



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

**ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA
HIDRODINÁMICA DEL CASCO EXTERNO DE UN
PLANEADOR SUBMARINO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA
ESPECIALIDAD DE DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS
MECÁNICOS**

PRESENTA

ING. CUAUHTEMOC BUSTOS CUEVAS

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO, FEBRERO DEL 2019

“A mi familia con todo mi cariño”.

Agradecimientos

A mis padres, quienes siempre me han apoyado en cada paso que eh dado en mi vida, y que siempre están impulsándome a ser mejor cada día.

A mi hermana, quien me mostró el camino con su ejemplo y su apoyo para poder salir adelante.

A mi pareja, quien desde que llego me ha alentado cada día a superarme en todo lo que hago.

A mis asesores, quienes compartieron conmigo su conocimiento y me ayudaron a poder terminar este ciclo académico.

Por último, quiero agradecer a CIDESI y a CONACYT que gracias a su apoyo pude tener la oportunidad de seguir preparándome académicamente.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un diseño conceptual y el análisis hidrodinámico del casco externo de un planeador submarino propuesto en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). La configuración del planeador CIDESI se propone como un diseño para un vehículo submarino de bajo costo para monitorear y recopilar datos en el lecho marino de México. El diseño se compone de un casco externo cilíndrico de forma elipsoidal, con dos alas unidas al casco en el plano horizontal que se utilizan para generar sustentación y un timón en el plano vertical simétrico controla el movimiento lateral del planeador. Además, cuenta con una antena en la parte posterior del elipsoide que le permite enviar y recibir información mediante señales satelitales.

Una de las etapas más relevantes durante el diseño de este tipo vehículos submarinos es el estudio de su comportamiento hidrodinámico, ya que la navegabilidad del planeador debe garantizarse durante todas las condiciones de operación. Para esto, se debe llevar a cabo un análisis de estabilidad estático y dinámico. Sin embargo, antes del análisis dinámico se requiere caracterizar el comportamiento hidrodinámico a través del cálculo de las fuerzas y momentos a los que estará sometido a las diferentes condiciones de flujo durante su misión.

El objetivo principal del presente estudio es calcular las fuerzas y momentos hidrodinámicos ejercidos sobre el planeador en diferentes condiciones de vuelo. El estudio del flujo alrededor del planeador se lleva a cabo a través de simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) implementadas en ANSYS Fluent.

De las simulaciones realizadas se obtuvieron los coeficientes de fuerzas y momentos hidrodinámicos en diferentes ángulos de ataque, deslizamiento y giro del planeador submarino, los cuales serán utilizados para alimentar un modelo dinámico del planeador submarino con el que se podrá conocer de una manera más acertada el comportamiento que se espera tenga el planeador durante sus misiones en el océano.

Abstract

Underwater gliders are autonomous vehicles that use their buoyancy and a mobile and rotating internal mass to perform a sawtooth-like motion in a horizontal plane, and a rotational motion on their own longitudinal axis. These kinds of gliders are mostly used to collect oceanographic data during their missions.

In this work a hydrodynamic analysis is performed for a glider designed in the Center for Engineering and Industrial Development (CIDESI). The CIDESI glider configuration is proposed as an in-house design for a low-cost submarine vehicle for monitoring and collect data in the seabed of Mexico. The design is composed of a cylindrical outer hull of ellipsoidal shape, in addition two wings joined to the hull in the symmetrical horizontal plane of the ellipsoid are used to generate the lift and a rudder in the vertical symmetrical plane [CITATION Hen891 \l 2058]controls the lateral motion of the glider. It also has an antenna on the back of the ellipsoid that allows it to send the information that the glider obtains during its missions by satellite signals.

One of the most important steps in the design of this underwater vehicles is the hydrodynamic performance study, since the seaworthiness of the glider must be ensure for all the operation conditions. Then, a static and dynamic stability analysis has to be carefully carried out. However, before to determine the dynamical features of the glider, all the hydrodynamic coefficients have to be determined. The main goal of the present study is to compute the hydrodynamic forces and moments exerted on the glider at different flow conditions. The study of the flow around the glider is carried out through computational fluid dynamics simulations implemented in ANSYS Fluent.

From the simulations carried out, the hydrodynamics forces and moments coefficients were obtained at different angles of attack, slip and turn of the submarine glider. Such information will be used to feed a dynamic model of the underwater glider in order to compute accurately the behavior of the glider during its missions in the ocean.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Estado del arte	3
1.2	Tipos de planeador submarinos	4
1.2.1	Planeador Slocum	4
1.2.2	Planeador Sprayglider	6
1.2.3	Planeador Seaglider	7
1.3	Diseño hidrodinámico de planeadores submarinos	8
1.4	Definición de la problemática	11
1.5	Justificación	12
1.6	Objetivos	13
1.6.1	Objetivo general	13
1.6.2	Objetivos específicos	13
1.7	Metodología de solución	14
1.8	Alcances y limitaciones	15
2	Marco teórico	16
2.1	Fuerza de arrastre	17
2.2	Fuerza de sustentación	18
2.3	Momentos.....	18
2.4	Número de Reynolds	20
2.5	Perfil alar	21
2.6	Ángulo de ataque	21
2.7	Capa límite.....	21
2.8	Funciones de pared	22
3	Modelo físico y formulación matemática	24
3.1	Modelo CAD del planeador submarino	24
3.2	Sistemas de referencia	27
3.3	Movimientos del planeador submarino	28
4	Modelo computacional	30
4.1	Ecuaciones RANS $k - \omega$ SST	30
4.1	Condiciones de frontera y dominios computacionales	32

4.1.1	Condiciones de frontera y dominio computacional para calcular los coeficientes para un movimiento de diente de sierra.	32
4.1.2	Condiciones de frontera y dominio computacional para calcular los coeficientes para un movimiento en espiral.....	33
4.2	Construcción de las mallas computacionales	35
4.2.1	Malla computacional para las simulaciones del dominio con velocidad de entrada lineal.....	35
4.2.2	Malla computacional del dominio con velocidad de entrada angular	37
4.3	Esquemas de discretización	39
4.3.1	Esquemas de discretización para el dominio con velocidad lineal	39
4.3.2	Esquemas de discretización para el dominio con velocidad angular	40
5	Resultados de los dominios.....	41
5.1	Resultados de dominio para velocidad lineal	41
5.2	Resultados del dominio angular	45
6	Resultados generales	48
7	Simulador de vuelo.....	52
8	Conclusiones	57
9	Referencias bibliográficas	59

Índice de figuras

Figura 1. Plano del prototipo Slocum (Paul Smoletti, 1992).....	5
Figura 2. Modelo comercial planeador Slocum G2 (Clayton Jones)	5
Figura 3. Propela del planeador Slocum G2 (Clayton Jones).....	6
Figura 4. Planeador spray. (J. Sherman 2001).	7
Figura 5. Planeador seaglider. (C.C. Eriksen 2001).....	8
Figura 6. Movimiento o patrón tipo diente de sierra.....	16
Figura 7. Flotabilidades del planeador submarino.....	17
Figura 8. Ángulo de ataque donde la flecha negra indica la dirección del flujo y α el ángulo de ataque.	21
Figura 9. Zonas de capa límite [13]	22
Figura 10. Zonas de capa límite [13]	23
Figura 11. Cuerpo elipsoidal del planeador submarino.....	25
Figura 12. Perfil NACA0012 (UIUC Airfol Coordinates Database) [19].....	26
Figura 13. a) Medidas del ala lateral del planeador, b) Medidas del timón del planeador. (Medidas en m)	26
Figura 14. Diseño y medidas del planeador submarino completo.	27
Figura 15. Marcos coordenados y movimientos del planeador submarino.	28
Figura 16. Condiciones de frontera de dominio de velocidad lineal.....	33
Figura 17. Condiciones de frontera del dominio angular	34
Figura 18 . Malla computacional del dominio de velocidad lineal	36
Figura 19. Áreas de refinamiento de malla en el planeador	36
Figura 20. Malla computacional para el dominio angular.....	38
Figura 21. Mapa de isocontornos de la magnitud de la velocidad en el plano medio para ángulos de ataque a 0° (a) y a 15° (b).	43
Figura 22 . Identificación de las regiones vorticosas alrededor del planeador a través de la isosuperficie de helicidad a 0° (a) y a 15° (b)	44
Figura 23. Mapa de isocontornos de la magnitud de la velocidad en el plano xy, $z=0$ para un ángulo de guiñada de 15° (β)......	44
Figura 24 .Mapa de isocontornos de velocidad en el plano medio computacional a un ángulo de 0° de guiñada	47
Figura 25. Identificación de zonas vorticosas mediante isosuperficies de helicidad alrededor del planeador en dominio angular.....	47
Figura 26. a) Fuerza de arrastre como función del ángulo de cabeceo, b) Fuerza de sustentación como función del ángulo de cabeceo, c) Momento en eje j como función del ángulo de cabeceo (En rojo se muestran resultados numéricos. La línea punteada corresponde al ajuste realizado).	48
Figura 27. a) Fuerza lateral como función del ángulo de guiñada, b) Momento en eje k como función del ángulo de guiñada.....	49
Figura 28. a) momentos de giro como función del ángulo de guiñada, b) momento de cabeceo como función del ángulo de cabeceo, c) momento de guiñada como función del ángulo de guiñada.	50
Figura 29. Desplazamiento del planeador submarino como función del tiempo.	53
Figura 30. Desplazamiento angular del planeador submarino como función del tiempo.	54
Figura 31. Fuerzas generadas sobre del planeador submarino como función del tiempo	54
Figura 32. Momentos generados alrededor del planeador submarino.....	55

Figura 33. Trayectoria tipo diente de sierra que se espera tenga el planeador 56

Índice de tablas

Tabla 1 Diseños de planeadores submarinos	25
Tabla 2. Condiciones de frontera del dominio computacional para velocidad lineal	33
Tabla 3. Condiciones de frontera para el dominio angular.....	35
Tabla 4. Ángulos de cabeceo y guiñada usados para las simulaciones	37
Tabla 5. Ángulos y simulaciones realizadas en el dominio angular	39
Tabla 6. Parámetros de convergencia	40
Tabla 7. Definición de velocidades angulares en función de radio de curvatura del dominio	40
Tabla 8. Resultados de las simulaciones de fuerzas de arrastre, sustentación y momentos	41
Tabla 9. Resultados obtenidos de fuerza lateral y momento	42
Tabla 10. Momentos hidrodinámicos obtenidos del dominio con velocidad angular para guiñada (datos en N-m).....	45
Tabla 11. Momentos hidrodinámicos obtenidos del dominio con velocidad angular para cabeceo (datos en N-m).....	45
Tabla 12. Momentos de dominio angular para giro (datos en N-m).....	46
Tabla 13. Datos hidrodinámicos fijos	51
Tabla 14. Masas añadidas.....	52

Nomenclatura

m = metros

s =segundos

N =Newtons

cc = centímetros cúbicos

Kg = kilogramos

cm = centímetros

α =ángulo de cabeceo (ataque)

β = ángulo de guiñada

Ω = ángulo de giro

v = velocidad del planeador

S = Superficie en contacto con el fluido

F_D = fuerza de arrastre

C_D = Coeficiente de arrastre

K_{D0} = coeficiente de arrastre en ángulo 0

K_D =coeficiente de arrastre inducido

F_L = fuerza de sustentación

C_L = Coeficiente de sustentación

K_{L0} = coeficiente de sustentación en ángulo 0

K_L = coeficiente de sustentación inducido

F_S = fuerza lateral

C_M = Coeficiente de momento

K_β = coeficiente de fuerza lateral inducido

τ_1 = momento con ángulo de giro

τ_2 = momento con ángulo de cabeceo

τ_3 = momento con ángulo de guiñada

K_{MR} = coeficiente de momento de giro

K_{M0} = coeficiente de momento de cabeceo con ángulo 0

K_M = coeficiente de momento de cabeceo inducido

K_{MY} = coeficiente de momento de guiñada

P = velocidad angular con ángulo de giro

K_P = coeficiente de momento de giro con velocidad angular

q = velocidad angular con ángulo de cabeceo

K_q = coeficiente de momento de cabeceo con velocidad angular

r = velocidad angular con ángulo de guiñada

K_r = coeficiente de momento de guiñada con velocidad angular

R_c = Radio de curvatura del anillo

V_c = Velocidad de entrada al centro del anillo

R_e = número de Reynolds

L = longitud del planeador

ρ = densidad del agua de mar

μ = viscosidad dinámica

1 Introducción

Los planeadores son una clase de vehículos submarinos que no requieren un sistema de propulsión externo para impulsarse dentro del lecho marino, estos vehículos fueron diseñados por primera vez para la recolección de datos marinos en el año de 1989 por Henry Stommel [1], el interés de conocer más acerca del océano fue lo que lo inspiró a desarrollar este tipo de planeadores. Con el paso del tiempo, se diseñaron diferentes modelos de planeadores submarinos para diversos tipos de aplicaciones, tales como oceanografía física, química y biológica, exploración, monitoreo e inspección de océanos y aplicaciones militares [2]. Este tipo de planeadores submarinos pueden operar de una manera autónoma individual o en grupo dependiendo de las misiones para las que sean requeridos.

Los planeadores submarinos han tomado gran importancia en la oceanografía gracias al bajo costo, gran rango de alcance y duración que pueden tener en sus misiones en comparación con todos los demás métodos que existen para la recolección de datos marinos o inspección de océanos, tales como el uso de barcos y boyas marinas que toman muestras de un solo lugar [1]. Son elegidos constantemente por empresas particulares y gubernamentales para realizar monitoreo del océano porque ofrecen un bajo costo/riesgo durante su operación, además de que son efectivos y cumplen con los requerimientos de obtención de datos oceanográficos.

Estos vehículos siguen un movimiento tipo diente de sierra que puede generar gracias a 2 sistemas internos, que son el sistema de flotabilidad y el sistema de cabeceo y giro que ayudan a que el planeador pueda variar su flotabilidad de positiva a negativa. La variación de flotabilidad hace que el planeador pueda sumergirse hasta la profundidad indicada en el sistema de control, y a su vez pueda emerger hasta la superficie para poder enviar los datos recolectados a través de su antena hacia un satélite, que a su vez mandará esos datos al centro de control para que puedan ser analizados. Este movimiento se sigue como un patrón durante toda la trayectoria que se le haya asignado al planeador, que puede variar ya sea en tiempo, área de monitoreo o datos oceanográficos a recolectar [3].

Los datos oceanográficos que el planeador puede obtener son variados, dado que se pueden adaptar sensores dependiendo las necesidades que se tengan, algunos datos que se pueden recolectar son temperatura, salinidad, velocidad y dirección de corrientes marinas, además de otros datos más específicos a través de sensores de mediciones químicas y ópticas, sensores de oxígeno, sensores de radiación, sensores de detección de luz, etc.

Uno de los intereses dentro del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) es el desarrollo de un planeador submarino prototipo. Específicamente dentro del área de energía, existe un equipo de trabajo dedicado al desarrollo de este planeador. Este equipo de trabajo está distribuido para el diseño de todos los sistemas internos de la siguiente manera:

- El equipo de trabajo de sistemas de control, que es el encargado de diseñar los sistemas para controlar la trayectoria del planeador, es decir, desarrollar los sistemas de flotabilidad, cabeceo y giro.
- Los encargados del sistema de distribución de pesos dentro del planeador submarino, quienes tienen a su cargo elegir de una manera adecuada la masa móvil interna del planeador submarino (batería), la cual es la encargada de modificar de manera dinámica el centro de gravedad del planeador y por lo tanto la flotabilidad de este.
- El equipo de desarrollo del simulador dinámico, el cual ha desarrollado el modelo matemático de la dinámica de vuelo del planeador.
- El equipo de trabajo encargado del casco de presión, donde los encargados de este diseño tienen que desarrollar un casco interno que proteja a todos los sistemas electrónicos del planeador y a su vez que resista la presión hidrostática a la cual estará sometido dentro del océano.
- Por último, tenemos el casco externo del planeador submarino que es la parte del planeador que se encuentra en contacto directo con el agua del océano. El dimensionamiento adecuado y la geometría de las superficies hidrodinámicas del planeador permitirán que éste siga la trayectoria de diente de sierra designada para su misión. El diseño del casco externo implica el calcular de manera precisa las fuerzas y momentos hidrodinámicos sobre el planeador a las diferentes condiciones de flujo a

los que estará sometido. En general se deben calcular los coeficientes de las fuerzas de sustentación, arrastre, lateral y los coeficientes de los momentos de cabeceo, guiñada y giro a través de cálculos teóricos, simulaciones computacionales u observaciones experimentales. En esta tesis, se presenta el desarrollo e implementación de simulaciones computacionales de dinámica de fluidos para calcular los coeficientes hidrodinámicos mencionados y alimentar el modelo dinámico del planeador con el fin de conocer su comportamiento durante la misión para la cual está siendo desarrollado.

1.1 Estado del arte

En la actualidad los planeadores submarinos han dominado la investigación oceanográfica desde la introducción del planeador Slocum han surgido otros diseños tales como el Seaglider [3], el Sprayglider [4] y el Slocum (mejorado) [5] y que han realizado misiones de largo alcance. Un ejemplo relevante en este sentido es el planeador Seaglider que ha realizado misiones que van desde las 700 hasta las 1000 millas de longitud recorrida en el océano Atlántico con una velocidad aproximada de 0.25 m/s [3].

La forma en la que estos planeadores submarinos son puestos en marcha es bastante simple, son desplegados desde un barco en la zona que se desea inspeccionar, después, a través del sistema de flotación variable que consta de una vejiga y una masa móvil, toma la posición para iniciar el movimiento tipo diente de sierra, que por lo regular consiste colocar, mediante el sistema de control, al planeador a 30° con respecto a la superficie del océano. Una vez posicionado el planeador y liberado hacia el océano, comienza a desplazarse en un patrón tipo diente de sierra para cumplir con la misión que se le haya asignado. Cada determinado intervalo de tiempo el planeador sale a la superficie para enviar los datos obtenidos a un satélite que a su vez manda los datos a un centro de mando. Cabe mencionar que se puede cambiar la misión del planeador remotamente cuando éste sale a enviar los datos, después sigue con la misión asignada o con la nueva misión durante algunas semanas

o meses repitiendo el mismo patrón hasta que éste sale a la superficie y por medio un GPS integrado es recogido para su mantenimiento y cambio de batería.

1.2 Tipos de planeador submarinos

En la actualidad existen 3 tipos de planeadores submarinos comerciales conocidos, el planeador Slocum, el Sprayglider y el Seaglider. Los tres tienen funciones parecidas, pero están diseñados para diferentes partes del océano, además de estos (en cuanto a planeadores submarinos no comerciales se refiere), existen una gran variedad de modelos académicos y de investigación con los cuales se han hecho diferentes pruebas de hidrodinámica y aplicaciones varias para poder conocer el alcance de los diferentes diseños [3, 4, 5].

En esta sección se presenta la información más relevante de los 3 planeadores comerciales, desde su diseño hasta las aplicaciones que tienen para la recolección de datos oceanográficos y otras para las cuales son usados.

1.2.1 Planeador Slocum

La idea de realizar planeadores submarinos surgió en el año 1989 por Henry Stommel y Doug Weeb [1], este último quien ya tenía experiencia en la ingeniería oceánica y había comenzado con una nueva compañía llamada Webb Research Corporation, y Webb era un reconocido oceanógrafo físico, lo cual ayudó en gran medida a su intención de desarrollar el concepto de planeador submarino Slocum. Este planeador toma su nombre de Joshua Slocum quien fuera el primer hombre en navegar los mares en un pequeño bote.

En 1991 fue diseñado y probado un prototipo de planeador Slocum (Fig. 1) en aguas poco profundas para la recolección de algunos datos oceanográficos. En este prototipo, los cambios de flotabilidad se realizaban mediante una liberación de peso con el fin de ejecutar los movimientos de ascenso y descenso (cabeceo). El prototipo fue probado en sitio y durante todo este proceso el planeador se movió a una velocidad promedio de 0.13 m/s.

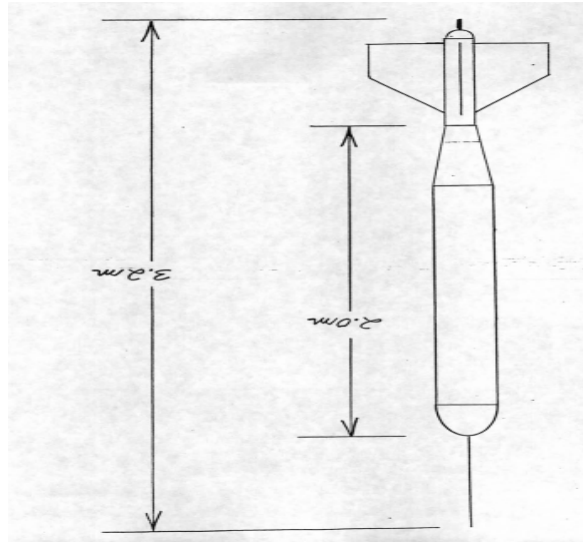


Figura 1. Plano del prototipo Slocum (Paul Smoletti, 1992)

Como se puede observar en la Fig. 1, los prototipos del planeador Slocum se han caracterizado por ser modelos geoméricamente sencillos y de bajo costo, su diseño está basado en un cilindro extruido con aletas laterales y un timón. En los primeros prototipos las alas laterales se colocaban en la parte trasera del cuerpo cilíndrico mientras que en los nuevos modelos las alas laterales se han colocado a la mitad del cuerpo (ver Fig. 2) para mejorar su comportamiento hidrodinámico.

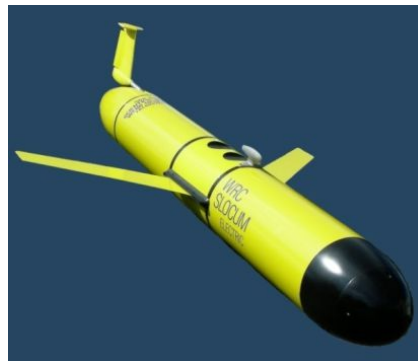


Figura 2. Modelo comercial planeador Slocum G2 (Clayton Jones)

Este tipo de planeadores está construido de manera tal que toma las ventajas de diversos diseños previos, lo que hace que sea más liviano y eficiente en comparación con algunos otros tipos de planeadores, alcanzan una profundidad de hasta 300 m ya que son

construidos para la exploración de litorales y no para aguas profundas. Tomando en cuenta el planeador Slocum G2 de la Fig. 2, se pueden adaptar algunos aditamentos como lo es una propela en la parte posterior del planeador (Fig. 3), con la opción de solo usarla cuando se tenga un arrastre mayor al que normalmente está sometido debido al efecto de corrientes marinas locales y con esto poder contrarrestarlo, pero con el problema de que la vida útil de la batería bajará considerablemente y el tiempo de la misión se verá reducido en gran medida.



Figura 3. Propela del planeador Slocum G2 (Clayton Jones)

Este tipo de planeadores puede manejar ángulos de ataque altos de hasta $\pm 40^\circ$, y con ello lograr la mayor profundidad posible en sus misiones, el sistema de flotación de estos planeadores es mediante una bomba de lastre tipo jeringa con capacidad de 500 cc de volumen ubicada detrás de la nariz del planeador.

1.2.2 Planeador Sprayglider

El tamaño de este planeador es un poco más pequeño respecto al del planeador Slocum que es de aproximadamente de 3 metros de largo (Fig. 4), el Sprayglider mide alrededor de 2 metros de largo y 50 centímetros de ancho contando las alas, con un peso de 50 kg [4].

El Sprayglider fue diseñado para poder maximizar el tiempo de las misiones de investigación (de hasta aproximadamente un año de duración) y para recorrer varios miles de kilómetros sin parar a una velocidad promedio de entre 0.2 m/s y 0.3 m/s), dependiendo la

zona en donde se encuentre trabajando y la posición que tenga en su movimiento tipo diente de sierra.



Figura 4. Planeador spray. (J. Sherman 2001).

Además de ser un planeador que puede alcanzar profundidades mayores que a las que llega el planeador Slocum, tiene otras ventajas, tales como, el ser más pequeño y más fácil de manejar durante su transportación, tiene un bajo costo debido a su diseño sencillo y el uso de sensores y actuadores de bajo costo, lo que hacen que su fabricación y ensamble sean considerablemente más baratos.

Una desventaja del Sprayglider, es que, al tener un diseño relativamente sencillo y hecho exclusivamente para sensores de bajo costo, su velocidad y el rango de operación de los sensores se ven afectados por la gran fuerza de sustentación a la que está sometido [4].

1.2.3 Planeador Seaglider

Los planeadores Seaglider son instrumentos pequeños, autónomos y económicos que ayudan a monitorear el océano en grandes distancias, que van desde los 1000 m en plano vertical y hasta 6000 m en plano horizontal durante varios meses. Este tipo de planeador es el más usado en la actualidad debido a su bajo costo y su gran rango de largo alcance, además de ser reutilizables y no contaminantes [3].

El diseño de este planeador es sencillo, pero con gran rango de operación gracias a su diseño ojival (Fig. 5), y a los sensores con mayor alcance y menor consumo de energía con los que cuenta. El diseño de este planeador consta de dos cascos, el casco exterior que es un cuerpo de revolución con alas laterales y un timón en el plano vertical en la parte trasera y el

casco interior conocido como casco de presión que es el encargado de proteger a los sistemas que ayudan al movimiento del planeador como lo son el sistema de control y de flotación.



Figura 5. Planeador seaglider. (C.C. Eriksen 2001)

El diseño ojival del casco ayuda en gran medida a incrementar la vida útil de su batería, reduce en gran medida la fuerza de arrastre que pueda generarse por la velocidad del planeador (la cual es de aproximadamente de 0.25 m/s) o bien por las corrientes marinas que puedan existir en las partes bajas del océano.

El movimiento que realiza al igual que los demás es en tipo diente de sierra generado de igual manera por una masa móvil interna que está conformada por una batería y un riel, y con un sistema de flotación de apoyo para el movimiento del planeador que es controlado por una variación de volumen desplazado por el planeador submarino.

1.3 Diseño hidrodinámico de planeadores submarinos

Debido a la naturaleza del sistema de propulsión que utilizan los planeadores submarinos, resulta crucial conocer su comportamiento hidrodinámico de una manera precisa con el fin de diseñar las estrategias de control adecuadas para que el planeador pueda llevar a cabo su misión. Los primeros diseños reportados fueron desarrollados mediante estudios de hidrodinámica mediante modelos teóricos y pruebas experimentales en tanques de agua. En la actualidad, gracias al desarrollo de las herramientas de dinámica de fluidos computacional, es posible conocer de una manera precisa las fuerzas y momentos hidrodinámicos, así como el flujo alrededor del planeador submarino. Lo anterior permite diseñar el casco mediante estudios computacionales en etapas tempranas y realizar pruebas experimentales en etapas de diseño avanzadas, reduciendo los altos costos que conlleva el desarrollo de pruebas

experimentales. En este sentido, diversos autores han realizado diseños de planeadores utilizando como herramienta principal las simulaciones CFD. Por ejemplo, M. Arima et al. [7], desarrollaron un planeador submarino con alta maniobrabilidad. Para esto implementaron simulaciones CFD con el fin de calcular las fuerzas hidrodinámicas que se generaban sobre el planeador, como la sustentación y el arrastre en diversas condiciones para los ángulos de incidencia de ambas alas y el ángulo de ataque. Los autores compararon, además, las características de un “planeador submarino con alas principales controlables independientemente” con un planeador convencional. Se dieron cuenta que con un planeador submarino con alas controlables se podían cambiar las fuerzas alrededor del planeador, logrando así poder obtener fuerzas que ayudaran a la estabilidad de planeador submarino.

Wu Jiang-guo et al. [8] propusieron un planeador híbrido que combinaba las ventajas de un vehículo submarino controlado de una manera remota y un planeador submarino autónomo. Implementaron simulaciones numéricas usando dinámica de fluidos computacional para investigar el impacto de las alas sobre la eficiencia del deslizamiento y la estabilidad del diseño híbrido. Los autores reportaron de una manera detallada el efecto de la longitud de la cuerda de las alas sobre la eficiencia global del planeador durante su movimiento completo tipo diente de sierra. Además, estudiaron el efecto sobre estabilidad debido a la variación del ángulo de incidencia de las alas.

Zhang et al. [9], caracterizaron el movimiento en espiral de un planeador submarino con el uso de modelos, análisis y experimentos. En un principio, plantearon un modelo analítico para calcular el comportamiento dinámico del planeador. Para alimentar dicho modelo de la dinámica del planeador, realizaron los cálculos requeridos para obtener las fuerzas y momentos hidrodinámicos a diferentes condiciones de flujo mediante simulaciones CFD. Finalmente, con los resultados del modelo dinámico implementaron estrategias de control para ajustar el movimiento del planeador en presencia de corrientes marinas. A partir de los resultados de las simulaciones y conociendo una predicción del movimiento en espiral, realizaron pruebas de campo del planeador en el mar de China meridional en el año de 2011. Los resultados de las pruebas de campo validaron los cálculos obtenidos con las simulaciones CFD.

Singh Y. et al. [8] realizaron el diseño y desarrollo de un planeador a escala de laboratorio con dimensiones de 0.83 m de largo y 0.085 m de diámetro en el cuerpo cilíndrico. Con este planeador llevaron a cabo varias pruebas de operación en el mar para obtener parámetros experimentales que fueron comparados con los resultados de los coeficientes obtenidos mediante las ecuaciones propuestas por Leonard y Graver [10]. Los resultados obtenidos de las ecuaciones fueron similares a los datos experimentales obtenidos de las pruebas de campo.

En este trabajo, se propone el diseño del casco externo de un planeador submarino prototipo realizado en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), siguiendo la tendencia encontrada en la literatura especializada revisada se implementan las simulaciones CFD necesarias para determinar los coeficientes de fuerzas y momentos hidrodinámicos que se generan sobre el planeador submarino, con el objetivo de alimentar un simulador dinámico de movimiento del planeador y predecir su trayectoria en el mar, esta información ayudará al equipo encargado del diseño de los sistemas de control para desarrollar las estrategias de control requeridas con el fin de ajustar la trayectoria del planeador durante su misión debido a todo tipo de desviaciones que pueda tener el planeador las cuales pueden ser ocasionadas por corrientes marinas, choques con objetos dentro del mar, etc.

1.4 Definición de la problemática

Un planeador submarino está sometido a diferentes fuerzas y momentos hidrodinámicos que dependen en gran medida de su geometría externa y de las condiciones del flujo durante su operación. Estas fuerzas y momentos hidrodinámicos pueden afectar la trayectoria asignada al planeador provocando desvío de las rutas establecidas en cada misión o bien afectando su vida útil, por lo cual el análisis del flujo generado por el movimiento del planeador es decisivo para diseñar las estrategias de control necesarias y asegurar su estabilidad hidrodinámica durante toda la misión.

Para esta parte del diseño se requieren estudios experimentales y/o simulaciones numéricas del flujo alrededor del planeador submarino a diferentes condiciones de operación, por lo que en este trabajo se plantea un estudio computacional del comportamiento hidrodinámico del planeador submarino de CIDESI, mediante la implementación de simulaciones de dinámica de fluidos computacional.

1.5 Justificación

Dentro del diseño del casco se requiere hacer un estudio del desempeño hidrodinámico en sus diferentes condiciones de operación, dado que es un diseño nuevo de planeador submarino se necesitan conocer las fuerzas, momentos y sus respectivos coeficientes hidrodinámicos a los cuales estará sometido en sus diferentes movimientos. Cabe señalar que la información obtenida de este estudio alimentará el modelo de dinámica de vuelo que se está desarrollando para el diseño de los sistemas de control del planeador submarino.

1.6 Objetivos

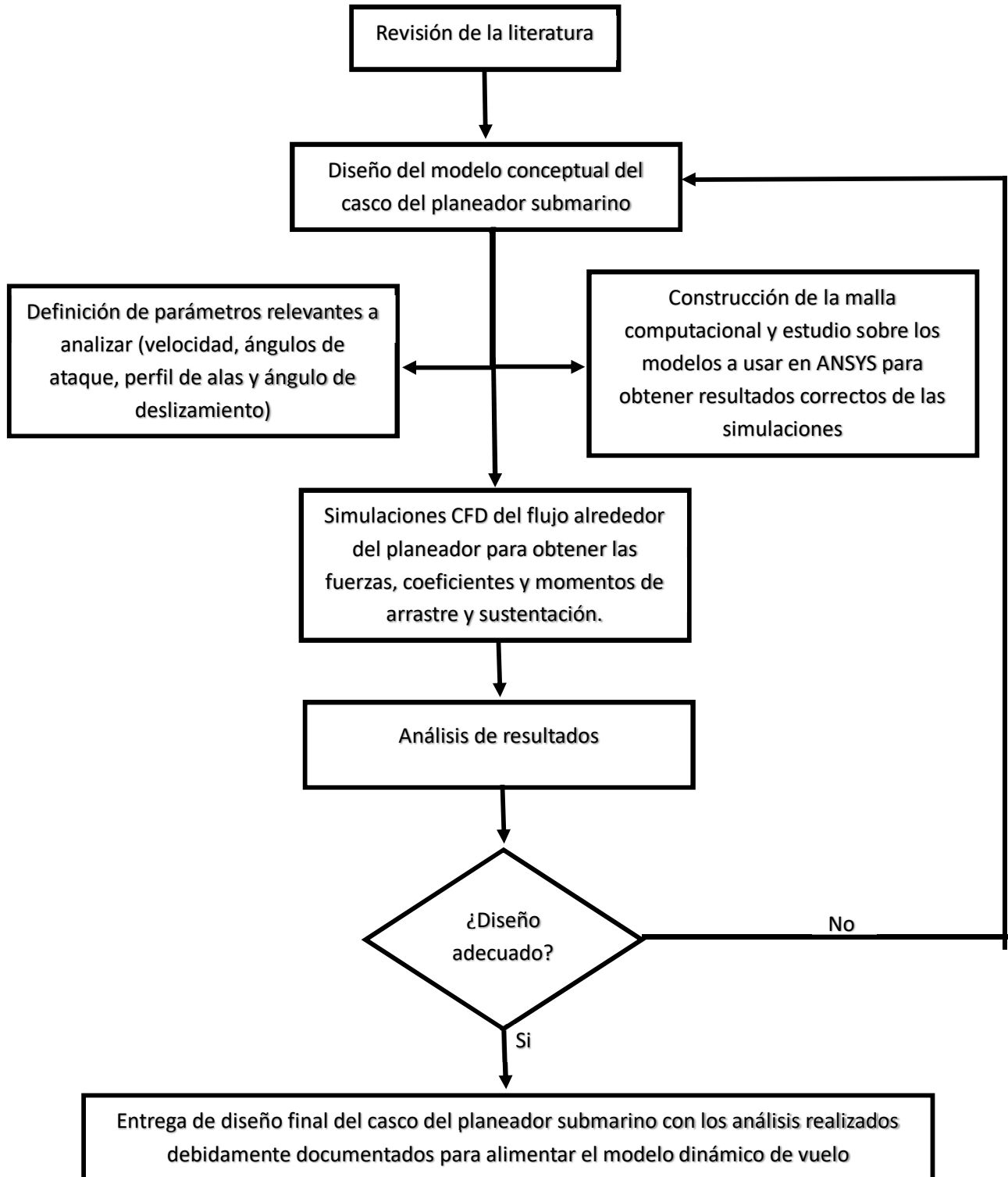
1.6.1 Objetivo general

Determinar las fuerzas y momentos hidrodinámicos sobre el casco externo del planeador submarino prototipo propuesto, en diferentes condiciones de operación variando parámetros tales como ángulo de deslizamiento, ángulo de ataque y radio de curvatura de la trayectoria, para conocer su comportamiento durante su movimiento lineal y de rotación.

1.6.2 Objetivos específicos

- Diseñar un modelo conceptual del casco del planeador (modelo CAD) para realizar un análisis hidrodinámico.
- Definir los parámetros relevantes en el casco para su análisis.
- Obtener mediante simulaciones CFD las fuerzas y coeficientes de arrastre, sustentación y momentos alrededor de sus tres ejes principales en sus diferentes condiciones de operación.
- Analizar los resultados de simulaciones para caracterizar de manera detallada el comportamiento hidrodinámico del planeador.
- En su caso realizar modificaciones al modelo del casco con base en los resultados obtenidos.

1.7 Metodología de solución



1.8 Alcances y limitaciones

El alcance de este proyecto es la caracterización hidrodinámica del diseño del planeador submarino CIDESI mediante simulaciones numéricas hechas con dinámica de fluidos computacional y validada con el simulador de vuelo que se desarrolló en conjunto con el equipo de trabajo en el área de energía.

Algunas de las limitaciones importantes dentro del proyecto son:

1. El retraso de entrega de parámetros necesarios por parte del equipo de trabajo para diseñar el modelo del planeador, y el que no se proporcionen parámetros como masas y pesos del planeador para poder hacer un análisis numérico más preciso del planeador submarino.
2. El poco número de licencias que existen en el centro de ANSYS FLUENT podrían retrasar la obtención de los parámetros necesarios para alimentar el simulador de vuelo.

2 Marco teórico

El planeador submarino sigue un movimiento o patrón tipo diente de sierra (Fig. 6) durante todo el trayecto de las misiones que le sean asignadas. Este tipo de movimiento se puede generar en un plano bidimensional (movimiento tipo diente de sierra) o tridimensional (movimiento en espiral) dependiendo de la zona de la que se quieren obtener datos oceanográficos.

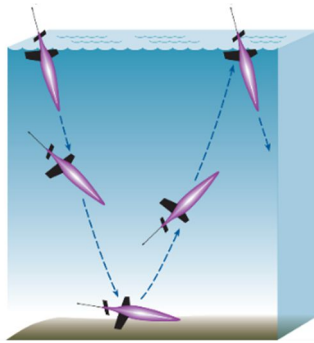


Figura 6. Movimiento o patrón tipo diente de sierra

Este movimiento tipo diente de sierra se genera gracias a los sistemas internos de pistón y masa móvil. El sistema de pistón y la masa móvil funcionan como un sistema de lastre con el cual se cambia la flotabilidad del planeador. Se compone de un pistón y una vejiga en la parte posterior del cuerpo del planeador submarino, así como una masa móvil en el centro del planeador que consta de una batería con la cual se alimenta todo el sistema electrónico. Esta masa móvil puede desplazarse 15 cm hacia delante o atrás del planeador cambiando su centro de gravedad y también puede girar sobre su propio eje para darle movimiento a las alas.

Cuando el pistón se expande hasta la mitad de su carrera, llena a la mitad la vejiga de aceite, y al mismo tiempo la masa móvil del planeador se queda en el centro de su carrera sin movimiento, haciendo que el planeador tenga una flotabilidad neutra, debido a que la masa del fluido desplazado es la misma que la de la masa móvil. Cuando el pistón se contrae extrae todo el aceite de la vejiga y al mismo tiempo la masa móvil se mueve hacia delante del planeador, haciendo que el planeador tenga una flotabilidad negativa y pueda sumergirse

dentro del mar. Cuando el planeador llega a la profundidad asignada, el pistón comienza a salir hasta llenar por completo de aceite la vejiga y al mismo tiempo la masa móvil se desplaza hacia atrás del cuerpo del planeador, haciendo que tenga una flotabilidad positiva, lo cual ayuda a que el planeador pueda emerger a la superficie, el movimiento se puede observar en la Fig. 7.

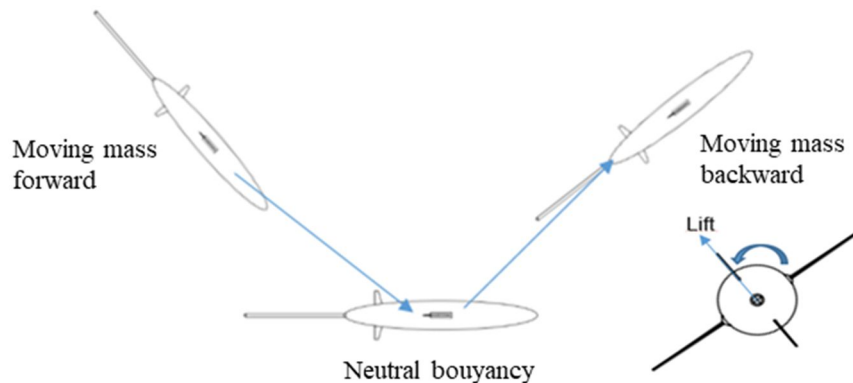


Figura 7. Flotabilidades del planeador submarino.

Estos movimientos generan a su vez fuerzas alrededor la superficie y de las alas del planeador como lo son, fuerza de arrastre, de sustentación y fuerza lateral, lo que a su vez también genera momentos en los 3 ejes principales del planeador, estas fuerzas y momentos se describen a continuación:

2.1 Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre D (“Drag” en inglés) ó F_D es la fricción entre un cuerpo sólido y el fluido (un líquido o gas) por el que se mueve, con dirección paralela a la velocidad del flujo incidente. La fuerza de arrastre está dada por:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D \quad (1)$$

2.2 Fuerza de sustentación

La fuerza de sustentación L (“Lift” en inglés) ó F_L es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la velocidad del flujo incidente. La fuerza de sustentación está dada por:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L \quad (2)$$

2.3 Momentos

El momento de cabeceo es producido por las fuerzas hidrodinámicas sobre el cuerpo de estudio en el eje de la envergadura de las alas, considerando un punto de aplicación y está dado por:

$$M = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_M L \quad (3)$$

Las ecuaciones antes mencionadas son las ecuaciones generales para el arrastre, sustentación y momento respectivamente, pero también pueden definirse de la siguiente manera [11]:

Fuerza de arrastre:

$$F_D = (K_{D0} + K_D \alpha^2) v^2 \quad (4)$$

Donde:

F_D = Fuerza de arrastre.

K_{D0} = Coeficiente de arrastre en ángulo de cabeceo igual a 0° .

K_D = Coeficiente de arrastre inducido en función de ángulo de cabeceo.

α = ángulo de cabeceo del planeador.

v = Velocidad del planeador.

Fuerza de sustentación:

$$F_L = (K_{L0} + K_L \alpha^2) v^2 \quad (5)$$

Donde:

F_L = Fuerza de sustentación.

K_{L0} = Coeficiente de sustentación en ángulo de cabeceo igual a 0°.

K_L = Coeficiente de sustentación inducido en función de ángulo cabeceo.

Fuerza lateral

$$F_S = K_\beta \beta v^2 \quad (6)$$

Donde:

F_S = Fuerza lateral.

K_β = Coeficiente de fuerza lateral inducido en función de ángulo de guiñada.

β = ángulo de guiñada del planeador.

Momentos hidrodinámicos alrededor del planeador:

$$\tau_1 = K_{MR} \beta v^2 \quad (\text{Giro}) \quad (7)$$

Donde:

τ_1 = Momento en eje x.

K_{MR} = Coeficiente de momento en x en función del ángulo de guiñada.

$$\tau_2 = (K_{M0} + K_M \alpha) v^2 \quad (\text{Cabeceo}) \quad (8)$$

Donde:

τ_2 = Momento en eje y.

K_{M0} = Coeficiente de momento en ángulo 0.

K_M = Coeficiente de momento en eje y en función del ángulo de cabeceo.

$$\tau_3 = K_{MY}\beta v^2 \quad (\text{Guiñada}) \quad (9)$$

Donde:

τ_3 = Momento en eje z.

K_{MY} = Coeficiente de momento en eje z en función del ángulo de guiñada.

Las ecuaciones de momento antes presentadas únicamente se pueden usar cuando el planeador sigue una trayectoria bidimensional tipo diente de sierra, si se quieren conocer estos momentos para un planeador con movimiento en espiral, se necesitan incorporar a las ecuaciones el efecto de la velocidad angular que el planeador experimenta durante este tipo de movimiento, para lo cual las ecuaciones de momento quedan de la siguiente manera:

$$\tau_1 = (K_{MR}\beta + K_P P)v^2 \quad (10)$$

$$\tau_2 = (K_{M0} + K_M\alpha + K_q q)v^2 \quad (11)$$

$$\tau_3 = (K_{MY}\beta + K_r r)v^2 \quad (12)$$

2.4 Número de Reynolds

Es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el régimen de flujo de un fluido. Su valor indica si el flujo se describe con un modelo laminar o turbulento. El número de Reynolds se puede definir como la relación entre las fuerzas inerciales (o convectivas, dependiendo el autor) y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Éste relaciona la densidad (ρ), la viscosidad dinámica del fluido (μ), la velocidad (v) y longitud característica (L) [12]:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (13)$$

2.5 Perfil alar

Se denomina perfil alar, a la forma del área transversal de un elemento, que al desplazarse a través del aire o agua es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que generan sustentación. Es una de las consideraciones más importantes en el diseño de superficies sustentadoras como alas, o de otros cuerpos similares como los álabes de una turbina y/o compresor. Según el propósito que se requiera en el diseño del ala, los perfiles pueden ser más finos o gruesos, curvos o poligonales, simétricos o no, e incluso el perfil puede ir variando a lo largo del ala si es que así se requiere [12].

2.6 Ángulo de ataque

Se denomina ángulo de ataque al ángulo que forma la cuerda geométrica de un perfil alar con la dirección del flujo incidente como se muestra en la Fig. 8. Es un parámetro que influye decisivamente en la capacidad de generar sustentación de un ala o en la capacidad de generar tracción en las palas de una hélice. Normalmente, al aumentar el ángulo de ataque se incrementa la sustentación hasta un cierto punto en el que ésta disminuye bruscamente [12].

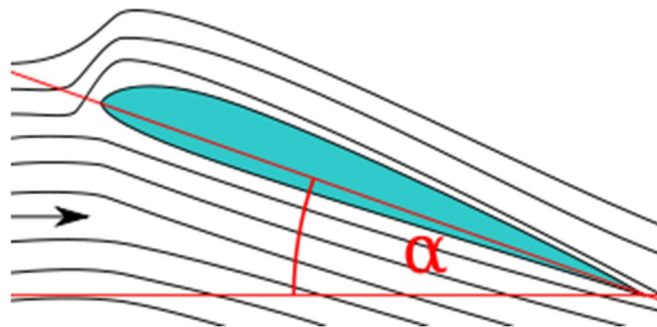


Figura 8. Ángulo de ataque donde la flecha negra indica la dirección del flujo y α el ángulo de ataque.

2.7 Capa límite

En mecánica de fluidos, la capa límite de un flujo es la zona donde el movimiento de éste es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. La capa límite se entiende como aquella en la que la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento

varía desde cero hasta el 99 % de la velocidad de la corriente no perturbada [13]. Se observa en la Fig. 9 las diferentes zonas que tiene la capa límite, las cuales son laminar, zona de transición y turbulenta. En la subcapa laminar las partículas del flujo presentan un gradiente de velocidad pequeño haciendo que se desplacen en forma de capas o láminas, teniendo trayectorias definidas; la subcapa de zona de transición está entre la laminar y turbulenta siendo el fin de una y comienzo de la otra; y en la subcapa turbulenta las partículas del flujo presentan un alto gradiente de velocidad provocando que éstas no tengan una trayectoria definida. En la Fig. 9 también se observa la subcapa viscosa que es la que está en contacto con el sólido, la capa buffer que es la intermedia de la viscosa y la región logarítmica y la región logarítmica es aquella zona en la que se hacen aproximaciones de la capa límite por medio de modelos RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

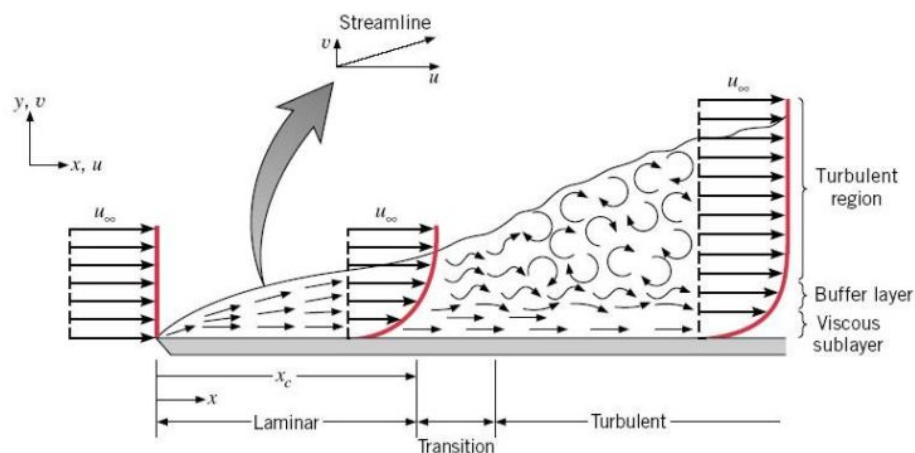


Figura 9. Zonas de capa límite [13]

2.8 Funciones de pared

Las funciones de pared son modelos matemáticos que nos permiten ajustar, por medio de aproximaciones, el comportamiento de la velocidad en la capa límite. En la Fig. 10 se observa la gráfica U^+ velocidad adimensional paralela a la pared contra y^+ distancia adimensional de la pared hacia la capa límite. En esta figura la capa límite se representa en rojo y las funciones de pared, función de la capa límite y función logarítmica en azul [13].

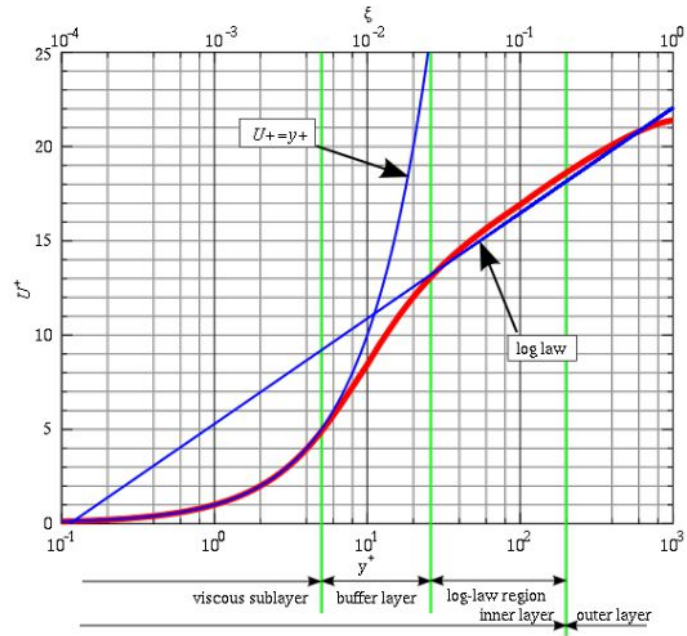


Figura 10. Zonas de capa límite [13]

3 Modelo físico y formulación matemática

Para la conceptualización del diseño del planeador, se realizó un estudio considerando las características principales de los planeadores desarrollados de tipo comercial y académico. Es importante señalar, que el estudio abarcó todos los sistemas del planeador por lo que la definición del diseño conceptual del planeador fue una decisión conjunta entre los diferentes grupos de trabajo del proyecto. A partir de este diseño conceptual, el trabajo realizado en esta tesis cubrió el dimensionamiento de las superficies hidrodinámicas, selección de perfiles para alas y timón, así como la obtención de las características hidrodinámicas del planeador.

3.1 Modelo CAD del planeador submarino

A partir del estudio realizado de los diversos planeadores, se determinó que todos aquellos diseñados para profundidades entre 300 y 1000 m contaban con un cuerpo de revolución en forma ojival (Fig. 11), el cual les ayuda a reducir en cierta medida el arrastre generado sobre el cuerpo del planeador. Dentro de los requerimientos de la misión definida para este primer prototipo de planeador de CIDESI, se tiene una profundidad máxima de 300 m, por lo que se decidió que el cuerpo del planeador tenga una forma elipsoidal; si bien, la reducción del arrastre no será tan eficiente como en el caso de un cuerpo en forma de ojiva, esta forma elipsoidal hará que su manufactura sea más simple y ayudará a minimizar las restricciones de espacio para la distribución de los sistemas internos a lo largo del cuerpo (sistema de flotabilidad, el sistema de cabeceo y giro y el sistema de control del planeador).

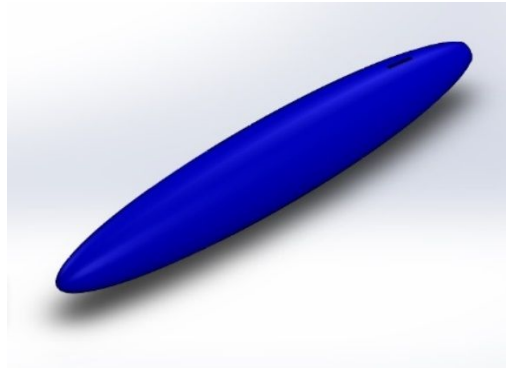


Figura 11. Cuerpo elipsoidal del planeador submarino

Tener un cuerpo del planeador que ayude con la fuerza de arrastre siempre es de vital importancia porque eso ayudará a que el planeador pueda tener una vida útil de la batería un poco más duradera.

Tomando en cuenta todo esto, nos dimos cuenta de que las alas y el timón del planeador eran muy importantes para una buena estabilidad del planeador. Por tal motivo, después de una exhaustiva revisión de la literatura acerca de diseños de planeadores submarinos, se encontró que todos usaban perfiles de alas simétricos (Tabla 1) para mantener una mejor estabilidad del planeador.

Tabla 1 Diseños de planeadores submarinos

Planeador	Forma	Perfil de alas
Seaglider	Ojival	NACA 0012
Slocum	Cilíndrico	NACA 0016
Sprayglider	Elipsoidal	NACA 0017

Después de revisar toda la literatura, se decidió utilizar un perfil de alas NACA 0012 (Fig. 12), el cual es un perfil simétrico lo que hará que las fuerzas de sustentación y arrastre sean de igual magnitud ya sea con ángulo de cabeceo positivo o negativo.

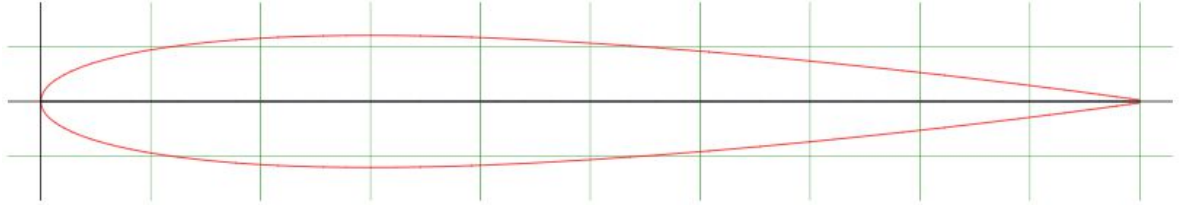


Figura 12. Perfil NACA0012 (UIUC Airfol Coordinates Database) [19]

Otro motivo por el cual se eligió este perfil de ala es que está demostrado que en la punta del perfil se produce un arrastre muy pequeño, por lo cual nos ayudará a tener el menor arrastre posible en todo el cuerpo del planeador [14]. Además de que alrededor de todo el perfil del ala se produce un movimiento de fluido tipo laminar hasta en un 70% de la cuerda del perfil (para ángulos de ataque pequeños), lo cual ayuda a que el flujo no se separe de manera abrupta del perfil del ala provocando algunos movimientos inesperados durante las misiones.

Las alas del planeador tienen una medida de 0.34 m de largo por .10 m de cuerda en la parte final del ala y 0.20 m de cuerda en la parte inicial del ala como se muestra en la Fig. 13a. Asimismo, para el timón se utilizó el mismo perfil de ala pero con medidas de 0.14 m de largo por 0.05 m de cuerda en la parte final del timón y de 0.10 m en la parte inicial del timón como se muestra en la Fig. 13b.

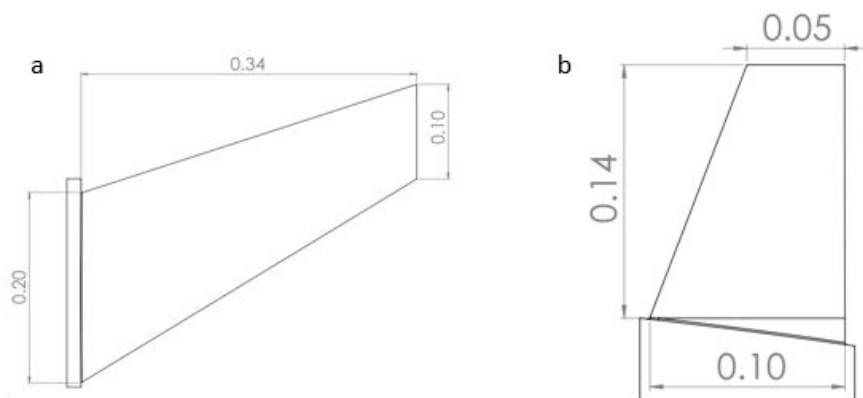


Figura 13. a) Medidas del ala lateral del planeador, b) Medidas del timón del planeador. (Medidas en m)

Dado que el planeador es simétrico, se tomó la decisión de colocar las alas laterales en la mitad del cuerpo de revolución elipsoidal en el plano horizontal del planeador, y el timón se colocó en la parte trasera a la mitad del cuerpo elipsoidal en el plano vertical del planeador.

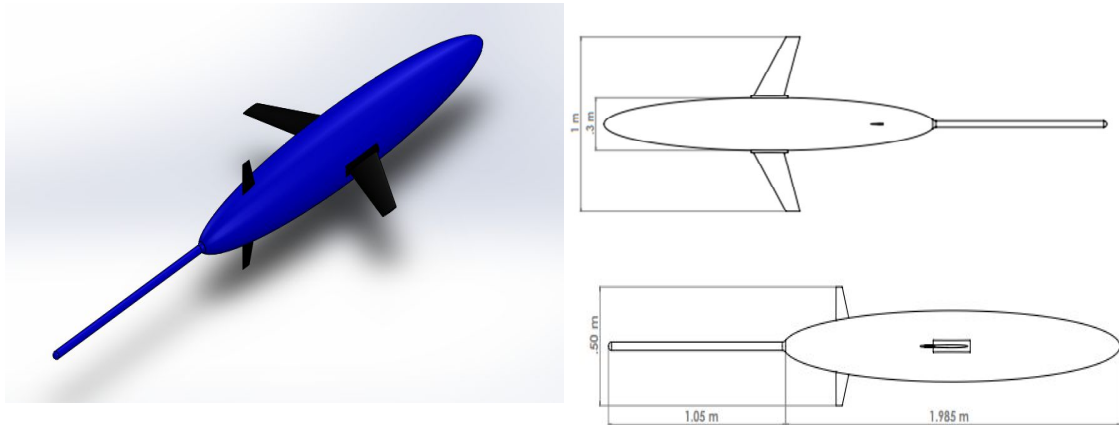


Figura 14. Diseño y medidas del planeador submarino completo.

Las medidas del planeador completas son de 0.30 m de diámetro del cuerpo elipsoidal en la parte central, este diámetro está basado principalmente en los requerimientos de tamaño de los sistemas internos que el planeador albergará. La envergadura total del planeador es de 1 metro y el largo total del planeador de nariz hasta la cola es de 3 metros, por último, la longitud del timón es de 0.50 metros (Fig. 14).

3.2 Sistemas de referencia

Para caracterizar la dinámica del planeador submarino se utilizaron dos sistemas de referencia, los cuales son el marco de referencia del cuerpo y el marco de referencia para el flujo. El marco del cuerpo se encuentra colocado en el centro de gravedad del planeador submarino y está representado por i, j y k , donde i representa el eje longitudinal a través del planeador, el eje j representa el eje transversal a través de las alas laterales del planeador submarino y por último el eje k representa el eje vertical alineado con el timón del planeador como se muestra en la Fig. 15.

Por otro lado, tenemos el marco del flujo, dentro de este marco se trabajarán todas las simulaciones numéricas que se realizarán en este trabajo. El marco del flujo está dado por los 3 ejes principales de un sistema cartesiano (x, y, z) , estos están distribuidos de la misma manera que en el marco del cuerpo, pero el origen de este sistema de referencia está localizado en un punto aparte del cuerpo planeador. Este marco es el que nos indicará la dirección en la cual se moverá el fluido dentro de las simulaciones (Fig. 15).

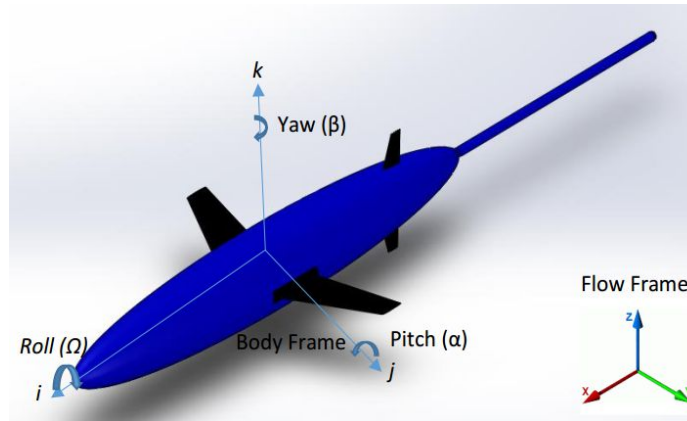


Figura 15. Marcos coordenados y movimientos del planeador submarino.

3.3 Movimientos del planeador submarino

El planeador submarino está diseñado para realizar un movimiento de diente de sierra, este tipo de movimiento bidimensional es posible a través del sistema de propulsión interna conformado por un pistón y una masa móvil que varía la flotabilidad del planeador en combinación con las alas, que crea una fuerza de elevación que permite al planeador convertir la flotabilidad en un movimiento horizontal. La masa del móvil consiste en una batería que se desliza a lo largo de un riel dentro del parapente, luego el centro de gravedad del vehículo se altera a medida que la batería se desliza. El movimiento hacia delante y hacia atrás de la masa del móvil cambia la posición relativa entre el centro de flotabilidad y la gravedad creando un momento de lanzamiento sobre el vehículo. A partir de la serie de avances y retrocesos de la masa móvil, es posible lograr el recorrido del patrón de dientes de sierra como se mostró en la Fig. 7. Además, se permite un movimiento de rotación de la batería alrededor de su propio eje para controlar el rodillo de movimiento y también para producir un movimiento lateral a través del timón en la parte posterior del parapente.

El planeador submarino debe de realizar 3 movimientos durante sus misiones para poder ajustar su posición y conseguir el movimiento tipo diente sierra, estos movimientos se encuentran descritos en la Fig. 15, y están representados por α , β y Ω , donde α representa el movimiento de cabeceo que realiza el planeador, este movimiento se genera cuando la masa móvil interna del planeador se desplaza hacia delante o hacia atrás y al mismo tiempo la vejiga del planeador se llena o se vacía dependiendo si se quiere que el movimiento de cabeceo sea positivo o negativo y se realiza alrededor del eje j del marco del cuerpo del planeador. Como segundo movimiento del planeador, está el movimiento de giro del planeador, este movimiento se genera cuando la masa móvil interna del planeador realiza un giro sobre su propio eje, el cual está denotado por i en el marco del cuerpo del planeador. Finalmente, tenemos el movimiento de guiñada del planeador, este movimiento se genera ya sea por asignación de la misión, o debido al efecto de las corrientes marinas dentro el océano, este movimiento se produce alrededor del eje k del marco del cuerpo del planeador.

4 Modelo computacional

En este capítulo se describen a detalle los modelos computacionales utilizados para implementar las simulaciones CFD del flujo alrededor del planeador. El modelo de integración numérica para las ecuaciones de dinámica de fluidos, el modelo de turbulencia seleccionado para las simulaciones y la construcción de las mallas computacionales son explicados a detalle.

4.1 Ecuaciones RANS $k - \omega$ SST

El diseño del planeador submarino completo fue presentado en los capítulos anteriores, utilizando este diseño se implementaron las simulaciones numéricas en el software ANSYS FLUENT. Las simulaciones se hicieron en estado estacionario utilizando un modelo de turbulencia RANS para resolver el flujo a los altos ángulos de ataque en los que trabaja el planeador. Las ecuaciones RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes, por sus siglas en inglés). Esta aproximación propuesta por Reynolds en 1895 está basada en la descomposición de las variables de flujo en un valor medio y otro fluctuante. Las ecuaciones de Navier-Stokes se formulan en función de las variables promedio, obteniendo así un nuevo sistema de ecuaciones, denominadas RANS, muy parecido al original, pero con un término adicional que debe ser modelado (conocido como el tensor de Reynolds). Algunas características son:

- a) Esta herramienta es usada principalmente para aplicaciones de desarrollo tecnológico.
- b) Las ecuaciones son resueltas con el comportamiento de flujo promediado en el tiempo y con las magnitudes de las fluctuaciones turbulentas.

Existen una gran cantidad de modelos de turbulencia RANS, los cuales tienen ventajas y desventajas dependiendo del tipo de flujo que se desea resolver. Para el estudio hidrodinámico del planeador se eligió el modelo $k - \omega$ (SST), este modelo combina efectivamente la formulación robusta y precisa del modelo $k - \omega$ en las regiones cercanas a la pared, la cual es nuestra área de interés, y en el área lejana de la pared utiliza el modelo

$k - \varepsilon$, el cual es bastante eficiente y de bajo costo computacional para calcular flujos turbulentos libres, donde no existe la presencia de capas límites.

Las ecuaciones RANS del modelo $k - \omega$ (SST) incluyen masa, momento para calcular los campos promediados de presión y velocidad en todo el dominio computacional y ecuaciones de transporte para la tasa de disipación específica (ω) y energía cinética turbulenta (k), para un flujo incomprensible y constante, las ecuaciones de conservación se escriben como:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (14)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - R_{ij} \right] \quad (15)$$

$$\frac{\partial \rho U_i k}{\partial x_i} = \widetilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \rho U_i \omega}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} [\mu + \sigma_k \mu_t] \frac{\partial \omega}{\partial x_i} + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (17)$$

Donde ρ es densidad, U es velocidad, p es presión, μ es la viscosidad dinámica, R_{ij} es el tensor de esfuerzos de Reynolds que se aproxima mediante la hipótesis de viscosidad turbulenta [15], k es la energía cinética de turbulencia, ω es la tasa de disipación específica de la energía cinética turbulenta, \widetilde{P}_k es la producción de energía cinética turbulenta, μ_t es la viscosidad turbulenta y la función F_1 se define como:

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}, \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right] \right\} \quad (18)$$

Donde y es la distancia a la pared más cercana, F_1 es uno dentro de la capa límite y cambia a cero lejos de la capa, esta función de mezcla permite seleccionar correctamente los modelos $k - \omega$ y $k - \varepsilon$ sin interacción de uso. Finalmente, otra característica principal del modelo SST es un limitador de producción utilizado para prevenir la acumulación de turbulencias en las regiones de estancamiento:

$$\tilde{P}_k = \min (P_k, 10\beta^* \rho k \omega) \quad (19)$$

Todas las constantes complementarias requeridas para la implementación del modelo de turbulencia $k - \omega$ SST se calculan a partir de los modelos $k - \varepsilon$ y $k - \omega$ y sus valores exactos se pueden encontrar en la guía de teoría de fluidos de ANSYS [15].

4.1 Condiciones de frontera y dominios computacionales

Para poder obtener todos los coeficientes hidrodinámicos presentados en las ecuaciones 1-9, se tuvieron que realizar dos dominios computacionales. Uno que pudiera emular la velocidad lineal para el movimiento tipo diente de sierra del planeador en un plano bidimensional, y el segundo donde se pudiera emular el movimiento en espiral del planeador con velocidades angulares dependiendo el radio de curvatura del movimiento.

4.1.1 Condiciones de frontera y dominio computacional para calcular los coeficientes para un movimiento de diente de sierra.

En la Fig. 16, se muestra el dominio computacional utilizado para calcular los coeficientes hidrodinámicos requeridos para caracterizar el movimiento bidimensional tipo diente de sierra del planeador. El dominio está compuesto de un cilindro extruido en la parte de atrás con un diámetro de 6 metros por un largo 10 metros, y en la parte delantera una media esfera de 3 metros de radio, los cuales están unidos y hacen una sola pieza de dominio computacional. Alrededor del planeador se encuentra otro subdominio de 2 metros de diámetro y 3 metros de largo que envuelve por completo al planeador de tal manera que se puedan realizar refinamientos específicos de la malla en esta zona del dominio, esto para poder obtener de una manera más precisa el comportamiento del fluido alrededor del planeador y así poder captar los efectos de la capa límite para el cálculo de las fuerzas y momentos hidrodinámicos.

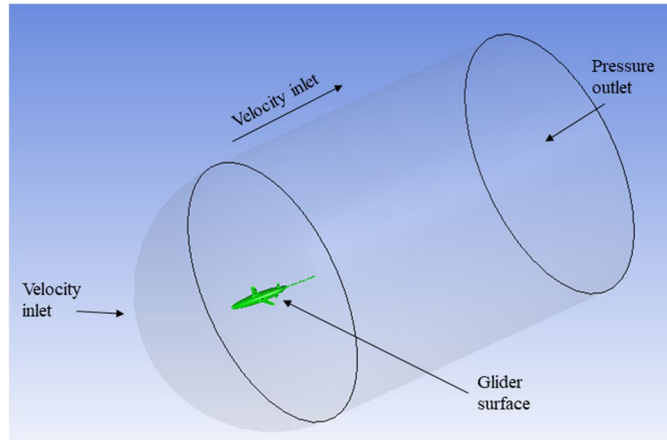


Figura 16. Condiciones de frontera de dominio de velocidad lineal

Las condiciones de frontera para resolver las ecuaciones de conservación en este dominio son las indicadas en la Fig. 16 y listadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de frontera del dominio computacional para velocidad lineal

Nombre	Condición	Parámetro
Entrada	Velocidad de entrada	$0.25 \frac{m}{s}$
Salida	Presión de salida	$0 Pa$
Planeador	Pared	$0 \frac{m}{s}$

4.1.2 Condiciones de frontera y dominio computacional para calcular los coeficientes para un movimiento en espiral.

Con el dominio computacional presentado en la sección anterior, sólo es posible obtener los coeficientes hidrodinámicos para un movimiento bidimensional de tipo diente de sierra. Para obtener los coeficientes de fuerzas y momentos del planeador durante un movimiento en espiral, es necesario emular dichas condiciones, por lo que se requirió implementar simulaciones CFD en un dominio de forma angular, donde la velocidad durante una maniobra de giro del planeador pueda ser representada en un sistema de referencia donde la velocidad de entrada es de forma angular. De esta manera se podrá variar la velocidad

angular dependiendo de radio de curvatura del dominio (R_c), el cual se toma desde el centro de flotabilidad del planeador y el origen de donde se construye el dominio angular.

En la Fig. 17 se muestran las condiciones de frontera del dominio angular, tenemos la velocidad de entrada la cual es una velocidad en el centro de flotabilidad del planeador (V_c) que es de $0.25 \frac{m}{s}$, por lo cual la velocidad angular que se genera dentro del dominio se denomina como ω y se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{V_c}{R_c} = \omega \quad (20)$$

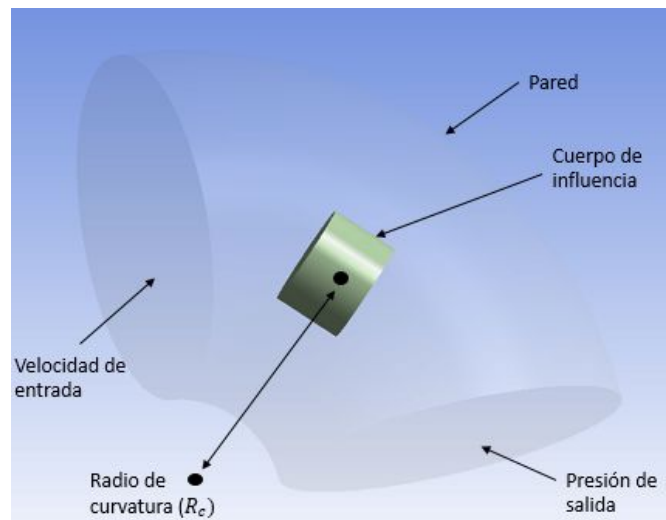


Figura 17. Condiciones de frontera del dominio angular

Para poder obtener los datos de los momentos de guiñada y giro se utilizaron dominios computacionales con cuatro diferentes radios de curvatura, 12, 15, 18 y 21 m. Se implementó además una función UDF (User Defined Function) en ANSYS para representar correctamente la velocidad de entrada de forma angular. En la Tabla 3 se enlistan las condiciones de frontera para el dominio utilizado.

Tabla 3. Condiciones de frontera para el dominio angular

Nombre	Condición	Parámetro
Entrada	Velocidad de entrada	$0.25 \frac{m}{s}$
Salida	Presión de salida	$0 Pa$
Planeador	Pared	$0 \frac{m}{s}$
Contorno del cilindro	Pared	$0 \frac{m}{s}$
Radio del dominio (R_c)	Radio	12, 15, 18 y 21 m
Cuerpo de influencia	Cuerpo de influencia	Congelado al dominio

4.2 Construcción de las mallas computacionales

4.2.1 Malla computacional para las simulaciones del dominio con velocidad de entrada lineal

A continuación, se presenta la metodología seguida para construir la malla computacional para las simulaciones del planeador en el dominio con velocidad lineal. Primeramente, se realizó una malla superficial sobre el casco del planeador, después se construyó la malla en el dominio computacional completo tomando en cuenta un cuerpo de influencia cercano al planeador donde la malla fue refinada de tal manera que coincidiera con el tamaño de la malla superficial sobre el casco (Fig. 18).

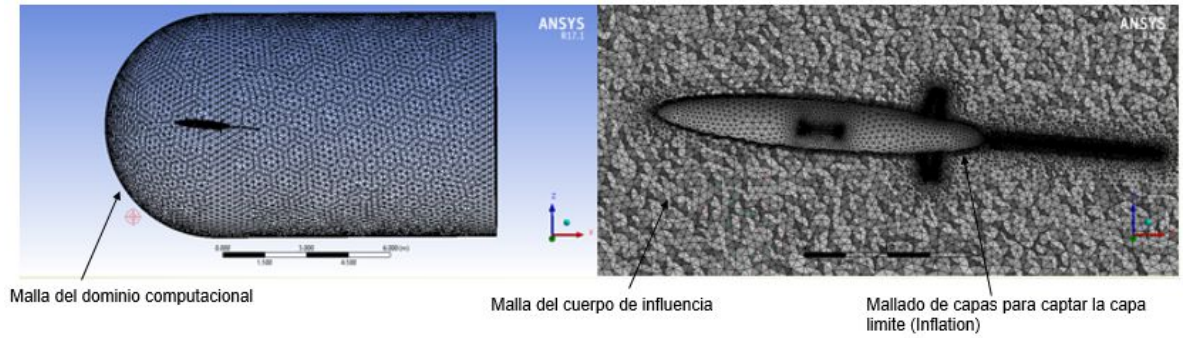


Figura 18. Malla computacional del dominio de velocidad lineal

Para garantizar que la solución con la malla construida capture los efectos principales ocurridos en la capa límite, se realiza una malla de capas alineadas alrededor de la superficie del planeador, la medida de las capas depende del parámetro y^+ deseado utilizando la teoría de la capa límite de placa plana, para nosotros el y^+ requerido fue de 80 y la medida de la primera capa resultó igual a 0.004 m.

Por último, se realizaron dos refinamientos, uno en la parte posterior de las alas y del timón del planeador de 0.001 m y el otro refinamiento se realizó en la cola del planeador con una medida de 0.003 m, debido a las complejidades de la geometría del planeador en dichas zonas fue que se tuvieron que realizar estos refinamientos (Fig. 19).

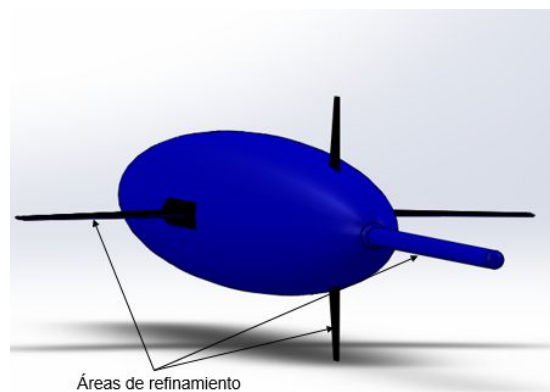


Figura 19. Áreas de refinamiento de malla en el planeador

Una vez habiendo definido la malla computacional, se hace un estudio de sensibilidad de malla para poder darnos cuenta de que sea consistente para la solución. Para esto utilizamos el $y+$ de 80 antes mencionado para poder modelar la capa límite.

El estudio de sensibilidad de malla se hizo comparando los resultados de las simulaciones refinando la malla en los puntos más críticos de la geometría del planeador, hasta obtener el tamaño de malla donde los resultados ya no variaran significativamente. Al final de este proceso se obtuvo una malla computacional de 3,228,865 millones de elementos.

Los parámetros para los que se hicieron las simulaciones en este dominio son listados en la Tabla 4, donde se muestran los ángulos de ataque de cabeceo y guiñada para los cuales se obtendrán las fuerzas de arrastre, sustentación, fuerza lateral y momentos sobre los ejes principales.

Tabla 4. Ángulos de cabeceo y guiñada usados para las simulaciones

Ángulo	Grados
Cabeceo	-15° a 15° pasos de 5°
Guiñada	-18° a 18° pasos de 3°

Como se puede observar en la Tabla 4, se realizaron 7 simulaciones para los movimientos de cabeceo y 13 para guiñada.

4.2.2 Malla computacional del dominio con velocidad de entrada angular

Para este caso, se siguió la misma metodología de mallado que para el dominio donde el planeador sigue una velocidad lineal. En la Fig. 20, se muestra la malla computacional obtenida para las simulaciones de este tipo.

Es importante mencionar que para las simulaciones con velocidad angular las dimensiones del dominio computacionales tuvieron que incrementarse considerablemente, esto debido a las condiciones del flujo dentro del dominio, por consecuencia el número de volúmenes de control de las mallas de este tipo fueron mayores que para el caso anterior y la potencia de cómputo requerida se incrementó significativamente. De la misma manera se

realizó un estudio de sensibilidad de malla para encontrar las dimensiones de la malla donde las soluciones son consistentes. Al finalizar el estudio las mallas realizadas para este estudio, tomando en cuenta los diferentes radios de curvatura tuvieron un tamaño aproximado de 6 millones de volúmenes de control.

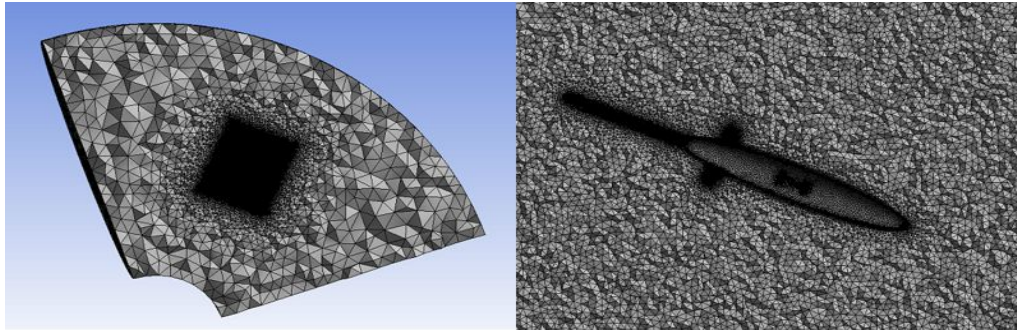


Figura 20. Malla computacional para el dominio angular

Es importante señalar que el número de volúmenes varió un poco de acuerdo a las simulaciones que se realizaron, ya que para obtener los datos faltantes de las ecuaciones número 7-9 que son K_p , K_q , K_r , momentos para giro, cabeceo y guiñada, respectivamente, se requirió hacer simulaciones con el dominio angular en forma horizontal variando la guiñada (β) desde -6° a 6° en pasos de 3° (5 simulaciones para cada radio de curvatura), para el cabeceo se usa el dominio en forma vertical y se varía el ángulo del planeador en cabeceo (α) desde -6° a 6° en pasos de 3° (5 simulaciones para cada radio de curvatura), y por último, para el giro se usa el dominio en forma vertical pero ahora variando la guiñada (β) desde -6° hasta 6° en pasos de 3° (5 simulaciones para cada radio de curvatura). Las simulaciones que se realizaron se pueden ver de manera resumida en la Tabla 5.

En total para poder obtener los datos de K_p , K_q , K_r , se necesitaron realizar un total de 60 simulaciones para después poder obtener los valores fijos de los coeficientes antes mencionados.

Tabla 5. Ángulos y simulaciones realizadas en el dominio angular

Ángulo	Posición del dominio	Grados
Cabeceo	Vertical	-6° a 6°
Guiñada	Horizontal	-6° a 6°
Guiñada (Giro)	Vertical	-6° a 6°

4.3 Esquemas de discretización

Una vez obtenidas las mallas con las cuales se va a trabajar en las simulaciones computacionales, es necesario elegir los métodos de solución a usar para resolver las ecuaciones de conservación de masa, momentum, energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de energía cinética turbulenta.

4.3.1 Esquemas de discretización para el dominio con velocidad lineal

Debido a que el flujo es considerado como incompresible, se eligió utilizar el método de solución basado en la presión (Pressure based). El solucionador basado en presión permite resolver el problema de flujo ya sea en una forma segregada o acoplada, en este estudio se determinó utilizar el solucionador acoplado. El uso del enfoque acoplado ofrece algunas ventajas sobre el enfoque segregado, el enfoque acoplado obtiene una implementación de fase única robusta y eficiente para flujos estacionarios, con un rendimiento superior en comparación con la solución segregada [15].

La discretización espacial (gradientes de las variables) se configuró como mínimos cuadrados (Least Squares Cell Based), junto con una discretización de la ecuación de corrección de presión de segundo orden. Y por último, los términos convectivos de las ecuaciones se discretizaron usando Upwind de segundo orden.

Para la discretización de los términos de momentum, energía cinética turbulenta y la razón de disipación específica se usó el esquema Upwind de segundo orden. Una vez

seleccionados los esquemas de discretización, se impusieron los criterios de convergencia para cada una de las ecuaciones, los cuales son mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de convergencia

Residual	Convergencia
Continuidad	1×10^{-4}
V_x	1×10^{-5}
V_y	1×10^{-5}
V_z	1×10^{-5}
k	1×10^{-5}
ω	1×10^{-5}

4.3.2 Esquemas de discretización para el dominio con velocidad angular

Para esta implementación, se utilizaron los métodos de solución, esquemas de discretización y criterios de convergencia descritos en el apartado anterior. Se procedió entonces, a implementar el código con el cual podríamos simular el flujo angular del fluido a la entrada del dominio; la implementación de la UDF programada en el lenguaje C para lograr dicho perfil de velocidades se presenta el apéndice A.

Se eligieron velocidades angulares diferentes para poder recrear el movimiento angular del planeador y con esto poder obtener los coeficientes hidrodinámicos requeridos, las velocidades angulares elegidas se enlistan en la Tabla 7.

Tabla 7. Definición de velocidades angulares en función de radio de curvatura del dominio

Velocidad (V_c)	Radio de curvatura (R_c)	Velocidad angular (ω)
$0.25 \frac{m}{s}$	12	0.0208333
	15	0.0166666
	18	0.0138888
	21	0.0119047

5 Resultados de los dominios

Las simulaciones implementadas en esta Tesis se hicieron para conocer las fuerzas de arrastre, sustentación, lateral y momentos que existen sobre los 3 ejes principales de un planeador submarino que se está realizando en el CIDESI, todo esto para alimentar un simulador dinámico de los movimientos que el planeador realizará cuando este en misiones de recolección de datos.

5.1 Resultados de dominio para velocidad lineal

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante las simulaciones en el dominio con velocidad lineal de $0.25 \frac{m}{s}$, tanto para las fuerzas de arrastre, sustentación, lateral y momentos sobre el eje j del marco del cuerpo del planeador submarino. A partir de las ecuaciones 4-9 se pueden calcular los coeficientes K_{D0} , K_D , K_β , K_{L0} , K_L , K_{MR} , K_{M0} , K_M , K_{MY} .

En la Tabla 8, se presentan los valores de fuerzas de arrastre, sustentación y momentos en eje j de acuerdo a todas las simulaciones en diferentes ángulos de ataque en cabeceo (α) en el intervalo de $[-15^\circ, 15^\circ]$.

Tabla 8. Resultados de las simulaciones de fuerzas de arrastre, sustentación y momentos

Grados (α°)	Fuerza de arrastre (N)	Fuerza de sustentación (N)	Momento en eje j (N.m)	Sustentación /arrastre
-15	2.0554523	-5.6225829	1.169283	-2.735448008
-10	1.2804591	-4.7502826	0.87024	-3.70982767
-5	0.64938402	-2.5940588	0.5396	-3.994645264
0	0.53237944	0.007089159	-0.021	0.01331599
5	0.64975443	2.5970153	-0.5396	3.99691819

10	1.2808039	4.7482442	-0.87024	3.707237462
15	2.0603389	5.6328954	-1.169283	2.733965466

En la Tabla número 9 se presentan los datos de fuerza lateral y momento con respecto al eje k obtenidos de las simulaciones para ángulo de guiñada en el intervalo de $[-18^\circ, 18^\circ]$. En las secciones siguientes se analizarán estos datos para calcular los coeficientes hidrodinámicos de fuerzas y momentos.

Tabla 9. Resultados obtenidos de fuerza lateral y momento

Grados (β°)	Momento eje k (N.m)	Fuerza lateral (N)
-18	1.4544251	-2.6426002
-15	1.1680466	-2.0916323
-12	0.94852253	-1.6525619
-9	0.75604673	-1.2405083
-6	0.61733975	-0.82256172
-3	0.55115793	-0.41143475
0	0.0435624	0.0435624
3	0.55013957	0.40700521
6	0.61578558	0.83624197
9	0.75260077	1.2283255
12	0.94858872	1.6769224
15	1.1741139	2.1077993
18	1.4416381	2.6070828

En la Fig. 21, se presentan los campos de presiones del flujo alrededor del planeador para los casos de 0° y 15° de ángulo de ataque. Es posible observar como cuando el planeador está a 0° de ángulo de ataque el campo de presiones es prácticamente simétrico cuya consecuencia es que la sustentación debida al movimiento en el fluido sea casi nula. En el

caso del planeador a 15° , se observa un campo de presiones asimétrico y zonas de desprendimiento de la capa límite en la antena del planeador.

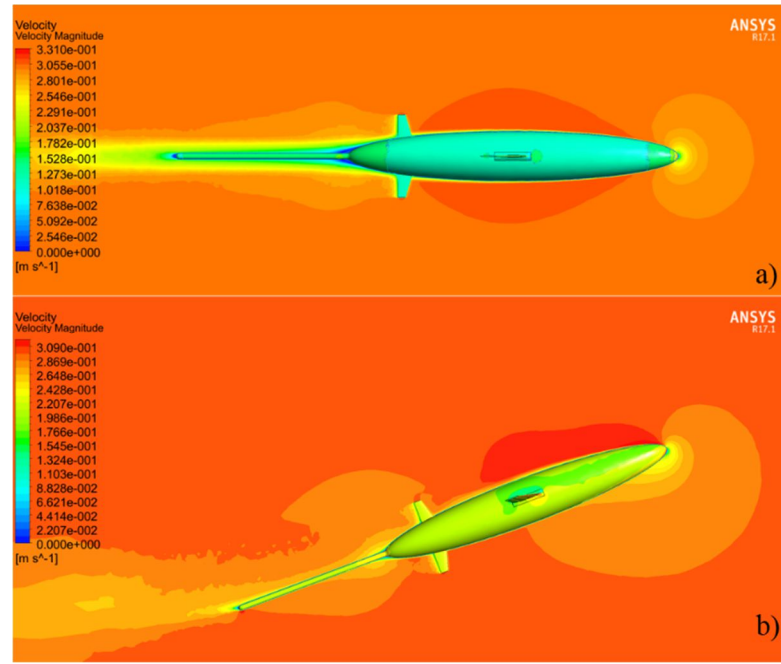


Figura 21. Mapa de isocontornos de la magnitud de la velocidad en el plano medio para ángulos de ataque a 0° (a) y a 15° (b).

Hemos hablado mucho sobre lo importante que es para nosotros conocer el comportamiento de la capa límite alrededor del planeador submarino, por eso una forma de poder observar el comportamiento de la capa límite es mediante la vorticidad que se genera en las alas y el timón.

En la Fig. 22, se muestran las regiones de vórtices alrededor del planeador a través de la helicidad del flujo para los casos de 0° y 15° de ángulo de ataque. Se observa que para el flujo a 0° , se tiene una condición de flujo adherido y la capa límite es laminar alrededor de todo el planeador. Por otro lado, en el caso de 15° de ángulo de ataque, se observan zonas de desprendimiento de la capa límite principalmente en las uniones entre el ala y el fuselaje y en la antena del planeador. También es posible observar los vórtices en las puntas de alas.

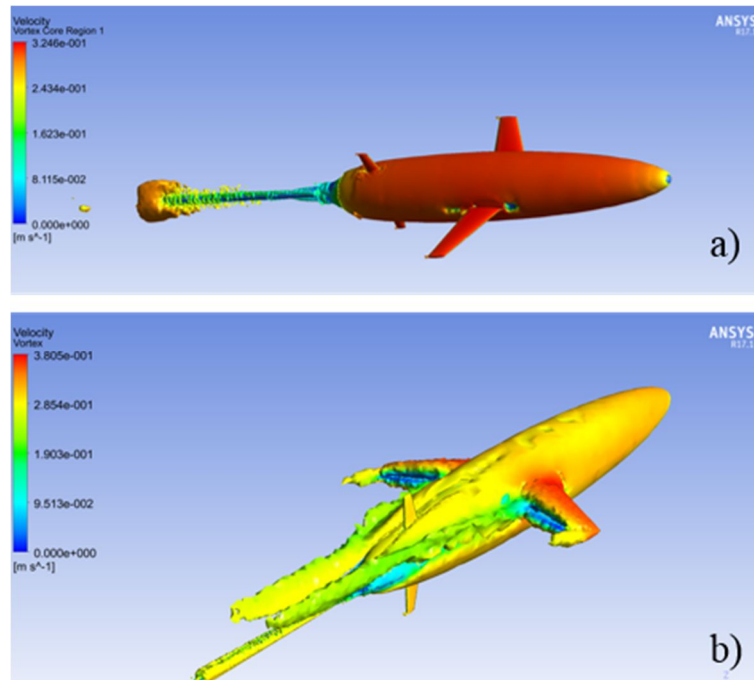


Figura 22. Identificación de las regiones vorticosas alrededor del planeador a través de la isosuperficie de helicidad a 0° (a) y a 15° (b)

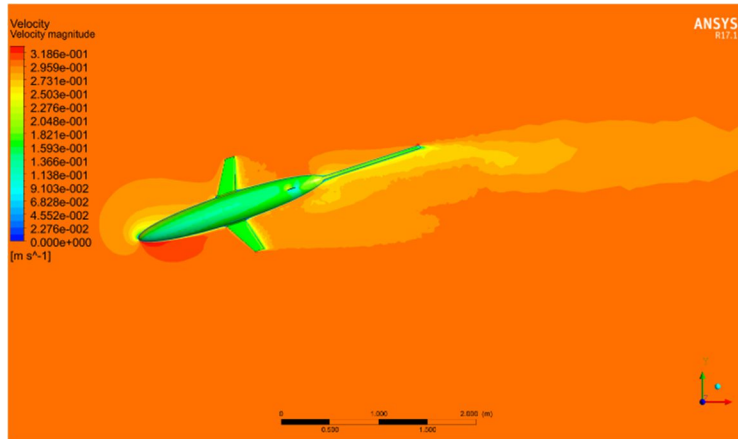


Figura 23. Mapa de isocontornos de la magnitud de la velocidad en el plano xy , $z=0$ para un ángulo de guiñada de 15° (β .)

El efecto en la variación del ángulo de guiñada sobre el flujo alrededor del planeador se puede observar en la Fig. 23, en donde se presenta el campo de presiones para un ángulo de guiñada de 15° . En este caso, se producirá una fuerza lateral sobre el planeador la cual deberá ser contrarrestada a través del sistema de control de este.

5.2 Resultados del dominio angular

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones con el dominio con velocidad angular, los cuales son requeridos para obtener los coeficientes restantes de las ecuaciones 10-12 que son: K_p, K_q, K_r , que ayudarán a predecir el comportamiento del planeador durante un movimiento en espiral. Dichos datos complementarán el compendio de coeficientes hidrodinámicos que alimentarán al modelo dinámico del planeador cuyo objetivo es predecir en vuelo su comportamiento. Primero se presentan los resultados de los momentos obtenidos de las simulaciones hechas para el movimiento del planeador en guiñada con respecto al ángulo de guiñada (β) y con el dominio de forma horizontal en la Tabla 10.

Tabla 10. Momentos hidrodinámicos obtenidos del dominio con velocidad angular para guiñada (datos en N-m)

$R [m]$	β				
	-6°	-3°	0°	3°	6°
12	-0.2754	-0.3295	-0.489524	-0.5686024	-0.65746
15	-0.0570766	-0.116252	-0.21683	-0.288886	-0.34404
18	-0.023242	-0.068655	-0.134869	-0.19004	-0.023242
21	-0.007343	-0.02333	-0.07346	-0.1094827	-0.144335

En la Tabla 11 se presentan los resultados de las simulaciones hechas para el movimiento de cabeceo del planeador respecto al ángulo de cabeceo (α) con el dominio computacional en forma vertical.

Tabla 11. Momentos hidrodinámicos obtenidos del dominio con velocidad angular para cabeceo (datos en N-m)

$R [m]$	α				
	-6°	-3°	0°	3°	6°
12	-0.666037	-0.9052	-1.27006854	-1.568849	-1.6783
15	-0.46172	-0.6799	-0.8975	-1.0493	-1.2302
18	-0.40928	-0.6554	-0.82392	-0.9121	-1.0033
21	-0.2321	-0.42323	-0.6994	-0.77141	-0.8911

Finalmente, en la Tabla 12 se presentan los resultados de las simulaciones hechas para el movimiento de giro del planeador variando el ángulo de guiñada (β) con el dominio computacional en posición vertical.

Tabla 12. Momentos de dominio angular para giro (datos en N-m)

$R [m]$	β				
	-6°	-3°	0°	3°	6°
12	-0.0411	-0.01815	-0.0134	-1.164	-0.00879
15	-0.00459	-0.006426	-0.01119	-0.118	-0.00924
18	-0.00271	-0.00286	-0.00229	0.0097	-0.00045
21	-0.00119	-0.0006	-0.00156	-0.00146	-0.00298

En la Fig. 24, se presenta el mapa de isocontornos de velocidad en el plano medio del dominio para un ángulo de guiñada de 0° en el dominio angular. Es posible observar como la velocidad se incrementa proporcionalmente al radio en el dominio.

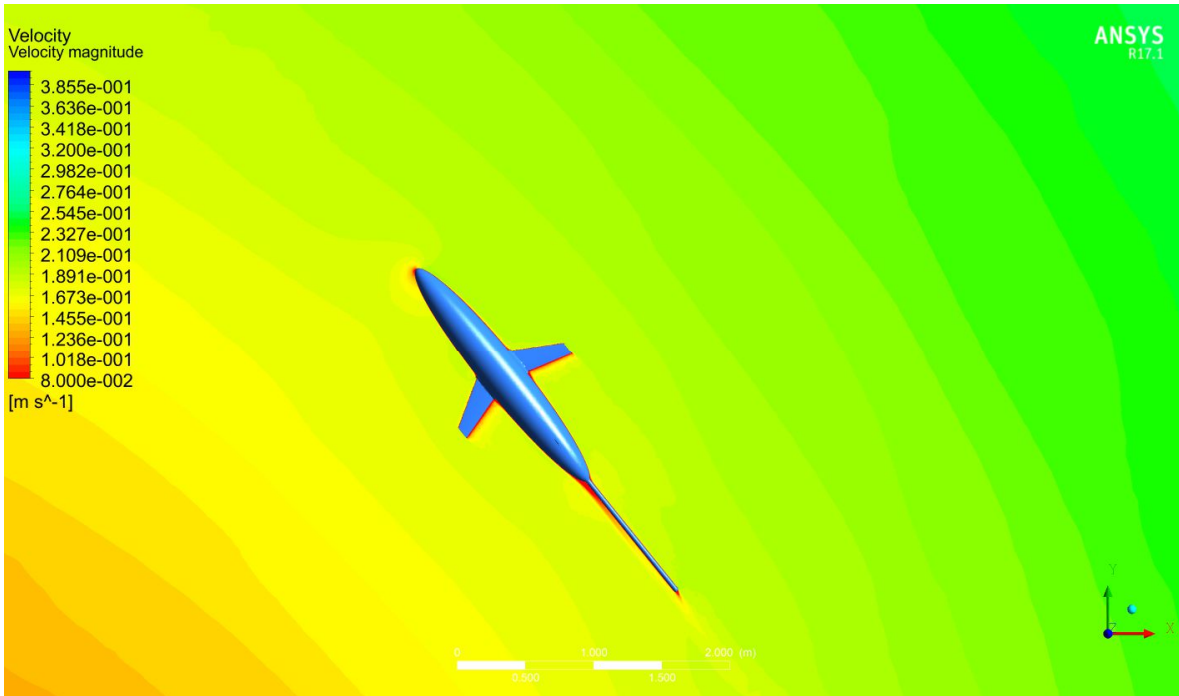


Figura 24. Mapa de isocontornos de velocidad en el plano medio computacional a un ángulo de 0° de guiñada

En la Fig. 25, se muestran las regiones de vórtices alrededor del planeador a través de la helicidad del flujo para los casos de 6° en vista de guiñada y de cabeceo, se observan zonas de desprendimiento de la capa limite en la parte trasera de la antena del planeador, por ser velocidad angular se desprende un poco la capa limite en esa zona, pero no afecta al movimiento del planeador.

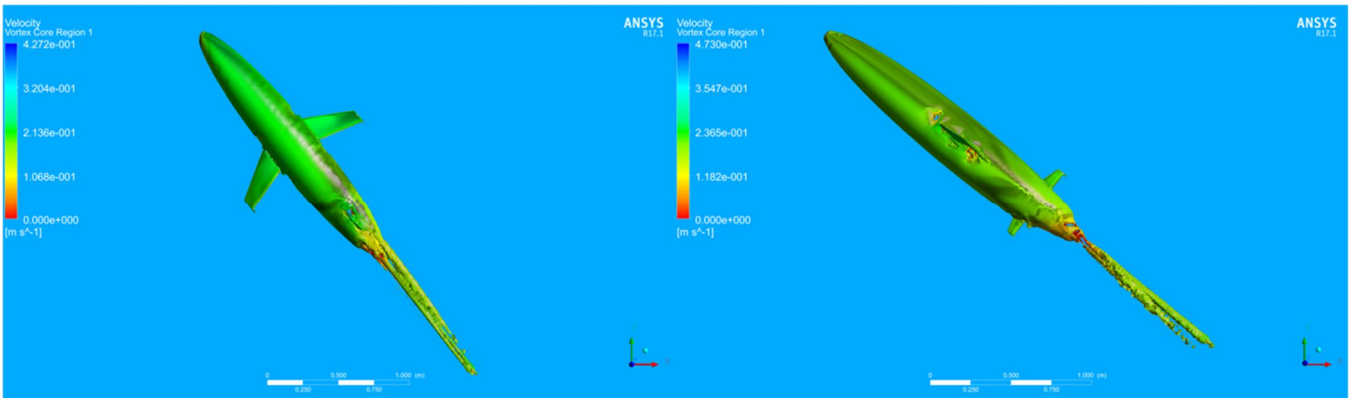


Figura 25. Identificación de zonas vorticosas mediante isosuperficies de helicidad alrededor del planeador en dominio angular.

6 Resultados generales

A partir de los datos obtenidos para las fuerzas de arrastre, sustentación, fuerza lateral y momentos en los ejes principales en las diferentes condiciones de flujo descritas, se obtuvieron las curvas del comportamiento hidrodinámico del planeador a través de las ecuaciones 4-12, se realizaron los ajustes necesarios a las curvas en el software MatbLab para obtener los coeficientes requeridos.

En las Figs. 26 a y 26 b, se presentan las curvas hidrodinámicas para las fuerzas de arrastre y sustentación como función del ángulo de cabeceo. Se observa que el comportamiento de la fuerza de arrastre es parabólico y el de la fuerza de sustentación es lineal tal y como lo dictan las ecuaciones presentadas anteriormente. Se realizó un ajuste cuadrático y lineal para las curvas de las fuerzas de arrastre y sustentación, respectivamente; esto con el fin de comparar las ecuaciones resultantes con las propuestas (Ec. 1-9) para cada una de las fuerzas y de esta manera obtener los coeficientes hidrodinámicos correspondientes. La Fig. 26c, muestra el momento de cabeceo como función del mismo ángulo, se observa el comportamiento lineal con pendiente negativa del momento de cabeceo, esto indica que a medida que el planeador incrementa su ángulo de ataque, el momento de cabeceo trata de regresarlo a un ángulo de ataque menor, esto se puede interpretar como la tendencia del vehículo a ser estáticamente estable de manera longitudinal respecto a cualquier perturbación.

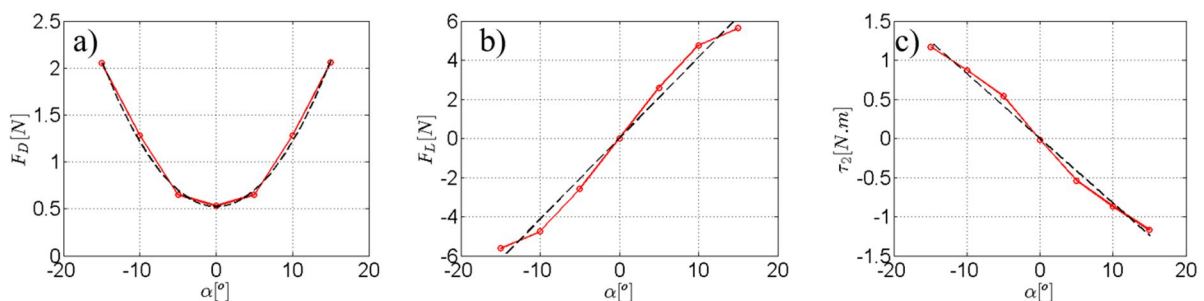


Figura 26. a) Fuerza de arrastre como función del ángulo de cabeceo, b) Fuerza de sustentación como función del ángulo de cabeceo, c) Momento en eje j como función del ángulo de cabeceo (En rojo se muestran resultados numéricos. La línea punteada corresponde al ajuste realizado).

Se graficaron además la fuerza lateral y el momento de guiñada como función del ángulo β , en la Fig. 27 se pueden observar los comportamientos lineales de ambos respecto al ángulo de guiñada. En el caso del momento alrededor de este eje, el comportamiento obtenido revela que el vehículo es estable estáticamente de manera lateral.

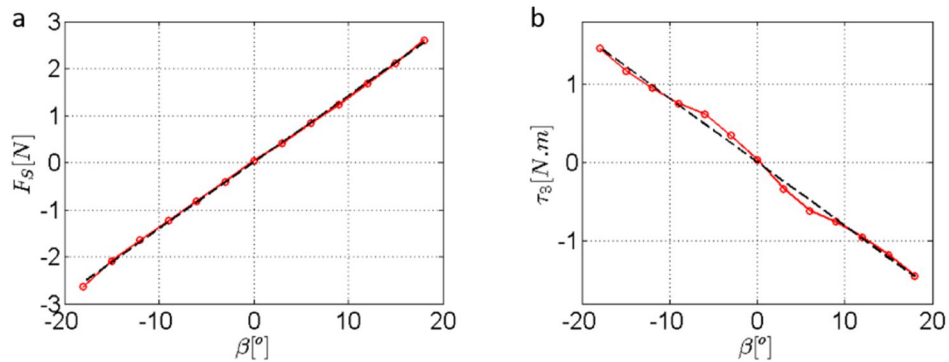


Figura 27. a) Fuerza lateral como función del ángulo de guiñada, b) Momento en eje k como función del ángulo de guiñada

Teniendo las fuerzas y momentos calculados mediante las simulaciones CFD, se obtuvieron los coeficientes K^s a través de las regresiones lineales (excepto para el arrastre que es una regresión cuadrática) calculadas para cada una de las curvas hidrodinámicas obtenidas. Para el movimiento tipo diente de sierra y con las simulaciones en el dominio con velocidad lineal, las ecuaciones calculadas mediante las regresiones correspondientes se compararon directamente con las siguientes expresiones para calcular los cada uno de los coeficientes hidrodinámicos:

$$\frac{F_D}{v^2} = K_{D0} + K_D \alpha^2 \quad \text{(Fuerza de arrastre)} \quad (21)$$

$$\frac{F_L}{v^2} = K_{L0} + K_L \alpha \quad \text{(Fuera de sustentación)} \quad (22)$$

$$\frac{F_S}{v^2} = K_\beta \beta \quad \text{(Fuerza lateral)} \quad (23)$$

$$\frac{\tau_1}{v^2} = K_{MR} \beta \quad \text{(Momento en giro)} \quad (24)$$

$$\frac{\tau_2}{v^2} = K_{M0} + K_M \alpha \quad \text{(Momento en cabeceo)} \quad (25)$$

$$\frac{\tau_3}{v^2} = K_{MY}\beta \quad (\text{Momento en guiñada}) \quad (26)$$

Para determinar los coeficientes faltantes que caracterizan un movimiento en espiral del planeador, se utilizaron los resultados de las simulaciones en el dominio computacional con velocidad angular. Se realizaron 3 gráficas con sus respectivas líneas de ajuste que se presentan en la Fig. 28. En la Fig. 28a, se muestra el momento en giro como función del ángulo β para cada uno de los radios de curvatura del dominio, en Fig. 28b se presenta el momento de cabeceo como función del ángulo α y en la Fig. 28c se muestra el momento en guiñada que está en función del ángulo β . Como se puede observar, los momentos hidrodinámicos de guiñada y cabeceo son funciones lineales de los ángulos de deslizamiento y ataque, respectivamente. Este resultado concuerda con las ecuaciones para cada uno de los momentos hidrodinámicos por lo que es posible entonces obtener los coeficientes haciendo un ajuste lineal sobre cada conjunto de datos y promediando para los diferentes radios de curvatura, esta metodología de obtención de los coeficientes de fuerzas y momentos fue presentada por [10].

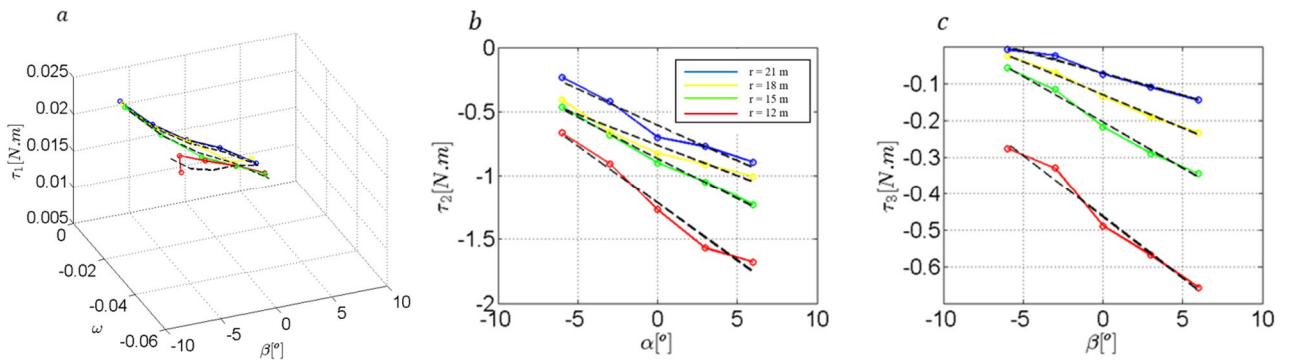


Figura 28. a) momentos de giro como función del ángulo de guiñada, b) momento de cabeceo como función del ángulo de cabeceo, c) momento de guiñada como función del ángulo de guiñada.

Para cada una de las curvas obtenidas como función del radio de curvatura del dominio, se realizaron los ajustes lineales correspondientes, con el fin de obtener los coeficientes hidrodinámicos K_p, K_q, K_r . De la misma manera que para el movimiento de

diente de sierra, las ecuaciones lineales obtenidas mediante las regresiones se compararon con las siguientes expresiones para calcular coeficientes K 's:

$$\frac{\tau_1}{v^2} = K_{MR}\beta + K_P P \quad (\text{Momento para Giro}) \quad (27)$$

$$\frac{\tau_2 - K_{M0}}{v^2} = K_M \alpha + K_q q \quad (\text{Momento para cabeceo}) \quad (28)$$

$$\frac{\tau_3}{v^2} = K_{MY}\beta + K_r r \quad (\text{Momento para guiñada}) \quad (29)$$

Los valores de los coeficientes hidrodinámicos calculados se enlistan en la Tabla 13, estos coeficientes se utilizarán directamente para alimentar el modelo dinámico del planeador y de esta manera conocer su comportamiento temporal durante la misión asignada y en caso de perturbaciones existentes.

Tabla 13. Datos hidrodinámicos fijos

Datos hidrodinámicos fijos	
K_D	330.9 Kg/m/rad
K_{D0}	9.429 Kg/m
K_L	329.4 Kg/m/rad
K_{L0}	0.3056 Kg/m
K_β	129.9 Kg/m/rad
K_M	-63 Kg/rad
K_{M0}	0.6305 Kg
K_q	-845.36 kg s/rad ²
K_{MR}	-1.5194 kg/rad
K_P	-12.309135 kg s/rad
K_{MY}	-20.2925 kg/rad
K_r	-199.8516 kg s/rad ²

7 Simulador de vuelo

Como se mencionó al inicio de este trabajo, siendo éste un proyecto institucional de relevancia, existen diferentes equipos en el CIDESI llevando a cabo las tareas en paralelo, con el fin de completar el diseño y prototipado del planeador. Una de las tareas de diseño fue la implementación de un simulador de vuelo del planeador. Es importante señalar que la implementación de este simulador está fuera de los alcances de esta tesis y el código fue solamente utilizado por el autor de este trabajo para poder verificar el comportamiento del planeador con los resultados de las simulaciones CFD. Este simulador fue validado con los datos publicados en [9].

El simulador fue alimentado con los coeficientes de la Tabla 13, además, dentro del código realizado para el simulador de vuelo, también se implementaron otros parámetros importantes para el vuelo del planeador como lo eran:

- Peso total del planeador.
77 kilogramos
- Masas añadidas.

Tabla 14. Masas añadidas

Masa Añadida (M_11)	3.7377 Kg
Masa Añadida (M_22)	111.7101 Kg
Masa Añadida (M_33)	92.43193 Kg

Estos datos fueron proporcionados por compañeros con los que se estaba trabajando en conjunto para la obtención de todos los parámetros requeridos para poder ejecutar el programa del simulador de vuelo para planeador submarino de CIDESI.

A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos con este simulador del comportamiento dinámico del planeador. Dentro de los datos de entrada del simulador,

se pueden introducir perturbaciones de corrientes sobre el planeador, sin embargo, en este punto del desarrollo del vehículo, se requiere primero verificar que con el diseño propuesto se puede seguir una trayectoria de tipo diente de sierra.

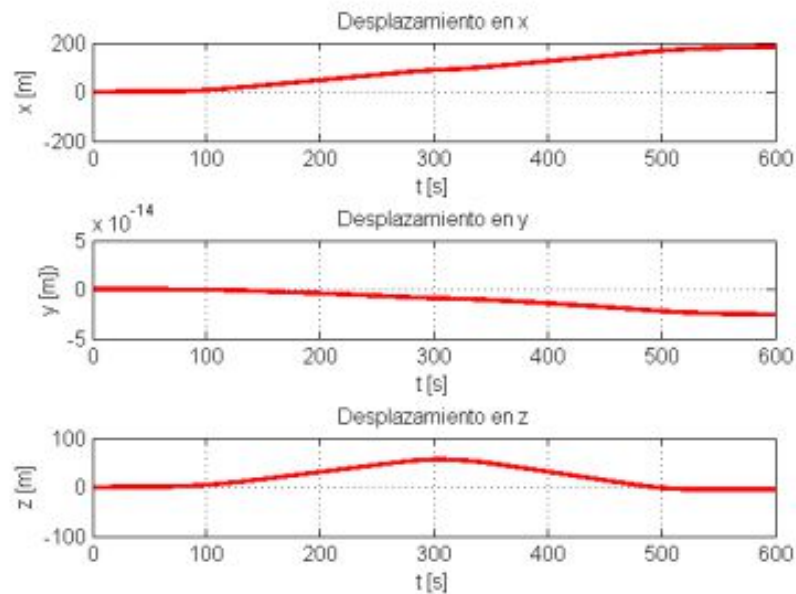


Figura 29. Desplazamiento del planeador submarino como función del tiempo.

En la Fig. 29 se muestra el desplazamiento del planeador como función del tiempo en las tres componentes del espacio cartesiano. Se puede observar, que el movimiento del planeador solo se da en un plano bidimensional (el desplazamiento en el eje y es prácticamente cero), esto corresponde a un ciclo en el movimiento tipo diente de sierra que se busca tener en este tipo de planeadores submarinos.

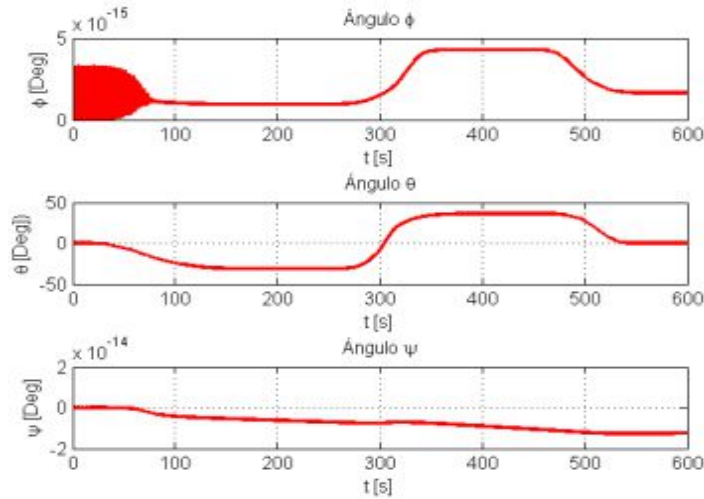


Figura 30. Desplazamiento angular del planeador submarino como función del tiempo.

En la Fig. 30 podemos ver el desplazamiento angular en guiñada, cabeceo y giro respectivamente. Se observa de una manera clara que como el desplazamiento del planeador es bidimensional, el único ángulo que tiene alteraciones es el ángulo de cabeceo con el cual el planeador puede realizar el movimiento tipo diente de sierra, primero existe un decremento en la gráfica por que el planeador tiene una flotabilidad negativa para poder hundirse, después un aumento por que el planeador tiene una flotabilidad positiva para poder subir a la superficie.

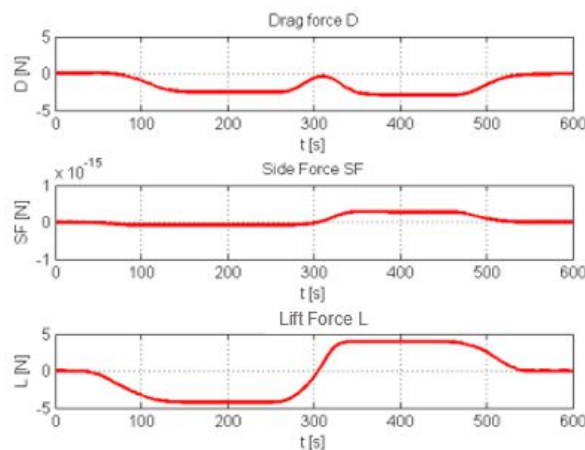


Figura 31. Fuerzas generadas sobre del planeador submarino como función del tiempo

Las fuerzas de arrastre, fuerza lateral y de sustentación se muestran, respectivamente, en la Fig. 31, donde el comportamiento de la fuerza de arrastre es conforme al movimiento tipo diente de sierra y solo se mantiene en cero cuando el planeador sube a la superficie para el envío de datos. La fuerza lateral es prácticamente cero debido al movimiento en dos dimensiones del planeador y por último la fuerza de sustentación podemos observar como es negativa cuando el planeador desciende (flotabilidad negativa) y positiva cuando el planeador asciende (flotabilidad positiva).

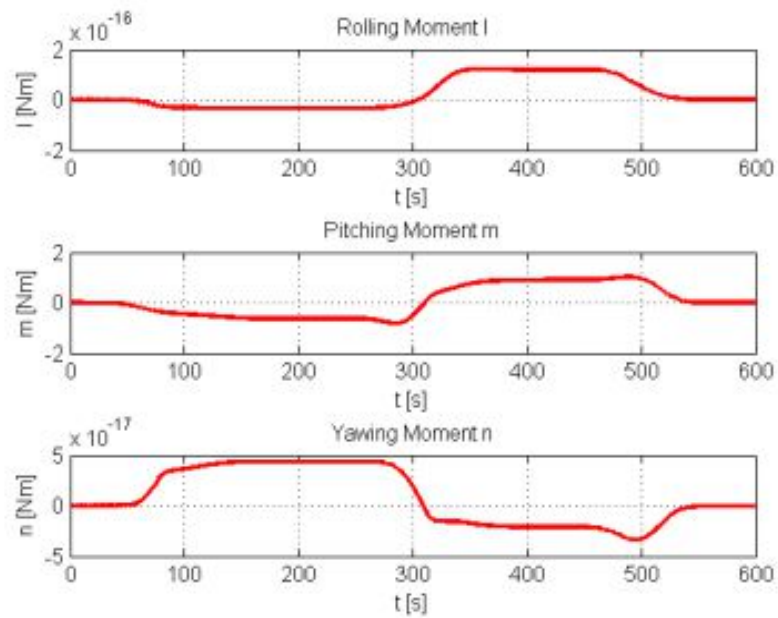


Figura 32. Momentos generados alrededor del planeador submarino

En la Fig. 32 podemos observar los momentos hidrodinámicos generados sobre los ejes principales de planeador. Los momentos de guiñada y giro en este caso son cero debido a que el movimiento es tipo diente de sierra, sin embargo, el momento de cabeceo cambia de negativo a positivo por el ajuste de la flotabilidad del planeador para bajar o subir dentro del océano.

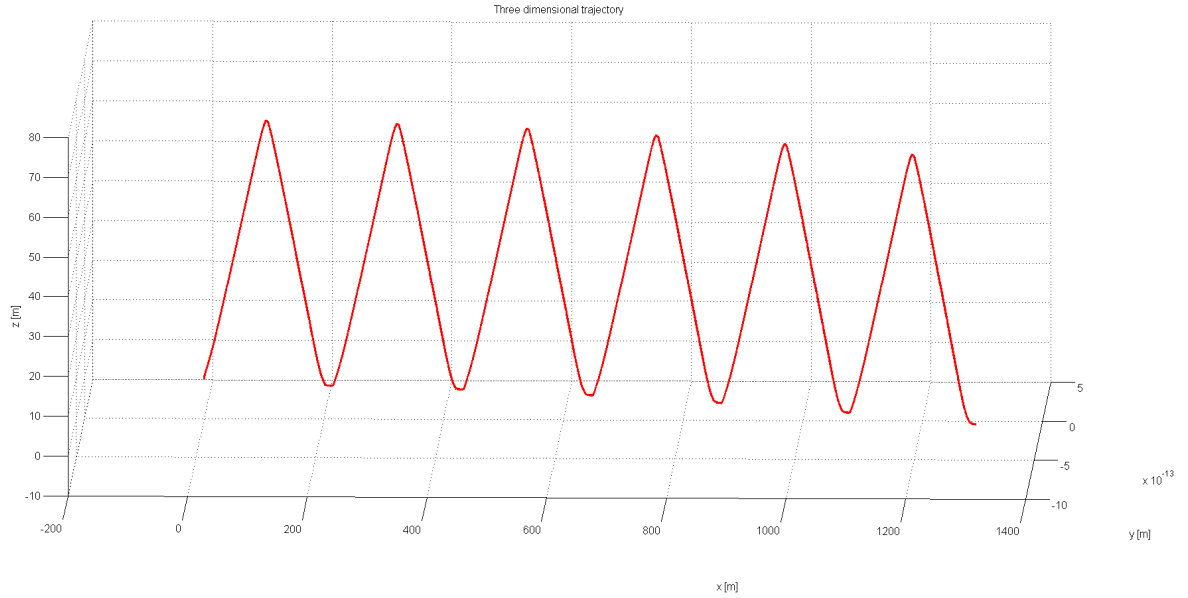


Figura 33. Trayectoria tipo diente de sierra que se espera tenga el planeador

Finalmente, en la Fig. 33, se muestran varios ciclos del movimiento tipo diente de sierra que el planeador sigue durante su trayectoria dentro del océano. Se observa que, en un número considerable de ciclos, el movimiento está prácticamente restringido a un plano bidimensional, con frecuencia y amplitud constante. Con lo anterior, se puede concluir que el diseño del casco propuesto en este trabajo puede seguir este tipo de movimiento adecuadamente durante sus misiones. El siguiente reto que deberá abordar el equipo de los sistemas de control es realizar simulaciones con este modelo dinámico donde existan perturbaciones que obliguen al planeador a moverse en forma de espiral (movimiento en tres dimensiones), esto para que se diseñen las estrategias de control requeridas para las diferentes condiciones de operación que se espera tener para este planeador.

8 Conclusiones

En este trabajo se desarrolló el diseño conceptual y el estudio hidrodinámico del casco del planeador submarino prototipo de CIDESI. En primera instancia, se definió el diseño del cuerpo del casco, la geometría de las alas y el timón, tomando en cuenta lo reportado en la literatura de diseños de planeadores comerciales y de investigación, así como los requerimientos de desempeño y de espacio requerido para albergar los sistemas internos del vehículo. Se eligió el perfil NACA 0012 simétrico el cual ha sido utilizado en otros diseños de planeadores y se dimensionaron las alas de acuerdo con los requerimientos hidrodinámicos.

Una vez definido el diseño conceptual se implementaron modelos de simulación CFD con los que se estudió el comportamiento del planeador a las diferentes condiciones de vuelo a las cuales está sometido durante su misión.

Es importante señalar que el proceso de modelado con herramientas computacionales de este tipo, conlleva el desarrollo de una metodología apropiada para cada caso de estudio, en donde se debe elegir el dominio computacional adecuado para la simulación del flujo, construir mallas computacionales consistentes que aseguren la precisión de los resultados obtenidos y elegir los esquemas de discretización y métodos de solución apropiados para que las simulaciones converjan a una solución cercana a la realidad.

Se implementaron dos modelos CFD, el primero de ellos para determinar los coeficientes de fuerzas y momentos hidrodinámicos para el planeador con movimiento bidimensional tipo diente de sierra. Se hicieron simulaciones variando el ángulo de ataque y deslizamiento, con el que se pudieron obtener las curvas aerodinámicas de fuerzas y momentos, conociendo de esta forma el desempeño hidrodinámico del planeador durante estas condiciones de flujo. Además de esto, se estudió el flujo alrededor del planeador, donde pudo observarse que a altos ángulos de ataque, se presenta un desprendimiento importante de la capa límite en los carenados de las alas, lo que genera un decremento en la eficiencia hidrodinámica del

planeador a dichas condiciones. Esto servirá para mejorar la geometría de estas zonas del carenado en diseños subsecuentes y tratar de evitar este efecto hidrodinámico indeseable. El segundo modelo CFD implementado, fue para determinar los coeficientes y fuerzas hidrodinámicas del planeador moviéndose en una trayectoria en espiral, de igual manera se obtuvieron las curvas hidrodinámicas que describen el desempeño del planeador durante estas condiciones de operación variando los ángulos de ataque, deslizamiento y el radio de curvatura del movimiento en espiral.

Con estos dos modelos se realizaron alrededor de 90 casos de simulación, con los que se caracterizó de manera global el comportamiento hidrodinámico del planeador y se obtuvieron los coeficientes de fuerzas y momentos hidrodinámicos para las condiciones de funcionamiento a las que estará sometido el vehículo submarino.

Con la obtención de todos los datos de fuerza, sustentación, fuerza lateral y momentos hidrodinámicos en sus 3 ejes principales, fue posible alimentar el simulador dinámico del planeador, el cual fue desarrollado en la Dirección de Energía de CIDESI. Los resultados del simulador de la dinámica de vuelo del planeador mostraron que con el diseño del casco propuesto en este trabajo, el planeador es capaz de seguir un movimiento de tipo diente de sierra bidimensional, sin desviaciones importantes durante una trayectoria horizontal considerable. A partir de estos resultados y de la integración de los sistemas, será posible en el futuro inmediato del proyecto desarrollar pruebas experimentales de este nuevo concepto de planeador, así como liberar la información del comportamiento hidrodinámico para que sea usada por el equipo encargado de diseñar las estrategias de control del vehículo submarino.

9 Referencias bibliográficas

1. Stommel, H. (1989). The Slocum Mission. *Oceanography*, 25.
2. Hernandez-Gomez, J. J., Marquina, V., & Gómez. (2007). *Aeronáutica básica*.
3. Charles C. Eriksen, et.al. C. C. (2001). Seaglider: a Long-Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*.
4. Jeff Sherman, R. E. (2001). The Autonomous Underwater Glider "Spray *IEEE Journal of Oceanic Engineering*.
5. Clayton Jones, E. (1992). Slocum Glider, expanding our understanding of the oceans. *Oceans - St. John's*.
6. Carmona, A. (2004). *Aerodinámica y actuaciones del avión*.
7. M. Arima, N. I. (2009). Modelling and Motion Simulation of an Underwater Glider with Independently Controllable Main Wings. *Oceans Europe*.
8. Yogang Singh, S. K. (2017). CFD approach to modelling, hydrodynamics analysis and motion characteristics of a laboratory underwater glider with experimental results. *Ocean Engineering and Science*, 30.
9. Shaowei Zhang, J. Y. (2013). Spiraling motion of underwater gliders: Modeling, analysis, and experimental results. *Ocean Engineering*, 13.
10. N.E. Leonard and J.G. Graver. (2001), Model-based feedback control of autonomous underwater gliders, *IEEE J. Ocean Engineering*, vol. 26, pp. 633–645.
11. Graver, J. G. (2005). *Underwater Gliders: Dynamics, Control and Design*. Princeton University.
12. McCormick, B. W. (1979). *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*. 2nd Edition, Published by Wiley.
13. H. Schlichting, K. Gersten, E. Krause, and H. Oertel. (1995), *Boundary-layer theory*, vol. 7. Springer.

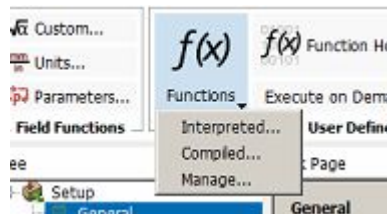
14. W. J. McCroskey. (1987). A Critical Assessment Of Wind Tunnel Results For The NACA 0012 Airfoil. AVIATION RESEARCH AND TECHNOLOGY ACTIVITY MOFFETT FIELD.
15. ANSYS Fluent Theory Guide. (2013), ANSYS Inc.
16. Sharcnet. (2016). Mesh Quality. Obtenido de <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/>
17. Simonetti, P. (1991). Slocum Glider Design and Field Trials. IEEE Journal of Oceanic Engineering.
18. Stokes, G. (1851). On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. Transactions of the Cambridge Philosophical Society.
19. F. Menter. (1994), Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA-Journal
20. UIUC Airfoil Coordinates Database, Department Of Aerospace Engineering, URL=https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html

Apéndice A. Código para velocidad angular

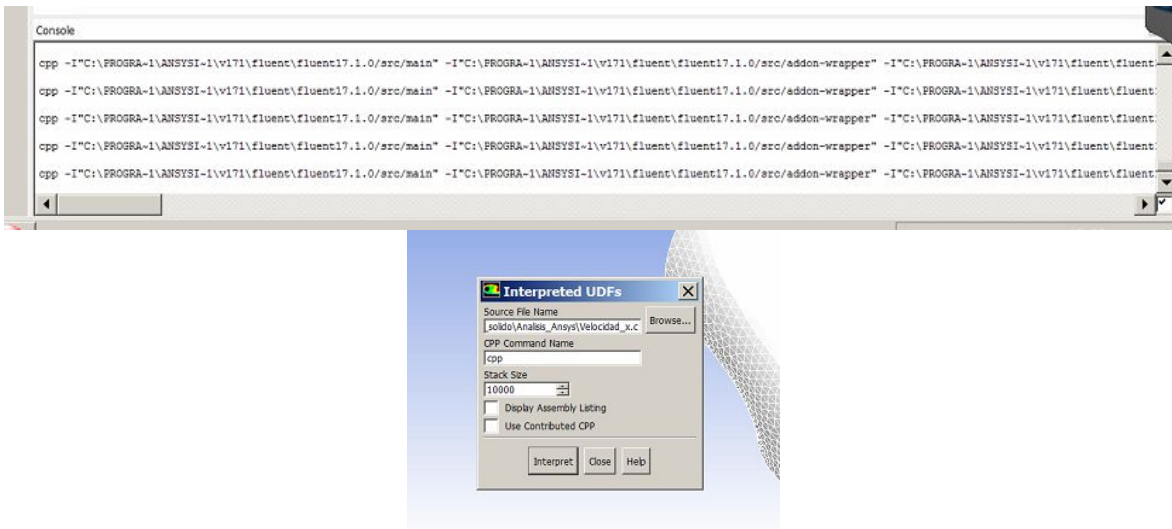
Para poder implementar el código programado en “C” dentro del software, accedimos a la parte de *User Defined* para implementar el código que nos ayudará a simular el aumento de la velocidad conforme el radio de curvatura del anillo va incrementando.



Después, en *functions*, se elegía *interpreted* para poder interpretar el código y se quedara integrado en el software para poder elegirlo en velocidades de entrada.



Una vez elegida la opción de *interpreted*, nos abría una pestaña para poder elegir el código en donde lo tuviéramos guardado, que en nuestro caso estaba en una carpeta junto con el programa de ANSYS con el que se estaba trabajando, y estaba guardado en bloc de notas con extensión *.txt* para que el software lo pudiera leer.



Una vez elegido el código a usar se interpreta dentro del software y esperamos a que no tenga ningún error y el programa lo pueda interpretar sin problemas para que pueda entrar

```

/*****
Velocity_inlet.c
UDF for specifying steady-state velocity profile boundary condition
*****/
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(Boundary_velocity, thread, position)
{
    float x[3];          /* this will hold the position vector */
    float y;
    float z;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        y = x[1];
        z = x[2];
        F_PROFILE(f, thread, position) = (0.0166666)*(sqrt((x[1]+15)*(x[1]+15)));
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

en las opciones de velocidad de entrada y podemos elegir las a la hora de definir las condiciones en el software.

Para nuestro caso el código para que la velocidad del fluido pudiera realizar el movimiento forma angular dentro del dominio quedó de la siguiente manera:

Teniendo el código implementado dentro del software, a la hora de elegir las condiciones de frontera podremos encontrar el código implementado, que en nuestro caso se llama *Boundary_velocity* el cual, dependiendo el radio de curvatura que usaríamos, cambiaría la velocidad angular, la cual es la que se

indica en la figura anterior, que es la velocidad de $0.25 \frac{m}{s}$ dividida entre el radio de curvatura del anillo.

Para poder entender de una mejor manera la velocidad angular que usaríamos, en la Tabla 7 se describen los radios de curvatura que se usaron en las simulaciones y las velocidades angulares resultantes que se colocaron en el código para ser implementadas en el software.

