



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

CONSTRUCCIÓN, MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN PEQUEÑO VEHICULO SUBMARINO COMERCIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Ignacio de la Cotera López
Director: José Luis Aguirre Martínez

Cartagena 15 de Septiembre de 2018



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	Pág. 5
ÍNDICE DE TABLAS	Pág. 7
1. INTRODUCCIÓN	Pág. 9
1.1.- Definición de ROV	Pág. 9
1.2.- Antecedentes	Pág. 9
1.3.- Objetivos	Pág. 10
1.4.- Metodología y fases del proyecto	Pág. 10
2. CONSTRUCCIÓN DEL ROV	Pág. 12
2.1.- Plan de construcción y metodología	Pág. 12
2.1.1.- Inventario	Pág. 12
2.1.2.- Guías de construcción y organización	Pág. 16
2.1.3.- Materiales y equipos utilizados	Pág. 16
2.2.- Descripción de cada fase de construcción	Pág. 17
2.2.1.- “Acrylic Cementing”, o primera fase de pegado acrílico	Pág. 17
2.2.2.- “Electronics tube endcaps”, tapas del tubo de electrónica	Pág. 18
2.2.3.- Electrónica del ROV	Pág. 19
2.2.4.- “Wire routing”, cableado y conexiones principales	Pág. 19
2.2.5.- Finalización	Pág. 20
2.2.6.- Prueba de funcionamiento en laboratorio	Pág. 23
2.2.7.- Medida de velocidad real de rotación motores	Pág. 23
2.3.- Puesta en marcha del ROV	Pág. 24
2.3.1.- Preparación de la primera sumersión	Pág. 24
2.3.2.- Preparación del software de pilotaje y manejo	Pág. 25
2.3.3.- Sellado partes electrónicas, lubricación motores, y cableado	Pág. 25
2.3.4.- Sumersión del ROV y puesta en marcha de todos las partes del ROV	Pág. 25
2.4.- Evaluación de resultados y corrección de errores	Pág. 26
3. INTRODUCCIÓN DE LA IMU, Y MEJORAS EN EL SOFTWARE DE CONTROL	Pág. 28
3.1.- Construcción y acoplamiento de la IMU	Pág. 28
3.2.- Actualización del software (Arduino)	Pág. 29
3.3.- Puesta en marcha y análisis de funcionamiento	Pág. 30
3.4.- Mejoras en el dispositivo de control mediante un Joystick	Pág. 32
4. MODELIZACIÓN DEL ROV EN 3D MEDIANTE SOLIDWORKS	Pág. 34
4.1.- Piezas disponibles en 2D y conversión a 3D	Pág. 34
4.2.- Piezas no disponibles, modelización en base a medidas reales	Pág. 34
4.3.- Ensamblajes de cada parte y ensamblaje final	Pág. 35
5. SIMULACIONES FLUIDWORKS PARA OBTENCIÓN DE FUERZAS Y MOMENTOS	Pág. 37
5.1.- Elección del ensamblaje a simular	Pág. 37
5.2.- Elección del mallado y descripción de las simulaciones	Pág. 37
5.3.- Descripción del sistema de coordenadas	Pág. 38
5.4.- Desarrollo de las simulaciones y datos obtenidos	Pág. 39
5.4.1.- Movimiento de avance	Pág. 39
5.4.2.- Movimiento de retroceso	Pág. 40
5.4.3.- Movimiento de descenso	Pág. 40
5.4.4.- Movimiento de ascenso	Pág. 41
5.4.5.- Movimiento de estribor	Pág. 42
5.4.6.- Movimiento de babor	Pág. 42
5.4.7.- Movimiento de guiñada negativa	Pág. 43
5.4.8.- Movimiento de guiñada	Pág. 44
5.4.9.- Movimiento de cabeceo	Pág. 44

5.4.10.- Movimiento de cabeceo negativo	Pág. 45
5.4.11.- Movimiento de balance	Pág. 46
5.4.12.- Movimiento de balance negativo	Pág. 46
5.4.13.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y descenso	Pág. 47
5.4.14.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y ascenso	Pág. 48
5.4.15.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y babor	Pág. 48
5.4.16.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y estribor	Pág. 49
5.4.17.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y descenso	Pág. 50
5.4.18.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y ascenso	Pág. 50
5.4.19.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y babor	Pág. 51
5.4.20.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y estribor	Pág. 52
5.5.- Análisis de resultados y corrección de datos erróneos	Pág. 52
5.5.1.- Detección resultados erróneos	Pág. 52
5.5.2.- Simulaciones con nuevo sistema de coordenadas para el cálculo de momentos	Pág. 55
5.5.3.- Simulaciones con nuevo sistema de coordenadas para flujos de giro	Pág. 56
5.6.- Resultados finales, conclusiones	Pág. 56
6. CÁLCULO MEDIANTE CFDs (COEFICIENTES HIDRODINÁMICOS)	Pág. 57
6.1.- Definición de los CFD	Pág. 57
6.2.- Modelo dinámico por coeficientes	Pág. 59
6.2.1.- Introducción y consideraciones iniciales	Pág. 59
6.2.2.- Sistema de coordenadas, posicionamiento y cinemática	Pág. 59
6.2.3.- Ecuaciones dinámicas del movimiento	Pág. 61
6.2.4.- Fuerzas hidrostáticas y momentos	Pág. 61
6.2.5.- Fuerzas hidrodinámicas y momentos	Pág. 61
6.2.6.- Masa añadida	Pág. 63
6.2.7.- Fuerzas y momentos de sustentación	Pág. 65
6.3.- Regresión y uso de MatLab	Pág. 65
6.4.- Desarrollo de los cálculos y resultados obtenidos	Pág. 68
6.4.1.- Movimiento de avance	Pág. 68
6.4.2.- Movimiento de retroceso	Pág. 69
6.4.3.- Movimiento de descenso	Pág. 71
6.4.4.- Movimiento de ascenso	Pág. 72
6.4.5.- Movimiento de babor y estribor	Pág. 73
6.4.6.- Movimiento de guiñada	Pág. 75
6.4.7.- Movimiento de guiñada negativa	Pág. 75
6.4.8.- Movimiento de cabeceo	Pág. 76
6.4.9.- Movimiento de cabeceo negativo	Pág. 77
6.4.10.- Movimiento de balance	Pág. 78
6.4.11.- Movimiento de balance negativo	Pág. 78
6.4.12.- Movimiento de flujo cruzado. Consideraciones iniciales	Pág. 79
6.4.13.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y descenso	Pág. 80
6.4.14.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y ascenso	Pág. 81
6.4.15.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y babor	Pág. 81
6.4.16.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y estribor	Pág. 82
6.4.17.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y descenso	Pág. 82
6.4.18.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y ascenso	Pág. 83
6.4.19.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y babor	Pág. 83
6.4.20.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y estribor	Pág. 84
6.5.- Análisis de resultados y corrección de datos erróneos	Pág. 84
6.6.- Resultados finales con nomenclatura correspondiente al sistema de coordenadas de referencia correcto.	Pág. 86
7. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ROV	Pág. 92

7.1.- Medida del volumen y masa _____	Pág. 92
7.2.- Medida de los momentos de inercia en los tres ejes de giro _____	Pág. 93
7.2.1.- Metodología e instrumentación _____	Pág. 93
7.2.2.- Descripción de las medidas _____	Pág. 94
7.2.3.- Resultados _____	Pág. 96
8. CONCLUSIONES _____	Pág. 97
9. BIBLIOGRAFÍA _____	Pág. 100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Open ROV	Pág. 9
Figura 2: Casco y placa de hardware libre	Pág. 12
Figura 3: Bolsa piezas 1 con marcas	Pág. 13
Figura 4: Bolsa piezas 2 con marcas	Pág. 14
Figura 5: Bolsa piezas 3 y 4, y motores	Pág. 15
Figura 6: Bolsa piezas 5 y 6	Pág. 16
Figura 7: Pegamentos y aplicadores	Pág. 17
Figura 8: Pegado de piezas chasis	Pág. 17
Figura 9: Introducción jeringuilla en la tapa	Pág. 18
Figura 10: Rellenado de resina en cableado	Pág. 18
Figura 11: Conexión placa comunicaciones	Pág. 19
Figura 12: Preparación cableado	Pág. 19
Figura 13: Cableado soldado y montado	Pág. 20
Figura 14: Montaje final parte electrónica	Pág. 20
Figura 15: Calibrado y sellado láseres	Pág. 21
Figura 16: Colocación tapa y vástago electrónica	Pág. 22
Figura 17: Construcción finalizada, vista general	Pág. 22
Figura 18: Vista frontal	Pág. 22
Figura 19: Vista trasera	Pág. 22
Figura 20: Medida velocidad de giro	Pág. 24
Figura 21: Cable en bobina	Pág. 25
Figura 22: Montaje IMU	Pág. 28
Figura 23: Protección de resina	Pág. 29
Figura 24: Acoplamiento de la IMU	Pág. 29
Figura 25: Error de actualización	Pág. 30
Figura 26: Nueva interfaz	Pág. 31
Figura 27: Desviación IMU	Pág. 32
Figura 28: Medidas principales motor	Pág. 35
Figura 29: Vistas principales ROV	Pág. 36
Figura 30: Vistas en 3D ROV	Pág. 36
Figura 31: comparación entre mallado 7/7 (izq.) y 5/7 (der.)	Pág. 38
Figura 32: Comparación entre sistemas de coordenadas	Pág. 38
Figura 33: Distribución velocidades. Movimiento de avance	Pág. 39
Figura 34: Distribución velocidades. Movimiento de retroceso	Pág. 40
Figura 35: Distribución velocidades. Movimiento de descenso	Pág. 41
Figura 36: Distribución velocidades. Movimiento de ascenso	Pág. 41
Figura 37: Distribución velocidades. Movimiento de estribor	Pág. 42
Figura 38: Distribución velocidades. Movimiento de babor	Pág. 43
Figura 39: Distribución velocidades. Guiñada negativa	Pág. 43
Figura 40: Distribución velocidades. Movimiento de Guiñada	Pág. 44
Figura 41: Distribución velocidades. Movimiento de cabeceo	Pág. 45
Figura 42: Distribución velocidades. Cabeceo negativo	Pág. 45
Figura 43: Distribución velocidades. Movimiento de balance	Pág. 46
Figura 44: Distribución velocidades. Balance negativo	Pág. 47
Figura 45: Distribución velocidades. Avance y descenso	Pág. 47
Figura 46: Distribución velocidades. Avance y ascenso	Pág. 48
Figura 47: Distribución velocidades. Avance y babor	Pág. 49
Figura 48: Distribución velocidades. Avance y estribor	Pág. 49
Figura 49: Distribución velocidades. Retroceso y descenso	Pág. 50

Figura 50: Distribución velocidades. Retroceso y ascenso	Pág. 51
Figura 51: Distribución velocidades. Retroceso y babor	Pág. 51
Figura 52: Distribución velocidades. Retroceso y estribor	Pág. 52
Figura 53: Sistema de referencia automático erróneo	Pág. 53
Figura 54: Distancia entre centro de masas y sistema de coordenadas 1	Pág. 54
Figura 55: Nuevo sistema de referencia	Pág. 55
Figura 56: Masa añadida para sección rectangular	Pág. 65
Figura 57: Código regresión en MatLab y ejemplo resultados del cálculo	Pág. 66
Figura 58: Ejemplos de representación gráfica de regresiones	Pág. 66
Figura 59: Ejemplo código "Cfd_cruzados" para coeficientes cruzados	Pág. 67
Figura 60: Regresión Fuerza lateral. Avance	Pág. 68
Figura 61: Regresión momentos X e Y. Avance	Pág. 69
Figura 62: Regresión precisa, momento Z. Avance	Pág. 69
Figura 63: Regresión fuerza lateral. Retroceso	Pág. 70
Figura 64: Regresión momentos X e Y. Retroceso	Pág. 70
Figura 65: Regresión precisa, momento Z. Retroceso	Pág. 70
Figura 66: Regresión fuerza lateral. Descenso	Pág. 71
Figura 67: Regresión momentos X e Y. Descenso	Pág. 71
Figura 68: Regresión precisa, momento Z. Descenso	Pág. 72
Figura 69: Regresión fuerza lateral. Ascenso	Pág. 72
Figura 70: Regresiones momentos X e Y. Ascenso	Pág. 73
Figura 71: Regresión precisa, momento Z. Ascenso	Pág. 73
Figura 72: Regresión fuerzas X e Y. Babor y estribor	Pág. 74
Figura 73: Regresión fuerza lateral. Babor y estribor	Pág. 74
Figura 74: Regresión momentos X e Y. Babor y estribor	Pág. 74
Figura 75: Regresión momento Z. Babor y estribor	Pág. 75
Figura 76: Regresión errónea Fuerza X y Momento Z. Guiñada negativa	Pág. 76
Figura 77: Regresión momentos X e Y. Cabeceo	Pág. 77
Figura 78: Regresión momentos X e Y. Cabeceo negativo	Pág. 77
Figura 79: Regresión momento en Z. Balance	Pág. 78
Figura 80: Regresión momento en Z. Balance negativo	Pág. 79
Figura 81: Dispositivo y medidor de vibraciones	Pág. 93
Figura 82: Acelerómetro colocado y medida de la vibración	Pág. 93
Fig. 83: Sistema de ecuaciones. Fórmula momento de inercia ROV	Pág. 95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Velocidades de rotación de los motores	Pág. 23
Tabla 2: Simulaciones elección de mallado	Pág. 37
Tabla 3: Fuerzas y momentos. Movimiento de avance	Pág. 39
Tabla 4: Fuerzas y momentos. Movimiento de retroceso	Pág. 40
Tabla 5: Fuerzas y momentos. Movimiento de descenso	Pág. 40
Tabla 6: Fuerzas y momentos. Movimiento de ascenso	Pág. 41
Tabla 7: Fuerzas y momentos. Movimiento de estribor	Pág. 42
Tabla 8: Fuerzas y momentos. Movimiento de babor	Pág. 42
Tabla 9: Fuerzas y momentos. Movimiento de guiñada negativa	Pág. 43
Tabla 10: Fuerzas y momentos. Movimiento de guiñada	Pág. 44
Tabla 11: Fuerzas y momentos. Movimiento de cabeceo	Pág. 44
Tabla 12: Fuerzas y momentos. Movimiento de cabeceo negativo	Pág. 45
Tabla 13: Fuerzas y momentos. Movimiento de balance	Pág. 46
Tabla 14: Fuerzas y momentos. Movimiento de balance negativo	Pág. 46
Tabla 15: Fuerzas y momentos. Avance y descenso	Pág. 47
Tabla 16: Fuerzas y momentos. Avance y ascenso	Pág. 48
Tabla 17: Fuerzas y momentos. Avance y babor	Pág. 48
Tabla 18: Fuerzas y momentos. Avance y estribor	Pág. 49
Tabla 19: Fuerzas y momentos. Retroceso y descenso	Pág. 50
Tabla 20: Fuerzas y momentos. Retroceso y ascenso	Pág. 50
Tabla 21: Fuerzas y momentos. Retroceso y babor	Pág. 51
Tabla 22: Fuerzas y momentos. Retroceso y estribor	Pág. 52
Tabla 23: Momentos erróneos. Movimiento de avance	Pág. 53
Tabla 24: Error de cálculo en movimiento de ascenso	Pág. 54
Tabla 25: Comparativa nuevos cálculos de momentos	Pág. 55
Tabla 26: Nomenclatura estándar AUV	Pág. 60
Tabla 27: Coeficientes de masa añadida	Pág. 64
Tabla 28: Coeficientes de amortiguamiento. Avance.	Pág. 68
Tabla 29: Coeficientes de amortiguamiento. Retroceso	Pág. 69
Tabla 30: Coeficientes de amortiguamiento. Descenso	Pág. 71
Tabla 31: Coeficientes de amortiguamiento. Ascenso	Pág. 72
Tabla 32: Coeficientes de amortiguamiento. Babor y estribor	Pág. 73
Tabla 33: Coeficientes de amortiguamiento. Guiñada	Pág. 75
Tabla 34: Coeficientes de amortiguamiento. Guiñada negativa	Pág. 75
Tabla 35: Coeficientes de amortiguamiento. Cabeceo	Pág. 76
Tabla 36: Coeficientes de amortiguamiento. Cabeceo negativo	Pág. 77
Tabla 37: Coeficientes de amortiguamiento. Balance	Pág. 78
Tabla 38: Coeficientes de amortiguamiento. Balance negativo	Pág. 78
Tabla 39: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Avance y descenso	Pág. 80
Tabla 40: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Avance y ascenso	Pág. 81
Tabla 41: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Avance y babor	Pág. 81
Tabla 42: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Avance y estribor	Pág. 82
Tabla 43: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Retroceso y descenso	Pág. 82
Tabla 44: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Retroceso y ascenso	Pág. 83
Tabla 45: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Retroceso y babor	Pág. 83
Tabla 46: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Retroceso y estribor	Pág. 84
Tabla 47: Coeficientes cruzados con MatLab. Avance y ascenso	Pág. 84
Tabla 48: Coeficientes cruzados con MatLab. Avance y descenso	Pág. 85
Tabla 49: Coeficientes cruzados con MatLab. Avance y babor	Pág. 85

Tabla 50: Coeficientes cruzados con MatLab. Avance y estribor _____	Pág. 85
Tabla 51: Coeficientes cruzados con MatLab. Retroceso y descenso _____	Pág. 85
Tabla 52: Coeficientes cruzados con MatLab. Retroceso y ascenso _____	Pág. 86
Tabla 53: Coeficientes cruzados con MatLab. Retroceso y babor _____	Pág. 86
Tabla 54: Coeficientes cruzados con MatLab. Retroceso y estribor _____	Pág. 86
Tabla 55: Medida del volumen del ROV _____	Pág. 92
Tabla 56: Ejemplo medidas de frecuencia de vibración _____	Pág. 95
Tabla 57: Frecuencias en rad/s _____	Pág. 95
Tabla 58: Cálculo momento de inercia disco _____	Pág. 95
Tabla 59: Coeficiente de rigidez y momentos de inercia. Momento de inercia del ROV _____	Pág. 96

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Definición de ROV.

Se denomina ROV (remotely operated vehicle) a los vehículos sumergibles no autónomos, operados o tripulados a remoto a través de un cordón de sujeción, alimentación, y comunicación directamente desde el operador a distancia. También existen otros tipos de vehículos submarinos no tripulados como los UUV's y los AUV's. Los UUV's (en inglés, Unmanned Underwater Vehicle) están controlados por un operador remoto a través de algún tipo de enlace de comunicaciones y los AUV's (en inglés, Autonomous Underwater Vehicle) no necesitan de aportaciones de un operador.

Para el desarrollo del presente proyecto, el departamento de ingeniería mecánica ha solicitado la adquisición de un pequeño ROV comercial que fue comprado por la escuela de ingeniería industrial (ETSII) de la universidad politécnica de Cartagena. Tras la consulta con el antiguo director del centro, Don Antonio Guillamón, el cual fue el que adquirió el ROV, se llegó a un acuerdo con el director de la ETSINO (escuela técnica superior de ingeniería naval y oceánica) Don Gregorio Munuera, el cual era el beneficiario primero del ROV y conecedor del desarrollo que se llevaría a cabo con este proyecto.

Se trata de un ROV desarrollado por una pequeña empresa de Berkeley (California) llamada OPENROV, la cual lleva años desarrollando varios modelos de ROV. El adquirido es el OPENROV 2.8., vendido por piezas y que debe ser montado por el comprador. Pensado para el desarrollo de ingeniería y estudiantes de grados universitarios en ingeniería.

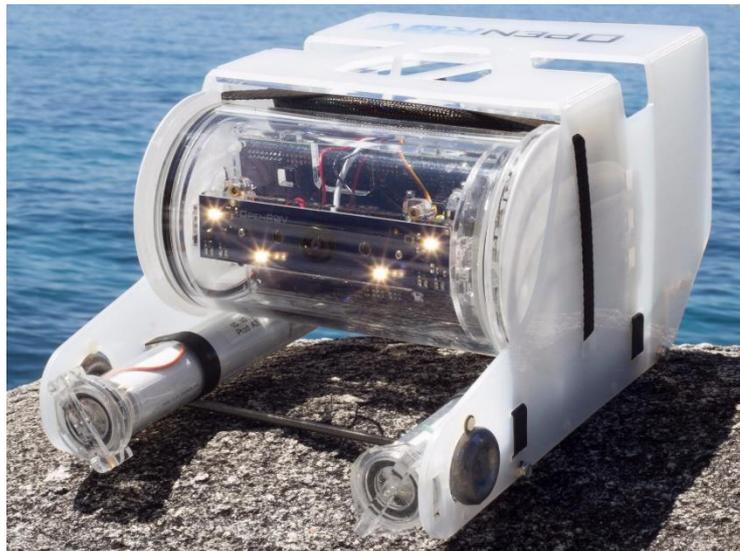


Fig. 1: Modelo OPENROV 2.8 kit

1.2.- Antecedentes.

Este proyecto se puede describir básicamente como la continuación lógica de varios proyectos hechos bajo la supervisión del departamento de ingeniería mecánica. Estos proyectos han estudiado el diseño de un ROV virtualmente (con el futuro objetivo de construirlo físicamente), analizando su comportamiento en el seno de flujos de agua con simulaciones en SolidWorks. También han estudiado el fundamento teórico de los CFDs y su utilidad para el estudio de las fuerzas que aparecen sobre cuerpos sumergidos en un fluido y con movimiento. Pero ningún proyecto de los mencionados ha podido comparar los resultados de los software usados con otros resultados obtenidos en la realidad. Lo más parecido a esto ha sido el

proyecto de José Antonio Ruiz Ruiz, que ha comparado resultados entre varios modelos de cálculo a partir de lo que obtuvo con las simulaciones de SolidWorks.

El departamento, con el propósito de desarrollar el ROV propio, ha ido estableciendo las bases teóricas más importantes para que en el futuro se pueda construir un ROV no tripulado y capaz de auto controlarse con garantías.

1.3.- Objetivos.

Con lo antes mencionado, el objetivo principal del presente proyecto es el de establecer las bases fundamentales para poder desarrollar futuros proyectos de ROVs (de diseño propio) capaces de moverse de forma autónoma en sumersiones y sin la necesidad de estar conectado a la superficie. Se necesitará de programación de un software capaz de corregir las desviaciones provocadas por las fuerzas y momentos que aparecen sobre los cuerpos móviles en fluidos. Este software no puede ser programado desde cero si se requiere una fiabilidad en el funcionamiento real, por lo que se necesita de ensayos experimentales para manejar datos reales y usarlos para la programación.

Para los ensayos, es necesario de un ROV real ya diseñado y construido, y con capacidad de programar el software integrado para futuros programas de control (arduino). También es necesario hacer un estudio simulado del ROV real, y compararlo con los ensayos, para establecer que son fiables los datos que se obtienen virtualmente.

Con todo ello, se establecen las bases como:

- Construcción del ROV
- Modelización en CAD, diseño en 2D de cada parte del ROV
- Modelización en 3D, mediante software SolidWorks de cada parte y del ensamblaje completo
- Modelización cálculos de CFDs
- Simulación en flowsimulation (herramienta de SolidWorks)
- Simulación mediante CFDs (entorno virtual de movimiento)
- ROV desarrollado y preparado para futuros proyectos
- Software obtenido capaz de gobernar el ROV

1.4.- Metodología y fases del proyecto.

1.- Construcción completa de un ROV (Remote Operated Vehicle, vehículo operado a distancia) adquirido por la facultad de ingenieros técnicos industriales, que consiste en un robot submarino no tripulado, conectado a una unidad de control en la superficie mediante un cable umbilical y controlado por un operador a distancia.

1.1.- Realización del inventario preciso de todas las partes del ROV

1.2.- Construcción a realizar siguiendo las instrucciones de cada parte del ROV (chasis, electrónica, casco, motores...)

1.3.- Comprobaciones de funcionamiento del software y hardware del dispositivo.

2.- Adición de una unidad de medición inercial (IMU). Para la toma de medidas de presión, temperatura, orientación y velocidad del ROV operando dentro del agua.

3.-Desarrollo de un software capaz de controlar los movimientos del ROV automáticamente sin necesidad de un operador que lo controle a distancia. Dicho software deberá corregir los desviamientos producidos por las fuerzas de fricción y sustentación propias del movimiento de un sólido móvil en el seno de un flujo externo.

3.1.- Cálculo fuerzas de fricción y sustentación mediante CFDs en MATLAB a partir de la toma de datos que la IMU hace continuamente mientras funciona el ROV.

3.2.- Modelización del ROV mediante diseño en 3D mediante el programa SOLIDWORKS.

- 3.3.- Simulación del comportamiento de éste en un flujo externo de agua en determinadas condiciones con el objetivo de extraer los datos necesarios (fuerzas, momentos, líneas de corriente...) para el cálculo (mediante MATLAB) de los coeficientes hidrodinámicos del ROV a través de CFDs.
- 3.4.- Desarrollo y simulación informática de un controlador que gobierne el ROV y sus movimientos.
- 4.- Comparación de los resultados obtenidos en cada parte y corrección de las diferencias.
- 5.- El objetivo final es el de, a partir de los resultados obtenidos, crear un programa de control para un ROV capaz de dirigirlo bajo cualquier tipo de movimiento automáticamente, y que sea capaz de corregir los desvíos producidos por las fuerzas que aparecen en el flujo de agua.
 - 5.1.- Con el programa obtenido de la simulación informática, se controla el ROV en un experimento en la realidad, dentro de una piscina en la que se medirá la velocidad real, orientación, movimiento descrito por el submarino... etc.
 - 5.2.- Comprobación de que ha funcionado correctamente. Cálculo de errores.
 - 5.3.- Modificación del programa de manera que se consiga que los movimientos de un segundo ensayo sean lo más cercanos posibles a los que se observen en la simulación informática.
- 6.- Posibles ampliaciones y mejoras:
 - 6.1.- Es posible que durante la construcción aparezcan problemas, los cuales deben ser subsanados e incluidos en la memoria del proyecto, tales como: Piezas defectuosas, mal funcionamiento de los motores adquiridos para la propulsión del ROV (velocidades de giro distintas a las esperadas), falta de materiales o maquinaria necesaria para la construcción (ej: soldaduras, elementos de unión...), y cualquier otro tipo de imprevistos.
 - 6.2.- Actualización del software del dispositivo para poder acoplar la IMU.
 - 6.3.- Adecuación del software del ROV para su fácil manejo mediante un ordenador.
 - 6.4.- Inclusión de un dispositivo de control manual como un Joystick.
 - 6.5.- Calcular otros parámetros del flujo mediante SolidWorks Flow Simulation para futuros proyectos.
 - 6.6.- Otras que pueden ir apareciendo conforme se desarrolle el proyecto.

2.- CONSTRUCCIÓN DEL ROV

2.1.- Plan de construcción y metodología.

Para la construcción del ROV, lo primero es comprobar que todo lo que es necesario ha sido adquirido y viene empaquetado correctamente. Lo que hace necesario un primer Inventario de todo lo que se ha adquirido.

Tras el inventario, se usarán las guías que facilitan los compañeros de la empresa OPENROV con el pequeño "inconveniente" de que están en inglés, pero no supondrá un problema.

Conforme se siguen cada una de las guías, se van montando e integrando las partes del ROV, tras cada cual se realiza un chequeo. Así hasta la finalización del montaje.

Es importante mencionar que durante todo el proceso de montaje se han ido tomando datos de tiempos de construcción y también se ha grabado en vídeo todo el proceso. Todo para tener una documentación lo más completa posible que requiere un proyecto de ingeniería. Dicha documentación se encuentra en los Anexos del proyecto, y que pueden ser consultados por aquel que lo desee en el archivo del departamento de ingeniería mecánica. Concretamente en el Anexo I.

2.1.1.- Inventario

Se ha comprado un Open Rov 2.8 Kit y en la primera semana se procede a realizar el correspondiente inventario de lo que se ha adquirido.

Junto con el kit del Open Rov también se ha comprado una pistola de vacío y los materiales necesarios para la construcción del ROV.

Para comprobar que están incluidos todos los elementos del kit se compara con el archivo web de Open Rov donde viene descrito el contenido de dicho kit. Conforme se va chequeando cada pieza también se marca cada pieza con un código para tenerlo todo organizado.

OPEN ROV 2.8. KIT (Kit parts manifest), que incluye:

- 3 Pegatinas "Open rov"
- 2 Contrapesos de plomo de 3 lb.
- Gorro rojo
- Beagle Board Black (Placa computadora de hardware libre), con cable USB incluido
- Casco del ROV
- Cable DB-25



Fig.2: Casco y placa de hardware libre

- Bolsa piezas 1 (B1) - Piezas acrílico de 3mm de espesor. 27 piezas incluyendo:
 - 9 piezas de forma:
 - B1-1
 - B1-2
 - B1-3
 - B1-4
 - B1-5
 - B1-6.1//6.2
 - B1-7.1//7.2
 - 6 círculos con un agujero central:
 - B1-8.1//8.2//8.3//8.4//8.5//8.6
 - 2 círculos con dos agujeros en el diámetro
 - B1-9.1//9.2
 - 2 piezas en forma de "C":
 - B1-10.1//10.2
 - 2 círculos con 2 muescas:
 - B1-11.1//11.2
 - 3 piezas ovaladas:
 - B1-12.1//12.2//12.3
 - Barra transversal, soporte cámara: B1-13
 - 2 círculos con orificios de forma (endcap electronic chasis):
 - B1-14.1//14.2



Fig. 3: Bolsa piezas 1 con marcas

- Bolsa piezas 2 (B2) - Piezas acrílico de 6mm de espesor. 20 piezas incluyendo:
 - 5 piezas de forma:
 - B2-1
 - B2-2
 - B2-3
 - B2-4
 - B2-5

- 3 círculos con un agujero:
 - B2-6.1//6.2//6.3
- 2 circunferencias con muescas:
 - B2-7.1//7.2
- 2 ángulos curvos:
 - B2-8.1//8.2
- 3 “U” de base curva:
 - B2-9.1//9.2//9.3
- 2 piezas en forma de “pinza” (soporte cámara):
 - B2-10.1//10.2
- Pieza en “U” de base recta: B2-11
- 2 circunferencias “abiertas”:
 - B2-12.1//12.2

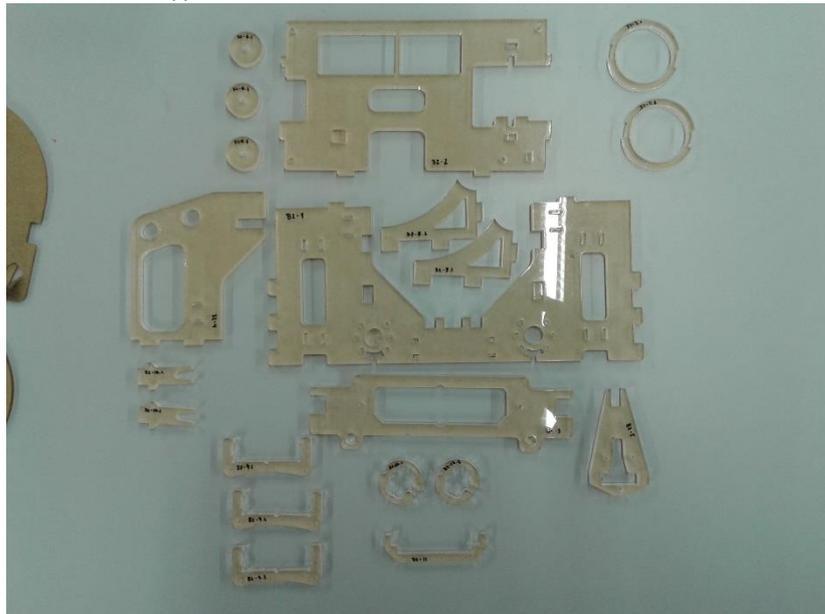


Fig. 4: Bolsa piezas 2 con marcas

- 2 tubos para alojamiento de baterías:
 - T-1 y T-2
- 3 hélices propulsoras
- Bolsa piezas 3 (B3) - Piezas acrílico de acabado (endcap) de distintos espesores. 12 piezas incluyendo:
 - 2 piezas blancas de 1.5mm de espesor:
 - B3-1
 - B3-2
 - 4 piezas transparentes de 1.5mm de espesor:
 - B3-3
 - B3-4
 - B3-5
 - B3-6
 - 2 piezas transparentes de 3mm de espesor:
 - B3-7
 - B3-8
 - 4 piezas transparentes de 6mm de espesor:
 - B3-9
 - B3-10

- B3-11
 - B3-12
- Anillos de goma (aislantes):
 - 4 anillos grandes
 - 4 anillos pequeños
- Bolsa piezas 4 (B4) - Piezas varias. 27 piezas incluyendo:
 - Aleta: B4-1
 - 3 tubos impermeables aislantes de calor de 10":
 - B4-2.1//2.2//2.3
 - Malla
 - Brida grande
 - 10 bridas pequeñas
 - Jeringuilla (un sólo uso)
 - Correa con cierre regulable
 - 8 bandas de goma para sujeción
 - Cuerda conectora (amarilla y azul)
- 3 motores DST-700 (sin ensamblar)
- Servomotor HiTec HS-81 con sus piezas correspondientes para el ensamblaje



Fig. 5: Bolsas piezas 3 y 4, y motores

- Placa de control
- Adaptador de red Wifi por línea eléctrica TENDA
- Cámara (con conector de color negro incluido)
- Bolsa piezas 5 (B5) - Piezas electrónicas. 17 piezas incluyendo:
 - Placa de luces LED
 - Soporte superior de la placa
 - Cable USB
 - 2 fusibles
 - 3 Lasers
 - Puente RJ-45
 - 4 cables para placa de luces:
 - 2 cables rojos
 - 2 cables negros
 - 4 terminales de batería:
 - 2 positivos
 - 2 negativos
- Bolsa piezas 6 (B6) - Sujetadores. 72 piezas incluyendo:
 - Alojamiento tornillo de métrica M3x25
 - 6 Tornillos de nylon blancos de métrica M3x12
 - 9 Tuercas de nylon negras de métrica M3
 - 5 Tuercas de bloqueo de métrica M5
 - 5 Tuercas (inox) de métrica M5
 - Llave inglesa hexagonal

- 13 Tornillos de acero inoxidable de métrica M2x12
- 13 tuercas (inox) de métrica M2
- 13 arandelas de seguridad de métrica M2



Fig. 6: Bolsas piezas 5 y 6

- Tubo alojamiento parte electrónica: T-3
- 2 Varillas roscadas de métrica M5
- Bolsa piezas 7 (B7) - Piezas IMU. 8 piezas incluyendo:
 - IMU
 - 4 cables de colores
 - Tubo de plástico: B7-1
 - 2 piezas de forma (aislamiento IMU):
 - B7-2
 - B7-3

A parte del Kit 2.8. de OPENROV se han adquirido las baterías de litio de 3.2v junto con 3 cargadores.
 Pegamentos acrílicos - Bolsa Piezas 8
 Kit de la pistola de vacío.

2.1.2.- Guías de construcción y organización.

Las guías que se usarán han sido adquiridas en la Web de OPENROV, para lo que es necesario un registro de usuario, en el que se expone el porqué de la compra del ROV. Esto da acceso no sólo a las guías de construcción, sino que también a un foro común para todos aquellos que tienen el mismo ROV y necesitan de ayuda por parte de la empresa, esto es importante ya que es algo que será muy útil en futuras fases del proyecto. En el foro se exponen también ideas de mejora para el ROV y otras tantas guías de accesorios que se le pueden añadir al kit comprado.

Todas las guías utilizadas se encuentran en el anexo de la memoria.

La organización para la construcción siguiendo las guías es de la siguiente manera:

1. Descarga de la guía y una primera lectura de cada paso a seguir
2. Anotación y disposición de las piezas necesarias que se usarán en la guía
3. Preparación de la mesa de trabajo, así como el material necesario para realizar cada uno de los pasos.
4. Protección del montador con guantes de látex, se manejarán productos adhesivos en el montaje.
5. Se lleva a cabo la consecución de cada paso hasta terminar la guía.
6. Chequeo de que los pasos se han realizado correctamente.
7. Se dejan secar las piezas montadas y se apartan hasta que sean necesarias en futuros pasos.
8. Se pasa a la siguiente guía.

2.1.3.- Materiales y equipos utilizados

La totalidad de la construcción se ha llevado a cabo en el laboratorio de I+D+I del departamento de Ingeniería Mecánica de la ETSII. Para el arranque del ROV y sus modificaciones se usan los ordenadores disponibles en dicho laboratorio.

La mayoría de las piezas que conforman el ROV son de metacrilatoacrílico. Por lo que el material adhesivo de unión entre estas piezas es un pegamento acrílico líquido, que al hacer contacto con el metacrilato reacciona y fusiona fuertemente las piezas unidas.

Para la aplicación del adhesivo se usa un biberón con una punta fina, para facilitar la aplicación en las uniones de las piezas.



Fig. 7: Pegamentos y aplicadores

Para la protección de las baterías y el cableado interno se utiliza otro tipo de adhesivo, se trata de la resina epoxy, que se mezcla con un endurecedor y, tras un proceso de curación (8~15 horas) se convierte en una pieza totalmente sólida uniéndose a lo que está en contacto con ella.

Para las uniones de los cables con las placas electrónicas, y los contactos de las baterías, se ha utilizado un soldador eléctrico y acople de estaño, lo cual está disponible en el laboratorio del departamento.

En cada una de las guías se especifican más herramientas necesarias para ejecutar adecuadamente los pasos, tales como: cúter, destornillador, alicates... etc.

2.2.- Descripción de cada fase de construcción.

2.2.1.- “Acrylic Cementing”, o primera fase de pegado acrílico.

Esta primera fase sigue las instrucciones de la guía 1, en el que se lleva a cabo la primera parte del pegado del chasis del ROV, siendo todas las piezas que lo conforman de metacrilato. Primero ha de retirarse el fil protector de cada una de las piezas, que se puede hacer fácilmente con un cúter. También hay que retirar las partes sobrantes que protegen los orificios de cada pieza en el embalaje.

Para el correcto uso del cemento acrílico (adhesivo), se adjunta en la guía un vídeo de explicación como ayuda para alguien sin experiencia en su utilización. Tras la consulta, se procede a pegar las piezas según las indicaciones de la guía.

Primero se hace contacto entre las piezas, y después se introduce la punta fina del biberón de adhesivo en el pequeño hueco que queda entre las piezas. Una vez introducido se expulsa la cantidad de necesaria de adhesivo (líquido) hasta que se aprecia que queda toda la junta “empapada” por el adhesivo.



Fig. 8: Pegado de piezas chasis

Puesto que tiene una gran velocidad de reacción, en apenas 5 min los elementos pegados se pueden seguir utilizando para cada uno de los siguientes pasos.

Una vez se han completado todos los pasos, se comprueba que están bien unidos y en su correcta posición. Después se dejan apartados para las siguientes guías de construcción.

2.2.2.- “Electronics tube endcaps”, tapas del tubo de electrónica.

Se pasa a la guía 2, en la que se procede a montar y sellar las tapas del tubo de la parte electrónica. Puesto que es la parte más importante del ROV, se tuvo especialmente cuidado en su montaje. Asegurando un buen sellamiento de este tubo, se puede garantizar la seguridad de las placas electrónicas, las cuales se estropearían con la inclusión de agua o humedad durante su funcionamiento.

Los primeros pasos son la preparación del tapón del orificio por el cual se hará el vacío disminuyendo la presión en su interior antes de sumergir el ROV. Este tapón está formado con la parte interior de una jeringuilla (vástago) y la punta del exterior de ésta. De manera que al recortar la jeringuilla con una sierra, según las medidas indicadas en la guía, y lijando los bordes con papel de lija, se introducirá en el interior de la tapa del tubo de electrónica. Después de hacer el vacío, se introduce el vástago (al ser el de la propia jeringuilla nos aseguramos que no hay fugas y está totalmente sellado), y, haciendo tope con el interior, hace imposible la entrada de humedad o agua. A priori puede parecer muy simple y poco fiable, pero posteriormente se verá que funciona correctamente.



Fig. 9: Introducción jeringuilla en la tapa

Una vez preparado el tapón, se montan y pegan las piezas acrílicas que conforman las tapas del tubo de electrónica según el orden indicado en la guía.

La siguiente parte consta de sellar con la resina epoxy estas tapas y las de los tubos de las baterías, haciendo especial hincapié en el rellenado de resina del hueco que queda en el cableado de las conexiones principales.

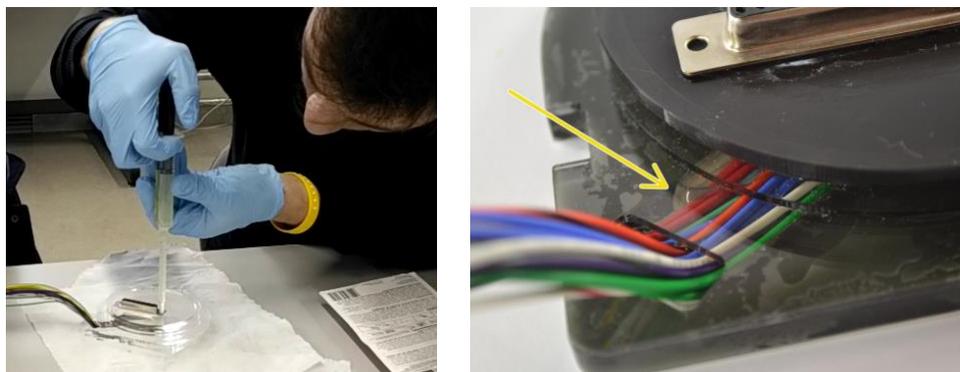


Fig. 10: Rellenado de resina en cableado

Finalmente, se dejan secar y curar todas las partes rellenadas con esta resina, por lo que se decidió dejar un mínimo de 24 horas para asegurar la curación completa de la resina. Se pasa a la siguiente guía.

2.2.3.- Electrónica del ROV.

En la guía 3, se describen los pasos para el montaje de toda la parte electrónica del ROV, incluyendo la cámara, los láseres, el arduino, las luces LED, y el servomotor que gobierna la inclinación de la cámara. También se acopla todo sobre la placa principal del ROV.

Pero primero se acoplan dos placas de comunicaciones extraídas de dos PLC hermanos, que serán las que establezcan la comunicación por cable entre el ROV y el ordenador (piloto). Se acopla una a la caja de comunicaciones, que es la que irá directamente conectada al ordenador por dos cables, uno USB y otro Ethernet. Y la otra, sobre la misma placa principal del ROV, estas dos partes se comunicarán a través del cordón o cable principal del ROV.

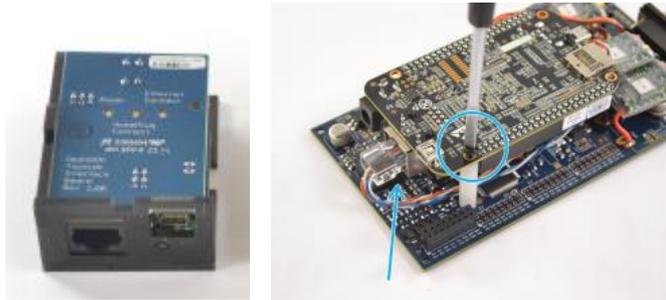


Fig. 11: Conexión placa comunicaciones

En el siguiente paso se prepara el motor eléctrico que, controlado por la placa principal, permitirá al piloto cambiar el ángulo de orientación de la cámara.

Finalmente se ensamblan la cámara, las luces, y el motor eléctrico. Para las conexiones de los cables se utiliza el soldador eléctrico con aporte de estaño. Una vez todo ensamblado, se atornilla al chasis que se montó en la primera fase de construcción. Se pasa a la siguiente guía.

2.2.4.- “Wire routing”, cableado y conexiones principales.

Aunque la parte principal de la guía 4 es sobre el cableado de los motores y las conexiones principales, primero se incluyen varios pasos para el montaje de los soportes donde irán los 3 motores, y el montaje también de los álabes de cada motor.

Después se preparan todos los cables que conectarán los motores (3 cables por motor), cortando la parte sobrante y pelando la punta según las medidas indicadas en la guía.

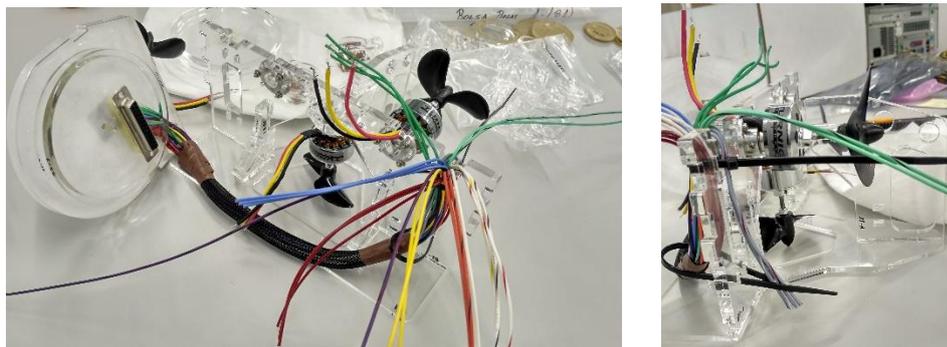


Fig. 12: Preparación cableado

Una vez montado y preparados los cables para la soldadura, se sueldan todos los cables con aquellos que indica la guía (entre motores y cables salientes de la placa electrónica) por medio de los colores que tiene el cableado. Para la protección de la soldadura (éstas están expuestas al medio acuático), el kit incorpora tubos de plástico preparados para fundirlos sobre cada soldadura, pero se toma la decisión de usar otro aislante termoplástico de manera que pueda ser posible su desmontaje para futuras remodelaciones, lo cual no sería posible si se fundieran los tubos de plástico sobre cada soldadura.

Tras el proceso de soldadura, se enganchan con bridas cada parte del cableado al chasis de la estructura principal del ROV, de manera que no interfieran en el ensamblaje final con el casco, y tampoco con el movimiento de los álabes de los motores.

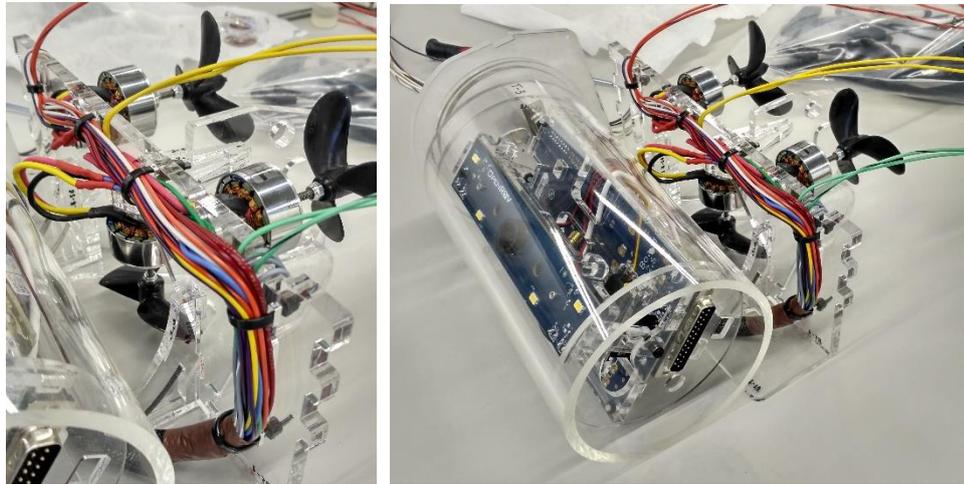


Fig. 13: Cableado soldado y montado

También en esta guía se citan unos pasos finales para la soldadura y montaje de los soportes positivo y negativo de las baterías, dentro de los tubos preparados para ello. Sobre las tapas que se montaron en la primera fase de pegado, se pegan placas de aluminio y se sueldan los soportes con el soldador eléctrico. Finalizada la soldadura, se rellenan con resina todos los orificios de las tapas de las baterías que comunican con el exterior.

Se pasa a la siguiente guía.

2.2.5.- Finalización.

La guía 5 consta de los pasos finales para la finalización de la construcción del ROV, y del calibrado de los láseres y el enfoque de la cámara.

Son pasos más simples que los anteriores, ya que se trata de montar todo bajo el casco principal, y conectar la parte electrónica (montada sobre el chasis de la parte electrónica) con la toma saliente del cableado que está pegada en las tapas del tubo de la electrónica. Los anillos de goma que hacen la estanqueidad de las tapas se lubrican con cera y se montan sobre las tapas del tubo principal (lo mismo para las tabas de los tubos de las baterías).

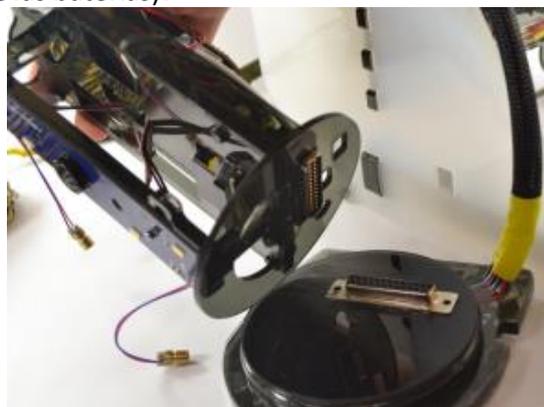


Fig. 14: Montaje final parte electrónica

En el montaje final se atornillan las varillas que aportan rigidez al casco, los pesos (plomos) necesarios para que el ROV se hunda en el medio marino (agua salada), las gomas de sujeción para los tubos de las baterías. También se suelda el cable de la conexión de comunicación principal (entre las placas de la caja

de comunicación y la placa principal que está dentro del tubo de electrónica) a los cables amarillos que se han dejado preparados en la anterior guía, y se conecta a la caja de comunicaciones.

El siguiente paso es conectar el ROV al ordenador y encenderlo, para ello se conecta a través de un cable USB (aporta la energía y enciende el ROV) y a través de otro cable Ethernet se establece comunicación con el software del ROV. Aquí aparecieron varios problemas:

- No se establecía conexión correctamente, por lo que no se encendía. Pero tras la revisión de las conexiones se consiguió encender.
- Una vez encendido, el ROV no hacía el sonido de encendido que debe hacer (que significa que está comunicando al ordenador a través de la caja de comunicaciones). Por lo que se volvieron a revisar las conexiones y la dirección IP (del ROV) que hay que indicar al ordenador que use. Finalmente se consiguió conectar y hacer que comunicara con el ordenador.

Después se calibran los láseres según el método explicado en la guía:

1. Se dibuja sobre un papel dos marcas en forma de cruz, separadas 10cm sobre una misma línea en orientación vertical.
2. Se coloca el papel en una superficie vertical a la altura del ROV, separado del ROV a unos 4 metros

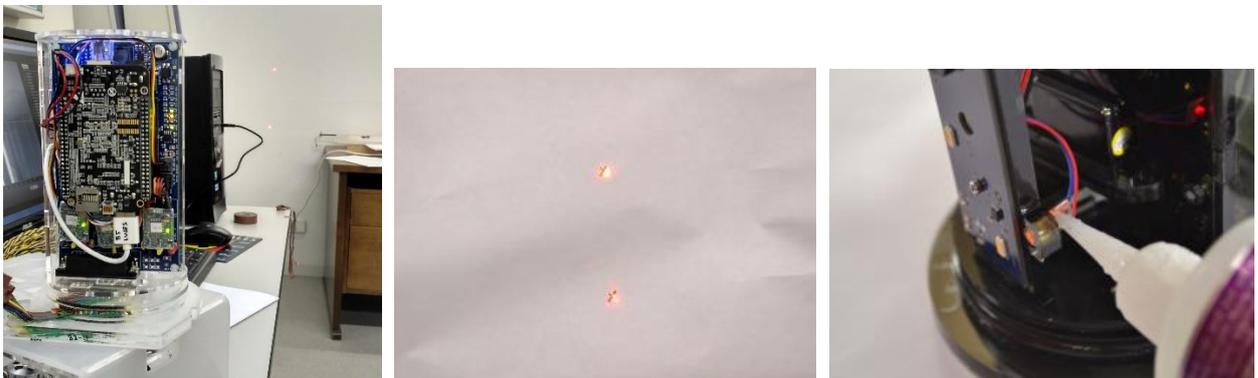


Fig. 15: Calibrado y sellado láseres

3. Se colocan los láseres en los soportes correspondientes y se encienden, haciéndolos coincidir con las marcas, si dan en el punto correcto, se sellan los láseres con pegamento en los soportes.

Una vez calibrados los láseres se comprueba que los motores giran en el sentido correcto. Para ello, en el software del ROV, se ejecutan los diagnósticos para testear los motores, haciéndolos girar cada uno en el sentido que corresponde, siendo satisfactorio el test. Para concluir que funcionan correctamente, se les hace girar en sentido contrario también, siendo también satisfactorio este test. El motor izquierdo gira en sentido anti-horario y el derecho en sentido horario. El motor vertical gira en sentido anti-horario para velocidad positiva (descenso), y en sentido horario para velocidad negativa (ascenso a la superficie).

Ya está todo colocado y calibrado en la parte electrónica. Una vez comprobado que todo funciona correctamente se puede seguir con la guía 5, donde indica el proceso para montar el tubo de la parte electrónica, ponerle el tapón preparado en el paso 2.2.2-, y hacerle el vacío en su interior.

Se procede de la siguiente manera:

1. Se coloca la tapa contraria a la de las conexiones de los cables, poniendo el anillo de goma lubricado con cera para asegurar la estanqueidad.
2. En el orificio que se preparó con la jeringuilla, se introduce el vástago que se dejó apartado en el paso 2.2.2-, y se corta de manera que quede a la altura de la tapa.
3. Se retira el vástago, y con la pistola de vacío, se extrae el aire del interior del tubo para hacer disminuir la presión.
4. Cuando ya se tiene una depresión suficiente, se retira la boquilla de la pistola de vacío y se vuelve a colocar el vástago. Ya se queda el tubo cerrado y preparado para sumergirse.



Fig. 16: Colocación tapa y vástago electrónica

Para la finalización de la construcción se ensambla todo y se sujeta con las correas de tela, asegurando que todo está fijado para introducirlo en el agua a falta de introducir las baterías.

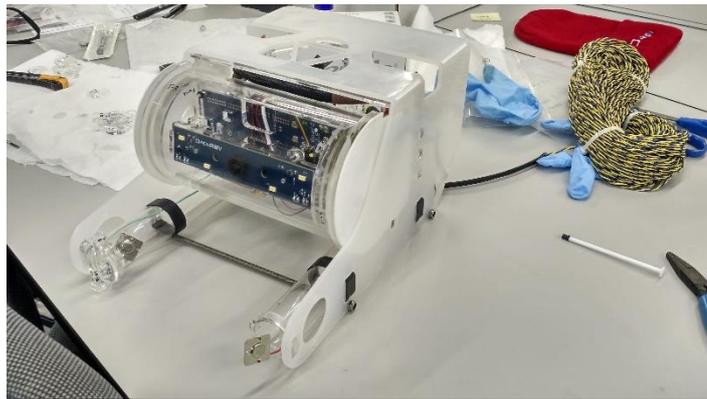


Fig. 17: Construcción finalizada, vista general

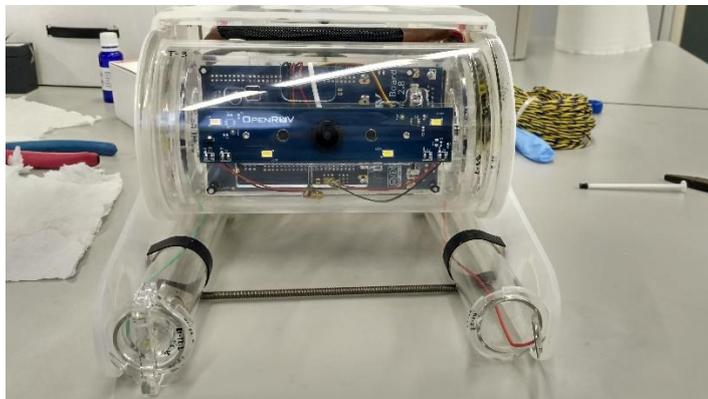


Fig. 18: Vista frontal

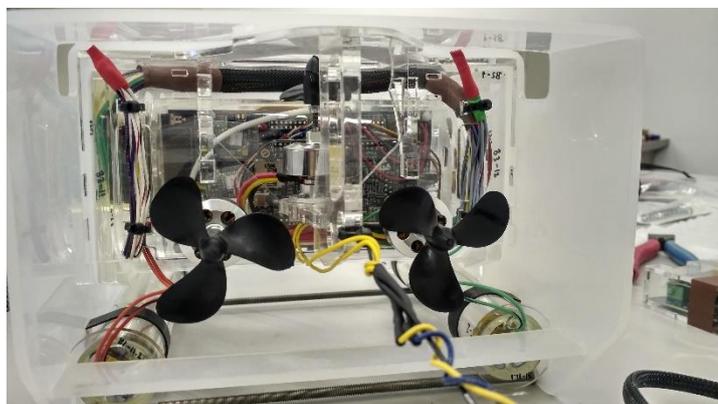


Fig. 19: Vista trasera

2.2.6.- Prueba de funcionamiento en el laboratorio.

Antes de realizar el primer ensayo en el medio acuático se decidieron hacer varias pruebas de funcionamiento para evitar fallos importantes y garantizar la seguridad del propio ROV.

Se introdujo el ROV en un tanque de agua del laboratorio de ingeniería mecánica del ELDI, para comprobar que no tenía ningún tipo de fisura por la que entrase agua o humedad a la parte electrónica. Confirmando la estanqueidad.

Con el ROV conectado al ordenador, se ponen en marcha todos los medios que incluye:

- Comprobación de funcionamiento luces LED: se encienden y apagan, y también se encienden en los 5 niveles de intensidad posibles, siendo satisfactorio su funcionamiento.
- Comprobación de los láseres: se encienden y apagan para comprobar que funcionan bien los comandos del software, siendo satisfactorio su funcionamiento.
- Comprobación del funcionamiento de la cámara: se confirma que al conectar el ROV al ordenador, en la pantalla de la interfaz del ROV se muestra en tiempo real lo que la cámara está enfocando. También se toman varias fotos a través de los comandos del software. Siendo satisfactorio su funcionamiento.
- Comprobación del funcionamiento del motor eléctrico que mueve el ángulo de enfoque de la cámara: se hace elevar y disminuir el ángulo de dirección de enfoque respecto el eje paralelo a tierra. También se prueban los comandos de elevar al máximo (+60º) y disminuir al mínimo dicho ángulo (-60º), y el de centrar la cámara (ángulo de enfoque 0). Siendo satisfactorio su funcionamiento.
- Comprobación del funcionamiento de las velocidades de los motores: el ROV dispone de 5 velocidades distintas para los 3 motores, siendo 1 la más baja, y 5 la más alta. Con los motores girando, se van cambiando las marchas de velocidad, pasando desde el nivel 1 al nivel 5 de uno en uno (acelerando), y en orden contrario se repite el procedimiento (decelerando). Siendo satisfactorio su funcionamiento.

Una vez concluidas las comprobaciones, se da por finalizada toda la fase de construcción del ROV, disponible para el primer ensayo en un medio acuático.

2.2.7.- Medida de la velocidad real de rotación de los motores.

Uno de los defectos del software, o más bien de la información aportada por la empresa suministradora del ROV, es que no adjuntan el dato de la velocidad de rotación de los motores. En la guía 5 se dice que los motores principales giran a la misma velocidad y el vertical a otra distinta. Pero no indica a qué velocidad en concreto, ni tampoco cómo varía ésta en cada nivel de las 5 velocidades.

Por todo ello, el director del proyecto aconsejó medir las velocidades de rotación de los motores de manera independiente unos de otros, para cada una de las 5 velocidades, ya que será un dato útil en el desarrollo de futuros proyectos y mejora la documentación de éste. Con su ayuda, se procedió a medir la frecuencia de giro mediante un foco estroboscópico, obteniendo los siguientes datos:

Velocidades	Nivel 1 (rpm)	Nivel 2 (rpm)	Nivel 3 (rpm)	Nivel 4 (rpm)	Nivel 5 (rpm)
Motor 1 (izq.)	2085	3190	4185	5219	7915
Motor 2 (der.)	2085	3190	4185	5219	7915
Motor 3	2035	4183	5092	5957	6804

*Tabla 1: Velocidades de rotación de los motores **

*Donde los motores 1 y 2, son los motores principales, izquierdo y derecho respectivamente, comprobando que giran a la misma velocidad. El motor 3 es el motor vertical.

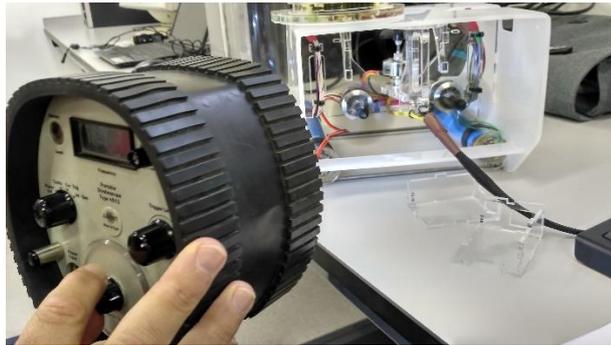


Fig. 20: Medida velocidad de giro

También a modo de documentación extra, se anota la dirección de los motores para cada tipo de movimiento:

- Movimiento de avance: El motor 1 gira en sentido anti-horario, y el motor 2 en sentido horario. En este movimiento el motor 3 permanece inmóvil.
- Movimiento de retroceso: El motor 1 gira en sentido horario, y el 2 en sentido anti-horario. En este movimiento el motor 3 permanece inmóvil.
- Movimiento de giro positivo (hacia la derecha, ya que el eje Z positivo es hacia abajo): Los motores 1 y 2 giran en el mismo sentido horario. En este movimiento el motor 3 permanece inmóvil.
- Movimiento de giro negativo (hacia la izquierda): Los motores 1 y 2 giran en el mismo sentido anti-horario. En este movimiento el motor 3 permanece inmóvil.
- Movimiento de ascenso/descenso: En este caso sólo gira el motor 3 (vertical), en sentido horario para el ascenso, y en sentido anti-horario para el descenso.
- Movimientos combinados: para el tipo de manejo utilizado (introducción de comandos mediante el teclado del ordenador), sólo es posible combinar los movimientos de dos direcciones, es decir, sólo puedo indicar al ROV que avance y descienda, por ejemplo, pero no puedo indicarle que avance y gire al mismo tiempo.

2.3.- Puesta en marcha del ROV.

2.3.1.- Preparación de la primera sumersión.

Para hacer el primer ensayo real del ROV, fueron necesarias varias decisiones:

- Primeramente, el lugar de ensayo. Se debatió entre sumergir el ROV en el mar (en el puerto de Cartagena), o en una piscina (en el club Santiago, adscrito a la Universidad). Puesto que era necesaria una toma de corriente (para el ordenador piloto del ROV), y en caso de una avería del ROV, era más sencilla su recuperación en la piscina, se decidió sumergirlo en la piscina del club Santiago. Se pidió permiso a la consejería de la UPCT para poder usar dicha piscina y se concedió con la condición de hacerlo dentro del horario de apertura del club al público.
- Quienes llevarían a cabo el ensayo. En un principio, el proyecto de construcción se empezó de forma conjunta entre dos alumnos: yo mismo, Ignacio de la Cotera López, y una compañera del grado de ingeniería Naval, Ana Collado. Por esto que se organizó un ensayo conjunto entre nosotros y nuestros directores de proyecto, Don José Luis Aguirre y Don Gregorio Munuera. Y como la construcción y preparación del ROV la llevó a cabo en su mayor parte el alumno Ignacio de la Cotera, y tenía mayor conocimiento de su funcionamiento, fue el piloto designado para este primer ensayo.
- Objetivo del ensayo. Principalmente sumergir el ROV y probar todo lo que se probó en el laboratorio, pero en el medio acuático, y confirmar su correcto funcionamiento. También en este primer ensayo, empezar a ver cómo afectan las fuerzas que aparecen sobre el ROV en movimiento en el seno de un fluido.

2.3.2.- Preparación del Software de pilotaje y manejo.

Antes de llevar el ROV a la piscina, y para agilizar el proceso de chequeo de funcionamiento, se preparó un ordenador portátil, aportado por Don Gregorio, con la dirección IP del ROV ya integrada, y habiendo probado la correcta conexión entre ROV y ordenador. Así, al llegar al lugar de ensayo, bastaría con enchufar el ordenador a una toma de corriente eléctrica cercana a la piscina y enchufar el ROV al ordenador para ponerlo en marcha. También el piloto del ROV para este primer ensayo, se familiarizó con los comandos del teclado necesarios para controlar los movimientos del ROV y estar preparado para el manejo en el momento de la sumersión.

2.3.3.- Sellado partes electrónicas, lubricación motores, y cableado.

Esta es una parte de la preparación en la que sólo se realiza una inspección de que el sellado de la parte electrónica está bien hecho, las baterías se cargan al máximo, se introducen en los tubos de baterías y se colocan los tapones para sellar los tubos. De que se vuelva a hacer el vacío en el interior del tubo, para asegurar que se evitan posibles inclusiones de aire desde su montaje, y se lubriquen las partes móviles de los motores, con un lubricante que también hace de protector impermeable y evitar la corrosión de los motores.

Para el cable de comunicación y alimentación principal, que conecta el ROV a la caja de comunicaciones, y mide 300 metros se recomienda en la guía "start up" desenrollarlo por completo y enrollarlo en una bobina para que al sumergir el ROV no se produzcan lazos o enganches inesperados a lo largo del cable. Apareciendo el problema de que, al desenrollarlo, se provocaron por accidente numerosos y aparatosos nudos, teniendo que consumir bastante tiempo (entre 4 y 5 horas) en volver a dejarlo sin ninguna irregularidad.



Fig. 21: Cable en bobina

Una vez arreglado el problema se monta la bobina correctamente, teniendo todo listo para el día concretado para el ensayo.

2.3.4.- Sumersión del ROV y puesta en marcha de todas las partes del ROV.

El día 09 de Octubre de 2017, a primera hora de la mañana (09:00) se citó a los dos alumnos con sus respectivos directores del proyecto en la facultad de Ingeniería Naval, desde donde se recogería el ordenador portátil y el ROV con todo lo necesario para su funcionamiento. Previo paso por la conserjería encargada de controlar el acceso a la piscina del club Santiago (junto al pabellón de deportes de la universidad), se accedió a la zona de la piscina y se montó el dispositivo de pilotaje del ROV. Mediante un alargador se enchufó el ordenador a la corriente y se colocó todo junto al borde de la piscina sobre un banco de madera. Desde esa posición se podía ver con claridad en todo momento la situación del ROV en el agua durante el ensayo, y se estaba lo bastante cerca para echar el robot al agua y retirarlo al final de la prueba.

Puesto que el agua de la piscina estaba descuidada (hacia un mes que se cerró la piscina para uso de baño público), tenía un color verdoso bastante denso, por lo que la imagen captada por el ROV sumergido era bastante ilegible, sólo se veía un tono verde intenso del agua, pero no se apreciaba ni el fondo ni las paredes de las piscinas, tampoco los láseres, que sirven para controlar la distancia respecto las superficies y evitar colisiones, podían ser utilizados de forma correcta. Por consiguiente, se trató de hacer funcionar el ROV siempre a poca profundidad, para que fuese posible conocer su situación en todo momento desde la posición de pilotaje.

Con todo, se puso en marcha el primer ensayo de funcionamiento, sumergiendo el ROV ya encendido. En esta sumersión se llevaron a cabo las siguientes comprobaciones:

- Flotabilidad. Al ser un medio acuático no salino, no se le pusieron los plomos pesados necesarios en el mar para evitar la flotabilidad del ROV. Con su propio peso, equilibrado con la fuerza de empuje del agua, el ROV se mantenía a una profundidad constante, es decir, ni se hundía por su propio peso, ni flotaba hasta la superficie. Se podía apreciar que en esta posición, el ROV permanecía inmóvil pero elevándose ligeramente la proa hacia arriba. Una buena prueba de ello fue ver que la cámara captaba el exterior del agua estando a profundidad 0.
- Dirección de movimiento. Se activaron los motores en movimiento de avance a la velocidad del nivel 1, y el ROV comenzó a moverse en la dirección correcta, pero con un ligero desvío hacia estribor, y también sumergiéndose. Se probaron todos los tipos de movimientos posibles que se permiten con los comandos del teclado: avance, retroceso, giros, ascenso, y descenso. En todos ellos se puede decir que funcionaba correctamente, pero también aparecía este pequeño desvío hacia estribor y hacia el fondo de la piscina en todos los casos.
- Luces y láser. Con el ROV en la superficie del agua y orientado hacia el piloto, se activaron todos los comandos relacionados con la intensidad de las luces, encendido y apagado de ellas, y también con los láseres, desde el exterior se podían apreciar todas estas partes. Todo funcionó correctamente y se dio por bueno su funcionamiento.
- Cámara. A pesar del inconveniente del agua descuidada, cuando el ROV enfocaba a la superficie y hacia el exterior de ella, la cámara captaba y mostraba en tiempo real todo lo que había por delante del ROV. También se probó a cambiar la orientación de la cámara y funcionó correctamente.
- Velocidades. Se volvieron a probar todos los movimientos posibles de los motores, pero esta vez con cada una de las 5 velocidades. Se observó, que las velocidades 4 y 5 eran demasiado elevadas y hacían que el control de la dirección del ROV fuese bastante complicado, ya que acentuaban el desvío a estribor y hacia el fondo. En cambio, para estas velocidades altas, el motor vertical funcionó bastante bien, haciendo que el ROV regresase en poco tiempo a la superficie.
- Regreso a la superficie y fin del ensayo. Por último, el piloto del ROV lo condujo hasta la superficie del agua en la zona más próxima al borde de la piscina donde se encontraba el dispositivo de control, y el ROV fue retirado y puesto a la luz del sol para secarlo.

2.4.- Evaluación de resultados y corrección de errores.

Con todo lo expuesto en el apartado anterior, se puede concluir que la construcción y el funcionamiento del ROV son CORRECTOS, y se puede dar por concluido todo el proceso de construcción del OPENROV 2.8. También pueden sacarse varias conclusiones sobre los resultados obtenidos del primer ensayo:

- El centro de masa del ROV no se encuentra donde se esperaba (está descentralizado del centro geométrico), por lo que aparecía esa pequeña elevación de proa. Esto puede corregirse fácilmente incorporando los plomos pesados en la parte delantera y desplazaría el centro de masa hacia la proa.
- La distribución de pesos no está equilibrada. Esta conclusión es fruto de esa desviación que aparece en todos los movimientos en el plano XY hacia estribor. ¿Por qué la distribución de pesos y no la fuerza de rozamiento del fluido sobre la superficie del ROV?, pues bien, para provocar esa desviación en el movimiento como causa de la fuerza de rozamiento, debe darse una diferencia

de las fuerzas en los dos lados del ROV respecto al plano YZ, pero sólo es posible si existen diferencias geométricas, las cuales no existen por la simetría del ROV respecto a este plano; por ello se llega a la conclusión de que esta diferencia en las fuerzas de rozamiento no se da para nuestra geometría. Esto lleva a pensar que el desvío del movimiento en el eje Y es fruto del desequilibrio del peso de la parte del tubo de electrónica, el cual, parece tener un poco más de peso en la zona de estribor. El desvío hacia el fondo también apunta hacia esta hipótesis: si al ejercer una fuerza de peso mayor en estribor que en babor durante el movimiento de avance, inevitablemente provocamos que descienda. Para su corrección será necesario la inclusión de peso extra en la parte de babor del ROV, ya sea con plomos pesados o algún otro elemento similar.

- Las velocidades 4 y 5 se descartan para futuros ensayos. Como se observó, el ROV se hace incontrolable a estas velocidades para el avance y retroceso, y para los giros. Además de gastar bastante batería se encuentra innecesario su uso desde el punto de vista de la investigación del movimiento del ROV en el seno de un fluido. Se recomendaría usar sólo para cuando se requiere que el ROV vuelva a la superficie.
- Para futuros ensayos, será conveniente la mejora del dispositivo de control de comandos para el ROV. El teclado se queda un poco limitado de movimientos, al no poder combinar el giro y el avance. Lo más idóneo es la inclusión de un joystick, lo cual se llevará a cabo en el siguiente apartado.

Para concluir, puede decirse que el ROV está completamente preparado para futuros ensayos.

3.- INTRODUCCIÓN DE LA IMU, Y MEJORAS EN EL SOFTWARE DE CONTROL

3.1.- Construcción y acoplamiento de la IMU.

Uno de los objetivos principales del presente proyecto es el de establecer una base fundamentada en la experimentación real para el cálculo de coeficientes de amortiguamiento que aparecen en el estudio del movimiento del ROV sumergido, por lo que es necesario disponer de algún dispositivo de medida de presión, aceleración, velocidad, orientación, etc., acoplado sobre el ROV para hacer posible una toma de datos reales en experimentación. El ROV estándar no dispone de ningún dispositivo de medida, por lo que se queda escueto en este sentido. Por eso, OPENROV tiene dentro de la gama de accesorios que se pueden incorporar a los kit pensados para el desarrollo de ingeniería, una unidad de medición inercial (en inglés, Inercial Medition Unit) o IMU capaz de medir la presión, orientación, profundidad y aceleración del ROV en tiempo real, y emitir estos datos al ordenador. La universidad, conocedora de este elemento, adquirió junto al OPENROV kit 2.8 la IMU compatible con este modelo.

Para la construcción y puesta en marcha de la IMU, la empresa OPENROV también facilita un par de guías para poder llevarlo a cabo. La guía empieza por construir paso a paso, de una manera semejante a la de la guía 1, la “cajita” formada por piezas de metacrilato acrílico, también montadas con el uso del adhesivo acrílico.

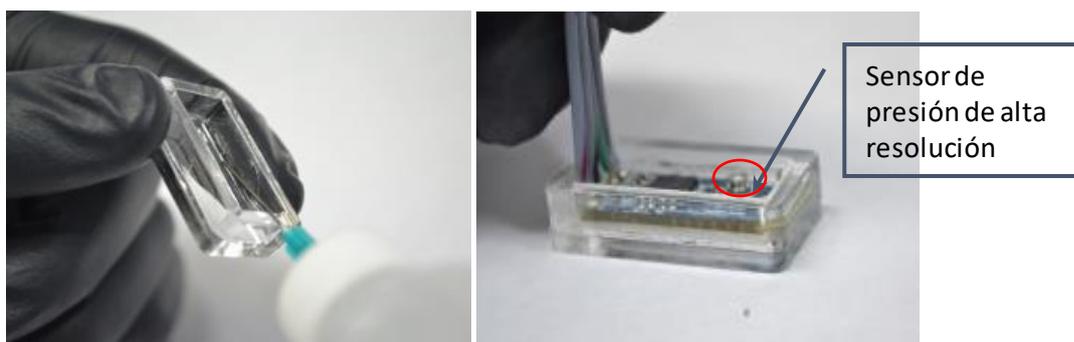


Fig. 22: Montaje IMU

Una vez montada, se introduce la placa de la IMU que tiene el sensor de presión de alta resolución incorporado sobre la placa, y sobre la que se han soldado los 4 cables necesarios para conectarlos a la placa base del ROV. También la placa incluye un MPU 9150, lo que es un accesorio de arduino para la programación de el sensor de presión, el cual tiene integrados: un acelerómetro, un giroscopio, y un magnetómetro. El sensor de presión, y el sensor MPU, conforman la parte más importante de la IMU. Este modelo de IMU no tiene carcasa, ya que es importante que el sensor de presión esté siempre en contacto con el medio en el que se encuentre el ROV y medir la presión directamente. Para proteger la placa, las soldaduras, y la MPU, OPENROV recomienda a través de la guía, recubrir todo con la resina Epoxy utilizada en la construcción del ROV, teniendo especial cuidado de no recubrir el sensor de presión.

Cuando se terminó de montar, se dio una incidencia importante. La placa, y por lo tanto el MPU, no estaban totalmente paralelos a la base acrílica, a causa de que una de las soldaduras hacía tope y provocaba un pequeño desnivel, el cual permaneció incluso después de incorporar la resina epoxy. Esto conlleva que cuando se arranque el ROV, ese pequeño desnivel permanecerá y se mostrará por la interfaz, aunque el ROV esté sobre una superficie plana.

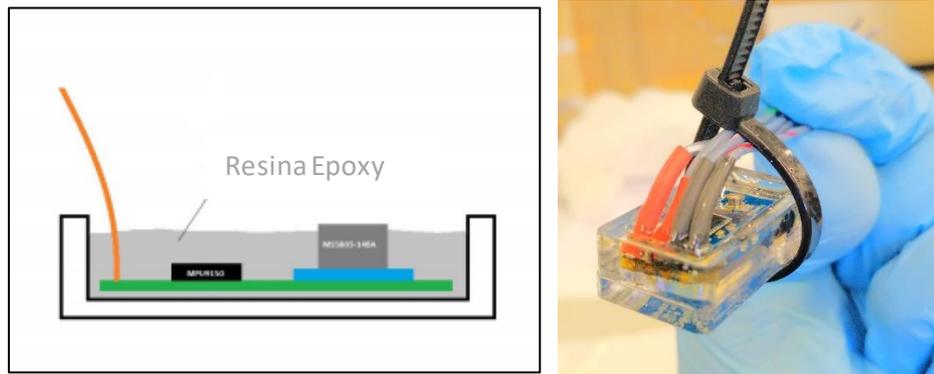


Fig. 23: Protección de resina

Para finalizar, se acopla la IMU al chasis del ROV en la estructura principal y boca abajo (el software del ROV ya tiene establecido esta orientación). También se sueldan los cables a la conexión de la placa base.

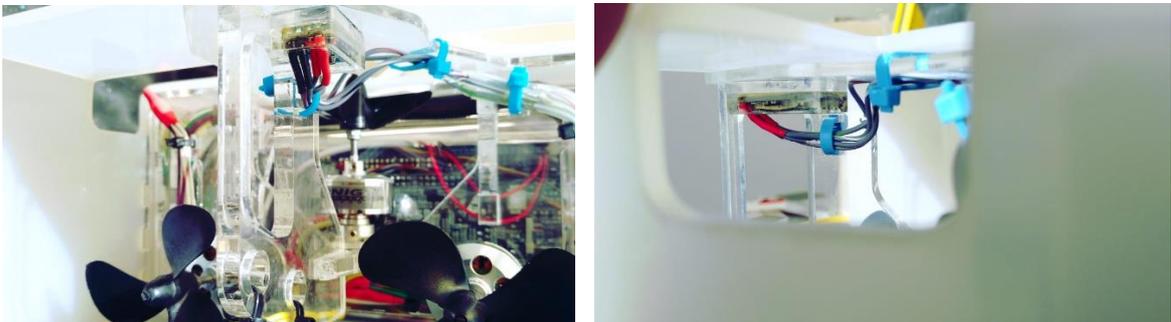


Fig. 24: Acoplamiento de la IMU

3.2.- Actualización del Software (Arduino).

El software estándar que viene incorporado a la placa de Arduino del ROV no está preparado para detectar la IMU ni mostrar los datos que recibe de la misma. Por lo que es necesaria una actualización del software completo del ROV. Las instrucciones y el nuevo archivo de disco para la actualización se encuentran todo en el foro de la comunidad OPENROV, donde los ingenieros de la empresa ofrecen su ayuda a todos los consumidores que lo necesiten.

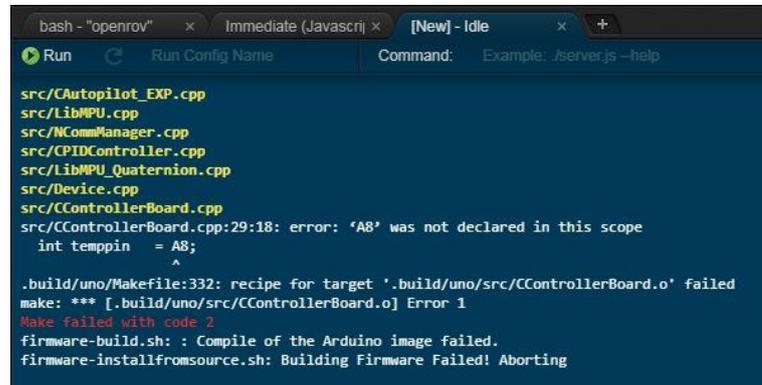
La versión que se ha descargado para el ROV construido se trata de la 30.0.3, que es la última versión compatible con el OPENROV 2.8. Para la actualización es necesario desmontar la parte del tubo de electrónica y abrirlo para separar la BBB (Beagle Bone Black) de la placa base. Será en la BBB donde se introduzca una tarjeta micro SD de memoria con el archivo de disco necesario para la actualización.

Es en este paso donde se produjo un fallo importante. Al realizar la actualización de la BBB (enchufada al ordenador mediante USB) con la tarjeta de memoria, no ocurría lo mismo que indicaba la guía. Más específicamente: en la BBB hay 4 leds azules, los cuales, una vez iniciado el proceso de actualización y en un máximo de 15 min, deben ir encendiéndose uno por uno, hasta quedar los 4 encendidos permanentemente (que quiere decir que se ha cargado el nuevo archivo de disco con la actualización). Llegado a este punto, se desconecta (apaga) la BBB del ordenador. Pues bien, la BBB del ROV en estudio encendía los 4 leds, pero no se quedaban permanentemente encendidos (sólo durante unos segundos), sino que empezaban a parpadear. Tras varios intentos, se supuso que, aunque no quedarán los 4 leds encendidos, el archivo se había cargado en la BBB. Se volvió a montar y se continuó con el proceso de actualización del ROV.

Con la BBB cargada con el nuevo software, y montada sobre la placa base, se encendió el ROV, y se le inició el proceso de actualización (upload arduino firmware), dicho proceso viene incluido en el software estándar. Pero durante la actualización, el propio software mostraba un error de compilación, y no era

posible terminar de actualizar el ROV. Es aquí donde se produjo el fallo más complicado de detectar, pues era un error del archivo instalado en la BBB, más concretamente en la línea de código.

Para encontrar el fallo fue necesario iniciar nuevamente el proceso de actualización, pero esta vez mediante la interfaz de "iCloud 9", la cual viene incluida en el software estándar, que permite visualizar la línea de código de todos los archivos de disco. Hecho esto, aparecía el mismo error pero se indicaba dónde estaba y qué tipo de error era, no el cómo solucionarlo.



```
bash - "openrov" x Immediate (Javascript) x [New] - Idle x +
Run Run Config Name Command: Example: ./server.js --help

src/CAutopilot_EXP.cpp
src/LibMPU.cpp
src/CommManager.cpp
src/CPIDController.cpp
src/LibMPU_Quaternion.cpp
src/Device.cpp
src/CControllerBoard.cpp
src/CControllerBoard.cpp:29:18: error: 'A8' was not declared in this scope
    int tempPin = A8;
                   ^
.build/uno/Makefile:332: recipe for target '.build/uno/src/CControllerBoard.o' failed
make: *** [.build/uno/src/CControllerBoard.o] Error 1
Make failed with code 2
firmware-build.sh: : Compile of the Arduino image failed.
firmware-installfromsource.sh: Building Firmware Failed! Aborting
```

Fig. 25: Error de actualización

Al mismo tiempo, y dado que el campo de la programación y la electrónica no es propio de nuestro departamento, ni está dentro de las enseñanzas impartidas en el grado de ingeniería mecánica, se vio la necesidad de pedir ayuda a los ingenieros de OPENROV a través del foro común. Tras la complicada busca dentro del foro para encontrar qué significaba el fallo (nos llevó un par de semanas de búsqueda), finalmente se escribió un correo electrónico al ingeniero de OPENROV responsable de la parte de electrónica. Tras varios intercambios de correos, se nos indicó que probablemente el error venía del archivo instalado en la BBB, o bien de su reubicación sobre la placa base del ROV. Un apunte es que todo este proceso se llevó a cabo en inglés, tanto el foro como la empresa la llevan ingenieros estadounidenses.

Se volvió a descargar el archivo de disco para la actualización, la misma versión 30.0.3, aunque hay que destacar que fue facilitado directamente en uno de los correos electrónicos, así se aseguraban en la empresa de que el error no fuera fruto de una mala descarga desde el foro o nos estuviéramos equivocando de archivo. Nuevamente se desmontó la placa base y se desacopló la BBB para insertar la tarjeta SD de memoria con el archivo de actualización.

Aquí es donde estaba el fallo: era imprescindible esperar a que los 4 LEDs azules se encendieran y quedasen permanentemente encendidos y, antes de que comenzaran a parpadear (en un margen de 5 segundos) desenchufar la BBB del ordenador. En los primeros intentos se esperaba a que se quedasen los 4 encendidos todo el tiempo, lo cual no ocurre en ningún caso. Se vuelve a montar la BBB sobre la placa base y se procede a la actualización, apareciendo un nuevo error, distinto del anterior, al encender el ROV y conectarlo al ordenador. Consistía en que en la interfaz mostrada en la pantalla del ordenador, donde debería encenderse una luz verde con la velocidad de conexión (significa que el ROV está comunicando correctamente), aparecía en rojo y con velocidad de conexión nula. Tras otro correo intercambiado con la empresa, fue sencillo detectar el error cometido, pues al montar la BBB se hizo mal la conexión entre las placas electrónicas.

Tras corregir todo lo indicado anteriormente, fue posible hacer la actualización completa del ROV y el arduino ya estaba capacitado para recibir información de la IMU. Con el software actualizado, en la interfaz nueva se mostrarán los grados de inclinación en los 3 ejes principales, así como la velocidad del ROV, la profundidad, presión y temperatura del medio en el que se encuentre.

3.3.- Puesta en marcha y análisis de funcionamiento.

Con la IMU montada, y el software preparado, se conecta y enciende el ROV al ordenador para comprobar que todo funciona correctamente. Primero se calibra la IMU, haciendo girar el ROV manualmente respecto cada eje.

En la siguiente figura se muestra la nueva interfaz del ROV:

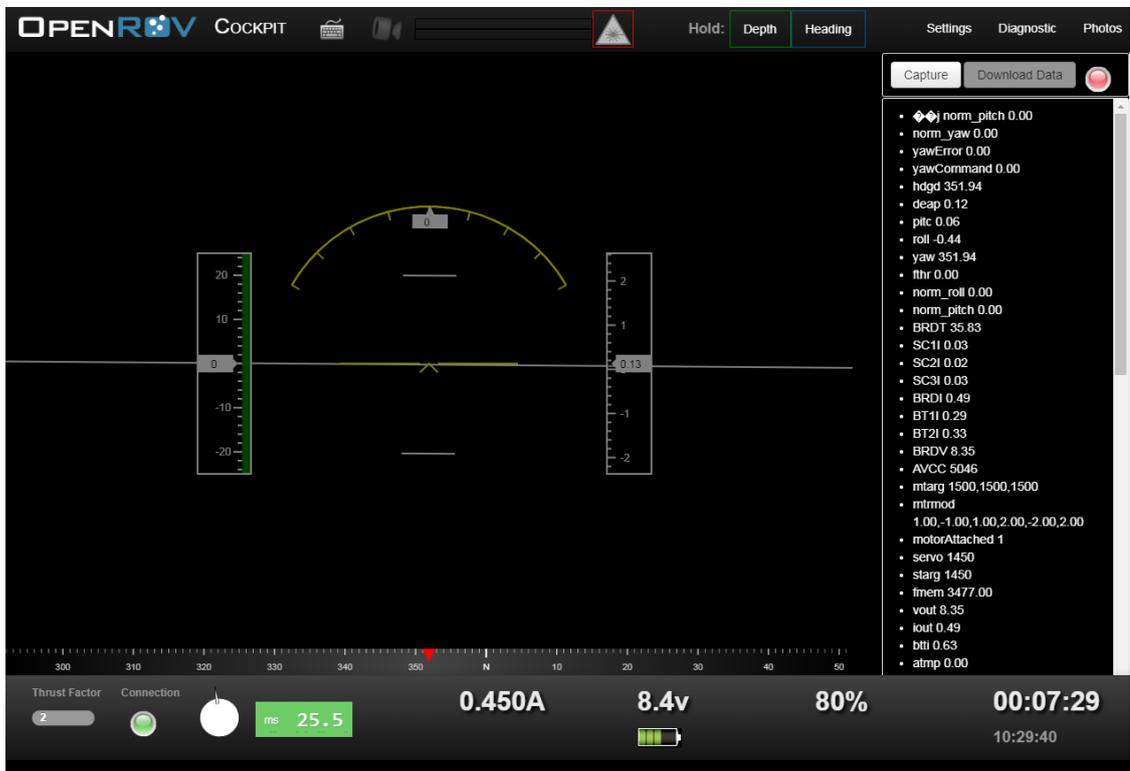


Fig. 26: Nueva interfaz

Como puede apreciarse en la imagen, el ROV ahora puede, mediante la IMU:

- Medir el grado de inclinación de balance (giro respecto eje Y), regla amarilla.
- Medir el grado de inclinación de cabeceo (giro respecto eje X), regla verde.
- Medir la orientación o giro respecto eje Z, donde el 0 lo marca el norte. Brújula en la parte inferior, justo sobre el indicador de batería.
- Medir la profundidad a la que se encuentra (funciona por diferencia de presiones respecto a la atmosférica), regla blanca.
- Medir la velocidad del ROV.
- Medir la temperatura del medio que lo rodea.
- Medir la presión a la que está sometida el ROV. Se muestra en la parte derecha.

En un principio todo parece funcionar correctamente, pero al colocar el ROV sobre una superficie plana, paralela al plano de tierra, se aprecia en el monitor una ligera desviación en el balance y en el cabeceo.

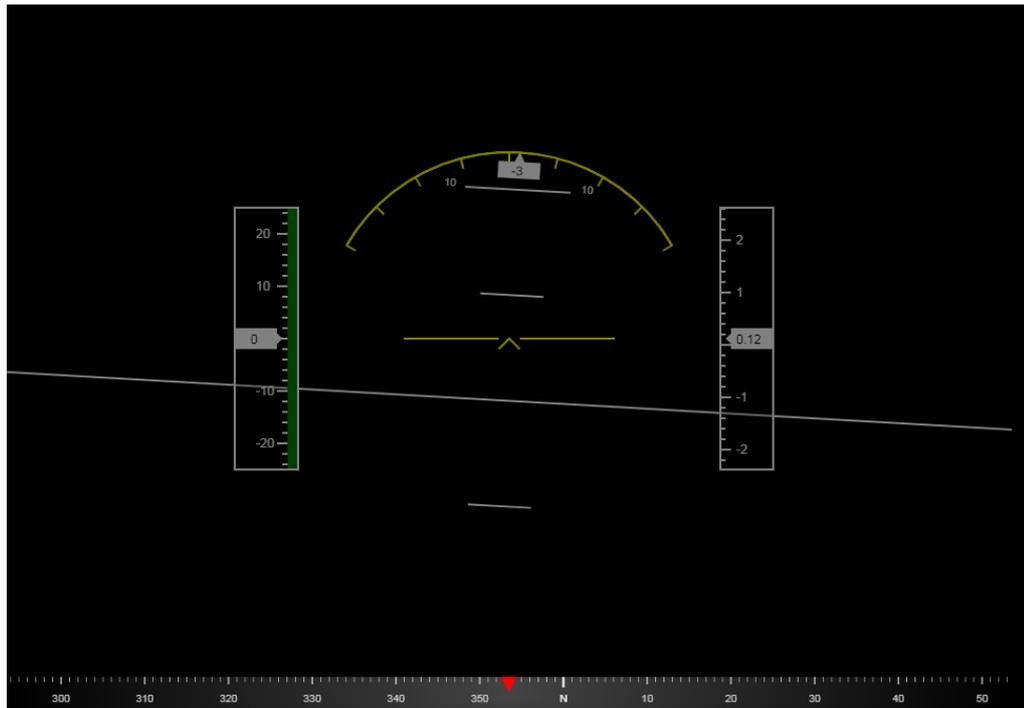


Fig. 27: Desviación IMU

Este error no puede ser de la IMU, ya que se comprueba que funciona con normalidad, por lo que es fruto de un mal montaje del acelerómetro de la IMU sobre el ROV. Como se indica en el apartado 3.1, al depositar la placa electrónica sobre la base acrílica y echar la resina epoxy, aparece un pequeño desnivel por la soldadura de los cables. Este desnivel es el que aparece en la figura 27. Para corregirlo se le indicará, mediante el código de arduino, que se ponga el nivel 0 de balance desde el valor igual a -3, y el nivel 0 de cabeceo desde el valor igual a -10.

3.4.- Mejoras en el dispositivo de control mediante un Joystick.

Aprovechando que se aprendió a ver el código fuente del funcionamiento del arduino que controla el ROV, y también que era posible modificarlo, se tomó la decisión de mejorar el sistema de pilotaje del ROV, recuérdese que el teclado dejaba bastante limitado la libertad de movimientos del ROV.

La mejor manera para el nuevo sistema de pilotaje, y con la ayuda del foro de OPENROV, fue la inclusión de un Joystick, que se trata de un mando para videojuegos de ordenador con dos palancas (joysticks), y varios botones programables para los comandos del ROV.

Con este nuevo dispositivo:

- Ya es posible el movimiento en varios ejes a la vez, por ejemplo: puede avanzar el ROV mientras que gira a la derecha; lo cual no era posible hacer con el teclado.
- También es más preciso el manejo de la velocidad: en cada uno de los niveles de velocidad, dependiendo de lo que se haga mover uno de los joysticks, el ROV va acelerando o decelerando a la misma vez. Con el teclado se establecía una velocidad constante para cada marcha.

Los nuevos controles, y cómo utilizarlos, se describen en la interfaz del ROV, en el apartado de "input (keyboard/gamepad)", donde los comandos de "GAME:" son los atribuidos al Joystick. Los Sticks son los Joysticks y los "DPAD" son las teclas de dirección del mando. A los que aparecen en la interfaz, hay que añadir lo siguiente:

- Encender y apagar láseres: botón RB
- Encender y apagar luces: botón LT
- Aumentar nivel de velocidad: DPAD_RIGHT
- Volver a nivel de velocidad 1: DPAD_LEFT

También indicar que se cambió el sentido de la velocidad, para que al mover los joysticks fuera más intuitivo. Se cambió lo siguiente en la línea de código, abriendo icloud 9, en el directorio `openrov/cockpit/src/plugins/rovpilot/public/js`; abrir el archivo `rovpilot.js`:

- `Rov.pilot.sent.yaw: -1*v`
- `Throttle axis: +1*v`
- `Rov.pilot.sent.lift: +1*v`

Al principio tenía por defecto que al mover hacia la derecha el stick, se moviera el ROV en avance, pero ahora al moverlo hacia la derecha, el ROV gira, y al moverlo hacia delante, avanza. Dentro del directorio indicado se puede modificar cualquier control que se desee en futuros proyectos.

4.- MODELIZACIÓN DEL ROV EN 3D MEDIANTE SOLIDWORKS.

Una vez terminada toda la parte de construcción del ROV y acoplamiento de la IMU, confirmando su correcto funcionamiento y documentadas todas las partes para su consulta en futuros proyectos, se procede a la modelización computacional de la geometría del ROV, para poder realizar las simulaciones necesarias y calcular los coeficientes de amortiguamiento. Este modelo también será usado en el entorno 3D para la simulación de movimientos.

Para la modelización del ROV, primero se creará un modelo-pieza de todas y cada una de las piezas que conforman el ROV. A partir de éstas se crearán ensamblajes de cada una de las partes principales y finalmente un ensamblaje final, el cual será muy preciso en comparación al ROV real.

4.1.- Piezas disponibles en 2D y conversión a 3D.

En la página web de OPENROV:

[https://github.com/OpenROV/openrov-hardware/tree/master/CAD Files OpenROV v2 8](https://github.com/OpenROV/openrov-hardware/tree/master/CAD%20Files%20OpenROV%20v2%208)

La empresa tiene publicados los archivos que contienen el modelo en 2D de la mayoría de las piezas creadas en formato CAD. Estos archivos describen la vista del alzado de todas las piezas de acrílico que conforman el ROV. A partir de estos archivos, se abren mediante el programa *eDrawings* que permite visualizar las medidas de estos planos y poder copiar los croquis de los alzados (con las medidas reales a escala 1:1 de las piezas).

Para la conversión a 3D de cada pieza se procede de la siguiente manera:

1. Abrir el archivo con extensión .dxf de la pieza que se va a convertir.
2. Copiar el croquis del alzado de la pieza.
3. En solidworks, dentro de la ventana de “crear nueva pieza”, en el croquis del alzado pegar el modelo copiado desde edrawins.
4. Crear operación saliente/extruir con la medida del espesor de cada pieza. Estas medidas están descritas dentro del inventario. Ej.: para las piezas marcadas como B1 corresponden a la bolsa piezas 1, que contiene piezas de acrílico de 3mm de espesor, pues este es el usado en la operación de saliente/extruir.
5. Se comprueba que el modelo es exactamente igual que la pieza real, y se guarda el archivo con extensión .SLDPRT (solidpart).

De manera que se tenga un orden en la documentación, todas las piezas se agrupan en varios bloques, que después facilitarán su búsqueda para crear los ensamblajes. Estos bloques son:

- Battery Tubes: contiene las piezas que conforman el ensamblaje de los tubos de baterías y sus correspondientes tapas.
- Electronics tube: contiene las piezas que conforman el ensamblaje del chasis de electrónica, y el ensamblaje del tubo exterior con sus tapas.
- Main Structure: contiene las piezas del chasis del ROV, y la estructura principal donde se colocan los motores y sobre la cual se ensamblan el resto de partes.
- IMU: contiene las piezas que conforman la “cajita” donde se encuentra la IMU
- Shell: contiene el archivo del casco y de la banda de rigidez.

*Nota: en este último bloque se incluye un archivo llamado “cable conexiones”, que no es un archivo creado a partir de un croquis en 2D. También es importante indicar que para el archivo en 2D del casco, el croquis es el de su desarrollo plano y, por tanto, hay que añadir al saliente dos operaciones de chapa metálica, una de brida para el primer ángulo y otra de pliegue para el segundo ángulo.

4.2.- Piezas no disponibles, modelización en base a medidas reales.

Las piezas que forman parte de los motores, que son los propios motores y los álabes de cada uno de ellos, no están incluidos en los archivos CAD que publican los compañeros de OPENROV. Como para el estudio fluidodinámico no se necesitarán incluir los álabes (son los que dan movimiento al flujo y no soportan fuerzas fluidas de amortiguamiento) no se realizarán con las medidas reales. Solo se crean unos modelos ejemplo para futuros proyectos. En cambio, los motores (soportes y motor) si son necesarios en el estudio fluidodinámico, por lo que se debe crear un modelo-pieza lo más exacto posible en comparación con las medidas reales. Con un pie de rey se miden las distancias necesarias de los soportes y los motores (se modeliza sólo uno de ellos, ya que son tres motores iguales), de manera que se toman como referencia las medidas del plano de corte vertical del motor. Para los agujeros de los soportes se miden directamente sobre el motor. Como es una pieza cilíndrica, pueden ponerse mediante cotas inteligentes sobre un eje de revolución.

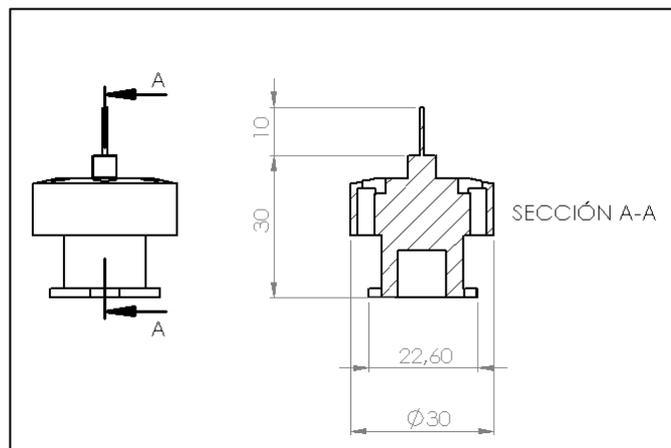


Fig. 28: Medidas principales motor

Una vez puestas las medidas sobre el eje de revolución, se realiza una operación de revolución saliente, y sobre este macizo, varias operaciones de taladro, vaciado, chaflán, y matriz circular para que la pieza sea exactamente igual que la pieza real.

También se crea una pieza en base a medidas reales, llamada "cable conexiones" y antes mencionada en el apartado 4.1, que se ha creado para recrear el cable de las conexiones que se encuentra entre el casco y el tubo de electrónica, rellenando el hueco que quedaría sin este cable. Esto es importante ya que se evitará que en las simulaciones aparezca un flujo en este hueco, el cual no aparecería en la realidad por la presencia del cable de las conexiones del ROV. Las medidas que se han tomado son las del largo y ancho del hueco que queda, dándole a la pieza una forma elíptica en su sección, para que se asemeje lo máximo posible a la realidad.

4.3.- Ensamblajes de cada parte y ensamblaje final.

Para finalizar la modelización, y ya creadas todas las piezas en SolidWorks, se crean varios ensamblajes de las partes principales, de la manera siguiente:

- Ensamblaje "electronics tube": Sin incluir el chasis de electrónica que iría dentro del tubo, se ensamblan las tapas y el tubo de electrónica, con relaciones de posición para que queden las tapas orientadas igual que en el ROV real.
- Ensamblaje "estructura principal": Lo conforman las piezas del chasis del ROV y los soportes de acrílico de los motores. Sobre este ensamblaje se montará el ensamblaje final.
- Ensamblaje "tubos baterías": Se ensamblan las piezas que forman las tapas de los tubos y se añaden relaciones de posición sobre el tubo hueco de las baterías.

Finalmente, sobre el ensamblaje “estructura principal” se añaden el resto de componentes (ensamblaje de las demás partes, motores, cable conexiones) y, con las relaciones de posición fijas y móviles necesarias, se termina el modelizado del ROV completo para futuras simulaciones en FlowSimulation. A continuación se muestran las vistas principales y las vistas en 3D, frontal y trasera, del modelo del ROV.

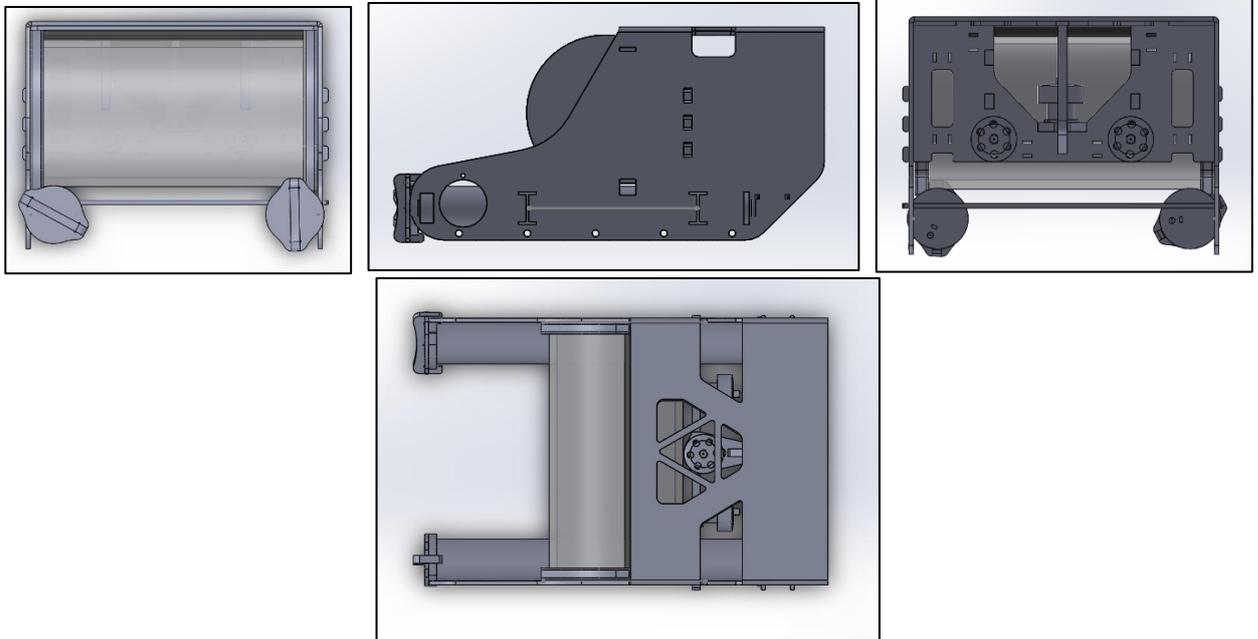


Fig. 29: Vistas principales ROV

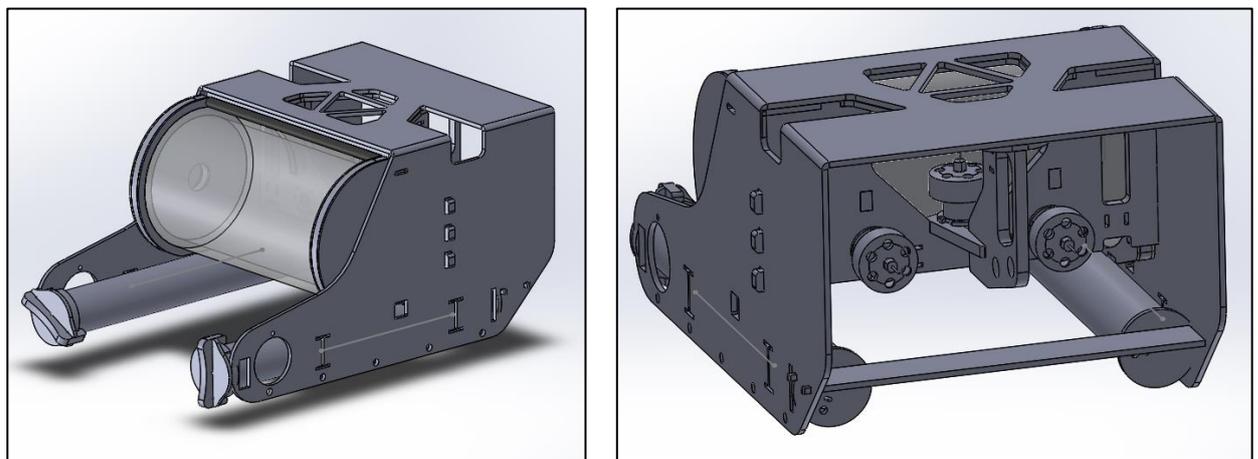


Fig. 30: Vistas en 3D ROV

5.- SIMULACIONES FLUIDWORKS PARA OBTENCIÓN DE FUERZAS Y MOMENTOS.

Con el objetivo de calcular los coeficientes hidrodinámicos, se necesita previamente calcular todas las fuerzas y momentos que aparecen sobre la geometría del ROV cuando se encuentra en movimiento en el seno de un fluido. Para ello, se ha utilizado la herramienta FluidWorks que es una extensión de simulación dentro del programa ya utilizado SolidWorks. Este programa es el utilizado en un anterior proyecto, cuyo autor es José Antonio Ruiz Ruiz, donde se muestra un procedimiento “sistemático” para el manejo sencillo y rápido del programa a la hora de materializar las simulaciones. Siguiendo estos pasos, se comienza a simular el ROV en flujos de agua, para obtener finalmente las fuerzas y momentos.

5.1.- Elección del ensamblaje a simular.

Para aproximar lo máximo posible el comportamiento del ROV a la realidad, se escoge un ensamblaje sin los álabes motores, pero con los soportes y motores montados sobre el ROV. También se incluye el cable de conexiones creado para tapar el hueco entre el tubo de electrónica y el casco, evitando que fluidworks interprete que por ese hueco hay flujo de agua, lo cual no ocurriría en la realidad por la presencia de dicho cable.

Se podrían haber incluido en la simulación las varillas roscadas que dan rigidez al ROV, los tornillos del montaje, y algunas gomas de sujeción, pero todos estos elementos son piezas pequeñas, lo cual dificultaría la simulación por elementos finitos, aumentando considerablemente el tiempo de simulación. Por ello, se han obviado todos estos “pequeños elementos” ya que no son objeto de estudio. La parte principal del cálculo de coeficientes hidrodinámicos es sobre la geometría principal del ROV, y no es influyente el comportamiento del flujo sobre estos elementos externos.

También se han obviado todos los cables que están acoplados con bridas en la parte de la estructura principal junto a los motores. Estos cables son complicados de modelizar con piezas rígidas, y al ser también de pequeño tamaño, empeorarían los tiempos de simulación.

Al ensamblaje sobre el que se realizan todas las simulaciones se le llama “ensamblaje estudio fluidodinámico”.

5.2.- Elección del mallado y descripción de las simulaciones.

La elección del mallado es quizá la decisión más importante a la hora de comenzar las simulaciones. Una mala elección de éste puede hacer que los cálculos sean defectuosos, o bien que se tome demasiado tiempo innecesario en el proceso de cálculo. Es por esto que, antes de comenzar las simulaciones, se realizan varias pruebas de tiempo para distintos mallados, y en base a los tiempos y diferencias en las fuerzas se decidirá el nivel de mallado y refinamiento. El “LIM” (level of initial mesh) determina el número de celdas que se crean en el mallado, siendo 1 el nivel más bajo, y 7 el más alto (preciso); el “ratio factor” (RF) es el canal de refinamiento avanzado, que tiene en cuenta cambios de sección estrechos y geometrías complejas tales como curvaturas, pequeñas geometrías.... Este factor también va regulado desde el nivel 1 hasta el nivel 7. Todas las simulaciones se realizan con los objetivos de calcular las fuerzas en la dirección de los 3 ejes principales y los momentos alrededor de estos ejes.

Estas pruebas son las realizadas para esta elección, con velocidad de flujo en la dirección de avance de 0,25 m/s:

Mallado	LIM	RF	Fuerza en Y	Tiempo
1	1	1	0,56017	1'
2	7	7	0,52612	2h 25'
3	3	7	0,53409	3' 49"
4	5	7	0,52534	18' 19"

Tabla 2: Simulaciones elección de mallado

Como se puede observar en la tabla, siendo el mallado de LIM=7 y RF=7 el más preciso posible de implementar con FlowSimulation, el valor de la fuerza que más se le aproxima dentro de un tiempo razonable (todas las simulaciones oscilan entre 11 y 46 minutos), y garantizando un grado de precisión bastante fiable, es el del mallado 4. Por lo que serán estos factores los utilizados para todas las simulaciones que se van a realizar en FlowSimulation.

Una vez escogido el mallado, se determinan las propiedades de la simulación:

- Computacional domain: Automático. Este valor calcula el tamaño del túnel donde se va a simular el flujo. Se establece automáticamente por el programa.
- Fluido de trabajo: Agua.
- Flujo externo.
- Sin transferencia de calor.
- Sin condiciones de turbulencia.
- Sin rugosidad del ROV.
- Temperatura y presión en condiciones normales (20°C y 1 atm).
- Dependiendo del movimiento que se quiere estudiar, la velocidad debe describirse en función del sentido de flujo, es decir, el programa establece un movimiento del fluido alrededor de la geometría en estudio, que permanece fija, a modo de túnel de viento. Por ejemplo: para estudiar el movimiento de avance del ROV en el eje Y a 1m/s, deberá indicarse en las propiedades de la simulación una velocidad de -1m/s en el eje Y.

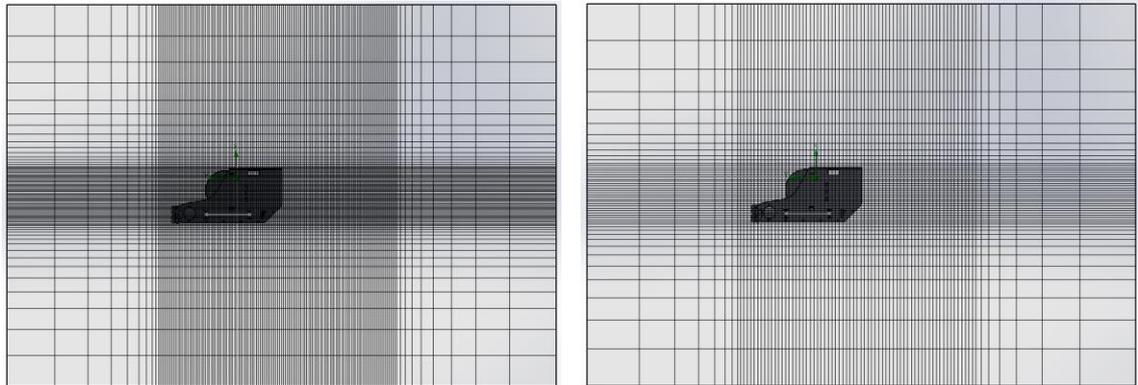


Fig. 31: comparación entre mallado 7/7 (izq.) y 5/7 (der.)

5.3.- Descripción del sistema de coordenadas.

En el medio submarino, existe un sistema de coordenadas normalizado, que rige la dirección y sentido positivo de todos los movimientos posibles de un submarino. Debido a que el ensamblaje del ROV se hizo con un sistema de coordenadas predeterminado, y no se corrigió esta orientación, las simulaciones se han realizado todas con un sistema de coordenadas donde los ejes están mal puestos. Pero en el resumen final de cálculos está todo correctamente referenciado.

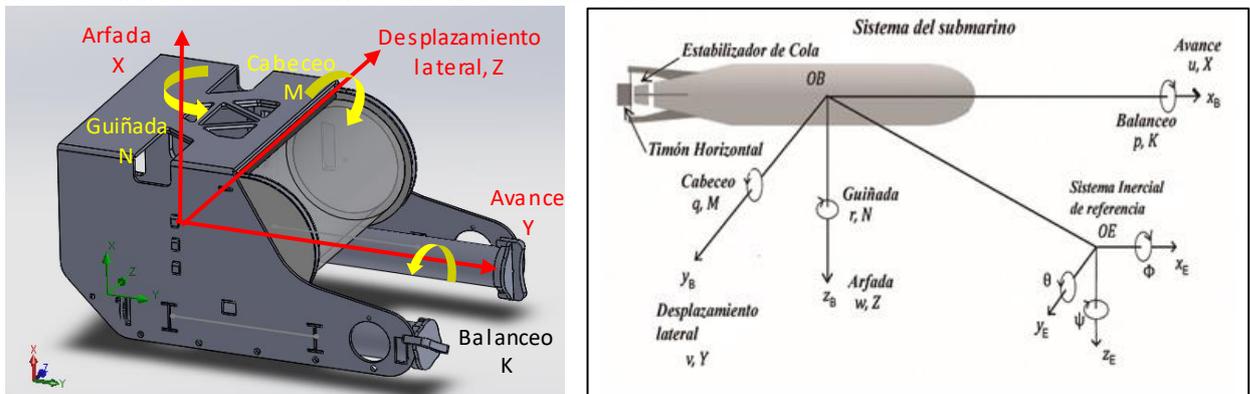


Fig. 32: Comparación entre sistemas de coordenadas

En este sistema de coordenadas, el eje en la dirección de avance es el eje Y en sentido positivo, el eje en dirección de arfada es el eje X en sentido negativo, y para el desplazamiento lateral es el eje Z positivo a babor.

También indicar, que los nombres puestos a cada simulación son erróneos, pero este error es sólo en el nombre, no afecta a las simulaciones. Para la consulta de los archivos de SolidWorks y de las hojas de Excel con los resultados de las simulaciones, es necesario tener en cuenta este error, por eso está indicado dentro de la carpeta que contiene estos archivos en el ANEXO.

En los resultados finales, y para los cálculos de los CFDs, estos errores no afectarían, y además, se les pondrá su correspondiente nombre y así evitar confusiones con el sistema de coordenadas.

5.4.- Desarrollo de las simulaciones y resultados obtenidos.

Se han realizado un total de 90 simulaciones, distribuidas de la siguiente manera:

- Para las direcciones de: avance y retroceso, ascenso y descenso, y flujos cruzados; se simulan flujos en 5 velocidades (0.25,0.5,0.75,1,1.5) en m/s. Un total de 60 simulaciones.
- Para la dirección de desplazamiento lateral a babor y estribor se simulan flujos en 3 velocidades (0.1,0.25,0.4) m/s. Un total de 6 simulaciones.
- Para los giros de: balance, cabeceo, guiñada; tanto positivos como negativos, se simulan flujos en 4 velocidades (π , $3*\pi/2$, $2*\pi$, $3*\pi$) rad/s. Un total de 24 simulaciones.

5.4.1.- Movimiento de avance. Recordar que para el avance del ROV, es en el eje Y, y debe indicarse el sentido contrario del flujo.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
GG Force 1	[N]	0,553386	2,154607	4,788904	8,552821	19,12902
GG Force (X) 1	[N]	-0,17394	-0,68816	-1,42183	-2,73892	-6,23439
GG Force (Y) 1	[N]	-0,52534	-2,04174	-4,57286	-8,10239	-18,0845
GG Force (Z) 1	[N]	0,000256	-0,00752	-0,03111	-0,01656	-0,06185
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,00064	-0,00742	0,000984	0,001362	0,005379
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,000456	-0,00103	-0,00198	-0,00296	-0,00269
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,013358	0,048231	0,10759	0,191888	0,435882

Tabla 3: Fuerzas y momentos. Movimiento de avance.

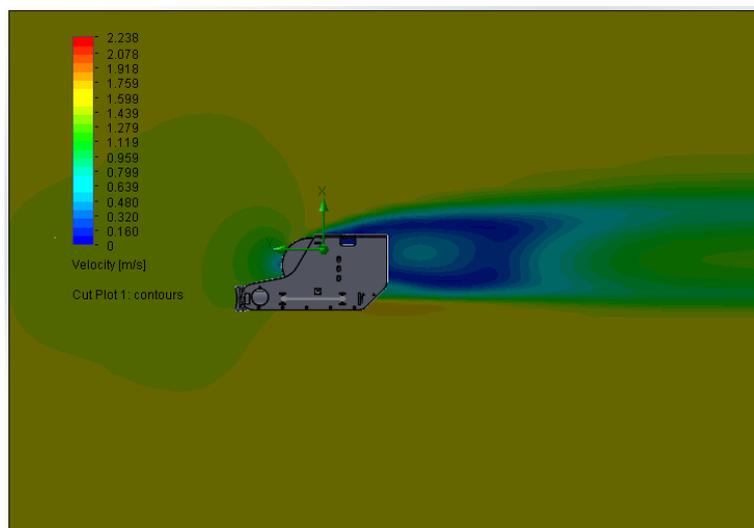


Fig. 33: Distribución velocidades. Movimiento de avance.

5.4.2.- Movimiento de retroceso.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
GG Force 1	[N]	0,737653	2,92383	6,469088	11,47519	25,77206
GG Force (X) 1	[N]	0,147522	0,605709	1,214019	2,159426	4,816446
GG Force (Y) 1	[N]	0,722702	2,860314	6,353942	11,26994	25,31734
GG Force (Z) 1	[N]	0,008398	0,022394	0,051794	0,07244	0,182679
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,00345	-0,01264	-0,02934	-0,0628	-0,12432
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,00084	-0,00311	-0,00692	-0,01698	-0,03064
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,034971	0,139646	0,312722	0,559615	1,248238

Tabla 4: Fuerzas y momentos. Movimiento de retroceso.

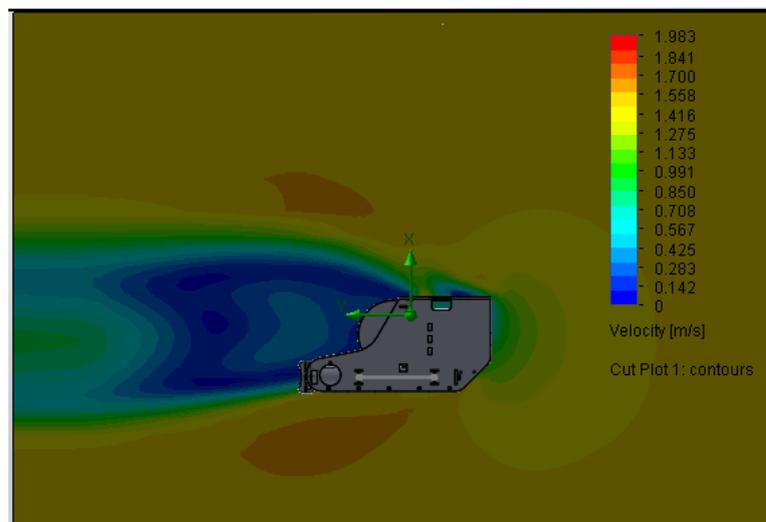


Fig. 34: Distribución velocidades. Movimiento de retroceso.

5.4.3.- Movimiento de descenso.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (X)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
GG Force 1	[N]	1,373253	6,659666	14,96317	26,61707	51,05579
GG Force (X) 1	[N]	1,302213	6,332303	14,21116	25,22626	47,63771
GG Force (Y) 1	[N]	0,435622	2,059052	4,677729	8,477931	18,35752
GG Force (Z) 1	[N]	0,017291	0,115751	0,241354	0,478491	0,5864
GG Torque (X) 1	[N*m]	7,84E-05	-0,00087	0,001428	-0,03633	0,055129
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,000339	-0,00071	-0,00388	0,025702	0,04429
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,033232	0,095918	0,219045	0,596493	0,934775

Tabla 5: Fuerzas y momentos. Movimiento de descenso.

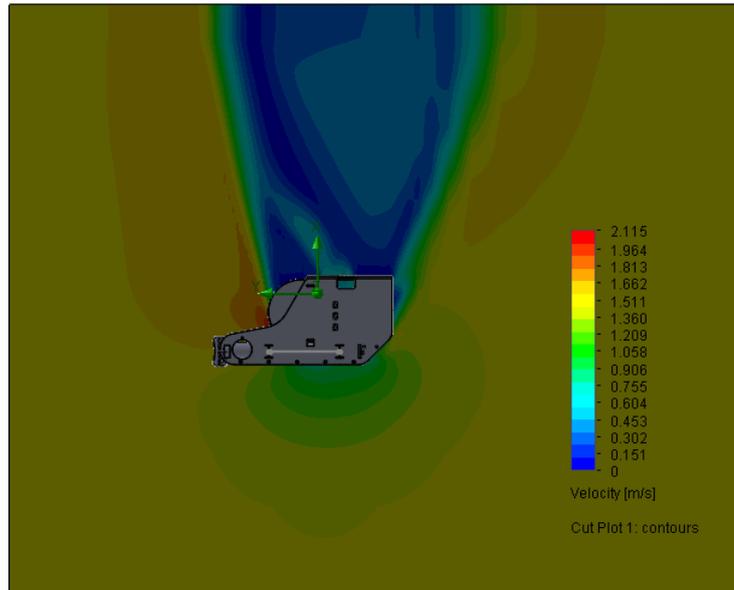


Fig. 35: Distribución velocidades. Movimiento de descenso

5.4.4- Movimiento de ascenso.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (X)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
GG Force 1	[N]	1,16113	4,625865	10,56538	18,77156	41,37716
GG Force (X) 1	[N]	-1,15611	-4,60671	-10,5232	-18,6908	-41,1277
GG Force (Y) 1	[N]	0,107872	0,420356	0,934984	1,707573	4,463218
GG Force (Z) 1	[N]	0,002334	-0,01081	-0,1249	-0,33024	-0,81104
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,00062	-0,00171	-0,00317	-0,00864	-0,02136
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,0009	-0,00253	-0,00928	-0,01303	-0,02045
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,0357	-0,14686	-0,31896	-0,58786	-1,25731

Tabla 6: Fuerzas y momentos. Movimiento de ascenso.

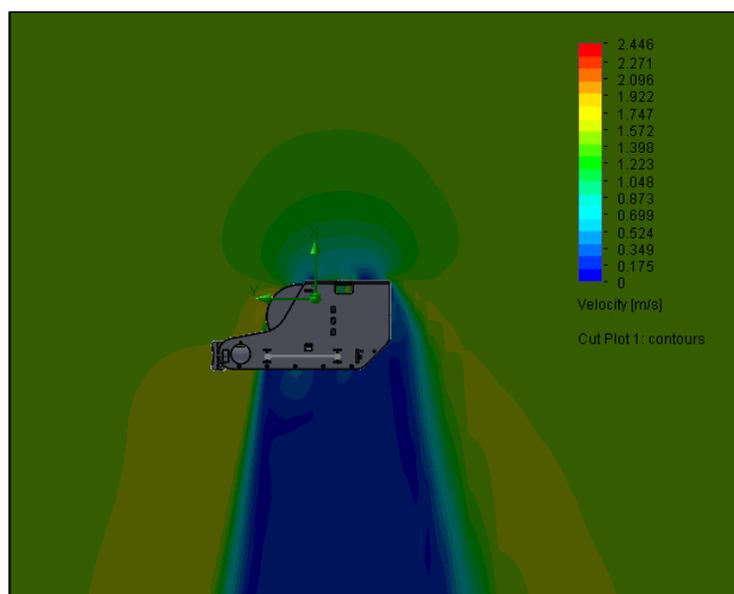


Fig. 36: Distribución velocidades. Movimiento de ascenso.

5.4.5.- Movimiento de estribo (desplazamiento lateral).

Goal Name	Unit	Value	Value	Value
Velocidad (Z)	[m/s]	0,1	0,25	0,4
GG Force 1	[N]	0,194175	1,211754	3,085467
GG Force (X) 1	[N]	-0,00177	0,005154	0,24424
GG Force (Y) 1	[N]	-0,00299	-0,00786	0,051663
GG Force (Z) 1	[N]	0,194144	1,211718	3,075351
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,00169	-0,01228	-0,03088
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,002516	0,010806	0,035319
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,000519	0,001645	-0,01114

Tabla 7: Fuerzas y momentos. Movimiento de estribo.

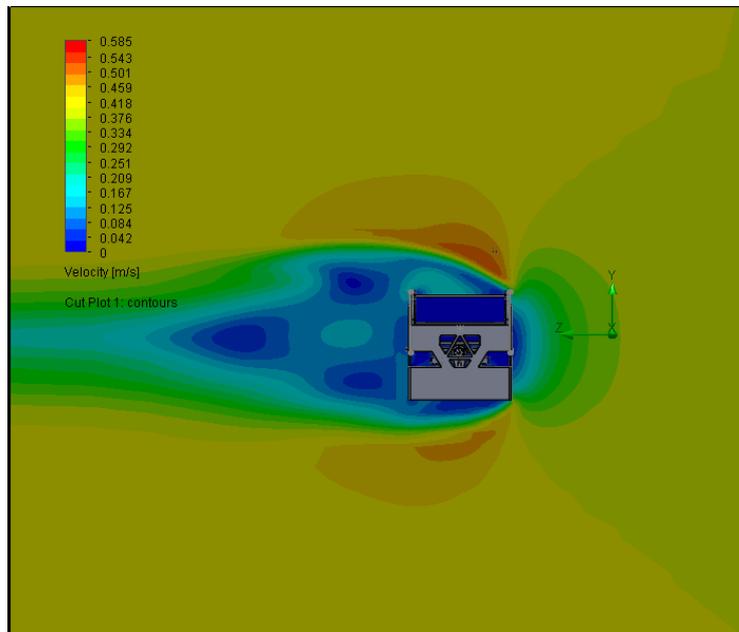


Fig. 37: Distribución velocidades. Movimiento de estribo.

5.4.6.- Movimiento de babor.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value
Velocidad (Z)	[m/s]	-0,1	-0,25	-0,4
GG Force 1	[N]	0,19317	1,206854	2,97032
GG Force (X) 1	[N]	-0,00029	0,003606	-0,01801
GG Force (Y) 1	[N]	-0,00093	-0,00332	-0,01416
GG Force (Z) 1	[N]	-0,19317	-1,20684	-2,97023
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,002046	0,014291	0,032949
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,00243	-0,01538	-0,03994
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,000353	-0,00015	-0,00178

Tabla 8: Fuerzas y momentos. Movimiento de babor.

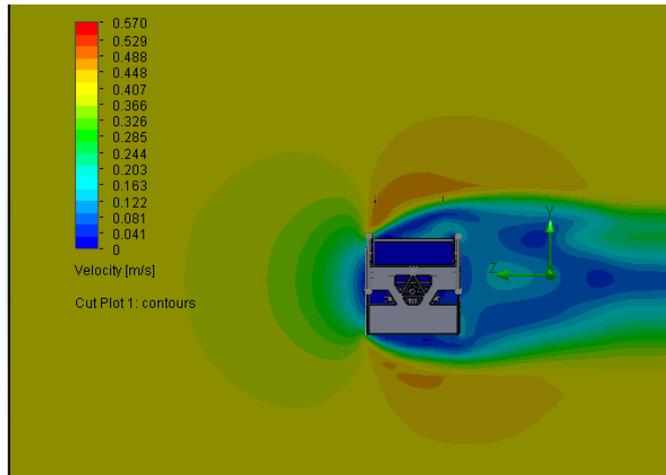


Fig. 38: Distribución velocidades. Movimiento de babor

5.4.7.- Movimiento de guiñada negativa. (Giro respecto eje X tomado para las simulaciones).

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value
Velocidad (X)	[rad/s]	3,141593	4,712389	6,283185	9,424778
GG Force 1	[N]	2,30197	5,53821	10,40346	22,14954
GG Force (X) 1	[N]	0,287331	0,153412	-0,52504	0,626022
GG Force (Y) 1	[N]	-0,48427	-1,17598	-1,35734	-4,57139
GG Force (Z) 1	[N]	2,232036	5,409741	10,30116	21,66362
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,64285	-1,42921	-2,78763	-5,71423
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,0343	-0,0757	-0,20941	-0,29831
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,020632	0,014299	-0,02661	0,059718

Tabla 9: Fuerzas y momentos. Movimiento de guiñada negativa.

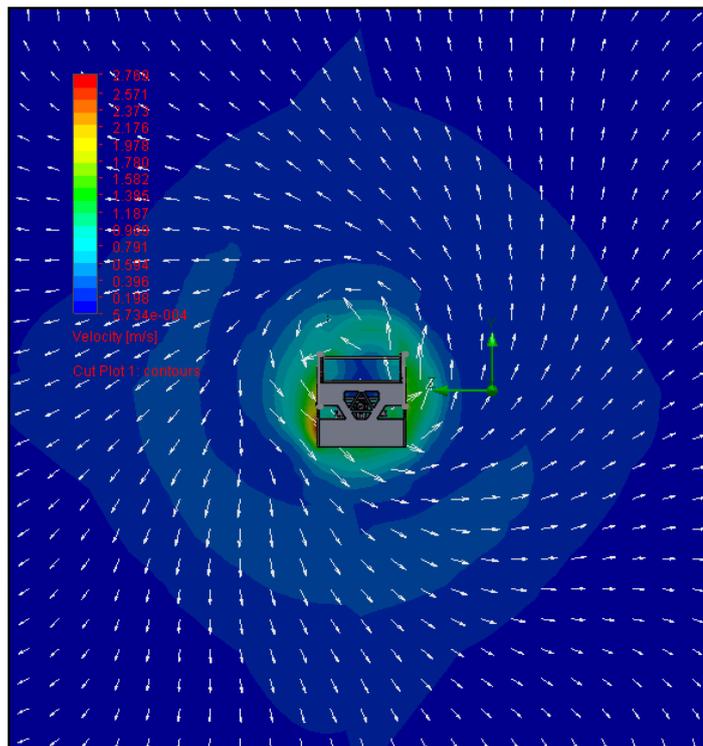


Fig. 39: Distribución velocidades. Guiñada negativa.

5.4.8.- Movimiento de guiñada. (Positiva, regla de la mano derecha).

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value
Velocidad (X)	[rad/s]	-3,14159	-4,71239	-6,28319	-9,42478
GG Force 1	[N]	2,274881	5,105489	8,819992	20,47253
GG Force (X) 1	[N]	-0,0543	-0,16524	-0,30413	-0,73953
GG Force (Y) 1	[N]	-0,51875	-1,14492	-1,96486	-4,58273
GG Force (Z) 1	[N]	-2,21428	-4,97271	-8,59297	-19,9393
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,701149	1,579356	2,711012	6,282003
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,058015	0,132742	0,226001	0,52021
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,01226	-0,02812	-0,04406	-0,09272

Tabla 10: Fuerzas y momentos. Movimiento de guiñada.

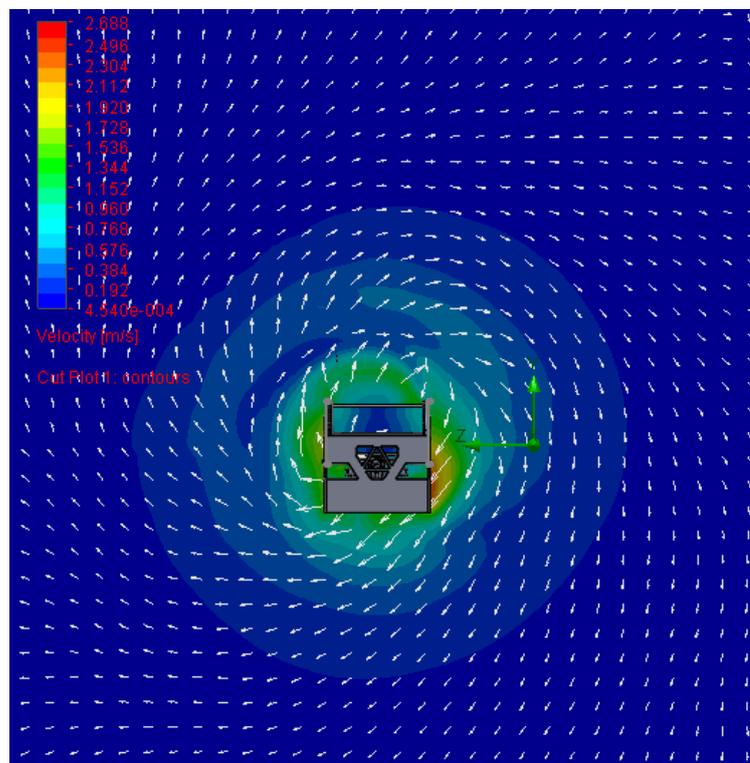


Fig. 40: Distribución velocidades. Movimiento de Guiñada

5.4.9.- Movimiento de cabeceo. (Giro respecto eje Z tomado para las simulaciones).

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value
Velocidad (X)	[rad/s]	-3,14159	-4,71239	-6,28319	-9,42478
GG Force 1	[N]	2,54868	5,69156	10,05357	22,21323
GG Force (X) 1	[N]	2,512086	5,61728	9,923355	21,95774
GG Force (Y) 1	[N]	0,245175	0,544552	0,965282	2,056297
GG Force (Z) 1	[N]	0,353668	0,737215	1,292137	2,656455
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,00859	-0,01396	-0,02299	-0,04028
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,010843	0,019165	0,030144	0,052198
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,358559	0,79777	1,40955	3,131092

Tabla 11: Fuerzas y momentos. Movimiento de cabeceo.

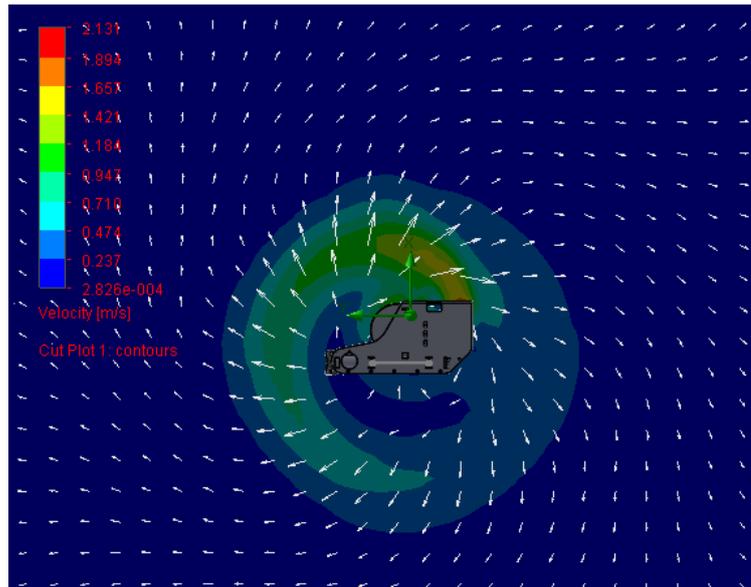


Fig. 41: Distribución velocidades. Movimiento de cabeceo.

5.4.10.- Movimiento de cabeceo negativo.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value
Velocidad (X)	[rad/s]	3,141593	4,712389	6,283185	9,424778
GG Force 1	[N]	3,106652	6,923124	12,23447	27,46512
GG Force (X) 1	[N]	-2,7319	-6,07051	-10,6901	-23,9511
GG Force (Y) 1	[N]	-1,47765	-3,32642	-5,94472	-13,4235
GG Force (Z) 1	[N]	0,067374	0,116113	0,251639	0,699076
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,001682	0,001609	0,003766	0,010834
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,001391	0,00344	0,010416	0,02585
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,34084	-0,75472	-1,32578	-2,96884

Tabla 12: Fuerzas y momentos. Movimiento de cabeceo negativo.

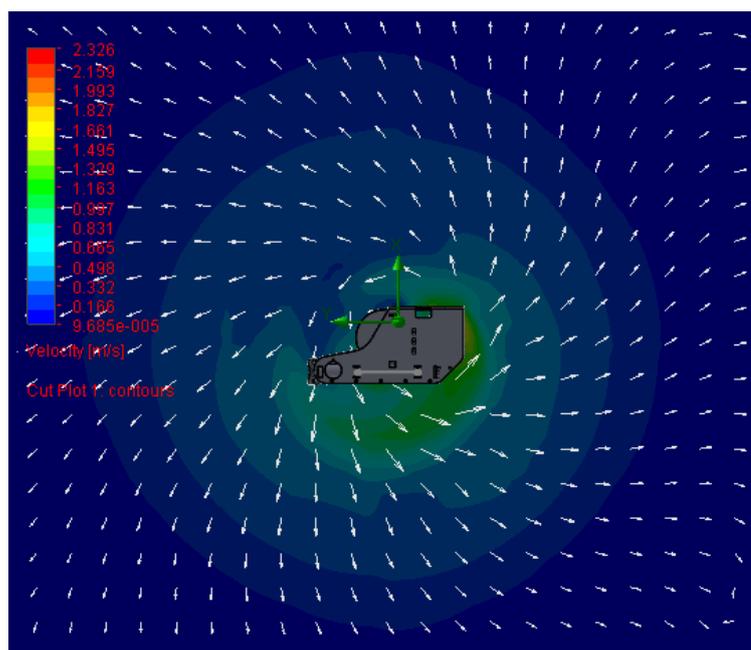


Fig. 42: Distribución velocidades. Cabeceo negativo.

5.4.11.- Movimiento de balance. (Giro respecto eje Y tomado para las simulaciones).

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value
Velocidad (X)	[rad/s]	-3,14159	-4,71239	-6,28319	-9,42478
GG Force 1	[N]	2,10869	4,704411	8,383998	18,87015
GG Force (X) 1	[N]	0,581068	1,283562	2,297251	5,146528
GG Force (Y) 1	[N]	0,355493	0,801306	1,443765	3,24878
GG Force (Z) 1	[N]	1,995635	4,45442	7,932819	17,86173
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,013728	0,03247	0,05614	0,125716
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,297376	0,66298	1,17729	2,646167
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,01035	-0,01804	-0,03419	-0,08046

Tabla 13: Fuerzas y momentos. Movimiento de balance.

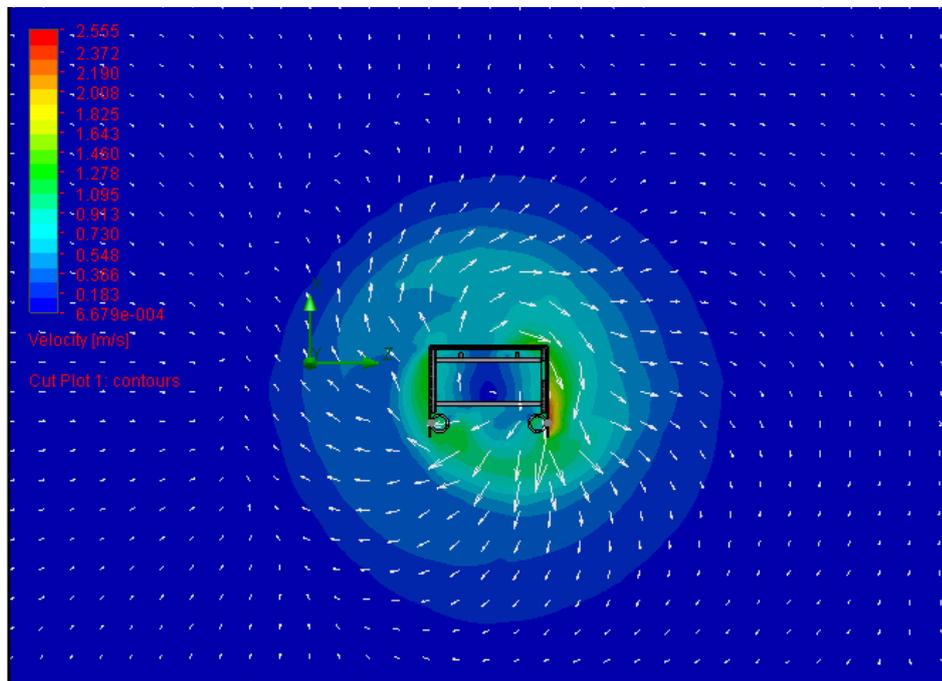


Fig. 43: Distribución velocidades. Movimiento de balance.

5.4.12.- Movimiento de balance negativo.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value
Velocidad (X)	[rad/s]	3,141593	4,712389	6,283185	9,424778
GG Force 1	[N]	1,670321	3,711158	6,763681	14,92544
GG Force (X) 1	[N]	0,291248	0,640329	1,212241	2,569979
GG Force (Y) 1	[N]	0,275807	0,601903	1,119861	2,602666
GG Force (Z) 1	[N]	-1,62144	-3,6056	-6,55925	-14,4703
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,03315	-0,07462	-0,13066	-0,32416
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,29061	-0,65261	-1,16133	-2,553
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,004027	0,008828	0,021496	0,08741

Tabla 14: Fuerzas y momentos. Movimiento de balance negativo.

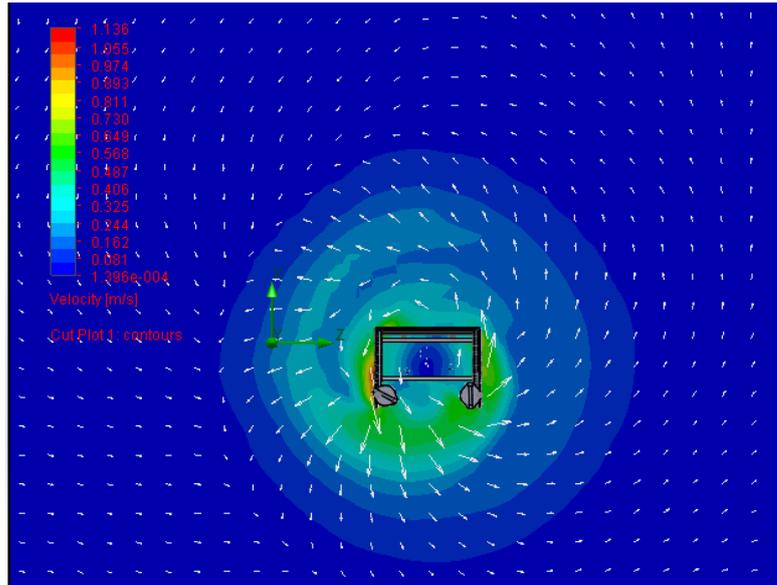


Fig. 44: Distribución velocidades. Balance negativo.

5.4.13.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y descenso.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
Velocidad (X)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
GG Force 1	[N]	1,95889	7,811349	17,62392	31,30428	70,76763
GG Force (X) 1	[N]	1,949138	7,77911	17,56012	31,19461	70,54036
GG Force (Y) 1	[N]	-0,19456	-0,70461	-1,48895	-2,60099	-5,6375
GG Force (Z) 1	[N]	0,015969	0,078401	0,166967	0,298356	0,577736
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,003067	0,015579	0,036118	0,06386	0,153767
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,006154	0,026459	0,059174	0,106332	0,235522
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,00046	-0,00195	-0,00256	-0,00209	-0,00218

Tabla 15: Fuerzas y momentos. Avance y descenso.

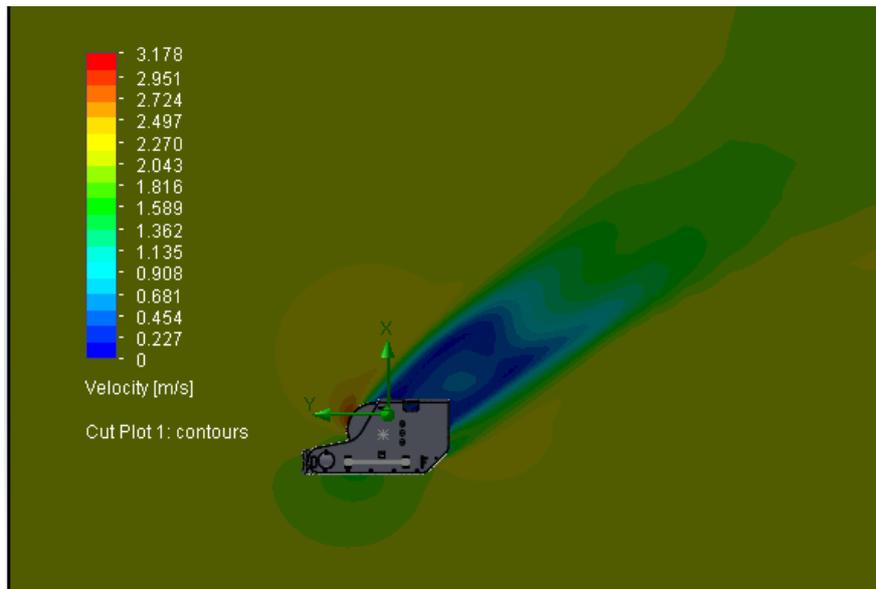


Fig. 45: Distribución velocidades. Avance y descenso.

5.4.14.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y ascenso.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
Velocidad (X)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
GG Force 1	[N]	2,417083	9,619276	21,78839	38,8685	87,86201
GG Force (X) 1	[N]	-2,30742	-9,21651	-20,9071	-37,4002	-84,7472
GG Force (Y) 1	[N]	-0,71672	-2,74338	-6,11278	-10,556	-23,0935
GG Force (Z) 1	[N]	-0,06638	-0,24538	-0,51062	-0,74433	-2,08351
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,00683	-0,02442	-0,05874	-0,12493	-0,26313
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,00386	-0,01468	-0,03028	-0,06349	-0,12782
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,00857	-0,03039	-0,08231	-0,13082	-0,29012

Tabla 16: Fuerzas y momentos. Avance y ascenso.

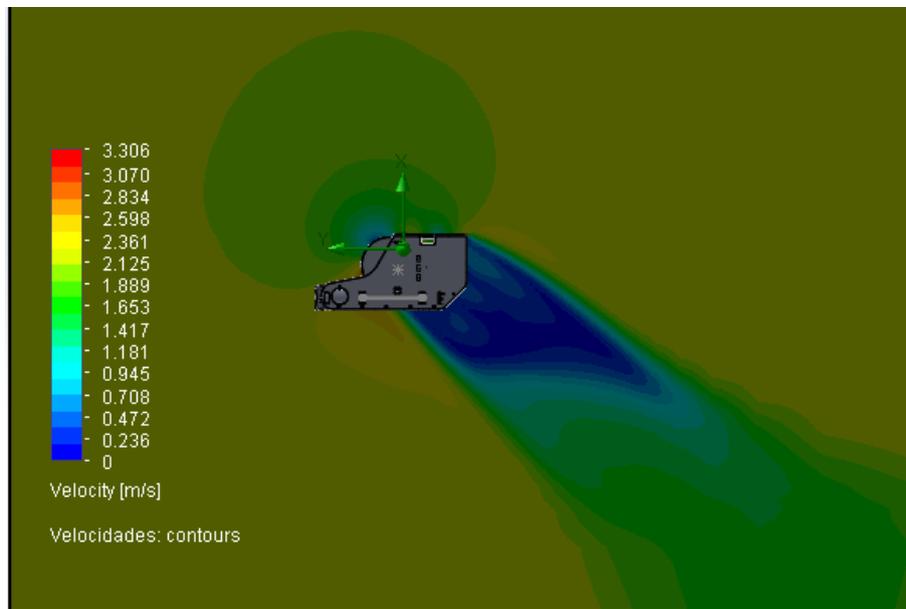


Fig. 46: Distribución velocidades. Avance y ascenso.

5.4.15.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y babor.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
Velocidad (Z)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
GG Force 1	[N]	2,381205	9,504636	21,36448	37,96344	85,70934
GG Force (X) 1	[N]	-0,33148	-1,28644	-2,90277	-5,15699	-12,0014
GG Force (Y) 1	[N]	-0,95061	-3,77287	-8,44425	-14,9741	-33,6246
GG Force (Z) 1	[N]	-2,15792	-8,62836	-19,409	-34,5022	-77,9195
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,0606	-0,23863	-0,55207	-0,97215	-2,07351
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,03267	-0,13357	-0,29896	-0,52203	-1,17494
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,028693	0,119398	0,259499	0,461864	1,0728

Tabla 17: Fuerzas y momentos. Avance y babor.

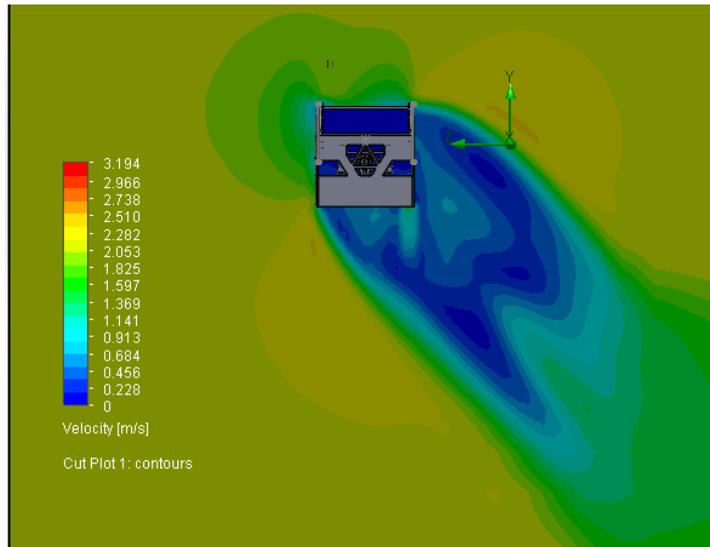


Fig. 47: Distribución velocidades. Avance y babor.

5.4.16.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y estribor.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
Velocidad (Z)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
GG Force 1	[N]	2,420593	9,645256	21,70335	38,63033	86,91178
GG Force (X) 1	[N]	-0,30396	-1,19307	-2,6687	-4,80605	-10,9677
GG Force (Y) 1	[N]	-0,95596	-3,7861	-8,48162	-15,0638	-33,8667
GG Force (Z) 1	[N]	2,202957	8,790504	19,79838	35,24607	79,28689
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,06275	0,257911	0,590035	1,048743	2,311464
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,029137	0,12367	0,264852	0,469381	1,034625
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,02214	0,086853	0,192437	0,33123	0,781768

Tabla 18: Fuerzas y momentos. Avance y estribor.

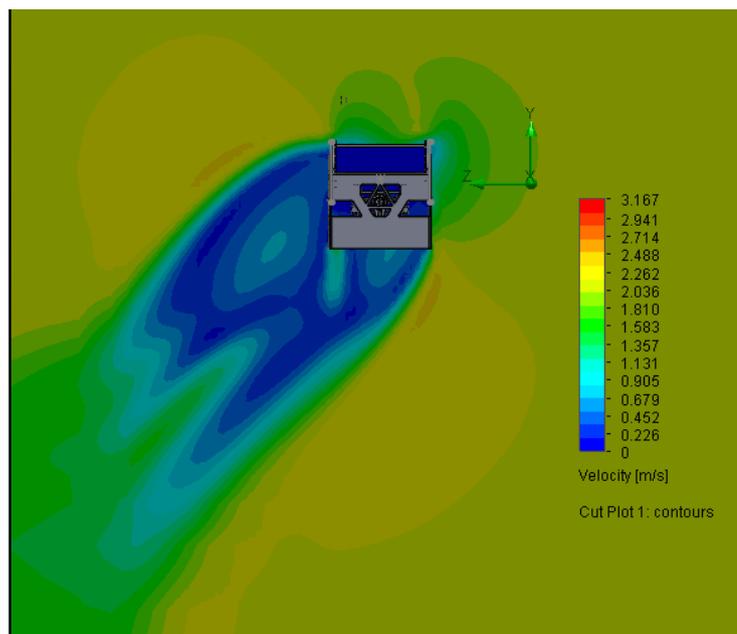


Fig. 48: Distribución velocidades. Avance y estribor.

5.4.17.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y descenso.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
Velocidad (X)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
GG Force 1	[N]	2,591816	10,2335	22,95607	40,75706	90,15734
GG Force (X) 1	[N]	1,846389	7,076892	15,70297	27,75828	60,99604
GG Force (Y) 1	[N]	1,816763	7,385191	16,72698	29,81632	66,38279
GG Force (Z) 1	[N]	0,087903	0,317985	0,778559	1,265936	1,074889
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,0045	-0,01452	-0,02895	-0,05363	-0,0459
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,006401	0,025665	0,059705	0,100818	0,145196
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,143229	0,573672	1,290525	2,298879	5,042368

Tabla 19: Fuerzas y momentos. Retroceso y descenso.

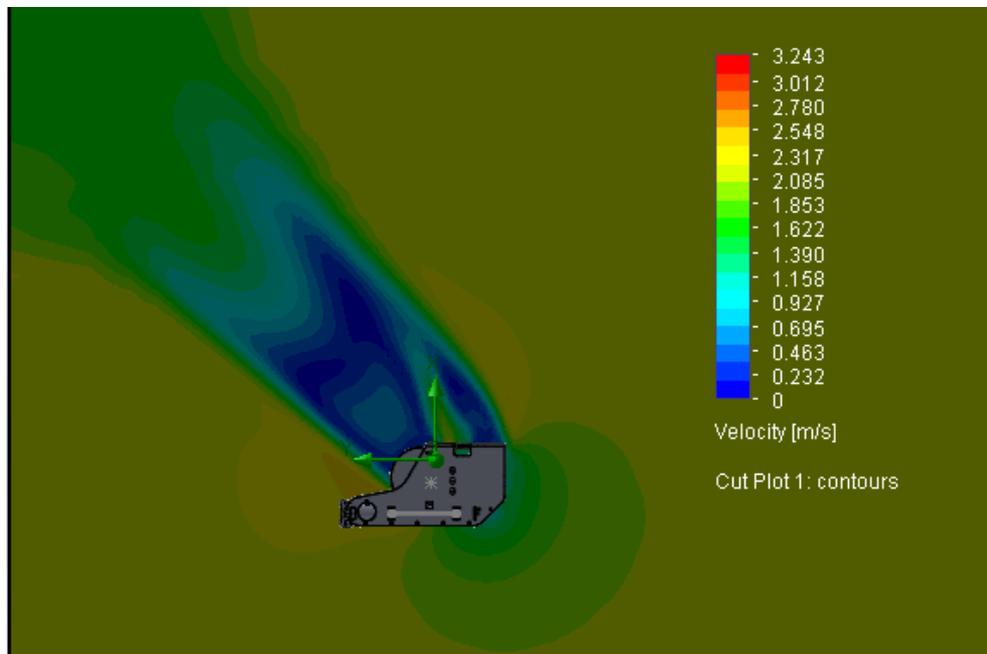


Fig. 49: Distribución velocidades. Retroceso y descenso.

5.4.18.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y ascenso.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
Velocidad (X)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
GG Force 1	[N]	1,352046	5,36583	12,04236	21,35217	48,00494
GG Force (X) 1	[N]	-1,07314	-4,25993	-9,56649	-16,982	-38,1999
GG Force (Y) 1	[N]	0,822263	3,2616	7,312217	12,94039	29,06789
GG Force (Z) 1	[N]	0,017052	0,084379	0,179175	0,268127	0,544721
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,00323	-0,01278	-0,0276	-0,03615	-0,08459
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,002039	0,009257	0,021059	0,041852	0,086436
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,09089	-0,36216	-0,81575	-1,45068	-3,26983

Tabla 20: Fuerzas y momentos. Retroceso y ascenso.

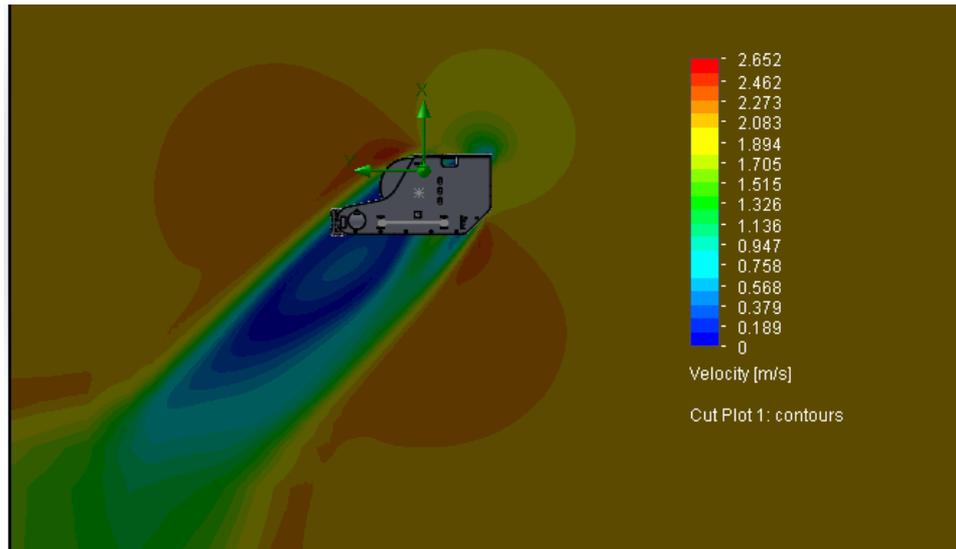


Fig. 50: Distribución velocidades. Retroceso y ascenso.

5.4.19.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y babor.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
Velocidad (Z)	[m/s]	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5
GG Force 1	[N]	2,738185	11,00912	24,83825	44,16722	99,33424
GG Force (X) 1	[N]	0,123255	0,413692	0,87872	1,598089	3,648163
GG Force (Y) 1	[N]	1,110587	4,359722	9,795385	17,37267	39,07479
GG Force (Z) 1	[N]	-2,49981	-10,1006	-22,8083	-40,5756	-91,2532
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,150303	0,608025	1,370889	2,440509	5,490142
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,02957	-0,12429	-0,27553	-0,49002	-1,09968
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,042496	0,172137	0,388484	0,691453	1,559663

Tabla 21: Fuerzas y momentos. Retroceso y babor.

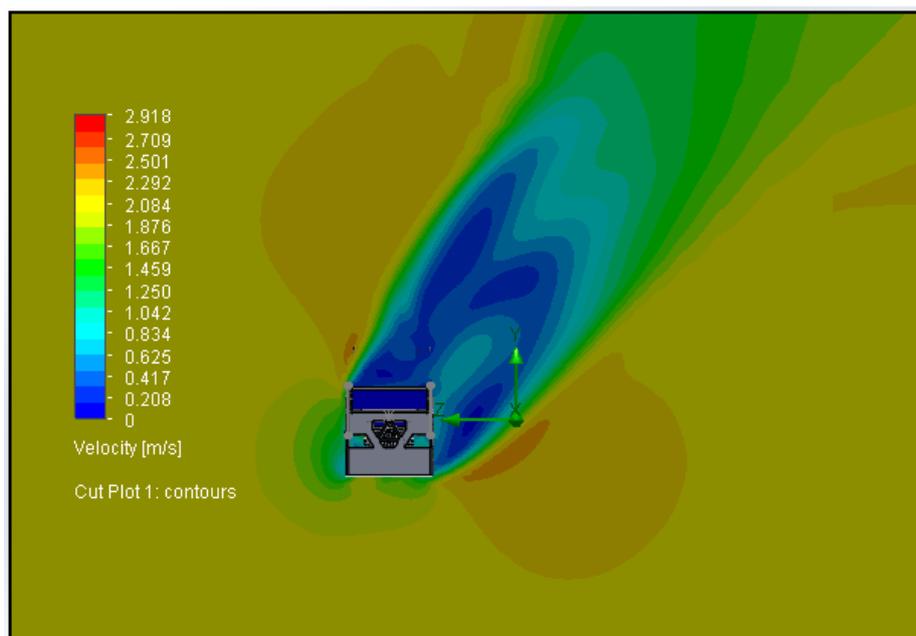


Fig. 51: Distribución velocidades. Retroceso y babor.

5.4.20.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y estribor.

Goal Name	Unit	Value	Value	Value	Value	Value
Velocidad (Y)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
Velocidad (Z)	[m/s]	0,25	0,5	0,75	1	1,5
GG Force 1	[N]	2,737953	10,97997	24,68967	44,22132	99,49136
GG Force (X) 1	[N]	0,134779	0,456608	0,770892	1,356311	2,643702
GG Force (Y) 1	[N]	1,09746	4,302175	9,721391	17,02483	38,39735
GG Force (Z) 1	[N]	2,504756	10,0917	22,68215	40,7902	91,74521
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,15108	-0,6101	-1,38183	-2,46921	-5,54647
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,032806	0,13584	0,315596	0,562072	1,287237
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,041209	0,165908	0,382376	0,680238	1,516707

Tabla 22: Fuerzas y momentos. Retroceso y estribor.

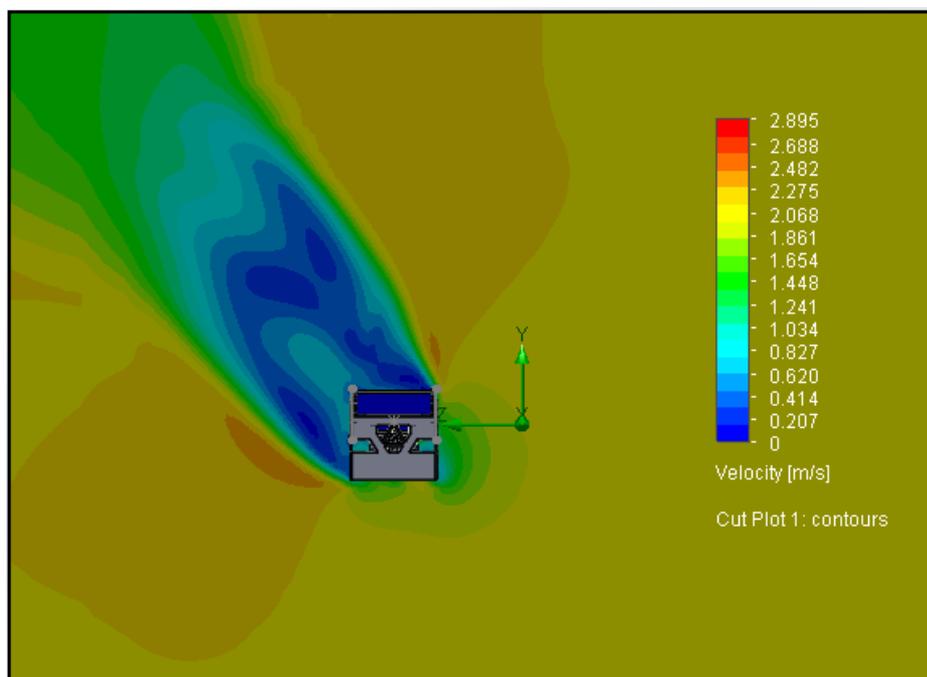


Fig. 52: Distribución velocidades. Retroceso y estribor.

5.5.- Análisis de resultados y detección de datos erróneos.

Todos los resultados de las fuerzas y momentos obtenidos que se muestran en el apartado anterior son los resultados corregidos y definitivos, con el fin de evitar una extensión demasiado grande del proyecto, se han omitido las tablas correspondientes donde se indicaban los datos erróneos. Estos datos se encuentran documentados en las hojas de Excel de cada simulación, que se pueden consultar en el ANEXO. Por lo que en los siguientes apartados se procederá a la descripción de cómo se detectaron los errores y su posterior corrección.

5.5.1.- Detección resultados erróneos.

En la primera simulación para cada movimiento, a la hora de comprobar los cálculos y los resultados obtenidos, se observó un posible error. Los momentos producidos por los flujos de agua parecían no tener coherencia con lo esperado según las condiciones de simetría del ROV respecto algunos de sus ejes.

Como ejemplo, se muestra a continuación una tabla con los momentos que calculaba FlowSimulation para el movimiento de avance a 1.5m/s →

Goal Name	Unit	Value
GG Torque (X) 1	[N*m]	5,438993379
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-1,884840875
GG Torque (Z) 1	[N*m]	1,390069586

Tabla 23: Momentos erróneos. Movimiento de avance

Para los momentos respecto al eje X y el eje Y, se obtienen unos números distintos de 0, o por lo menos demasiado desviados de 0, cuando lo esperado es que en este tipo de movimiento, los momentos respecto a X e Y sean nulos. Y es que deben ser nulos por las condiciones de simetría en la geometría del ROV respecto dichos ejes. Para que aparezca un valor desviado del 0 en los momentos, debe darse que en los extremos respecto al plano XY aparezcan fuerzas (en la dirección de X y la de Y en este caso) distintas producidas por el flujo sobre el ROV, y para que sean distintas, debe haber una diferencia en su geometría (recordar que estamos analizando los coeficientes hidrodinámicos de amortiguamiento, que dependen principalmente de la geometría del ROV) lo cual no ocurre en nuestro diseño. Por lo que se puede afirmar que estos resultados son erróneos.

Lo mismo ocurrió con los resultados de los momentos en el resto de direcciones de flujo, dependiendo del movimiento, siempre hay alguno de sus momentos que, por condiciones de simetría, deben ser nulos o, por lo menos, muy próximos a 0. Y volvían a aparecer resultados con números muy desviados del 0, por lo que no se trataba de un error puntual en una simulación (lo cual, podría ocurrir en programas de cálculo por elementos finitos), sino que se trataba de un error repetido en cada simulación, ya sea en las propiedades de cálculo de las simulaciones, o en el sistema de coordenadas escogido como referencia para la determinación de los momentos.

Este segundo tipo de error sería el más lógico y a la vez el más probable, ya que los momentos se calculan respecto al sistema de referencia. Aunque siguieran siendo muy próximos a 0 los valores de los momentos (siempre aparece un pequeño error en este tipo de cálculo computacional), como se tiene en cuenta el valor de la distancia al origen de coordenadas de una manera proporcional (Newton*metro), los resultados finales siempre se verían afectados por esta distancia. Para que este error pueda ser confirmado, ha de darse que el sistema de coordenadas de referencia esté a una distancia considerable del centro de masas del ROV. Analizando las propiedades de los cálculos, se pudo observar que este sistema de referencia, que era el que crea el programa por defecto, está bastante desviado del centro de masas.

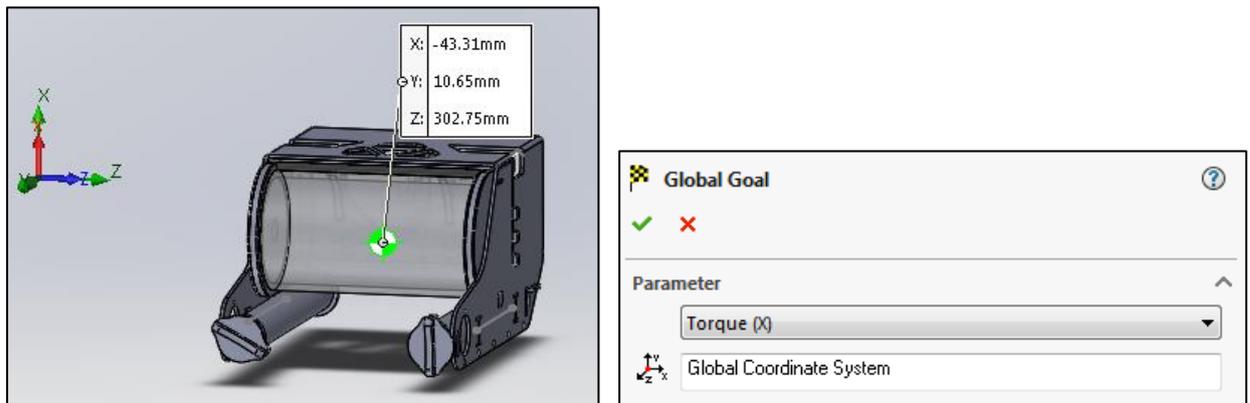


Fig. 53: Sistema de referencia automático erróneo.

Por lo que se puede confirmar que el error está en la referencia del sistema de coordenadas, haciendo inservible para las simulaciones el sistema creado automáticamente. Para la corrección de este error, deberá repetirse cada simulación de la manera descrita en el apartado 5.5.2.

También se detectó un error al observar el resultado del momento respecto Y obtenido de la simulación del movimiento de ascenso a una velocidad de 1.5 m/s. Mientras que para las demás velocidades, los resultados tienen valores negativos, para esta velocidad se obtiene un valor positivo. Por esto es que se revisan los cálculos que ha realizado FlowSimulation.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Torque (X) 2	[N*m]	-0,0213596	-0,018758165	-0,038926805	-0,002578385	100
GG Torque (Y) 2	[N*m]	0,00385971	0,000932605	-0,022732795	0,020010769	57,3
GG Torque (Z) 2	[N*m]	-1,2573086	-1,276835274	-1,314845683	-1,242749873	100

Tabla 24: Error de cálculo en movimiento de ascenso.

Como puede observarse, para el análisis de este objetivo el programa finaliza la simulación pero no termina los cálculos necesarios para que el valor del momento respecto de Y converja, quedándose al 57% de la progresión, mientras que para el resto de resultados sí que llega al 100% del progreso. Para corregirlo, basta con repetir el proceso de simulación, pero esta vez sólo indicando a FlowSimulation que calcule el momento respecto al eje Y. El resultado corregido es el que está indicado en el apartado 5.4.4.

Otro error cometido es una consecuencia del cambio de sistema de coordenadas de referencia. Éste se da en cada una de las simulaciones de los movimientos de giro.

Para describir este tipo de flujos en las simulaciones, es necesario establecer un sistema de referencia distinto del automático (en los movimientos rectilíneos sólo había que indicar la velocidad para cada dirección). En primer lugar, se introdujo un origen para el nuevo sistema de coordenadas sobre un punto donde se intuía que podía estar el centro de masas, llamado “sistema de coordenadas 1”, y sobre éste sistema, se describieron los flujos de giro. Parecían estar correctamente definidos pero, tras el error encontrado anteriormente en el cálculo de momentos, se volvió a analizar la situación geométrica de este punto respecto al centro de masas calculado correctamente (mediante la operación centro de masas de SolidWorks).

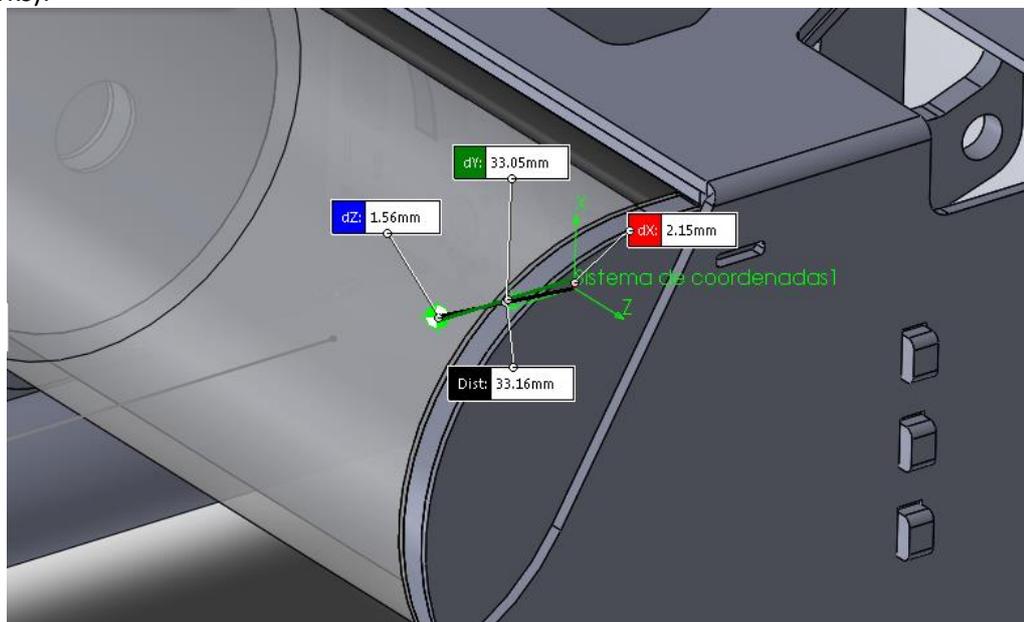


Fig. 54: Distancia entre centro de masas y sistema de coordenadas 1

Se observa que no coinciden ambos sistemas, y se puede afirmar que las simulaciones hechas para los movimientos de giro no son correctas. Para corregirlo, se repiten las simulaciones de la manera descrita en el apartado 5.5.3.

5.5.2.- Simulaciones con nuevo sistema de coordenadas para el cálculo de momentos.

Como se indica en el apartado anterior, hay que cambiar el sistema de coordenadas de referencia para todas las simulaciones. El nuevo sistema tiene los ejes paralelos al anterior pero el origen de coordenadas se coloca sobre la operación “centro de masa” realizado al ensamblaje, y se le llama “sistema de coordenadas 2”.

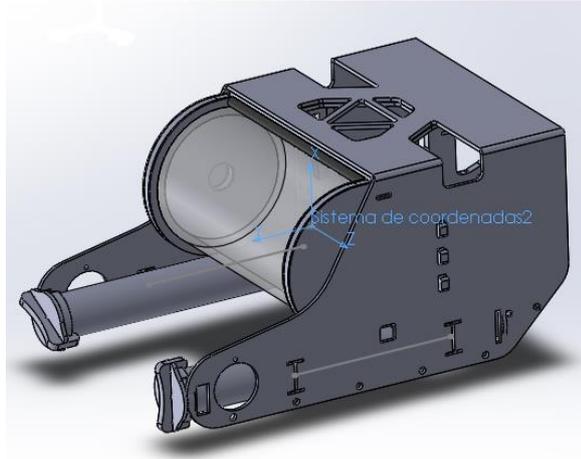


Fig. 55: Nuevo sistema de referencia

Como el error que se comete ha sido principalmente en los cálculos de los momentos, primero había que analizar la influencia del cambio de sistema de referencia en el cálculo de las fuerzas y los momentos. De esta manera se evitarían cálculos innecesarios que harían que se perdiera muchísimo tiempo:

- Se repiten las simulaciones para el movimiento de avance en cada una de las 5 velocidades, al igual que en la primera simulación, pero esta vez se le indica a FlowSimulation a través de las propiedades de cálculo que escoja el nuevo sistema de referencia.
- Los resultados obtenidos para las fuerzas son de valores prácticamente iguales que los que se obtuvieron en la primera simulación, por lo que se puede afirmar que este cambio del sistema de referencia no afectará al cálculo de las fuerzas en cada movimiento, pudiendo escoger como válidos los obtenidos anteriormente.
- De esta manera no será necesario repetir en cada nueva simulación el cálculo de las fuerzas. Esto hace que se reduzca considerablemente el tiempo de simulación que conllevaría al repetir todos los movimientos.

En cambio, los nuevos resultados de los momentos sí que han cambiado de forma considerable, y esta vez sí dan lo que se esperaba teóricamente. Como ejemplo, en el movimiento de avance, para la velocidad de 1.5 m/s, se obtienen momentos respecto X e Y muy próximos a 0. No dan exactamente 0 porque se asume que el análisis por elementos finitos siempre comete un error mínimo, que por muy pequeño que sea siempre afectará a los resultados.

A continuación se muestra una comparativa de las dos simulaciones, donde la tabla de la izquierda corresponde a los resultados de la primera simulación, y los de la derecha a los de la nueva simulación con el sistema de referencia correcto:

Goal Name	Unit	Value	Goal Name	Unit	Value
GG Torque (X) 1	[N*m]	5,438993379	GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,00064083
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-1,884840875	GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,000456148
GG Torque (Z) 1	[N*m]	1,390069586	GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,013358053

Tabla 25: Comparativa nuevos cálculos de momentos

Se puede observar que los nuevos resultados cometen un error del orden de 0.0001 unidades respecto 0. Confirmando que este nuevo sistema de referencia es apto para realizar las simulaciones y el cálculo de momentos.

Así pues, con todo lo expuesto, se procede a la repetición de las simulaciones para cada uno de todos los movimientos, pero con el nuevo sistema de coordenadas, y calculando sólo los momentos, ya que hemos visto que no es necesario repetir para las fuerzas, y ahorrar mucho tiempo en simulación. Todos los resultados finales corregidos están expuestos en el apartado 5.4.

5.5.3.- Simulaciones con nuevo sistema de coordenadas para flujos de giro.

Según el análisis del apartado 5.5.1, las simulaciones de los movimientos de giro no son correctas, debido a que el "sistema de coordenadas 1" no coincide con el centro de masas del ROV, y es el movimiento el que no está bien definido. Por lo que para estas simulaciones se repiten todos los cálculos, incluidas también las fuerzas. También se tiene en cuenta que el sistema de referencia para el cálculo de momentos es el "sistema de coordenadas 2" al igual que en el apartado anterior.

En este caso se asume el tiempo de simulación que conlleva repetir los cálculos por completo. Los resultados finales corregidos se muestran en el apartado 5.4.

5.6.- Resultados finales, conclusiones.

Todos los resultados finales se encuentran referenciados en el apartado 5.4., pero se han conservado también los cálculos erróneos en hojas de Excel dentro del ANEXO para que puedan ser consultados en futuros proyectos. También en el ANEXO se encuentran anotados los tiempos de simulación.

Para concluir la parte de simulación se exponen las siguientes conclusiones:

- SolidWorks es una herramienta virtual que realiza cálculos por elementos finitos, por lo que todos los resultados obtenidos, aunque son bastante precisos, tienen un pequeño error cometido. El análisis de este error se deja como objeto de futuros proyectos.
- El mallado utilizado obtiene un resultado de simulación muy próximo comparado con el obtenido por el mallado de máxima precisión, pero en un tiempo mucho más reducido.
- Aunque se podrían haber sumido muchos momentos como nulos por las condiciones de simetría, en este trabajo fin de grado se han calculado todos, para poder estudiar en futuros proyectos la precisión de cálculo de SolidWorks, además de poder comparar los resultados con los que se obtendrán en los ensayos reales del ROV.
- Las fuerzas y momentos obtenidos son fiables y pueden ser usados para el cálculo de coeficientes hidrodinámicos.

6.- CÁLCULO MEDIANTE CFDs (COEFICIENTES HIDRODINÁMICOS)

6.1.- Definición de los CFD.

Conocer una estimación de las resistencias al movimiento del ROV es muy importante, ya que esto puede ayudar al análisis de la potencia instalada en los motores y el comportamiento que tendrá cuando se encuentre en movimiento en el seno de un fluido.

La mecánica de fluidos computacional (en inglés, computational fluid dynamics o CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de gases y líquidos. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que aumenta la velocidad de cálculo así como disminuye el margen de error al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los flujos turbulentos o casos con superficie libre. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala como tanques de ensayos hidrodinámicos.

El método consiste en discretizar una región del espacio creando lo que se conoce como una malla espacial, dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que en realidad, se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño.

Esto es lo que se ha hecho en el apartado anterior mediante la utilización de SolidWorks y la herramienta FlowSimulation para el OPENROV 2.8.

Dentro del ámbito naval, las herramientas CFD, pueden ser clasificadas dentro de dos grandes grupos: aquellas que consideran flujo potencial y aquellas que consideran flujo viscoso.

Flujo potencial.

Los flujos potenciales asumen que el fluido no tiene viscosidad y que el flujo es irrotacional por lo que la vorticidad es cero, luego:

$$\omega = \nabla \times u = 0$$

Esto implica que el campo de velocidades puede obtenerse como gradiente de una función llamada potencial de velocidades y denotada como ϕ

$$u_i = \frac{\partial \phi}{\partial x_i}$$

Y la ecuación diferencial que rige el proceso es la ecuación de Laplace. Que para flujo incompresible debe cumplirse que:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i^2} = 0$$

Dentro de este grupo esta con y sin superficie libre.

Flujo viscoso.

En el otro grupo tendremos las herramientas que consideran flujo viscoso, que son aquellas que consideran la viscosidad del fluido, dividiéndose a su vez con o sin superficie libre.

En el desarrollo de este proyecto será necesario flujo viscoso pero no consideraremos el efecto de superficie libre ya que consideramos el vehículo completamente sumergido.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

Ecuación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \nu \Delta u_i$$

Ecuación de energía:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \phi + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$$

Donde:

- Δ es el operador laplaciano.
- E es la energía interna por unidad de masa.
- Ψ es el ratio de disipación de energía mecánica.
- ν es la viscosidad cinemática.
- k es el coeficiente de conductividad térmica.
- T es la temperatura.

Utilización de los CFD.

Este tipo de herramientas tienen aplicación en casi todos los campos de la técnica actual desde la medicina a la ingeniería. Así mismo ocurre en la hidrodinámica, aquí aparece en los siguientes campos:

- Flujos en el interior de tuberías y conductos.
- Maniobrabilidad: El análisis mediante herramientas CFD de los flujos alrededor de apéndices del buque permiten calcular los distintos momentos producidos y así, evaluar la maniobrabilidad del buque.
- Comportamiento en el mar: En este campo los CFD constituyen una parte poco madura. Una de las cosas es estudiar las cargas de oleaje y viento sobre las estructuras que resulta ser muy importante para un buen diseño.
- Resistencia y propulsión: Las aplicaciones CFD se centran fundamentalmente en ese campo. Aquí sobre todo, hasta finales de los 90 se solían utilizar cálculos potenciales donde se desprecian los efectos de la viscosidad y formación de olas en superficie libre. Esto proporciona cálculos simples, rápidos y más o menos acertados. Sin embargo, con el tiempo y ya a finales de los 90, empezaron a considerarse todos estos efectos siendo estos los puntos que plantean los mayores problemas en la actualidad.
- Diseño de propulsores: En campo de los CFD las técnicas utilizadas son viscosas ya que permiten un mejor cálculo del rendimiento del propulsor para una mejor aproximación a los resultados de experimentos reales. Aquí se emplean técnicas BEM ("Boundary Element Methods") u otras como superficies sustentadoras.

En este proyecto se van a utilizar los CFD tanto para el análisis de la resistencia al avance del modelo como para determinar los coeficientes que nos determinen como se va a comportar el vehículo.

6.2.- Modelo dinámico por coeficientes.

6.2.1.- Introducción y consideraciones iniciales.

La modelación matemática del comportamiento dinámico de vehículos submarinos no tripulados es un área ampliamente investigada y la información no clasificada está disponible a través de Internet y de otras fuentes de publicaciones escritas.

Sin embargo, existe gran confusión, aun en la actualidad, en los términos asociados a las fuerzas que actúan sobre los UUV's, principalmente de tipo hidrodinámico. Como ya se dijo uno de los objetivos de este proyecto es explicar cómo se pueden obtener estos coeficientes mediante el uso de CFD, pero antes de explicar cómo se pueden obtener hay que comprender qué son y cómo se definen estos coeficientes, para después saber cómo se deben desarrollar las maniobras en el software.

Por lo que en este capítulo se analiza el movimiento de un AUV sumergido en sus 6 grados de libertad, obteniendo las ecuaciones que definen el movimiento de este vehículo.

Se van a considerar las siguientes consideraciones iniciales:

- El vehículo se comporta como un cuerpo rígido. Lo que elimina la consideración de fuerzas que actúan sobre los elementos individuales de masa.
- La rotación de la Tierra es despreciable en cuanto a componentes de la aceleración del centro de masa se refiere. Lo que elimina las fuerzas debidas al movimiento de la Tierras (aceleración de Coriolis).
- No se consideran corrientes subacuáticas, es decir, se considera que el vehículo navega en un mar completamente en calma.

Las principales fuerzas que actúan sobre el vehículo son de origen inercial, gravitacional, hidrostáticas e hidrodinámicas. Estas fuerzas principalmente se combinan para constituir el comportamiento hidrodinámico del cuerpo.

El estudio de la dinámica se puede dividir en dos partes: la cinemática, que sólo trata los aspectos geométricos del movimiento, y la dinámica, que es el análisis de las fuerzas que provocan el movimiento.

El capítulo comienza con una descripción de los sistemas de coordenadas, la cinemática y las relaciones dinámicas utilizadas en el modelado de un vehículo que se mueve en el espacio libre.

También se representa la hidrodinámica básica. Esta discusión desarrolla la base de la fuerza de diversas expresiones y momentos representando la interacción del vehículo con su entorno fluido.

Con las fuerzas hidrodinámicas, las fuerzas de control y sus momentos se analiza completamente las seis ecuaciones del movimiento que se forman.

6.2.2.- Sistema de coordenadas, posicionamiento y cinemática

Es necesario analizar el movimiento de un vehículo autónomo submarino no tripulado con seis grados de libertad para determinar su posición y orientación en el espacio tridimensional y en el tiempo.

Las tres primeras coordenadas independientes (x, y, z) determinan la posición y el movimiento de traslación a lo largo de X, Y, Z ; los tres restantes (θ, Φ, Ψ), son para la orientación y el movimiento de rotación en el sistema Global.

Convencionalmente en terminología naval a estas componentes se le llama: avance, deriva, arfada, balanceo, cabeceo y guiñada, respectivamente.

Obviamente la posición, orientación y movimiento de rotación de un cuerpo rígido (un cuerpo en el que la posición relativa de todos sus puntos es constante) puede ser descrito con respecto a una posición de referencia. Para este fin, un conjunto de ejes de coordenadas ortogonales se eligen y se supone que se conecta rígidamente al origen arbitrario del cuerpo para construir el sistema de referencia.

De manera similar, las fuerzas y momentos que actúan sobre el vehículo lo hacen de la misma forma.

Hay que tener en cuenta que el convenio utilizado en los UUVs, la dirección “x” positiva se toma hacia adelante, la dirección “y” positiva se toma hacia la derecha, la dirección “z” positiva se toma hacia abajo, y la regla de la mano derecha se aplica a los ángulos de rotación.

Grados de Libertad	Movimientos	Fuerzas y Momentos	Velocidades lineales y angulares	Posiciones y ángulos Euler
1	Avance	X	U	x
2	Deriva	Y	V	y
3	Arfada	Z	W	z
4	Balance	K	P	ϕ
5	Cabeceo	M	Q	θ
6	Guiñada	N	R	ψ

Tabla 26: Nomenclatura estándar AUV

Posicionamiento.

Como se mencionó anteriormente, las posiciones y los ángulos requeridos son muy importantes para describir claramente los sistemas de referencia con el fin de entender las ecuaciones cinemáticas del movimiento. Hay dos sistemas de referencia ortogonales; el primero es el sistema fijo XY Z Tierra (Sistema Global) que se define con respecto a la superficie de la tierra.

El Sistema Global de coordenadas que se utiliza en este proyecto se define con los tres ejes ortogonales, colocados en el centro de masa. En este proyecto el Sistema Global será también el Sistema Local. Estos ejes están alineados con las direcciones Norte, Este y Abajo. Se establece un sistema de referencia con vectores unitarios i, j, k .

Ignorando la tasa de rotación de la Tierra en comparación con las velocidades angulares producidas por el movimiento del vehículo, se puede decir que las coordenadas XYZ son un sistema de referencia inercial en el que las leyes del movimiento de Newton son válidas.

La posición de un vehículo en este sistema de referencia tendrá el siguiente vector:

$$r_0 = [X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}]$$

La cinemática define el movimiento de un objeto sin tener en cuenta la masa y las fuerzas externas que actúan sobre el objeto durante su movimiento. Por lo tanto las velocidades lineal y angular del objeto se tienen en cuenta en la cinemática. Como se ha mencionado en el punto anterior, las velocidades lineal y angular se expresan bajo un sistema de coordenadas o de referencia fijo.

Como en este caso el sistema de referencia que tenemos es el centro de masas y a la vez es el sistema de referencia global, las velocidades del sistema son las que se han medido en la simulación. u, v, w para las velocidades lineales; y p, q, r para las velocidades angulares.

En la siguiente matriz se muestra cómo están relacionadas las velocidades lineales y angulares, con sus ángulos respecto de los ejes del sistema de referencia, con los vectores velocidad de cada tipo de movimiento dentro de los 6 grados de libertad:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \dot{\theta} \cos \dot{\psi} + v(-\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \dot{\theta} \cos \psi) + w(\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi) \\ u \cos \dot{\theta} \sin \dot{\psi} + v(\cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \dot{\theta} \sin \psi) + w(-\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi) \\ -u \sin \theta + v \sin \phi \cos \dot{\theta} + w \cos \phi \cos \dot{\theta} \\ p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \dot{\theta} \\ q \cos \phi - r \sin \phi \\ (q \sin \phi + r \cos \phi) / \cos \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

6.2.3.- Ecuaciones dinámicas del movimiento

La representación general de las ecuaciones de la dinámica del movimiento se hace dejando las fuerzas externas y momentos en el lado derecho y las aceleraciones del cuerpo, su masa, su inercia, y los términos de masa añadida en el lado izquierdo.

$$\begin{bmatrix} \text{Masa} \\ \text{Inercia} \\ \text{Masa añadida} \end{bmatrix} [\text{Aceleraciones}] = \begin{bmatrix} \text{Fuerzas Hidrostáticas y Momentos} \\ + \\ \text{Fuerzas Hidrodinámicas y Momentos} \\ + \\ \text{Fuerzas Propulsivas y Momentos} \end{bmatrix}$$

El cálculo de las ecuaciones de aceleración, a partir de las ecuaciones de movimiento de translación, rotación, e inercia, no son del ámbito de este proyecto, por lo que sólo se deja indicado. Para su consulta se deja referenciado en la bibliografía el TFG de José Antonio Ruiz, donde se lleva a cabo este análisis.

6.2.4.- Fuerzas hidrostáticas y momentos.

Las fuerzas gravitatorias y de empuje generalmente se llaman fuerzas de restauración en la terminología usada en hidrodinámica. Los vectores de peso y de empuje no cambian las reacciones del vehículo para los cuerpos que están sumergidos. La expresión del empuje y del peso bajo el sistema de referencia global puede ser escrita como: $F_W = 0i^{\rightarrow} + 0j^{\rightarrow} + Wk^{\rightarrow}$ y $F_B = 0i^{\rightarrow} + 0j^{\rightarrow} - Bk^{\rightarrow}$.

La matriz que engloba la descripción de las fuerzas y momentos hidrostáticos en cada dirección se ha obtenido del TFG mencionado antes, destacando que θ y ϕ son los ángulos respecto de los ejes de coordenadas, y que X_G, Y_G, Z_{Gz} son las coordenadas del centro de gravedad del cuerpo sumergido.

$$\begin{bmatrix} F_{Hidrostáticas} \\ M_{Hidrostáticas} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(W - B)\sin \theta \\ (W - B)\cos \theta \sin \phi \\ (W - B)\cos \theta \cos \phi \\ [(y_G W - y_G B)\cos \theta \cos \phi + (-z_G W + z_G B)\cos \theta \sin \phi] \\ [(-z_G W + z_G B)\sin \theta + (-x_G W + x_G B)\cos \theta \cos \phi] \\ [(x_G W - x_G B)\cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_G B)\sin \theta] \end{bmatrix}$$

Donde la W es el peso del cuerpo sumergido, y la B, es la fuerza de empuje.

6.2.5.- Fuerzas hidrodinámicas y momentos.

Estas fuerzas hidrodinámicas se dividen en tres grupos:

- Amortiguamiento Hidrodinámico.
- Masa añadida.
- Sustentación del cuerpo.

Hay que tener también unas consideraciones iniciales que nos van a ayudar y que son necesarias para poder definir las fuerzas y momentos. Es bien sabido que el amortiguamiento de un vehículo submarino no tripulado moviéndose a gran velocidad con sus seis grados de libertad es acoplado, altamente no lineal y que está formado por dos términos; uno cuadrático y otro lineal. Con el fin de simplificar el modelado del vehículo, se harán las siguientes suposiciones:

- Se considera que para el rango de velocidades en el que se mueve el vehículo, los coeficientes tienen valores constantes.
- No se tendrá en cuenta ninguno de los términos de amortiguamiento mayores de segundo orden. Esto permitirá descartar los términos de orden superior como Y_{vvv} .
- No se tendrá en cuenta el efecto de la hélice, el modelo se introduce sin tener en cuenta los efectos que esta produce, efectos tales como succión y también un par que obliga normalmente a este tipo de vehículos a navegar con un cierto ángulo de balance.
- No se tendrá en cuenta la simetría del ROV respecto al plano XY, por lo que se calcularán todas las fuerzas y momentos en los 3 ejes del sistema de referencia.
- Para este caso, y debido a un error al describir el sistema de referencia del ROV en FlowSimulation, la dirección Y es la de avance, la dirección X la de arfada (positivo hacia arriba), y la dirección Z es la de deriva.

Fuerzas debidas al movimiento axial:

$$\begin{aligned} F_{\text{Arrastre Avance}} Y &= Y_u |u| \cdot u |u| + Y_u \cdot u \\ F_{\text{Sustentación Avance}} X &= X_u |u| \cdot u |u| + X_u \cdot u \\ F_{\text{Lateral Avance}} Z &= Z_u |u| \cdot u |u| + Z_u \cdot u \end{aligned}$$

Donde, por ejemplo:

$X_u |u| \cdot u |u|$, corresponde al término de amortiguamiento cuadrático y es el dominante cuando la velocidad es media o elevada.

$X_u \cdot u$, corresponde al término de amortiguamiento lineal y es el dominante cuando la velocidad es pequeña.

Y lo mismo para cada componente de amortiguamiento en las tres direcciones.

Aunque en este caso de movimiento de avance no deberían aparecer momentos de balance o guiñada debido a la simetría del ROV respecto del plano XY, se deja expresado y se calcularán los coeficientes para el análisis de los cálculos en futuros proyectos.

Momentos debidos al movimiento axial:

$$\begin{aligned} K_{\text{Balance avance}} K &= K_u |u| \cdot u |u| + K_u \cdot u \\ M_{\text{Cabeceo avance}} M &= M_u |u| \cdot u |u| + M_u \cdot u \\ N_{\text{Guiñada avance}} N &= N_u |u| \cdot u |u| + N_u \cdot u \end{aligned}$$

Donde: K_{uu} es el término cuadrático de amortiguamiento y K_u el término lineal. Lo mismo para cada componente de amortiguamiento en las tres direcciones.

Todas estas fuerzas y momentos se describen de la misma manera para todos los movimientos que se han simulado en FlowSimulation, y a partir de esta definición, se han calculado los coeficientes de amortiguamiento.

Así que finalmente se obtienen, mediante las regresiones, tres pares de coeficientes de amortiguamiento para las fuerzas en la dirección de los 3 ejes, y 3 pares de coeficientes de amortiguamiento para los momentos respecto los 3 ejes.

Pero cada uno se relaciona con la velocidad correspondiente: Los movimientos del eje Y se asocian a la velocidad v , y los movimientos en el eje Z a la velocidad w . Para las velocidades de giro se utiliza p , q , y r , para los movimientos de balance, cabeceo, y guiñada respectivamente. (Siguiendo la nomenclatura de la tabla 26)

6.2.6.- Masa añadida.

Debido a la aceleración del ROV en el fluido, éste crea un vacío mientras avanza. Este vacío debe ser rellenado con el fluido que deja aguas abajo del ROV. A la representación de esta masa se le llama masa virtual o añadida, esto se traduce en un aumento de la resistencia del ROV. La masa añadida no es en realidad una masa real, pero tiene las mismas unidades. La masa añadida es otro coeficiente hidrodinámico que se debe calcular.

En general, el movimiento de los vehículos submarinos con 6 grados de libertad a gran velocidad será no lineal y difícil de modelar. Sin embargo, en muchas aplicaciones de ROVs, sólo pueden moverse a bajas velocidades, como es el caso de este OPENROV 2.8 que tiene una velocidad máxima de 2 nudos. Si además el vehículo tiene 3 planos de simetría se supone que los elementos de la diagonal principal de la matriz de coeficientes de masa añadida son nulos (M_A). Por lo tanto, se obtienen las siguientes expresiones simplificadas para M_A y C_A (matriz de fuerzas centrípetas):

$$M_A = -diag \{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_p, M_q, N_r\}$$

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_r r & M_q q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_r r & 0 & -K_p p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_q q & K_p p & 0 \end{bmatrix}$$

La estructura diagonal es muy atractiva desde el punto de vista de que los elementos de la diagonal son difíciles de determinar en experimentación tan bien como en la teoría. En la práctica, la aproximación diagonal se encuentra como bastante buena para muchas aplicaciones. Esto es debido al hecho de que los elementos fuera de la diagonal de una matriz positiva (inercia) serán mucho más pequeños que sus homólogos diagonales.

“Strip theory”, o teoría de banda. Para cuerpos delgados, una estimación de las derivaciones hidrodinámicas puede ser obtenida aplicando la “strip theory”. El principio de esta teoría consiste en definir el volumen sumergido en el fluido en un número concreto de bandas. Por lo tanto, los coeficientes hidrodinámicos bidimensionales para masa añadida pueden ser computados en cada banda, y sumados a lo largo del cuerpo sumergido para llegar a los coeficientes tridimensionales. Los coeficientes bidimensionales en guiñada, balance, y cabeceo están dados en la tabla 27. Para vehículos delgados sumergidos podemos usar las siguientes fórmulas:

$$A_{11} = -X_{\dot{u}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{11}^{(2D)}(y, z) dx \approx 0.10m$$

$$A_{22} = -Y_{\dot{v}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{22}^{(2D)}(y, z) dx$$

$$A_{33} = -Z_{\dot{w}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{33}^{(2D)}(y, z) dx$$

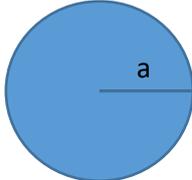
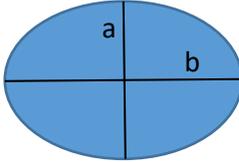
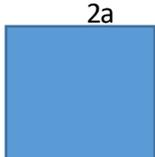
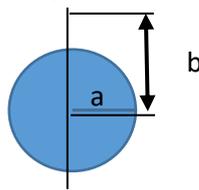
$$A_{44} = -K_{\dot{p}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{44}^{(2D)}(y, z) dx$$

$$A_{55} = -M_{\dot{q}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{55}^{(2D)}(y, z) dx$$

$$A_{66} = -N_{\dot{r}} = \int_{-L/2}^{L/2} A_{66}^{(2D)}(y, z) dx$$

Donde $A_{22}^{(2D)}(y, z)$, $A_{33}^{(2D)}(y, z)$, $A_{44}^{(2D)}(y, z)$, son normalmente aproximados con valores similares a los de la tabla 27.

Tabla 27: Coeficientes de masa añadida

	
$A_{22}: \pi \cdot \rho \cdot a^2$ $A_{33}: \pi \cdot \rho \cdot a^2$ $A_{44}: 0$	$A_{22}: \pi \cdot \rho \cdot a^2$ $A_{33}: \pi \cdot \rho \cdot b^2$ $A_{44}: 1/8 \pi \rho \cdot (b^2 - a^2)^2$
	
$A_{22}: 4.75 \cdot \rho \cdot a^2$ $A_{33}: 4.75 \cdot \rho \cdot a^2$ $A_{44}: 4.75 \cdot \rho \cdot a^2$	$A_{22}: \pi \cdot \rho \cdot [a^2 + (b^2 - a^2)/b^2]$ $A_{33}: \pi \cdot \rho \cdot a^2$ $A_{44}: \text{desconocido}$

Los momentos añadidos de inercia bidimensionales en balance, guiñada y cabeceo pueden ser reescritos como:

$$\int_{-L/2}^{L/2} A_{44}^{(2D)}(y, z) dx \triangleq \int_{-B/2}^{B/2} y^2 \cdot A_{33}^{(2D)}(x, z) dy + \int_{-H/2}^{H/2} z^2 \cdot A_{22}^{(2D)}(x, y) dz$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} A_{55}^{(2D)}(y, z) dx \triangleq \int_{-B/2}^{B/2} x^2 \cdot A_{33}^{(2D)}(y, z) dy + \int_{-H/2}^{H/2} z^2 \cdot A_{11}^{(2D)}(x, y) dz$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} A_{66}^{(2D)}(y, z) dx \triangleq \int_{-B/2}^{B/2} y^2 \cdot A_{11}^{(2D)}(x, z) dy + \int_{-H/2}^{H/2} x^2 \cdot A_{22}^{(2D)}(y, z) dz$$

Donde L, B y H son las dimensiones principales del ROV. Para una sección rectangular se pueden aproximar los coeficientes con la siguiente figura:

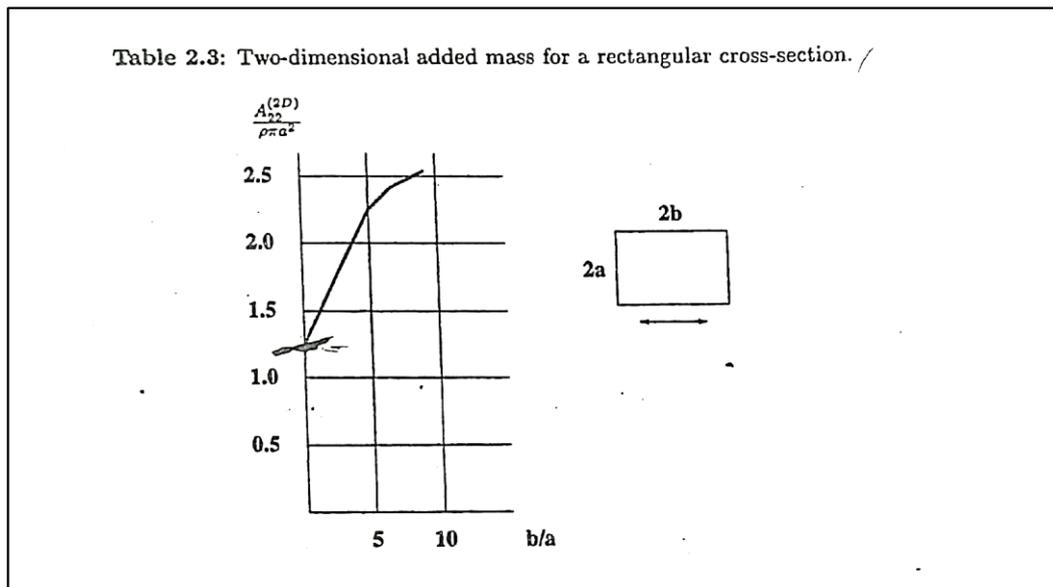


Fig. 56: Masa añadida para sección rectangular

Nuestro modelo de ROV, para el cálculo de la masa añadida, será calculado con las fórmulas de la figura 56, ya que se ha aproximado a un modelo rectangular.

6.2.7.- Fuerzas y momentos de sustentación.

Cuando el vehículo se mueve con un cierto ángulo de ataque con respecto al flujo, se genera una aceleración del flujo y por lo tanto una caída de presión en la cara de succión y el flujo se frena y por lo tanto se genera una sobre presión en la cara de presión, esta diferencia de presiones genera una fuerza de sustentación, esta fuerza está aplicada sobre el centro de presión, como este no está alineado con el centro de gravedad del vehículo la fuerza generará un momento de cabeceo o guiñada, dependiendo del plano en el que se produzca el ángulo de ataque.

Como el ROV sobre el que se aplican las ecuaciones no tiene una forma en la que predomine notablemente la eslora frente a la manga, por lo que no depende linealmente del ángulo de ataque, y además, tampoco tiene veletas y timones para el control de la dirección, el cual se realiza directamente con los propulsores instalados.

6.3.- Regresión y uso de MatLab.

Tras tener calculadas todas las fuerzas y momentos que aparecen en cada uno de los movimientos posibles del ROV, mostradas en el apartado 5.4, se hace una regresión para calcular los distintos coeficientes de amortiguamiento.

Dicha regresión se lleva a cabo mediante la utilización del software matemático de cálculo "MatLab", que además puede usarse para representar las regresiones, mostrando en una gráfica las fuerzas frente a la velocidad en cada tipo de movimiento.

Todos los archivos de matlab, y todos los cálculos se encuentran adjuntos en el ANEXO, disponible para su consulta y utilización en futuros proyectos.

A continuación se muestra un ejemplo del código para calcular los coeficientes de amortiguamiento y la regresión lineal de las fuerzas en la dirección de X e Y que aparecen en el movimiento de avance y su representación gráfica:

```

C:\matlabR12\work\Calculo_cfds.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1- clear all;
2- X=[0, 0.25,0.5,0.75,1,1.5,];
3- param0=[120,0];
4- y(1,:)= [0 -0.17394245 -0.688158647
5- -1.421825096 -2.738923704 -6.234385321];
6- y(2,:)= [0 -0.525338253 -2.041742881
7- -4.572860273 -8.102393174 -18.08446569];
8- for i = 1:2
9- [param,r]=nlinfit(X,y(i,:),@regre1,param0);
10- Parametros(:,i) = param
11- Chi2(i) = sum(r.^2)
12- xx(i,:) = [X(1):0.01:X(end)];
13- yy(i,:) = Parametros(1,i)*xx(i,:).^2+Parametros(2,i)*xx(i,:);
14- figure(i); plot (X,y(i,:),'.',xx(i,:),yy(i,:))
15- end
16-
Ready

```

```

Parametros =
    -2.8709    -7.9500
     0.1528    -0.1352

Chi2 =
    0.0099    0.0005

```

Fig. 57: Código regresión en MatLab y ejemplo resultados del cálculo

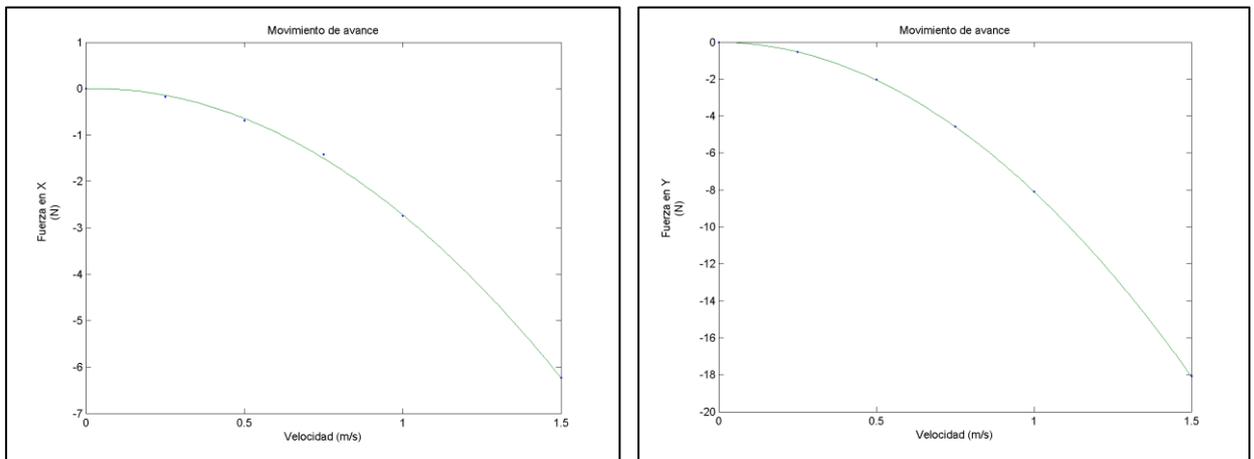


Fig. 58: Ejemplos de representación gráfica de regresiones

El uso del código de cálculo es de la siguiente manera, para cada tipo de movimiento:

- En los términos de X se introducen los valores de las velocidades, incluyendo el 0 para mejorar la representación gráfica (si no se introduce el valor 0, la regresión es igualmente correcta).
- En los términos de Y se introducen las fuerzas calculadas para cada velocidad. Se pueden copiar directamente desde la hoja de Excel donde se ha resumido todos los resultados, pero cambiando las comas por puntos convenientemente.
- Si hay varios tipos de movimientos que comparten las mismas velocidades, se puede usar la misma iteración para todos ellos, teniendo sólo que introducir varias matrices de Y_i ($i=1,2,\dots$) con los valores de las fuerzas en cada movimiento.
- Para los momentos se procede de la misma manera que para las fuerzas
- Una vez introducidos los datos, se compila y ejecuta la línea de código.
- Se muestran 3 parámetros por pantalla: El primero es el término cuadrático de la regresión, el segundo el término lineal, y el llamado "Chi2" es el error cometido en la regresión.
- Con los resultados, se representa en una gráfica los puntos correspondientes al par (velocidad, fuerza) y la línea aproximada de la regresión.

Los parámetros calculados, el término cuadrático y el término lineal, se corresponden con los coeficientes de amortiguamiento asociados a los movimientos del ROV sumergido en el agua en este caso. Pero son sólo válidos para las fuerzas y momentos de los movimientos en una sola dirección lineal o de giro.

Para el cálculo de los coeficientes de amortiguamiento de movimientos cruzados, se necesitará un código distinto al que se le ha llamado "Cfd_cruzados". Esto es debido a que estos coeficientes se rigen por una ecuación de la hidrodinámica distinta de la utilizada para movimientos en una sola dirección.

Fig. 59: Ejemplo código "Cfd_cruzados" para coeficientes cruzados

El código funciona de la siguiente manera:

- En V1 y V2, se introducen los valores de las velocidades en cada dirección según el movimiento que se va estudiar.
- A2 crea una ecuación polinómica donde los valores de V1 y V2 son los términos dependientes del polinomio.
- B es el número calculado a partir de la ecuación del coeficiente hidrodinámico (ecuación 1) de amortiguamiento cruzado en el movimiento estudiado, despejando el término cruzado pero sin dividir el producto de las velocidades de cada dirección, y le asocia un valor a cada par de velocidades, formando un sistema de dos ecuaciones plinómicas con una incógnita.
- S es la solución del sistema de dos ecuaciones con una incógnita. Esta solución es el coeficiente de amortiguamiento cruzado.

Dentro de estos movimientos, los valores de las fuerzas cuya dirección no forme parte de las dos direcciones que describen el movimiento, y los de los momentos, deben calcularse con la ecuación del coeficiente hidrodinámico cruzado (ecuación 2). Por ejemplo: si se tiene que calcular la regresión de la fuerza en dirección Z, y el movimiento es el de avance y ascenso (ejes X e Y), ésta debe calcularse con la ecuación (ecuación 2) que se describe a continuación, por ejemplo para la fuerza Z:

$$Z_{uw\ total} = Z_{uu} * u^2 + Z_u * u + Z_{ww} * w^2 + Z_w * w + Z_{uw} * u * w$$

$$B = Z_{uw} * u * w = Z_{uw\ total} - (Z_{uu} * u^2 + Z_u * u + Z_{ww} * w^2 + Z_w * w) \quad (Ecuación 1)$$

$$Z_{uw} = \frac{Z_{uw\ total} - (Z_{uu} * u^2 + Z_u * u + Z_{ww} * w^2 + Z_w * w)}{u * w} \quad (Ecuación 2)$$

Donde:

- La Z total es la fuerza en dirección Z (resultado obtenido de la simulación).
- U es la velocidad en la dirección de avance en la que se obtiene la fuerza total.
- W es la velocidad en la dirección de ascenso en la que se obtiene la fuerza total.
- Z_{uu} es el término cuadrático, asociado a esa fuerza, calculado para el movimiento de avance, U.
- Z_u es el término lineal, asociado a esa fuerza, calculado para el movimiento de avance.
- Z_{ww} es el término cuadrático, asociado a esa fuerza, calculado para el movimiento de ascenso, W.
- Z_w es el término lineal, asociado a esa fuerza, calculado para el movimiento de ascenso.
- Z_{uw} es el coeficiente de amortiguamiento cruzado para esta fuerza en este tipo de movimiento. Este resultado es el que hay que despejar y calcular.

6.4.- Desarrollo de los cálculos y resultados obtenidos.

Con los datos de velocidades, fuerzas, y momentos obtenidos de las simulaciones, y con la herramienta de MatLab, se proceden a realizar los cálculos para las regresiones y sacar los valores de los coeficientes de amortiguamiento.

También se representan gráficamente las regresiones calculadas en las que aparecen algún error, haciendo un apunte: en algunas gráficas no se ha incluido el punto del origen, donde la velocidad y la fuerza son nulas, pero sólo afecta a la estética de las gráficas.

El resto de las gráficas obtenidas no se incluyen en esta memoria para evitar una extensión demasiado grande. Pero están adjuntas en los archivos del ANEXO, para poder consultarlo y utilizarlo en futuros proyectos.

6.4.1.- Movimiento de avance.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	[N]	-2,8709	0,1528	0,0099
GG Force (Y) 1	[N]	-7,95	-0,1352	5,36E-04
GG Force (Z) 1	[N]	-0,0222	-0,0065	3,53E-04
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,0086	-0,0087	3,83E-05
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,0005	-0,0028	1,99E-06
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,1948	-0,002	4,50E-06

Tabla 28: Coeficientes de amortiguamiento. Avance.

Para este movimiento se van a representar las gráficas de la fuerza lateral, y los momentos. La fuerza lateral que aparece es muy próxima a 0 (por la simetría, se esperaba que fuera nula) y se ve en la regresión que los coeficientes son muy pequeños, además de que los puntos de la gráfica están dispersos por la imprecisión del cálculo con valores centesimales. Lo mismo ocurre para los momentos respecto X e Y, y se comparan con la representación del momento en Z, el cual tiene una regresión más exacta, ya que es este momento el que aparecería realmente en el avance.

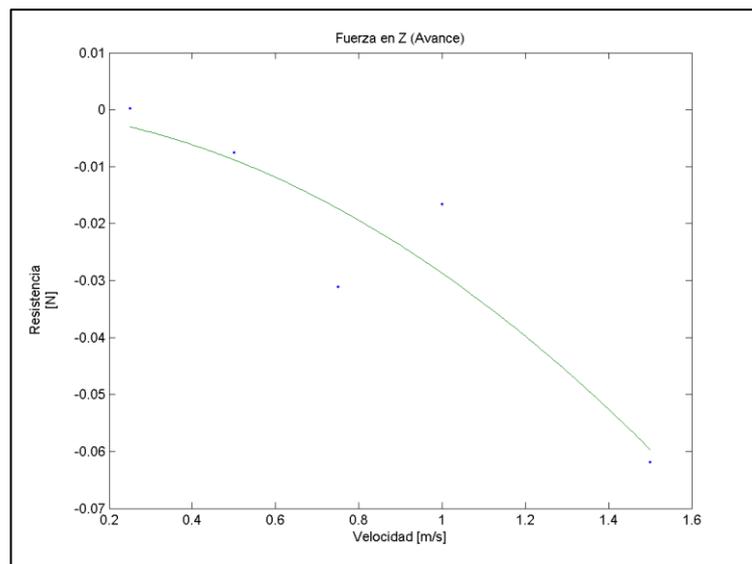


Fig. 60: Regresión Fuerza lateral. Avance

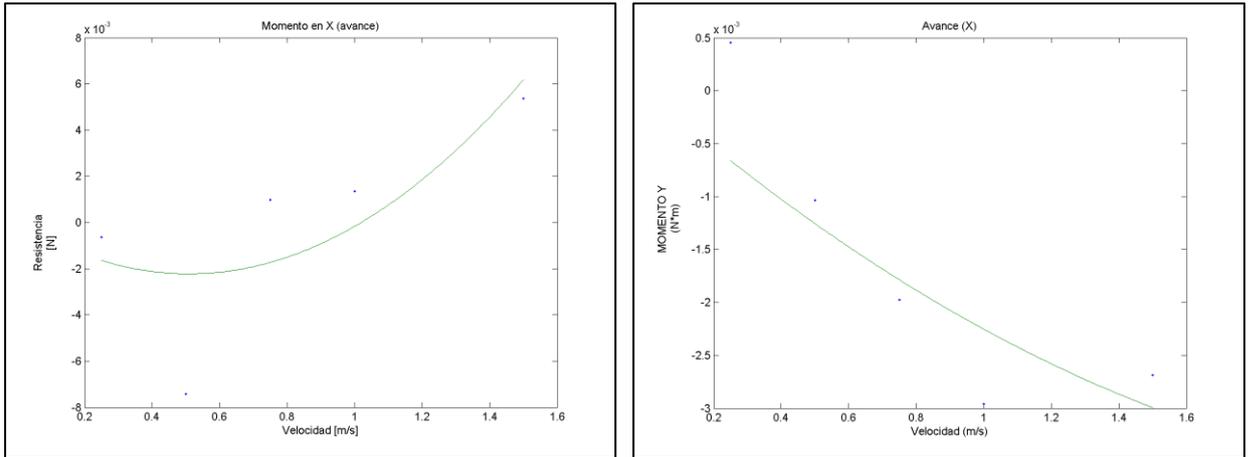


Fig. 61: Regresión momentos X e Y. Avance

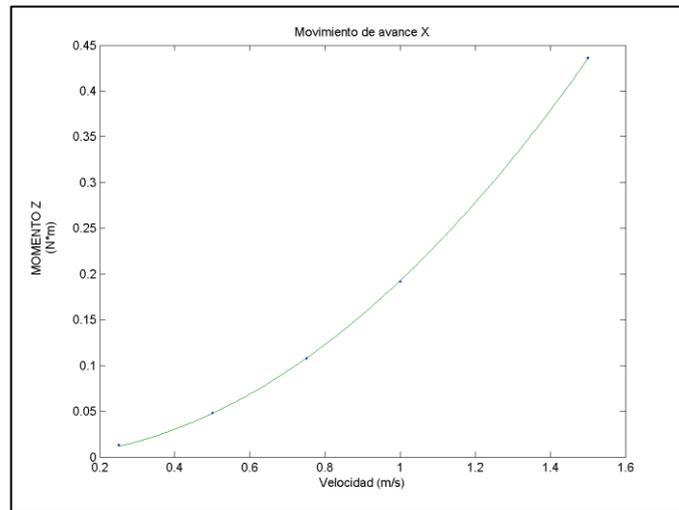


Fig. 62: Regresión precisa, momento Z. Avance

6.4.2.- Movimiento de retroceso.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	[N]	2,0755	0,0937	0,0023
GG Force (Y) 1	[N]	11,1908	0,0891	5,02E-04
GG Force (Z) 1	[N]	0,0777	0,0036	1,22E-04
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,0543	-0,0025	5,32E-05
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,013	-0,0013	1,00E-05
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,5118	0,005	1,18E-05

Tabla 29: Coeficientes de amortiguamiento. Retroceso

Al ser un movimiento similar al anterior, sólo que en sentido contrario, se representan las mismas gráficas que antes para comprobar que ocurre lo mismo.

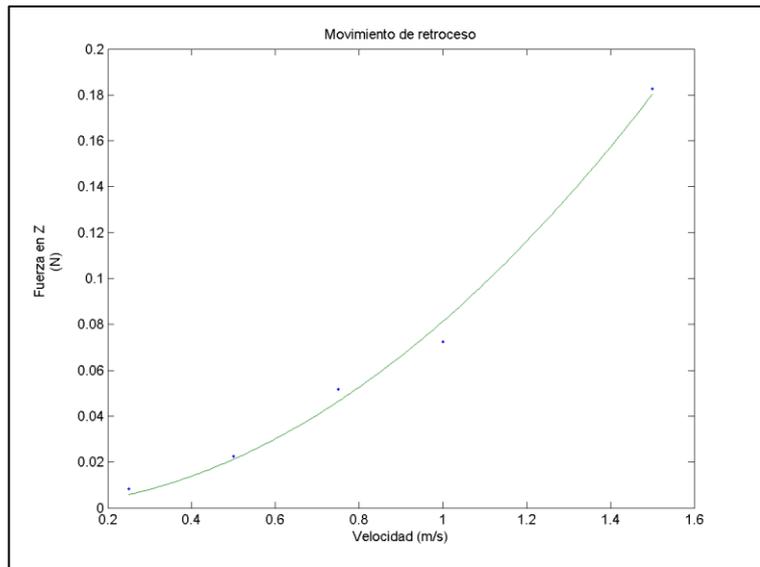


Fig. 63: Regresión fuerza lateral. Retroceso

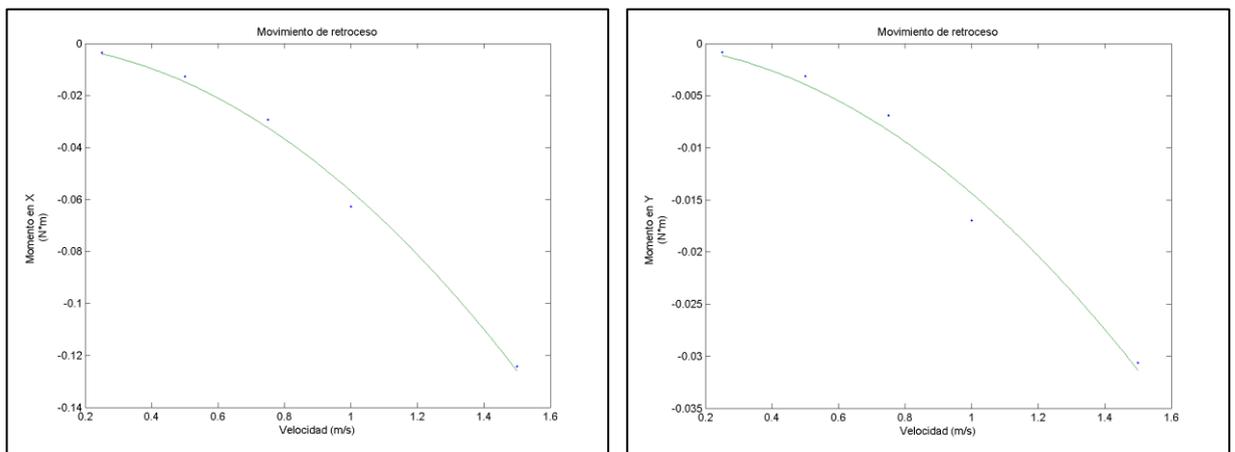


Fig. 64: Regresión momentos X e Y. Retroceso

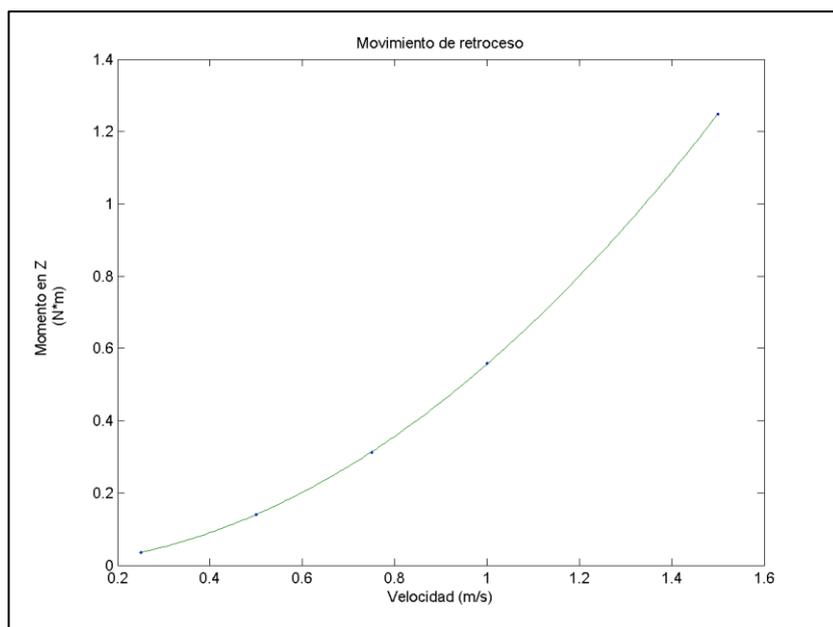


Fig. 65: Regresión precisa, momento Z. Retroceso

6.4.3.- Movimiento de descenso.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	[N]	17,5718	5,8357	6,2683
GG Force (Y) 1	[N]	8,0065	0,2737	0,0687
GG Force (Z) 1	[N]	0,0877	0,2832	0,019
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,0598	-0,0602	0,0019
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,0309	-0,0154	2,09E-04
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,36	0,1071	0,0246

Tabla 30: Coeficientes de amortiguamiento. Descenso

Aquí vuelve a ocurrir lo mismo que en los movimientos de avance y retroceso con las fuerzas laterales, y con los momentos de X, Y y Z.

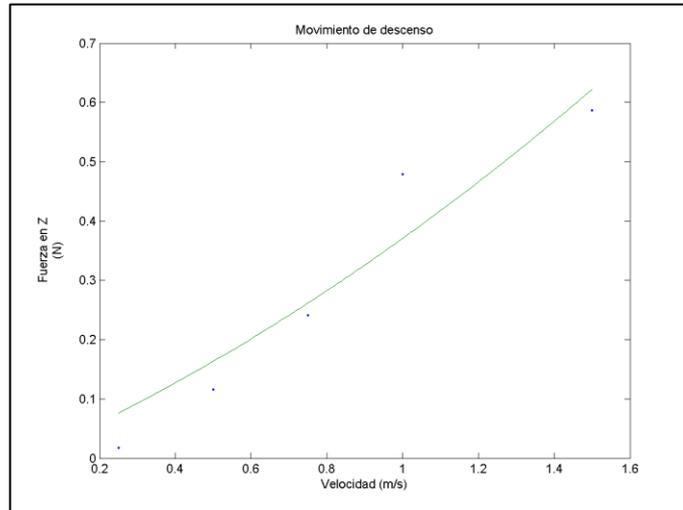


Fig. 66: Regresión fuerza lateral. Descenso

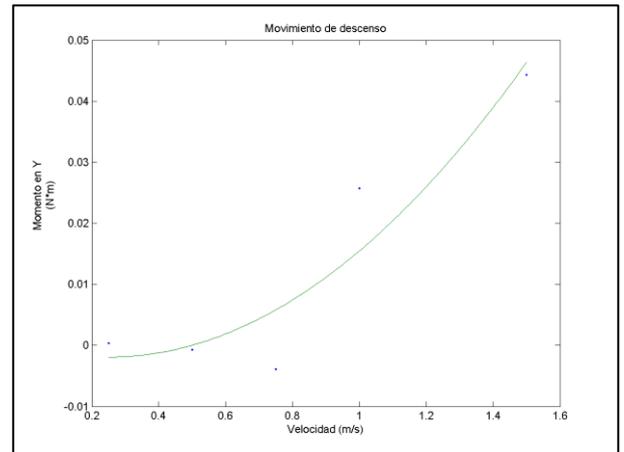
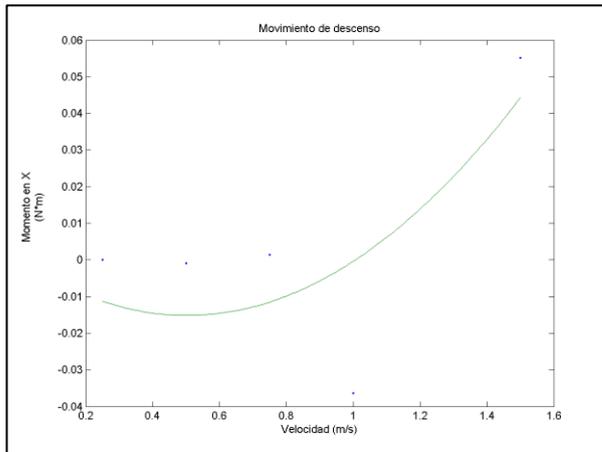


Fig. 67: Regresión momentos X e Y. Descenso

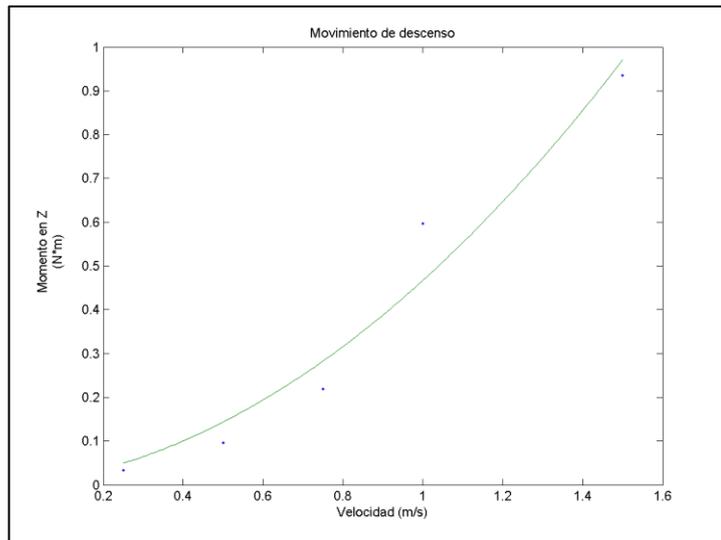


Fig. 68: Regresión precisa, momento Z. Descenso

6.4.4.- Movimiento de ascenso.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	[N]	-17,9462	-0,5473	0,0785
GG Force (Y) 1	[N]	2,2548	-0,4345	0,0257
GG Force (Z) 1	[N]	-0,483	0,1792	0,0015
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,0116	0,0032	1,62E-06
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,0047	-0,007	9,96E-06
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,5402	-0,0311	4,13E-04

Tabla 31: Coeficientes de amortiguamiento. Ascenso

Al ser un movimiento similar al anterior, sólo que en sentido contrario, se representan las mismas gráficas que antes para comprobar que ocurre lo mismo.

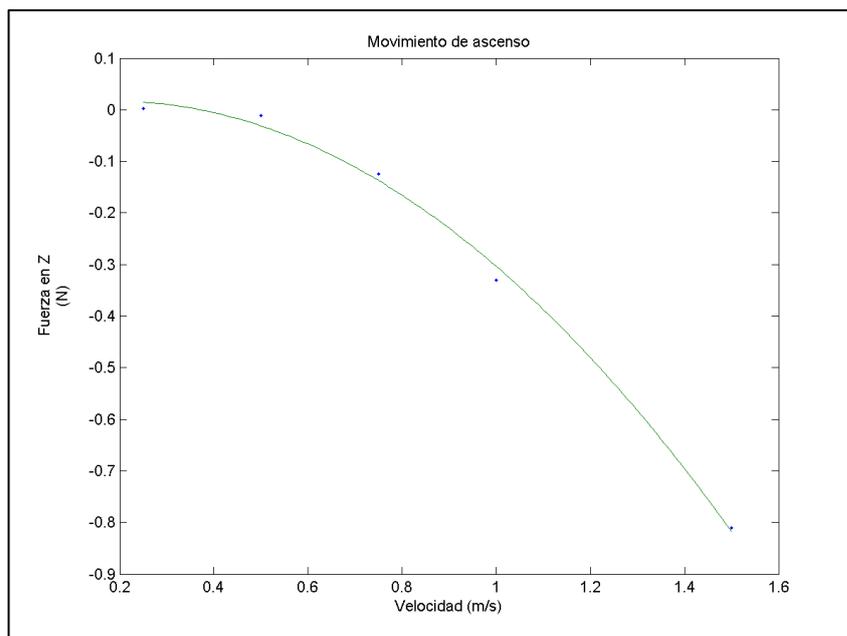


Fig. 69: Regresión fuerza lateral. Ascenso

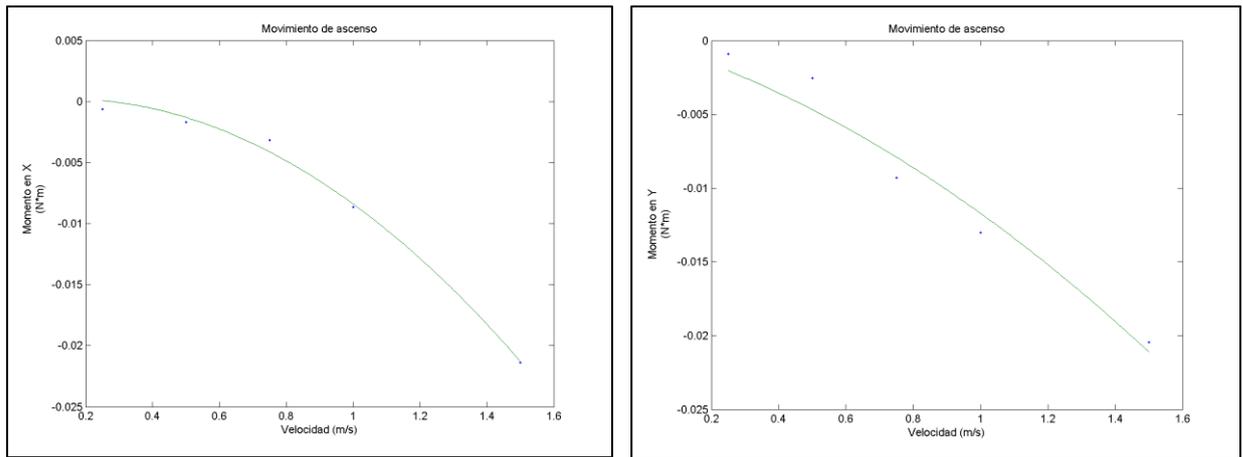


Fig. 70: Regresiones momentos X e Y. Ascenso

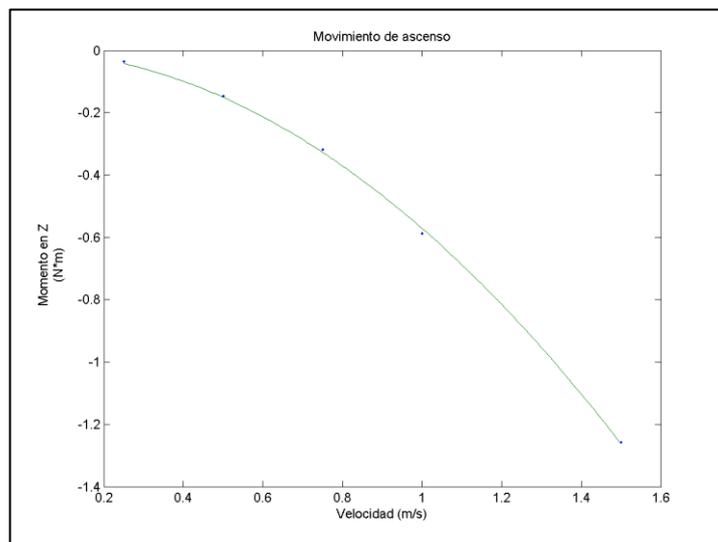


Fig. 71: Regresión precisa, momento Z. Ascenso

6.4.5.- Movimiento de babor y estribor.

En este caso, puesto que existe simetría, los valores que aparecen de fuerzas y momentos en ambos sentidos deberían ser iguales. Pero ya se ha visto que FlowSimulation siempre comete un pequeño error. Por lo que los coeficientes de amortiguamiento en estos dos casos deberían de ser los mismos. Lo que se ha hecho entonces es calcularlos al mismo tiempo, obteniendo la media ponderada entre babor y estribor.

Goal Name	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	1,6941	-0,3614	2,68E-02
GG Force (Y) 1	0,474	-0,1107	8,69E-04
GG Force (Z) 1	18,403	0,2024	5,90E-03
GG Torque (X) 1	-0,1893	-0,0043	4,95E-06
GG Torque (Y) 1	0,2569	-0,0092	2,35E-05
GG Torque (Z) 1	-0,0748	0,0189	8,87E-05

Tabla 32: Coeficientes de amortiguamiento. Babor y estribor

Para que se entienda mejor, se representan todas las gráficas de las regresiones calculadas donde se ven los pares de puntos asociados a cada sentido de flujo. Un apunte importante es que este movimiento está

restringido en el ROV, puesto que no es uno de los comandos posibles con los motores instalados. Pero se ha calculado como una simulación de posibles corrientes laterales que pueden aparecer en el mar. Por eso se les dan valores bajos a las velocidades de flujo. Los resultados de las fuerzas y momentos, excepto en la dirección del flujo, son números muy pequeños por lo que la regresión no es muy precisa.

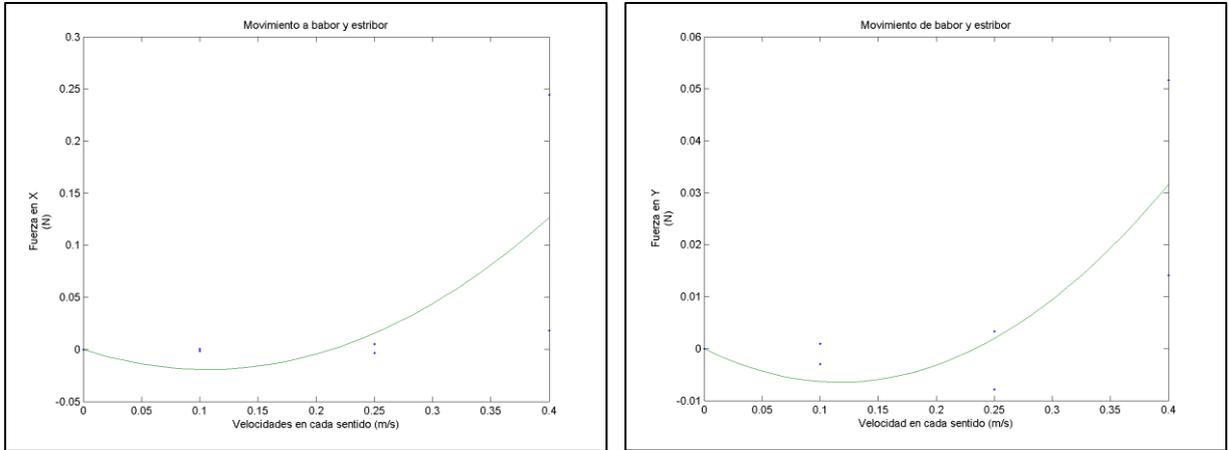


Fig. 72: Regresión fuerzas X e Y. Babor y estribor

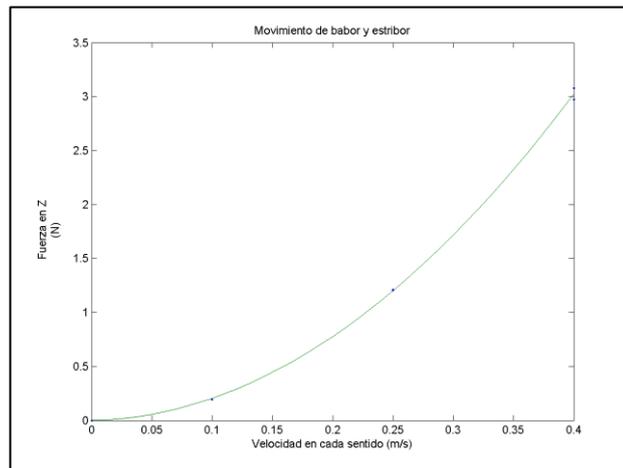


Fig. 73: Regresión fuerza lateral. Babor y estribor

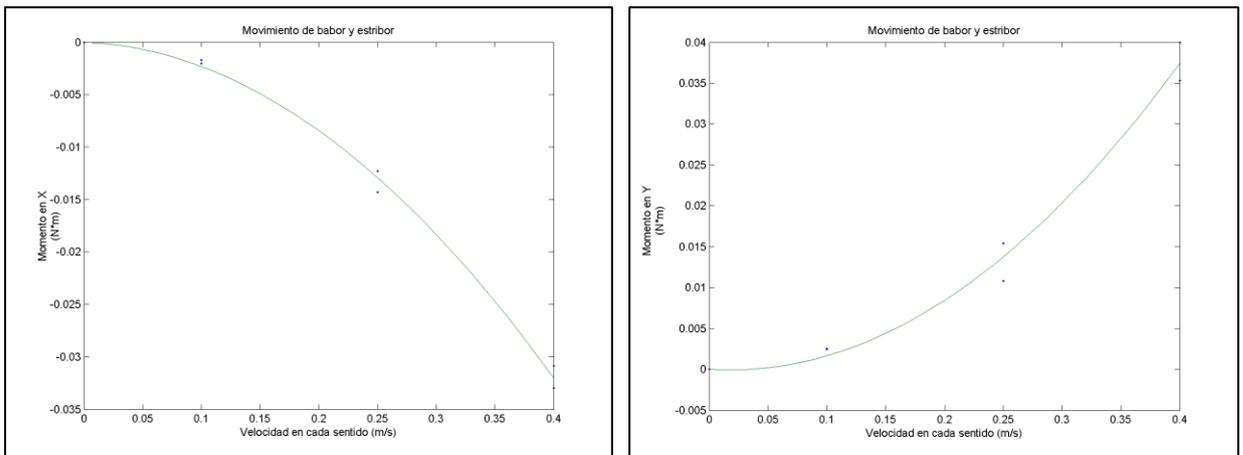


Fig. 74: Regresión momentos X e Y. Babor y estribor

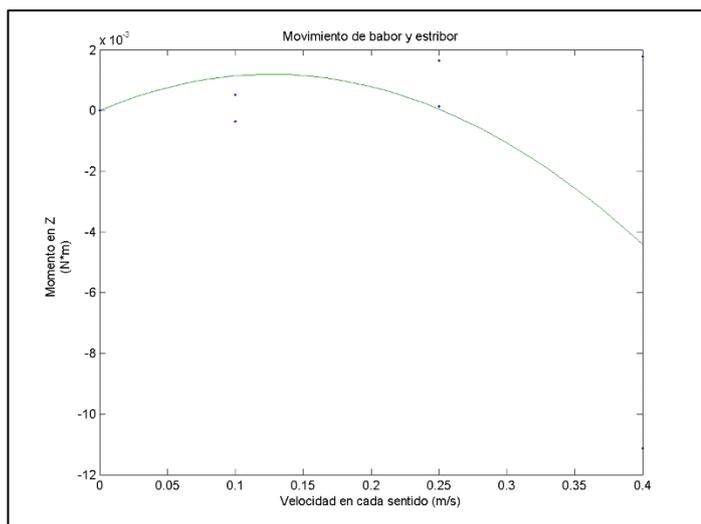


Fig. 75: Regresión momento Z. Babor y estribor

En las gráficas de la regresión de las fuerzas en X e Y, y también la de momento Z, se puede apreciar que la parábola tiene una parte negativa y otra positiva. Esto es fruto de que en este flujo a velocidades tan pequeñas, las fuerzas que aparecen en estas direcciones son muy próximas a 0 en cualquier caso, así es que FlowSimulation da un valor positivo y otro negativo repitiendo la simulación con los mismos datos. Esas fuerzas son las que producen el momento en Z, por lo que conlleva también a que tenga una parte positiva y otra negativa.

6.4.6.- Movimiento de guiñada.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	[N]	-0,0095	0,0109	6,47E-05
GG Force (Y) 1	[N]	-0,0522	0,0075	0,0038
GG Force (Z) 1	[N]	-0,2277	0,0357	0,0455
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,0714	-0,0081	0,005
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,0059	-0,0002	3,20E-05
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,0009	-0,0015	3,45E-06

Tabla 33: Coeficientes de amortiguamiento. Guiñada

Para este caso, no se ve necesario exponer las gráficas de las regresiones, ya que todas son precisas, y al ser un movimiento de rotación, no intervienen las condiciones de simetría. Aun así, están hechas y adjuntas en los archivos del ANEXO. Los valores reducidos de los coeficientes en el momento de Y y de Z son fruto de que las fuerzas que soporta el ROV en esas direcciones se compensan en cada lado.

6.4.7.- Movimiento de guiñada negativa.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	[N]	0,012	-0,065	0,5549
GG Force (Y) 1	[N]	-0,0589	0,0822	0,3081
GG Force (Z) 1	[N]	0,2398	0,0542	0,3877
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,0614	-0,0323	0,0394
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,0025	-0,0099	0,0038
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,001	-0,0044	0,0024

Tabla 34: Coeficientes de amortiguamiento. Guiñada negativa

Aparecen valores en rojo, quiere decir que no son fiables ya que en el momento de las simulaciones, FlowSimulation da un resultado negativo de la fuerza en X y el momento en Z para la velocidad de giro de 2π rad/s, mientras que para el resto de fuerzas y momentos si dan resultados del mismo signo que en el resto de velocidades. Aunque se repitió varias veces la simulación, no se subsanaba el error. Por lo que únicamente se ha dejado indicado.

Para una mejora del análisis de este error, se muestran las gráficas correspondientes a la regresión de esta fuerza y a la del momento en Z:

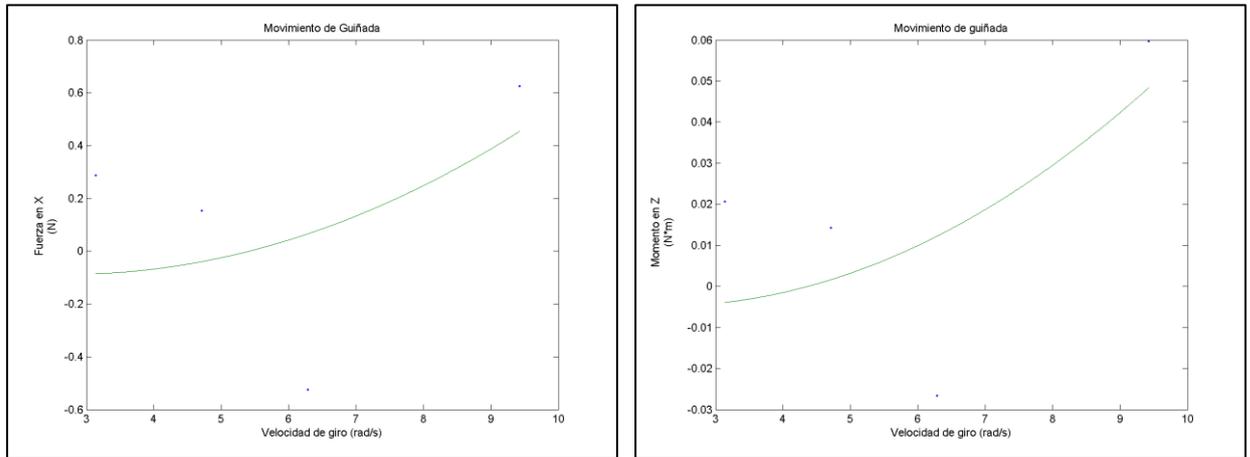


Fig. 76: Regresión errónea Fuerza X y Momento Z. Guiñada negativa

6.4.8.- Movimiento de cabeceo.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r^2
GG Force (X) 1	[N]	0,2417	0,0538	0,004
GG Force (Y) 1	[N]	0,0217	0,0143	6,04E-04
GG Force (Z) 1	[N]	0,0262	0,0358	0,0016
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,0002	-0,002	1,45E-06
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,0003	0,0027	1,94E-06
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,0346	0,0065	2,58E-05

Tabla 35: Coeficientes de amortiguamiento. Cabeceo

Para los momentos en X e Y, los coeficientes de amortiguamiento son muy pequeños, esto es debido a que en este caso deberían ser nulos, porque existe simetría respecto a estos ejes y las fuerzas que aparecen en las direcciones de X e Y a cada lado deberían ser iguales y no producir momentos. Pero son muy próximos a 0 y se pueden tomar como buenos.

Además, las regresiones parecen ser precisas aun siendo valores muy reducidos. Se muestran a continuación las gráficas para estos momentos:

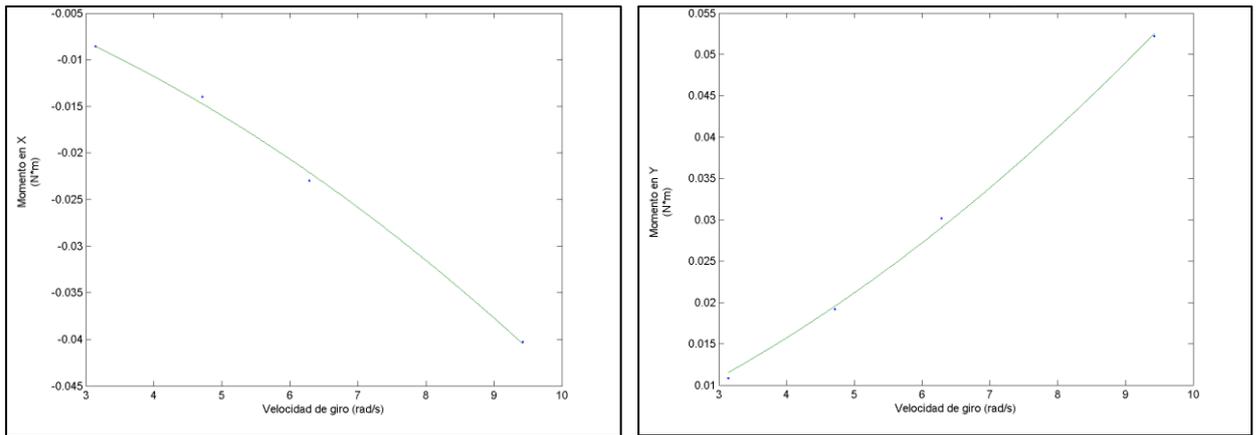


Fig. 77: Regresión momentos X e Y. Cabeceo

6.4.9.- Movimiento de cabeceo negativo.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	[N]	-0,2663	-0,0311	4,90E-04
GG Force (Y) 1	[N]	-0,1522	0,0099	8,44E-05
GG Force (Z) 1	[N]	0,0098	-0,0189	0,0014
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,0001449	-0,0002384	1,49E-06
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,0003863	-0,0008854	1,61E-06
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,0329	-0,0047	1,50E-05

Tabla 36: Coeficientes de amortiguamiento. Cabeceo negativo

Al ser un movimiento similar al anterior pero con el sentido de giro contrario, ocurre lo mismo para los momentos X e Y. Incluso en este caso se aprecia mejor que los momentos en X e Y son más próximos todavía a 0.

Una buena manera también de comprobar esto, a parte de las gráficas de las regresiones, es consultar los resultados de las fuerzas y momentos obtenidos de las simulaciones en el apartado 5.4.10. Esto es válido tanto para el cabeceo positivo como para el negativo.

Se representan las mismas gráficas para comprobarlo:

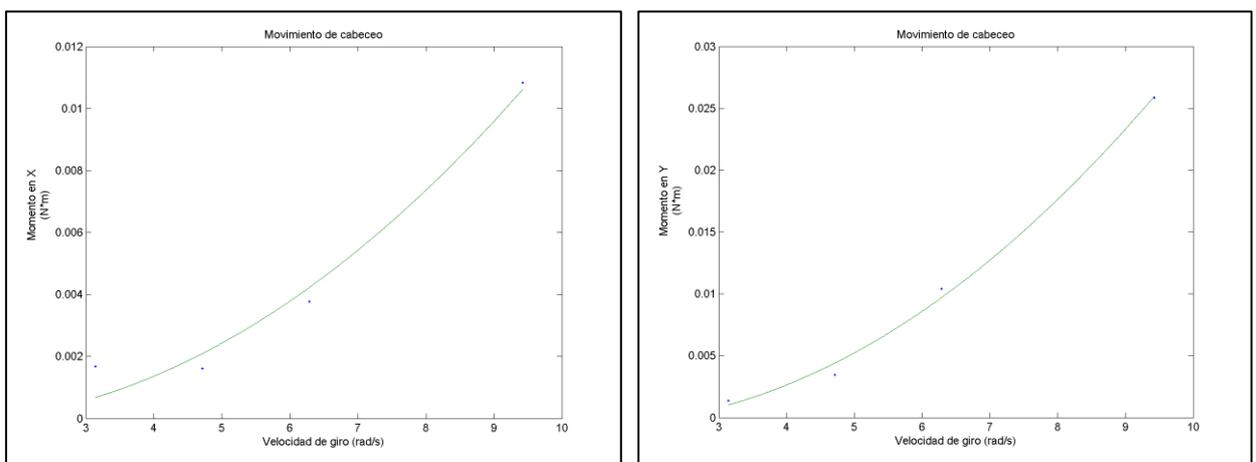


Fig. 78: Regresión momentos X e Y. Cabeceo negativo

6.4.10.- Movimiento de balance.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	[N]	0,0577	0,0022	0,000117
GG Force (Y) 1	[N]	0,0369	-0,0028	0,0495
GG Force (Z) 1	[N]	0,2011	-0,0008	0,2574
GG Torque (X) 1	[N*m]	0,0014	0,0002	0,0008
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,0297	0,0009	0,003
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,0009	0,0003	0,0067

Tabla 37: Coeficientes de amortiguamiento. Balance

Aunque se obtienen valores reducidos en los momentos X y Z, no es debido a que tengan que ser próximos a 0 porque en este caso no hay condiciones de simetría respecto a ningún eje por el tipo de giro que es. Son reducidos ya que las fuerzas a cada lado de los ejes se compensan unas a otras (son en sentido opuesto), y no provocan que el ROV soporte momentos de fuerza elevados.

Una buena muestra de ello es la gráfica correspondiente a la regresión del momento en Z, que tiene muy poco error desviación a pesar de que sean valores centesimales.

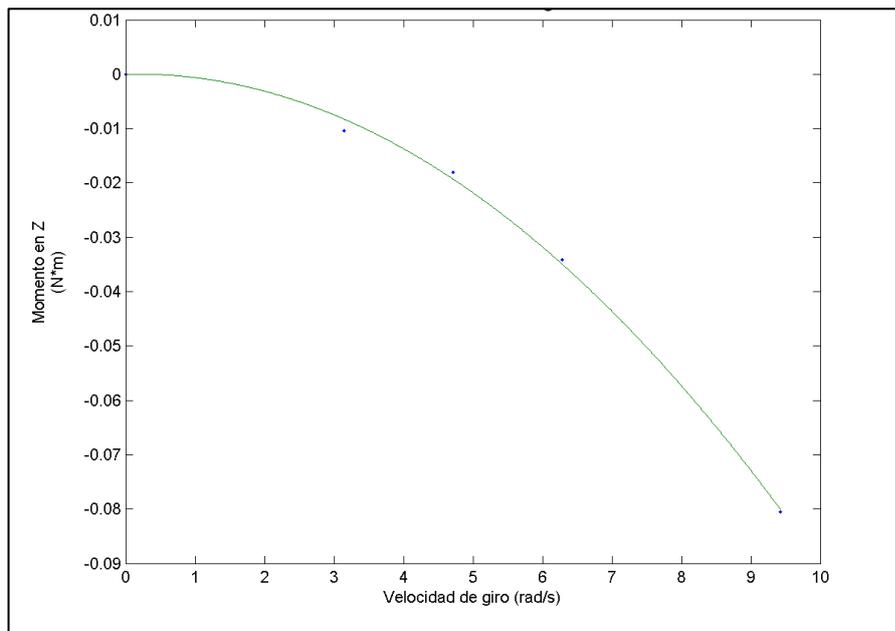


Fig. 79: Regresión momento en Z. Balance

6.4.11.- Movimiento de balance negativo.

Goal Name	Unit	Término Cuadrático	Término lineal	r ²
GG Force (X) 1	[N]	0,0281	0,0093	0,0032
GG Force (Y) 1	[N]	0,0309	-0,015	0,0005
GG Force (Z) 1	[N]	-0,1614	-0,0161	0,0112
GG Torque (X) 1	[N*m]	-0,004	0,0032	0,0001
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-0,028	-0,0069	0,0002
GG Torque (Z) 1	[N*m]	0,0015	-0,0053	0,0001

Tabla 38: Coeficientes de amortiguamiento. Balance negativo

Siendo este movimiento similar al anterior, vuelve a ocurrir lo mismo para los momentos en X y Z. Con la salvedad de que la regresión del momento Z tiene una desviación a velocidades bajas. Esto no es un error de cálculo ni de la simulación, es simplemente que la regresión es un cálculo aproximado, y siempre pueden aparecer pequeñas desviaciones. Se muestra a continuación:

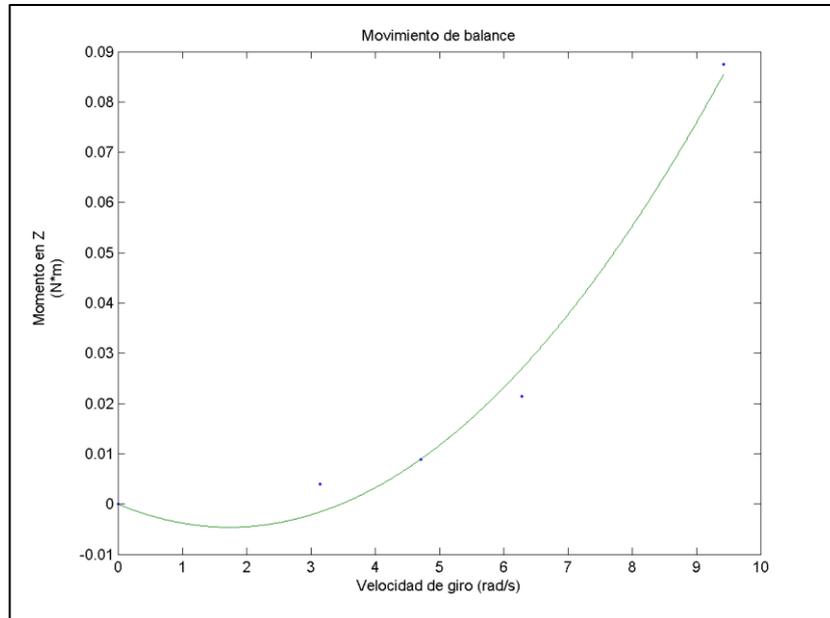


Fig. 80: Regresión momento en Z. Balance negativo

6.4.12.- Movimiento de flujo cruzado. Consideraciones iniciales.

Por un error de concepto, se calcularon los coeficientes cruzados mediante la regresión de las fuerzas y las velocidades de los movimientos cruzados, por lo que estos cálculos se rechazaron inmediatamente porque la regresión no es compatible con los movimientos cruzados. De todas maneras se mantuvieron indicados los resultados en el ANEXO.

Tal y como se ha explicado en el apartado 6.3, para el cálculo de coeficientes hidrodinámicos de amortiguamiento no se puede hacer con la regresión, ya que no depende sólo de las fuerzas y velocidades en una sola dirección, sino que es combinación de dos direcciones.

Por lo tanto, para calcular los coeficientes de amortiguamiento cruzados se utiliza la "Ecuación 2" que es la que se obtiene al despejar el término cruzado directamente de la ecuación de la fuerza hidrodinámica resultante del movimiento en dos direcciones. De esa ecuación se conocen todos los valores de las velocidades y sus coeficientes de amortiguamiento asociados a cada dirección de las fuerzas.

Con el uso de esta ecuación, lo que se obtiene es el coeficiente de amortiguamiento cruzado para cada fuerza y momento según la velocidad de las que se obtienen. Este coeficiente, teóricamente, debe ser constante independientemente del valor de la fuerza y de las velocidades con las que es calculado.

Por ejemplo: para el coeficiente de amortiguamiento cruzado asociado a la Fuerza X en la dirección de avance y descenso, puede utilizarse cualquiera de las fuerzas X calculadas en las simulaciones (se obtiene 1 por cada velocidad simulada, 5 en total), siempre y cuando se introduzcan en la ecuación los valores de la velocidad a la que se ha simulado, y los valores de los coeficientes obtenidos para esa fuerza en los movimientos unitarios. Y, teóricamente, deben coincidir los resultados de los cálculos para cada fuerza y velocidad.

Por lo tanto, pueden llegar a calcularse los coeficientes cruzados en base a 5 fuerzas distintas, y obtener 5 cálculos para el mismo coeficiente. Esto hace posible que pueda mejorarse el resultado final considerablemente.

Lo que se ha hecho es calcular cada coeficiente 5 veces para cada fuerza o momento y su velocidad correspondiente, y posteriormente, viendo que no coinciden exactamente por los pequeños errores que se acumulan inevitablemente en las simulaciones y las regresiones, obtener la media aritmética, teniendo en cuenta también la desviación típica para dar más información de la precisión de los resultados.

Esto también sirve para analizar cómo de precisos son los resultados en base a las simulaciones. Si uno de los 5 cálculos da un resultado muy desviado de la media, esto puede ayudar a identificarlo fácilmente y rechazarlo para el resultado final.

Para este tipo de movimientos, no se muestra ninguna gráfica puesto que no se han calculado regresiones lineales.

En primer lugar se utilizó esta ecuación para todas las fuerzas, dentro de cada uno de los movimientos. Pero según se explicó en el apartado 6.3., para las fuerzas cuya dirección coincide con una de las direcciones del movimiento cruzado, no puede utilizarse la "ecuación 2" únicamente. En los resultados que se van a ir mostrando se apreciará que para esas fuerzas se comete mucho error, por eso se utilizará el método de resolución del sistema de ecuaciones a partir de la "ecuación 1", que proporciona el valor final del coeficiente cruzado.

6.4.13.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y descenso.

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value	Media CFD cruzados	Desviación
Velocidad (Y)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5		
Velocidad (X)	0,25	0,5	0,75	1	1,5		
CFD Cruzados fuerza (X)	6,246289	-5,04974	-8,93989	-10,8108	-12,8618	-9,415552312	3,322133653
CFD Cruzados fuerza (Y)	4,805124	3,692723	3,248715	3,066392	2,834654	3,210621033	0,363330425
CFD Cruzados fuerza (Z)	0,968798	0,331295	0,154937	0,056844	0,001862	0,136234423	0,144634206
CFD Cruzados momento (X)	-0,18667	-0,09692	-0,06448	-0,04696	-0,03427	-0,060656804	0,027159775
CFD Cruzados momento (Y)	-0,11747	-0,09964	-0,0906	-0,08753	-0,08168	-0,089860576	0,007494847
CFD Cruzados momento (Z)	0,998604	0,78079	0,704821	0,665991	0,628501	0,695025869	0,065115258

Tabla 39: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Avance y descenso

Los datos de la primera columna están claramente desviados de la media. Por ejemplo para la fuerza X a la velocidad más baja se obtiene un valor positivo, mientras que para el resto de velocidades da uno negativo. Hay mucha dispersión entre ellos. Y también se repite esta desviación en las otras fuerzas y momentos para la misma velocidad, por lo que finalmente se rechazan los resultados de la primera columna. Esto se atribuye al error relativo que comete SolidWorks, el cual es demasiado elevado en los cálculos de fuerzas a velocidades reducidas.

Mirando también la columna de la desviación típica se puede ver que da un valor que es demasiado grande para los resultados obtenidos de la fuerza en X, por lo que se puede empezar a suponer que hay algún tipo de error teórico para este tipo de resolución de los coef. cruzados.

Revisando la teoría de las ecuaciones para este tipo de movimientos, se observa que, para las fuerzas cuya dirección se corresponda con una de las que conforman el movimiento, aparecen dos ecuaciones distintas para la misma incógnita (el coeficiente cruzado), así que se toma otro método más fiable de resolución. Es por esto por lo que se repetirán los cálculos para las fuerzas que cumplan estas condiciones, y se le aplicará la resolución del sistema de dos ecuaciones y una incógnita con MatLab, según se describe en el apartado 6.3.

6.4.14.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y ascenso.

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value		
Velocidad (Y)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	Media CFD cruzados	Desviación
Velocidad (X)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5		
CFD Cruzados fuerza(X)	-17,6797	-16,838	-16,8771	-16,9776	-17,1113	-16,95099606	0,12199698
CFD Cruzados fuerza (Y)	-8,05109	-6,41772	-5,93156	-5,43048	-4,94837	-5,682033251	0,633781516
CFD Cruzados fuerza (Z)	0,133906	-0,13094	-0,1723	-0,06643	-0,30567	-0,108285344	0,161230506
CFD Cruzados momento (X)	-0,12824	-0,10567	-0,10876	-0,12743	-0,11761	-0,114869276	0,009786495
CFD Cruzados momento (Y)	-0,09676	-0,07413	-0,0627	-0,06909	-0,05914	-0,06626524	0,006664475
CFD Cruzados momento (Z)	0,075882	0,157633	0,154942	0,181482	0,194393	0,172112542	0,019049707

Tabla 40: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Avance y ascenso

Aquí no se ha rechazado ningún valor ni tampoco se aprecian desviaciones muy elevadas. Puede ser que para la fuerza en Z haya algún error, pero como por condiciones de simetría este coeficiente debería ser nulo, con sólo aproximarse a 0 puede darse por válido.

6.4.15.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y babor.

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value		
Velocidad (Y)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	Media CFD cruzados	Desviación
Velocidad (Z)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5		
CFD Cruzados (X)	-4,96133	-4,38615	-4,26181	-4,18879	-4,29621	-4,418858503	0,311442942
CFD Cruzados (Y)	-8,71735	-8,10728	-7,86387	-7,74399	-7,63219	-8,012937013	0,431456775
CFD Cruzados (Z)	-52,1238	-52,5025	-52,6245	-52,6871	-52,8811	-52,56380701	0,28146393
CFD Cruzados momento (X)	-0,84091	-0,79983	-0,81809	-0,80445	-0,74953	-0,802561837	0,033672283
CFD Cruzados momento(Y)	-0,82815	-0,81568	-0,80489	-0,79143	-0,78759	-0,805548818	0,016848534
CFD Cruzados momento (Z)	0,406684	0,391393	0,363865	0,358764	0,368067	0,377754687	0,020434967

Tabla 41: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Avance y babor

En este movimiento puede verse fácilmente que el coeficiente de amortiguamiento cruzado debe permanecer constante sin verse afectado por la fuerza o momento y las velocidades con el que se calcula, obteniéndose valores bastante centrados y desviaciones de la media muy aceptables.

6.4.16.- Movimiento de flujo cruzado. Avance y estribor.

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value		
Velocidad (Y)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	Media CFD cruzados	Desviación
Velocidad (Z)	0,25	0,5	0,75	1	1,5		
CFD Cruzados (X)	1,132729	0,624473	0,457492	0,449654	0,448616	0,495058849	0,086367016
CFD Cruzados (Y)	7,854955	7,21222	6,982308	6,885726	6,791809	6,968015624	0,180425707
CFD Cruzados (Z)	-54,4561	-53,979	-53,8835	-53,8672	-53,7944	-53,88102959	0,075939944
CFD Cruzados momento(X)	-0,7541	-0,80774	-0,83372	-0,83784	-0,82075	-0,825013675	0,013623896
CFD Cruzados momento(Y)	-0,6746	-0,72708	-0,71125	-0,71378	-0,70823	-0,715086137	0,008312071
CFD Cruzados momento(Z)	-0,15224	-0,11161	-0,09504	-0,07853	-0,08912	-0,093575787	0,013828238

Tabla 42: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Avance y estribor

Se rechazan los resultados de la primera columna al estar desviados del resto de valores obtenidos para las demás velocidades, por la misma razón que en el apartado 6.4.13.

Es muy interesante comparar estos resultados, los cuales parecen ser bastante correctos, con los obtenidos en el movimiento de avance y babor, ya que deben coincidir, por lo menos en los coeficientes de la fuerza de mayor magnitud. Y excepto en la fuerza de dirección X (que no se corresponden con ninguna de las direcciones del movimiento y por condiciones de simetría ya se dijo que deberían ser nulas), estos números son muy similares, y puede hacer pensar que FlowSimulation es una herramienta fiable para este tipo de simulaciones.

6.4.17.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y descenso.

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value		
Velocidad (Y)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	Media CFD cruzados	Desviación
Velocidad (X)	0,25	0,5	0,75	1	1,5		
CFD Cruzados (X)	-13,8227	-3,19853	0,363232	2,181584	3,509116	0,713850122	2,909605276
CFD Cruzados (Y)	8,41971	9,617863	10,05582	10,25622	10,0643	9,998548969	0,270134989
CFD Cruzados (Z)	0,093845	0,532941	0,836304	0,813736	0,121129	0,576027318	0,333185977
CFD Cruzados momento(X)	0,173233	0,061824	0,026639	0,003573	0,015899	0,026983949	0,025066121
CFD Cruzados momento(Y)	0,151314	0,118159	0,110509	0,099618	0,057765	0,096512711	0,026928777
CFD Cruzados momento(Z)	0,971457	1,198687	1,273	1,314979	1,294519	1,270296219	0,050723304

Tabla 43: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Retroceso y descenso.

Se rechazan los resultados de la primera columna al estar desviados del resto de valores obtenidos para las demás velocidades, por la misma razón que en el apartado 6.4.13.

También se puede ver que ocurre lo mismo que en el apartado 6.4.13 con la desviación tan grande en la fuerza de dirección X. Por lo que deberá repetirse su cálculo con el otro método.

6.4.18.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y ascenso.

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value		
Velocidad (Y)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	Media CFD cruzados	Desviación
Velocidad (X)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5		
CFD Cruzados (X)	3,86348	2,451008	1,991064	1,752331	1,534384	1,932197016	0,392953208
CFD Cruzados (Y)	2,383789	1,446401	1,144236	1,028809	0,875604	1,123762786	0,241601439
CFD Cruzados (Z)	-1,38054	-1,09402	-0,95797	-0,84903	-0,76446	-0,916369169	0,142477078
CFD Cruzados momento(X)	-0,03707	-0,02617	-0,02444	-0,03545	-0,03211	-0,029541815	0,005125074
CFD Cruzados momento(Y)	-0,02752	-0,04333	-0,04754	-0,05385	-0,05232	-0,049258374	0,004781082
CFD Cruzados momento(Z)	1,570241	1,492429	1,469955	1,458375	1,448926	1,467421338	0,018759286

Tabla 44: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Retroceso y ascenso

Se rechazan los resultados de la primera columna al estar desviados del resto de valores obtenidos para las demás velocidades, por la misma razón que en el apartado 6.4.13.

6.4.19.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y babor.

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value		
Velocidad (Y)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	Media CFD cruzados	Desviación
Velocidad (Z)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5		
CFD Cruzados (X)	3,617926	3,025032	2,814232	2,626611	2,451594	2,907078983	0,451100189
CFD Cruzados (Y)	-5,30539	-5,37449	-5,48282	-5,50807	-5,56857	-5,447867091	0,106185955
CFD Cruzados (Z)	57,68251	58,48557	58,76366	58,8575	58,90514	58,53887466	0,505571078
CFD Cruzados momento(X)	-2,64125	-2,6721	-2,67834	-2,68231	-2,68246	-2,671292294	0,017310889
CFD Cruzados momento(Y)	0,74858	0,756859	0,74427	0,741818	0,737915	0,745888517	0,007251734
CFD Cruzados momento(Z)	-0,29854	-0,27935	-0,27217	-0,26835	-0,26545	-0,276773411	0,013236759

Tabla 45: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Retroceso y babor

En este movimiento también puede verse fácilmente que el coeficiente de amortiguamiento cruzado debe permanecer constante sin verse afectado por la fuerza o momento y las velocidades con el que se calcula, obteniéndose valores bastante centrados y desviaciones de la media muy aceptables.

6.4.20.- Movimiento de flujo cruzado. Retroceso y estribor.

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value		
Velocidad (Y)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	Media CFD cruzados	Desviación
Velocidad (Z)	0,25	0,5	0,75	1	1,5		
CFD Cruzados (X)	-0,04533	0,534833	0,382274	0,519811	0,490179	0,481774234	0,068878964
CFD Cruzados (Y)	6,043368	6,092301	6,299273	6,108232	6,21549	6,151732797	0,103682857
CFD Cruzados (Z)	59,1966	59,08971	58,91419	59,3143	59,23348	59,14965635	0,154415951
CFD Cruzados momento(X)	-2,55954	-2,57902	-2,594	-2,60601	-2,6013	-2,587971027	0,018891485
CFD Cruzados momento(Y)	0,763202	0,797458	0,820426	0,824072	0,836739	0,808379352	0,028965238
CFD Cruzados momento(Z)	0,128349	0,104833	0,111712	0,107538	0,096759	0,109838275	0,011700054

Tabla 46: Coeficientes de amortiguamiento cruzados. Retroceso y estribor

Como ocurría en el avance, es muy interesante comparar estos resultados, los cuales parecen ser bastante correctos, con los obtenidos en el movimiento de retroceso y babor, ya que deben coincidir, por lo menos en los coeficientes de la fuerza de mayor magnitud. Y excepto en la fuerza de dirección X (que no se corresponden con ninguna de las direcciones del movimiento y por condiciones de simetría ya se dijo que deberían ser nulas), estos números son muy similares, y puede hacer pensar que FlowSimulation es una herramienta fiable para este tipo de simulaciones.

6.5.- Análisis de resultados y corrección de datos erróneos.

Casi todos los resultados antes expuestos se pueden dar por válidos, como se indican en los comentarios hechos tras cada tabla con los coeficientes calculados.

Pero como se ha dicho también, hay que repetir algunos cálculos para los coeficientes de las fuerzas cuya dirección coincida con una de las direcciones del movimiento cruzado, mediante el método de resolución del sistema de ecuaciones mediante matlab.

Por lo que a continuación se van a mostrar las tablas con los términos "B" bajo cada una de las velocidades, necesarios para las ecuaciones, y el coeficiente cruzado para cada fuerza obtenido de la correlación lineal entre los valores de fuerza y velocidad.

- Avance y ascenso (direcciones X e Y).

Goal Name	Value (B)	Value	Value	Value	Value	Coeficiente cruzado
Velocidad (Y)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	
Velocidad (X)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	
CFD Cruzados (X)	-1,1049784	-4,20948902	-9,49336222	-16,9776317	-38,5004432	-21,8596
CFD Cruzados (Y)	-0,5031934	-1,60443028	-3,33650276	-5,43047772	-11,1338408	-6,573

Tabla 47: Coeficientes cruzados con MatLab. Avance y ascenso

- Avance y descenso (direcciones X e Y).

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value	Coeficiente cruzado
Velocidad (Y)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	
Velocidad (X)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	
CFD Cruzados (X)	-0,39039309	1,26243524	5,02868859	10,8108074	28,9389826	15,4666
CFD Cruzados (Y)	-0,30032024	-0,92318079	-1,82740234	-3,06639179	-6,37797127	-3,7418

Tabla 48: Coeficientes cruzados con MatLab. Avance y descenso

- Avance y babor (direcciones Z e Y).

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value	Coeficiente cruzado
Velocidad (Y)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	
Velocidad (Z)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	
CFD Cruzados (Y)	-0,54483452	-2,02681932	-4,42342748	-7,74399303	-17,1724306	-9,8333
CFD Cruzados (Z)	-3,25774058	-13,125613	-29,6012863	-52,6871412	-118,982438	-67,6564

Tabla 49: Coeficientes cruzados con MatLab. Avance y babor

- Avance y estribor (direcciones Z e Y).

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value	Coeficiente cruzado
Velocidad (Y)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	
Velocidad (Z)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	
CFD Cruzados (Y)	-1,41708472	-5,64285492	-12,6684984	-22,5153255	-50,6509705	-28,838
CFD Cruzados (Z)	3,40398238	13,4901536	30,2942501	53,8357744	120,957041	68,8917

Tabla 50: Coeficientes cruzados con MatLab. Avance y estribor

Si lo comparamos con el de babor, puede verse que para la fuerza de mayor magnitud, se obtiene un coeficiente similar.

- Retroceso y descenso (direcciones X e Y).

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value	Coeficiente cruzado
Velocidad (Y)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	
Velocidad (X)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	
CFD Cruzados (X)	-0,86391699	-0,79963269	0,20431789	2,18158383	7,89551009	3,7601
CFD Cruzados (Y)	0,52623189	2,40446563	5,65639714	10,2562196	22,6446674	12,9319

Tabla 51: Coeficientes cruzados con MatLab. Retroceso y descenso

- Retroceso y ascenso (direcciones X e Y).

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value	Coeficiente cruzado
Velocidad (Y)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	
Velocidad (X)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	
CFD Cruzados (X)	-0,24146749	-0,612752	-1,11997361	-1,75233147	-3,45236491	-2,0775
CFD Cruzados (Y)	-0,1489868	-0,36160035	-0,64363293	-1,02880939	-1,97010905	-1,1947

Tabla 52: Coeficientes cruzados con MatLab. Retroceso y ascenso

- Retroceso y babor (direcciones Z e Y).

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value	Coeficiente cruzado
Velocidad (Y)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	
Velocidad (Z)	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,5	
CFD Cruzados (Y)	0,33158661	1,34362172	3,0840846	5,50807222	12,5292906	7,1064
CFD Cruzados (Z)	-3,60515661	-14,6213925	-33,0545581	-58,8575015	-132,536559	-75,4193

Tabla 53: Coeficientes cruzados con MatLab. Retroceso y babor

- Retroceso y estribor (direcciones Z e Y).

Goal Name	Value	Value	Value	Value	Value	Coeficiente cruzado
Velocidad (Y)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	
Velocidad (Z)	0,25	0,5	0,75	1	1,5	
CFD Cruzados (Y)	0,3777105	1,52307518	3,54334111	6,10823214	13,9848527	7,9381
CFD Cruzados (Z)	3,69978751	14,772427	33,1392313	59,3143007	133,275338	75,8644

Tabla 54: Coeficientes cruzados con MatLab. Retroceso y estribor

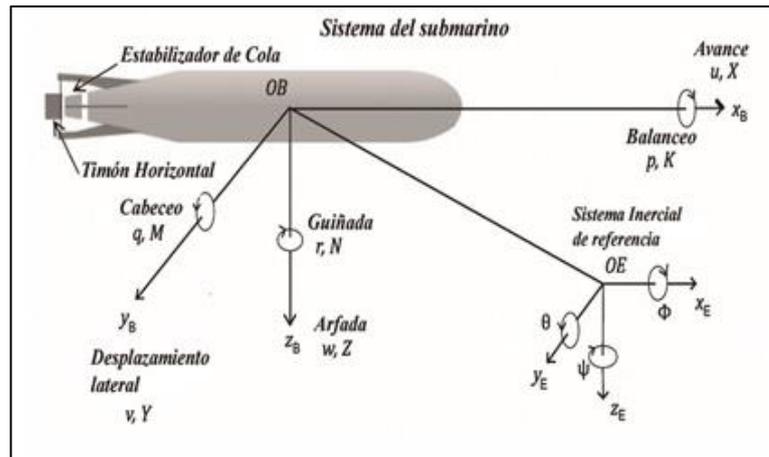
En este caso se ve claramente que para babor y estribor combinados con el retroceso, los coeficientes cruzados son muy similares, que es lo que se esperaba teóricamente. Este es un resultado que nos confirma que el método utilizado es fiable.

6.6.- Resultados finales con nomenclatura correspondiente al sistema de coordenadas de referencia correcto.

A continuación se muestra una tabla resumen con todos los resultados obtenidos, pero con la nomenclatura correspondiente al sistema de coordenadas que se utiliza en vehículos submarinos, para recordarlo se vuelve a mostrar este sistema de coordenadas.

La nomenclatura es la que se ha indicado en la tabla 26 de la página 60.

Grados de Libertad	de Movimientos	Fuerzas y Momentos	Velocidades lineales y angulares	Posiciones y ángulos de Euler
1	Avance	X	U	x
2	Deriva	Y	V	y
3	Arfada	Z	W	z
4	Balance	K	P	\emptyset
5	Cabeceo	M	Q	θ
6	Guiñada	N	R	ψ



MOVIMIENTO DE AVANCE (X)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_U (LINEAL)	-0,1352	(Kg/s)
X_{UU} (CUADRÁTICO)	-7,95	(Kg/m)
Y_U	-0,0065	(Kg/s)
Y_{UU}	-0,0222	(Kg/m)
Z_U	0,1528	(Kg/s)
Z_{UU}	2,8709	(Kg/m)
K_U	-0,0028	(Kg*m/s)
K_{UU}	0,0005	(Kg)
M_U	-0,002	(Kg*m/s)
M_{UU}	0,1948	(Kg)
N_U	0,0087	(Kg*m/s)
N_{UU}	-0,0086	(Kg)

MOVIMIENTO DE RETROCESO (X)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_U (LINEAL)	0,0891	(Kg/s)
X_{UU} (CUADRÁTICO)	11,1908	(Kg/m)
Y_U	0,0036	(Kg/s)
Y_{UU}	0,0777	(Kg/m)
Z_U	-0,0973	(Kg/s)
Z_{UU}	-2,0755	(Kg/m)
K_U	-0,0013	(Kg*m/s)
K_{UU}	-0,013	(Kg)
M_U	0,005	(Kg*m/s)
M_{UU}	0,5118	(Kg)
N_U	0,0025	(Kg*m/s)
N_{UU}	0,0543	(Kg)

MOVIMIENTO DE DESCENSO (Z POSITIVO)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_W (LINEAL)	0,2737	(Kg/s)
X_{WW} (CUADRÁTICO)	8,0065	(Kg/m)
Y_W	0,2832	(Kg/s)
Y_{WW}	0,0877	(Kg/m)

Z_W	-5,8357	(Kg/s)
Z_{WW}	-17,5718	(Kg/m)
K_W	-0,0154	(Kg*m/s)
K_{WW}	0,0309	(Kg)
M_W	0,1071	(Kg*m/s)
M_{WW}	0,36	(Kg)
N_W	0,0602	(Kg*m/s)
N_{WW}	-0,0598	(Kg)

MOVIMIENTO DE ASCENSO (Z)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_W (LINEAL)	-0,4345	(Kg/s)
X_{WW} (CUADRÁTICO)	2,2548	(Kg/m)
Y_W	0,1792	(Kg/s)
Y_{WW}	-0,483	(Kg/m)
Z_W	0,5473	(Kg/s)
Z_{WW}	17,9462	(Kg/m)
K_W	-0,007	(Kg*m/s)
K_{WW}	-0,0047	(Kg)
M_W	-0,0311	(Kg*m/s)
M_{WW}	-0,5402	(Kg)
N_W	-0,0032	(Kg*m/s)
N_{WW}	0,0116	(Kg)

MOVIMIENTO DE ESTRIBOR/BABOR (Y)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_V (LINEAL)	-0,1107	(Kg/s)
X_{VV} (CUADRÁTICO)	0,474	(Kg/m)
Y_V	0,2024	(Kg/s)
Y_{VV}	18,403	(Kg/m)
Z_V	0,3614	(Kg/s)
Z_{VV}	-1,6941	(Kg/m)
K_V	-0,0092	(Kg*m/s)
K_{VV}	0,2569	(Kg)
M_V	0,0189	(Kg*m/s)
M_{VV}	-0,0748	(Kg)
N_V	0,0043	(Kg*m/s)
N_{VV}	-0,1893	(Kg)

MOVIMIENTO DE AVANCE Y DESCENSO (XZ)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_{UW}	-3,7418	(Kg/m)
Y_{UW}	0,1362	(Kg/m)
Z_{UW}	-15,4666	(Kg/m)
K_{UW}	-0,0898	(Kg)
M_{UW}	0,695	(Kg)
N_{UW}	0,0607	(Kg)

MOVIMIENTO DE AVANCE Y ASCENSO (XZ)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_{UW}	-3,7418	(Kg/m)
Y_{UW}	-0,1083	(Kg/m)
Z_{UW}	21,8596	(Kg/m)
K_{UW}	-0,0663	(Kg)
M_{UW}	0,17211	(Kg)
N_{UW}	0,1149	(Kg)

MOVIMIENTO DE AVANCE Y BABOR (XY)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_{UV}	-9,8333	(Kg/m)
Y_{UV}	67,6564	(Kg/m)
Z_{UV}	4,4189	(Kg/m)
K_{UV}	-0,8055	(Kg)
M_{UV}	0,3778	(Kg)
N_{UV}	0,8026	(Kg)

MOVIMIENTO DE AVANCE Y ESTRIBOR (XY)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_{UV}	-28,838	(Kg/m)
Y_{UV}	-68,8917	(Kg/m)
Z_{UV}	-0,4951	(Kg/m)
K_{UV}	-0,7151	(Kg)
M_{UV}	-0,0935	(Kg)
N_{UV}	0,8250	(Kg)

MOVIMIENTO DE RETROCESO Y DESCENSO (XZ)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_{UW}	12,9319	(Kg/m)
Y_{UW}	0,5760	(Kg/m)
Z_{UW}	-3,7601	(Kg/m)
K_{UW}	0,0965	(Kg)
M_{UW}	1,2702	(Kg)
N_{UW}	-0,0269	(Kg)

MOVIMIENTO DE RETROCESO Y ASCENSO (XZ)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_{UW}	-1,9417	(Kg/m)
Y_{UW}	-0,9163	(Kg/m)
Z_{UW}	-2,0775	(Kg/m)
K_{UW}	-0,0492	(Kg)
M_{UW}	1,4674	(Kg)
N_{UW}	0,0295	(Kg)

MOVIMIENTO DE RETROCESO Y BABOR (XY)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_{UV}	7,1064	(Kg/m)
Y_{UV}	75,4193	(Kg/m)
Z_{UV}	-2,9070	(Kg/m)

K_{UV}	0,7458	(Kg)
M_{UV}	-0,2767	(Kg)
N_{UV}	2,6712	(Kg)

MOVIMIENTO DE RETROCESO Y ESTRIBOR (XY)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_{UV}	7,9381	(Kg/m)
Y_{UV}	-75,8644	(Kg/m)
Z_{UV}	-0,4817	(Kg/m)
K_{UV}	0,8083	(Kg)
M_{UV}	0,1098	(Kg)
N_{UV}	2,5879	(Kg)

MOVIMIENTO DE GUIÑADA (N)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_R (LINEAL)	0,0075	(Kg/s)
X_{RR} (CUADRÁTICO)	-0,0522	(Kg/m)
Y_R	0,0357	(Kg/s)
Y_{RR}	-0,2277	(Kg/m)
Z_R	0,0109	(Kg/s)
Z_{RR}	0,0095	(Kg/m)
K_R	-0,0002	(Kg*m/s)
K_{RR}	0,0059	(Kg)
M_R	-0,0015	(Kg*m/s)
M_{RR}	-0,0009	(Kg)
N_R	0,0081	(Kg*m/s)
N_{RR}	-0,0714	(Kg)

MOVIMIENTO DE GUIÑADA NEGATIVA (N)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_R (LINEAL)	0,0822	(Kg/s)
X_{RR} (CUADRÁTICO)	-0,0589	(Kg/m)
Y_R	0,0542	(Kg/s)
Y_{RR}	0,2398	(Kg/m)
Z_R	0,065	(Kg/s)
Z_{RR}	-0,012	(Kg/m)
K_R	-0,0099	(Kg*m/s)
K_{RR}	-0,0025	(Kg)
M_R	-0,0044	(Kg*m/s)
M_{RR}	0,0001	(Kg)
N_R	0,0323	(Kg*m/s)
N_{RR}	0,0614	(Kg)

MOVIMIENTO DE CABECEO (M)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
X_Q (LINEAL)	0,0143	(Kg/s)
X_{QQ} (CUADRÁTICO)	0,2417	(Kg/m)
Y_Q	0,0358	(Kg/s)
Y_{QQ}	0,0262	(Kg/m)
Z_Q	-0,0538	(Kg/s)
Z_{QQ}	-0,2417	(Kg/m)

K_Q	0,0027	(Kg*m/s)
K_{QQ}	0,0003	(Kg)
M_Q	0,0065	(Kg*m/s)
M_{QQ}	0,0346	(Kg)
N_Q	0,0027	(Kg*m/s)
N_{QQ}	0,0002	(Kg)
MOVIMIENTO DE CABECEO NEGATIVO (M)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
$X_{Q(LINEAL)}$	0,0099	(Kg/s)
$X_{QQ(CUADRÁTICO)}$	-0,1522	(Kg/m)
Y_Q	-0,0189	(Kg/s)
Y_{QQ}	0,0098	(Kg/m)
Z_Q	0,0311	(Kg/s)
Z_{QQ}	0,2663	(Kg/m)
K_Q	-0,0008854	(Kg*m/s)
K_{QQ}	0,0003863	(Kg)
M_Q	-0,0047	(Kg*m/s)
M_{QQ}	-0,0329	(Kg)
N_Q	0,0002384	(Kg*m/s)
N_{QQ}	-0,0001449	(Kg)

MOVIMIENTO DE BALANCE (K)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
$X_P(LINEAL)$	-0,0028	(Kg/s)
$X_{PP(CUADRÁTICO)}$	0,0369	(Kg/m)
Y_P	-0,0008	(Kg/s)
Y_{PP}	0,2011	(Kg/m)
Z_P	-0,0022	(Kg/s)
Z_{PP}	-0,0577	(Kg/m)
K_P	0,0009	(Kg*m/s)
K_{PP}	0,0297	(Kg)
M_P	0,0003	(Kg*m/s)
M_{PP}	-0,0009	(Kg)
N_P	-0,0002	(Kg*m/s)
N_{PP}	-0,0014	(Kg)
MOVIMIENTO DE BALANCE NEGATIVO (K)		
COEFICIENTE	CFD	UNIDADES
$X_P(LINEAL)$	-0,015	(Kg/s)
$X_{PP(CUADRÁTICO)}$	0,0309	(Kg/m)
Y_P	-0,0161	(Kg/s)
Y_{PP}	-0,1614	(Kg/m)
Z_P	-0,0093	(Kg/s)
Z_{PP}	-0,0281	(Kg/m)
K_P	-0,0069	(Kg*m/s)
K_{PP}	-0,028	(Kg)
M_P	-0,0053	(Kg*m/s)
M_{PP}	0,0015	(Kg)
N_P	-0,0032	(Kg*m/s)
N_{PP}	0,004	(Kg)

7.- MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ROV

En este último apartado se va a proceder al cálculo de las propiedades físicas más importantes necesarias para poder simular el movimiento del ROV en un entorno virtual. Estas propiedades, además, mejoran la documentación de las características del ROV que se tienen, y serán muy útiles para la continuación de este proyecto en cualquiera de las ramas posibles que se abren a partir de aquí.

El modelo en 3D hecho en SolidWorks puede proporcionarnos unos valores aproximados de estas propiedades, pero al no incluir en el modelo los materiales de los que están hechas las piezas que conforman el ensamblaje, se ha visto la necesidad de obtener la masa y los momentos de inercia a partir de ensayos reales.

7.1.- Medida del volumen y masa.

Para medir el volumen que desplazaría el ROV en el agua, se tienen en cuenta los espesores de todas las piezas del ensamblaje, cuyos valores sí proporciona SolidWorks correctamente. Pero el programa no tiene en cuenta el volumen que encierran algunas piezas cilíndricas, como son los casos de los tubos de baterías, el tubo de electrónica, y los motores. Por eso se modifican estas piezas de manera que sean macizas, y así SolidWorks tiene en cuenta también el espesor correspondiente al volumen encerrado.

Para ello se procede de la siguiente manera:

1. Se miden en el programa los volúmenes de las piezas que encierran volumen con la herramienta “propiedades físicas”, anotando el resultado.
2. Se modifican las piezas en cuestión, haciendo que sean macizas para tener en cuenta el volumen interior.
3. Se vuelven a medir en el programa y se anota el nuevo volumen de las piezas macizas.
4. Se calcula la diferencia entre los volúmenes de las piezas macizas y las huecas. Esta diferencia es la que habrá que sumar al volumen calculado por SolidWorks del ensamblaje completo, donde sí tiene en cuenta los espesores de las piezas que encierran volumen. Es decir, esta diferencia es el valor del volumen que encierran las piezas huecas.
5. Finalmente se calcula en SolidWorks el volumen del ensamblaje completo y se le suman las medidas de los volúmenes que encierran las piezas huecas.

El resultado final, con las medidas correspondientes se adjunta en la siguiente tabla:

Elemento	mm ³	Volumen añadido	xNº piezas
Electronics tube (hueco)	323910,77		
Electronics tube	1462659,57	1138748,8	1138748,8
Battery Tube (hueco)	87964,59		
Battery Tube (2 piezas)	201061,93	113097,34	226194,68
Motores (hueco)	8015,96		
Motores (con electroimanes)	10537,89		
Motor (3 piezas)	11323,29	3307,33	9921,99
Volumen total a añadir			1374865,47
Ensamblaje total (con huecos)	1177479,08		
Ensamblaje total añadiendo huecos	2552344,55	2,55234455 m³	

Tabla 55: Medida del volumen del ROV

La masa del ROV se ha obtenido simplemente pesándolo en una báscula electrónica. El peso del ROV, con todas las piezas y elementos montados es de → **Masa ROV = 2,505 Kg.**

7.2.- Medida de los momentos de inercia en los tres ejes de giro.

SolidWorks no está capacitado para calcular estas propiedades si no se le han incluido los materiales de los que está hecho el modelo. Por lo que directamente se han calculado mediante ensayos en el laboratorio del departamento de ingeniería mecánica de la ETSII.

7.2.1.- Metodología e instrumentación

Se ha montado un dispositivo formado por una placa metálica plana y rígida, atornillada a una varilla también rígida, y todo sobre una plancha de acero que hará de contrapeso para mantener todo el dispositivo fijo. Sobre el cual se coloca el ROV centrado sobre su centro de masas.



Fig. 81: Dispositivo y medidor de vibraciones

Después se hará vibrar el dispositivo de manera que el ROV, debido a su inercia, creará una oscilación determinada sobre el dispositivo. Al medir esta vibración (frecuencia), podemos usar la medida para calcular el momento de inercia respecto el eje trasversal a la placa atornillada, y paralelo a la varilla.

Para medir la frecuencia de la vibración, se usará un medidor de vibraciones disponible en el laboratorio, pegando el imán del acelerómetro a la placa de acero donde se coloca el ROV.



Fig. 82: Acelerómetro colocado y medida de la vibración

7.2.2.- Descripción de las medidas

La toma de datos se basa en que sean suficientes para resolver las siguientes ecuaciones que intervienen en el ensayo:

$W_n = \text{frecuencia natural} = \sqrt{\frac{K_\theta}{I}}$	$I = \text{momento de inercia} = \frac{K_\theta}{W_n^2}$	$K_\theta = \text{Coef. a torsión} = W_n^2 * I$
---	--	---

Y se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se hace vibrar el sistema con el ROV sobre él. Se anota el número de oscilaciones producidas y la diferencia de tiempo entre el primer y el último pico positivo de vibración (en milisegundos), se divide este tiempo entre el número de oscilaciones. Este es el periodo de vibración.
2. Con este dato se pasa el resultado a frecuencia en hercios.
3. Se vuelve a hacer vibrar el sistema con el ROV dos veces más, con el objetivo de tener varias medidas y después sacar la media de ellas. Esto nos proporciona una medida más precisa.
4. Se repite el proceso pero sin el ROV montado, para saber qué inercia debemos restarle a la medida anterior.
5. Se vuelve a repetir sin el sargento que sujeta el ROV al dispositivo, para conocer también qué inercia aporta el sargento.
6. Finalmente se repite el proceso pero con un disco de inercia, del cual conocemos el momento de inercia, para poder calcular el coeficiente de resistencia a la torsión (K) de la varilla.
7. Con todas las medidas obtenidas, se procede al cálculo del momento de inercia del ROV.
8. Se gira el ROV para calcular el momento de inercia respecto los otros dos ejes principales, y se repite el procedimiento.

Todas las medidas y los cálculos, así como las ecuaciones empleadas, está todo adjunto en el ANEXO en una hoja de Excel, disponible para su consulta y utilización en futuros proyectos.

A continuación se muestra el cálculo del momento de inercia respecto del eje vertical a modo de ejemplo:

MOMENTO DE INERCIA						
Respecto eje Vertical						
Nº Medida	Tipo de medida	Elemento a medir	Medida tiempo 1	Medida tiempo 2	Medida W _n (Hz)	Nº Ciclos
4	Por picos de frecuencia y número de ciclos	ROV	3828	144,5	2,714809285	10
5	Por picos de frecuencia y número de ciclos	ROV	3844	910,2	2,726838912	8
	Resultado final (MEDIA)	ROV			2,720824098	
1	Por picos de frecuencia y número de ciclos	Sistema sin ROV	3453	441,4	4,648691725	14
2	Por picos de frecuencia y número de ciclos	Sistema sin ROV	3563	835,9	4,766968575	13
3	Por picos de frecuencia y número de ciclos	Sistema sin ROV	3793	1887	4,721930745	9
	Resultado final (MEDIA)	Sistema sin ROV			4,712530348	
1	Por picos de frecuencia y número de ciclos	Eje con disco	3934	109,4	7,321027036	28

2	Por picos de frecuencia y número de ciclos	Eje con disco	3934	515,6	7,313362977	25
3	Por picos de frecuencia y número de ciclos	Eje con disco	2332	312,5	6,932409012	14
Resultado final (MEDIA)		Eje con disco			7,188933008	
1	Por picos de frecuencia y número de ciclos	Eje sin disco	1977	85,94	11,63368693	22
2	Por picos de frecuencia y número de ciclos	Eje sin disco	3547	1645	11,56677182	22
3	Por picos de frecuencia y número de ciclos	Eje sin disco	3949	60	11,57109797	45
Resultado final (MEDIA)		Eje sin disco			11,5905189	

Tabla 56: Ejemplo medidas de frecuencia de vibración

➔ Para la ecuación de momento de inercia se necesitarán las medidas en rad/s, por lo que se multiplican los resultados por 2π .

	W_n (rad/s)
ROV	17,095442
Sistema sin ROV	29,60970144
Eje con disco (W_{nds})	45,16939825
Eje sin disco (W_{ns})	72,82537809

Tabla 57: Frecuencias en rad/s

En primer lugar se calcula el momento de inercia del disco de inercia, del que se conocen los radios exterior e interior, y su masa: $I_d = \frac{1}{2} masa * (Radio_{ext}^2 + Radio_{int}^2)$

Masa del Disco	2,234
Radio exterior	50,075
Radio interior	11
Momento de inercia disco (I_d)	2936,040783

Tabla 58: Cálculo momento de inercia disco

A partir de todos los datos obtenidos se puede resolver el siguiente sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas (en negro), que son el momento de inercia del sistema sin ROV y el de la rigidez de la varilla (ambas en rojo). Con la constante de rigidez se pueden calcular posteriormente los momentos de inercia para cada frecuencia obtenida anteriormente (fórmula de momento de inercia), y finalmente restarle a la asociada al sistema con el ROV la del sistema sin ROV, calculando el momento de inercia del ROV finalmente.

$K_\theta = W_{ns}^2 * I_s$ $K_\theta = W_{nds}^2 * (I_d + I_s)$ $W_{ns}^2 * I_s = W_{nds}^2 * (I_d + I_s)$ $I_s = \frac{W_{nds}^2 * I_d}{W_{ns}^2 - W_{nds}^2}$	$I \text{ sistema con ROV} = I_{ROV} + I_{ssR}$ $I \text{ sistema con ROV} = \frac{K_\theta}{W_{nROV}^2}$ $I_{ROV} = \frac{K_\theta}{W_{nROV}^2} - I_{ssR}$
--	---

Fig. 83: Sistema de ecuaciones. Fórmula momento de inercia ROV

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los momentos de inercia asociados a cada tipo de medida y su nomenclatura. Estos resultados son los que se utilizan en la segunda ecuación, en la que al momento de inercia del sistema con el ROV se le asigna la frecuencia de vibración del ROV.

Para cada cálculo se utilizan las medidas de frecuencia en radianes por segundo anteriormente calculadas.

Rigidez a torsión (varilla)	Sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas	9735636,684	K_{θ}
Momento de inercia sistema	Resolviendo el sistema (sin sargento ni ROV)	1835,687973	I_s
Momento de inercia sin ROV	Con la ecuación de momento de inercia (con sargento)	11104,43079	I_{SSR}
Momento de inercia del sistema con ROV	Con la ecuación de momento de inercia	33312,2288	$Kg*m^2$
Momento de inercia del ROV	Resolviendo la ecuación	22207,79801	0,022207798

Tabla 59: Coeficiente de rigidez y momentos de inercia. Momento de inercia del ROV

7.2.3.- Resultados

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Momento de inercia respecto el eje vertical → $I_{zz} = 0,022207798 \text{ Kg}*m^2$
 Momento de inercia respecto el eje transversal → $I_{yy} = 0,013899 \text{ Kg}*m^2$
 Momento de inercia respecto el eje longitudinal → $I_{xx} = 0,019448416 \text{ Kg}*m^2$

8.- CONCLUSIONES

En este último apartado se muestran las conclusiones más importantes de lo que se ha realizado en este proyecto, analizando los resultados obtenidos en las simulaciones y en los cálculos. Además también se exponen los apartados descritos en el plan de trabajo que no se han llegado a realizar por su extenso desarrollo, dejándolos como posibles proyectos futuros.

A modo de resumen, en este proyecto se ha llevado a cabo lo siguiente:

- ✓ Se ha realizado la construcción de un pequeño vehículo submarino comercial, llamado OPENROV 2.8, desarrollado por la empresa californiana OPENROV, y adquirido por la escuela para desarrollo de ingeniería. En la construcción se ha documentado todo lo que se ha ido haciendo, y todos los errores que han aparecido se han podido corregir debidamente.
- ✓ Se ha incluido una unidad de medición inercial (IMU), necesaria para la toma de medidas en ensayos reales del ROV. Para lo que fue necesaria su construcción y adecuación del Software para su correcto funcionamiento.
- ✓ Se ha mejorado el dispositivo de control de pilotaje del ROV, con la inclusión de un Joystick.
- ✓ Se ha realizado un ensayo en la realidad, en el que se probó el ROV en un medio acuático, sumergiéndolo a pequeñas profundidades, y donde se confirmó el correcto funcionamiento del vehículo submarino y, por lo tanto, también la construcción adecuada del ROV.
- ✓ El ROV, junto a todas sus partes externas, está preparado y puesto a punto para futuras inmersiones en el medio acuático.
- ✓ También está puesto a punto para futuras investigaciones sobre cómo afectan las fuerzas hidrodinámicas que aparecen en los vehículos submarinos, cuando llevan una velocidad determinada.
- ✓ Se han modelizado computacionalmente en 3D mediante SolidWorks todas y cada una de las piezas que conforman el ROV, así como también el ensamblaje completo. Para ello: se transformaron los planos 2D de las dimensiones de las piezas suministradas por OPENROV, y se tomaron medidas de las piezas de las que la empresa no suministraba los planos de sus dimensiones.
- ✓ Con el modelo creado, y utilizando la herramienta FlowSimulation incluida en el programa de SolidWorks, se han realizado las simulaciones necesarias para la obtención de las fuerzas y momentos que aparecen como fruto del movimiento de una geometría en el seno de un fluido. Estas simulaciones se llevaron a cabo según se describe en el TFG del compañero José Antonio Ruiz, en el que se describen los pasos más importantes a seguir.
- ✓ Las simulaciones se han realizado según los flujos equivalentes a los movimientos posibles del ROV.
- ✓ Para estas simulaciones, con carácter previo se establecieron cuáles eran el ensamblaje y el mallado más adecuados para las simulaciones, teniendo en cuenta la precisión y los tiempos de las simulaciones.
- ✓ Durante el desarrollo de cada simulación, se han ido anotando los tiempos de simulación, y también según iban apareciendo, se han corregido los errores que se cometían, como por ejemplo el sistema de referencia mal escogido.
- ✓ Se han repetido algunas simulaciones las veces necesarias para obtener resultados coherentes con la teoría.
- ✓ Debido a que el ensamblaje tiene un sistema de coordenadas automático sobre el que se referencia, los movimientos y las fuerzas están referenciadas sobre un sistema distinto al que se usa en los movimientos submarinos. Todo ello está documentado correctamente para evitar confusiones en futuras consultas.
- ✓ Finalizadas las simulaciones, se llevó a cabo un análisis completo de los resultados obtenidos.

- ✓ Se han mostrado en esta memoria todos los resultados de cada simulación y la descripción detallada de cómo se han calculado en todos los movimientos estudiados.
- ✓ Se ha creado un programa de cálculo en MatLab en el que se calcula la regresión lineal en base a los pares de puntos fuerza/velocidad o momento/velocidad, donde se obtienen dos términos, uno cuadrático y otro lineal, que son los coeficientes de amortiguamiento.
- ✓ En el cálculo también se muestran los errores cometidos en cada regresión, lo que ha sido utilizado para el análisis de los resultados obtenidos.
- ✓ Con las fuerzas y momentos obtenidos de las simulaciones, y con la regresión en MatLab, se han obtenido los coeficientes de amortiguamiento correspondientes a cada fuerza y momento que aparecen en cada uno de los movimientos simulados en FlowSimulation.
- ✓ En base a todos los resultados proporcionados por MatLab, se han representado gráficamente las regresiones lineales más significativas tanto en cuanto a que muestran el grado de precisión de las regresiones.
- ✓ Se ha realizado un análisis detallado de los resultados obtenidos en el cálculo de los coeficientes de amortiguamiento para los movimientos en una sola dirección o sentido de giro.
- ✓ Para los movimientos cruzados, se han desarrollado dos tipos de método de cálculo.
- ✓ En un primer lugar se han calculado todos los coeficientes de amortiguamiento para flujos cruzados utilizando la ecuación correspondiente y los datos obtenidos anteriormente, sacando la media ponderada de todos ellos para un resultado más preciso.
- ✓ Con el fin de mejorar aún más la precisión de los cálculos de los coeficientes cruzados, para alguna de las fuerzas se han calculado sus coeficientes de amortiguamiento con MatLab, mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineal de dos ecuaciones y una incógnita.
- ✓ Durante el desarrollo de todos los cálculos, se han ido realizando análisis de los resultados, y se han corregido los errores detectados.
- ✓ Se ha calculado mediante SolidWorks el volumen de agua que desplazaría el ROV.
- ✓ Se han obtenido los momentos de inercia mediante ensayos en el laboratorio.

Según los resultados obtenidos se pueden sacar algunas conclusiones:

- ✓ El ROV funciona correctamente, pero su manejo no es óptimo, ya que presenta algunas desviaciones en su dirección.
- ✓ El diseño es bastante mejorable. El método para sellar las partes que no se pueden mojar puede decirse que es poco “elegante”, desde el punto de vista de la ingeniería, aunque sigue siendo efectivo.
- ✓ La IMU presenta una desviación en su nivel 0 de balance y cabeceo, lo cual debe tenerse en cuenta en futuros ensayos. Este nivel es muy fácil de detectar, por lo que no supone un problema grave. La manera de corregirlo es a través de la manipulación del código Software del ROV, ya que no es posible modificar el montaje donde se produce la desviación.
- ✓ En base a los resultados obtenidos de las simulaciones, se aprecia que SolidWorks puede ser una herramienta fiable para este tipo de análisis, ya que, en la mayoría de los casos, los cálculos son precisos y coherentes con la teoría de la mecánica de fluidos.
- ✓ Los valores y operaciones erróneas se han podido detectar y rechazar gracias a un proceso de cálculo encadenado.

Partes que no se han podido alcanzar en este proyecto, debido a su gran extensión, y futuros desarrollos de este proyecto:

- Simulación de movimiento del modelo 3D del ROV en un entorno virtual. Esto facilitará la visualización de cómo afectan las fuerzas hidrodinámicas al movimiento del ROV. Para esta simulación eran necesarias 3 cosas: el modelo, los coeficientes de amortiguamiento, y las propiedades físicas más importantes del ROV. Todo ello se ha obtenido y estará disponible para quien lleve a cabo esta rama de estudio.

- Desarrollo del programa de control de pilotaje automático del ROV. Esta es una parte más enfocada a ingenieros electrónicos, o incluso para la rama de telecomunicaciones/telemática.
- Corrección de la desviación de la IMU.
- Mejora en el diseño del ROV, haciendo hincapié en el método de sellamiento de la parte electrónica (cambiar el tapón de la jeringuilla).
- Análisis de la fiabilidad del programa SolidWorks, haciendo un estudio similar del modelo del ROV con otro programa más preciso como puede ser ANSYS, y comparar los resultados.
- Comparar lo obtenido en el entorno virtual con lo que se obtenga en los ensayos reales, y mejorar el programa de control de pilotaje automático.

9.- BIBLIOGRAFÍA

[1] RUIZ RUIZ, JOSÉ ANTONIO. Cálculo de coeficientes hidrodinámicos de UUVs mediante CFDs. Trabajo fin de grado, Grado en tecnologías industriales. Escuela técnica superior de ingenieros industriales, 2016.

[2] Hoerner Sighard F. Fluid Dynamic Drag. Published by autor, 1965, pp 25-26-43

[3] Hoerner Sighard F. and Borst Henry V. Fluid Dynamic Lift. Published by autor, second edition, 1985, pp 30-31-99.

[5] OPENROV, guías de construcción:
<https://openrov.dozuki.com/>

[6] OPENROV, foro de ayuda:
<https://forum.openrov.com/>