

# **Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Huelva**

Grado en Ingeniería Mecánica

## **Trabajo Fin de Grado**

Modelación hidrodinámica de un  
vehículo submarino operado  
remotamente (ROV) usando CFD

Cristina Vélez Bermejo

07/2020

DIRECTORES:

Dra. Inmaculada Pulido Calvo

Dr. Juan Carlos Gutiérrez Estrada

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Definición de ROV.....	6
1.2 Antecedentes.....	7
1.3 Objetivos.....	7
1.4 Metodología y fases del proyecto.....	7
2. ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1 Fases generales del diseño.....	8
2.2 Clasificación actual de los ROVs.....	10
2.3 Aplicaciones generales de un ROV.....	13
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	15
3.1 Descripción del ROV.....	15
3.2 Modelado 3D del ROV en inventor.....	15
3.3 ANSYS.....	17
3.4 Descripción de simulaciones.....	18
3.5 Descripción de coeficientes y fuerzas hidrodinámicas.....	27
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1 Modelo 3D en Inventor.....	35
4.2 Simulaciones en ANSYS.....	36
4.3 Coeficientes hidrodinámicos.....	45
5. CONCLUSIONES.....	57
6. REFERENCIAS.....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

<b>Figura 1:</b> ROV operando en una estructura submarina.....	5
<b>Figura 2:</b> Ejemplo ROV.....	6
<b>Figura 3:</b> Diagrama de flujo de las fases del diseño.....	9
<b>Figura 4:</b> Ejemplo Small ROV.....	10
<b>Figura 5:</b> Ejemplo ROV gama media con un brazo.....	11
<b>Figura 6:</b> Ejemplo ROV Ultra Deep (alta profundidad) en el mar.....	12
<b>Figura 7:</b> Ejemplo ROV Ultra Deep (alta profundidad) con operarios.....	12
<b>Figura 8:</b> Ejemplo ROV de oruga y arado.....	13
<b>Figura 9:</b> Imagen modelo de ROV seleccionado para realizar el diseño.....	15
<b>Figura 10:</b> Configuración Inventor. Elección formato.....	16
<b>Figura 11:</b> Configuración Inventor. Elección plano de trabajo.....	17
<b>Figura 12:</b> Área de trabajo Inventor.....	17
<b>Figura 13:</b> Inserción ventana de geometría.....	18
<b>Figura 14:</b> Inserción modelo 3D del ROV en ANSYS.....	19
<b>Figura 15:</b> configuración de la geometría.....	20
<b>Figura 16:</b> Definición del área de control.....	20
<b>Figura 17:</b> Representación del volumen de control final.....	21
<b>Figura 18:</b> Inserción ventana de Fluid Flow (Fluent).....	21
<b>Figura 19:</b> Mallado del volumen de control y ROV.....	22
<b>Figura 20:</b> Mallado del ROV.....	22
<b>Figura 21:</b> Configuración ventana Setup.....	23
<b>Figura 22:</b> Configuración del tipo de fluido.....	24
<b>Figura 23:</b> Configuración velocidad.....	25
<b>Figura 24:</b> Configuración presión.....	26
<b>Figura 25:</b> Configuración vórtices.....	26
<b>Figura 26:</b> Configuración turbulencia por energía cinética.....	26
<b>Figura 27:</b> Configuración Wall Shear.....	27
<b>Figura 28:</b> Configuración dimensión y tipo de precisión de Fluid Flow.....	28
<b>Figura 29:</b> Creación de definiciones para parámetro $C_D$ .....	29
<b>Figura 30:</b> Configuración del coeficiente de resistencia hidrodinámica.....	29
<b>Figura 31:</b> Creación de definiciones para parámetro $C_L$ .....	30
<b>Figura 32:</b> Configuración del coeficiente de sustentación.....	30
<b>Figura 33:</b> Creación de definiciones para la fuerza $F_D$ .....	31
<b>Figura 34:</b> Configuración de la fuerza de arrastre.....	31
<b>Figura 35:</b> Creación de definiciones para la fuerza $F_L$ .....	32
<b>Figura 36:</b> Configuración de la fuerza de elevación.....	32
<b>Figura 37:</b> Configuración de los coeficientes y fuerzas para mostrarse en pantalla.....	33
<b>Figura 38:</b> Inicialización de la solución.....	34
<b>Figura 39:</b> Cálculo de los coeficientes.....	34
<b>Figura 40:</b> Diseño modelo 3D en varias perspectivas.....	35
<b>Figura 41:</b> Diseño simplificado modelo 3D.....	35
<b>Figura 42:</b> Simulación de la presión vista desde perspectiva. Velocidad 0,514 m/s.....	36
<b>Figura 43:</b> Simulación presión vista frontal. Velocidad 0,514 m/s.....	36
<b>Figura 44:</b> Simulación turbulencia. Velocidad 0,514 m/s.....	37
<b>Figura 45:</b> Simulación Wall-Shear. Velocidad 0,514 m/s.....	37

<b>Figura 46:</b> Simulación velocidad. Velocidad 0,514 m/s.....	37
<b>Figura 47:</b> Simulación líneas de corriente. Velocidad 0,514 m/s.....	38
<b>Figura 48:</b> Simulación formación de vórtices. Velocidad 0,514 m/s.....	38
<b>Figura 49:</b> Simulación de la presión vista desde perspectiva. Velocidad 1,029 m/s....	39
<b>Figura 50:</b> Simulación presión vista frontal. Velocidad 1,029 m/s.....	39
<b>Figura 51:</b> Simulación turbulencia. Velocidad 1,029 m/s.....	39
<b>Figura 52:</b> Simulación Wall-Shear. Velocidad 1,029 m/s.....	40
<b>Figura 53:</b> Simulación velocidad. Velocidad 1,029 m/s.....	40
<b>Figura 54:</b> Simulación líneas de corriente. Velocidad 1,029 m/s.....	40
<b>Figura 55:</b> Simulación formación de vórtices. Velocidad 1,029 m/s.....	41
<b>Figura 56:</b> Simulación de la presión vista desde perspectiva. Velocidad 1,543 m/s...	41
<b>Figura 57:</b> Simulación presión vista frontal. Velocidad 1,543 m/s.....	41
<b>Figura 58:</b> Simulación turbulencia. Velocidad 1,543 m/s.....	42
<b>Figura 59:</b> Simulación Wall-Shear. Velocidad 1,543 m/s.....	42
<b>Figura 60:</b> Simulación velocidad. Velocidad 1,543 m/s.....	42
<b>Figura 61:</b> Simulación líneas de corriente. Velocidad 1,543 m/s.....	43
<b>Figura 62:</b> Simulación formación de vórtices. Velocidad 1,543 m/s.....	43
<b>Figura 63:</b> Numeración caras frontales ROV.....	44
<b>Figura 64:</b> Gráfica de coeficientes de sustentación ( $C_L$ ) frente a iteraciones.....	49
<b>Figura 65:</b> Imagen del ROV diseñado con la dirección de las fuerzas.....	50
<b>Figura 66:</b> Gráfica sustentación hidrodinámica ( $F_L$ ) frente a iteraciones.....	50
<b>Figura 67:</b> Gráfica de coeficientes de resistencia hidrodinámica ( $C_D$ ) frente a iteraciones.....	52
<b>Figura 68:</b> Gráfica de fuerza de arrastre ( $F_D$ ) frente a iteraciones.....	53
<b>Figura 69:</b> Imagen del ROV diseñado por Ruiz Ruiz.....	55
<b>Figura 70:</b> Imagen del ROV diseñado por Vélez Bermejo.....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Valores de los coeficientes hidrodinámicos a 0,514 m/s.....	45/46
<b>Tabla 2:</b> Valores de los coeficientes hidrodinámicos a 1,029 m/s.....	46/47
<b>Tabla 3:</b> Valores de los coeficientes hidrodinámicos a 1,543 m/s.....	47/48
<b>Tabla 4:</b> Coeficientes de sustentación $C_L$ en función de la velocidad.....	49
<b>Tabla 5:</b> Sustentación hidrodinámica $F_L$ en función de la velocidad.....	50
<b>Tabla 6:</b> Coeficientes de resistencia hidrodinámica $C_D$ en función de la velocidad.....	52
<b>Tabla 7:</b> Resistencia hidrodinámica $F_D$ en función de la velocidad.....	53
<b>Tabla 8:</b> Coeficientes hidrodinámicos seleccionados. Velocidad 0,514 m/s.....	53
<b>Tabla 9:</b> Coeficientes hidrodinámicos seleccionados. Velocidad 1,029 m/s.....	53
<b>Tabla 10:</b> Coeficientes hidrodinámicos seleccionados. Velocidad 1,514 m/s.....	53
<b>Tabla 11:</b> Comparación de fuerzas hidrodinámicas a diferentes velocidades.....	53

## 1. INTRODUCCIÓN

En la presente memoria se pretende reflejar el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado denominado “Modelación hidrodinámica de un vehículo submarino operado remotamente (ROV) usando modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)”. Para su realización se emplean técnicas de Diseño Asistido por Ordenador (CAD), concretamente se realiza con el programa Autodesk Inventor, y la Dinámica de Fluidos Computacional con el programa ANSYS FLUENT.

El diseño del modelo de ROV (Remote Operated Vehicle, Vehículo operado a distancia), se realiza en Inventor, y posteriormente este modelo se traslada a ANSYS, de forma que se puede hacer una estimación del comportamiento hidrodinámico del vehículo, esto es, conocer la incidencia que el fluido tendrá sobre el modelo, cuando este se sumerja en el agua y viaje a una determinada velocidad, con una determinada presión, profundidad... además de conocer los coeficientes hidrodinámicos. Con este tipo de estudio de investigación, una vez conocido el comportamiento del fluido, en la etapa de diseño se puede modificar el modelo hasta conseguir las condiciones de contorno deseadas con unas características óptimas, sin necesidad de crear un modelo físico y realizar ensayos sobre este.

En los últimos años, el desarrollo tecnológico de vehículos autónomos, tanto submarinos como aéreos, están sufriendo un notable crecimiento, ya que son elementos muy útiles para la sociedad. Con este tipo de vehículo se puede realizar un control y una adquisición de información en tareas de alto nivel de riesgo, de manera que se evita la exposición del ser humano en dichas tareas. En la figura 1 se representa un ROV trabajando en una estructura submarina.

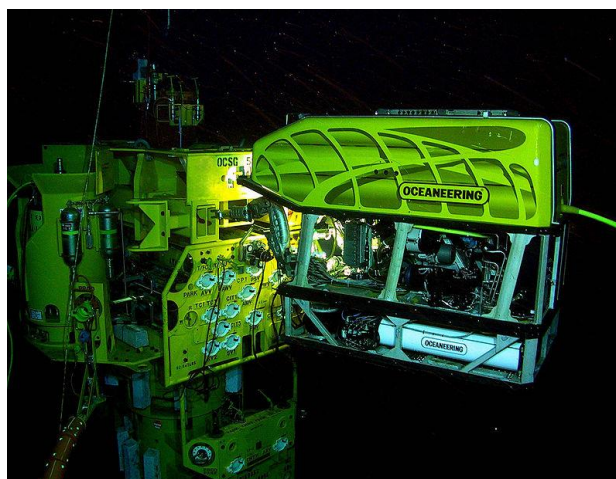


FIG 1: ROV operando en una estructura submarina  
([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/99/ROV\\_working\\_on\\_a\\_subsea\\_structure.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/99/ROV_working_on_a_subsea_structure.jpg))

### 1.1 Definición de ROV

Los vehículos operados remotamente (ROVs) son plataformas robóticas controladas a distancia por un operario, y en la actualidad tienen su principal aplicación en el reconocimiento, inspección, observación y desarrollo de tareas específicas bajo el agua. Un ROV normalmente se constituye por una plataforma sobre la que se instalan un conjunto de motores o propulsores que permiten su desplazamiento a través de la columna de agua, acompañado de una serie de sensores, que dependiendo del tipo de operación a realizar, tendrán una función u otra (Gutiérrez-Estrada *et al.*, 2019).

Este robot submarino no tripulado se conecta a un barco en la superficie por medio de un cable. La energía que recibe el ROV y las órdenes, se envían mediante el cordón o cable umbilical, y a través de este se transmite la información que el ROV recoge, como fotografías, videos, información sobre el estado del propio ROV u otros datos. Para que este proceso sea posible el barco debe contar con un centro de control adecuado para poder realizar el intercambio de información entre el operario y el ROV. No necesariamente debe estar conectado a un barco, si no se trata de exploraciones en el mar a aguas abiertas, y por ejemplo la exploración tiene lugar en una pequeña piscifactoría, el operario se ubicará en la superficie, y desde allí controla al ROV. De la misma manera, contará con un equipo de recepción de información para obtener en todo momento los datos que transmite el ROV. Haciendo uso de esta tecnología se evita la exposición de los trabajadores en ambientes peligrosos y a limitaciones por falta de oxígeno y descompresiones.

Algunos ROVs pueden llevar una gran variedad de brazos para realizar trabajos en las profundidades, cámaras de video para ver al instante lo que hay en el fondo del mar, o simplemente una cámara fotográfica con el fin de captar las imágenes del fondo marino. En la figura 2 se puede observar un modelo de ROV, donde se puede apreciar el cordón umbilical.



FIG 2: Ejemplo ROV

([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3d/ROV\\_Hercules\\_2005.JPG/800px-ROV\\_Hercules\\_2005.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3d/ROV_Hercules_2005.JPG/800px-ROV_Hercules_2005.JPG))



## 1.2. Antecedentes

Este proyecto ha sido realizado por Cristina Vélez Bermejo, estudiante del Grado de Ingeniería Mecánica, en la Universidad de Huelva. Se lleva a cabo con ayuda de Inmaculada Pulido Calvo y Juan Carlos Gutiérrez Estrada, profesores de la Universidad de Huelva, pertenecientes al departamento de Ciencias Agroforestales.

Por otra parte este Trabajo de Fin de Grado está incluido en las actividades del Proyecto KTTSeaDrones del programa INTERREG VA España-Portugal (POCTEP0622-KTTSEADRONES-5-E) (<https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/acciones>), cuya idea principal es generar conocimiento y transferir tecnología al sector pesquero-acuícola. Divide los objetivos principales en tres partes:

- Objetivo 1: Diseñar sensores adaptados a vehículos aéreos y marinos para el desarrollo del sector pesquero-acuícola y la gestión del litoral.
- Objetivo 2: Aumentar la competitividad y sostenibilidad en sectores económicos implicados en la gestión del litoral y del sector pesquero usando nuevas tecnologías.
- Objetivo 3: Crear nuevos nichos de empleo especializados, para ello tratan de introducir iniciativas innovadoras basadas en nuevas tecnologías (Gutiérrez-Estrada *et al.*, 2019).

## 1.3 Objetivos

Los objetivos principales de este proyecto son, en primer lugar, conocer el comportamiento que tendrá el fluido alrededor de un ROV previamente diseñado, cuando este se sumerge bajo el agua y se encuentre en movimiento, realizando un estudio de simulación sobre los parámetros de presión, velocidad y resistencia del agua, y en segundo lugar hallar los coeficientes y fuerzas hidrodinámicas a las que el ROV está sometido.

## 1.4 Metodologías y fases del proyecto

Los pasos seguidos para realizar este proyecto son:

- Diseño del ROV en el programa de Autodesk Inventor, a partir de un prototipo facilitado por los profesores tutores de este proyecto.
- Utilizando el programa ANSYS, se realiza un estudio de simulación sobre el comportamiento del fluido alrededor del modelo de ROV diseñado.
- Finalmente, con bases al mismo programa, se hallan los coeficientes y fuerzas hidrodinámicas a los que el prototipo diseñado se enfrentará, estos son: coeficiente de arrastre y elevación y fuerzas de arrastre y elevación.



## 2. ESTADO DEL ARTE

Fue sobre de la década de los 60 cuando se comenzaron a utilizar los primeros ROVs, basando sus aplicaciones exclusivamente en el ámbito militar (Ridao *et al.*, 2007). Algunas de estas aplicaciones eran por ejemplo el rastreo de naves, mapeo de campos de escombros o minas submarinas, preparación y ejecución de actividades de rescate y salvamento, actividades de seguridad y protección de instalaciones costeras y submarinas, etc (Valdés-Ruiz, 2009).

Sobre la evaluación de poblaciones de la fauna acuática, en los últimos años de la década de los 90 se hicieron las primeras investigaciones, basadas en la estimación de capturas por unidad de esfuerzo sobre una especie de gambas, las denominadas *Pandalus* (Bergström *et al.*, 1987), sin embargo, desde mediados de esta década ya se consideraban los beneficios que estos equipos aportaban a la sociedad respecto a las metodologías tradicionalmente usadas; tienen una alta capacidad de maniobra, respetan totalmente el medio que les rodea, en el sentido de que no llegan a producir variaciones sobre el mismo, o estas variaciones son mínimas, etc.

A lo largo de los años se fue indagando e investigando hasta llegar a conseguir la combinación de la videograbación junto a la obtención de datos físico-químicos *in situ*, pudiendo realizar estudios y análisis precisos de mega faunas en condiciones realmente complicadas para hacer uso de técnicas diferentes y tradicionales. Este estudio fue realizado por Rumohr, 1995, y marcó un punto significativo en la historia de los ROV, ya que desde este momento hasta nuestros días el estudio sobre especies marinas o simplemente estudios oceanográficos usando ROVs se ha incrementado progresivamente. Algunos de los autores que participaron en estas investigaciones fueron: Auster *et al.*, 1997; Moser *et al.*, 1998; Karpov *et al.*, 2004 o Duffy *et al.*, 2014, entre otros.

### 2.1 Fases generales del diseño

Para afrontar este apartado, en primer lugar hay que tener claro el significado del término diseño, y este se puede definir como la formulación de un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema, siendo su resultado: funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, ejecutable y comercializable (Sánchez-Sánchez, 2019). El proceso de diseño sigue el diagrama de flujo mostrado en la figura 3, con sus diferentes fases:

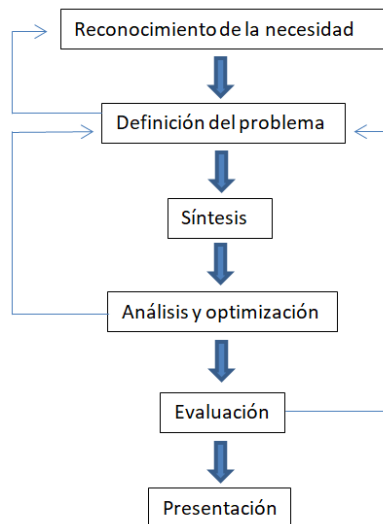


FIG 3: Diagrama de flujo de las fases del diseño

- Reconocimiento de la necesidad: punto que marca el inicio del proceso de diseño, como indica su nombre, se da cuando el ingeniero, su jefe o su cliente detectan una necesidad, y se decide realizar algo para satisfacerla.
- Definición del problema: a diferencia de la fase anterior, en este apartado se especifican las características que debe tener el diseño que se va a realizar, por ejemplo que el ROV pueda sumergirse y trabajar a una profundidad de 5.000 metros. Antes de comenzar con el diseño debe hacerse una investigación precisa analizando fuentes tanto internas (como las condiciones ambientales y operación donde trabajará el modelo) como externas (conocer el estado del arte del modelo, artículos técnicos relacionados, legislación aplicable, etc).
- Síntesis: esta fase abarca aspectos como la exploración de las diferentes posibilidades existentes para llegar a un resultado. El resultado de esta fase puede ser múltiple y diverso, pero hay que tener en cuenta que una vez analizado, se seleccionará el resultado óptimo. La creatividad es la característica principal de esta fase.
- Análisis y optimización: en esta fase se analizan los diferentes resultados obtenidos en la etapa anterior, se comprueba que cumplen con todas las especificaciones técnicas y se selecciona la solución óptima. Si por el contrario, ninguna de las soluciones fuesen satisfactorias, se comienza un proceso iterativo como el mostrado en la imagen anterior, y por tanto el procedimiento de síntesis debería iniciarse de nuevo.
- Evaluación: en esta fase se realiza un análisis crítico del total de las ideas generadas, se pueden comparar con productos similares ya existentes. El resultado debe ser competitivo.
- Presentación: La última fase del proceso de diseño es la comunicación del diseño final a otras personas. Para realizar una buena presentación, las formas de comunicación aconsejadas son: comunicación escrita, oral y gráfica (Sánchez - Sánchez, 2019).

## 2.2 Clasificación actual de los ROVs

En la actualidad existe una gran variedad de ROVs, y diferentes clasificaciones, se ha optado por clasificarlos en dos grandes grupos desglosados a continuación (según el uso o no de batería y según su tamaño, peso y potencia):

- Según el uso o no de batería.
  - ROVs sin baterías. Este tipo de ROV se alimenta desde la superficie mediante el uso de un cable.
  - ROVs con batería y con cable. Es habitual usar únicamente el cable, pero en el caso en el que este se rompa o presente algún tipo de problema con la conexión, entonces se utiliza la batería para conducir el ROV hasta la superficie y poder recuperarlo fácilmente.
- Según su tamaño, peso y potencia. Hay una amplia diversidad de tipos, se exponen a continuación algunos de ellos.
  - LCROV (Low Cost Remotely Operated Vehicle): Son un tipo de ROVs pequeños. Su potencia no supera los 4 kW y su peso se encuentra alrededor de los 3 kg. La profundidad máxima a la que se pueden sumergir es de 100 metros. Su sistema es totalmente eléctrico y la gran mayoría tienen diseños sencillos, sin brazos. Se utilizan principalmente para realizar inspecciones o investigar zonas pequeñas o de difícil acceso.
  - Small ROV: Este tipo de ROVs se incluyen dentro de los ROVs medianos. Su potencia se encuentra alrededor de 7,5 kW. Tiene un peso aproximadamente de 15 kg y la profundidad máxima admisible es de 300 metros. Su sistema es totalmente eléctrico, y su diseño no es muy sofisticado. Su uso de nuevo se limita a la observación. En la figura 4 se representa un ROV de este tipo.



FIG 4: Ejemplo Small ROV

(<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.subsea-tech.com%2Fmini-rov-guardian%2F&psig=AOvVaw3pidiagSRHF-ZoijKkKWNb&ust=1588617171325000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCLDt6OqmOkCFQAAAAAdAAAAABAF>)

- ROV de gama media: Es un tipo de ROV grande, con una potencia límite de 75 kW. Su peso se encuentra alrededor de los 1.000 o 2.000 kg. La profundidad máxima a la que se pueden sumergir es de 2.000 metros. Poseen un sistema mixto electro-hidráulico, y tienen un diseño más completo que los modelos anteriores, compuestos normalmente por uno o dos brazos con dedos, por lo que además de observar también están capacitados para realizar tareas de trabajo medio o pesado, pudiendo cargar con pesos de hasta 200 kg y realizar una fuerza de 450 kg. Este tipo de ROV está especializado para trabajar en zonas con altas corrientes. Actualmente es uno de los ROV más usados. En la figura 5 se representa un ROV de este tipo.



FIG 5: Ejemplo ROV gama media con un brazo  
(<http://www.sharkmarine.com/products/rovs/barracuda/>)

- ROV de trabajo: Es un tipo de ROV grande, tienen una potencia máxima de 220 kW. Su peso oscila entre los 2.000 y 7.000 kg, pueden sumergirse a una profundidad máxima de 3.500 metros. Poseen un sistema combinado (eléctrico e hidráulico), cabe destacar que debido al aumento de potencia y de peso del ROV con respecto los tipos anteriores, este necesita un cordón umbilical de mayor sección. Realiza una fuerza de hasta 5.000 kg y se utiliza principalmente para realizar el mantenimiento industrial.
- ROV Ultra Deep (Ultra profundo): Es un tipo de ROV grande y su principal ventaja es que pueden ser sumergidos hasta una profundidad de 11.000 metros. Se pueden diferenciar dos tipos: con sistema totalmente eléctrico o con sistema combinado (eléctrico e hidráulico). En el primer caso, los ROV eléctricos tienen una potencia máxima de 18 kW aproximadamente. Cordón umbilical más delgado respecto a los casos anteriores. Su utilidad principal es la observación de los fondos marinos profundos durante largos periodos de tiempo. El ROV con sistema combinado, en cambio, tiene una potencia máxima alrededor de 90 kW y está diseñado para realizar trabajos pesados,

misiones de búsqueda, salvamento, etc. En la figura 6 se observa un ROV de este tipo.



FIG 6: Ejemplo ROV Ultra Deep (alta profundidad) en el mar  
(<https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2016/08/Falkor-SuBastian.jpg>)

En la figura 7 se muestra un ROV donde se pueden observar las grandes dimensiones que éste presenta respecto a los operarios.



FIG 7: Ejemplo ROV Ultra Deep (alta profundidad) con operarios  
(<https://www.rovplanet.com/news/news?id=633>)

- ROV de arrastre: Es uno de los ROV más pesados, tal es su peso, que ninguna hélice actualmente está capacitada para hacerlo ascender o descender por sí sola, por lo que el método usado para sumergirlo es colocarlo sobre la superficie marina y a través de un cable y con ayuda de una polea, este va descendiendo hasta llegar a la profundidad deseada. De la misma manera se opera para llevar al ROV de nuevo a la superficie una vez haya descendido y realizado el trabajo. Las características del cable en este tipo de ROVs son muy importantes, ya que tienen que resistir un enorme esfuerzo. Normalmente estos son fabricados de acero o Kevlar, que es un polímero empleado para la



elaboración de hilos con prestaciones de resistencias extraordinarias, cuya rotura resulta muy difícil. Por tanto estos ROVs cuentan con dos cables, uno para recibir información y otro para realizar el ascenso y descenso del mismo. Se suelen utilizar para obtener datos oceanográficos muy exactos o localizar cables y tuberías en el fondo del mar, entre otras aplicaciones.

- ROV de oruga y arado: Este tipo incluye a aquellos ROV que están capacitados para desplazarse gracias a una especie de “ruedas” denominada oruga o arado. En la actualidad, se usan principalmente para el tendido de cables o para abrir y cerrar zanjas. Este tipo de ROV puede recibir la información y las órdenes a realizar a través del cable o desde una estación a bordo del ROV. Los ROV de arado son los más pesados de todos, su peso puede llegar a los 80.000 kg. Pueden realizar una fuerza de arrastre de 250.000 kg, y su profundidad máxima es de 1.500 metros (Ruiz-Ruiz, 2019). En la figura 8 se observa un ROV de este tipo.



FIG 8: Ejemplo ROV de oruga y arado  
(<https://www.smd.co.uk/wp-content/uploads/2018/05/QTrencher-1600.pdf>)

### 2.3 Aplicaciones generales de un ROV.

En la actualidad los ROV son elementos muy útiles y fiables para el ser humano, su sofisticado diseño permite en muchas ocasiones realizar trabajos peligrosos sin necesidad de poner en riesgo la vida de las personas. En este apartado se expondrán los campos más usuales donde a día de hoy se utilizan los ROVs.

- Acuicultura. Este es un campo de aplicación de los ROVs muy amplio. Algunas de sus aplicaciones son la prevención e inspección de bioincrustaciones o incrustaciones biológicas (cúmulo indeseable de microorganismos, plantas, algas y/o animales sobre estructuras mojadas), el análisis de datos e imágenes

en zonas estuáricas y explotaciones acuícolas, realización de controles visuales de especies, estudios sobre animales (tamaño, posición, etc), entre otras. (Gutiérrez-Estrada *et al.*, 2019).

- **Ámbito científico.** Para realizar estudios de la fauna y flora submarina, análisis del agua, presión, corrientes marinas, etc.
- **Salvamento.** Esta sección engloba principalmente la recuperación de cuerpos y salvamento de personas atrapadas.
- **Inspección.** De presas, de instalaciones (cables, tuberías o conductos enterrados bajo tierra), inspección de grietas y defectos. En muelles, se realiza el control de las paredes y cimentaciones, de los anclajes y las plataformas flotantes en el caso de pantanales, vigilancia de plataformas petrolíferas, barcos, etc
- **Limpieza de plataformas.**
- **Operaciones militares.** Como la recuperación de objetos, espionaje, detección de minas submarinas, etc.
- **Vigilancia de puertos.**
- **Realización de trabajos.** Como la excavación y colocación de tuberías, construcción bajo el agua, extensión de cables, operaciones de perforación, etc.

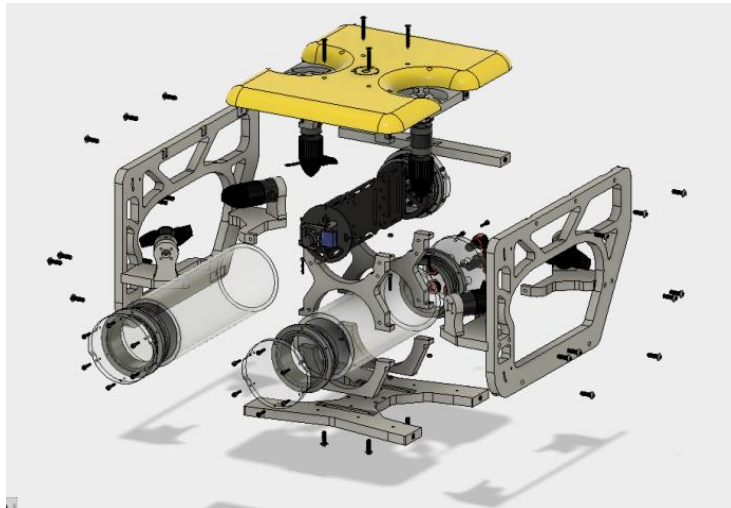


### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1 Descripción del ROV

En un principio la intención de este proyecto era realizar un diseño en base a un ROV que la Universidad de Huelva iba a comprar, donde se le facilitarían al alumno sus planos, medidas, características y los aspectos necesarios para conseguir un diseño similar al ROV original. Ante la situación que estamos viviendo en el país ocasionada por el COVID-19, la Universidad no ha logrado conseguir el ROV debido a la demora y paralización causada por el virus.

Ante este estado, se decidió seleccionar un modelo de ROV similar al de la universidad y facilitado por los profesores, y se realiza el diseño en función a ese nuevo modelo. En la figura 9 se muestra una imagen del ROV seleccionado.



**FIG 9: Imagen modelo de ROV seleccionado para realizar el diseño**  
(<https://shop.nidorobotics.com/sibiu-nano-maker-kit/>)

En cuanto a las características que son de interés para la realización del proyecto, es necesario señalar que este ROV, cuyo modelo es Sibiu Nano Maker Kit puede operar a una profundidad máxima de 100 metros desde el nivel del mar, su velocidad máxima son 3 nudos, o lo que es lo mismo 1,514 m/s, y tiene un peso de 5,15 kg (<https://shop.nidorobotics.com/sibiu-nano-maker-kit/>).

#### 3.2 Modelado 3D del ROV en Inventor

El modelado 3D es el proceso en el que, mediante un software, en este caso Autodesk Inventor, se crea una representación matemática de un objeto o una forma tridimensional. El objeto creado, es el denominado modelo 3D.

Se usa el modelo de ROV descrito en el apartado anterior (Sibiu Nano Maker Kit) y se diseña un nuevo prototipo intentado obtener resultados lo más semejantes posibles.

Cabe destacar que el diseño se hace únicamente de la carcasa del ROV, sin entrar en los componentes interiores que lo forman.

Pasos a seguir para realizar el diseño:

En primer lugar, cuando se abre el programa, aparece una ventana donde se debe seleccionar el tipo de diseño que se va a realizar, esto es, si se realizará una pieza, bien sean en 2 o 3 dimensiones, un ensamblaje, que se utiliza para unir o ensamblar diferentes piezas y crear el conjunto, o un dibujo, que se usa para crear anotaciones en un documento. Se muestra a continuación la ventana de inventor. Se debe seleccionar la primera opción, para crear una pieza en 3 dimensiones en formato normal.ipt. Cabe señalar que todo el diseño se ha realizado en un único formato ipt, es decir, el ROV diseñado no se ha formado ensamblando diferentes piezas. En la figura 10 se muestra la ventana de Inventor.

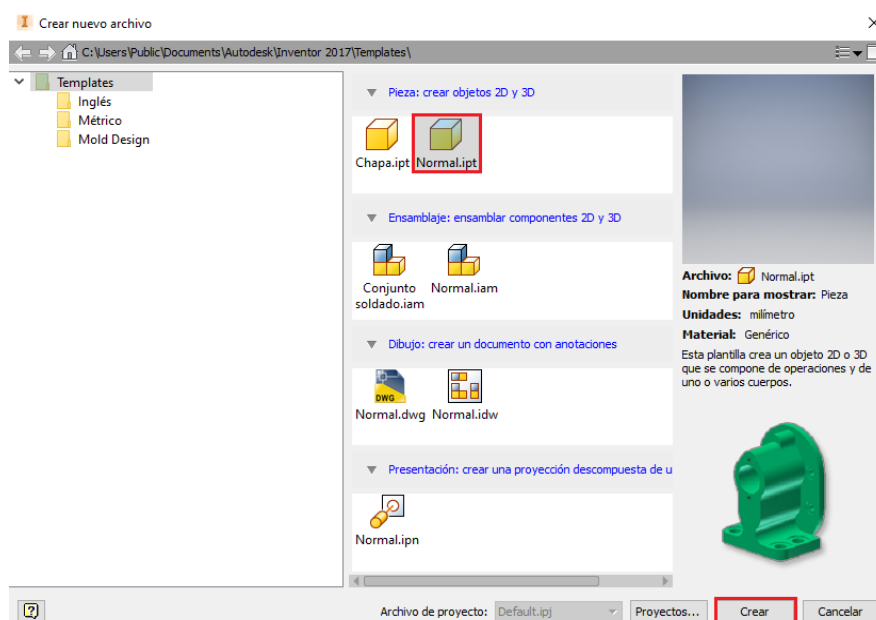


FIG 10: Configuración Inventor. Elección formato.

Seguidamente, una vez seleccionada la opción de dibujo en 3D, se debe elegir el plano en el que se quiere dibujar el ROV. El programa muestra unos ejes y se selecciona el plano vertical xy (marcado de rojo en la figura 11).

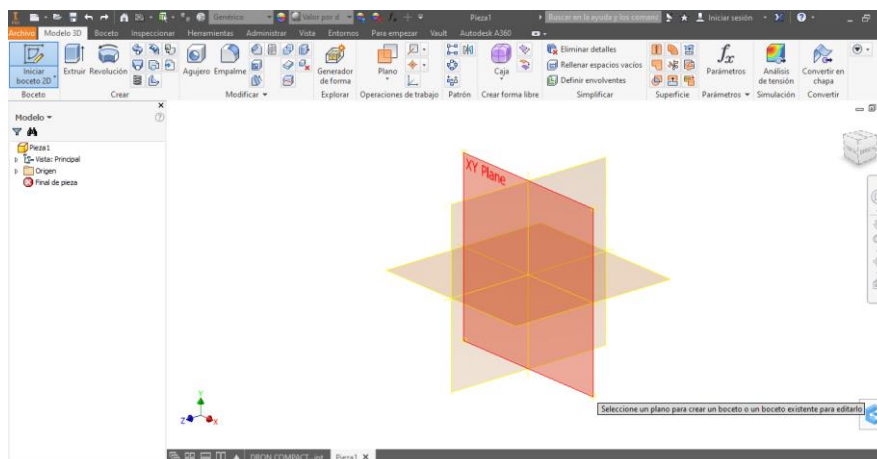


FIG 11: Configuración Inventor. Elección plano de trabajo.

Finalmente ya se puede comenzar a dibujar sobre el plano. El programa marca el punto central entre ejes. Seleccionando los comandos que aparecen en la barra superior (líneas, círculo, arco, rectángulo...) se comienza a realizar el diseño. Se muestra en la figura 12 el área de trabajo de Inventor.

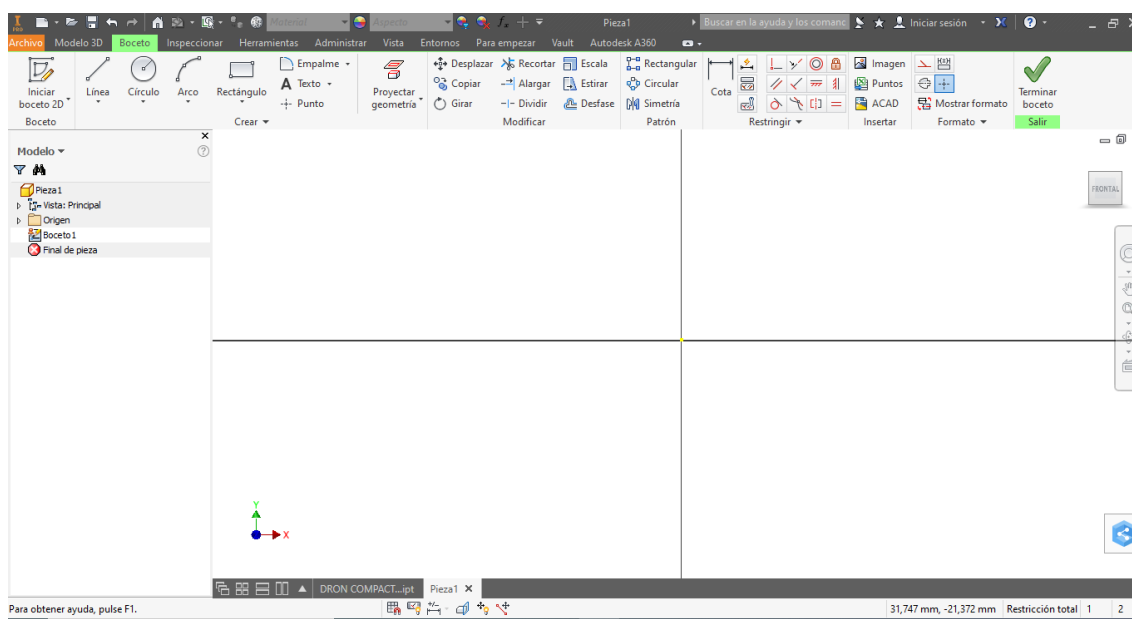


FIG 12: Área de trabajo Inventor.

El prototipo final de ROV diseñado se mostrará en el apartado de resultados.

### 3.3 ANSYS

Para realizar la modelación hidrodinámica del ROV diseñado usando modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se utiliza el programa de simulación de ANSYS. En concreto se trabajará con ANSYS Workbench. Con este proceso se puede

conocer la incidencia que el fluido tendrá sobre el modelo y las resistencias que el fluido, en este caso el agua marina, opondrá al movimiento del vehículo.

La Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) es una de las ramas de la Mecánica de Fluidos que resuelve y realiza problemas sobre el flujo de gases y líquidos basándose en métodos numéricos y algoritmos. Las ecuaciones que el programa utiliza para llegar al resultado final son de compleja resolución. En la actualidad, existen ecuaciones simplificadas para lograr resultados aproximados respecto a los obtenidos por el simulador, pero en ningún caso serán tan precisos como estos, ya que no deja de ser una mera aproximación numérica.

La forma de trabajo de ANSYS consiste en determinar una región alrededor del modelo 3D diseñado. A esta región se le denomina volumen de control y está formada por un gran número de celdas pequeñas que componen una malla. En cada una de estas celdas ANSYS resuelve una matriz algebraica, y mediante un proceso de iteración llega a una convergencia sobre el resultado final al cabo de un determinado número de iteraciones.

### 3.4 Descripción de las simulaciones

En este apartado se explica paso a paso el procedimiento a seguir para hallar las simulaciones utilizando el simulador ANSYS. Para comenzar, una vez que se abre la hoja de proyectos de Workbench, aparece una ventana de trabajo, y en ella, en el apartado de “Toolbox” → “Component Systems” → “Geometry”. Se hace click sobre el apartado de geometría y se arrastra hacia el espacio de trabajo “Project Schematic”. Se muestra en la figura 13 el modo de realizarlo.

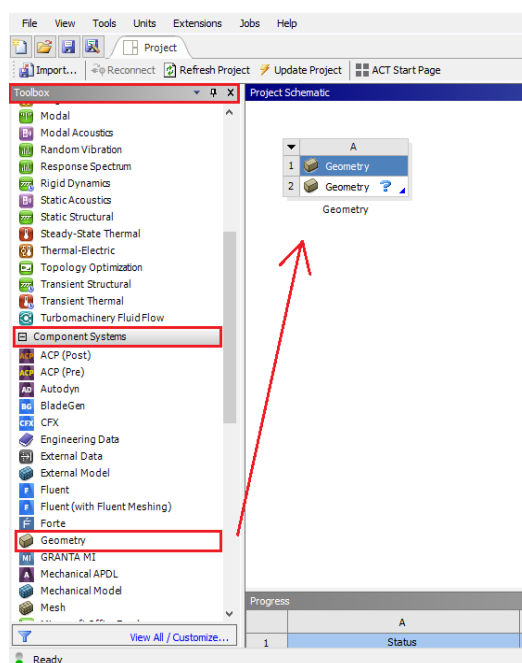


FIG 13: Inserción ventana de geometría

A continuación, se debe seleccionar la geometría sobre la que se quiere realizar la simulación, es decir, el modelo de ROV diseñado en Inventor, que debe estar en formato .igs (Previamente hay que exportarlo de Inventor para conseguir esa extensión.). Haciendo click sobre el apartado de geometría con el botón derecho, se selecciona la opción de “Import Geometry” y a continuación pueden aparecer dos opciones. La primera, que es la que se muestra en la imagen siguiente, donde el archivo del ROV diseñado en inventor con extensión .igs, aparece justo debajo del apartado “Browse”, en este caso, se hace click sobre el archivo exportado y ya pasaría a estar insertado en ANSYS. La siguiente opción, es que el archivo .igs no aparezca debajo de “Browse”, en este caso, de manera sencilla se hace click sobre “Browse”, aparecerá una nueva ventana, donde se selecciona la ubicación y carpeta donde se haya guardado el diseño, y de esta forma pasaría a formar parte de ANSYS. En la figura 14 se muestra la forma de realizarlo en la ventana de ANSYS.

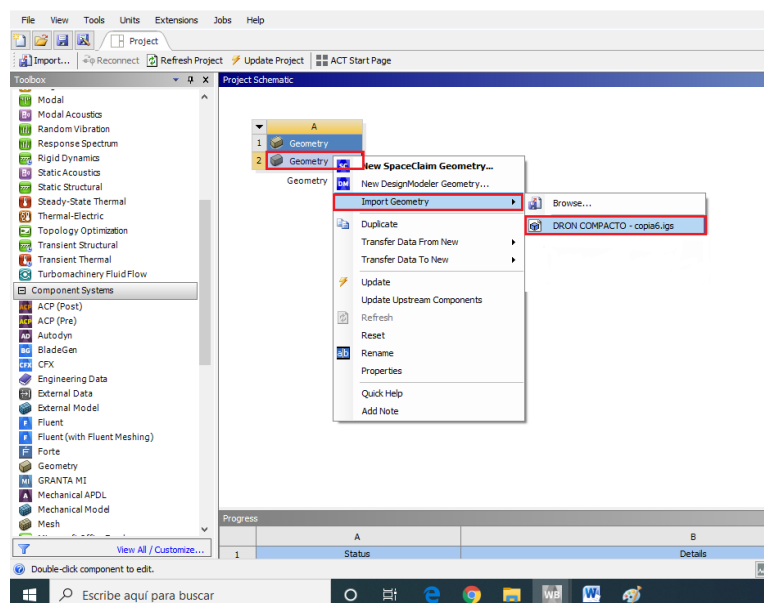


FIG 14: Inserción modelo 3D del ROV en ANSYS

Una vez se tiene el prototipo de ROV en ANSYS, el siguiente paso es crear un volumen de control alrededor de este, esto consiste en crear un espacio sobre el que se realizará posteriormente el análisis de fluido. Para realizarlo, se duplica la ventana de geometría anteriormente creada (Se hace click derecho sobre “Geometry” y se selecciona el apartado de “Duplicate”) Automáticamente, aparecerá otra ventana idéntica sobre el espacio de trabajo “Project Schematic”, a la que se denominará “volumen de control”. Este volumen de control hay que configurarlo en el programa, para ello, de nuevo, se hace click sobre el apartado de “geometría” dentro del volumen de control, se selecciona la opción “Edit Geometry in DesignModeler” y aparecerá una ventana como la mostrada en la siguiente imagen, donde únicamente hay que generar la importación de la geometría. Se muestra en la figura 15.

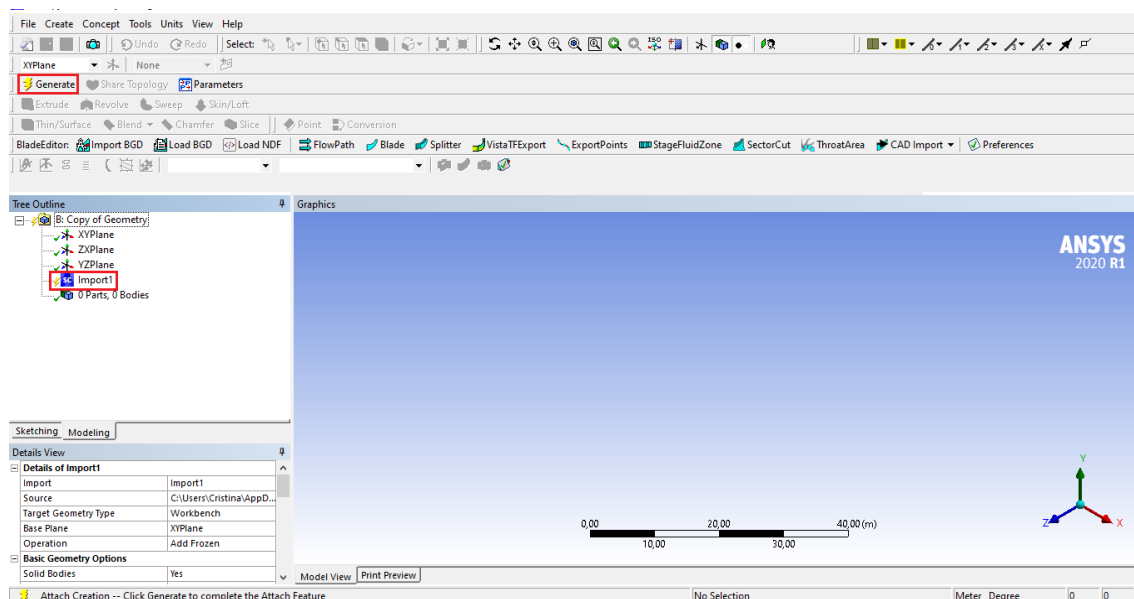


FIG 15: configuración de la geometría

Una vez realizado el procedimiento anterior, el modelo 3D debe aparecer en la ventana de “Graphics” y a continuación se determina el volumen de control. (“Sketching” → “Draw” → “Rectangle”) Se realiza un rectángulo alrededor de la pieza, este interesa que sea de grandes dimensiones, para apreciar mejor las líneas de corriente. Se muestra en la figura 16.

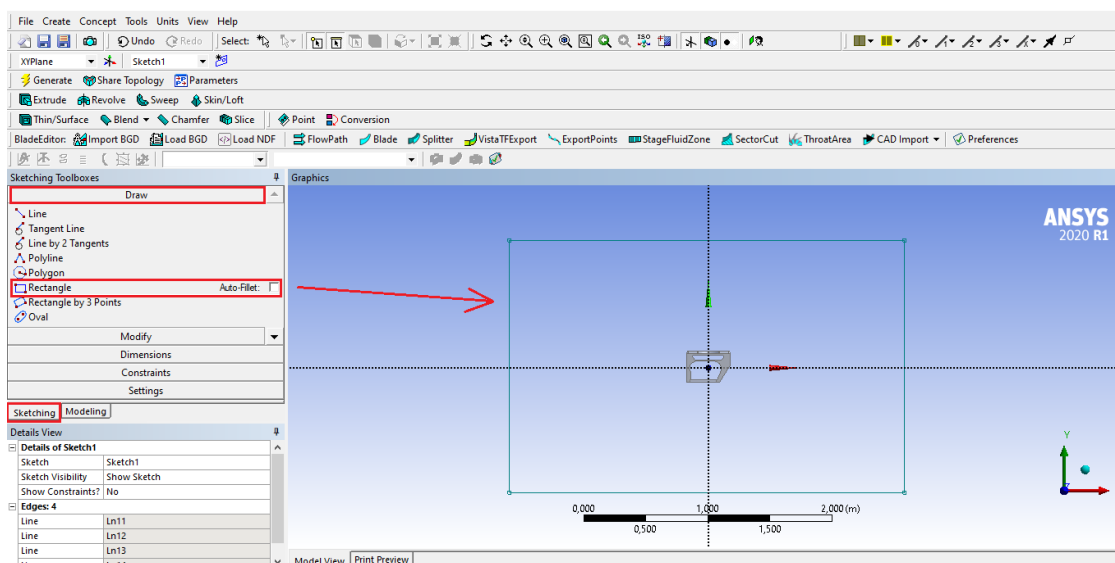


FIG 16: Definición del área de control

Posteriormente se extruye el rectángulo dibujado para darle volumen y se realiza una serie de configuraciones: “Details View” → “Details of Extrude1” → “Operation : Add Frozen” → “Direction: normal” → “FD1,Depth: 1.2m” y finalmente se genera el volumen de control (haciendo click sobre “Generate” en la parte superior izquierda)

El siguiente paso a realizar es crear un “Boolean” esto se realiza para que el cubo del volumen de control diseñado no englobe al perfil del ROV, y justo en el espacio donde éste se ubica, no exista volumen de control, sino que únicamente se encuentre el modelo 3D diseñado. (“Create” → “Boolean” → “Operation: Subtract” → “Targeted Bodies: seleccionar la superficie del cubo” → “Tool Bodies: seleccionar la superficie del ROV” → “Generate”) Se obtiene el cubo que representa el volumen de control, y el ROV en su parte central. Se muestra en la figura 17.

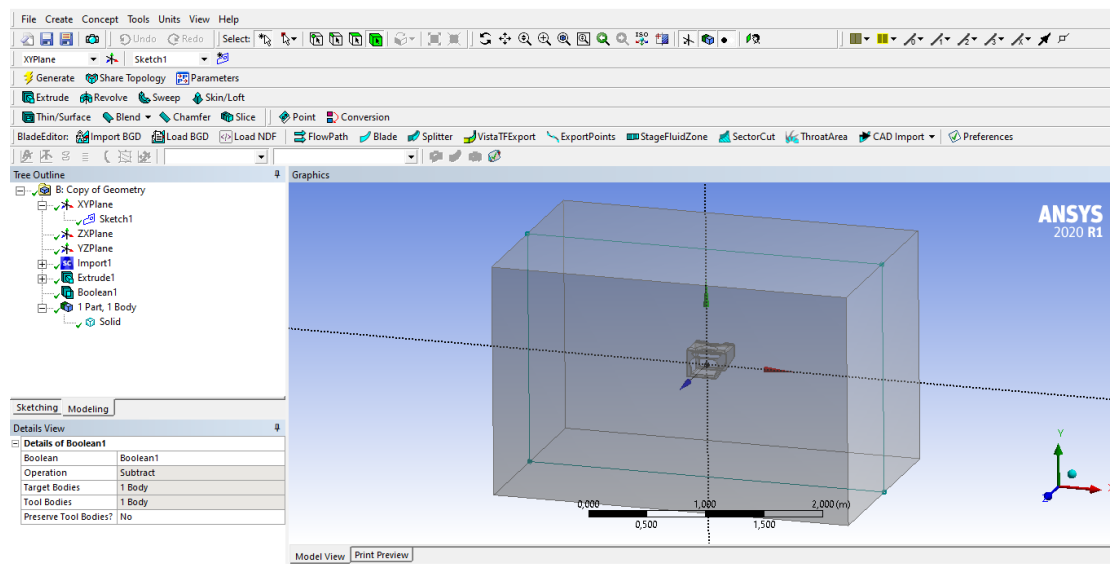


FIG 17: Representación del volumen de control final

Una vez realizado este procedimiento se ha concluido con la edición del volumen de control. Se vuelve a la pantalla principal de ANSYS (Workbench) y se comienza a realizar el análisis de fluido siguiendo los siguientes pasos: “Toolbox” → “Analysis Systems” → “Fluid Flow (Fluent)”. De la misma manera que se explicó al crear la geometría, se arrastra la ventana de “Fluid Flow (Fluent)” hacia el espacio de trabajo “Project Chematic”, y se obtienen dentro de Fluid Flow cinco ventanas diferentes: “Geometry”, “Mesh”, “Setup”, “Solution” y “Results”. Se muestra en la figura 18.

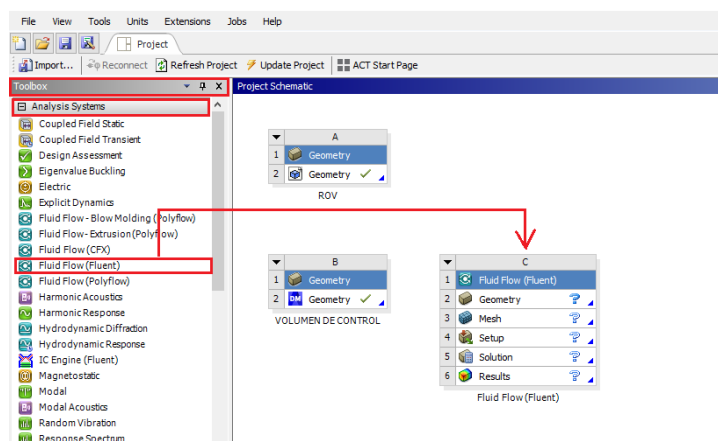


FIG 18: Inserción ventana de Fluid Flow (Fluent)



Sobre la ventana de geometría, hay que arrastrar la geometría correspondiente al volumen de control definido anteriormente (una vez arrastrada, si se ha configurado correctamente, aparecerá un tick de color verde en la parte derecha, en el lugar donde se encuentran los símbolos de interrogaciones, como se puede ver en la figura 17).

Para configurar el siguiente apartado correspondiente al mallado, “Mesh” se realiza doble click sobre este y se abre automáticamente la pantalla de “meshing”. En ella se puede realizar la configuración deseada del mallado en la parte inferior izquierda, “Details of Mesh”. El mallado del ROV y del volumen de control se ha realizado con la configuración por defecto de ANSYS, de modo que se obtiene un mallado con la siguiente forma (figuras 19 y 20):

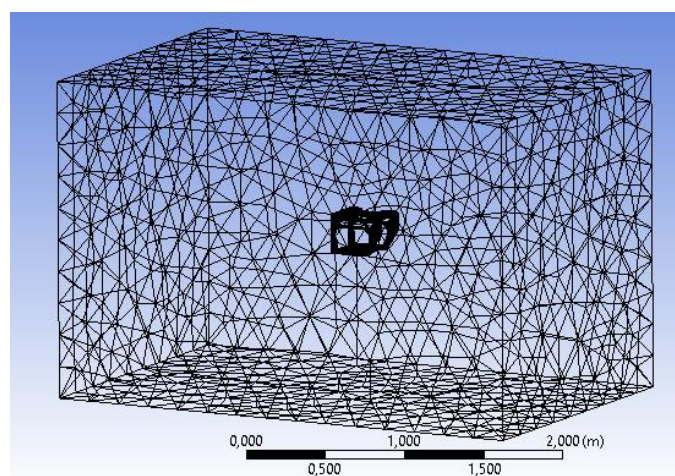


FIG 19: Mallado del volumen de control y ROV

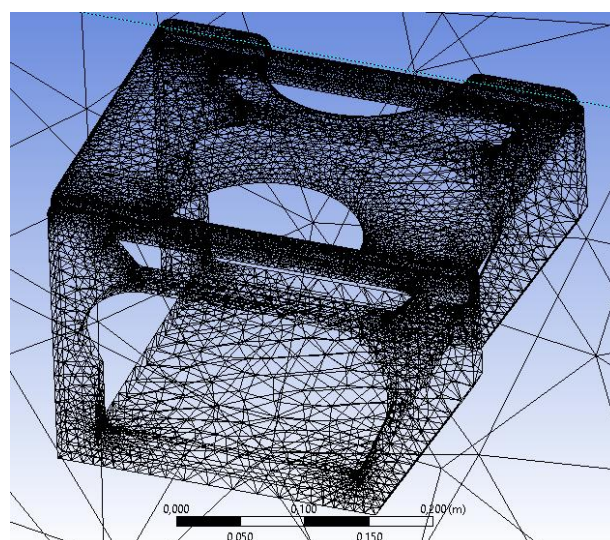


FIG 20: Mallado del ROV

El último paso a realizar dentro de la configuración del mallado consiste en definir las caras del volumen de control. La forma de proceder consiste en seleccionar la cara o

caras, hacer click derecho sobre la misma y seleccionar la opción de “Create Named Selection...”, donde se introduce el nombre de cada cara. La cara frontal se denominará por “entrada”, que como indica el nombre cuando el fluido se encuentre en movimiento, es por esa zona por donde entra. La cara trasera se definirá por “salida”, y el resto de caras será el denominado “wall”, que se traduce a español como muro o pared, y este delimita las caras exteriores del volumen de control. Sobre la imagen mostrada anteriormente (figura 20), el fluido avanzaría desde la parte izquierda hacia la parte derecha, es decir, la entrada corresponde a la cara del volumen de control ubicada en la zona izquierda y la salida a la cara ubicada en la zona derecha.

Se pasa al tercer apartado de configuración, “*Setup*” donde hay que configurar todos los parámetros del fluido, velocidades, valores de referencia, etc. La primera ventana que aparecerá antes de abrir la hoja de trabajo, es la mostrada en la figura 21, debemos hacer click en “dimensión 3D” y activar la pestaña de “*double precision*”.

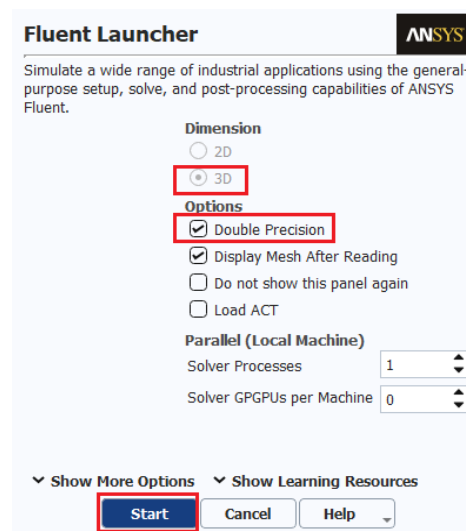


FIG 21: Configuración ventana Setup

Se comienza editando los valores del fluido (“*Setup*” → “*Materials*” → “*Fluid*”). Aparece una nueva ventana para crear o editar el tipo de material, en ella se define que se trata de agua (water) y las diferentes propiedades que esta tiene, teniendo en consideración que es agua marina (densidad =  $1.028 \text{ kg/m}^3$  y viscosidad =  $0,008 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ). Se muestra en la figura 22.

FIG 22: Configuración del tipo de fluido

En el siguiente apartado, hay que definir las condiciones en las que se encuentran las caras del volumen de control definidas en el apartado de mallado. En la cara de la entrada, se selecciona únicamente la velocidad a la que viajará el fluido y la presión a la que se encuentre el ROV. En la cara de la salida hay que seleccionar un valor de presión de salida de 0 Pascales, para que el fluido tenga completa libertad de movimiento.

Finalmente en el apartado de valores de referencia, “*Reference Values*”, de nuevo se establece la densidad del fluido ( $1.028 \text{ kg/m}^3$ ), la profundidad a la que se sumerge el ROV, la presión, temperatura (297 K), la velocidad y la viscosidad del agua marina ( $0,008 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ). Cabe destacar que este estudio se realiza para tres valores de velocidades diferentes (1,2 y 3 nudos, o lo que es lo mismo, 0,514, 1,029 y  $1,543 \text{ m/s}$  respectivamente) y 3 valores de profundidades diferentes (superficie, -2.5m y -5m) y por tanto el proceso de definición de valores explicado anteriormente hay que realizarlo 9 veces, cada una de ella con los datos correspondientes de velocidad, presión y profundidad. La presión dependerá de la profundidad del fluido, aunque como se verá en posteriores apartados, como las variaciones de profundidades son muy pequeñas, la repercusión que ésta tendrá sobre los resultados finales serán insignificantes.

Presión bajo el agua = presión atmosférica + presión hidroestática.

La presión hidroestática varía respecto a la profundidad. Normalmente cada 10 metros de profundidad, se añade 1 atmósfera de presión, que equivale a 101.325 pascales, por tanto:

Presion (0m) = 101.325 Pascales.

Presión (-2.5m) =  $101.325 + \frac{101325}{4} = 126.656,2$  Pascales.

Presión (-5m) =  $101.325 + \frac{101325}{2} = 151.987,5$  Pascales.

Para finalizar el proceso de configuración, solo resta inicializar la solución (“*Solution*” → “*Monitors*” → “*Initialization*” → “*Initialize*”), seleccionar el número de iteraciones y calcular la solución (“*Solution*” → “*Calculation Activities*” → “*Run Calculation*” → “*Parameters*” → “*Number of Iterations*: seleccionar número de iteraciones” → “*Calculate*”) Sobre el número de iteraciones es importante señalar que la solución será más precisa mientras mayor número de iteraciones realice el programa para hallar el resultado final. En este caso el número de iteraciones será de 50, es un valor pequeño, pero debido a que este proyecto se está realizando con el ordenador personal del alumno, éste no permite mayor número de iteraciones por no tener mayor capacidad. Hay que ser consciente de que los resultados obtenidos serán, a groso modo, valores aproximados a los reales.

Con todo este proceso, ya se tiene definida la configuración para obtener las simulaciones. Para ver la representación de éstas, hay que abrir el último apartado de “*Fluid Flow*”, el denominado “*Results*”. A continuación se explicarán los pasos a seguir para la obtención de los parámetros necesarios:

### Velocidad alrededor del ROV:

Respecto a la velocidad se representarán dos tipos de gráficas.

Opción 1: “*Results*” → “*Insert*” → “*Isosurface*” y aparecerá una nueva ventana donde se selecciona el tipo de variable que se quiere obtener, en este caso la velocidad. En la figura 23 se muestra la configuración.

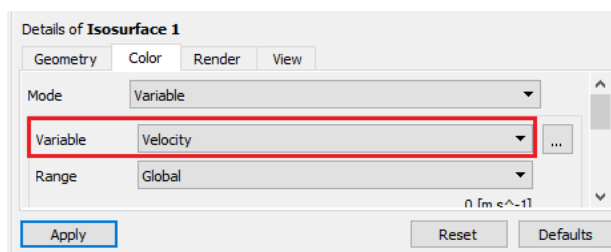


FIG 23: Configuración velocidad

Opción 2: “*Results*” → “*Insert*” → “*Streamline*”. Aparece una ventana similar a la imagen anterior, donde hay que configurar “*Start from*: isosurface”, y la variable velocidad (“*Variable*” → “*Velocity*”)

### Presión del ROV:

“*Results*” → “*Insert*” → “*Contour*”. En la ventana que aparece configurar: “*Domains*: solid” → “*Localitation*: wall solid” → “*Variable*: pressure” → “*Of contour*: 25”. En la figura 24 se muestra la configuración.

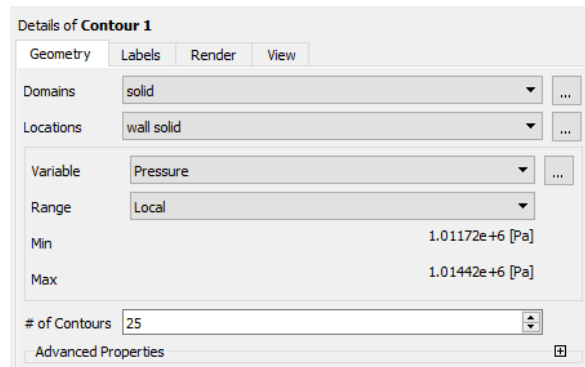


FIG 24: Configuración presión

### Formación de vórtices:

Se realiza sobre la misma ventana explicada anteriormente (“Contour”), solo que ahora tendrá una configuración distinta:

“Domains: solid” → “Localitation: isosurface” → “Variable: velocity u” → “Of contours: 30”. Se muestra en la figura 25.

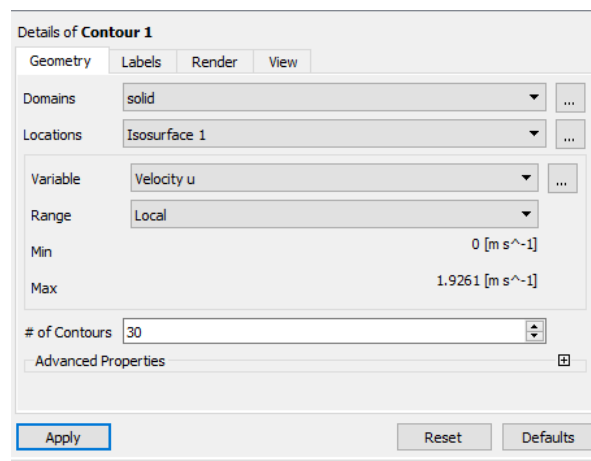


FIG 25: Configuración vórtices

### Turbulencia formada por la energía cinética:

De nuevo sobre la ventana de “Contour” se configuran los siguientes parámetros:

“Domains: solid” → “Locations: Wall solid” → “Variable: Turbulence Kinetic Energy” → “Range: local”. Se muestra en la figura 26.

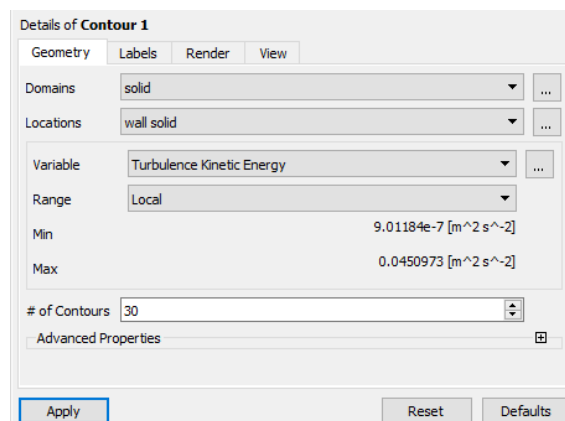


FIG 26: Configuración turbulencia por energía cinética

### Wall shear:

Este parámetro define la resistencia que el fluido opone ante el movimiento del cuerpo sumergido.

“Results” → “Insert” → “Vector”. En la ventana correspondiente al vector, editar los siguientes parámetros: “Dominio: solid” → “Locations: wall shear” → “Factor: 1” → “Variable: Wall Shear”. Se muestra en la figura 27.

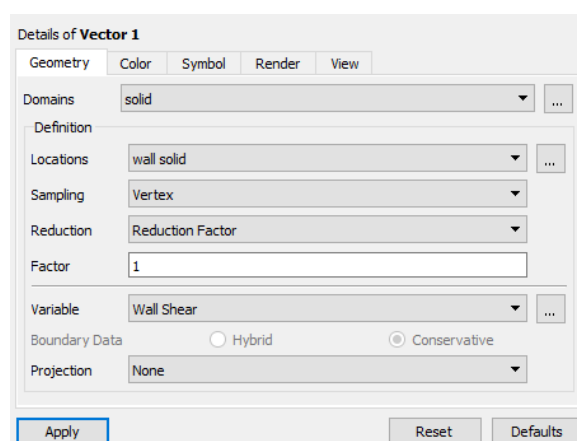


FIG 27: Configuración Wall Shear

### 3.5 Descripción de los coeficientes hidrodinámicos

Para afrontar este apartado, es necesario previamente definir las variables hidrodinámicas que se van a calcular, y estas, en definitiva son unos coeficientes y fuerzas de arrastre o resistencia hidrodinámica y de sustentación a las que el ROV se

ve sometido al hallarse sumergido bajo un fluido, en este caso agua marina, y realizar un movimiento a una determinada presión y velocidad.

Mediante un proceso iterativo realizado a través de ANSYS y que se explicará posteriormente, se hallan los siguientes coeficientes:

- $C_D$ : coeficiente de resistencia hidrodinámica o coeficiente de arrastre.
- $C_L$ : coeficiente de sustentación o coeficiente de elevación.
- $F_D$ : Fuerza de arrastre o resistencia hidrodinámica.
- $F_L$ : Fuerza de elevación o sustentación hidrodinámica.

Configuración de los coeficientes hidrodinámicos:

Para obtener los valores correctos de los coeficientes y fuerzas expuestas anteriormente, hay que realizar su configuración en la pestaña de “set up” dentro del sistema de análisis de “fluid flow (fluent)” de ANSYS. Aparecerá la ventana mostrada en la figura 28, donde debemos hacer click en “dimensión 3D” y activar la pestaña de “double precision”.

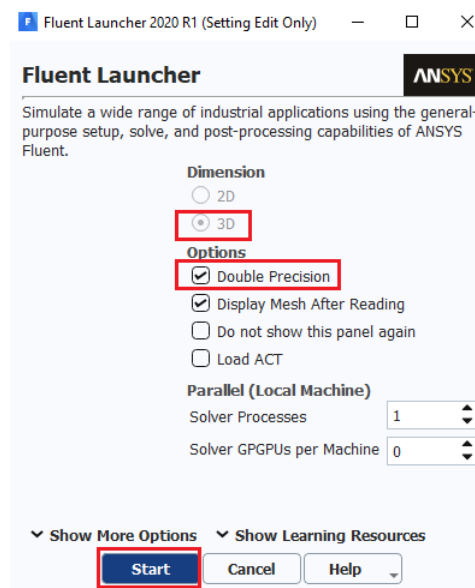


FIG 28: Configuración dimensión y tipo de precisión de Fluid Flow

Posteriormente pasamos a introducir cada coeficiente. En el apartado de “solution” → “report definitions” → “new” → “force report” → “drag”, como se representa en la figura 29.



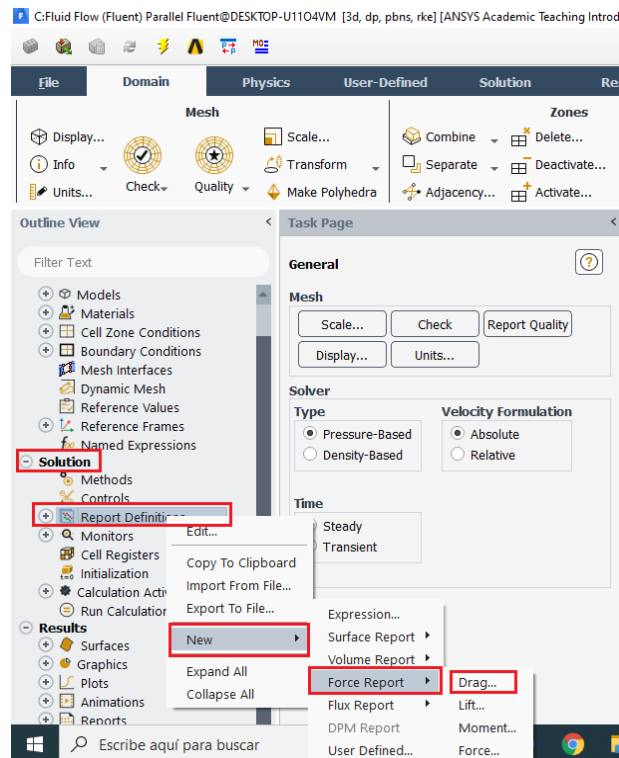


FIG 29: Creación de definiciones para parámetro  $C_D$

Se configura en primer lugar el coeficiente  $C_D$ . Se marca la pestaña de “*Drag Coefficient*” y “*wall-solid*”, que hace referencia al ROV. Se muestra en la figura 30.

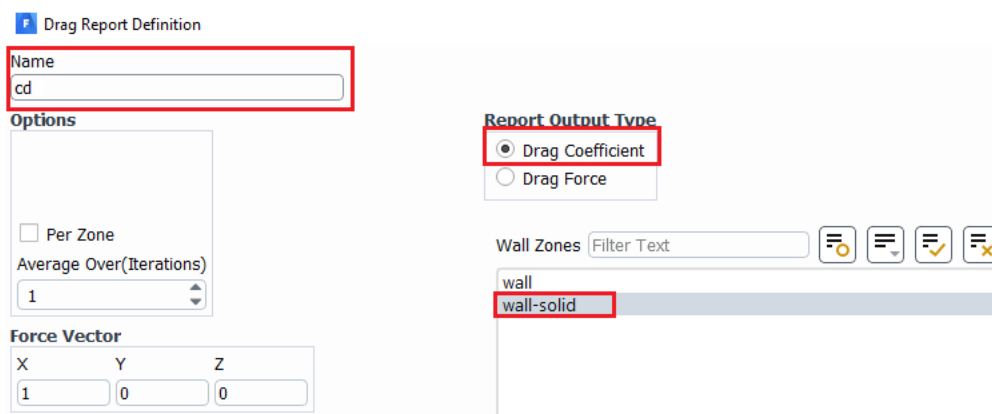


FIG: 30: Configuración del coeficiente de resistencia hidrodinámica

Usando el mismo procedimiento, se configura el resto de coeficientes, aunque no en todos hay que marcar las mismas zonas y se difiere si es coeficiente o fuerza. Se detalla a continuación.

Se procede a configurar ahora el coeficiente de sustentación  $C_L$ . En el apartado de “*solution*” → “*report definitions*” → “*new*” → “*force report*” → “*lift*”, como se puede ver en la figura 31.

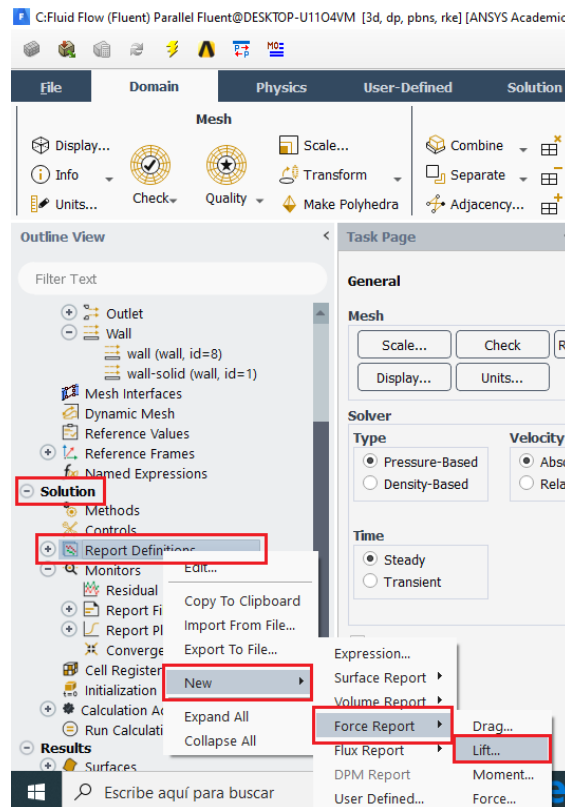


FIG 31: Creación de definiciones para parámetro  $C_L$

En la siguiente ventana, se marca la pestaña de “Lift Coefficient” y en la zona de trabajo “wall-solid y wall”. Se muestra en la figura 32.

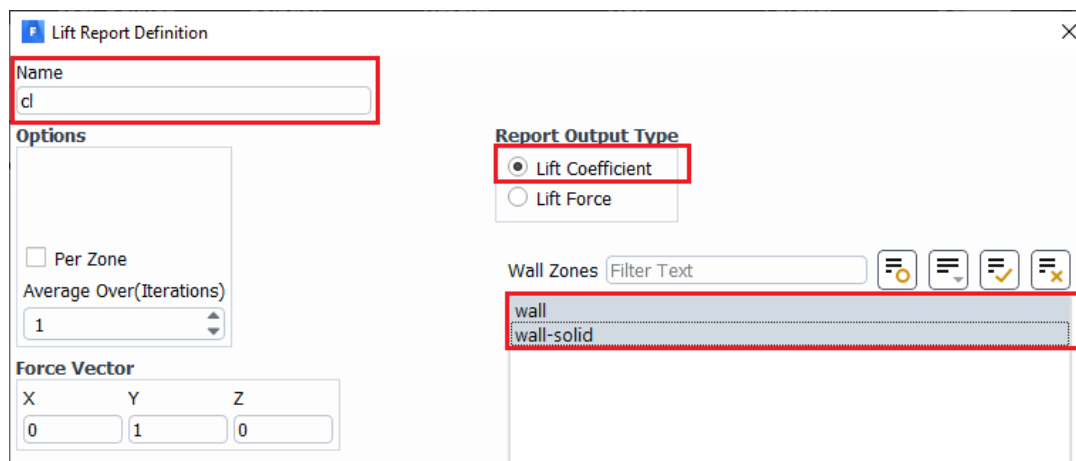


FIG: 32: Configuración del coeficiente de sustentación.

Se pasa a continuación a definir las fuerzas. Se comienza por la fuerza de arrastre  $F_D$ . En el apartado de “solution” → “report definitions” → “new” → “force report” → “drag”, como se muestra en la figura 33.

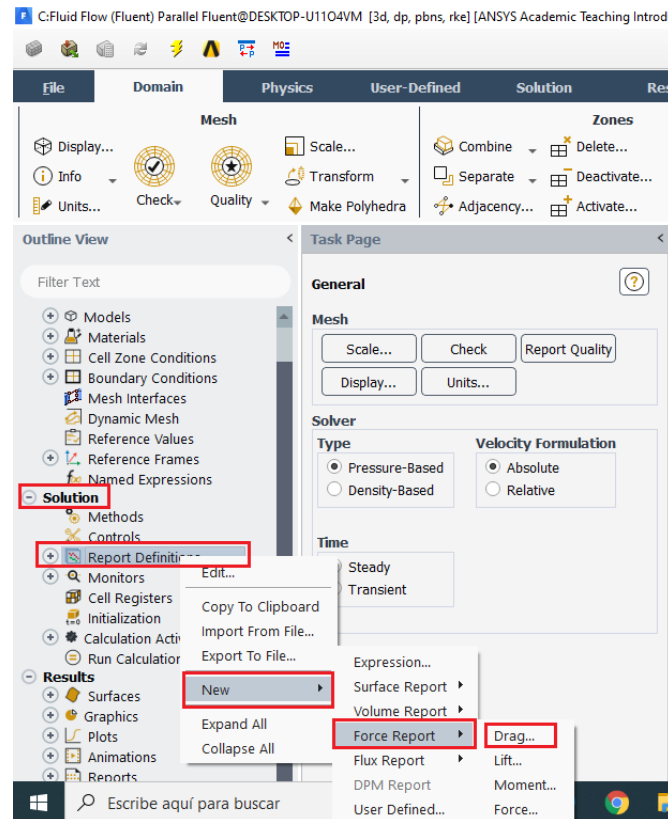


FIG 33: Creación de definiciones para la fuerza  $F_D$

En la siguiente ventana que aparece, se establece el nombre del coeficiente, se marca la pestaña de “Drag Force” y “wall-solid”, que hace referencia a la zona del ROV. Se muestra en la figura 34.

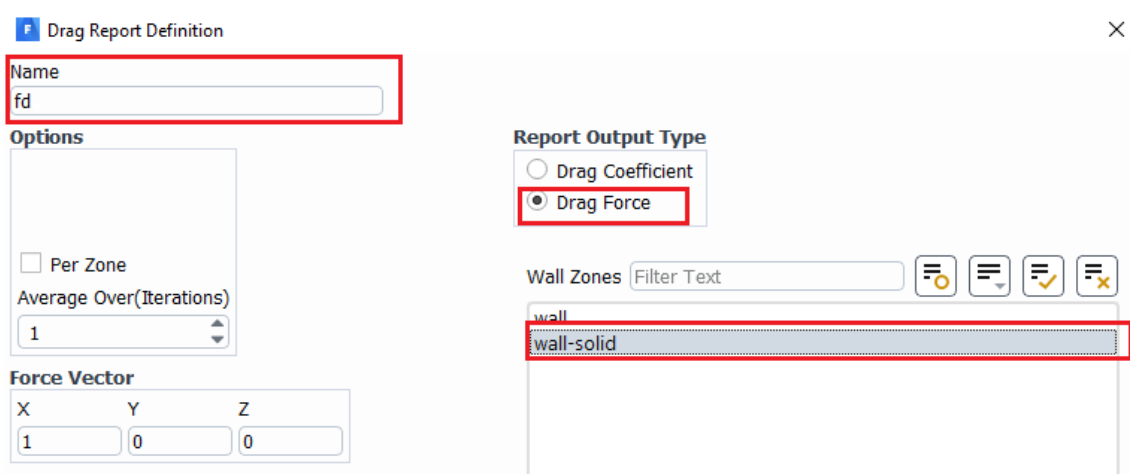


FIG: 34: Configuración de la fuerza de arrastre.

Por último se define la fuerza de elevación o sustentación hidrodinámica,  $F_L$ . En el apartado de “solution” → “report definitions” → “new” → “force report” → “lift”, como se puede ver en la figura 35.

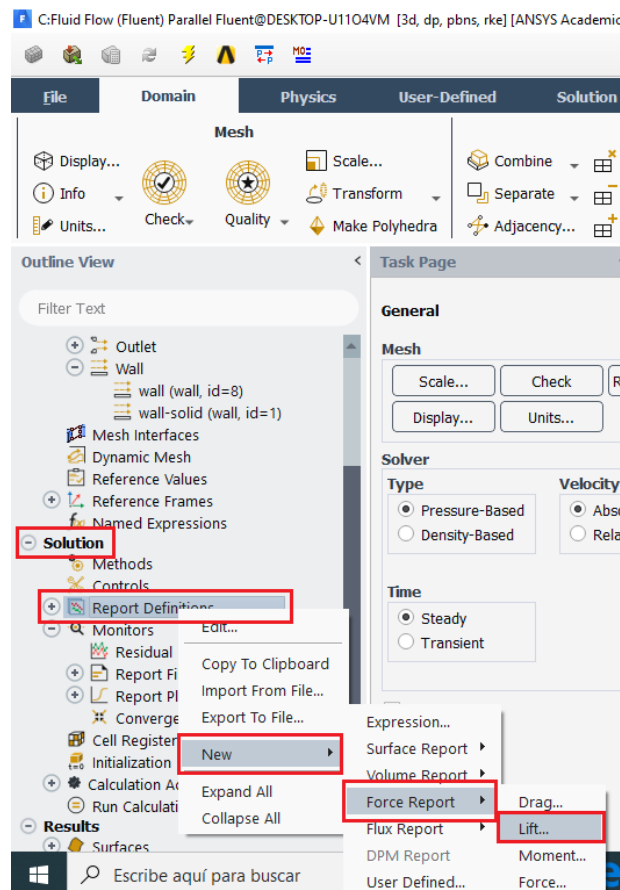


FIG 35: Creación de definiciones para la fuerza  $F_L$

Y en la ventana de “*Drag Report Definition*”, se establece el nombre de la fuerza, se marca la pestaña de “*Lift Force*” y en la zona de trabajo “*wall-solid* y *wall*”, que hace referencia a toda la zona de trabajo. Se muestra en la figura 36.

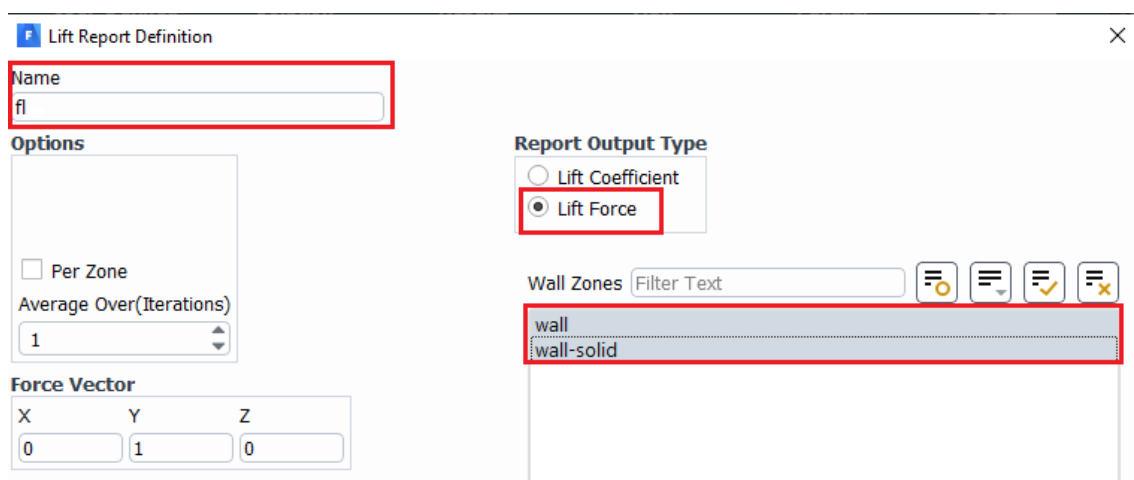


FIG 36: Configuración de la fuerza de elevación.

Una vez realizado todo este procedimiento, ya se tienen definidas en el programa las fuerzas y los coeficientes hidrodinámicos, a continuación, para que el programa muestre por pantalla los valores numéricos de todos los coeficientes en cada iteración,

hay que realizar de nuevo otra configuración en el programa. En el apartado de “solution” → “Report files” → “New”. Se muestra en la figura 37.

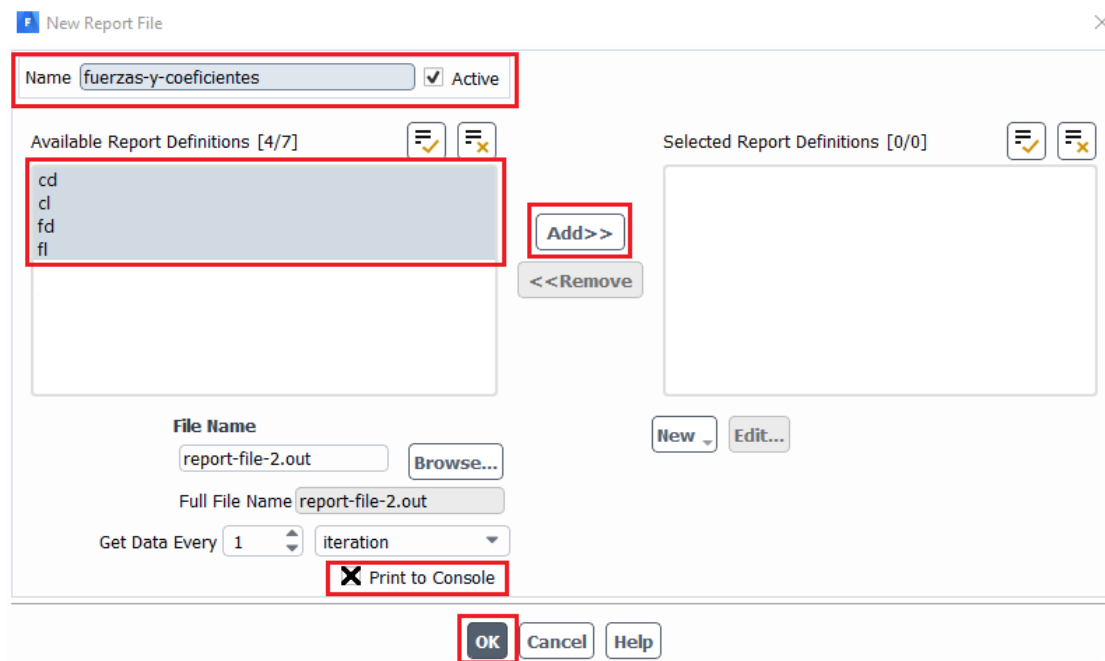


FIG 37: Configuración de los coeficientes y fuerzas para mostrarse en pantalla.

Ya han quedado definidas y configuradas todas las fuerzas y coeficientes hidrodinámicos que se desean obtener, solo resta definir el tipo de iteración que se requiere. En este caso, se va a realizar con un número pequeño, concretamente 50 iteraciones, debido a que el ordenador con el que se está realizando el proyecto no es muy potente y no tiene más capacidad. Lo ideal sería realizar un gran número de iteraciones, para de esta forma apreciar claramente hacia qué valor converge cada coeficiente, esto se podrá apreciar tanto en la gráfica que se obtendría como en los valores numéricos.

Se procede por tanto a la iniciación y cálculo de iteraciones (figura 38), en el apartado de “solution” → “Initialization” → “Hybrid Initialization” → “Initialize”

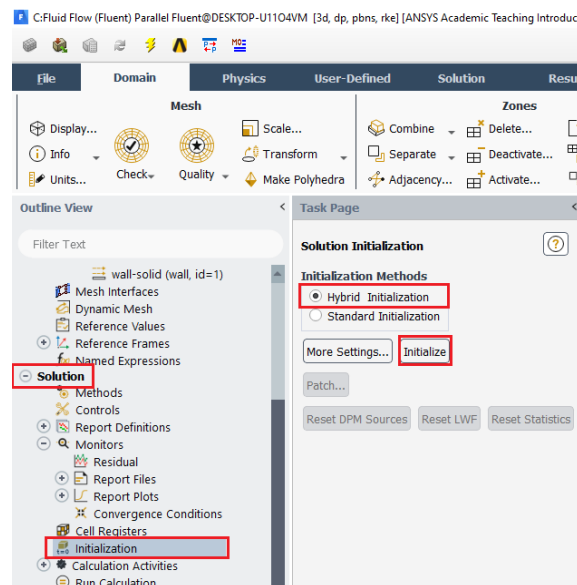


FIG 38: Inicialización de la solución.

Una vez Inicializada la solución, en el mismo apartado de “solution” → “calculation activities” → “Run calculation” → establecer número de iteraciones deseadas → “calculate”. Se muestra en la figura 39.

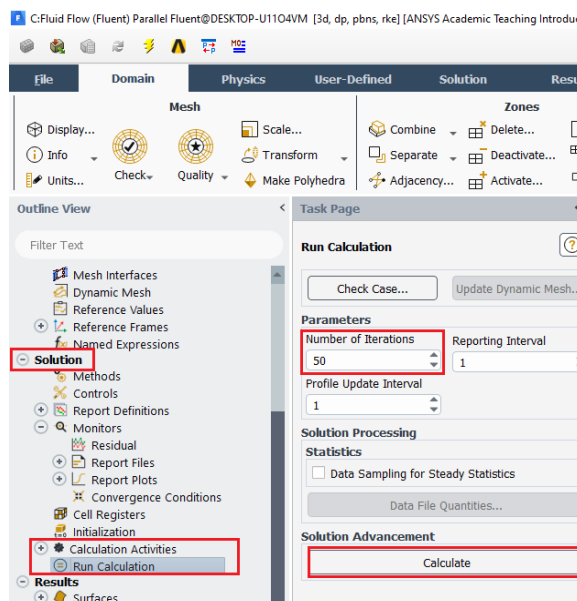


FIG 39: Cálculo de los coeficientes

Una vez calculadas todas las iteraciones configuradas, nos aparecerá una ventana (“console”) que muestra los valores finales de todos los coeficientes en cada iteración. Estos valores se pueden exportar y abrirlos en una hoja de Excel, y de este modo se pueden realizar gráficas, aunque también se puede realizar una nueva configuración sobre ANSYS de forma sencilla y muestra por pantalla las gráficas necesarias.

En el apartado de resultados se muestran todos los valores de las iteraciones junto con las gráficas y tablas correspondientes.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Modelos en 3D en Inventor

El modelo de ROV diseñado, tomando como base principal el modelo facilitado por los profesores (ROV Sibiu Nano Maker Kit) se muestra en la figura 40.

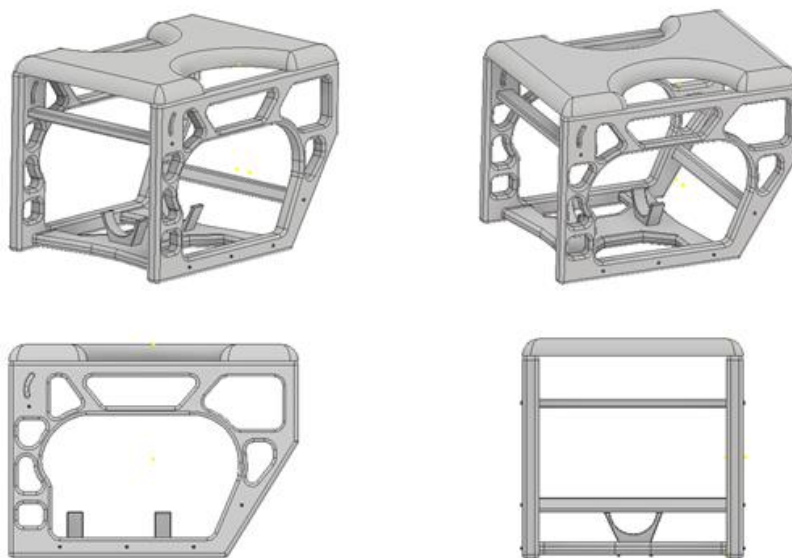


FIG 40: Diseño modelo 3D en varias perspectivas

A la hora de importar este modelo diseñado a ANSYS, el programa mostraba una serie de errores causados por tener una geometría demasiado compleja. El proyecto se ha realizado con la versión de ANSYS para estudiantes (ANSYS Academic), y esta tiene algunas limitaciones, como limitaciones en la geometría (máximo 50 cuerpos y 300 caras) o limitaciones respecto al número de cuadrículas en la que se van a simular las distintas partículas del fluido (máximo 512 cuadrículas), por tanto, se decidió simplificar el diseño ya realizado, hasta obtener un modelo aceptado por el programa. El resultado de diseño final con el que se han hecho las simulaciones y el estudio de coeficientes hidrodinámicos se muestra en la figura 41.

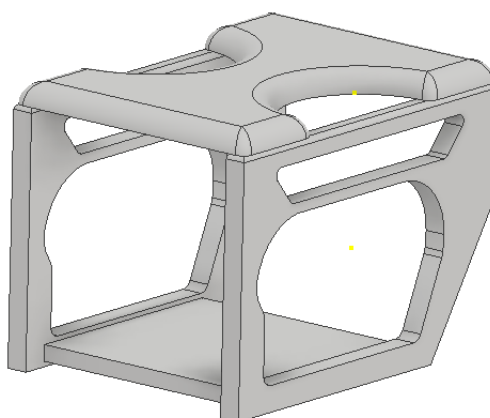


FIG 41: Diseño simplificado modelo 3D



Como se puede apreciar, el ROV ha sufrido una gran modificación, se han eliminado todo tipo de detalles y se ha dejado la estructura principal lo más básica posible. Un aspecto a tener en cuenta es la simplificación sobre los empalmes. Estos en un principio fueron diseñados con el objetivo de eliminar las enormes tensiones que se forman en las esquinas, que puede llegar a ocasionar a raíz de una micro fisura, que se produzca la propagación inmediata de esta, lo que podría acabar rompiendo la estructura del ROV. Por tanto, este diseño se adecua y adapta para realizar este estudio, pero no sería el más idóneo para llevar el proyecto a la realidad.

## 4.2 Simulaciones en ANSYS

Se muestran a continuación imágenes sobre las simulaciones halladas para las diferentes velocidades y profundidades.

Velocidad: 0,514 m/s. Profundidad: superficie

Presión (figuras 42 y 43):

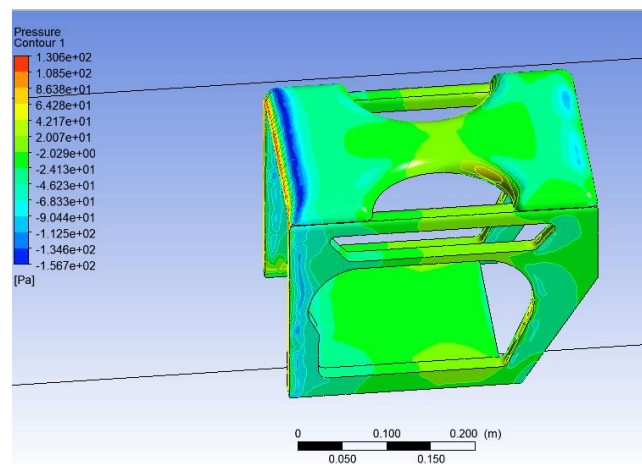


FIG 42: Simulación de la presión vista desde perspectiva. Velocidad 0,514 m/s

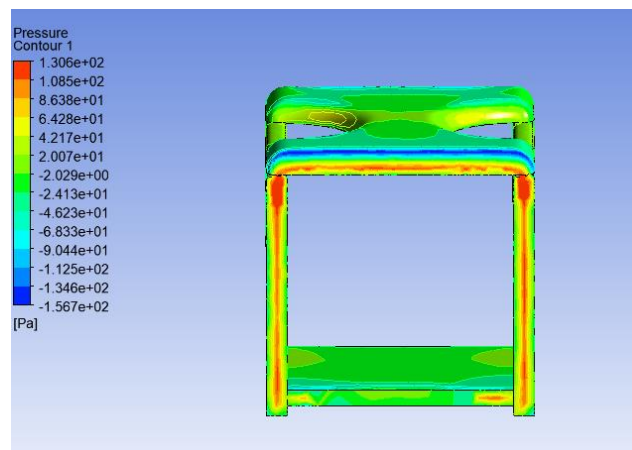


FIG 43: Simulación presión vista frontal. Velocidad 0,514 m/s

Turbulencia causada por la energía cinética (figura 44):

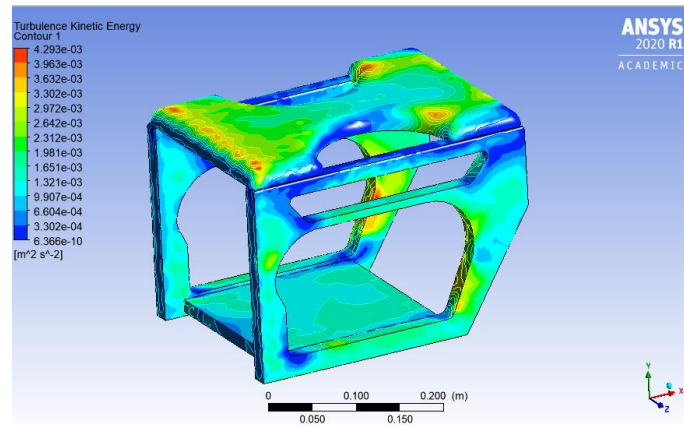


FIG 44: Simulación turbulencia. Velocidad 0,514 m/s

Wall Shear (figura 45):

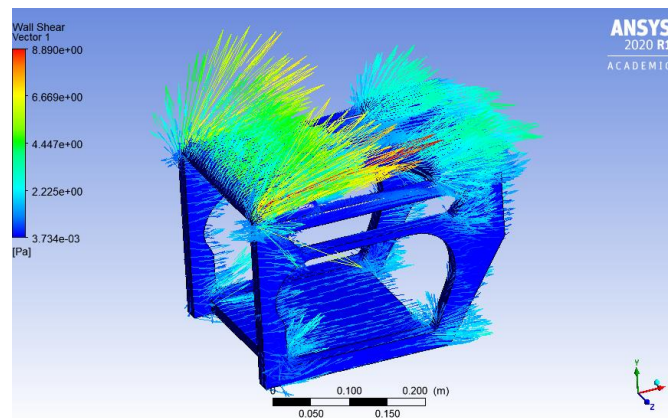


FIG 45: Simulación Wall-Shear. Velocidad 0,514 m/s

Velocidad alrededor del ROV (figura 46):

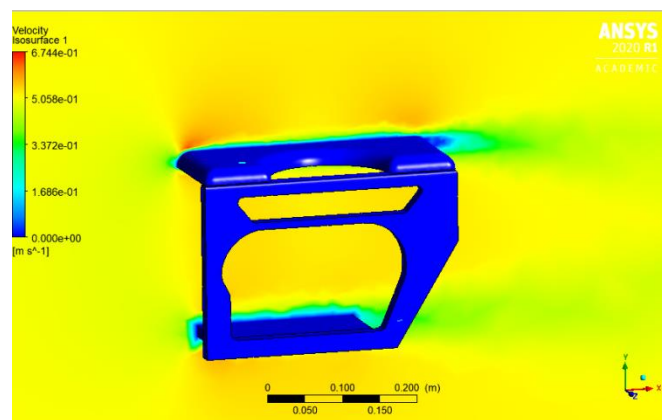


FIG 46: Simulación velocidad. Velocidad 0,514 m/s

Líneas de corriente (figura 47):

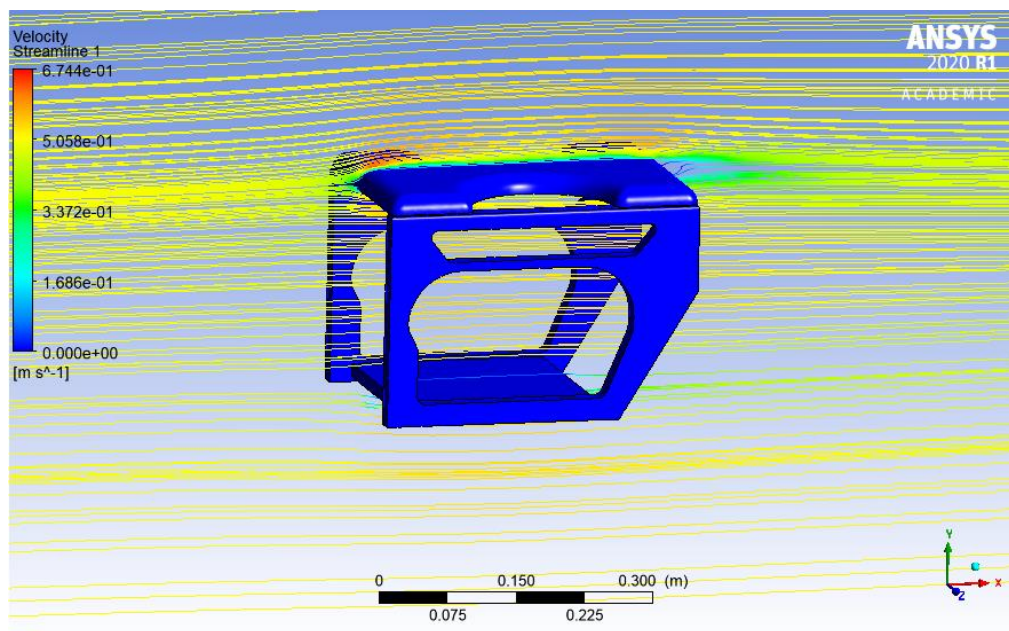


FIG 47: Simulación líneas de corriente. Velocidad 0,514 m/s

Formación de vórtices (figura 48):

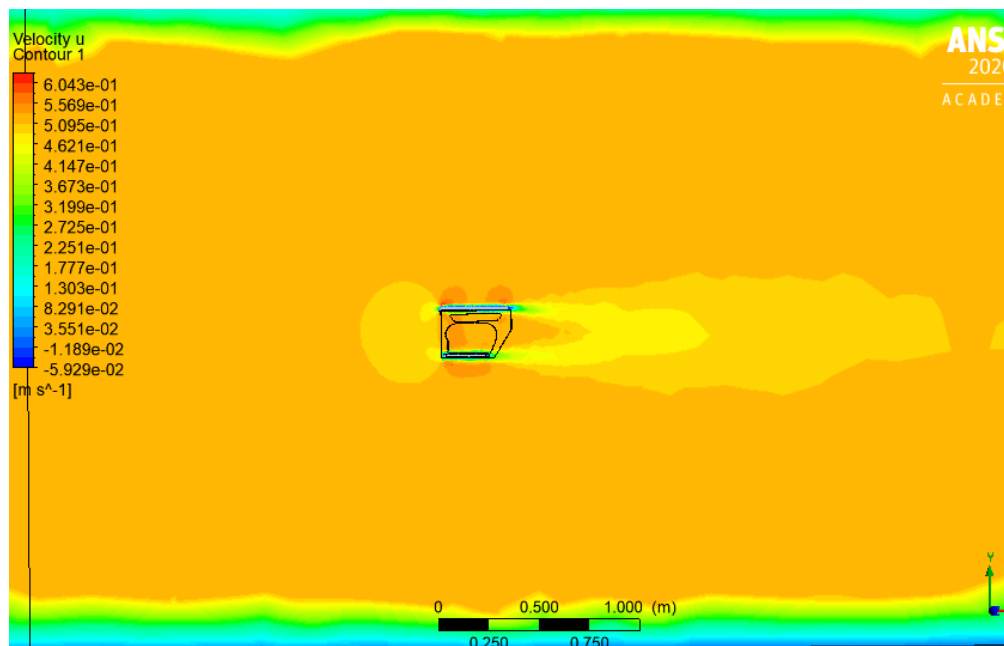


FIG 48: Simulación formación de vórtices. Velocidad 0,514 m/s

Velocidad: 1,029 m/s. Profundidad: superficie

Presión (figuras 49 y 50):

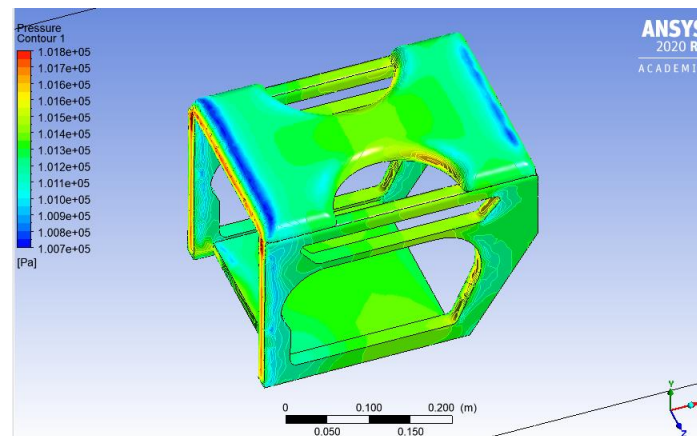


FIG 49: Simulación de la presión vista desde perspectiva. Velocidad 1,029 m/s

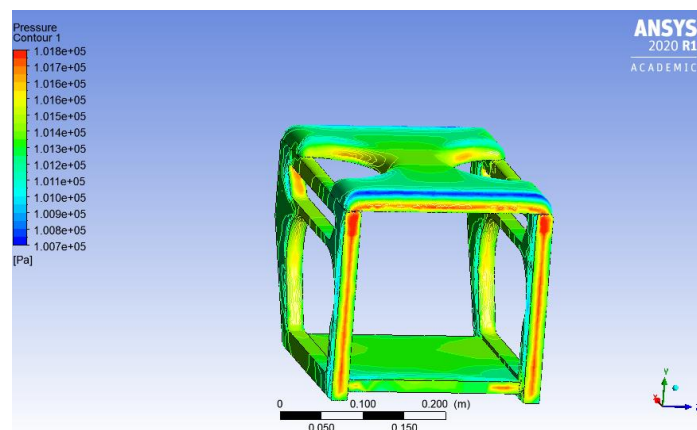


FIG 50: Simulación presión vista frontal. Velocidad 1,029 m/s

Turbulencia causada por la energía cinética (figura 51):

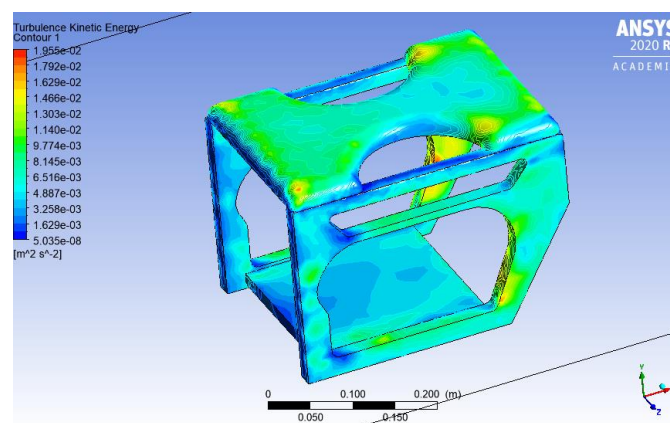


FIG 51: Simulación turbulencia. Velocidad 1,029 m/s



Wall Shear (figura 52):

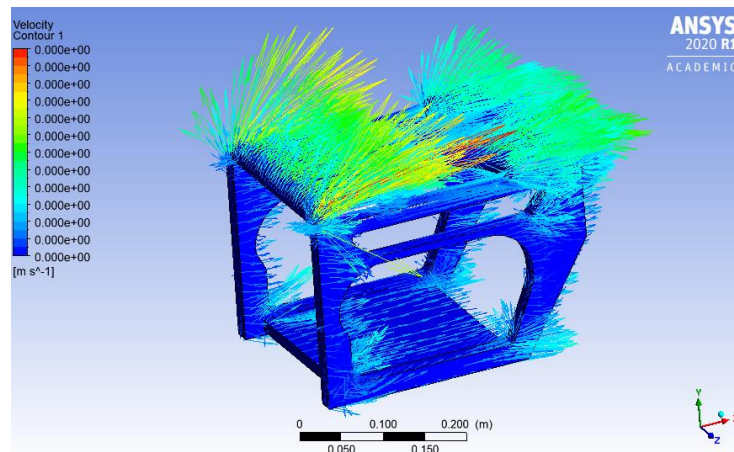


FIG 52: Simulación Wall-Shear. Velocidad 1,029 m/s

Velocidad alrededor del ROV (figura 53):

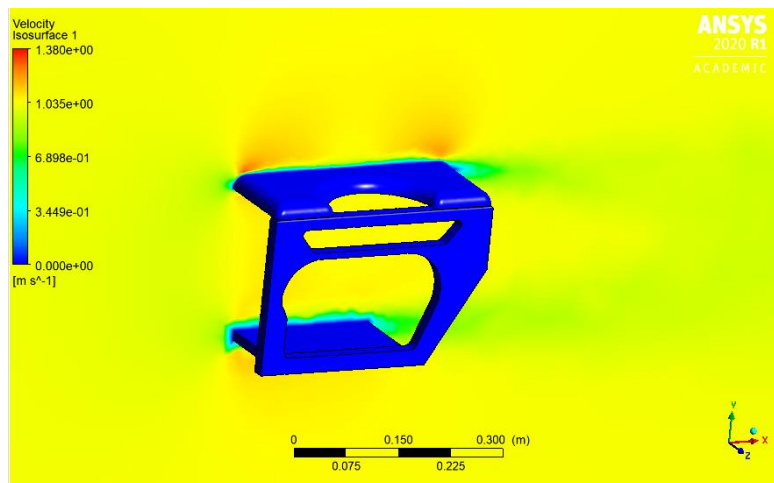


FIG 53: Simulación velocidad. Velocidad 1,029 m/s

Líneas de corriente (figura 54):

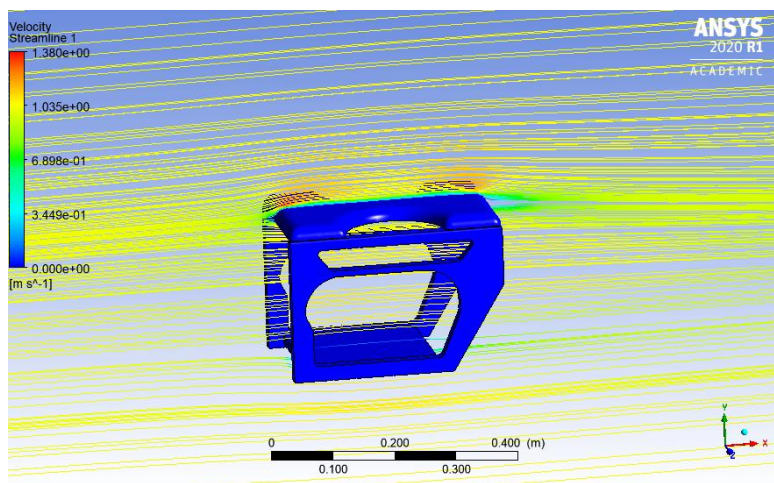


FIG 54: Simulación líneas de corriente. Velocidad 1,029 m/s

Formación de vórtices (figura 55):

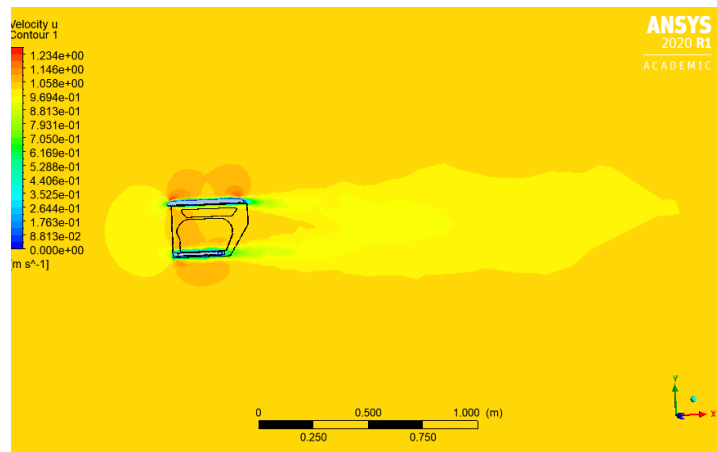


FIG 55: Simulación formación de vórtices. Velocidad 1,029 m/s

Velocidad: 1,543 m/s. Profundidad: superficie

Presión (figuras 56 y 57):

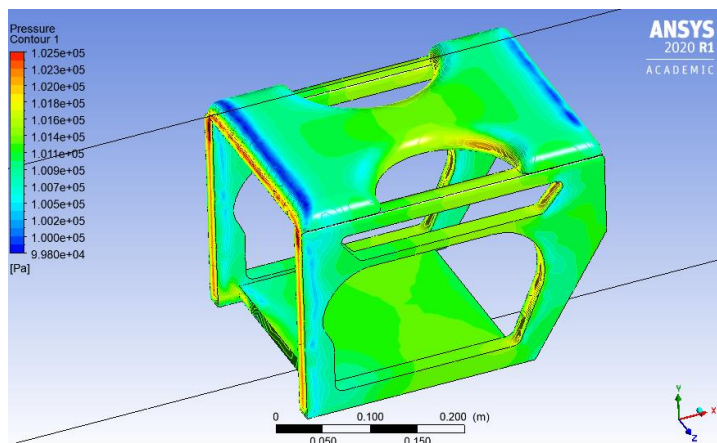


FIG 56: Simulación de la presión vista desde perspectiva. Velocidad 1,543 m/s

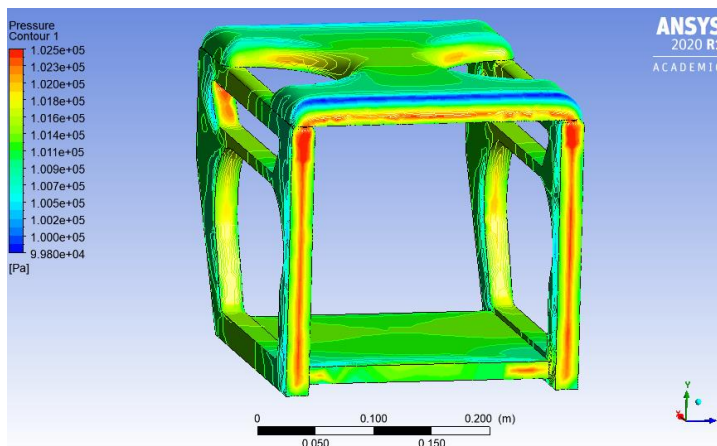


FIG 57: Simulación presión vista frontal. Velocidad 1,543 m/s

Turbulencia causada por la energía cinética (figura 58):

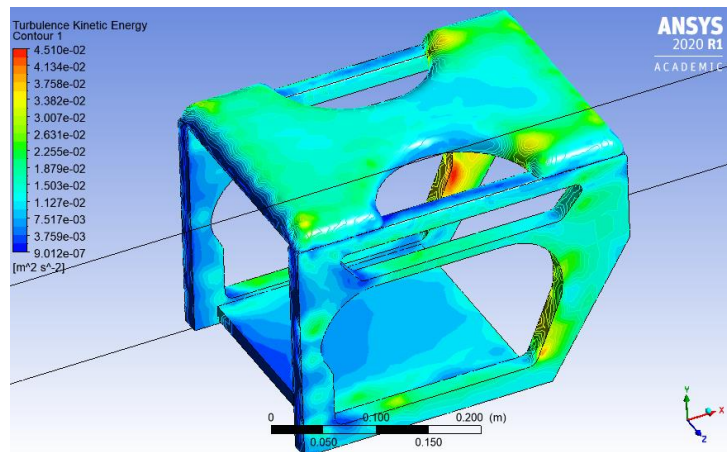


FIG 58: Simulación turbulencia. Velocidad 1,543 m/s

Wall Shear (figura 59):

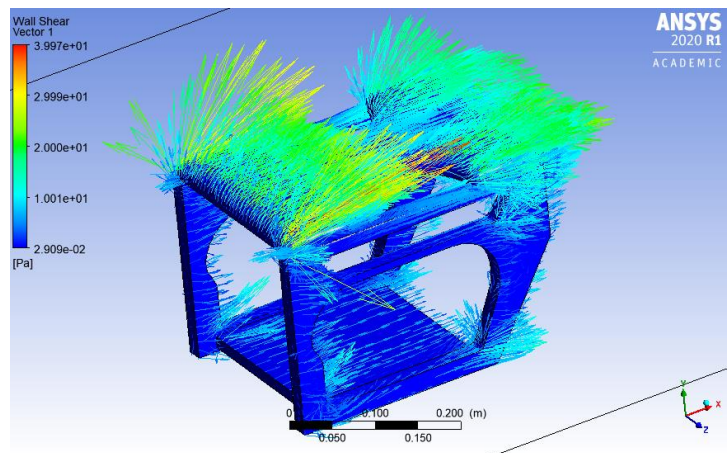


FIG 59: Simulación Wall-Shear. Velocidad 1,543 m/s

Velocidad alrededor del ROV (figura 60):

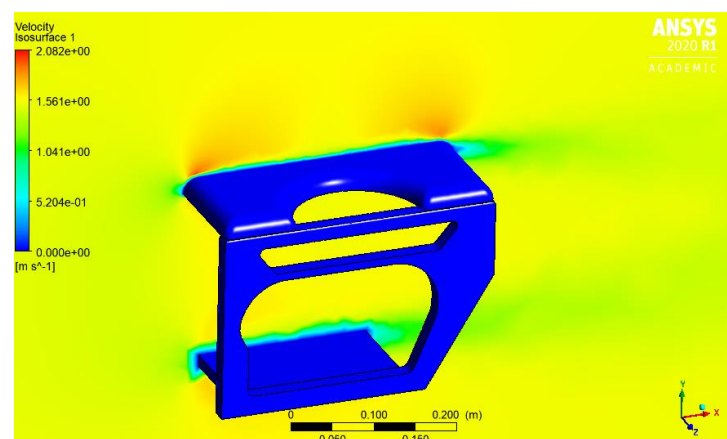


FIG 60: Simulación velocidad. Velocidad 1,543 m/s



Líneas de corriente (figura 61):

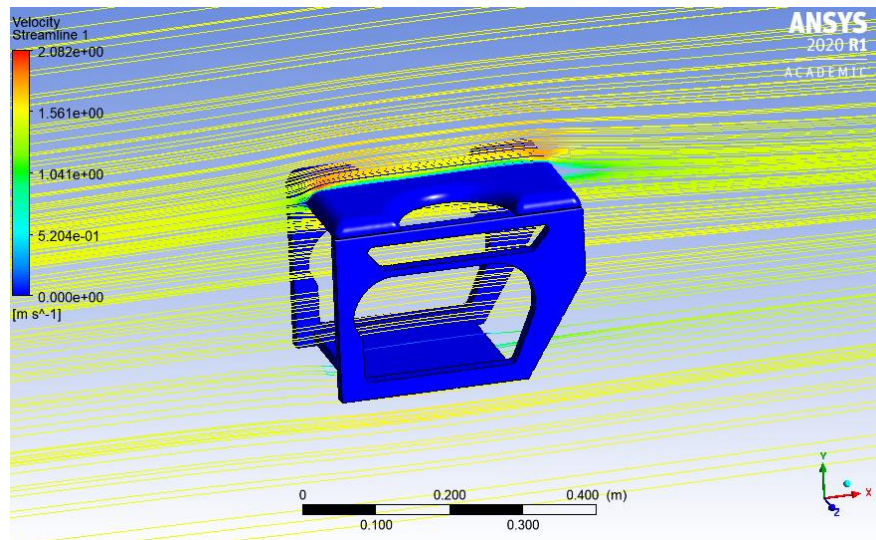


FIG 61: Simulación líneas de corriente. Velocidad 1,543 m/s

Formación de vórtices (figura 62):

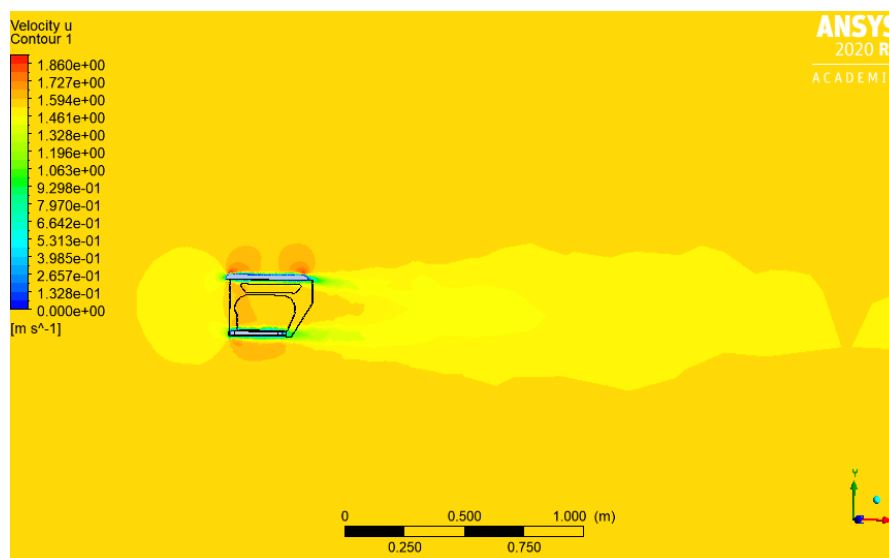


FIG 62: Simulación formación de vórtices. Velocidad 1,543 m/s

Las simulaciones para las diferentes profundidades son idénticas a las mostradas anteriormente, por lo que se omite su representación.

Respecto a la presión, comparando los resultados obtenidos en las diferentes velocidades se aprecia que los valores más altos se obtienen en la parte central del área frontal, independientemente de la velocidad a la que viaje el ROV, y en la zona que primero interfiere con el fluido, es decir, no se incluye la cara de la plataforma inferior del ROV (cara tres de figura 66), ya que las caras una, dos y cuatro comienza la

interacción con el fluido antes por el diseño que tiene. Se muestra una imagen del alzado de la cara frontal en la figura 63.

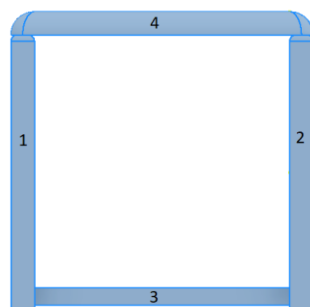


FIG 63: Numeración caras frontales ROV

Un aspecto que difiere en las tres representaciones es el decremento de presión que se produce en la zona superior trasera, se aprecia que conforme aumenta la velocidad, la presión en esta zona disminuye, tomando un color cada vez más próximo al azul oscuro. Es importante destacar también la baja presión que se da en la zona superior del área frontal (cara cuatro de la figura 66), esto es debido al ángulo de inclinación que tiene esta cara, que hace que el fluido se desvíe, y por tanto no tiene tanta incidencia directa en esa zona.

En cuanto a la turbulencia causada por la energía cinética, en general se aprecia que a medida que se incrementa la velocidad, la turbulencia disminuye, es decir, a mayor velocidad, mayor estabilidad tendrá el ROV (en las caras superiores, las zonas rojas, definidas como la zona de mayor turbulencia, se vuelven de color amarillo/verde, y en el cuerpo, en general las zonas de color azul claro se vuelven de color azul oscuro). Sin embargo, hay una zona de turbulencia mínima cuando el ROV viaja a 0,514 m/s, en la parte superior de las caras laterales, que al contrario que ocurre con el resto de caras, ésta aumenta su turbulencia al aumentar la velocidad, esto se debe a la geometría del ROV y al cúmulo de tensiones que pueden formarse en las esquinas.

Sobre la resistencia que el fluido opone al movimiento del ROV (Wall Shear), en líneas generales, se podría decir que es prácticamente constante en las tres velocidades estudiadas, aunque en la zona superior trasera del ROV se puede apreciar una pequeña variación de la resistencia, ciertos vectores de color celeste se vuelven de color verde, pero es un detalle irrelevante.

Respecto a la trayectoria y la velocidad del fluido alrededor del ROV, al tratarse de la misma geometría y un incremento de velocidad muy pequeño en los tres ensayos, el comportamiento que guardan éstos es idéntico para las tres velocidades, es decir, una partícula fluida seguiría la misma trayectoria cuando interceda sobre el ROV.

Por último en la gráfica denominada por la formación de vórtices, se puede ver claramente la estela que el ROV produce, es decir el rastro que deja tras de sí cuando

éste se mueve. Corrobora la relación con la gráfica de la presión, ya que en los puntos de mínima presión que se vieron con anterioridad, se producen las velocidades más altas (superficies curvas de la parte superior del ROV).

#### **4.3 Coeficientes hidrodinámicos**

Se muestran a continuación los valores de los coeficientes hidrodinámicos calculados en función de la velocidad (tablas 1, 2 y 3)

Valores de los coeficientes hidrodinámicos a 0,514 m/s (tabla 1):

Iteración	$C_L$	$F_L$	$F_D$	$C_D$
1	0,0011718	0,15913	3,2288	0,023777
2	0,0015689	0,21305	3,8947	0,02868
3	0,0014361	0,19502	4,0869	0,030096
4	0,0010137	0,13765	4,1061	0,030237
5	0,00049234	0,066858	4,0458	0,029793
6	-0,00051149	-0,069459	3,9627	0,029181
7	-0,00052629	-0,071469	3,8805	0,028576
8	-0,00089406	-0,12141	3,8081	0,028043
9	-0,0011036	-0,14987	3,7462	0,027587
10	-0,0011802	-0,16027	3,6948	0,027208
11	-0,0011893	-0,16151	3,6527	0,026898
12	-0,0010777	-0,14635	3,6181	0,026643
13	-0,00087299	-0,11855	3,5896	0,026434
14	-0,00059441	-0,080719	3,5676	0,026271
15	-0,00026513	-0,036004	3,5496	0,026139
16	0,000068367	0,0092841	3,535	0,026031
17	0,00037137	0,050431	3,5234	0,025946
18	0,00061332	0,083287	3,5139	0,025876
19	0,00078259	0,10627	3,5059	0,025817
20	0,00088754	0,12053	3,4996	0,025771
21	0,00093231	0,1266	3,4923	0,025717
22	0,00092967	0,12625	3,487	0,025678
23	0,00089054	0,12093	3,483	0,025648
24	0,00082799	0,11244	3,4812	0,025635
25	0,00076718	0,10418	3,4799	0,025626
26	0,00069257	0,094049	3,4788	0,025618
27	0,00062104	0,084336	3,4784	0,025615
28	0,00055435	0,07528	3,4773	0,025607
29	0,00049389	0,067068	3,4766	0,025602
30	0,00044263	0,060107	3,4759	0,025596
31	0,00040004	0,054324	3,4766	0,025602
32	0,0003666	0,049783	3,4766	0,025602
33	0,00033976	0,046138	3,4768	0,025603
34	0,00031863	0,043269	3,4761	0,025597
35	0,00029989	0,040724	3,4754	0,025592
36	0,00028548	0,038767	3,4736	0,025579
37	0,0002734	0,037127	3,4719	0,025567
38	0,00026469	0,035945	3,4715	0,025564
39	0,00025397	0,034488	3,4708	0,025559
40	0,00024508	0,033281	3,47	0,025553
41	0,00023669	0,032142	3,469	0,025545
42	0,00022901	0,031098	3,4676	0,025535
43	0,00021891	0,029727	3,4653	0,025518
44	0,0002098	0,02849	3,4632	0,025503
45	0,00020068	0,027252	3,4629	0,025501
46	0,00019261	0,026155	3,462	0,025494
47	0,00018453	0,025059	3,4611	0,025487
48	0,00017813	0,02419	3,4598	0,025478
49	0,00017073	0,023185	3,4587	0,02547
50	0,00016427	0,022308	3,4565	0,025453

Tabla 1: Valores de los coeficientes hidrodinámicos a 0,514 m/s.

$C_L$ : coeficiente de sustentación;  $F_L$ : fuerza de elevación;

$C_D$ : coeficiente de resistencia hidrodinámica;  $F_D$ : fuerza de arrastre.

Valores de los coeficientes hidrodinámicos a 1,029 m/s (tabla 2):

Iteración	$C_L$	$F_L$	$F_D$	$C_D$
1	0,0012387	0,67416	10,007	0,018386
2	0,0016089	0,87566	13,269	0,024381
3	0,0016002	0,87092	14,476	0,026599
4	0,0012921	0,70321	14,889	0,027358
5	0,000852	0,4637	14,908	0,027391
6	0,00041893	0,228	14,788	0,027172
7	0,000023575	0,01283	14,633	0,026886
8	-0,00033023	-0,17973	14,483	0,026611
9	-0,00056067	-0,30514	14,348	0,026362
10	-0,00066622	-0,36258	14,227	0,026141
11	-0,00074639	-0,40622	14,121	0,025945
12	-0,00067943	-0,36978	14,028	0,025775
13	-0,00052902	-0,28792	13,945	0,025623
14	-0,00030577	-0,16641	13,873	0,02549
15	-0,000032942	-0,017928	13,81	0,025375
16	0,00026557	0,14454	13,759	0,02528
17	0,00053691	0,29221	13,715	0,025199
18	0,00076116	0,41426	13,68	0,025136
19	0,00092592	0,50393	13,649	0,025078
20	0,0010281	0,55952	13,623	0,025031
21	0,0010704	0,58258	13,602	0,024992
22	0,001069	0,58182	13,587	0,024965
23	0,0010341	0,56282	13,573	0,02494
24	0,00097919	0,53292	13,564	0,024923
25	0,00091032	0,49544	13,558	0,024912
26	0,00083892	0,45658	13,559	0,024914
27	0,0007705	0,41934	13,562	0,024919
28	0,00070958	0,38618	13,566	0,024926
29	0,00065562	0,35682	13,57	0,024933
30	0,00061226	0,33322	13,576	0,024944
31	0,00057312	0,31192	13,58	0,024952
32	0,00054187	0,29491	13,586	0,024963
33	0,00051626	0,28097	13,588	0,024967
34	0,00049727	0,27064	13,591	0,024972
35	0,00047953	0,26098	13,592	0,024974
36	0,00046301	0,25199	13,597	0,024983
37	0,00044604	0,24276	13,598	0,024985
38	0,00043136	0,23477	13,6	0,02499
39	0,00041708	0,22699	13,598	0,024984
40	0,0004026	0,21911	13,597	0,02498
41	0,00038879	0,2116	13,595	0,024979
42	0,00037691	0,20513	13,595	0,02498
43	0,00036505	0,19868	13,59	0,024971
44	0,00035633	0,19393	13,586	0,024962
45	0,00034656	0,18861	13,58	0,024952
46	0,00033936	0,1847	13,581	0,024953
47	0,00033155	0,1844	13,578	0,024948
48	0,00032844	0,17875	13,575	0,024944
49	0,00032302	0,1758	13,569	0,024933
50	0,00031999	0,17415	13,565	0,024925

Tabla 2: Valores de los coeficientes hidrodinámicos a 1,029 m/s.

$C_L$ : coeficiente de sustentación;  $F_L$ : fuerza de elevación;

$C_D$ : coeficiente de resistencia hidrodinámica;  $F_D$ : fuerza de arrastre.

Valores de los coeficientes hidrodinámicos a 1,543 m/s (tabla 3):

Iteración	$C_L$	$F_L$	$F_D$	$C_D$
1	0,0012637	1,5464	20,62	0,01685
2	0,0015434	1,8888	28,275	0,023105
3	0,001556	1,9041	31,142	0,025448
4	0,0012751	1,5604	32,188	0,026303
5	0,00092168	1,1279	32,344	0,02643
6	0,00054748	0,66998	32,204	0,026315
7	0,00020187	0,24705	31,991	0,026141
8	-0,000096743	-0,11839	31,773	0,025964
9	-0,00034967	-0,42791	31,57	0,025798
10	-0,00049096	-0,60082	31,38	0,025642
11	-0,00052898	-0,64734	31,204	0,025499
12	-0,00050095	-0,61305	31,047	0,025371
13	-0,00038349	-0,4693	30,905	0,025254
14	-0,00018457	-0,22587	30,776	0,025149
15	0,000059017	0,072222	30,661	0,025055
16	0,00032415	0,39668	30,562	0,024974
17	0,00057328	0,70156	30,473	0,024901
18	0,00078079	0,9555	30,399	0,024841
19	0,00094132	1,1519	30,335	0,024789
20	0,0010475	1,2819	30,284	0,024747
21	0,0010927	1,3371	30,242	0,024712
22	0,0010911	1,3352	30,214	0,02469
23	0,0010557	1,292	30,187	0,024668
24	0,0010027	1,227	30,171	0,024654
25	0,00094193	1,1527	30,162	0,024647
26	0,00087587	1,0719	30,165	0,02465
27	0,00081063	0,99202	30,169	0,024653
28	0,00075195	0,9202	30,181	0,024663
29	0,00070108	0,85795	30,196	0,024675
30	0,00065925	0,80676	30,213	0,024689
31	0,00062428	0,76397	30,226	0,024699
32	0,00059258	0,72517	30,249	0,024718
33	0,00056912	0,69647	30,264	0,02473
34	0,000549	0,67184	30,271	0,024736
35	0,00053364	0,65305	30,275	0,02474
36	0,00051439	0,62949	30,284	0,024747
37	0,00049683	0,608	30,288	0,02475
38	0,00047879	0,58592	30,304	0,024763
39	0,00046398	0,56779	30,309	0,024767
40	0,00044828	0,54859	30,309	0,024767
41	0,00043504	0,53239	30,303	0,024762
42	0,00042273	0,51732	30,297	0,024758
43	0,0004134	0,50591	30,289	0,024751
44	0,0004026	0,49269	30,293	0,024754
45	0,00039374	0,48184	30,292	0,024753
46	0,00038586	0,4722	30,283	0,024746
47	0,00037951	0,46443	30,275	0,024739
48	0,00037359	0,45718	30,269	0,024735
49	0,00037006	0,45287	30,268	0,024733
50	0,00036517	0,44688	30,264	0,024731

Tabla 3: Valores de los coeficientes hidrodinámicos a 1,543 m/s.

$C_L$ : coeficiente de sustentación;  $F_L$ : fuerza de elevación;

$C_D$ : coeficiente de resistencia hidrodinámica;  $F_D$ : fuerza de arrastre.

En los subapartados siguientes se representan las curvas de los coeficientes a las diferentes velocidades estudiadas. De esta manera se puede ver de forma clara hacia qué valor tiende cada coeficiente y compararlos entre sí.

### Coeficiente de sustentación ( $C_L$ )

El coeficiente de sustentación hidrodinámica, también llamado coeficiente de elevación, es un parámetro adimensional usado para cuantificar la fuerza de sustentación que soporta un objeto al moverse en un medio fluido (Martín-Vega, 2019). En la figura 64 se muestra una gráfica con los valores del coeficiente de sustentación frente al número de iteraciones para las diferentes velocidades.

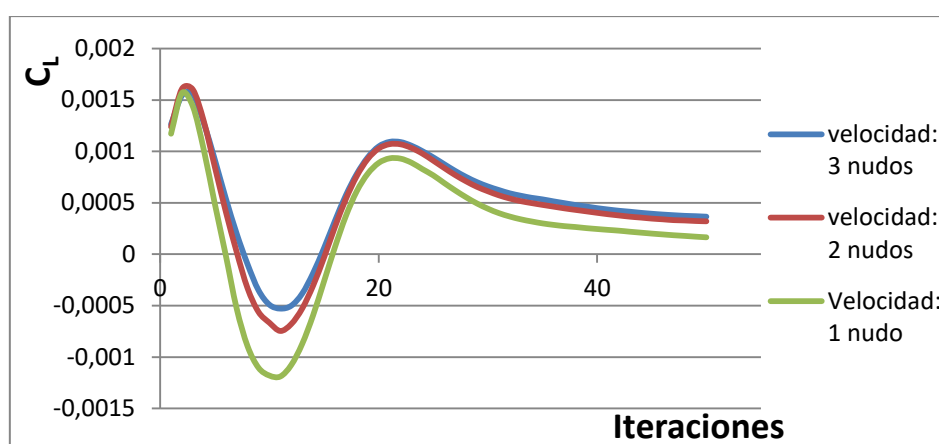


Figura 64: Gráfica de coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) frente a iteraciones

En esta gráfica se puede intuir que las tres curvas tienden hacia una posible línea horizontal, por tanto el valor de convergencia no está totalmente definido, se tomará el valor de la iteración 50 como resultado final, aunque se sabe que no es del todo exacto. Por otra parte se puede apreciar que el coeficiente de elevación aumenta tal como aumenta su velocidad.

En la tabla 4 se muestran los valores seleccionados del coeficiente  $C_L$  para cada velocidad:

Velocidad	Coeficiente de sustentación ( $C_L$ )
0,514 m/s	0,00016427
1,029 m/s	0,00031999
1,543 m/s	0,00036517

Tabla 4: Coeficientes de sustentación  $C_L$  en función de la velocidad



### Fuerza de elevación o sustentación hidrodinámica, $F_L$

Una de las fuerzas a las que se ve sometido el ROV es a la denominada sustentación hidrodinámica o fuerza de elevación,  $F_L$ . El subíndice definido por la letra “L”, proviene de la palabra inglesa “*Lift*”, que se traduce a español como “*levantar*”. Esta fuerza es perpendicular a la fuerza de arrastre y opuesta al peso (Martín-Vega, 2019), como se muestra en la figura 65.

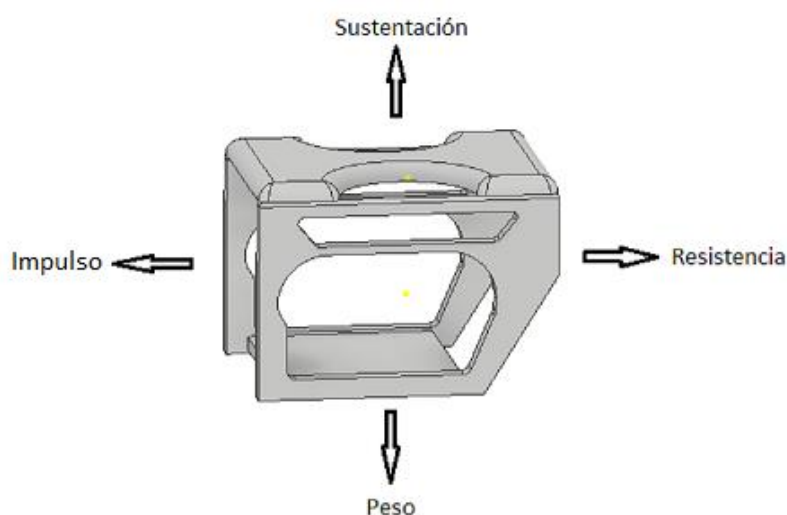


FIG 65: Imagen del ROV diseñado con la dirección de las fuerzas

Un aumento considerable de la sustentación hidrodinámica respecto al peso del ROV, se traduce como la elevación de este desde el fondo marino hacia la superficie.

En la figura 66 se representan en una gráfica los valores de la fuerza de elevación  $F_L$  respecto a las iteraciones.

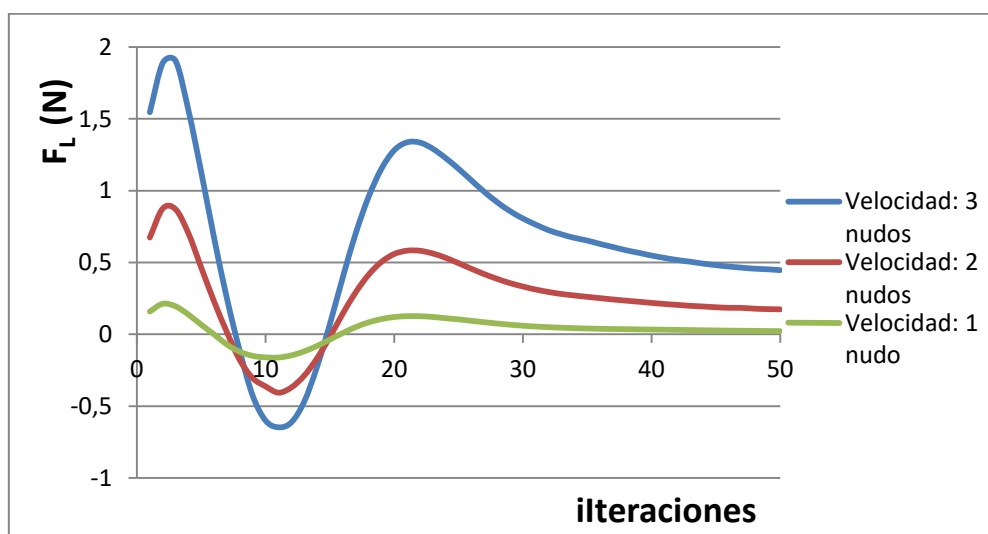


FIG 66: Gráfica sustentación hidrodinámica ( $F_L$ ) frente a iteraciones

De nuevo vuelve a ocurrir lo mismo que en la gráfica anterior, parece que las curvas tenderán en posteriores iteraciones hacia una línea horizontal. Se usará el valor de la iteración 50 como resultado final. En esta gráfica, al igual que ocurre en la gráfica anterior del coeficiente de sustentación, se aprecia que la velocidad y la fuerza  $F_L$  son directamente proporcionales, es decir, a mayor velocidad, mayor es la sustentación hidrodinámica.

Se muestra en la tabla 5 los valores seleccionados de la fuerza  $F_L$  para cada velocidad.

Velocidad	Sustentación hidrodinámica ( $F_L$ )
0,514 m/s	0,022308 N
1,029 m/s	0,17415 N
1,543 m/s	0,44688 N

Tabla 5: Sustentación hidrodinámica  $F_L$  en función de la velocidad

Por otra parte, se ve entre ellas un idéntico comportamiento, ya que las curvas mantienen la misma forma en ambas gráficas, lo cual confirma que existe una relación entre los dos parámetros. Estos se relacionan entre sí mediante la siguiente expresión (ecuación 1):

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_L \cdot A \quad (\text{Ecuación 1})$$

### Coeficiente de resistencia hidrodinámica ( $C_D$ )

El coeficiente de resistencia hidrodinámica, también llamado coeficiente de arrastre, es un parámetro adimensional usado para cuantificar el arrastre de un objeto en un medio fluido, en este caso agua marina. Este coeficiente es independiente del tamaño del cuerpo y de la velocidad del fluido hasta cierta medida, y es utilizado para calcular la fuerza de arrastre o resistencia hidrodinámica, usando una fórmula que se mostrará a continuación (ecuación 2). El coeficiente de resistencia hidrodinámica se suele abreviar como " $C_D$ ", donde la D viene del inglés de "*Drag*" que se define en español como "arrastrar".

En la figura 67, se representa en una gráfica el coeficiente de resistencia hidrodinámica,  $C_D$  frente a las iteraciones para los distintos valores de velocidad.

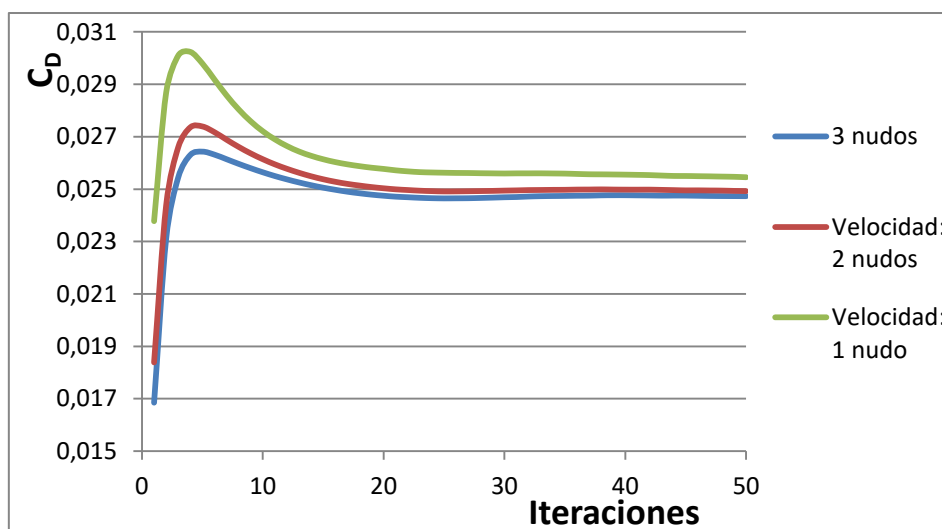


FIG 67: Gráfica de coeficientes de resistencia hidrodinámica ( $C_D$ ) frente a iteraciones

Al contrario de como ocurría en las gráficas anteriores, en esta se puede ver una convergencia en las tres curvas hacia un valor aproximadamente definido, ya que a partir de la iteración 25, se puede apreciar que los rangos de valores en los que se encuentran las curvas son muy pequeños, y por tanto se consideran prácticamente estables. Otro aspecto que se percibe es que el coeficiente de resistencia hidrodinámica es inversamente proporcional a la velocidad, ya que a medida que aumenta la velocidad, el coeficiente de resistencia hidrodinámica disminuye.

Se muestran en la tabla 6 los valores seleccionados del coeficiente  $C_D$  para cada velocidad:

Velocidad	Coeficiente de resistencia hidrodinámica ( $C_D$ )
0,514 m/s	0,025453
1,029 m/s	0,024925
1,543 m/s	0,024731

Tabla 6: Coeficientes de resistencia hidrodinámica  $C_D$  en función de la velocidad

### Fuerza de arrastre o resistencia hidrodinámica, $F_D$

La resistencia aerodinámica, también denominada fuerza de arrastre, es la fuerza de rozamiento que impide el movimiento del cuerpo a través del fluido con facilidad, lo cual es generada por una depresión existente entre la parte trasera y la parte delantera del vehículo (Martín-Vega, 2019). Dicho de otro modo, la resistencia hidrodinámica se podría definir como la fuerza opuesta al movimiento que sufre un

objeto sólido (ROV) al desplazarse a través de un fluido, y generada por el mismo fluido que lo rodea.

Este parámetro se suele abreviar como " $F_D$ ", el subíndice definido por la letra "D" proviene de la palabra inglesa "Drag", al igual que ocurre con el coeficiente  $C_D$ .

En la figura 68 se representa mediante una gráfica los valores de la fuerza de arrastre,  $F_D$  frente a las iteraciones para los distintos valores de velocidad.

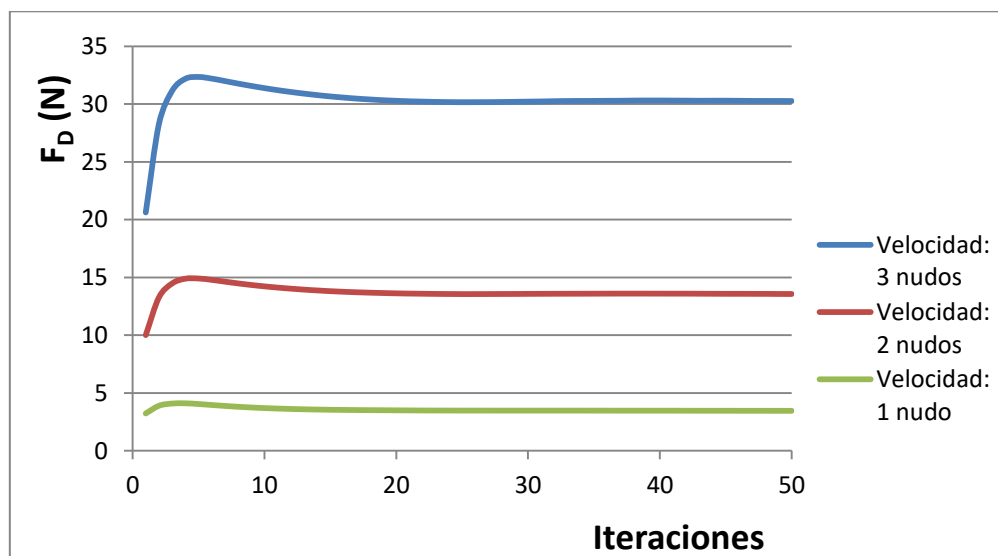


FIG 68: Gráfica de fuerza de arrastre ( $F_D$ ) frente a iteraciones

En este caso se vuelve a ver una clara convergencia de las curvas, igual que en el caso anterior, se aprecia que a partir de la iteración 20 aproximadamente, los valores que adquiere la fuerza de arrastre son prácticamente estables. En el caso de la fuerza de arrastre, esta es directamente proporcional a la velocidad, ya que a mayor velocidad, mayor se hace la fuerza de arrastre o resistencia hidrodinámica.

Se muestra en la tabla 7 los valores seleccionados de la fuerza  $F_D$  para cada velocidad.

Velocidad	Resistencia hidrodinámica ( $F_D$ )
0,514 m/s	3,4587 N
1,029 m/s	13,569 N
1,543 m/s	30,268 N

Tabla 7: Resistencia hidrodinámica  $F_D$  en función de la velocidad

Por otra parte, al igual que ocurriría con el coeficiente  $C_L$  y la fuerza  $F_L$ , entre las gráficas del coeficiente  $C_D$  y la fuerza  $F_D$  también existe un comportamiento idéntico entre ellas, ya que de nuevo, las curvas mantienen la misma forma en ambas gráficas, lo cual

confirma una nueva relación existente entre los parámetros, relacionados entre sí mediante la siguiente expresión (ecuación 2):

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_D \cdot A \quad (\text{Ecuación 2})$$

Se realizan tres tablas resumen (tablas 8, 9 y 10) donde se recogen todos los datos en función de la velocidad, para poder comparar y comentarlos con más facilidad.

Coeficientes hidrodinámicos a 0,514 m/s	
$C_L$	0,00016427
$F_L$	0,022308 N
$F_D$	3,4587 N
$C_D$	0,025453

Tabla 8: Coeficientes hidrodinámicos seleccionados. Velocidad 0,514 m/s

Coeficientes hidrodinámicos a 1,029 m/s	
$C_L$	0,00031999
$F_L$	0,17415 N
$F_D$	13,569 N
$C_D$	0,024925

Tabla 9: Coeficientes hidrodinámicos seleccionados. Velocidad 1,029 m/s

Coeficientes hidrodinámicos a 1,514 m/s	
$C_L$	0,00036517
$F_L$	0,44688 N
$F_D$	30,268 N
$C_D$	0,024731

Tabla 10: Coeficientes hidrodinámicos seleccionados. Velocidad 1,514 m/s

Una vez obtenidas las fuerzas hidrodinámicas a las que el ROV se somete, se van a comparar con los resultados del proyecto de Ruiz-Ruiz (2016) en la tabla 11.

Fuerzas hidrodinámicas				
Velocidad (m/s)	Fuerza de arrastre $F_D$ (N)		Fuerza de elevación $F_L$ (N)	
	Ruiz-Ruiz (2016)	Este estudio	Ruiz-Ruiz (2016)	Este estudio
0,514	11,1356	3,4587	10,4007	0,022308
1,029	44,4141	13,569	41,4402	0,17415
1,514	99,9076	30,268	93,1268	0,44688

Tabla 11: Comparación de fuerzas hidrodinámicas a diferentes velocidades.

Las diferencias entre ambos trabajos se debe a las geometrías diferentes de los ROVs. En el caso de la fuerza de arrastre, ésta presenta variaciones más pequeñas respecto a la fuerza de elevación. La fuerza de arrastre depende directamente del área frontal del

ROV. En el caso de Ruiz-Ruiz (2016) el diseño del ROV se compone de un cubo de 300 mm de lado, con una hélice en cada lado como se puede ver en la figura 69. En el caso del ROV de este estudio el área central es bastante inferior debido a dos motivos. En primer lugar las dimensiones del ROV son más pequeñas (240 x 220 mm) y en segundo lugar, el diseño se centra únicamente en la carcasa del ROV, por lo que la zona interna se encuentra hueca, lo que hace que el área frontal sea aún más inferior.

Hay que añadir, que las resistencias que las caras del ROV de Ruiz-Ruiz (2016) ejercen son bastante más elevadas que las que ejercen las caras del ROV de este estudio, ya que éstas se encuentran abiertas y su área es inferior. Se muestra en la figura 69 el ROV diseñado por Ruiz-Ruiz (2016) donde se puede apreciar en una de sus caras lo que equivaldría al área frontal, y en la figura 70 se muestra de color azul el área frontal del ROV diseñado en este proyecto.

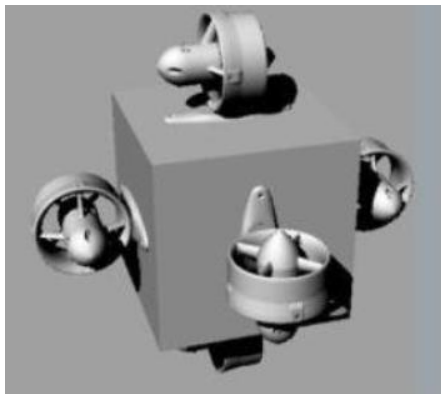


FIG 69: Imagen del ROV diseñado por Ruiz Ruiz (2016)

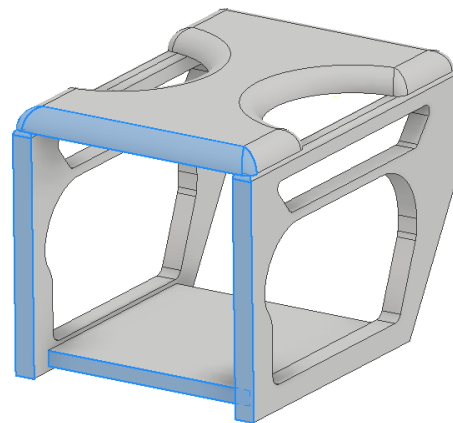


FIG 70: Imagen del ROV en estudio

Respecto a la fuerza de elevación, esta presenta una variación sumamente grande, lo cual es provocado por varios aspectos no considerados. En primer lugar al igual que ocurría con la fuerza de arrastre, el área frontal considerada en el diseño de este estudio es bastante inferior al área frontal considerada en el diseño de Ruiz-Ruiz (2016). Por otra parte, el diseño de este proyecto sólo realiza el estudio de la carcasa, sin tener en consideración ningún otro aspecto del ROV, como cilindros interiores, luces, hélices, parte mecánica y electrónica, etc, y en cambio, el estudio de Ruiz-Ruiz (2016) engloba la geometría completa del ROV, incluyendo las hélices, aunque a la hora de realizar los cálculos no considera los efectos que éstas producen, como la succión.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el ROV de Ruiz-Ruiz (2016) está formado por un cubo y en su interior se coloca toda la mecánica de este, por lo que se trata de un cubo estanco, el cual incluye aire en su interior, lo que puede producir un efecto de flote, o al menos un aumento de la fuerza de sustentación, sin embargo, en el caso del ROV de

este estudio se produce un efecto totalmente contrario, al no tener un cámara de aire estanco el ROV trataría de hundirse hasta el fondo marino, a lo que se suma que ha sido diseñado en su totalidad con un material constante, es decir, todo el ROV formado por el mismo material. Este aspecto se aleja un poco de la realidad, ya que normalmente la parte superior de la carcasa está formada por un material cuyas propiedades produce que el ROV se mantenga a flote. Por último, otro aspecto importante que influye en la fuerza de elevación es el propio peso de los vehículos.

En estudios futuros habrá que incluir en las simulaciones realizadas los elementos mecánicos (motores y hélices), dispositivos de visualización (cámaras e iluminación) y los sistemas de control.



## 5. Conclusiones

En primer lugar se concluye que el comportamiento que el fluido tiene alrededor del ROV no presenta variaciones significativas en las profundidades estudiadas.

En segundo lugar, con este trabajo se obtienen resultados preliminares que permiten modificar la actual configuración del chasis del ROV e incorporar en futuros estudios nuevos elementos físicos y estructurales que mejorarían su comportamiento hidrodinámico. Estas modificaciones deben estar dirigidas hacia una utilización óptima del sistema de baterías instaladas así como a la mejora de la capacidad de control del dispositivo.

En tercer lugar, los pasos seguidos en este trabajo pueden servir como guía metodológica para iniciarse en estudios de modelación hidrodinámica de vehículos submarinos.

## 6. Referencias

- Auster, P.J., Malatesta, R.J., Donaldson, C.L.S. 1997. Distributional responses to small-scale habitat variability by early juvenile silver hake, *Merluccius bilinearis*. *Environmental Biology of Fishes* 50, 195–200.
- Bergström, B.I., Larsson, J., Pettersson, J.O. 1987. Use of a Remotely Operated Vehicle (ROV) to study marine phenomena: I. Pandalid shrimp densities. *Marine Ecology Progress Series* 37(1), 97-101.
- Duffy, G.A., Lundsten, L., Kuhn, L.A., Paull, C.K. 2014. A comparison of megafaunal communities in five submarine canyons off Southern California, USA. *Deep Sea Research Part II* 104: 259–266.
- Gutiérrez-Estrada, J.C., Peregrín-Rubio, A., Gómez-Bravo, F., Pulido-Calvo, I., González-Cabrera, M., 2019. *Informe introductorio sobre desarrollo y evaluación de sistemas fijos (boyas), pequeños vehículos marinos (ROVs) y análisis de datos e imágenes en zona estuáricas y explotaciones acuícolas*. Informe de la Actividad 1 del Proyecto POCTEP 0622-KTTSEADRONES-5-E.
- Karpov, K., Lauermann, A., Cailliet, G., Prall, M. 2004. Comparing Fisherman-Directed Hook and Trap Sampling of Groundfish to ROV-Based Assessment: Phase I – Methods Development in Collaboration Between Fisherman, FDFG, and University Scientists. San Jose, CA: California Department of Fish and Game and Moss Landing Marine Laboratories.
- Martín-Vega, D. 2019. *Diseño y análisis aerodinámico de una motocicleta de competición*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Huelva.
- Moser, M.L., Auster, P.J., Bichy, J.B. 1998. Effects of mat morphology on large Sargassum-associated fishes: observations from a remotely operated vehicle (ROV) and free-floating video camcorders. *Environmental Biology of Fishes* 51, 391–398.
- Ridao, P., Carreras, M., Hernández, E., Palomeras, N. 2007. Underwater telerobotics for collaborative research. En: *Advances in telerobotics*, Springer 501 pp.
- Ruiz-Ruiz, J.A. 2016. *Cálculo de coeficientes hidrodinámicos de UUVs mediante CFDs*. Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Cartagena.
- Rumohr, H. 1995. Monitoring the marine environment with imaging methods. *Scientia Marina* 59(1), 129-138.
- Sánchez-Sánchez, R. 2019. *Cálculo, construcción y ensayo de máquinas*. Libro de texto número 177, materiales para la docencia, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva, 231 pp.
- Valdés-Ruiz, D. 2009. *Estado del arte en robótica submarina*. Tesina de Máster, Universidad Politécnica de Valencia.

Enlaces WEBS:

- <https://shop.nidorobotics.com/sibiu-nano-maker-kit/>
- <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/6510/tfg-rui-cal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/59038/TFM%20-%20Vald%E9s%20Ruiz,%20D..pdf?sequence=1>
- [https://1267314d-ddea-4d7b-b325150cf6d9ff6.filesusr.com/ugd/e32a70\\_f9c0c195ee8f484e94e35fb920a4f524.pdf](https://1267314d-ddea-4d7b-b325150cf6d9ff6.filesusr.com/ugd/e32a70_f9c0c195ee8f484e94e35fb920a4f524.pdf)
- [http://www-assig.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2\\_03-04/submarinos/rov\\_clases.htm](http://www-assig.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2_03-04/submarinos/rov_clases.htm).