

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD
PARA UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO REMOTAMENTE OPERADO

Autores:

ANDRÉS FELIPE ALDANA AFANADOR

HELIO SNEYDER ESTEBAN VILLEGAS

MODELADO Y SIMULACIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BUCARAMAGA

2018

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD PARA
UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO REMOTAMENTE OPERADO

Autores:

ANDRÉS FELIPE ALDANA AFANADOR

HELIO SNEYDER ESTEBAN VILLEGAS

MODELADO Y SIMULACIÓN

Director: SEBASTIAN ROA PRADA, PhD

Codirector: HERNANDO GONZÁLEZ ACEVEDO, MsC

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BUCARAMAGA

2018

Nota de aceptación

Sebastián Roa Prada

Director de proyecto

Hernando González Acevedo

Codirector de proyecto

Camilo Enrique Moncada Guayazan

Evaluador

Sergio Andrés Ardila Gómez

Evaluador

Bucaramanga, 2018

CONTENIDOS

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 14 |
| 2. OBJETIVOS | 17 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL | 17 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 17 |
| 3 JUSTIFICACIÓN | 18 |
| 4. ANTECEDENTES | 21 |
| 5. ESTADO DEL ARTE..... | 22 |
| 5.1. MODELADO..... | 22 |
| 5.2. DISEÑO DE ROV Y SIMULACIÓN CFD..... | 24 |
| 5.3. DISEÑO DE CONTROLADORES | 25 |
| 5.4 MODELO DE CORDÓN UMBILICAL..... | 27 |
| 6. MARCO TEÓRICO | 29 |
| 6.1. COMPONENTES FÍSICOS DE UN ROV..... | 29 |
| 6.1.1. SISTEMA DE PROPULSIÓN..... | 29 |
| 6.1.2. SENSORES | 32 |
| 6.1.3. SISTEMA DE ILUMINACIÓN..... | 37 |
| 6.2. CLASIFICACIONES DE UN ROV | 39 |
| 6.2.1. SEGÚN SU ALIMENTACIÓN | 40 |
| 6.2.2. SEGÚN SU USO..... | 41 |
| 6.3. OPENROV..... | 46 |
| 6.3.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS..... | 46 |
| 6.3.2. APLICACIONES ACTUALES..... | 47 |
| 6.4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL | 48 |
| 6.4.1. MODELOS DE TURBULENCIA | 49 |
| 6.4.2. MODELOS RANS | 50 |
| 6.4.3. ENMALLADO | 52 |
| 6.5. ANÁLISIS MATEMÁTICO DE UN ROV | 54 |
| 6.5.1. FLOTABILIDAD..... | 54 |
| 6.5.2. ESTABILIDAD | 55 |

| | |
|---|-----|
| 6.5.3. CINÉTICA DE UN ROV | 57 |
| 6.6. CONTROL DE UN ROV | 59 |
| 6.6.1. CONTROLADOR DE MODO DESLIZANTE | 60 |
| 6.6.2. CONTROLADOR LINEAL CUADRÁTICO | 62 |
| 7. METODOLOGÍA..... | 65 |
| 7.1. PLAN DE PRUEBAS..... | 65 |
| 7.1.1. PRUEBAS PARA VALIDACIÓN DE MODELO..... | 66 |
| 7.1.2. PRUEBAS PARA VALIDACIÓN DE CONTROLADORES | 67 |
| 8. RESULTADOS ESPERADOS..... | 68 |
| 9. CRONOGRAMA..... | 69 |
| 10. PRESUPUESTO..... | 71 |
| 11. ENSAMBLE DEL PROTOTIPO..... | 72 |
| 12. SIMULACIONES CFD | 77 |
| 12.1. SIMPLIFICACIÓN DE LA GEOMETRIA..... | 77 |
| 12.2. DEFINICIÓN DEL DOMINIO Y CONDICIONES DE FRONTERA..... | 79 |
| 12.3. ENMALLADO DEL DOMINIO Y COMPUTO | 82 |
| 12.4. POST PROCESAMIENTO | 87 |
| 13. MODELADO DEL ROV | 94 |
| 13.1 FUERZAS EXTERNAS | 95 |
| 13.2 FUERZA DEL CORDÓN UMBILICAL | 101 |
| 13.3 MODELO DE LOS ACTUADORES | 109 |
| 13.4 TEORÍA DE MANIOBRABILIDAD | 114 |
| 14. CONTROL DEL ROV | 116 |
| 15. RESULTADOS | 123 |
| 16. CONCLUSIONES | 128 |
| 16.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ENSAMBLAJE..... | 128 |
| 16.2 CONCLUSIONES SOBRE EL DESARROLLO DE LAS SIMULACIONES CFD..... | 128 |
| 16.3 CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO..... | 129 |
| 16.4 CONCLUSIONES SOBRE EL CONTROL..... | 130 |
| 17. BIBLIOGRAFÍA..... | 131 |

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** Producción petrolera en Colombia de 2014 a 2016 con pronóstico de Campetrol
- Figura 2** Propulsor con motor Brushless
- Figura 3** Controlador de velocidad para un motor Brushless
- Figura 4** Esquema de un sistema de propulsión hidráulico
- Figura 5** Propulsor hidráulico
- Figura 6** Cámara con mecanismo de rotación
- Figura 7** Modelo generalizado de un acelerómetro
- Figura 8** Acelerómetro capacitivo observado con un microscopio
- Figura 9** Circuito de procesamiento de la señal para un giroscopio
- Figura 10** Vista transversal de un sensor de presión y foto de este
- Figura 11** Ejemplo de LCROV
- Figura 12** Ejemplo de un ROV pequeño
- Figura 13** Ejemplo de un ROV ultra profundos
- Figura 14** Ejemplo de un ROV gama media
- Figura 15** Ejemplo de un ROV alta capacidad eléctrica
- Figura 16** Ejemplo de un ROV de trabajo junto con un TMS de tipo sombrero y su Sistema de lanzamiento y recuperación
- Figura 17** Ejemplo de un ROV de arrastre
- Figura 18** Vista isométrica del OpenROV versión 2.8
- Figura 19** Distribución mundial de las expediciones con OpenROV

Figura 20 Diagrama que muestra las ciencias tras el túnel de viento numérico

Figura 21 Diferencias entre cada uno de los modelos de turbulencia y sus grados de desarrollo

Figura 22 Generación del mosaico de Dirichlet y al mismo tiempo la triangulación de Delaunay

Figura 23 Explicación del fenómeno de flotación

Figura 24 Distintos estados de cuerpos sumergidos

Figura 25 Estabilidad para un cuerpo sumergido

Figura 26 Aparición del momento de restitución

Figura 27 Pesos ubicados en la parte baja para aumentar estabilidad

Figura 28 Grados de libertad de un vehículo acuático con sus respectivos ejes coordenados

Figura 29 Definición de la superficie deslizante de un control de modo deslizante

Figura 30 Esquema de control de un modo deslizante de un controlador lineal cuadrático

Figura 31 Plan de pruebas para validación del modelo

Figura 32 Plan de pruebas para validación de controladores

Figura 33 Primera parte del cronograma

Figura 34 Segunda parte del cronograma

Figura 35 Tercera parte del cronograma

Figura 36 Cuarta parte del cronograma

Figura 37 Estructura base de acrílico

Figura 38 Tapas del domo electrónico selladas

Figura 39 Ensamble de sección electrónica

Figura 40 Domo electrónico ensamblado

Figura 41 Actuadores del vehículo montados y conectados

Figura 42 Medida de altura del núcleo electrónico del ROV

Figura 43 Calibración con marcas realizadas

Figura 44 Vehículo Ensamblado

Figura 45 Prueba de conexión ROV

Figura 46 Metodología utilizada para la simulación CFD

Figura 47 Vista isométrica de la geometría simplificada del ROV

Figura 48 Vista frontal de la geometría simplificada del ROV

Figura 49 Vista trasera de la geometría simplificada del ROV

Figura 50 Vista superior de la geometría simplificada del ROV

Figura 51 Dimensiones del dominio computacional para un flujo lineal

Figura 52 Dimensiones del dominio computacional para la rotación del ROV

Figura 53 Condiciones de frontera para los arrastres lineales

Figura 54 Condiciones de frontera para los arrastres rotacionales

Figura 55 Malla para cálculo de arrastre Lineal

Figura 56 Calidad de la malla graficada sobre cada elemento

Figura 57 Muestra detallada de la malla del ROV

Figura 58 Muestra detallada de la malla del ROV

Figura 59 Malla del dominio para cálculo de arrastres rotacionales

Figura 60 Residuales de simulación con una malla estándar

Figura 61 Residuales de simulación con una malla optimizada

Figura 62 Fuerza de arrastre vs número de elementos

Figura 63 Porcentaje de variación del arrastre entre cada malla

Figura 64 Vista alejada del perfil de velocidad es sobre el ROV en posición frontal

Figura 65 Vista aumentada del perfil de velocidad es sobre el ROV en posición frontal

Figura 66 Vista alejada del perfil de velocidad es sobre el ROV en posición vertical

Figura 67 Vista aumentada del perfil de velocidad es sobre el ROV en posición vertical

Figura 68 Vista alejada del perfil de velocidad es sobre el ROV rotando

Figura 69 Vista aumentada del perfil de velocidad es sobre el ROV rotando

Figura 70 Valor del arrastre normal al vehículo en función del ángulo

Figura 71 Vórtices representados en el plano zy

Figura 72 Vórtices representados en el plano xz

Figura 73 DCL OpenROV

Figura 74 DCL para el cálculo en el plano yz

Figura 75 DCL para el cálculo en el plano xz

Figura 76 DCL para el cálculo en el plano xy

Figura 77 Sistema coordenado desplazado

Figura 78 Fuerzas externas aplicadas, plano xz

Figura 79 Fuerzas externas aplicadas, plano xy

Figura 80 Diagrama para cordón umbilical 1

Figura 81 Diagrama para cordón umbilical 2

Figura 82 Geometría del cable 3D con simetría aplicada

- Figura 83** Geometría enmallada
- Figura 84** Resultados simulación de fluidos
- Figura 85** Geometría del cable
- Figura 86** Foto de pruebas realizadas para el cable
- Figura 87** Estructura de pruebas utilizada en la bibliografía
- Figura 88** Estructura de pruebas diseñada
- Figura 89** Vista detallada del sistema de desplazamiento
- Figura 90** Diseño final del probador
- Figura 91** Montaje realizado para el experimento
- Figura 92** Gráfica correspondiente a motor superior
- Figura 93** Gráfica correspondiente a motor lateral 1
- Figura 94** Gráfica correspondiente a motor lateral 2
- Figura 95** Modelo montado en Simulink
- Figura 96** Validación del modelo con los datos experimentales
- Figura 97** Simulación de controladores diseñados
- Figura 98** Simulación de controlador PID
- Figura 99** Simulación de controlador LQG
- Figura 100** Simulación de controlador SMC
- Figura 101** Código de programación ROV
- Figura 102** Prueba de profundidad ROV en ambiente controlado
- Figura 103** Prueba de velocidad ROV en ambiente controlado
- Figura 104** Prueba de profundidad ROV en ambiente controlado
- Figura 105** Prueba de profundidad ROV en ambiente con perturbaciones

Figura 106 Prueba de profundidad ROV en ambiente con perturbaciones

Figura 107 Prueba de velocidad ROV en ambiente con perturbaciones

Figura 108 Prueba de velocidad ROV en ambiente con perturbaciones

Figura 109 Resultados del controlador PID

Figura 110 Resultados del controlador LQG

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características de una luz

Tabla 2 Resumen histórico de algunos avances en CFD

Tabla 3 Cuadro comparativo de los distintos modelos de turbulencia RANS

Tabla 4 Cuadro comparativo de las distintas aproximaciones de enmallado

Tabla 5 Cuadro comparativo de cada alternativa de controlador

Tabla 6 Presupuesto del proyecto

Tabla 7 Coeficientes de arrastres obtenidos por simulación

Tabla 8 Tabla de resultados

Tabla 9 Tabla de porcentaje de error

Tabla 10 Tablas de resultados de la fuerza en los instantes mostrados

Tabla 11 Resultados de simulaciones de controladores

Tabla 12 Evaluación de controladores con porcentaje de error

1. INTRODUCCIÓN

El control de navegación y orientación se encarga de diseñar sistemas de control que sean automáticos o remotos para cualquier tipo de vehículo. La historia del control basado en modelos para embarcaciones inicia con la invención del girocompás en 1908, el cual permitía la obtención de una respuesta automática y confiable del ángulo de Euler "Yaw" correspondiente al giro del eje vertical. Este fue el primer instrumento básico para los sistemas de control de lazo cerrado, los cuales son conocidos hoy como sistemas de piloto automático. Estos sistemas permiten controlar aeronaves, embarcaciones marinas o cualquier otro tipo de vehículo sin la intervención constante de un ser humano. Los primeros sistemas de piloto automático no podían realizar más que garantizar un cabeceo fijo y son incluso utilizados actualmente en sistemas para botes pequeños. Las primeras aplicaciones que se daban tenían el fin de mantener un curso fijo. Hoy en día, los pilotos automáticos pueden ejecutar maniobras complejas, tales como giros o aparcamiento, así como también habilitar el control de naves inestables como submarinos o buques de aceite. [1]

El gran logro obtenido con los pilotos automáticos basados en controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y el desarrollo de sistemas de posicionamiento de área local propuso que tres controladores PID desacoplados podrían ser utilizados para controlar el movimiento horizontal de una nave por medio de propulsores y hélices. Uno de los principales problemas para los sistemas de piloto automático es la prevención de las fuerzas de primer orden inducidas por las olas, las cuales alteran la retroalimentación en el lazo cerrado. Un sinnúmero de técnicas como el uso de filtros Notch y pasa bajos, y el uso de técnicas de banda muerta fueron testeadas con el fin de dar solución a esto, pero obteniendo resultados variantes. En 1963, la teoría de controladores lineales óptimos cuadráticos (LQG) estaba ya disponible. Esto motivó a la aplicación en sistemas de control de naves con múltiples entradas y salidas (MIMO). Otra de las ventajas consistió en que al ser un sistema MIMO, las interacciones entre los movimientos horizontales básicos del vehículo ya podían ser tratadas, a diferencia del caso con PID. Estas condiciones rebelan la tarea compleja que representa el control de vehículos subacuáticos remotamente operados, por lo que aún existe un problema de interés frecuente, el cual debe ser mejorado, creando sistemas más eficientes. [1]

Los vehículos remotamente operados, ROVs, son útiles para desarrollar casi cualquier tarea subacuática requerida, manteniendo al operador seguro, alejándolo de las áreas riesgosas de trabajo. Los ROVs comenzaron a utilizarse en los años 60's para realizar operaciones militares. Posteriormente, en los 80's, estos vehículos comenzaron a ser utilizados por compañías petroleras. Con el paso del tiempo se han venido mejorando, de tal forma que son ahora la mejor opción para llevar a cabo las operaciones subacuáticas, especialmente a grandes

profundidades, permitiendo la manipulación de instrumentación más avanzada, como cámaras de mayor resolución, sensórica de mayor sensibilidad y manipuladores de mayor capacidad, remplazando la labor desarrollada por los buzos, previendo así el riesgo al que los humanos son expuestos. [2] [3]

Existe una amplia variedad de diseños de estos vehículos subacuáticos, los cuales pueden abarcar diferentes tareas subacuáticas. Además de esto, pueden ser clasificados como sistemas de navegación libre (FSS por sus siglas en inglés, Free Swimming System) o sistemas de manejo anclado (TMS por sus siglas en inglés, Tether Management System), donde estos últimos trabajan las comunicaciones del vehículo de forma alámbrica por medio de un cordón umbilical. Existen también 5 clasificaciones más que abarcan los dos tipos de ROVs mencionados anteriormente [4]:

- Vehículos de observación
- Vehículos de observación con opción de carga
- Vehículo manipulador
- Vehículos de remolque
- Vehículos de prototipado y desarrollo

Por otro lado, a medida que la tecnología avanza, las capacidades de los vehículos remotamente operados se expanden constantemente, de modo que se vuelven cada vez más eficientes, al punto en que se logran especificaciones más altas para estos. De cierto modo, es imposible detallar todas las tareas a las que estos vehículos pueden ser sometidos. A pesar de esto, pueden ser agrupadas en seis categorías, enfocándose de forma general a las labores de extracción de crudos, gas y cableado subacuático. Estas categorías son [4]:

- Observación
- Estudio
- Inspección
- Construcción
- Intervención
- Excavación

En cuanto a instrumentación, existe un gran rango de herramientas que pueden ser incluidas en un ROV. Para esto, se debe tener en cuenta que estas herramientas no deben exceder la capacidad (en peso) para la cual está diseñado el ROV debido al riesgo en la navegación que esto podría representar. Las herramientas más comunes son [4]:

- Cámaras de video
- Sensores de prueba no destructivos

- Sensores acústicos (micrófonos, sonar, entre otros) y de seguimiento
- Herramientas de limpieza
- Estaciones vehiculares y dispositivos de enlace
- Herramientas de trabajo (por ejemplo, manipuladores)

Este proyecto propone el desarrollo de un sistema de control de un ROV que se llevará a cabo en cuatro etapas principales, iniciando por el modelamiento del ROV, donde se obtendrán las ecuaciones diferenciales que rigen el sistema, se desarrollará un análisis por elementos finitos para la obtención de algunos parámetros de hidrodinámica, se obtendrá la representación del sistema por medio de un modelo lineal en espacio de estados, y por último, se realizará el diseño de dos sistemas de control avanzado, que se seleccionarán con base en una búsqueda bibliográfica que permita determinar las estrategias más adecuadas para el sistema. Como resultado final se implementarán los controladores en un ROV subacuático comercial y se realizará la respectiva evaluación de desempeño de los mismos con pruebas reales.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de control de velocidad para un Vehículo Subacuático Remotamente Operado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar un modelo de ROV comercial de pequeña escala.
- Ensamblar el vehículo subacuático seleccionado.
- Establecer el modelo matemático del ROV con base en el prototipo ensamblado.
- Estimar los coeficientes de arrastre del vehículo por medio de simulación CFD.
- Determinar las estrategias de control más adecuadas para un vehículo subacuático disponibles en la literatura especializada.
- Diseñar dos estrategias de control avanzado para el ROV, seleccionadas con base en la búsqueda bibliográfica realizada.
- Validar experimentalmente los dos controladores con el prototipo en un ambiente controlado y comparar sus resultados.

3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente los vehículos remotamente operados, o ROV por sus siglas en inglés, son utilizados para desempeñar tareas de exploración, reconocimiento y realización de trabajos en ambientes subacuáticos. Estos vehículos no tripulados representan una gran ayuda en estos trabajos debido a su forma compacta, la no necesidad de intervención directa de las personas en las tareas realizadas, y además permiten la implementación de múltiples sensores y actuadores para diferentes tareas de acuerdo con la necesidad. Gracias a su versatilidad, el uso de ROVs es de interés para diferentes tipos de industrias que requieran tareas subacuáticas, las cuales en muchas ocasiones pueden representar alto riesgo al ser realizadas directamente por personas.

Uno de los principales sectores con un alto nivel de interés en los ROVs, es la industria petrolera. Esto debido a la gran funcionalidad que pueden presentar los vehículos remotamente operados en las actividades de exploración submarina para hallazgos de yacimientos de petróleo. En Colombia, según el gremio, el sector del petróleo representa el 7% del Producto Interno Bruto, PIB de Colombia y genera más de 95.000 empleos directos e indirectos [5]. Actualmente se manifiesta una necesidad urgente de apoyo en la exploración de suelos marinos, para actividades de exploración y explotación costa afuera. Esta necesidad se debe a que los pozos en tierra firme ya se encuentran en puntos bajos de producción y se requiere hacer nuevos hallazgos para garantizar la autonomía petrolera nacional. Durante 23 meses consecutivos la industria petrolera ha sorteado un escenario de ajustes de precios internacionales, lo cual ha traído para Colombia un sinnúmero de impactos, uno de ellos el descenso en la producción de crudo, la cual, según el último informe del Ministerio de Minas y Energía, llegó a los 914.000 barriles por día (bpd) en abril de 2016, un 12.5% menos que en igual mes del año anterior (1.029.000 bpd). Como consecuencia, Colombia pasaría de representar el 23.6% del mercado petrolero latinoamericano al 17.7%, además que, con la proyección de descenso en la producción de petróleo en el país, y reconociendo que el horizonte de reservas es de 5,5 años, el país estaría abocado a la importación de crudo [6].

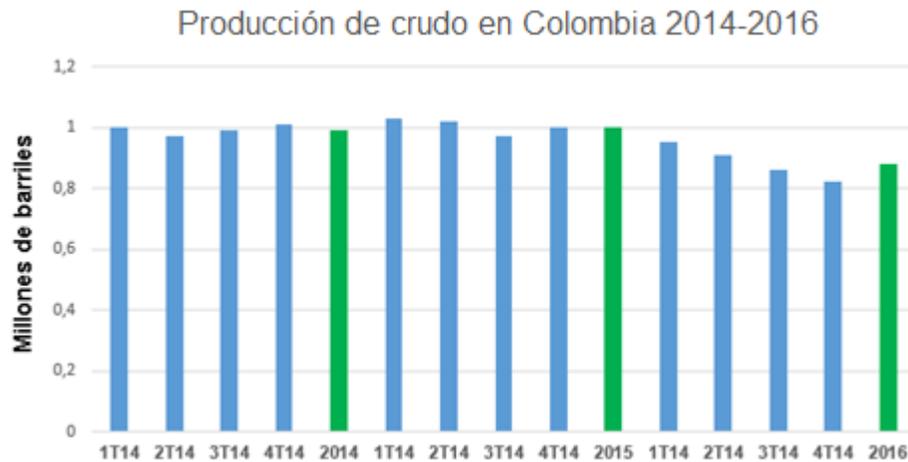


Figura 1 Producción petrolera en Colombia de 2014 a 2016 con pronóstico de Campetrol [6]

De acuerdo con la Cámara Colombiana de Bienes y Servicios Petroleros (Campetrol), los planes de inversión para el 2017 por parte de las empresas operadoras petroleras para la exploración y producción suman 4.705 millones de dólares, es decir, 105 % más que la cifra del 2016, que fue de 2.290 millones de dólares. Así, este año las compañías operadoras le dan nuevamente gran importancia al tema de exploración, ya que, del total de las inversiones, el 31,6 por ciento de los recursos van dirigidos a ella; por contribución, el segundo más alto de los últimos cuatro años [7]. El semillero de Investigación en Modelado y Simulación de la UNAB se encuentra realizando trabajos de investigación en colaboración con la empresa ECOPETROL-ICP para dar apoyo a sus necesidades de desarrollo tecnológico de soporte a la exploración y explotación de pozos costa afuera. Un de las líneas de trabajo solicitadas por ECOPETROL-ICP ha sido la de operación y uso de ROVs para diferentes actividades subacuáticas tales como la realización de ensayos sísmicos. Se prevé que con la realización de este proyecto se da un punto de partida para nuevos desarrollos en ECOPETROL-ICP, a una mayor escala, con participación de la Universidad Autónoma de Bucaramanga.

Uno de los factores más importantes en el diseño mecatrónico de un ROV, es el diseño de la estrategia de control del mismo. Dependiendo de la calidad del control implementado, se pueden obtener resultados de mayor o menor precisión en el trabajo a realizar por el ROV. El problema de control de un ROV es altamente relevante ya que este es un sistema subactuado, es decir, tiene menos actuadores que grados de libertad. Hay varios métodos para el diseño del sistema de control, desde la obtención experimental de parámetros hasta la implementación de estrategias de control más avanzadas a partir de modelos de caja blanca. Para esto se debe realizar un modelado correcto del ROV, así como también una definición correcta de los parámetros que rigen el modelo. Es por

esto que en el diseño de estos vehículos son evaluadas diferentes técnicas, tanto lineales como no lineales, que permitan controlar un sistema de alta complejidad, como lo son los ROV.

4. ANTECEDENTES

En la Universidad Autónoma de Bucaramanga se poseen pocas referencias acerca de trabajo con Vehículos Subacuáticos Remotamente Operados. En el año 2012, la estudiante Clara Mendoza presentó el proyecto de grado titulado: “Diseño Detallado de un ROV (Vehículo Operado Remotamente) para Exploración Marítima”. El proyecto se llevó a cabo por medio de la realización de planos y memorias de cálculo de los componentes estructurales del vehículo para una profundidad máxima de 500 metros. Se seleccionaron los componentes de propulsión, sensórica, navegación, iluminación y alimentación de energía, además del hardware para control. La autora concluye que la metodología de diseño mecatrónico planteada es ideal para el diseño adecuado de un ROV debido a la gran diversidad de variables de diseño que se deben tener en cuenta, así como es necesario saber cuál es la misión del vehículo para llegar al tamaño óptimo y escoger el mejor sistema de visión acorde a las necesidades planteadas por el usuario [8].

En el año 2017, se presentó un artículo al evento IMECE (International Mechanical Engineering Congress & Exposition) de ASME titulado: “Model-Based Optimal Control of a Small Remotely Operated Vehicle”. Éste fue presentado por los estudiantes Andrés Aldana y Helio Esteban (autores de este proyecto de grado), el cual consiste en el diseño de dos controladores para punto de equilibrio de un ROV. Para el desarrollo del proyecto se realizó un modelado dinámico de un modelo comercial de vehículo subacuático, analizándolo como un sistema de nado libre (FSS), y se incluyeron simulaciones básicas CFD para la obtención de los coeficientes de arrastre. Con base en el modelo obtenido, se diseñó un controlador LQR y otro controlador al que se le añadió el método de asignación de polos para ajuste fino. Los resultados se evaluaron ante valores iniciales de velocidad por medio de simulaciones en el software SIMULINK® de MATLAB®. [9]

En el caso del primer proyecto, se da un aporte valioso acerca de instrumentación aplicada en estos vehículos y datos a tener en cuenta en cuanto al trabajo con ROVS. Por otro lado, el artículo presentado en ASME presenta una contribución significativa al proyecto, ya que da un inicio al trabajo con software CFD, así como también al modelamiento y diseño de controladores. A la fecha no se conocen más referencias que traten el tema a nivel de la universidad.

5. ESTADO DEL ARTE

Los vehículos subacuáticos remotamente operados son un tema de investigación de interés reciente debido a la gran variedad de aplicaciones que puede tener. Es por esto que en el estado del arte se encuentran proyectos en gran cantidad, que parten desde el diseño y modelado, pasando también por etapas de simulación y cálculo de parámetros de gran peso como los hidrodinámicos, hasta el diseño y aplicación de controladores tanto lineales como no lineales. También se observa que en su mayoría se acompañan de experimentaciones en ambientes controlados, las cuales ayudan a verificar el desempeño de los vehículos, que incluso llevan a la necesidad de nuevas construcciones con mejoras. Para facilitar la lectura, se organizó el estado del arte siguiendo cuatro secciones, comenzando por los documentos que presentan el modelado del ROV, seguido de trabajos acerca de diseño del vehículo y simulación CFD, luego se presentan los artículos que tratan el diseño de controladores, y finalmente los artículos que presentan información sobre análisis de cordón umbilical, el cual representa un valor agregado en el modelo de vehículos subacuáticos.

5.1. MODELADO

En 1990, Kevin Goheen y E.R. Jeffereys presentaron a la conferencia internacional en robótica y automatización de la IEEE el artículo "The application of alternative modelling techniques to ROV dynamics". El objetivo principal del proyecto consistió en la prueba de algoritmos de identificación de sistemas y estimación de parámetros en un ROV simulado a partir de datos externos con el fin de compararlos, utilizando resultados en el dominio del tiempo y métodos estadísticos. Estos datos utilizados corresponden a un modelo no lineal complejo de un ROV y su sistema de navegación. Se prueban en total tres algoritmos diferentes de identificación de sistemas, los cuales, por medio de métodos estadísticos, calculan la estimación óptima de la complejidad del modelo. Para el desarrollo del proyecto utilizan el software MATLAB®. Los autores concluyen que los métodos recursivos de múltiples entradas y salidas para identificación de sistemas y estimación de parámetros desarrollados en las simulaciones estudiadas pueden ser aplicados ventajosamente al problema del modelado dinámico de un ROV [10].

En la Conferencia Americana de Control en 1993, Linton Clark, Kevin Goheen y Dana Yoerger presentaron el artículo "Practical Experiments in ROV System Identification". Se trata de un trabajo conjunto con el Departamento de Ingeniería

Mecánica y Aeroespacial, la Universidad de Carleton y el Departamento de Ingeniería Oceánica en el Instituto Oceanográfico de Woods Hole. La etapa inicial del proyecto parte de la aplicación de identificación de sistemas al modelamiento de un ROV. Para esto se realiza un set de pruebas en un tanque de testeo para ROVs, aplicando tres algoritmos de identificación de sistemas, las cuales se comparan entre sí para obtener su calidad. Los autores concluyeron que toda la dinámica no lineal, la cual es esencial para el modelado de un ROV, puede ser llevada a un modelo lineal de menor orden por medio de la aplicación de los métodos MIMO de identificación de sistemas que plantearon. Además, indican que el proyecto realizado es útil como trabajo previo para la realización de controladores adaptativos, en donde la dinámica del vehículo es de vital importancia para el correcto ajuste del controlador [11].

El proyecto desarrollado por S.M. Savaresi, F. Previdi, A. Dester, S. Bittanti y A. Ruggeri en 2004 se publica para el volumen 29 de la revista *Journal of Oceanic Engineering* de IEEE. El artículo "Modeling, identification, and analysis of limit-cycling pitch and heave dynamics in an ROV" tiene como propósito el modelado, la identificación de parámetros y el análisis de la dinámica de un ROV en su desplazamiento vertical y uno de sus ángulos. Esto se realiza con el fin de explicar los motivos de la oscilación generada en un vehículo existente, el cual presenta un continuo cabeceo en la navegación a altas velocidades. En este proyecto concluyen que las oscilaciones son generadas debido a saturación del actuador, el esquema de control y las herramientas de análisis planteadas [12].

En el 2011, el estudiante Riaan Pienaar presentó el proyecto "Simulation and Modelling of ROVs and AUVs" para el Centro Nacional Para Ingeniería Marítima e Hidrodinámica en la universidad de Tasmania. El objetivo principal consistía en crear un modelo matemático de un modelo de ROV seleccionado. Este modelo se utilizaría en una biblioteca de simulaciones matemáticas del modelo. Además, se incluyeron otros tipos de vehículos para añadir a la colección propuesta. El autor concluyó que la biblioteca obtenida fue utilizada posteriormente con propósitos de entrenamiento y diseño de controladores. Además, concluyó que el modelo matemático para los vehículos ya ha sido estudiado extensamente, por lo que fue posible establecer el modelo de las ecuaciones de dinámica con los 6 grados de libertad de un ROV y la ecuación de hidrostática [13].

Más adelante en el año 2016, se encuentra un proyecto presentado en la conferencia IMECE 2016 organizada por ASME, donde Wilmer Rustrian y Praveen Shankar realizaron el artículo "Modeling of a Small Remotely Operated Underwater Vehicle for Autonomous Navigation and Control". Partieron del modelado dinámico de un ROV comercial, seleccionando el modelo OpenROV 2.7 como objeto de estudio. Posteriormente, se realizó una identificación en lazo abierto del sistema en una validación experimental, de modo que se obtuvo el modelo de caja negra. Este modelo fue trabajado para el diseño de un controlador. [14].

De los proyectos anteriores se pueden encontrar aportes valiosos para el modelado del ROV en cuanto a dinámica, como se ve en el proyecto presentado en el IMECE, así como también se encuentran aportes a la identificación de sistemas, el cual es parte valiosa del proyecto para la identificación de los actuadores que serán incluidos.

5.2. DISEÑO DE ROV Y SIMULACIÓN CFD

Primero se presenta el proyecto desarrollado por Christopher Gaskin en el 2009 para el Centro Nacional Para Ingeniería Marítima e Hidrodinámica en la universidad de Tasmania. El proyecto “Design and Development of an ROV / AUV” tiene como fin el diseño, construcción e implementación de un vehículo subacuático operacional. Se planteó como la continuación del trabajo de un estudiante anterior para ser presentado a la Escuela Marítima Australiana AMC. Es por esto que el enfoque del proyecto está en rectificar los resultados anteriores y obtener el ROV operacional. Como resultado final, el autor obtuvo un ROV construido y operacional [15].

Luego se tiene el proyecto “Remotely Operated Underwater Vehicle” desarrollado por William John West en el 2009 para el Centro Nacional Para Ingeniería Marítima e Hidrodinámica en la universidad de Tasmania. Este proyecto es una continuación de la tesis desarrollada por Gaskin. En este caso, se comienza por la evaluación del vehículo desarrollado para el proyecto anterior. A partir de los resultados, se decidió construir un nuevo ROV con mejores características hidrostáticas e hidrodinámicas. Esto se llevó a cabo por medio de simulaciones fluido-estructura en el software CFD de ANSYS®. El autor concluyó que el nuevo vehículo demuestra que, con el uso de simulación avanzada computacional, puede ser diseñado para almacenar la carga completa del antiguo proyecto, añadiendo un propulsor para superar el arrastre generado [16].

Como tesis de pregrado se presenta el proyecto “Diseño de un Prototipo ROV (Remotely Operated Vehicle) Subacuático Experimental”, realizado en la Universidad Industrial de Santander por los estudiantes Damian Madero y John Durán en el 2012. Consiste en el diseño de la configuración mecánico estructural, donde se incluyó la obtención de parámetros de hidrodinámica. En el desarrollo del proyecto también se simularon los modelos en software CAD y CAE como Solidworks®, Comsol®, Ansys® y Matlab®. Finalmente validaron experimentalmente para verificar los parámetros mecánicos, como estabilidad, flotabilidad, entre otros, del vehículo diseñado. Los autores concluyeron la obtención de un vehículo diseñado de forma adecuada para soportar 20 metros de profundidad, capaz de mantener su estabilidad y con una considerable resistencia a la fuerza de arrastre, la cual se obtuvo gracias a la ayuda brindada por las simulaciones CFD [17].

La contribución obtenida en esta sección se enfoca principalmente en las simulaciones CFD realizadas que sirven de referencia para la realización de esta parte del proyecto. Además, se tienen en cuenta los resultados obtenidos de diseño mecánico para tener un mayor entendimiento al ensamblar, y de la misma manera, los resultados acerca de instrumentación implementada.

5.3. DISEÑO DE CONTROLADORES

La revista Journal of Oceanic Engineering de IEEE, en su volumen 15 en 1990 publicó el artículo “Multivariable self-tuning autopilots for autonomous and remotely operated underwater vehicles” desarrollado por K.R. Goheen y E.R. Jefferys. Los autores presentan dos esquemas, el primero trata de un controlador implícito lineal-cuadrático en línea con auto-sintonía y el segundo plantea una ley de control robusta basada en una aproximación de primer orden de la dinámica en lazo abierto y la identificación recursiva en línea. Para verificar el desempeño de los controladores, se examina su comportamiento cuando está controlando una simulación no lineal completa de un ROV y su sistema de navegación. En la sección de conclusiones, los autores plantean que se ha demostrado que el control MIMO de auto-sintonía puede ser utilizado satisfactoriamente en el difícil problema de guía automática de un vehículo subacuático. Mencionan además que la auto-sintonía es necesaria debido a la falta de conocimiento de calidad sobre la dinámica de lazo abierto de los ROVs. Finalmente concluyen que los dos esquemas desarrollados son aplicables para un sistema de piloto automático de un vehículo subacuático [18].

Dos años después en la Conferencia Americana de Control de 1995, se publicó el artículo “A multivariable decoupling design of an ROV depth control system: a direct adaptive fuzzy SMC approach” por A. Trebi-Ollennu, B.A. Stacey y B.A. White. El proyecto trata de un control Fuzzy adaptativo en modo deslizante (AFSMC), el cual es aplicado al lazo de control de movimiento vertical de un ROV buscador de minas. Los efectos de la variación de parámetros del vehículo son considerados. Además, el desempeño y robustez de la incertidumbre es evaluada. La efectividad de la técnica de control utilizada es demostrada por medio de la habilidad de desacople del movimiento vertical con los ángulos que lo afectan mientras es sujeto a cambios de parámetros. Los resultados obtenidos por los autores confirmaron que el método planteado puede tratar con la dinámica no lineal del ROV, de modo que puede ser aplicada directamente sin necesidad de linealización [19].

En 1997, la revista Transactions on Control Systems Technology de la IEEE publica en su volumen 5 el artículo “A discrete adaptive variable-structure controller for MIMO systems, and its application to an underwater ROV”, escrito

por M.L. Corradini y G. Orlando. El objetivo principal del proyecto es la obtención de una estructura de control discreto variable en el tiempo para sistemas de múltiples entradas y salidas. Se presentan dos algoritmos de control, los cuales se obtienen a partir de la extensión de sistema SISO a sistema MIMO de dos leyes de control de estructura variable llevadas a un controlador generalizado de varianza mínima. Los algoritmos presentados se aplican al problema de posicionamiento y orientación de un vehículo subacuático utilizado en la explotación de gas combustible en las aguas profundas. Los autores concluyen que las simulaciones realizadas proveen resultados satisfactorios con respecto al comportamiento transitorio y el error de seguimiento. Igualmente, como era esperado por los autores, la actividad del controlador surge desde el periodo transitorio y procede adecuadamente al estado estable, manteniendo baja la saturación en los actuadores por la mayor parte de la simulación [20].

En el 2008, Lucía Moreira y C. Guedes presentan el artículo " H_2 and H_∞ Designs for Diving and Course Control of an Autonomous Underwater Vehicle in Presence of Waves" en la revista *Journal of Oceanic Engineering de IEEE*. Un algoritmo de regression no lineal para la racionalización del espectro de la superficie marítima es tomado como caso de estudio. Los resultados obtenidos son analizados y evaluados en el dominio de la frecuencia, comparando el desempeño de los controladores, considerando o no la inclusión del modelo de las ondas. Los autores concluyen que, para el desarrollo del proyecto, se implementaron dos controladores: Un LQG y uno por los métodos H_2/H_∞ . También plantean que la inclusión del modelo de las olas es de mucha utilidad para la obtención de resultados más adecuados, considerando una de las perturbaciones que se presentan en la navegación de un ROV. Finalmente confirman la obtención de los controladores con resultados eficientes en simulación y que próximamente serán llevados a evaluación experimental [21].

Finalmente, se tiene un artículo publicado en el año 2016 donde se trabaja el diseño y desarrollo de un ROV con control de movimiento aplicando la técnica de lógica difusa. Este proyecto fue publicado en el evento International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS) de IEEE por N.D. Jayasundere y S.H.K.K. Gunawickrama como "Underwater ROV with Fuzzy Logic Motion Control". Se diseña para ambientes acuáticos de baja profundidad con un máximo de 10 metros de profundidad. Se desarrolló en dos fases, partiendo del diseño contemplando la parte electrónica asociada al control de movimiento y de potencia. Esta parte se monta internamente y se incluye un control umbilical para la comunicación y la alimentación del vehículo. Incluye además una cámara de video y un set de luces LED para iluminación. Se trabaja con un sistema embebido para control, utilizando una tarjeta Raspberry pi. Finalmente se realizaron pruebas en un laboratorio utilizando un tanque de 1.5 metros de profundidad, donde se

obtuvieron resultados altamente satisfactorios. Como resultados, se obtuvo que el ROV tenía una rápida respuesta a señales de maniobra en los casos en que no se aplicaban fuerzas externas, así como también presentó la capacidad de mantenerse en punto de equilibrio cuando se añadían perturbaciones a la prueba [22].

El artículo “Modeling of a Small Remotely Operated Underwater Vehicle for Autonomous Navigation and Control” mencionado anteriormente, se trabajó partiendo del modelamiento realizado y con ello realizaron controladores tipo PID para 3 controles independientes de piloto automático (dos ángulos de navegación y profundidad). Los autores concluyeron que cada sistema de piloto automático mostró estabilidad sin exceder los límites de los actuadores, por lo que el siguiente paso sería implementar los 3 controladores simultáneos y verificar su desempeño, lo cual se planteó como trabajo futuro [14].

El aporte realizado en esta sección es enfocado a qué técnicas son utilizadas para modelos de ROVs, tanto lineales como no lineales. Además de esto, se genera una mejora en la evaluación de complejidades de los controladores, lo cual apoyará el proceso de selección de las estrategias de control a aplicar en el trabajo desarrollado. Una observación que se puede realizar, tanto para esta sección como para las anteriores, es el espaciamiento que hay entre los artículos encontrados. En este caso se pueden ver que los documentos que se obtuvieron de los años 90's están mayormente enfocados a modelamiento e identificación de sistemas para el ROV, más que al control. Por otro lado, los proyectos más recientes se enfocan más en control y obtención de parámetros hidrodinámicos. Además de esto, este nuevo auge en el trabajo de los vehículos acuáticos surgió a la par con el crecimiento en investigación de otros vehículos como drones o robots móviles, por lo que se concluye que esto motiva al trabajo en esta área.

5.4 MODELO DE CORDÓN UMBILICAL

Uno de los trabajos más referenciados en el tema, el cual es la base del modelamiento de cables sumergibles, fue el de Walton y Polachek, publicado en el año 1959. Se aplica inicialmente el método de diferencias finitas con base en las ecuaciones de movimiento del cable. Se consideran en el mismo el movimiento longitudinal y transversal, la ocurrencia de largos desplazamientos, pero y factores acuáticos.

Durante la década de los 80, se desarrollaron diferentes proyectos por James Kamman junto a Ronald Huston, los cuales trataron los temas de representación y modelamiento de cables sumergidos. Partieron de definir el cable como una serie

de cilindros rígidos conectados por pines esféricos, los cuales al juntarse modelan el cable. Esta versión mejora a medida que se usa un mayor número de eslabones para la misma longitud de cable. Este mismo modelo es desarrollado, de modo que se enfoca en la solución del problema por medio de métodos numéricos aprovechando el auge computacional de la época. En esa misma década, G.J. Davies resuelve por medio de Elementos Finitos el problema del cable utilizando el software Abaqus®. En este proyecto tiene en cuenta la teoría de ondas para agregar el factor de las olas al modelo, la ecuación de Morison, la cual es una ecuación semiempírica utilizada para agregar las interacciones de un cable con un fluido, incluyendo arrastre, sustentación, fricción de superficie y la fuerza inercial.

En el año 2000, se realizó la validación de un modelo por parámetros concentrados por B. Buckham. Este modelo consistió en dividir el cable en pequeños segmentos trabajados como resortes unidos entre sí. A este proyecto se le realizó validación experimental, donde se encontró que el comportamiento del cable cualitativamente era similar al real, pero los valores de las tensiones ejercidas en el vehículo eran menores a las reales. Posteriormente en el 2013 se realizó una aproximación diferente a la interacción del cable con el vehículo, la cual consistió en tomar en cuenta únicamente el factor de arrastre. Se asumió una longitud de cable inextensible. Uno de los aportes más valiosos es el uso de los Clumps, que se trata de un flotador que permite reducir la influencia del cable en el vehículo, de modo que se pueda posteriormente modelar como un vehículo de nado libre. Ese mismo año se trabajó en otro modelo, el cual consistió en trabajar el mismo modelo de eslabones, sólo que en este caso con vigas para incluir el esfuerzo de flexión. Estos resultados fueron buenos respecto al error cualitativo (forma y comportamiento visual), pero de nuevo se subestiman los valores de tensión.

El principal aporte que esta sección deja al proyecto está principalmente en la aplicación de métodos numéricos para la estimación de fuerzas. Además de esto se pueden observar diferentes formas de realizar el proceso de modelamiento del cable para posterior desarrollo en Software de Elementos Finitos. Estas soluciones y sus características permiten la selección de un método que permita estimar un rango de valores de fuerzas en función de la velocidad.

6. MARCO TEÓRICO

Los ROVs son vehículos, que en su mayoría son sumergibles, utilizados para tareas varias. De acuerdo con la traducción de sus siglas estos vehículos son controlados desde la superficie por el operador y la información es generalmente enviada por un cordón umbilical al vehículo. La unidad de procesamiento para un ROV puede ser un PLC (Programmable Logic Controller), un microcontrolador o un sistema embebido. La selección de esta puede variar de acuerdo a las necesidades económicas, de robustez y capacidad de procesamiento que se requieran para el vehículo. Existen diferentes características de diseño mecánico necesarias para el correcto funcionamiento de un ROV como lo son: flotabilidad neutra, centro de masa más bajo que el centro de volumen, pesos frontales y laterales distribuidos equitativamente. [22]

6.1. COMPONENTES FÍSICOS DE UN ROV

Cada uno de los componentes de un ROV es un objeto de estudio debido a las necesidades del entorno donde se opera el vehículo. En la siguiente sección se mostrarán los componentes más críticos de un ROV, junto con las clasificaciones y características de cada uno.

6.1.1. SISTEMA DE PROPULSIÓN

Este sistema es el encargado darle la movilidad al ROV. La propulsión se compone de una fuente de poder, un sistema de control y el actuador principal. Existen sistemas de propulsión por hélice y de propulsión a chorro, donde el uso generalmente en estos vehículos es por hélice y a su vez se divide en eléctricos o hidráulicos. [23]

6.1.1.1. SISTEMAS DE PROPULSIÓN POR HÉLICE ELÉCTRICOS

Son aquellos que únicamente con alimentación eléctrica. Estos a su vez se dividen en dos clases, los de motores brushed (motor con escobillas) y los de motores brushless (Motores sin escobillas). Cuando se trabaja con motores brushed se tiene un menor rendimiento en cuanto a revoluciones y disipación de calor, pero un mayor desempeño respecto a resistencia, costo y facilidad de control. Estas

características lo hacen indicados para ROVs de exploración cuyas condiciones de operación sean hostiles. Para el caso de los motores brushless el asunto es distinto, estos motores tienen un funcionamiento que les permite alcanzar revoluciones superiores a los motores brushed y no sufren tanto de problemas de temperatura. Los sistemas de propulsión con motores brushless son más usados en operaciones de monitoreo y tareas de la industria debido a su velocidad y el empuje generado con las hélices. [22][23]



Figura 2 Propulsor con motor Brushless [22]

Debido a que cada uno de los motores tiene características eléctricas, el control de velocidad es distinto. Para el motor Brushed se trabaja con un sistema muy convencional llamado puente H. En cambio, para los motores Brushless el controlador de velocidad es un generador de AC mucho más complejo que el puente H. [22]



Figura 3 Controlador de velocidad para un motor Brushless [22]

6.1.1.2. SISTEMA DE PROPULSIÓN HIDRÁULICO

Los sistemas hidráulicos son altamente utilizados en ROVs de trabajo pesado. Debido a la cantidad y tipo de componentes vuelven muy pesado al ROV y a su vez aumenta la potencia requerida para moverlo. El uso de estos sistemas se debe a que pueden alcanzar mayores velocidades, tener inversiones de giro y un arranque mucho más rápido que en las propulsiones eléctricas. [24]

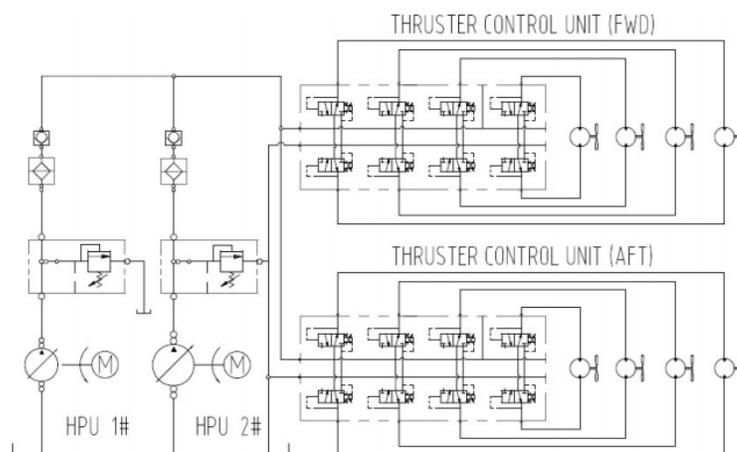


Figura 4 Esquema de un sistema de propulsión hidráulico [24]

Los sistemas de propulsión están compuestos por una etapa de bombeo con todas las válvulas y cheques hidráulicos de seguridad requeridos, un sistema de servo válvulas o válvulas proporcionales y finalmente los motores hidráulicos que sirven de propulsores. De acuerdo con la profundidad del ROV se selecciona el tipo de válvula y el tipo de bomba. La razón de esto es que por ejemplo componentes como las servo-válvulas no son viables para profundidades mayores, lo que limita a equipos como estos a labores de precisión en profundidades menores. [24]



Figura 5 Propulsor hidráulico [24]

6.1.2. SENSORES

La sensórica es una parte crucial de un ROV, debido a que este tipo de vehículos está diseñado para operar en ambientes donde no hay ningún tipo de vigilancia directa. Es necesario lograr enviar la mayor cantidad de información al operario en tierra. Otra necesidad de la implementación de sensórica es poder monitorear las variables del sistema para aplicar un lazo de control al vehículo. Los sensores más usados en las aplicaciones de small ROV son: Cámaras y sensores MEMS (Sistemas Microelectromecánicos). [23]

6.1.2.1. CÁMARAS

Las cámaras de video son altamente usadas en los ROVs de todos los tipos con la particularidad de que no representan un problema de diseño del vehículo. El criterio de selección para la cámara de un ROV es únicamente el tamaño del vehículo, por lo que los small ROV o los LCROV se utilizan cámaras CCD (charge-coupled device) de bajo costo. [23]



Figura 6 Cámara con mecanismo de rotación [23]

6.1.2.2. MEMS (MICRO-ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS)

Los sistemas micro electromecánicos es un término asignado a componentes mecánicos que son caracterizados por su pequeño tamaño. Los dispositivos MEMS pueden tener dimensiones en la escala de micrones y tienen los componentes mecánicos y eléctricos. [25]

La historia de la micro mecanización se remonta a los años 60 donde los investigadores decidieron experimentar con el uso de tecnologías para fabricar circuitos integrados y lograron fabricar estructuras mecánicas con silicio, y a partir de este avance en los años 70 se comenzó la fabricación de sensores como acelerómetros y sensores de presión. [25]

6.1.2.2.1. ACELERÓMETROS

Los acelerómetros fueron el segundo producto MEMS obtenido después de los sensores de presión, las aplicaciones de estos sensores son varias como por ejemplo [25]:

- Detectores de choques para airbags.
- Interfaces de usuario basadas en movimientos.
- Contadores de pasos.
- Detectores de caídas para protección de dispositivos electrónicos.
- Cámaras digitales para detectar la orientación de la imagen.

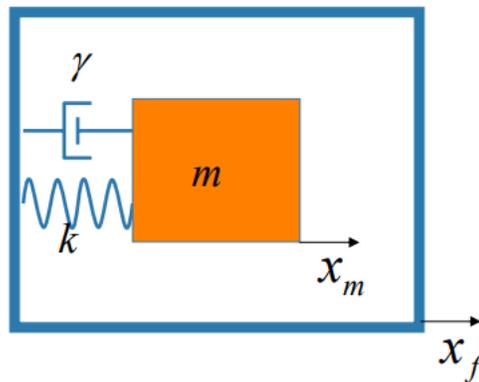


Figura 7 Modelo generalizado de un acelerómetro [25].

Un acelerómetro es básicamente una masa con un resorte y un amortiguador donde conociendo la tensión del resorte se obtiene la posición y con esta última el valor de la aceleración bajo las siguientes ecuaciones [25]:

$$m \frac{\partial^2 x_m}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial (x_m - x_f)}{\partial t} + k(x_m - x_f) = F_E$$

Donde:

m = Masa de la partícula atada al resorte y amortiguador

γ = Coeficiente de fricción viscosa del amortiguador

k = Constante elástica del resorte

x_m = Desplazamiento de la partícula atada

x_f = Desplazamiento del sensor

F_E = Fuerza neta aplicada al sensor

Para traducir estas señales mecánicas a eléctricas existen tres tipos de sensores utilizados. El primer sensor consta de un elemento piezo resistivo, fue desarrollado en los años 70 donde un elemento piezo resistivo que cambiaba su valor de resistencia en función al stress sometido, este sensor es robusto y simple. pero es altamente susceptible a ruido eléctrico externo. El segundo sensor consta de un elemento capacitivo que cambia su valor por medio del movimiento entre la masa y el marco, tiene la ventaja de que posee un alto desempeño ante el ruido y en la actualidad es el más utilizado debido a su bajo precio. Finalmente, el tercer sensor se basa en un componente piezo-eléctrico, su funcionamiento es básicamente producir corrientes en función a los cambios en la aceleración entre la masa y el sensor, debido a que este sensor solo reacciona ante cambios en la aceleración no es muy usado en sensores microscópicos [26].

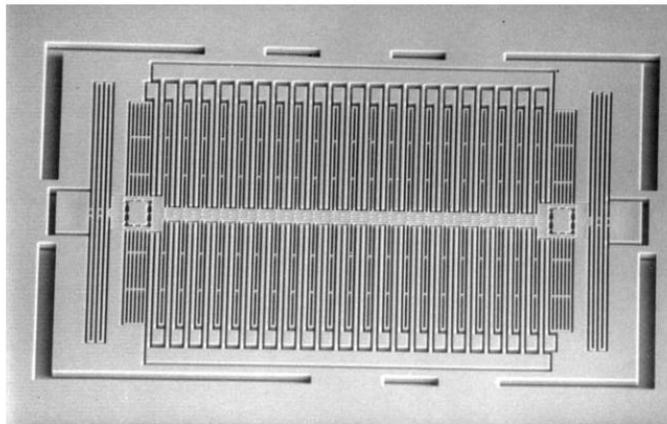


Figura 8 Acelerómetro capacitivo observado con un microscopio [26].

6.1.2.2.2. GIROSCOPIOS

Los giroscopios a diferencia de los acelerómetros no son elementos pasivos y poseen por lo menos un elemento móvil que responde ante una perturbación rotativa sobre el eje que se desea sensar. Estos sensores permiten medir la velocidad angular sobre varios ejes de rotación simultáneamente [26].

Debido a que fabricar rodamientos de alta calidad en una escala microscópica con la tecnología actual no es viable, los giroscopios de escala micrométrica operan con un sistema de vibración periódico [26].

Debido a que los acelerómetros y giroscopios son sensores de la misma naturaleza las tecnologías para leer las señales son muy similares utilizando elementos piezo resistivos, capacitivos y piezo eléctrico para generar las señales que luego serán post procesados por un circuito como el de la figura 16 [26].

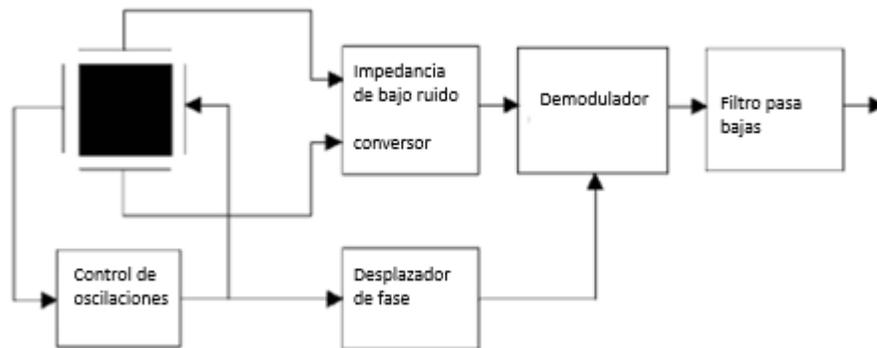


Figura 9 Circuito de procesamiento de la señal para un giroscopio [26].

6.1.2.2.3. SENSOR DE PRESIÓN

Los sensores de presión a diferencia de los acelerómetros y giroscopios que se encuentran totalmente encapsulados deben estar expuestos al medio a sensar. Los elementos principales de este tipo de sensores son una membrana que se deforma elásticamente y los componentes necesarios para traducir esta deformación en una señal eléctrica [26].

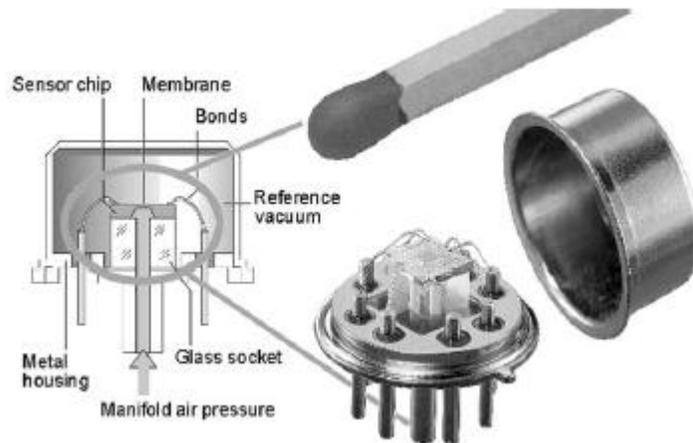


Figura 10 Vista transversal de un sensor de presión [26].
6.1.3. SISTEMA DE ILUMINACIÓN

Debido a que en la mayoría de los casos los ambientes submarinos tienen una iluminación tenue o nula, es necesario aplicar un sistema de iluminación para no perder la funcionalidad de la cámara del ROV. Para este ambiente se usan los siguientes tipos de fuentes de iluminación: incandescente, fluorescente de alta intensidad, de descarga de gas y de LED (light-emitting diode) [23].

| Fuente | Lumens/watt | Vida(h) | Color | Tamaño | Lastre |
|-----------------------|-------------|----------|-------------|-----------------|--------|
| Incandescente | 15-25 | 50-2500 | Rojizo | Mediano-Grande | No |
| Halógeno de tungsteno | 18-33 | 25-4000 | Rojizo | Pequeño-Mediano | No |
| Fluorescente | 40-90 | 10000 | Varios | Grande | Sí |
| Flúor verde | 125 | 10000 | Verde | Grande | Sí |
| Mercurio | 20-58 | 20000 | Azulado | Mediano | Sí |
| Halogenuro metálico | 70-125 | 10000 | Varios | Mediano | Sí |
| Sodio de alta presión | 65-140 | 24000 | Rosa | Mediano | Sí |
| Arco de xenón | 20-40 | 400-2000 | Luz natural | Muy pequeño | Sí |
| HMI/CID | 70-100 | 200-2000 | Luz natural | Pequeño | Sí |
| Sodio de baja presión | 100-185 | 18000 | Amarillo | Grande | Sí |
| Xenón flash | 30-60 | NA | Luz natural | Mediano | NA |

Tabla 1 Características de la iluminación según su fuente [23]

6.1.3.1. INCANDESCENTE

Este tipo de iluminación ya se encuentra obsoleta debido a que funcionan por medio del paso de corriente por un filamento al vacío. Este tipo de iluminación fue la primera en ser utilizada para un ROV, pero posee la gran desventaja de que solo se aprovecha el 10% de la energía en luz y en el caso de alógenas se aprovecha hasta el 15% [23].

6.1.3.2. FLUORESCENTE

Este tipo de iluminación soluciona los problemas de eficiencia que poseían la iluminación incandescente, alcanzando un 40% de aprovechamiento de la energía en luz. Son poco usadas en los ROVs debido a que su luz no penetra en el agua y no puede iluminar adecuadamente [23].

6.1.3.3. HID (HIGH INTENSITY DISCHARGE):

De la misma manera que las fluorescente operan con gases, pero tienen una mayor eficiencia y trabajan con gases como los halogenuros metálicos. Esta iluminación debido a que generan gran cantidad de luz en cortas distancias es utilizada en labores de construcción subacuática [23].

6.1.3.4. LED (LIGHT-EMITTING DIODE)

Es la más usada actualmente a nivel subacuático debido a su bajo costo, su respuesta instantánea y su gran eficiencia energética. Otra característica es que su iluminación no cambia apreciablemente a lo largo de su vida útil y no representa un mayor riesgo para el vehículo en caso de alguna falla. Esta iluminación puede ser usada en gran cantidad de aplicaciones usando los respectivos reflectores y lentes para ajustar la luz a la deseada [23].

6.2. CLASIFICACIONES DE UN ROV

Para poder implementar una solución a un problema de ingeniería que requiera un ROV es necesario conocer los tipos que existen y en qué tipo de situaciones se aplica cada uno de estos. Existen gran variedad de formas en la que los ROVs son clasificados, generalmente por una característica técnica específica, esto permite encontrar en la mayoría de los casos una clasificación acorde al problema. A continuación, se expondrán dos maneras de clasificar un ROV: según su alimentación, de acuerdo a su uso. [22]

6.2.1. SEGÚN SU ALIMENTACIÓN

Esta clasificación puede parecer bastante sencilla, pero resulta en un criterio crucial y principalmente está basado en el tiempo de operación que se desee para el ROV. [22]

6.2.1.1. ALIMENTADOS EN TIERRA

Este tipo de ROV posee un cordón umbilical por donde se transmite toda la información de este y también se suministra alimentación. Se usan principalmente en aplicaciones con un alto tiempo de operación y para equipos que operen con un consumo eléctrico muy elevado. [22]

6.2.1.2. ALIMENTADOS CON BATERÍA Y ENVIÓ DE DATOS POR CABLE

Este tipo de ROV también posee un cordón umbilical, pero a diferencia del ROV alimentado en tierra el cordón solo se utiliza para transmisión de datos. Esta diferencia permite reducir el tamaño del cable a usar y por ende la resistencia que este genera en el agua. Son usados en aplicaciones de alta movilidad como exploración y su tiempo de operación está sujeto a la batería aplicada. [22]

6.2.1.3. AUV

Cuando hablamos de un ROV completamente autónomo pasa a ser un AUV (Autonomus Underwater Vehicle). Este tipo de vehículos tiene una serie de ventajas debido a que no tiene limitantes físicas y puede separarse una distancia mayor del operario. Aunque este equipo supone múltiples ventajas también posee el riesgo de ser extraviado al no tener ningún contacto físico en tierra. Son utilizados en operaciones que requieran gran movilidad y poco tiempo de operación o en donde el medio sea muy hostil para transportar un cable largo. [22]

6.2.2. SEGÚN SU USO

Esta clasificación está orientada únicamente de acuerdo a la función que desempeña el vehículo. Los dos usos generales de estos vehículos son de exploración [22].

6.2.2.1. DE EXPLORACIÓN

Este tipo de vehículos es caracterizado por tener instrumentación en su mayoría sensórica, en vez de instrumentación para manejo de cargas. Las labores de exploración comprenden todo lo que es la rama de biología marina, exploración geológica y monitoreo de estructuras submarinas [22].

6.2.2.1.1. LCROV (LOW-COST ROV)

Son ROVs de un peso aproximado a los 3 Kg y una potencia inferior a los 5 HP. La inmersión de estos está limitada a 100 metros de profundidad. Estos ROVs son usados para movilizarse en zonas donde un buzo no puede acceder. La desventaja de este tipo de ROVs es que no se les puede equipar equipos auxiliares muy pesados como manipuladores de alta carga, lo que limita sus funciones a exploración y sensado.



Figura 11 Ejemplo de LCROV [22]

6.2.2.1.2. SMALL ROV

Tienen un peso aproximado de 15 Kg, una potencia máxima alrededor de 10 HP y una profundidad máxima de 300 metros. Estos ROVs comparten la misma falencia que los LCROVs, con la diferencia de que estos permiten la implementación de accesorios ligeramente más pesados como sensores de ultrasonido o baterías de mayor capacidad. [22]



Figura 12 Ejemplo de un ROV pequeño [22]

6.2.2.1.3. ULTRA PROFUNDOS

Los ROVs de este tipo desde el punto de vista de tamaño y potencia son similares a la gama media si son electrohidráulicos, y son similares a los de alta capacidad eléctrica si son únicamente eléctricos. Lo que diferencia a estos equipos es que su diseño está dado para sumergirse hasta los 10.900 metros. Son altamente usados en operaciones de salvamento en caso de ser electrohidráulicos y los netamente hidráulicos tienen más acogida en los campos de investigación de biología marina [23].



Figura 13 Ejemplo de un ROV ultra profundos [22]

6.2.2.2. DE TRABAJO

Este tipo de ROV es utilizado en todo tipo de industrias que necesiten desempeñar labores en un ambiente subacuático. Vienen equipados en su gran mayoría con herramientas para manejar cargas [22].

6.2.2.2.1. GAMA MEDIA

Estos ROV son de una escala superior a los previamente mencionados ya que estos pueden ser equipados con un manipulador habilitado hasta 100 o 200 Kg. Los ROV gama media tiene una potencia aproximada de 100 HP, una profundidad máxima de 2000 metros, un peso mayor a una tonelada y trabajan con un sistema electrohidráulico. La principal ventaja es que debido a su estructura y peso son idóneos para condiciones muy peligrosas con corrientes fuertes [22].



Figura 14 Ejemplo de un ROV gama media [22]

6.2.2.2. ALTA CAPACIDAD ELÉCTRICA

Son ROVs netamente eléctricos, esto debido a la reducción de peso que se tiene al no tener un sistema hidráulico. Los ROVs de alta capacidad eléctrica tienen una estructura similar a los ROVs de gama media, pero al no ser tan pesado son más usados para investigación científica y uso militar debido a su sigilo en cuanto a los actuadores, lo que junto a su tamaño medio dificulta su detección. La inmersión de este tipo de vehículos es entre los 3000 a 7000 metros de profundidad. [22]



Figura 15 Ejemplo de un ROV alta capacidad eléctrica [22]

6.2.2.3. DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Estos equipos son muy utilizados en industrias petroleras debido a su gran fuerza y capacidad de realizar labores de mantenimiento. La potencia eléctrica de estos ROVs es de aproximadamente los 300 HP, por esto mismo también el grosor del cordón umbilical debe ser mayor que en los vehículos anteriores. El peso de estos ROVs es de por lo menos 2 toneladas. La inmersión máxima de estos vehículos es de aproximadamente 3.500 metros. [22]



Figura 16 Ejemplo de un ROV de trabajo junto con un TMS de tipo sombrero y su Sistema de lanzamiento y recuperación [22]

6.2.2.2.4. DE ARRASTRE

Son vehículos extremadamente pesados por lo que no vienen incluidos con hélice superior. Para poder elevar estos equipos se hace por medio de la tensión del cordón umbilical, este viene reforzado con kevlar para soportar los esfuerzos a los que es sometido. El uso que se les da a estos equipos es generalmente para enterrar tuberías, hacerle mantenimiento a estas o llevar cargas pesadas de las profundidades a la superficie.

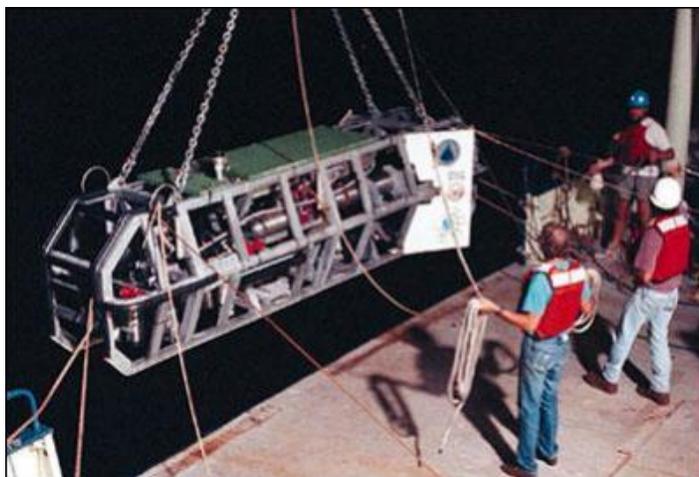


Figura 17 Ejemplo de un ROV de arrastre [22]

6.3. OPENROV

El OpenROV es un vehículo de código abierto, fabricado y distribuido por la compañía del mismo nombre. Este ROV ha tenido gran acogida en el campo educativo debido a su bajo costo. Pese a que posee defectos técnicos notorios como un número reducido de actuadores y una desalineación del actuador vertical respecto al centro de gravedad, lo que genera oscilaciones en el vehículo, ha permitido a gran cantidad de organizaciones y personas de recursos medio acceder a este tipo de vehículos. Actualmente este producto clasificado como LCROV se encuentra en la versión 2.8 [27].

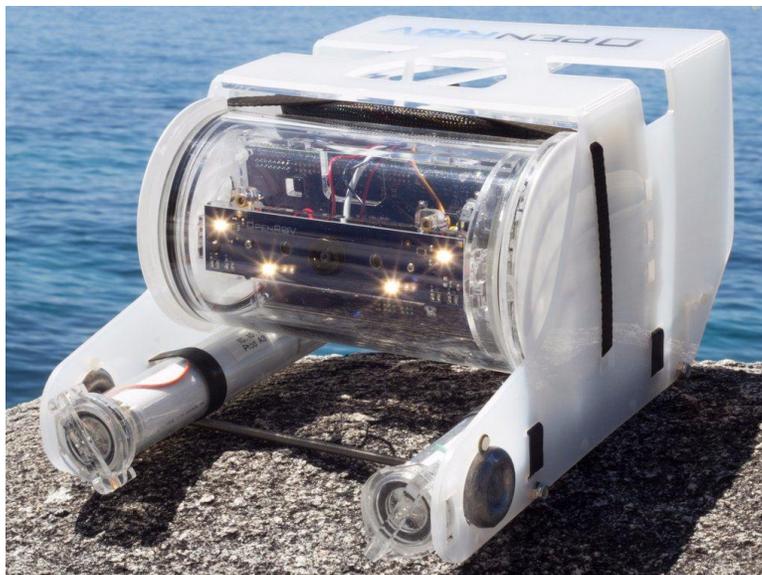


Figura 18 Vista isométrica del OpenROV versión 2.8 [27].

6.3.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

El Open ROV al ser un vehículo de bajo costo tiene carencias en ciertos aspectos técnicos. Sin embargo, el vehículo incluye una serie de características que lo hacen una herramienta bastante práctica para aplicaciones ligeras. Las características físicas más relevantes de este vehículo son [27]:

- Peso aproximado de 2.6 [Kg]
- Las dimensiones de este vehículo son 30 [cm] de largo, 20[cm] de ancho y 15 [cm] de alto
- Vida nominal de la batería de 2 a 3 horas.

- Flotabilidad Neutra y alta maniobrabilidad.

Para seleccionar la aplicación de un ROV se deben mirar las especificaciones de rendimiento. En caso del OpenROV las especificaciones de rendimiento son las siguientes [27]:

- Profundidad de operación máxima de 100 [m]
- Velocidad máxima de 2 [kn]
- Cámara HD
- Iluminación LED con un brillo de 200[lm]
- Temperatura recomendable del agua -10[C] a 50[C]

6.3.2. APLICACIONES ACTUALES

El OpenROV al ser un producto comercial está siendo usado para exploración y educación. Para el tema de exploración la misma compañía ha puesto en línea una iniciativa llamada OpenExplorer donde se suben las exploraciones realizadas utilizando esta plataforma [28].



Figura 19 Distribución mundial de las expediciones con OpenROV [28].

Dentro de estas expediciones las más representativas son para arqueología y biología marina. En el tema educativo el ROV ha tenido gran aceptación debido a que trabaja con componentes bastante comerciales y que puede ser modificado y adaptado con facilidad de acuerdo con el usuario, ya sea con Kits de expansión, o realizando modificaciones independientes [28].

6.4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es un campo de estudio que haciendo uso de los campos de la mecánica de fluidos, las matemáticas y la ciencia computacional recrea situaciones como el túnel de viento.

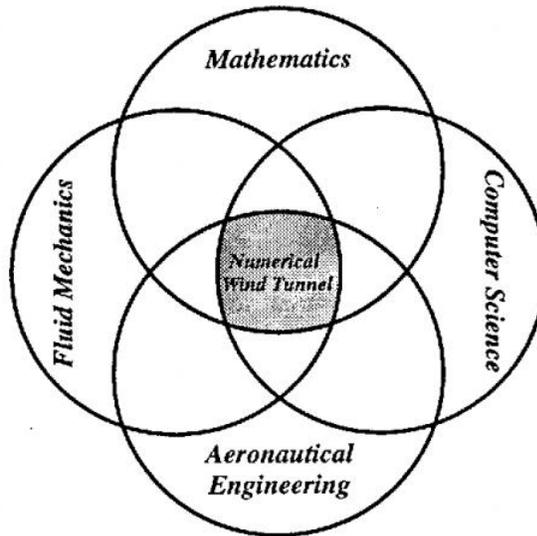


Figura 20 Diagrama que muestra las ciencias tras el túnel de viento numérico [28].

Este campo de estudio generó sus primeros avances en los años 1960 y su avance histórico se puede observar en la siguiente tabla:

| Años | Avance generado |
|-----------|--|
| 1960-1970 | Desarrollos tempranos: <ul style="list-style-type: none">• Dinámica de gases basados en el esquema de Riemann.• Esquemas de segundo orden disipativo para ecuaciones hiperbólicas.• Métodos explícitos, eficiente para Navier-Stokes.• Método de Panel. |
| 1970-1980 | Ecuaciones de flujo potencial: <ul style="list-style-type: none">• Diferenciamiento dependientes del tipo.• Características complejas.• Diferencia rotada.• Múltiples mallas.• Solución completa de un aeroplano |
| 1980-1990 | Ecuaciones de Euler y Navier-Stokes: |

| | |
|-----------|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Control de oscilación por medio de limitadores. • Esquema Godunov de alto orden. • División de flujo. • Captura de impacto por medio de difusión controlada. • Solucionador de Riemann aproximado. • Disminución total de la variación. |
| 1990-2000 | Optimización aerodinámica de forma: <ul style="list-style-type: none"> • Teoría de control basada en uniones |
| 2000-2010 | Métodos de elementos finitos discontinuos: <ul style="list-style-type: none"> • Galerkin discontinuo • Diferencia espectral • Reconstrucción de flujo • etc. |

Tabla 2 Resumen histórico de algunos avances en CFD [23]

6.4.1. MODELOS DE TURBULENCIA

La turbulencia es un problema complejo cuya comprensión ha llevado al desarrollo de distintos modelos para poder simular su comportamiento. Los distintos tipos de modelos parten de 3 posturas sobre la turbulencia:

- **La postura Estadística:** Esta postura plantea que la turbulencia es un fenómeno completamente aleatorio y que para poder tener una comprensión de esta se debe trabajar con promedios y aproximaciones que permitan extraer sus características principales. Los modelos resultantes de esta postura son los modelos RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes).
- **La postura Determinística:** Esta postura plantea que la turbulencia tiene características aleatorias, pero no es en esencia imposible de predecir. Por esto plantea que por medio de las ecuaciones de Navier-Stokes se puede obtener una aproximación certera del comportamiento de un flujo turbulento. Esto influenció al desarrollo del método DNS (Direct Numerical Simulation) que debido a su costo computacional ha tenido dificultades de aplicación.
- **La postura Estructural:** Esta postura no genera ningún modelo de turbulencia, pero abre un campo de estudio experimental, ya que esta postura plantea que la turbulencia no es aleatoria de ninguna forma y que sus vórtices ya sea a gran o pequeña escala tiene una estructura organizada y predecible.

De varios puntos medios entre los modelos RANS y el método DNS se desarrollaron otros métodos intermedios como los son el DES, LES y DDES.

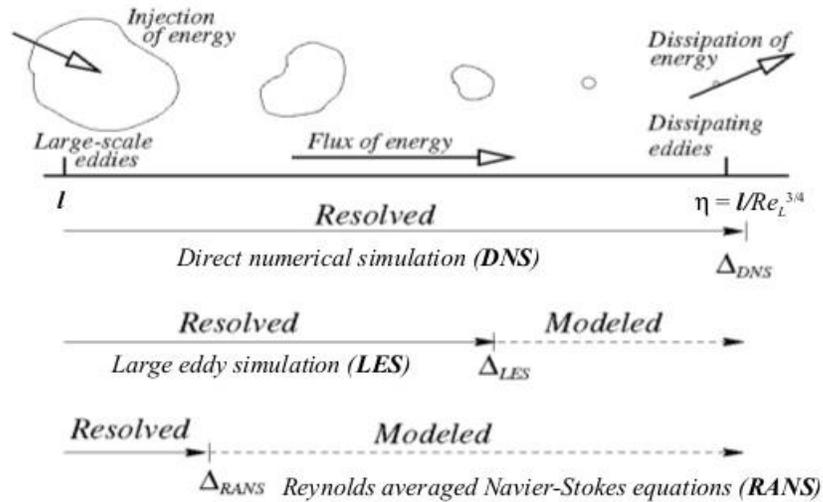


Figura 21 Diferencias entre cada uno de los modelos de turbulencia y sus grados de desarrollo [28].

6.4.2. MODELOS RANS

Los modelos RANS parten de la descomposición de Reynolds:

$$u_i = \bar{u}_i + \dot{u}_i$$

$$p = \bar{p} + \dot{p}$$

$$\rho = \bar{\rho} + \dot{\rho}$$

$$\theta = \bar{\theta} + \dot{\theta}$$

Que reemplazando en la ecuación original de Navier-Stokes se obtiene la siguiente ecuación:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \bar{u}_{i,j} \right) = -\bar{p}_{,i} + \mu \bar{u}_{i,jj} + (R_{ij})_{,j}$$

Donde ese nuevo termino que aparece R_{ij} , es denominado el tensor de esfuerzos de Reynolds y se define de la siguiente forma:

$$R_{ij} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{\dot{u}_1^2} & \overline{\dot{u}_1 \dot{u}_2} & \overline{\dot{u}_1 \dot{u}_3} \\ \overline{\dot{u}_1 \dot{u}_2} & \overline{\dot{u}_2^2} & \overline{\dot{u}_2 \dot{u}_3} \\ \overline{\dot{u}_1 \dot{u}_3} & \overline{\dot{u}_2 \dot{u}_3} & \overline{\dot{u}_3^2} \end{bmatrix}$$

La manera de estudiar este tensor y obtener sus valores abre el campo de estudio a los modelos de turbulencia que se manejan en diversos softwares de simulación, donde cada uno de estos tiene ciertas características que lo hacen idóneos para ciertas aplicaciones. Los modelos RANS más utilizados y demás características se pueden observar en la siguiente tabla.

| Modelo | Ventajas | Desventajas |
|-----------------------------|--|--|
| Modelo de longitudes mixtas | <ul style="list-style-type: none"> • Fácil de implementar, requiere menos recursos de computo. • Bien establecido. • Adecuado para capas de cizalla delgada (ej. Jets, velas). | <ul style="list-style-type: none"> • Incapaz para flujos con separación/recirculación. |
| Spalart - Allmaras | <ul style="list-style-type: none"> • El cálculo algebraico de la escala de longitud proporciona cálculos económicos. • Buenos resultados en flujos con gradientes de presión adversa. • Adecuado para aerodinámica externa. | <ul style="list-style-type: none"> • Definición de escala de longitud difícil dado geometrías complejas. |
| Estándar $k - \varepsilon$ | <ul style="list-style-type: none"> • Sólo necesita suministrar condiciones iniciales y/o de frontera. • Funciona bien para muchos flujos industriales relevantes. • Modelo más validado. | <ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento extremadamente bajo en flujos con gradientes de presión adversa que conducen a separación/recirculación. |
| Wilcox $k - \omega$ | <ul style="list-style-type: none"> • La integración de la solución del flujo a la pared no requiere funciones de amortiguación extra para regímenes de Reynolds bajos. • Condiciones de frontera turbulentas prescritas en la pared ($k = 0, \omega \rightarrow \infty$). | <ul style="list-style-type: none"> • La predicción de la separación es temprana y excesiva. |
| SST $k - \omega$ | <ul style="list-style-type: none"> • La mezcla de funciones permite usar el modelo $k - \omega$ | <ul style="list-style-type: none"> • Las funciones adicionales incrementan la |

cerca del muro y $k - \epsilon$ en una región completamente turbulenta lejos del muro.

- Excelente certeza para flujos con o sin gradientes de presión adversa.

complejidad y los recursos computacionales requeridos.

Tabla 3 Cuadro comparativo de los distintos modelos de turbulencia RANS [23]

6.4.3. ENMALLADO

El método de elementos finitos es una herramienta poderosa y versátil que permite hacer análisis de varios fenómenos físicos. Pero al ser una solución discreta depende del proceso de discretización para obtener resultados óptimos. Este proceso de discretización de una superficie es llamado enmallado y de acuerdo a la calidad de este proceso depende la calidad de los resultados de un método numérico como lo son los elementos finitos.

6.4.3.1. TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY

Muchos generadores de malla tienen como objetivo generar una malla triangular, esto se hace generando los nodos y conectando los puntos para generar triángulos.

Existe un esquema de triangulación llamado la triangulación Delaunay. Este esquema de triangulación es considerado como el óptimo para el método de elementos finitos según muchos investigadores. Este esquema maximiza la suma de los ángulos más pequeños de los triángulos.

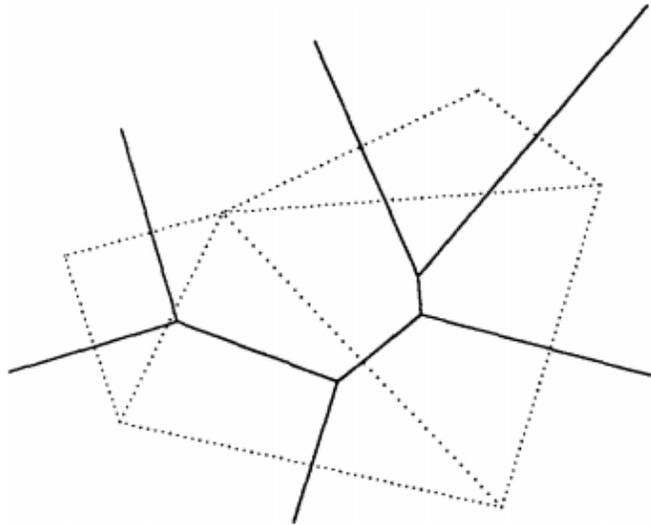


Figura 22 Generación del mosaico de Dirichlet y al mismo tiempo la triangulación de Delaunay (línea punteada) [28].

6.4.3.2. MÉTODOS DE GENERACIÓN DE MALLA 3D

Debido a que los problemas de 2D de elementos finitos son muy limitados, se ve la necesidad de generar métodos para enmallar geometrías en 3D. Estos métodos en la mayoría de sus casos parten de un método de dos dimensiones que se expande

La siguiente tabla muestra un resumen de las características de cada uno de los métodos de enmallado:

| Aproximación | Cuadriláteros | Bloques | Forma del elemento | Control de densidad de malla | Eficiencia de tiempo |
|---------------------------|---------------|---------|-------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Descomposición Topológica | No | No | Pobre | No | $O(N^2)$ |
| Conexión de nodo | Si | No | 2D Buena 3D Aceptable | Si | $O(N)$ |
| Basado en cuadrícula | Si | Si | Excelentes elementos internos | Si | $O(N)$ |
| Descomposición Geométrica | Si | No | 2D Buena 3D Desconocida | Si | Desconocida |

Tabla 4 Cuadro comparativo de las distintas aproximaciones de enmallado [23]

6.5. ANÁLISIS MATEMÁTICO DE UN ROV

Un ROV es un objeto de estudio complicado debido a la fuerte interacción que tiene con el fluido y como este último altera la dinámica del vehículo. Por esto a la hora de analizar un ROV hay tener en cuenta aspectos como la flotabilidad, la estabilidad, la cinética del vehículo y los coeficientes de arrastre que posee.

6.5.1. FLOTABILIDAD

Se puede saber de manera intuitiva que los objetos bajo el agua o cualquier líquido son más ligeros, e incluso algunos materiales flotan en el agua, como es el caso de algunas maderas.

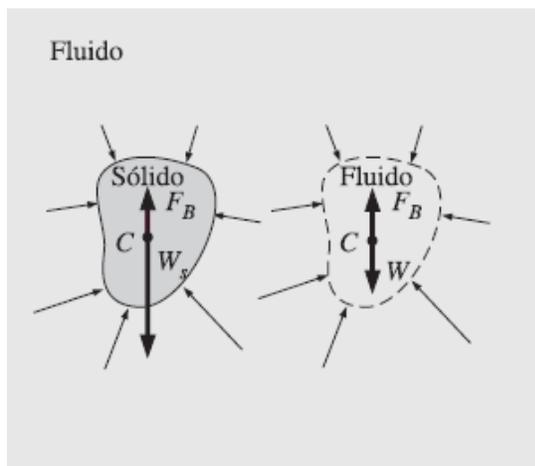


Figura 23 Explicación del fenómeno de flotación [29].

Este fenómeno se debe a la fuerza de flotación y la manera de calcular esta fuerza viene bajo la siguiente expresión [29]:

$$F_B = \rho_f g V$$

Donde:

F_B = Fuerza de flotación

g = Gravedad

V = Volumen desplazado

Para el caso de un ROV lo ideal es que la fuerza de flotación sea igual al peso del vehículo esto con el fin de que las fuerzas netas sobre el cuerpo sean cero y el vehículo no se eleve o descienda a menos que se le aplique una fuerza externa, esto ayuda a reducir los requerimientos del actuador y facilita el modelo dinámico [29].

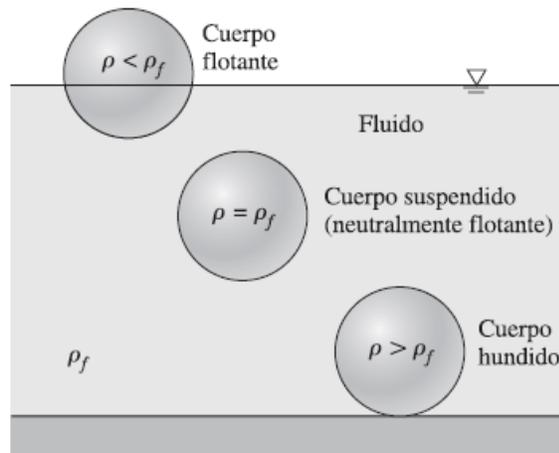


Figura 24 Distintos estados de cuerpos sumergidos [29].

6.5.2. ESTABILIDAD

A partir del fenómeno de flotación se origina otro fenómeno conocido como estabilidad. La estabilidad es la relación entre las fuerzas de hidrostática ejercidas en el cuerpo y capacidad de volver a un punto de equilibrio. La estabilidad de un cuerpo está dada por la ubicación de dos fuerzas sobre un cuerpo sumergido ya sea parcial o totalmente, estas fuerzas son el peso y la fuerza de flotación. La ubicación puntual del peso está dada en el denominado centro de masa y depende de las densidades y distribución de materiales ajenos al fluido que rodea al cuerpo. Mientras que la ubicación de la fuerza de flotación es una propiedad netamente de la geometría del cuerpo y corresponde a lo que se determina como centro de volumen [29].

Existen tres maneras de clasificar y determinar la estabilidad de un cuerpo totalmente sumergido. La primera es cuando un cuerpo es estable, esto sucede cuando el centro de masa esta debajo del centro de volumen. La segunda es cuando los centros de masa y de volumen están en el mismo punto, esto garantiza que el cuerpo sea neutramente estable. La tercera sucede cuando el centro de masa se encuentra arriba del centro de volumen y en este caso el cuerpo se encuentra inestable.

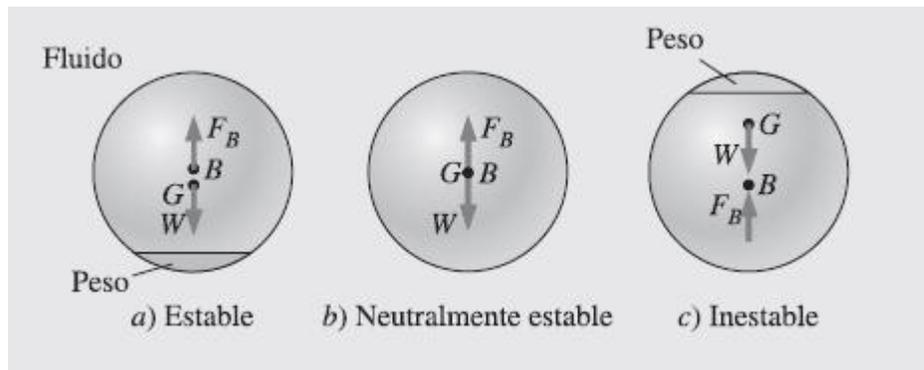


Figura 25 Estabilidad para un cuerpo sumergido [29].

Todo cuerpo tiende a llegar a un estado de estabilidad. Por esto un cuerpo inestable rotara hasta alcanzar a un punto de estabilidad por medio del momento de restitución. Para un cuerpo neutramente estable la posición angular se mantendrá sin cambio hasta la aplicación de un momento o fuerza externa.

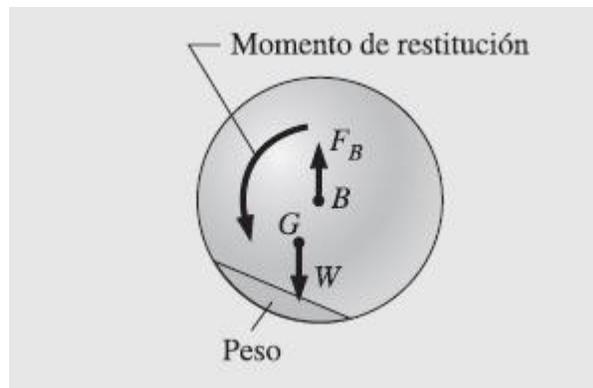


Figura 26 Aparición del momento de restitución [27].

Con esto se determina que para aumentar la estabilidad de un ROV hay que aumentar el peso en la parte baja de este sin perder la propiedad de flotabilidad neutra como es el caso del OpenROV.



Figura 27 Pesos ubicados en la parte baja para aumentar estabilidad [27].

6.5.3. CINÉTICA DE UN ROV

Un vehículo subacuático estándar posee los 6 grados de libertad máximos que puede tener un cuerpo (“surge”, “sway”, “heave”, “yaw”, “pitch” y “roll”), en donde los movimientos traslacionales son “surge” para desplazamiento frontal, “sway” para el desplazamiento lateral y “heave” para el movimiento vertical. En cuanto a los movimientos rotacionales están el “yaw” para rotación en el eje vertical, el “roll” para la rotación en el eje frontal y el “pitch” para la rotación en el eje lateral.

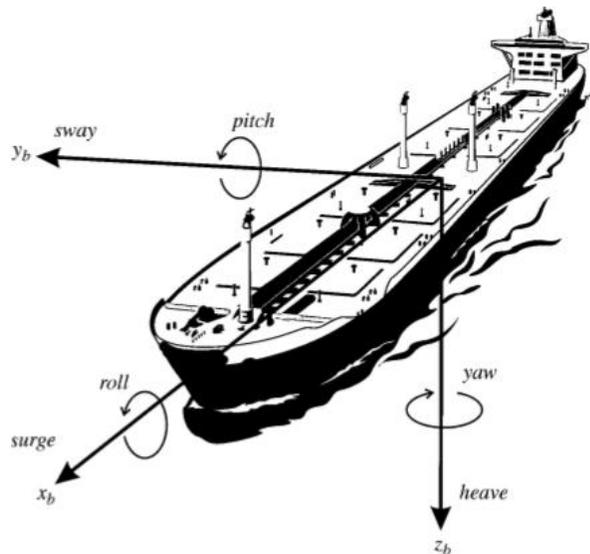


Figura 28 Grados de libertad de un vehículo acuático con sus respectivos ejes coordenados [1]

La cinética correspondiente a un vehículo acuático, parte de resolver las ecuaciones de movimiento de Newton-Euler para un cuerpo rígido de 6 grados de libertad. Si se analiza tomando como punto de origen el centro de gravedad, las ecuaciones que rigen el sistema son:

$$\sum F_{xb} = m(\dot{u} + qw - rv)$$

$$\sum F_{yb} = m(\dot{v} + ru - pw)$$

$$\sum F_{zb} = m(\dot{w} + pv - qu)$$

$$\sum M_{xb} = \dot{p}I_x + qr(I_z - I_y) - I_{xz}(\dot{r} + pq) + I_{yz}(r^2 - q^2) + I_{xy}(pr - \dot{q})$$

$$\sum M_{yb} = \dot{q}I_y + I_{xz}(p^2 - r^2) + pr(I_x - I_z) - I_{xy}(\dot{p} + qr) + I_{yz}(qp - \dot{r})$$

$$\sum M_{zb} = \dot{r}I_z + I_{xz}(rq - \dot{p}) + pq(I_y - I_x) - I_{yz}(\dot{q} + pr) + I_{xy}(q^2 - p^2)$$

Donde:

p = Velocidad angular respecto a eje X_b

q = Velocidad angular respecto a eje Y_b

r = Velocidad angular respecto a eje Z_b

u = Velocidad linear respecto a eje X_b

v = Velocidad linear respecto a eje Y_b

w = Velocidad linear respecto a eje Z_b

m = masa del cuerpo

I_x = Inercia en el eje X

I_y = Inercia en el eje Y

I_z = Inercia en el eje Z

I_{xz} = Producto de inercia de los ejes X y Z

I_{xy} = Producto de inercia de los ejes X y Y

I_{yz} = Producto de inercia de los ejes Y y Z

Otra parte esencial de la dinámica de un vehículo subacuático está dada por la hidrodinámica. La flotabilidad se incluye como fuerza externa, la cual se conforma por 3 variables, la densidad “ ρ ”, la gravedad “ g ” y el volumen desplazado “ v ”, donde el producto de estas 3 corresponde a la flotabilidad. Otras fuerzas y momentos importantes que surgen de la interacción fluido-estructura, son las fuerzas de arrastre. En este caso, se calculan por medio de una constante K_d que corresponde al factor influyente por el líquido, la cual se multiplica por el cuadrado de las velocidades y es incluida posteriormente en la matriz de amortiguamiento. Estos dos son incluidos en las sumatorias de fuerzas y momentos que se realiza por el método de Newton-Euler. [1]

El modelo general representado de forma matricial es mostrado a continuación:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}v(v) = \tau_{RB}$$

Donde:

M_{RB} representa la matriz de inercia del sistema de cuerpo rígido

C_{RB} representa la matriz conformada por el vector de Coriolis y el vector Centrípeto

τ_{RB} representa el vector de fuerzas y torques (X, Y, Z, K, M, N)

v representa el vector de velocidades (u, v, w, p, q, r)

6.6. CONTROL DE UN ROV

Los Vehículos Remotamente Operados Comerciales son generalmente manipulados en lazo abierto (es decir, sin retroalimentación en la navegación). A pesar de esto, la implementación de un sistema de control permite la realización de maniobras más avanzadas y de mayor precisión. Un controlador aplicado a un ROV define el rendimiento que este tendrá para realizar diversas tareas. Para desarrollar este controlador se deben tener en cuenta tres factores:

- Se trata de un sistema subactuado, de modo que los grados de libertad a controlar se deben estabilizar a partir de un número menor de actuadores, por lo que se deben complementar entre ellos para lograr ciertos movimientos

- Puede basarse en un modelo de caja negra, gris o blanca. A partir de esto se escoge la técnica de control a aplicar, ya que hay unas que son mejores para trabajar con base en modelo matemático y otras que trabajan mejor con base en datos experimentales
- Se pueden aplicar técnicas tanto lineales como no lineales. En el caso de los ROVs se han venido trabajando en su mayoría técnicas lineales debido a su facilidad. A pesar de esto, la dinámica compleja del vehículo puede complementarse de una mejor manera con un controlador no lineal.

Con lo anterior, los controladores más utilizados en estos vehículos se presentan en el siguiente cuadro comparativo, relacionando las características de cada uno de ellos:

| Controlador | Características |
|------------------------|--|
| PID | Controlador lineal. Fácil de sintonizar, pero es susceptible a perturbaciones |
| Fuzzy | Controlador no lineal. Puede ser combinado con redes neuronales para un mejor desempeño, pero es difícil de sintonizar |
| Modo Deslizante | Controlador no lineal. Responde bien ante perturbaciones, pero requiere modelo matemático |
| LQG | Controlador lineal. Responde bien ante perturbaciones, pero requiere modelo matemático |

Tabla 5 Cuadro comparativo de cada alternativa de controlador [23]

Teniendo en cuenta los objetivos de este proyecto, los dos controladores a profundizar son, Modo deslizante y LQG.

6.6.1. CONTROLADOR DE MODO DESLIZANTE

Salió a la luz en la década de los 70's con una publicación del Ph.D. Vadim Utkin. Está diseñado para utilizarse cuando la señal de control puede variar a altas

frecuencias (lo más cercano posible a cero). Debido a estas altas frecuencias, la superficie deslizante es seguida siempre por un error pequeño. Las perturbaciones externas que actúan en el sistema durante el control deslizante y que a su vez no saturan la acción de control, son completa e instantáneamente rechazadas.

El control SMC Fue originalmente diseñado como una estrategia de movimiento para sistemas dinámicos cuyo comportamiento esencial a lazo abierto podía ser modelado adecuadamente con ecuaciones diferenciales ordinarias. La acción de control se define en el dominio de tiempo continuo. El lazo de retroalimentación resultante es definido también en tiempo continuo y es gobernado por ecuaciones diferenciales ordinarias con zonas discontinuas.

La superficie es definida como:

$$s = \dot{\tilde{\psi}} + 2\lambda\tilde{\psi} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{\psi}(\tau) d\tau$$

Donde $\tilde{\psi} = \psi - \psi_d$ es el seguimiento del error del ángulo Yaw y $\lambda > 0$ es el parámetro de diseño que refleja el ancho de banda del controlador. Para $s = 0$ describe una superficie deslizante con dinámica exponencial estable. Para ello se define una segunda superficie deslizante:

$$s_0 = \tilde{\psi} + \lambda \int_0^t \tilde{\psi}(\tau) d\tau$$

A continuación, se presenta una interpretación gráfica de la superficie deslizante $s = s_0 + \lambda s_0$ y con frontera de $\phi > 0$:

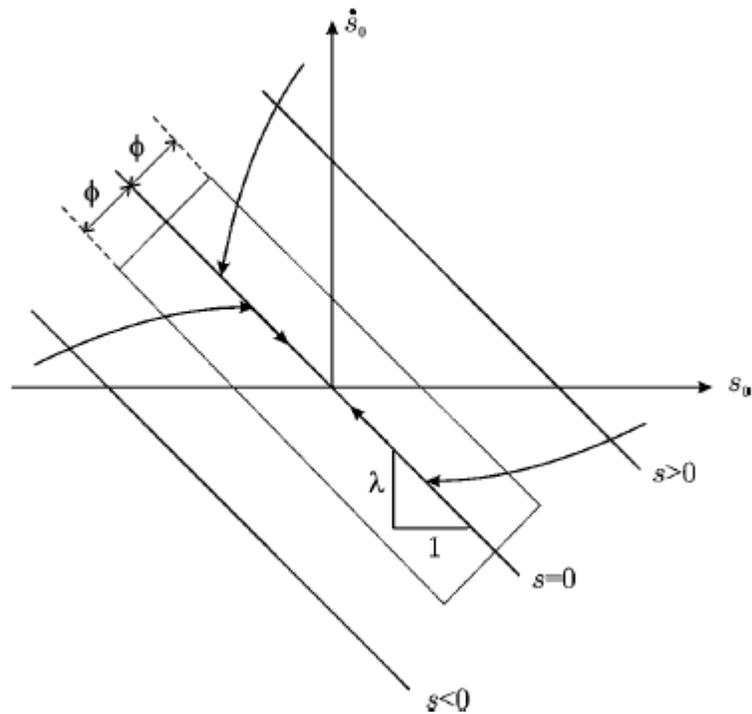


Figura 29 Definición de la superficie deslizante de un control de modo deslizante [1]

De este modo, se puede escribir:

$$s = s_0 + \lambda s_0 = 0$$

Por tanto, s_0 y $\tilde{\psi}$ convergen exponencialmente a cero siempre y cuando el sistema lineal:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\psi}} \\ \dot{s}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & 1 \\ 0 & -\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\psi} \\ s_0 \end{bmatrix}$$

Tenga dos polos reales en $-\lambda$. Esto asegura que el seguimiento del error $\tilde{\psi}$ tienda a cero en $s = 0$. Del mismo modo, el objetivo del control se reduce a encontrar un lazo de control no lineal la cual asegure que:

Se puede observar que en una trayectoria que inicia con $s > 0$, se desplazará a través de la superficie deslizante $s = 0$. En este mismo valor se alcanza la trayectoria que continuará el movimiento en la recta correspondiente a $s = 0$ a través del punto de equilibrio $s_s = 0$. Un comportamiento similar se puede observar cuando se inicia con un valor negativo de s .

6.6.2. CONTROLADOR LINEAL CUADRÁTICO

Salió a la luz en la década de los 60's con el trabajo realizado por Athans y Falb. Trata con el problema de encontrar un lazo de control para un sistema dado a partir del criterio de optimización. Normalmente se basa en una función de costo que depende de las variables de control y estado. Se compone de una serie de ecuaciones diferenciales que minimizan el costo funcional y pueden ser derivadas utilizando el principio de máximos de Pontryagin's (condición necesaria) o resolviendo la ecuación de Hamilton-Jacobi-Bellman (condición suficiente).

Un problema fundamental de diseño es el del regulador, donde es necesario que las salidas $y \in \mathbb{R}^m$ del sistema sean reguladas a cero o a un valor constante mientras se asegura que satisfagan las especificaciones de respuesta transitoria. Un regulador lineal cuadrático puede ser diseñado considerando el modelo en espacio de estados.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}$$

Donde $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^r$. En orden de diseñar un controlador óptimo, el sistema (A, B, C) debe ser controlable mientras la observabilidad es necesaria sólo si alguno de los estados debe ser estimado. La controlabilidad para sistemas LTI (lineales invariantes en el tiempo) está dada por:

“El estado y la matriz de entrada (A, B) debe satisfacer la condición de controlabilidad para asegurar que exista un control $u(t)$ que pueda llevar cualquier estado arbitrario $x(t_0)$ a otro estado arbitrario $x(t_1)$ para $t_1 > t_0$. La condición de controlabilidad por Gelb requiere que la matriz:

$$C = [B|AB| \dots |(A)^{n-1}B]$$

Sea de un rango completo de filas de tal forma que exista una inversa”.

El lazo de control para el sistema presentado en espacio de estados se encuentra a partir de minimizar el costo de la función cuadrática:

$$J = \min_u \left\{ \frac{1}{2} \int_0^T (y^T Q y + u^T R u) dt = \frac{1}{2} \int_0^T (x^T C^T Q C x + u^T R u) dt \right\}$$

Donde $R = R^T > 0$ y $Q = Q^T \geq 0$ son las matrices de peso. La solución en estado estable para este problema está dada por:

$$\begin{aligned}u &= -R^{-1}B^T P_\infty x \\ P_\infty A + A^T P_\infty - P_\infty B R^{-1} B^T P_\infty + C^T Q C &= 0\end{aligned}$$

Donde $P_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} P(t)$. El lazo de control óptimo se puede representar de la siguiente forma:

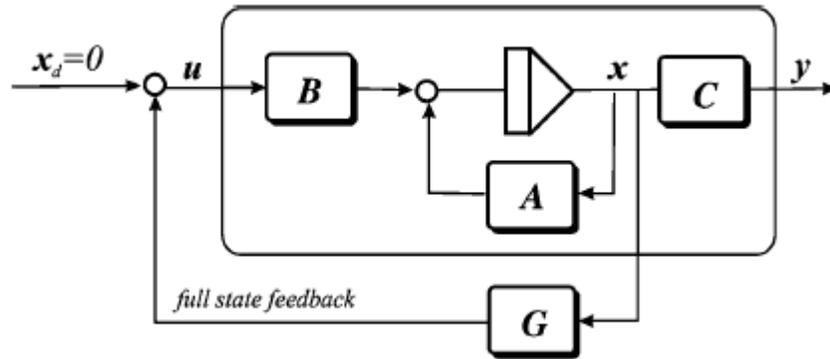


Figura 30 Esquema de control de un modo deslizante de un controlador lineal cuadrático [1]

7. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, se propone una serie de actividades que permitan el cumplimiento de cada objetivo. Además, se incluyen las tareas que se desempeñan como parte importante del trabajo previo.

1. Buscar bibliografía acerca de vehículos subacuáticos remotamente operados, en la que se incluyan las características, clasificaciones, configuraciones y cualquier otra información que sea de utilidad para realizar una selección adecuada del vehículo.
2. Seleccionar un modelo comercial de ROV con base en la búsqueda realizada, analizando la complejidad de maniobra, configuración de navegación, clase de ROV, presupuesto e instrumentación incluida.
3. Ensamblar el ROV adquirido siguiendo los instructivos establecidos por la empresa proveedora del vehículo, incluyendo la sensórica necesaria para el control a realizar.
4. Modelar el ROV aplicando los conceptos adquiridos en el área de modelamiento de sistemas en las diferentes asignaturas cursadas a través de la carrera. Se realizará el modelo dinámico del vehículo, al cual se le incluirá la dinámica del actuador. Como apoyo a este proceso, se consultará también en literatura especializada que ayude con el proceso de obtención de las ecuaciones que rigen el sistema.
5. Realizar una serie de simulaciones CFD para el cálculo de los parámetros de hidrodinámica causados por la interacción fluido estructura. Para esto se utiliza el software COMSOL®.
6. Seleccionar las estrategias de control a implementar basándose en la búsqueda bibliográfica previa.
7. Desarrollar los controladores previamente seleccionados, implementándolos en una simulación del modelo no lineal.
8. Validar los controladores experimentalmente siguiendo el plan de pruebas en la siguiente sección.

7.1. PLAN DE PRUEBAS

Las pruebas de validación del proyecto se dividen en dos. La primera para validar el modelo del ROV y la segunda para validar el rendimiento de los controladores implementados.

7.1.1. PRUEBAS PARA VALIDACIÓN DE MODELO

Los aspectos principales de esta etapa son identificar los actuadores del vehículo y validar los coeficientes de arrastre obtenidos en las simulaciones. El esquema de pruebas es el siguiente.

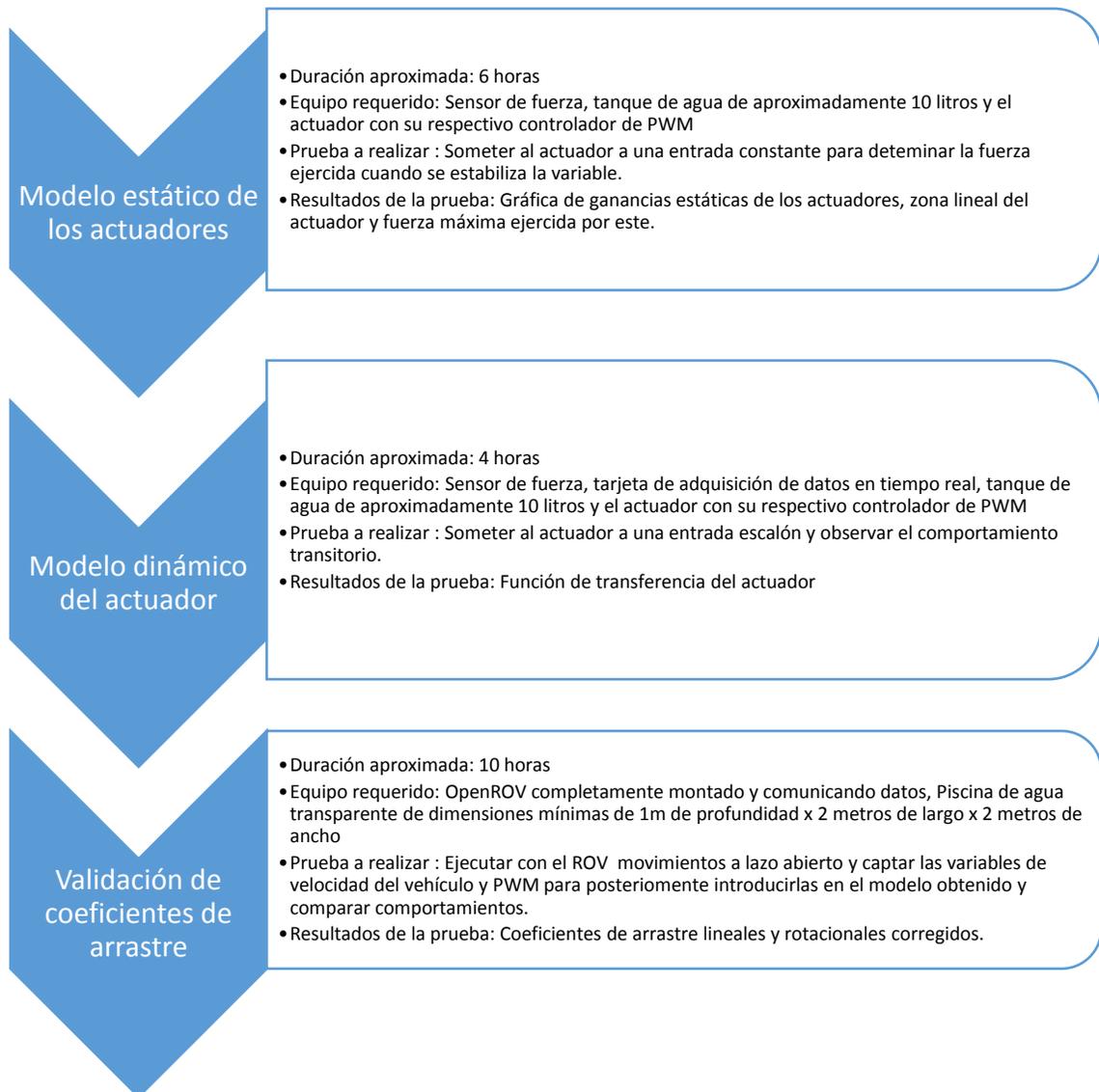


Figura 31 Plan de pruebas para validación del modelo

7.1.2. PRUEBAS PARA VALIDACIÓN DE CONTROLADORES

Después de diseñar los controladores es necesario validar su funcionamiento respecto a la simulación, utilizando el siguiente diagrama.

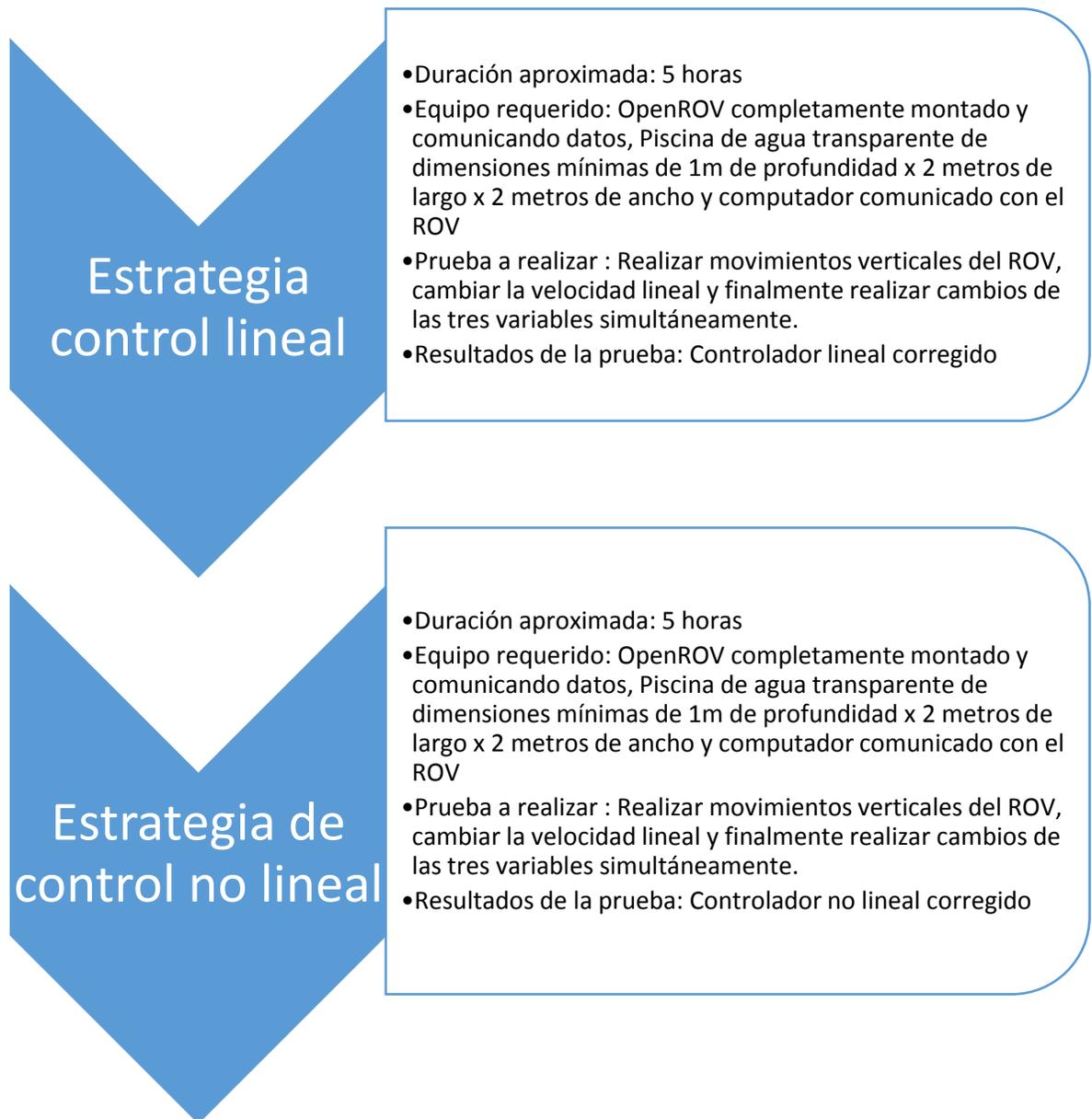


Figura 32 Plan de pruebas para validación de controladores

8. RESULTADOS ESPERADOS

- Vehículo subacuático remotamente operado ensamblado.
- Modelo matemático del ROV comercial seleccionado.
- Valores de coeficientes de arrastre para los 6 grados de libertad del vehículo, validados en la etapa de pruebas previa al controlador.
- Dos controladores ajustados al vehículo bajo estudio y evaluados por medio de simulación con base en el modelo matemático.
- Curvas del sistema compensado con la planta simulada y con la planta real.
- Controlador seleccionado más eficiente (comparación de tiempo de respuesta, sobrepaso) entre los diseñados.

9. CRONOGRAMA

Para la presentación del cronograma de trabajo, se realizaron cuatro subdivisiones temporales, de modo que se facilite el entendimiento del mismo. Estas son:

PERIODO 2017-2 (PRIMERA FASE)

| | | Periodo 2017-2 | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Actividad | Semana | 24/07-30/07 | 31/07-06/08 | 07/08-13/08 | 14/08-20/08 | 21/08-27/08 | 28/08-03/09 | 04/09-10/09 | 11/09-17/09 | 18/09-24/09 | 25/09-01/10 |
| Búsqueda bibliográfica ROVs | | | | | | | | | | | |
| Selección del ROV | | | | | | | | | | | |
| Ensamblado ROV | | | | | | | | | | | |
| Modelado ROV | | | | | | | | | | | |
| Simulación CFD | | | | | | | | | | | |
| Búsqueda bibliográfica controladores | | | | | | | | | | | |

Figura 33 Primera parte del cronograma

PERIODO 2017-2 (SEGUNDA FASE)

| | | Periodo 2017-2 | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Actividad | Semana | 02/10-08/10 | 09/10-15/10 | 16/10-22/10 | 22/10-28/10 | 29/10-05/11 | 06/11-12/11 | 13/11-19/11 | 20/11-26/11 | 27/11-03/12 | 04/12-10/12 |
| Búsqueda bibliográfica ROVs | | | | | | | | | | | |
| Selección del ROV | | | | | | | | | | | |
| Ensamblado ROV | | | | | | | | | | | |
| Modelado ROV | | | | | | | | | | | |
| Simulación CFD | | | | | | | | | | | |
| Búsqueda bibliográfica controladores | | | | | | | | | | | |

Figura 34 Segunda parte del cronograma

PERIODO 2018-1 (PRIMERA FASE)

| | | Periodo 2018-1 | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Actividad | Semana | 08/01-14/01 | 15/01-21/01 | 22/01-28/01 | 23/01-04/02 | 05/02-11/02 | 12/02-18/02 | 19/02-25/02 | 26/02-04/03 | 05/03-11/03 | 12/03-18/03 |
| Simulación CFD | | | | | | | | | | | |
| Búsqueda bibliográfica controladores | | | | | | | | | | | |
| Desarrollo controlador 1 | | | | | | | | | | | |
| Desarrollo controlador 2 | | | | | | | | | | | |
| Simulación controladores | | | | | | | | | | | |
| Validación experimental | | | | | | | | | | | |

Figura 35 Tercera parte del cronograma

PERIODO 2017-2 (SEGUNDA FASE)

| | | Periodo 2018-1 | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Semana | 19/03- 25/03 | 26/03- 01/04 | 02/04- 08/04 | 09/04- 15/04 | 16/04- 22/04 | 23/04- 29/04 | 30/04- 06/05 | 07/05- 13/05 | 14/05- 20/05 | 21/05- 27/05 |
| Actividad | | | | | | | | | | | |
| Simulación CFD | | | | | | | | | | | |
| Búsqueda bibliográfica controladores | | | | | | | | | | | |
| Desarrollo controlador 1 | | | | | | | | | | | |
| Desarrollo controlador 2 | | | | | | | | | | | |
| Simulación controladores | | | | | | | | | | | |
| Validación experimental | | | | | | | | | | | |

Figura 36 Cuarta parte del cronograma

10. PRESUPUESTO

| Elemento | Cantidad | Valor (COP) |
|--|----------|-------------------|
| Vehículo subacuático remotamente operado modelo OpenROV: | | |
| - Peso: 2.6Kg | | |
| - Dimensiones: 30cm largo x 20cm ancho x 15cm alto | | |
| - Batería recargable | 1 | 5'400.000,00 |
| - Profundidad máxima: 100m | | |
| - Velocidad máxima: 2 nodos | | |
| - Cámara | | |
| - Sensores de navegación | | |
| - Tarjeta Beagle Board | | |
| Software matemático | 1 | 1'875.000,00 |
| Software de simulación | 1 | 5'085.000,00 |
| Software CAD | 1 | 11'.985.000,00 |
| Elementos varios ensamblaje | 1 | 45.000,00 |
| Costos de realización de pruebas | NA | 450.000,00 |
| TOTAL | | 24'840.000 |

Tabla 6 Presupuesto del proyecto [23]

11. ENSAMBLE DEL PROTOTIPO

Se realizó el ensamble del OpenROV 2.8 siguiendo los instructivos establecidos por la empresa proveedora. Las actividades realizadas fueron:

- Siguiendo la guía 1 del instructivo, se realizó la unión de las piezas de acrílico utilizando como pegante el cemento acrílico. Con esto se obtuvieron las estructuras que conforman el vehículo:

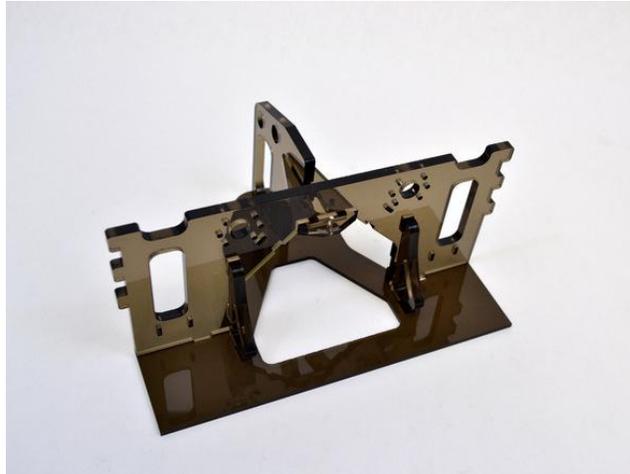


Figura 37 Estructura base de acrílico [30]

- En la siguiente guía, se realiza el respectivo sellamiento de las tapas del domo electrónico y se instaló el puerto de conexión para:

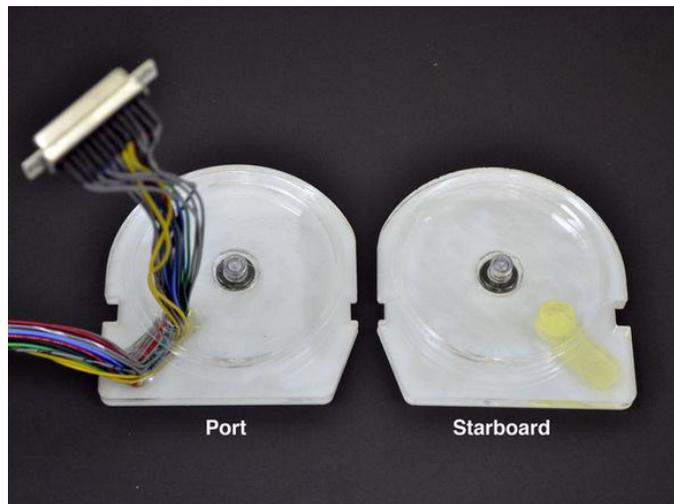


Figura 38 Tapas del domo electrónico selladas [30]

- La tercera guía corresponde al ensamble de los componentes internos del domo electrónico, incluyendo el sistema de comunicación que sale al cordón umbilical:



Figura 39 Ensamble de sección electrónica

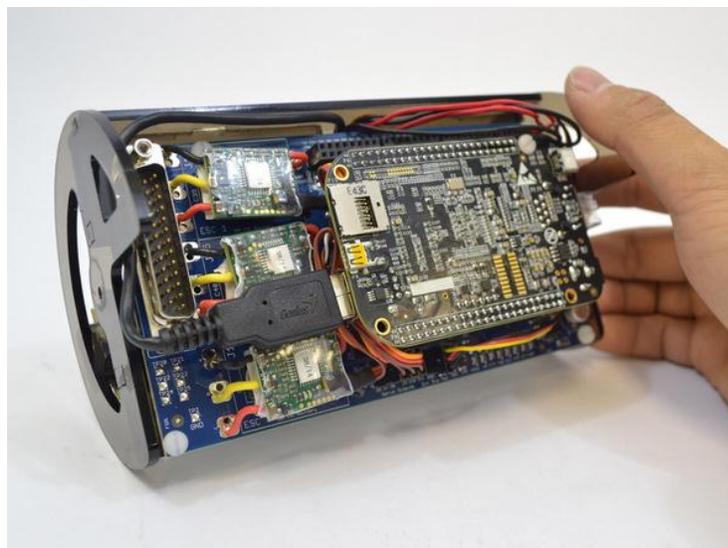


Figura 40 Domo electrónico ensamblado [30]

- Pasando a la cuarta guía, se lleva a cabo el montaje de los actuadores, en este caso, motores brushless DST-700. Además, se realiza el cableado interno y la conexión al domo electrónico:

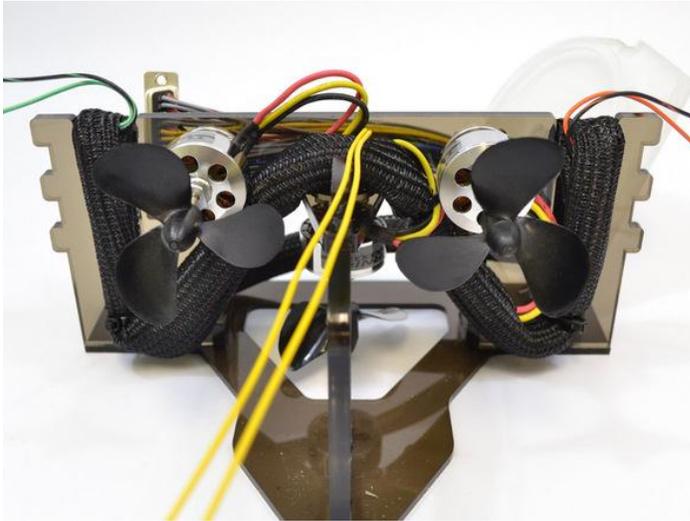


Figura 41 Actuadores del vehículo montados y conectados [30]

- Para terminar el ensamblaje del vehículo, se arman los tubos de las baterías y se calibran los laser. Con esto se puede realizar el ensamble final de todas las partes del ROV:



Figura 42 Medida de altura del núcleo electrónico del ROV

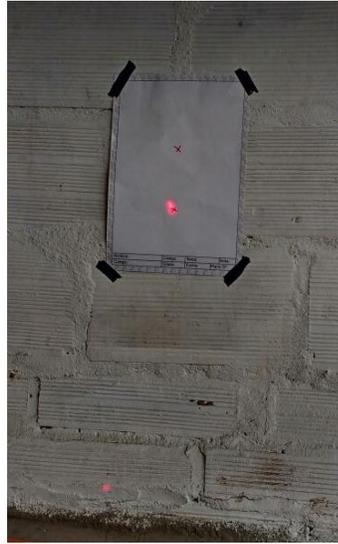


Figura 43 Calibración con marcas realizadas



Figura 44 Vehículo Ensamblado

- Finalmente, se realiza el sellado del vehículo según lo explicado en la sexta guía y se prueba la comunicación del vehículo para verificar la conexión entre el ROV y el computador:



Figura 45 Prueba de conexión ROV [30]

A partir de lo realizado, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- No se puede garantizar el periodo de muestreo por medio de la comunicación debido a la inestabilidad que presenta.
- El sensor IMU (unidad de medición inercial) ya cuenta internamente con un filtro para eliminar el ruido.
- El sistema fue satisfactoriamente sellado y se comprobó el correcto funcionamiento del vehículo
- El método de comunicación del ROV redujo el diámetro del cordón umbilical lo que reducirá las fuerzas de arrastre.

12. SIMULACIONES CFD

Para poder obtener los parámetros deseados de una simulación CFD se siguió la siguiente metodología.

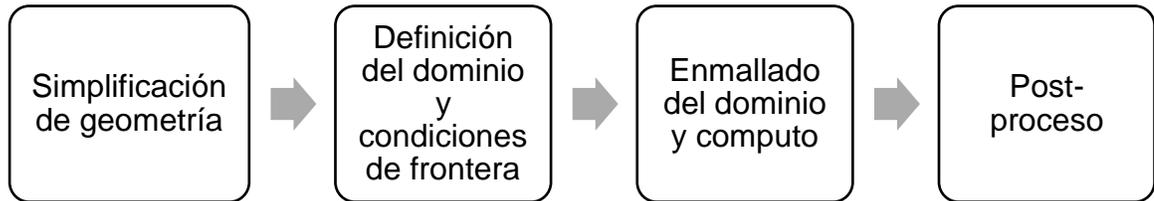


Figura 46 Metodología utilizada para la simulación CFD

12.1. SIMPLIFICACIÓN DE LA GEOMETRIA

El primer paso para poder realizar una simulación de CFD o cualquier estudio de elementos finitos es simplificar la geometría.

Esta simplificación consiste en eliminar perforaciones de tamaños pequeños, redondeos de diámetros reducidos y unificar a una sola pieza si el modelo lo permite.

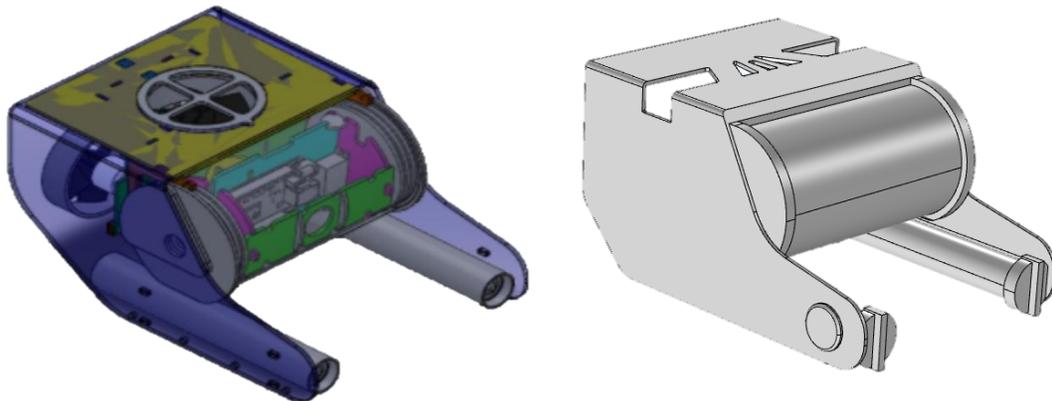


Figura 47 Vista isométrica de la geometría simplificada del ROV

Donde esta es la vista frontal del vehículo.

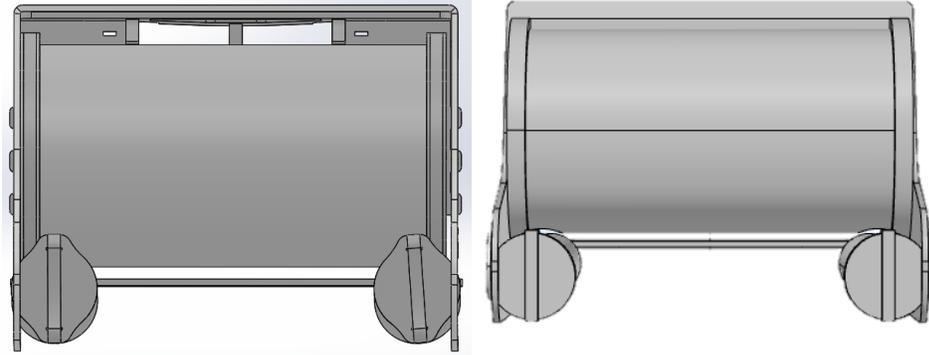
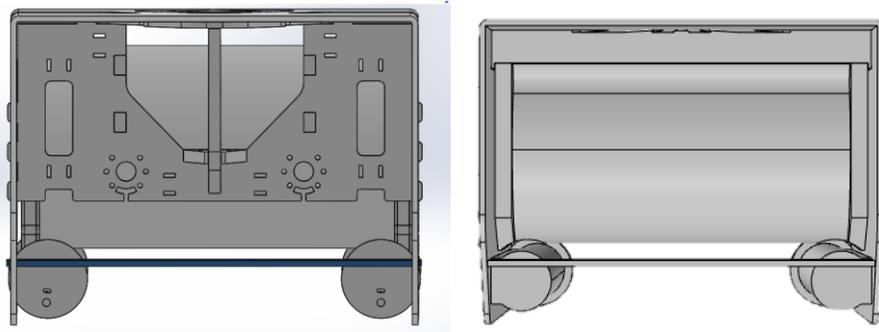


Figura 48 Vista frontal de la geometría simplificada del ROV

Esta es la vista trasera.



Y esta la vista superior.

Figura 49 Vista trasera de la geometría simplificada del ROV

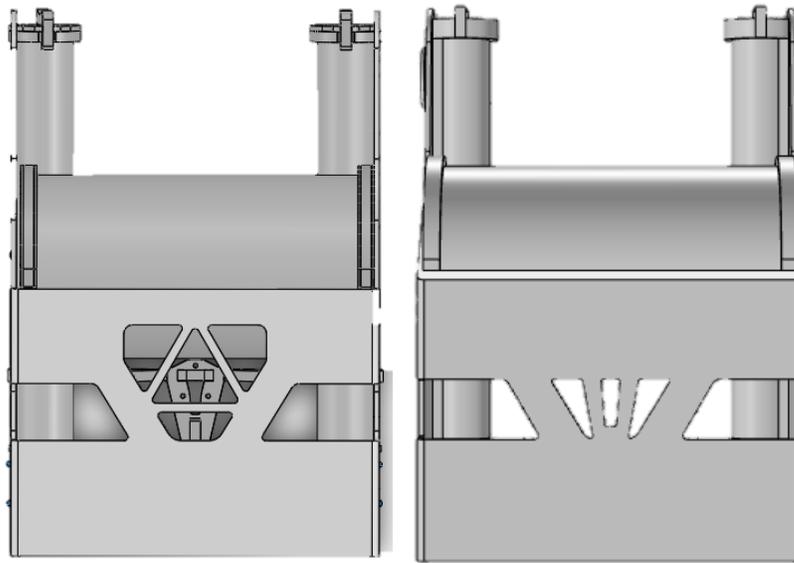


Figura 50 Vista superior de la geometría simplificada del ROV

12.2. DEFINICIÓN DEL DOMINIO Y CONDICIONES DE FRONTERA

De acuerdo con una tesis de maestría planteada para el análisis del arrastre de un ROV es la siguiente para un flujo lineal [35].

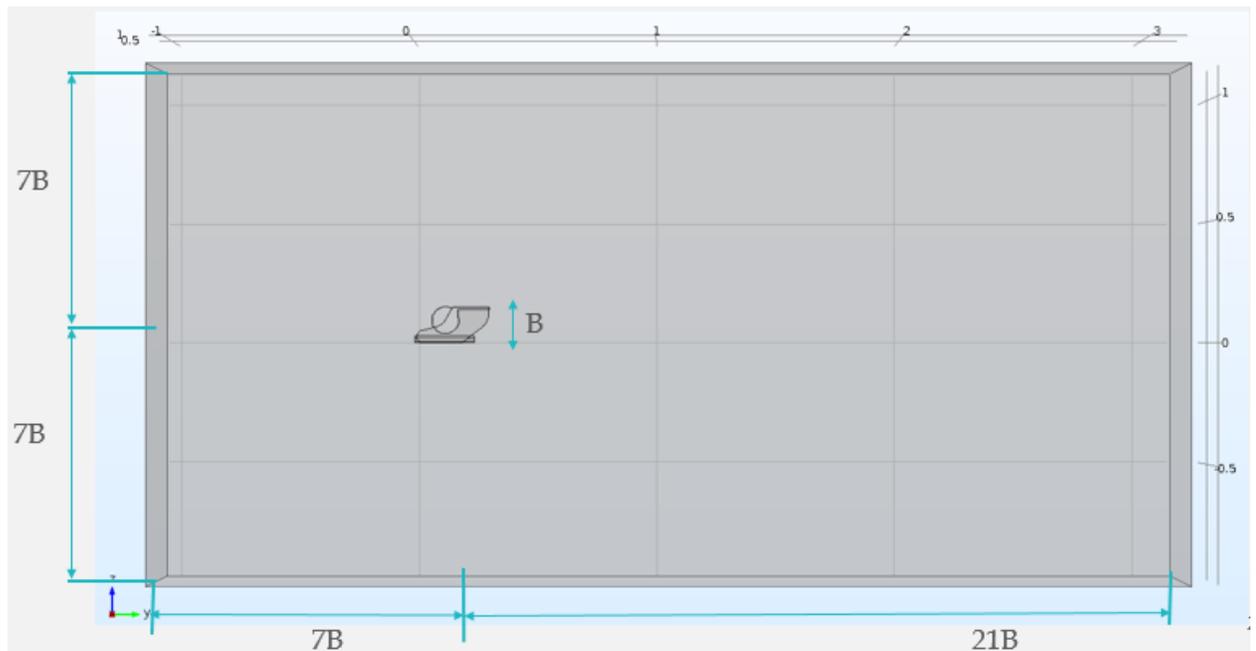


Figura 51 Dimensiones del dominio computacional para un flujo lineal

Para el caso de las dimensiones del dominio del análisis rotativo se asignaron las siguientes dimensiones donde B es el alto del vehículo.

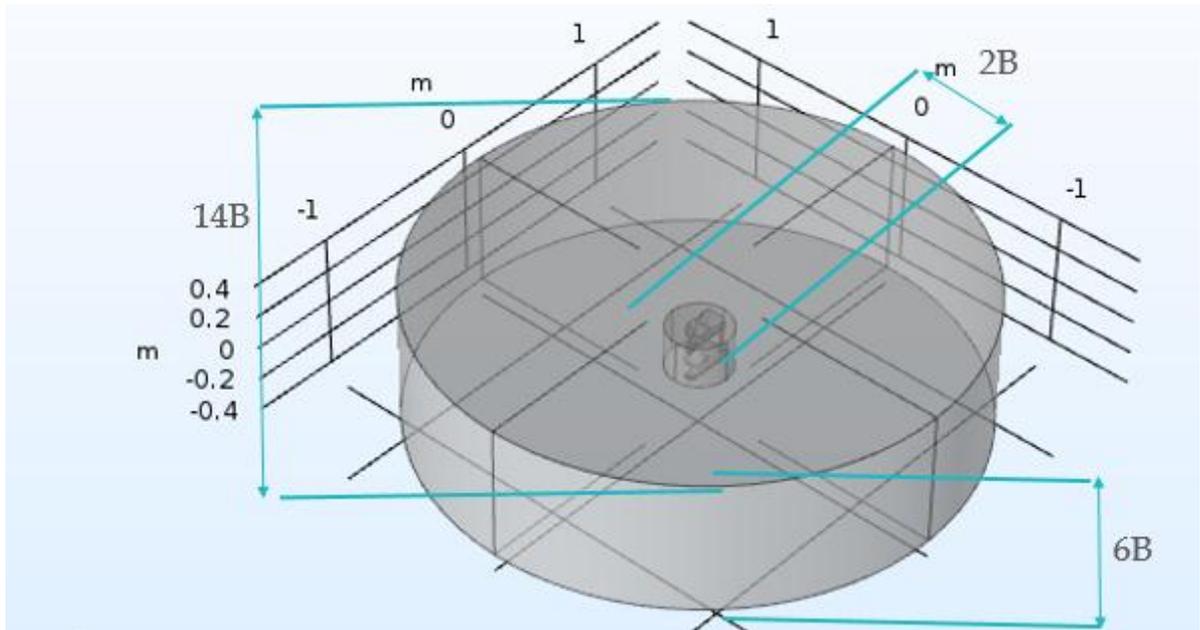


Figura 52 Dimensiones del dominio computacional para la rotación del ROV

La idea de estas dimensiones es capturar los fenómenos de la estela sin ninguna pérdida de información. Las dimensiones del dominio no son las únicas características para garantizar la fiabilidad del modelo, sino que las condiciones de frontera son cruciales para obtener resultados confiables.

Las condiciones de frontera son características atribuidas a segmentos de la geometría o del dominio que permiten conocer el comportamiento de la física en ese segmento. Las condiciones utilizadas para las simulaciones fueron:

- Muro: Zona donde el fluido tiene velocidad cero y se redirecciona el flujo
- Inlet: Zona donde se genera una entrada de fluido ya sea definiendo caudal o definiendo presión. El valor de velocidad en este caso es de 1 m/s.
- Outlet: Zona donde se permite la salida de un fluido ya sea asignando caudal o presión. La presión de salida es de 0 Pa.
- OpenBoundary: Zona donde el esfuerzo viscoso es cero y asimila una pared de profundidad infinita.
- Rotating Wall: Muro que sigue conservando la zona de velocidad cero, pero relativo a un fluido en rotación. La velocidad asignada es de 60 RPM.
- Rotating Domain: Zona volumétrica del fluido con una velocidad angular respecto a un eje.

A continuación, se observan las condiciones de frontera para el caso de flujo lineal:

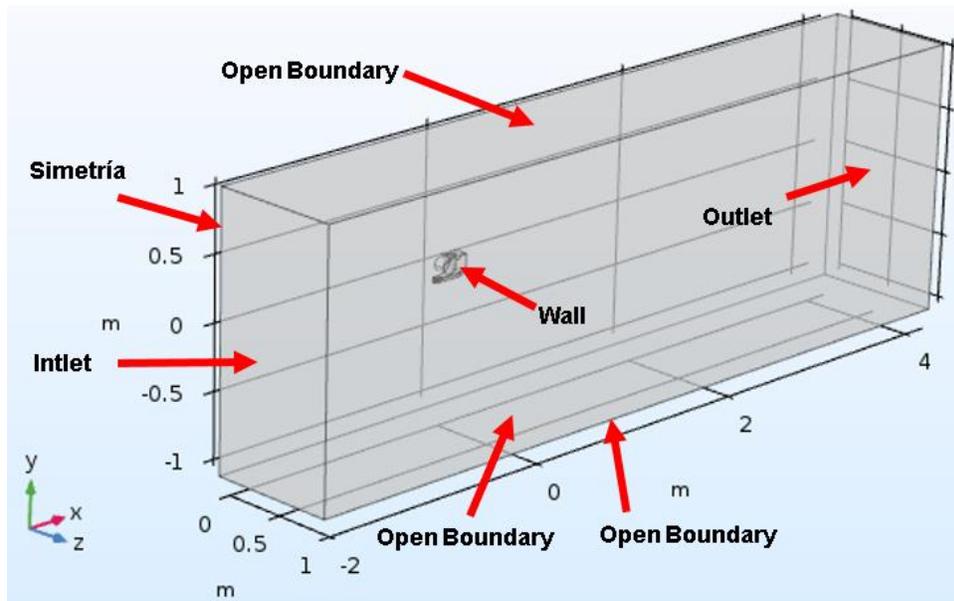


Figura 53 Condiciones de frontera para los arrastres lineales

Las condiciones de frontera establecidas para el cálculo de coeficientes de arrastre rotacional son las siguientes:

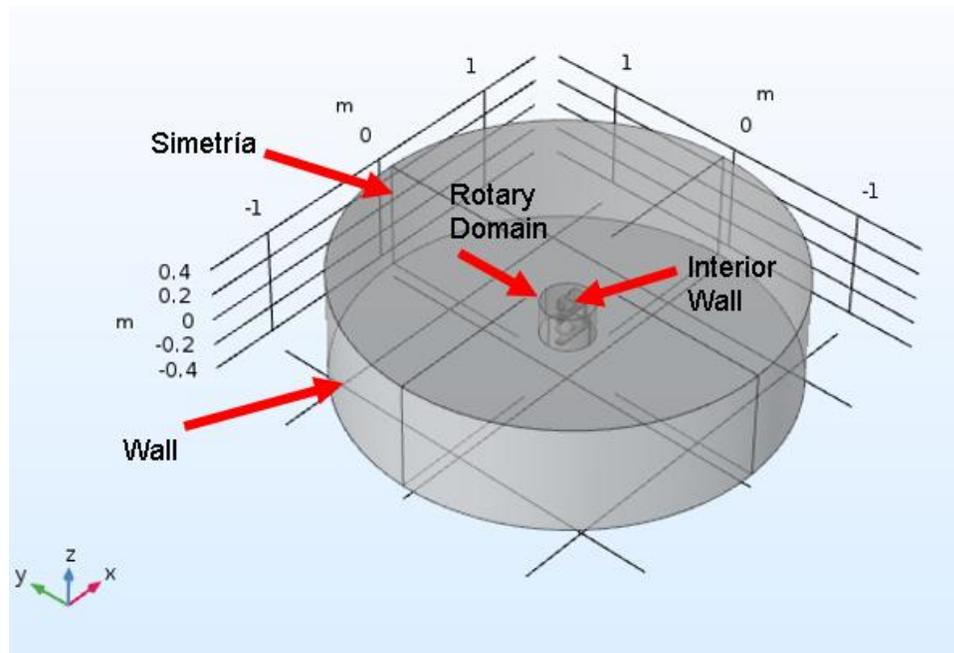


Figura 54 Condiciones de frontera para los arrastres rotacionales

12.3. ENMALLADO DEL DOMINIO Y COMPUTO

Para el enmallado del sistema se modificó el enmallado por defecto del sistema y se añadieron las siguientes características:

- Zona de prismas para aumentar la calidad de la malla.
- Zona de densidad alta en el vehículo y la zona de la estela

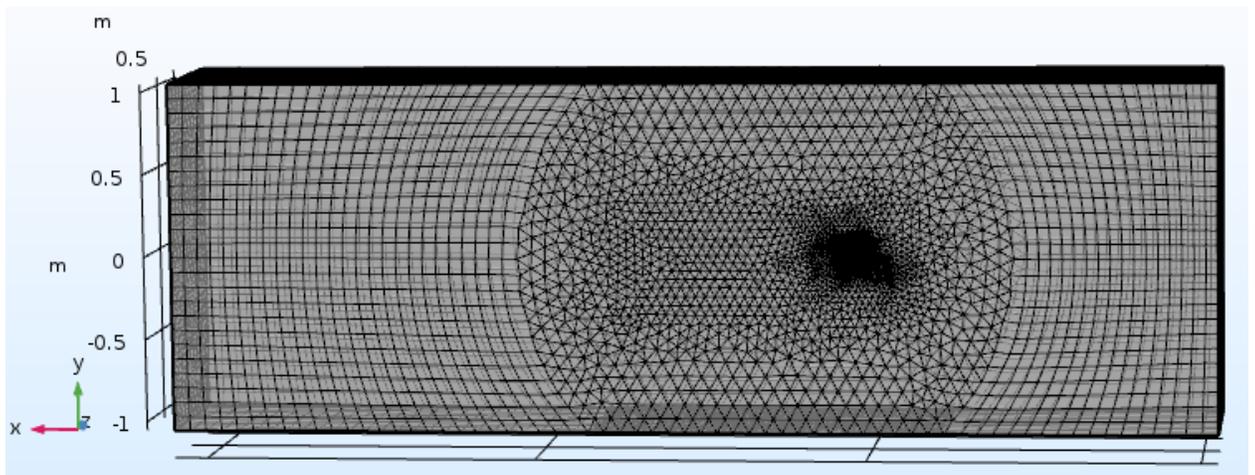


Figura 55 Malla para cálculo de arrastre Lineal

La gráfica mostrada a continuación es la calidad de la malla sobre cada elemento. De esto se puede observar que la zona de prismas la calidad no es variante, mientras que la calidad en zonas de tetraedros tiende a cambiar abruptamente. El criterio utilizado para medir la calidad de la malla fue el Skewness.

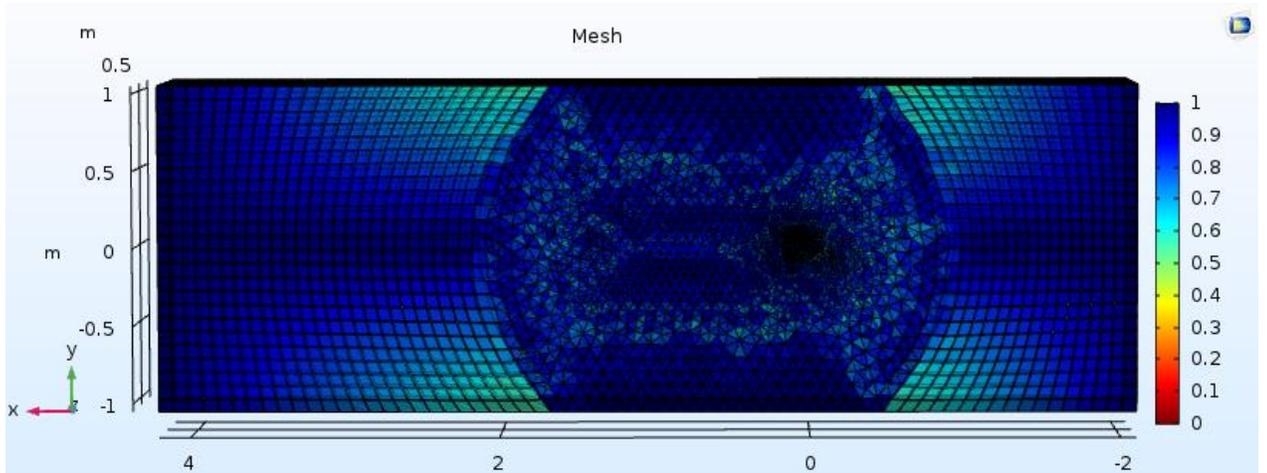


Figura 56 Calidad de la malla graficada sobre cada elemento

Se muestra, además, una vista con detalle en la sección del ROV y un acercamiento en el que se presenta la capa de prismas ubicada alrededor del vehículo:

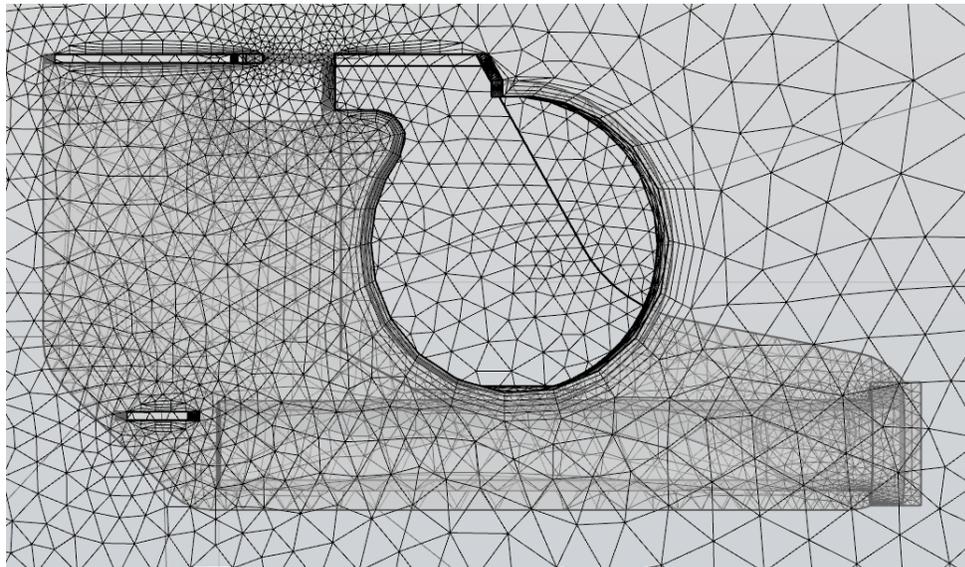


Figura 57 Muestra detallada de la malla del ROV

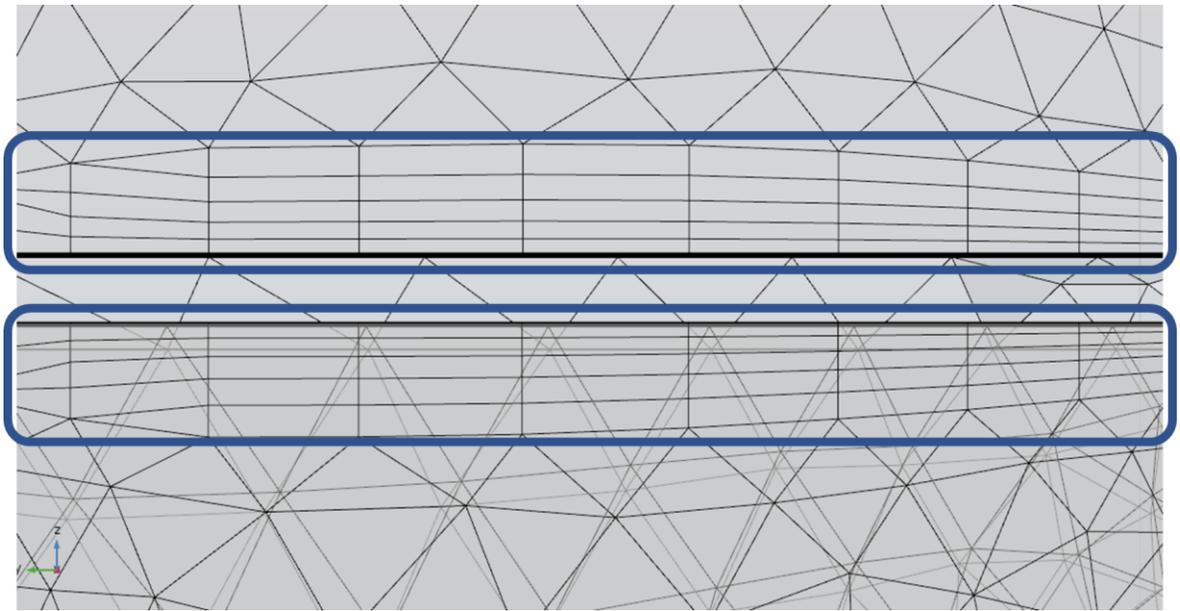


Figura 58 Muestra detallada de la malla del ROV

Para el dominio rotacional se conservó la malla por defecto solo que se agregó una zona de alta densidad de elementos cerca del vehículo para captar la estela de la rotación.

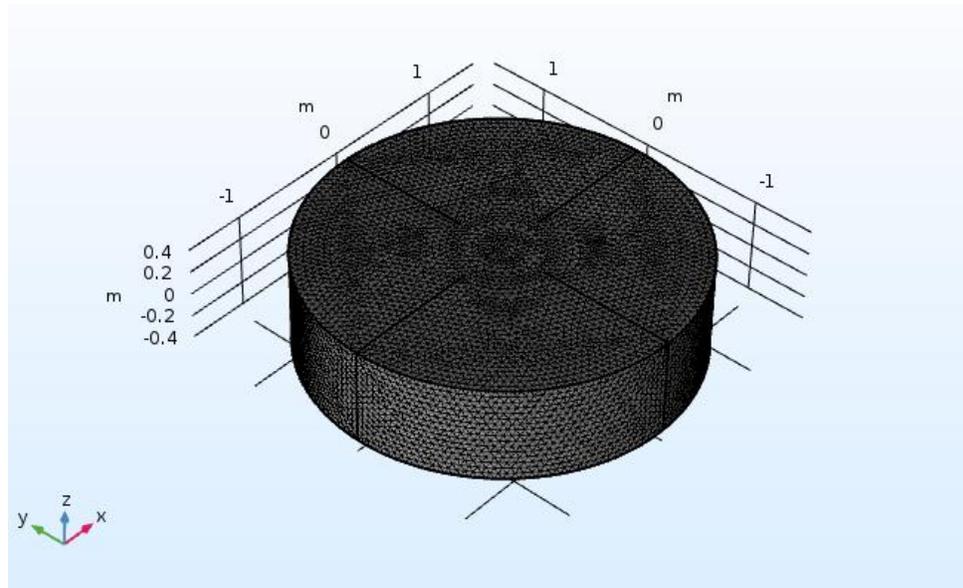


Figura 59 Malla del dominio para cálculo de arrastres rotacionales

Para refinar la malla y encontrar la malla donde los resultados no presentaban mayor variación se realizó un enmallado paramétrico denominado “H refinement”,

Este método de enmallado consiste en disminuir gradualmente el tamaño máximo y mínimo de los elementos. Esto se realiza por medio de un barrido paramétrico ofrecido por el software donde se coloca como parámetro el valor del tamaño de H y se disminuye a medida que la simulación avanza en un número determinado de veces, en esta ocasión, 6 ciclos.

En la siguiente grafica se pueden observar los residuales de la malla por defecto que muestras oscilaciones pronunciadas

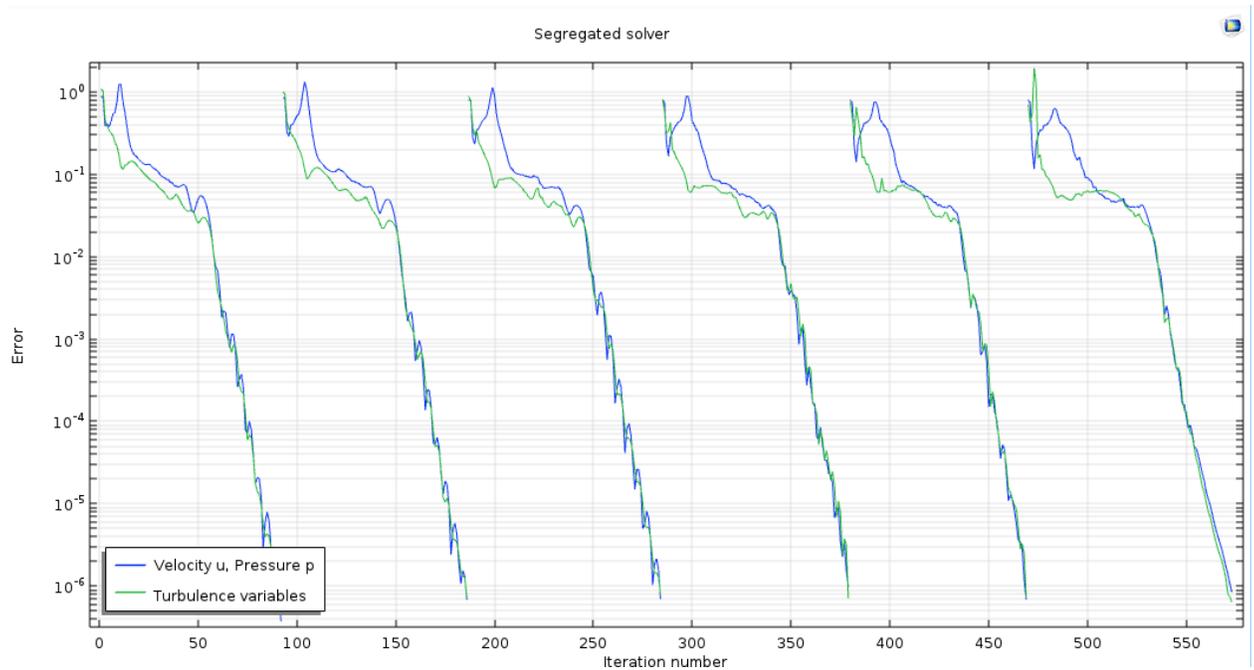


Figura 60 Residuales de simulación con una malla estándar

Estas son las gráficas de residuales para la malla mejorada.

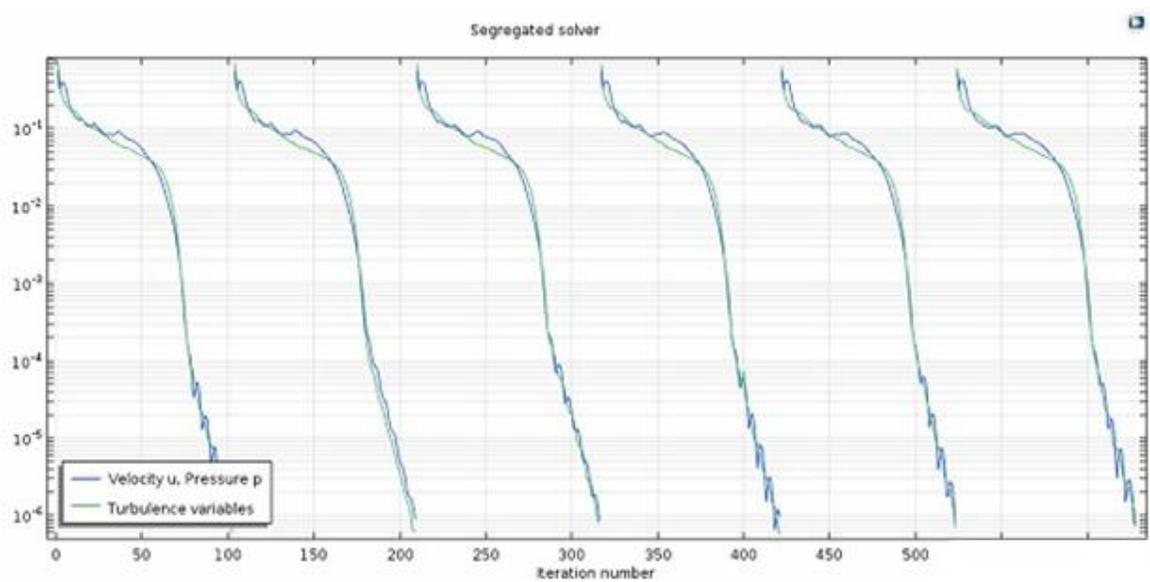


Figura 61 Residuales de simulación con una malla optimizada

Como se puede observar los residuales son más estables y en ningún punto el error supera su valor inicial.

Con el refinamiento realizado se identifica en qué punto se debe detener el refinamiento y establecer un tamaño de malla. Para esto se realizó un cálculo de la fuerza de arrastre a velocidad constante donde se determinó el punto donde la fuerza de arrastre no variaba de manera significativa, según el porcentaje de error generado entre muestras. Finalmente, la malla seleccionada es la de 2'431.212 elementos debido a que proporciona un error bajo y requiere menos cómputo que las siguientes, las cuales no generarían un cambio significativo en el resultado.

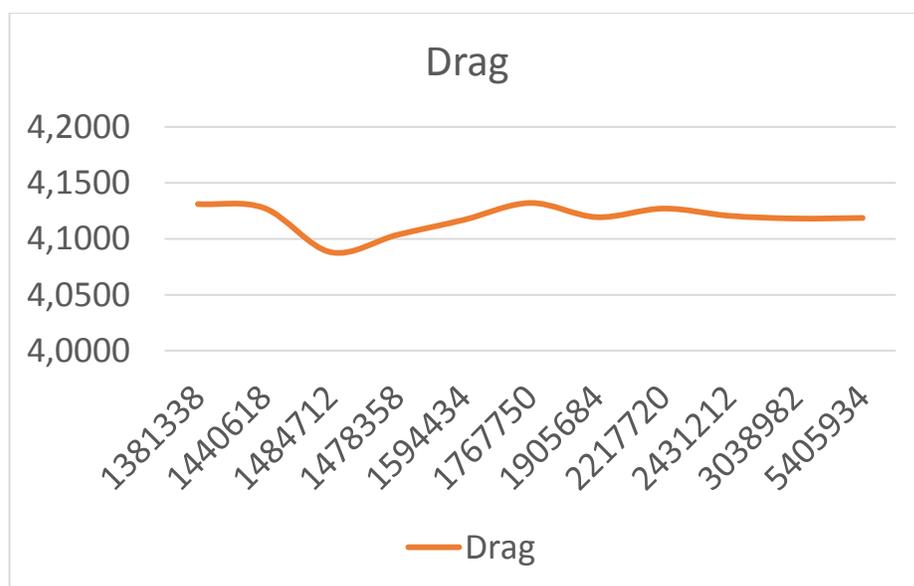


Figura 62 Fuerza de arrastre vs número de elementos

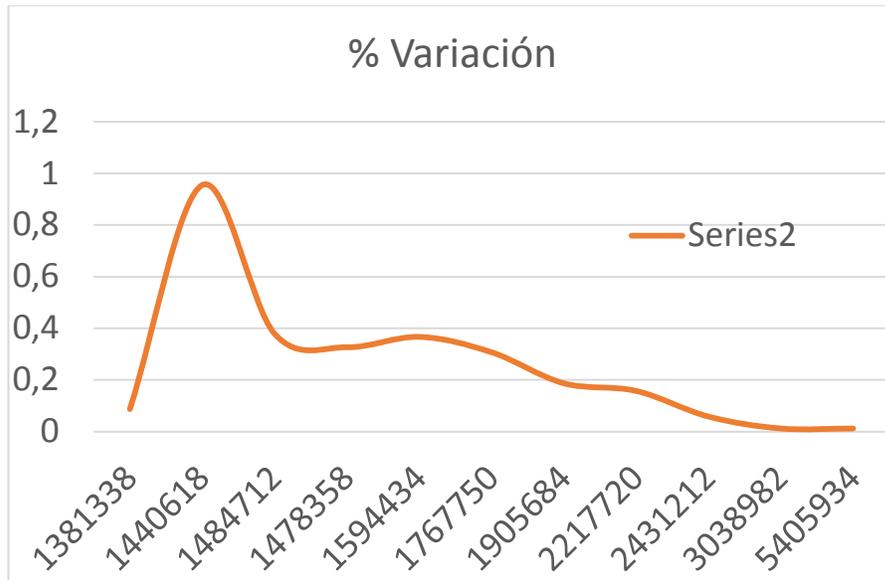


Figura 63 Porcentaje de variación del arrastre entre cada malla

12.4. POST PROCESAMIENTO

La simulación fue ejecutada por medio del solver estacionario de COMSOL® con un error de 10^{-6} . A continuación, se observan los perfiles de velocidad del vehículo avanzando de manera frontal. De esta imagen se puede observar que la burbuja de separación, donde la velocidad relativa del vehículo y el fluido es cero, se incrementa debido al vacío que tiene el vehículo. La escala se encuentra en metros por segundo.

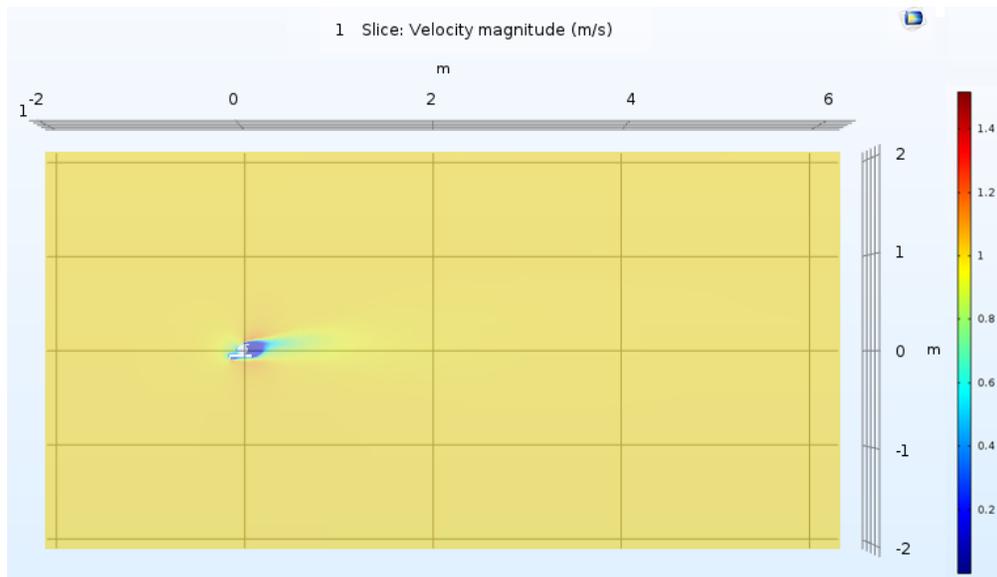


Figura 64 Vista alejada del perfil de velocidad es sobre el ROV en posición frontal

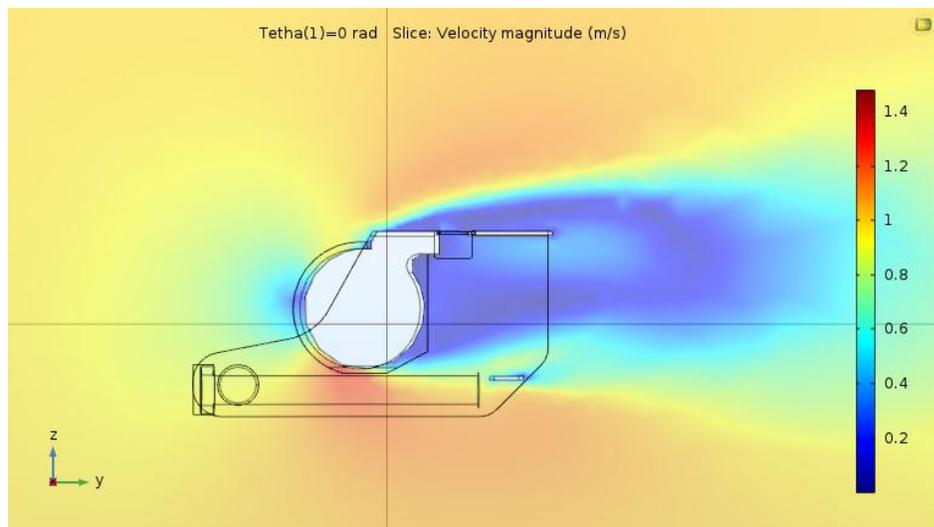


Figura 65 Vista aumentada del perfil de velocidad es sobre el ROV en posición frontal

Para el caso de un flujo que simula el movimiento vertical del vehículo se puede observar una mayor burbuja de separación que en el caso anterior, esto se debe a que el área proyectada es mayor y que los contornos en este sentido son más pronunciados. La escala se encuentra en metros por segundo.

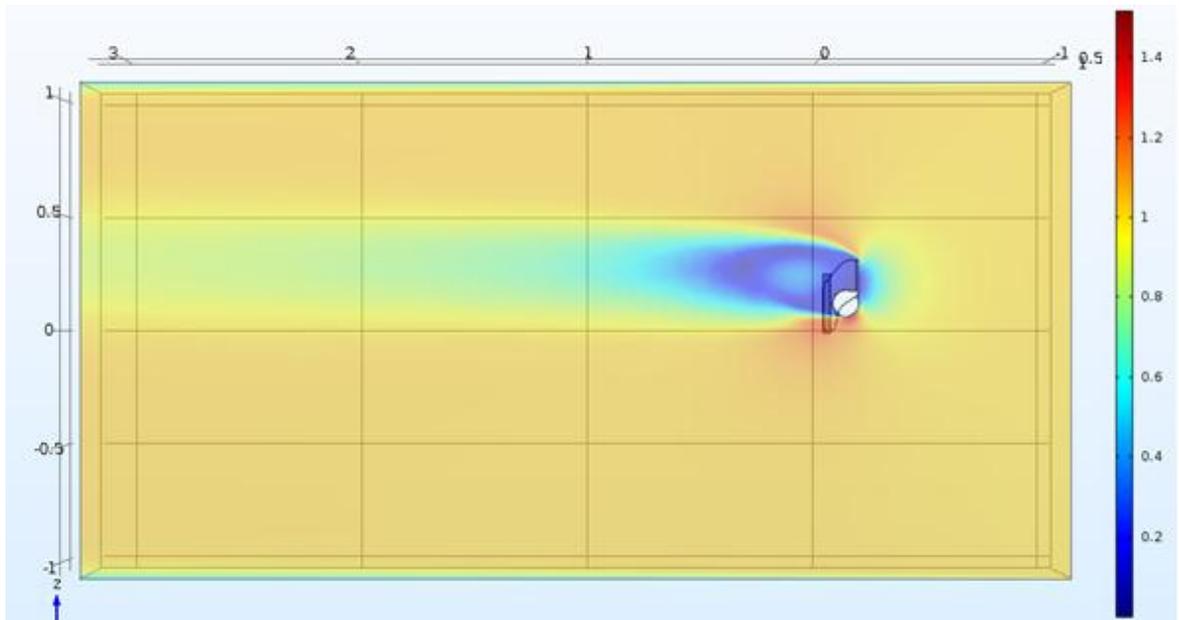


Figura 66 Vista alejada del perfil de velocidad es sobre el ROV en posición vertical

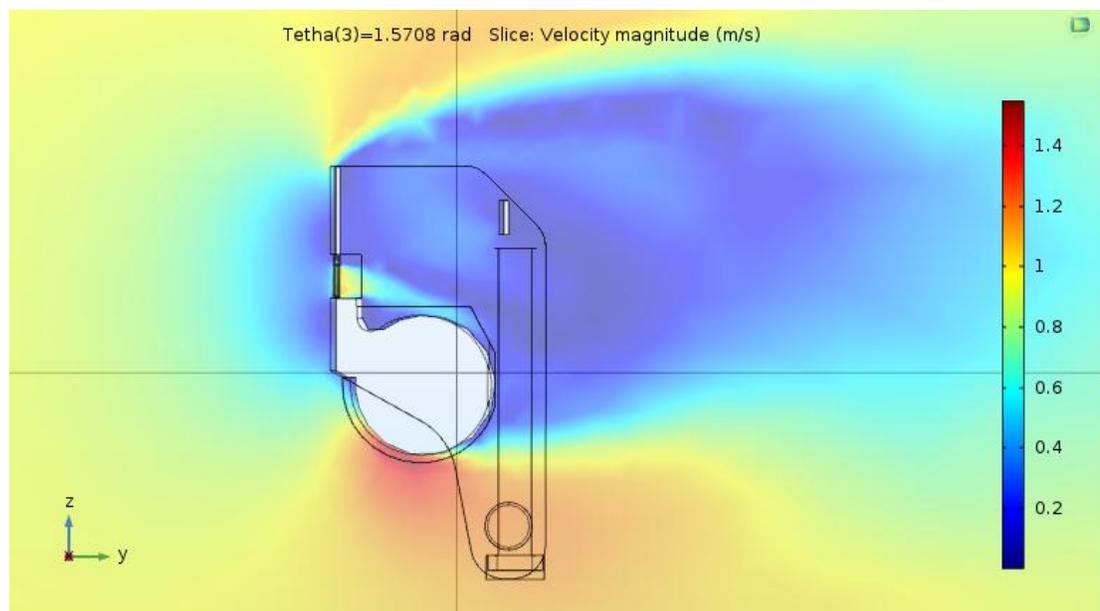


Figura 67 Vista aumentada del perfil de velocidad es sobre el ROV en posición vertical

En el caso de la rotación del vehículo se pudo observar un comportamiento completamente distinto ya que:

- No hay una estela continua
- Las burbujas de separación generadas no son simétricas

- En los extremos del vehículo es donde la velocidad promedio es mayor.

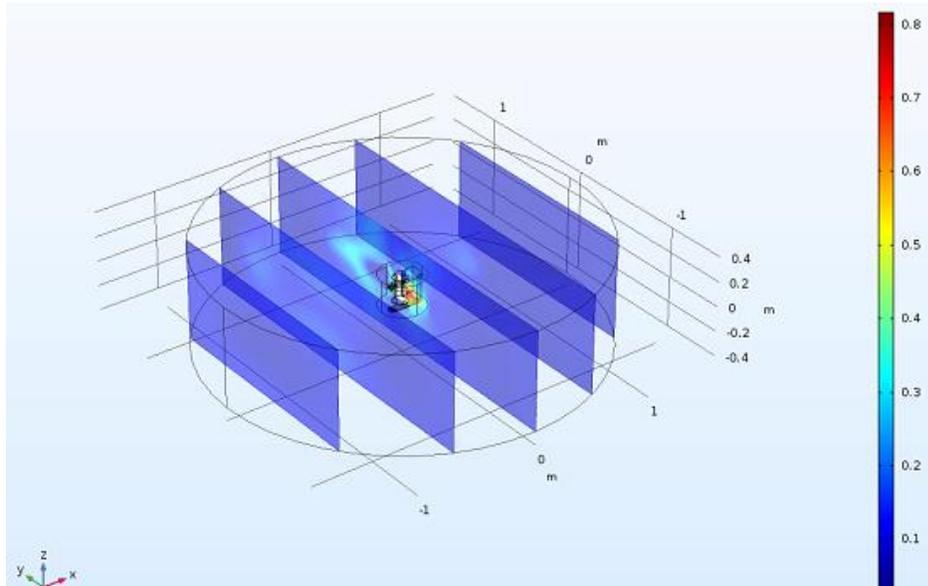


Figura 68 Vista alejada del perfil de velocidad es sobre el ROV rotando

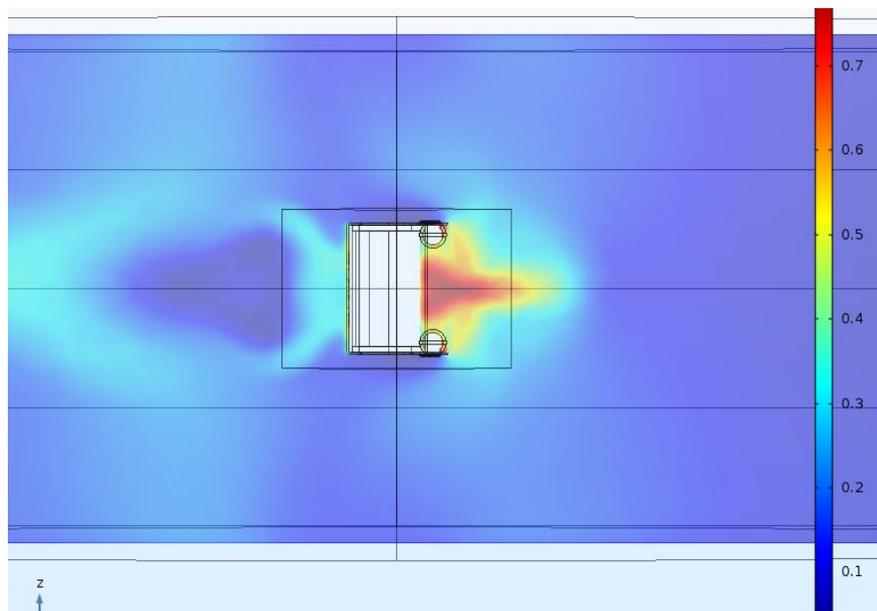


Figura 69 Vista aumentada del perfil de velocidad es sobre el ROV rotando

Como resultado principal se obtuvo la gráfica de la fuerza del arrastre respecto al ángulo de inclinación del vehículo.

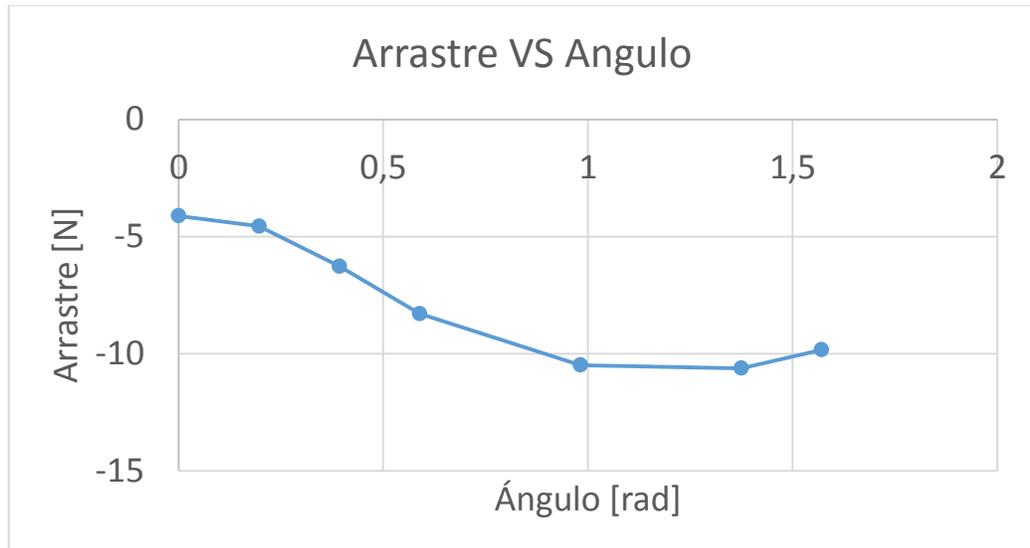


Figura 70 Valor del arrastre normal al vehículo en función del ángulo

De esta gráfica se puede concluir lo siguiente:

- El arrastre máximo no es en el movimiento vertical del vehículo.
- Trabajar con una malla de bajos elementos es crucial para realizar estos estudios paramétricos
- Se puede observar una línea de tendencia sinusoidal que demuestra que este fenómeno no es estocástico y se puede aproximar con algún tipo de función trigonométrica para ciertos ángulos.

También se calculó un factor de arrastre que ya tiene incluido los términos de viscosidad y área transversal, estos resultados son los siguientes. Se puede observar que los coeficientes lineales se multiplican por 2 debido a que se utilizó la condición de simetría:

| Arrastre | Valor |
|-------------------|--|
| X en función de u | $4.118 \cdot 2 \text{ [N/(m/s)}^2\text{]}$ |

| | |
|-----------------------|---|
| X en función de v | $2.3620 \cdot 2 \text{ [N/(m/s)}^2\text{]}$ |
| Y en función de u | $1.0199 \cdot 2 \text{ [N/(m/s)}^2\text{]}$ |
| Y en función de v | $9.8396 \cdot 2 \text{ [N/(m/s)}^2\text{]}$ |
| Rotación respecto a Y | $4.5623 \text{ [N/(rad/s)}^2\text{]}$ |
| Rotación respecto a Z | $2.66667 \text{ [N/(rad/s)}^2\text{]}$ |

Tabla 7 Coeficientes de arrastres obtenidos por simulación

Estos valores obtenidos son incluidos posteriormente en el modelo. Por otra parte, se incluyen las gráficas que muestran los vórtices obtenidos en la simulación frontal:

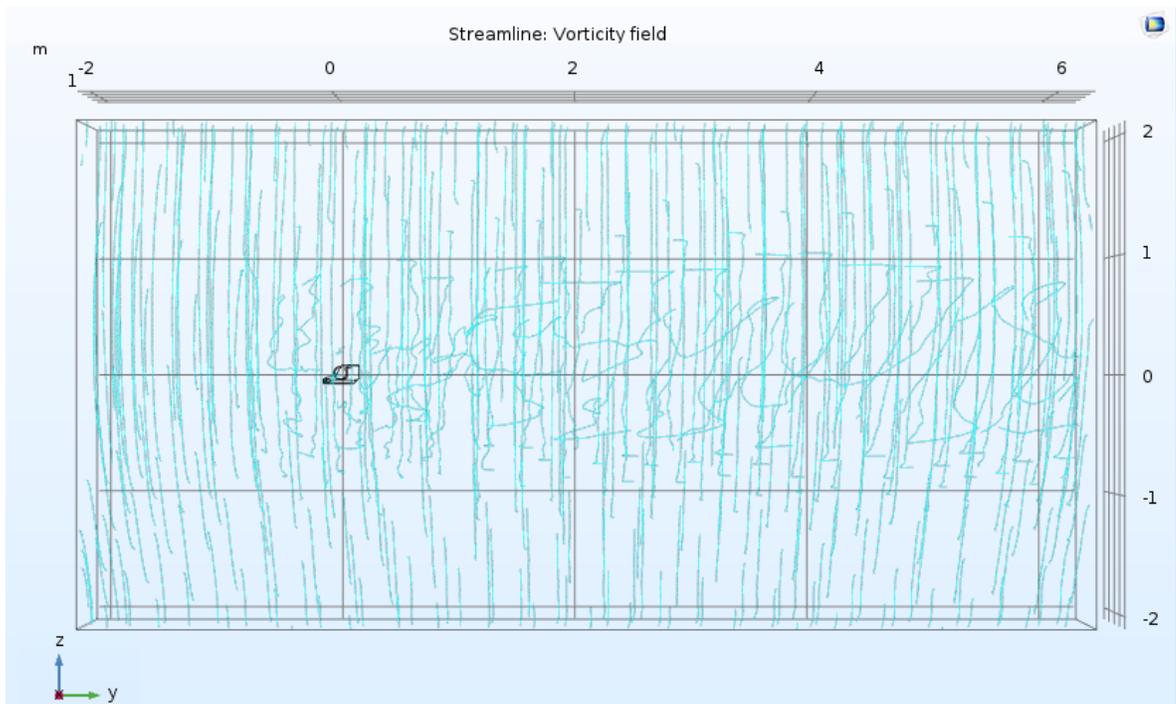


Figura 71 Vórtices representados en el plano zy

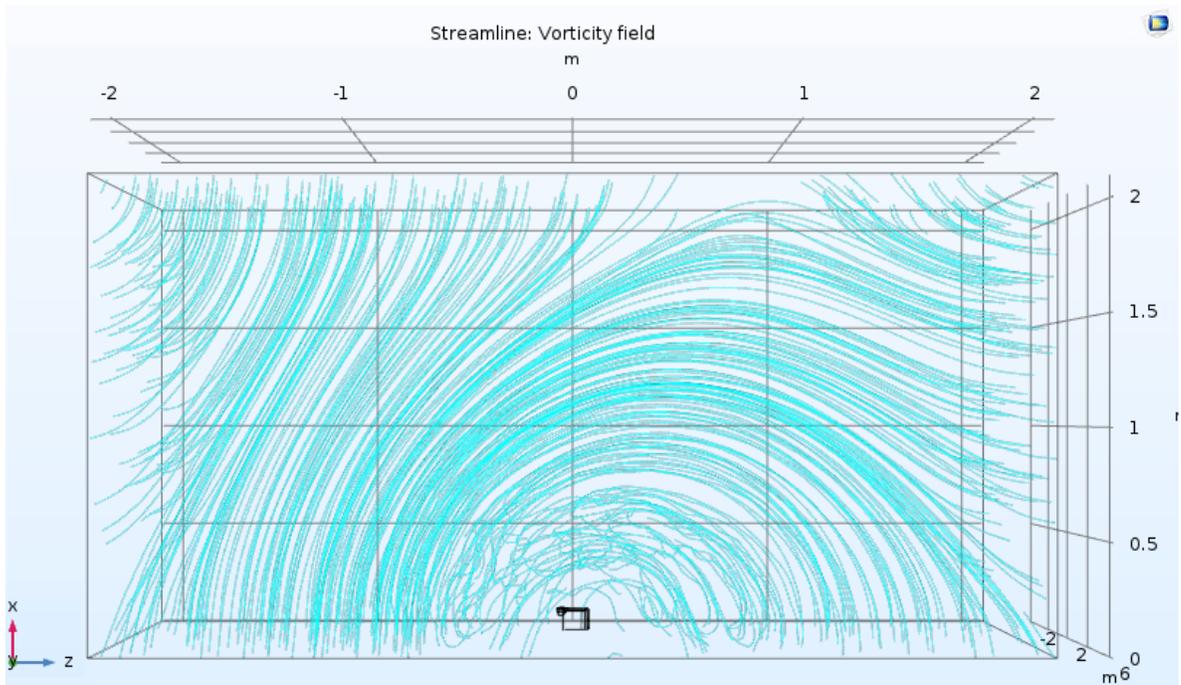


Figura 72 Vórtices representados en el plano xz

En estas gráficas se observa el flujo turbulento rotacional, mostrando la cantidad de circulación rotacional del fluido por unidad de área.

13. MODELADO DEL ROV

Primero se presenta la lista de símbolos utilizados en el modelo:

- F_x : Fuerzas en x [N]
- F_y : Fuerzas en y [N]
- F_z : Fuerzas en z [N]
- M_x : Momentos en x [N m]
- M_y : Momentos en y [N m]
- M_z : Momentos en z [N m]
- \dot{u} : Aceleración en x [m/s^2]
- \dot{v} : Aceleración en y [m/s^2]
- \dot{w} : Aceleración en z [m/s^2]
- u : Velocidad en x [m/s]
- v : Velocidad en y [m/s]
- w : Velocidad en z [m/s]
- \dot{p} : Aceleración angular alrededor del eje x [rad/s^2]
- \dot{q} : Aceleración angular alrededor del eje y [rad/s^2]
- \dot{r} : Aceleración angular alrededor del eje z [rad/s^2]
- p : Velocidad angular alrededor del eje x [rad/s]
- q : Velocidad angular alrededor del eje y [rad/s]
- r : Velocidad angular alrededor del eje z [rad/s]
- φ : Ángulo de rotación del eje x [rad]
- θ : Ángulo de rotación del eje y [rad]
- α : Ángulo de aplicación de la fuerza del cordón umbilical en el eje y [rad]
- δ : Ángulo de aplicación de la fuerza del cordón umbilical en el eje z [rad]
- F_{T1} : Fuerza propulsor 1 [N]
- F_{T2} : Fuerza propulsor 2 [N]
- F_{T3} : Fuerza propulsor 3 [N]
- F_C : Fuerza cordón Umbilical [N]
- K_{dn} : Constante de coeficiente de arrastre en el caso n . Traslacional: [Kg/m], Rotacional: [$\text{Kg m}^2/\text{rad}^2$]
- m : Masa del ROV [Kg]
- g : Gravedad [m/s^2]
- V : Volumen del ROV [m^3]
- I_x : Momento de inercia en el eje x [Kg m^2]
- I_y : Momento de inercia en el eje y [Kg m^2]
- I_z : Momento de inercia en el eje z [Kg m^2]
- I_{xz} : Producto de inercia sobre el eje x y z [Kg m^2]
- L_x : Distancia en x entre el motor y el centro de masa [m]

- L_y : Distancia en y entre el motor y el centro de masa [m]
- L_z : Distancia en z entre el motor y el centro de masa [m]
- z_{GB} : Distancia en x entre el centro de flotabilidad y el centro de masa [m]
- L_1 : Distancia en x entre el punto S del sistema coordenado y el centro de masa [m]
- L_2 : Distancia en y entre el punto S del sistema coordenado y el centro de masa [m]
- L_3 : Distancia en z entre el punto S del sistema coordenado y el centro de masa [m]
- h_1 : Distancia entre el fondo del tanque y carrete de cable en el eje z [m]
- h_2 : Distancia entre el fondo del tanque y punto de amarre del cordón umbilical en el ROV en el eje z [m]
- h_3 : Distancia entre el fondo del tanque y carrete de cable en el eje y [m]
- h_4 : Distancia entre el fondo del tanque y punto de amarre del cordón umbilical en el ROV en el eje y [m]

13.1 FUERZAS EXTERNAS

La segunda ley de Newton establece que la suma vectorial de las fuerzas aplicadas sobre un cuerpo rígido equivale a la masa total del sistema multiplicada por la aceleración del centro de gravedad del cuerpo.

$$\sum \vec{F} = m^N \vec{a}^G \quad \text{Ecuación 1}$$

La Ecuación 1 expresa la segunda ley de Newton para un sistema de masa constante, de modo que la masa es incluida como escalar. Se deben considerar las fuerzas externas que se aplican sobre el ROV, de modo que permita aplicar la dinámica Newtoniana. Estas fuerzas son:

- Peso del ROV
- Fuerza de flotabilidad
- Fuerza de arrastre
- Fuerzas de empuje

El diagrama de cuerpo libre se presenta en la Figura 68, donde se muestran las fuerzas aplicadas sobre el ROV:

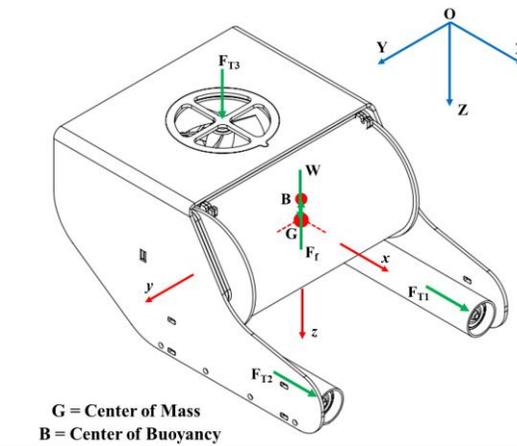


Figura 73 DCL OpenROV

A partir de lo anterior, la suma vectorial de las fuerzas aplicadas en cada eje, expresadas en una base fija al cuerpo es:

$$\sum F_X = F_{T1} + F_{T2} - K_{d1}(u^2) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\sum F_Y = -K_{d2}(v^2) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\sum F_Z = F_{T3} - K_{d3}(w^2) \quad \text{Ecuación 4}$$

Esta sumatoria representa el lado izquierdo de la ecuación de la segunda ley de Newton. Como se asume que el vehículo está diseñado para tener flotabilidad neutra, el peso no es incluido, al igual que la fuerza de flotabilidad. En cuanto al movimiento rotacional, se parte de la ecuación de Euler para movimiento rotacional, dada por:

$$\sum M = \vec{r}_{os^*} \times m\vec{a} + [\vec{I} \cdot \vec{\alpha} + \vec{\omega} \times (\vec{I} \cdot \vec{\omega})] \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde la diada de inercia es evaluada en el centro de masa y el vector \vec{r}_{os^*} equivale a la distancia entre el centro de masa del sistema y el punto de

evaluación “o”. Cuando el punto de evaluación es el mismo centro de masa, esta ecuación puede ser reducida a:

$$\sum M = \bar{I} \cdot \ddot{\alpha} + \vec{\omega} \times (\bar{I} \cdot \vec{\omega}) \quad \text{Ecuación 6}$$

Siguiendo esto, se realizan los diagramas del ROV donde se presentan las distancias que se involucran en el cálculo de momentos:

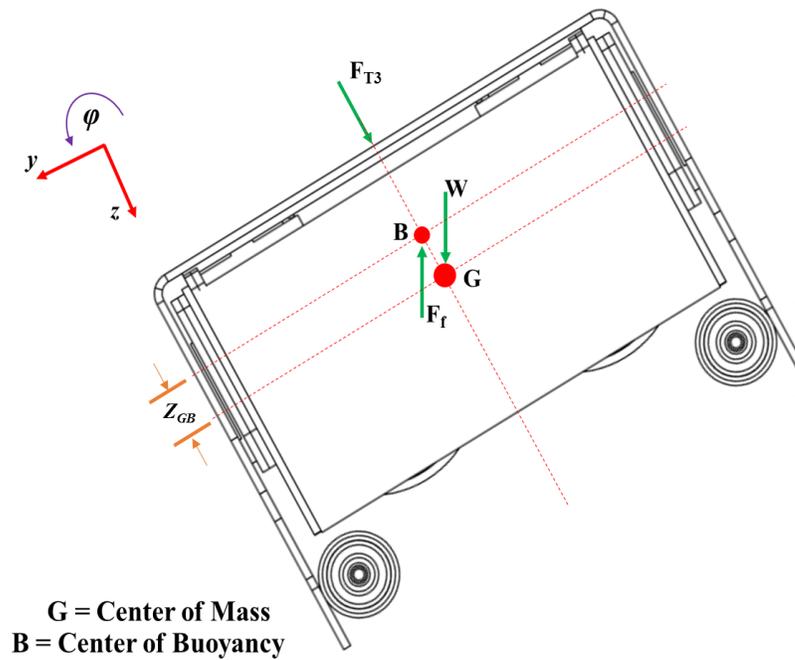
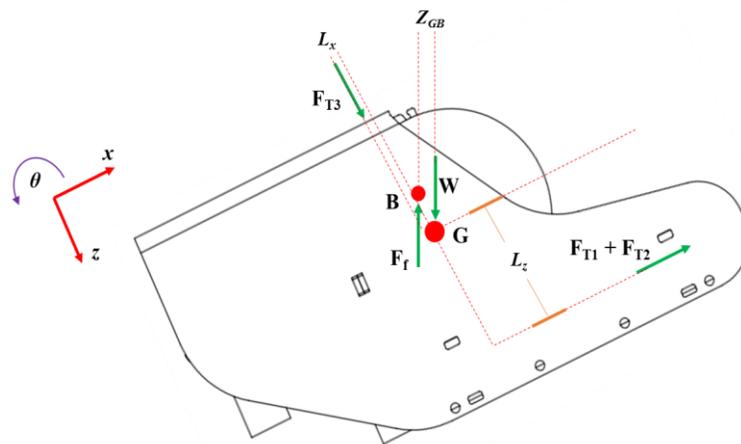
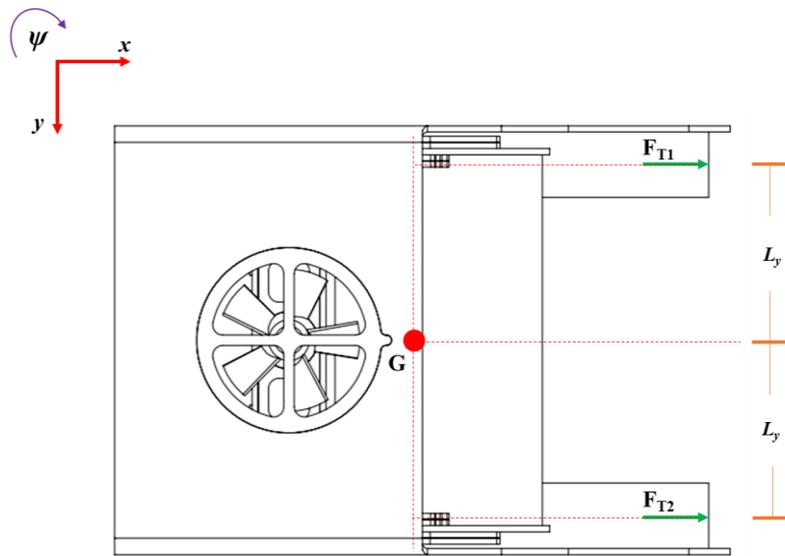


Figura 74 DCL para el cálculo en el plano yz



G = Center of Mass
 B = Center of Buoyancy

Figura 75 DCL para el cálculo en el plano xz



G = Center of Mass

Figura 76 DCL para el cálculo en el plano xy

Con base en esto, las ecuaciones obtenidas son:

$$\sum M_x = -K_{d4}(p^2) + \rho g V z_{GB} s \varphi c \theta \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\begin{aligned} \sum M_y = L_z(F_{T1} + F_{T2}) + L_x F_{T3} \\ - K_{d5}(q^2) \\ - \rho g V z_{GB} s \theta \end{aligned} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\sum M_z = L_y(F_{T1} - F_{T2}) - K_{d6}(r^2) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde se representa la sumatoria de momentos aplicados en el ROV, producidas por fuerzas y distancias, así como también por factores de hidrodinámica. Los productos de inercia I_{xy} e I_{yz} no se toman en cuenta debido a su tamaño. Luego de la realización de este modelo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El sensor IMU ensamblado en el vehículo no se encuentra justo en el centro de masa, por lo que el sistema coordinado fijo al cuerpo debe ser movido al punto del sensor.
- El sistema se modeló como FSS, mientras que el ROV a utilizar tiene cordón umbilical, por lo cual se debe considerar en el modelo.
- El modelo presentado presenta los propulsores como fuerzas, por lo que no se tiene en cuenta el modelo del actuador. Esto debe ser corregido de acuerdo con el plan de pruebas planteado en metodología.
- Se debe realizar el análisis del actuador en rotación para verificar que la fuerza producida por el mismo sea unidireccional.

Posteriormente, se realizó un modelado dinámico de ROV teniendo en cuenta las consideraciones planteadas al final del paso anterior:

Primero, se realizó la modificación del sistema coordinado fijo al cuerpo, de modo que se desplazara al punto del sensor IMU implementado:

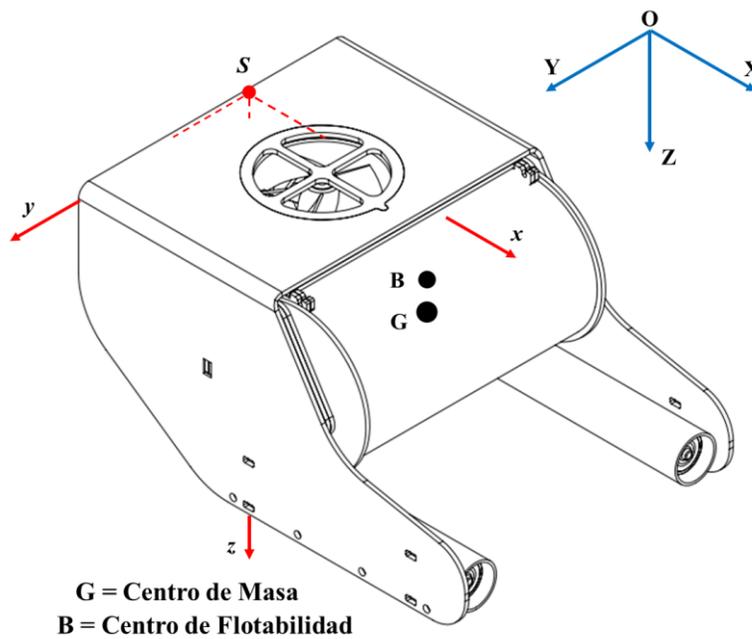


Figura 77 Sistema coordenado desplazado

Con esto se plantean los siguientes diagramas que incluyen las fuerzas externas aplicadas sobre el vehículo:

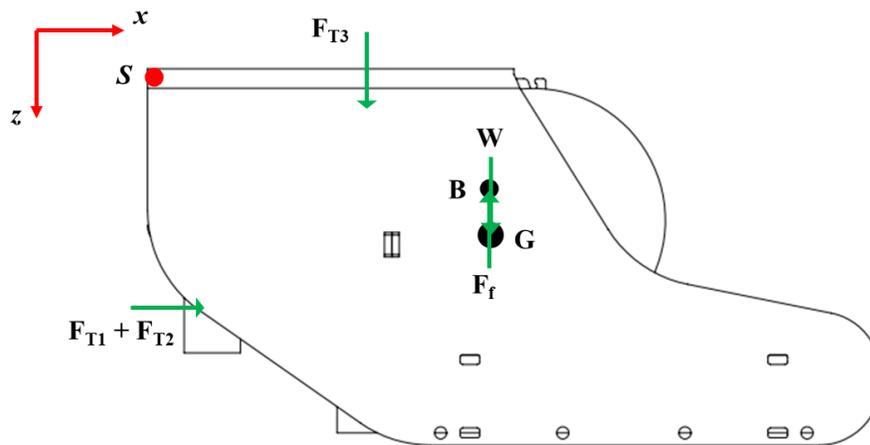


Figura 78 Fuerzas externas aplicadas, plano xz

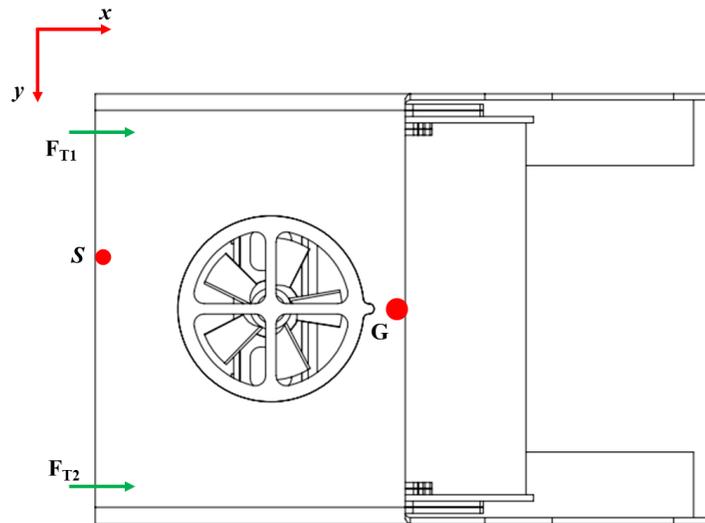


Figura 79 Fuerzas externas aplicadas, plano xy

En estos diagramas se observa el punto S, el cual es el origen del nuevo sistema. La única diferencia observada está en el lado derecho de las ecuaciones, donde las velocidades traslacionales se ven afectadas. En cuanto al movimiento rotacional, si se tiene en cuenta la ecuación 8, mencionada anteriormente, el punto de evaluación de los momentos, al tratarse del centroide, da paso a modificar la ecuación tal y como se plantea en la ecuación 9. A partir de esto, sólo se relaciona el lado derecho de la ecuación de Euler con la velocidad y aceleración angular. Al tratarse de un solo cuerpo, estos valores cinemáticos rotacionales se conservan para cualquier punto del cuerpo por lo que la ecuación final de momentos no presenta variación alguna.

13.2 FUERZA DEL CORDÓN UMBILICAL

Por otra parte, se llevó a cabo la sección del cordón umbilical. La primera aproximación realizada fue el desarrollo de un modelo muy básico. A partir de esto, se realizaron las siguientes suposiciones:

- Para que el cable ejerza una fuerza considerable sobre el vehículo, este debe estar totalmente tensionado, por lo que puede representarse como una línea recta.
- El valor de la magnitud puede obtenerse a partir de un dinamómetro ubicado en el carrete.

- El carrete se encontrará en un punto fijo, por lo que no puede desplazarse ese punto.
- Los ángulos pueden ser obtenidos a partir de relaciones trigonométricas.

Con base en esto se presentan los siguientes diagramas que representan el modelamiento del cable:

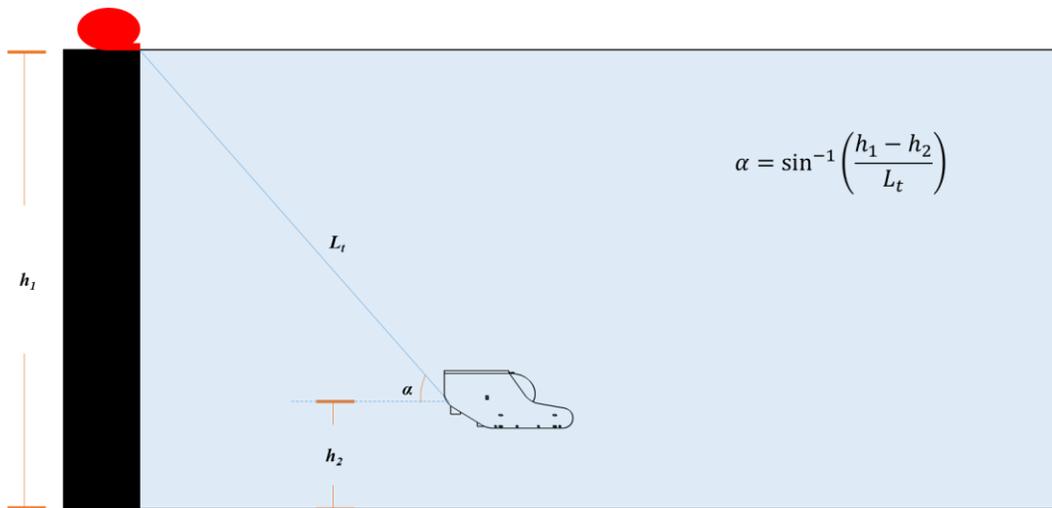


Figura 80 Diagrama para cordón umbilical 1

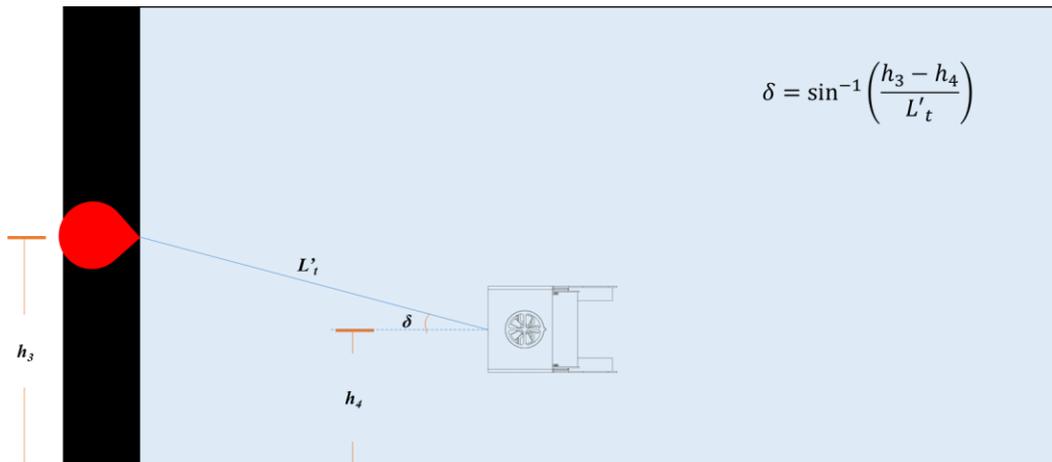


Figura 81 Diagrama para cordón umbilical 2

Tomando en cuenta lo anterior, se observan los ángulos α y δ , los cuales representan las posibles inclinaciones del cable totalmente tensionado en los planos presentados. El primer ángulo puede ser calculado por medio de relaciones

trigonométricas a partir de la altura entre el suelo y la profundidad dada por el sensor IMU del ROV. Por otro lado, el ángulo delta puede ser estimado por medio de un observador incluido en el lazo de control.

Con este primer método se presentan grandes desventajas. Primero, ya que requiere lectura constante en la implementación, por lo que incrementa el costo computacional que requiere la tarjeta del ROV. Por otro lado, y como razón principal, la fuerza de tensión producida por un cable en el ROV no puede ser idealizada como un solo elemento rígido, ya que, siguiendo la literatura, se trata de una fuerza variante en el tiempo en la que el cable presenta diferentes deformaciones de alta complejidad.

A partir de esto, se realizó una búsqueda bibliográfica más profunda acerca de modelamiento de cables que actúan sobre vehículos subacuáticos. En esta búsqueda se encontraron diversos artículos, de los cuales se destacan las referencias [31] y [32] debido a que son las más completas. En estas se desarrollan diferentes formas de modelado, comenzando por un modelado "Lumped Mass" el cual consiste en definir el cable como un conjunto de segmentos confirmados por un sistema de amortiguador-resorte. A partir de esto se desarrolla el cable por medio de segmentos finitos. Luego proceden a implementar una metodología más precisa por medio de diferencias finitas. Aparte de estos métodos, se incluyen otros de mayor orden, así como también se adhieren configuraciones para tener en cuenta los efectos torsionales en el cable. El modelamiento de cordones umbilicales sigue siendo un problema complejo para su desarrollo a partir de método analítico. Es por esto por lo que se implementa el método de Elementos Finitos para la solución numérica de este problema.

En este caso se divide la solución en dos secciones. La primera consiste en realizar una simulación de Fluidos por medio del módulo CFD de COMSOL® con una geometría 3D del cable, generada con forma catenaria base (basada en la ecuación de coseno hiperbólico) y con un diámetro pequeño. El cable tiene una extensión definida. Para esto se resuelven numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes para obtener los coeficientes del cable dentro de un fluido turbulento y se realiza un refinamiento de malla hasta obtener un error del 5%.

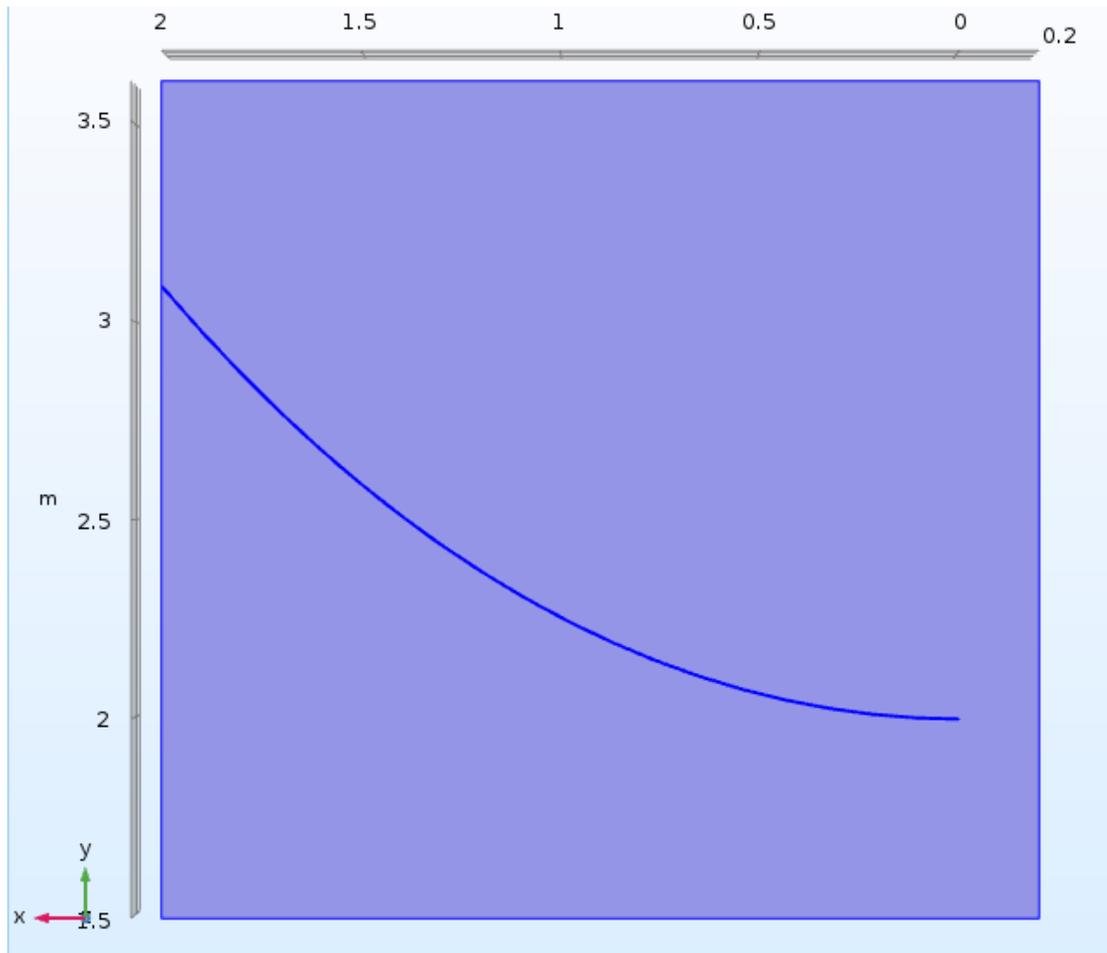


Figura 82 Geometría del cable 3D con simetría aplicada

La geometría es generada y se aplican las respectivas condiciones de frontera, incluyendo una simetría que permite disminuir tiempo y recursos en el cómputo. Para el enmallado se asignan 2 secciones. En la primera sección (zona cercana al cable) se implementa el refinamiento de malla con elementos cada vez más pequeños. La segunda sección se mantiene con el mismo tamaño de elementos en todas las simulaciones, ya que no afectan en gran cantidad el cálculo y, asimismo, se evita el cómputo extra.

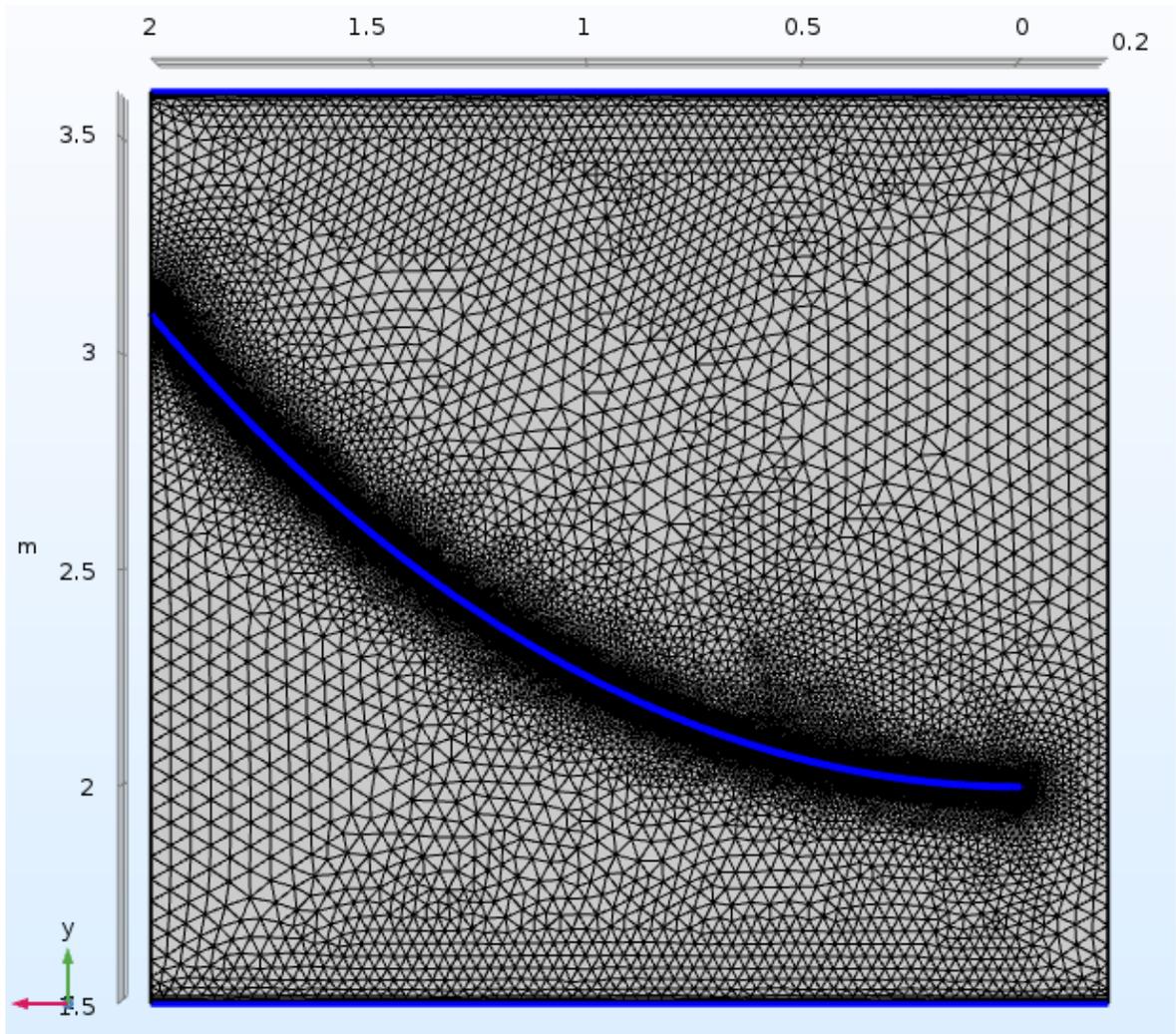


Figura 83 Geometría enmallada

Por último, se generan los resultados y se realiza la respectiva integral de área para obtener los valores de fuerza que se llevan a la ecuación de coeficiente de arrastre:

$$C_d = \frac{2 \times F}{997 \times 0,01 \times 0,00217}$$

Y se realiza la comparación de resultados.

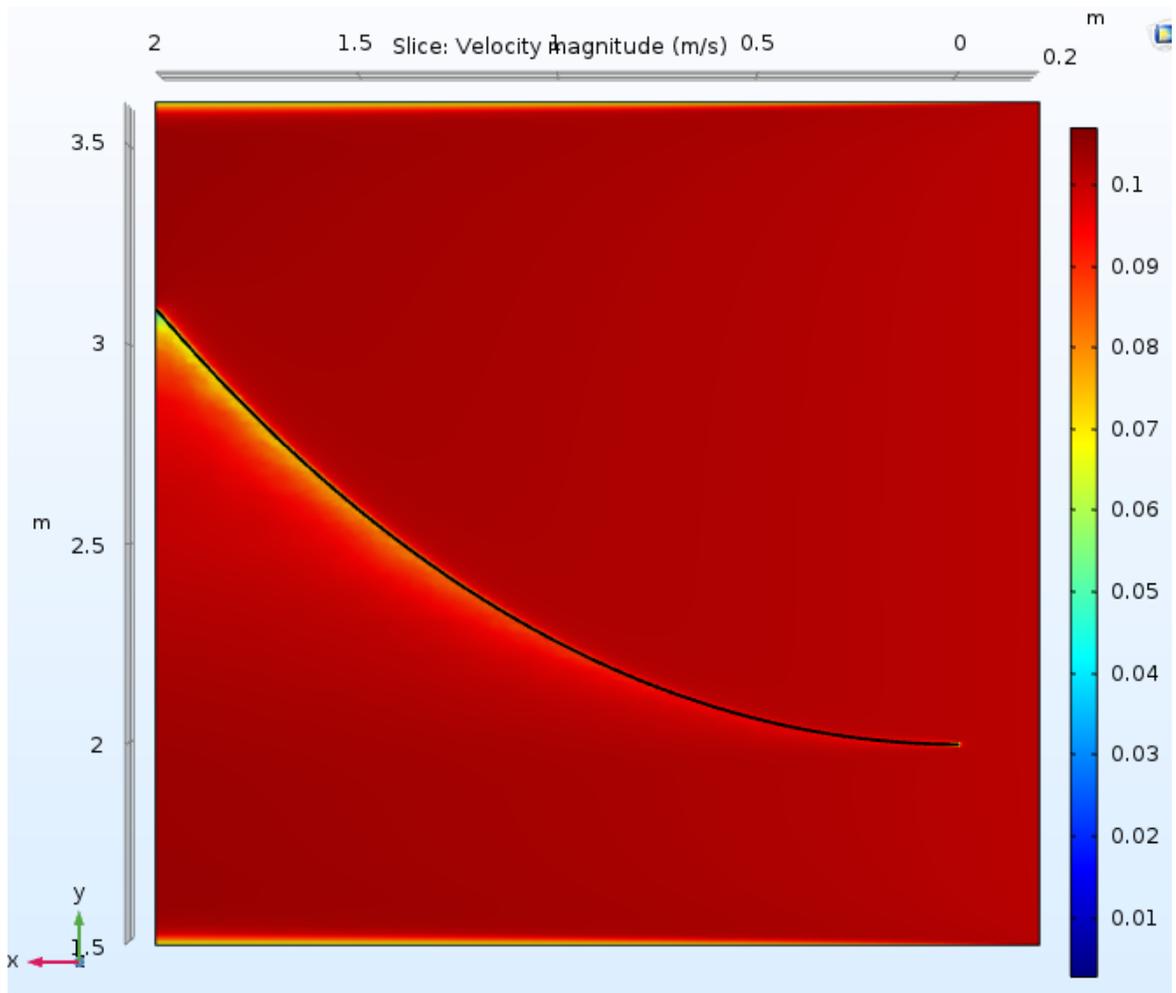


Figura 84 Resultados simulación de fluidos

| Fluidos | Cd | Elements |
|---------|--------|----------|
| T1 | 0,148 | 153810 |
| T2 | 0,1197 | 426654 |
| T3 | 0,1164 | 1117867 |

Tabla 8 Tabla de resultados

| Error (%) | |
|-----------|----------|
| T2 | 19,12162 |
| T3 | 2,756892 |

Tabla 9 Tabla de porcentaje de error

Con esto se obtiene que el valor del arrastre generado por el cable es de 0.1164. La segunda sección corresponde a una simulación de mecánica de sólidos, donde se aplica la ecuación de Morison:

$$F = \rho C_m V \dot{U} + \frac{1}{2} \rho C_d A U |U| \quad \text{Ecuación 10}$$

La cual consiste en una ecuación diseñada para elementos cuya longitud es mucho mayor a su diámetro e interactúan con un fluido. En este caso se incluyen los valores obtenidos por medio de la simulación CFD para obtener la fuerza distribuida que recibe el cable a partir del fluido. Además de esto se incluye un desplazamiento predeterminado del ROV con una condición de frontera en el extremo móvil del cable. La geometría empleada es la misma sin la condición de simetría. Otra consideración es la no linealidad del material. Para esto se implementa el modelo Power Law, donde τ representa el esfuerzo, γ representa la deformación y n el exponente de deformación unitaria:

$$\tau = \tau_0 + k \gamma^{1/n} \quad \text{Ecuación 11}$$

El cual implementa los valores normales de propiedades de material exigidos en COMSOL® además de solicitar otros valores que se obtienen a partir de tablas de propiedades de material con las especificaciones del que se esté trabajando. En las condiciones de frontera se tiene en cuenta el extremo superior (azul) como fijo, el extremo inferior (verde) como móvil. Este último contiene una condición de desplazamiento prescrito, basada en la velocidad que el ROV tendría en una situación específica. Esto se realiza con el fin de incluir en el cable todas las interacciones posibles que se tendrían en una navegación.

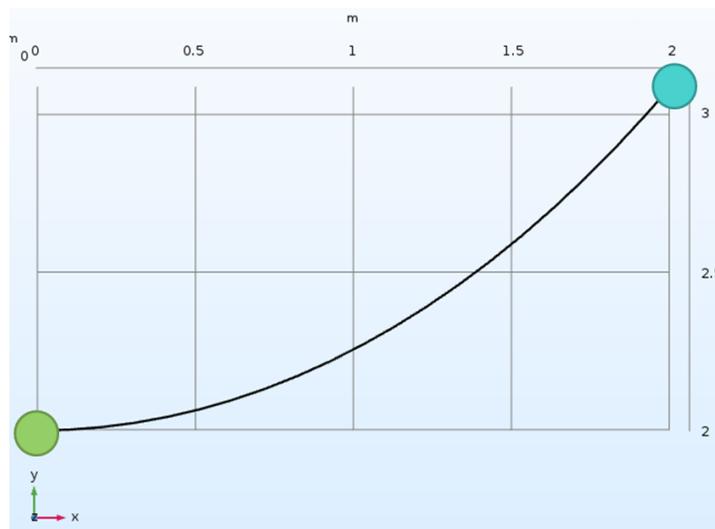


Figura 85 Geometría del cable

Finalmente se realiza el enmallado y la simulación. Para obtener el valor del resultado, se implementa una integral de área en la cara que tendría contacto con el ROV. El valor de fuerza obtenido fue:

| Tiempo | Fuerza X [N] | Fuerza Y [N] | Fuerza Z [N] |
|--------|--------------|--------------|--------------|
| 0,1 | 9206,6 | -1460,9 | 4478,3 |
| 0,2 | 1833 | 1832,4 | 256,79 |
| 0,3 | 9626,2 | 2963,4 | 2808,8 |
| 0,4 | 2058,2 | 8268,6 | -1217,4 |
| 0,5 | 3056 | 1064,9 | -1597,9 |
| 0,6 | 3466,9 | 3845,6 | 8934,2 |
| 0,7 | -2496,4 | 6208,7 | -5825,7 |
| 0,8 | -7761,1 | 5016,3 | -1211,4 |

Tabla 10 Tablas de resultados de la fuerza en los instantes mostrados

Con estos valores se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Las fuerzas obtenidas son valores altos para lo que realmente puede afectar un cable en el vehículo. Esto se debe a que el cable es simulado como inextensible, lo cual genera una tensión extra en el cable que afecta la reacción en el punto de contacto con el ROV.
- El modelo de simulación, a pesar de ser más completo que los modelos básicos (parámetros concentrados o sólo cfd), requiere de mayor profundización para lograr un resultado más acertado, ya que al trabajarse por módulos separados se desprecian algunos cambios considerables en el movimiento del cable que pueden influir en la respuesta de la fuerza.

Finalmente, se procede a realizar una búsqueda bibliográfica para la estimación experimental de la tensión del cable. En estas se encuentra, por un lado, que la fuerza que ejerce el cable sobre el vehículo es muy variante en el tiempo en su magnitud. Además de esto se encuentra que, en su mayoría, las consideraciones del cordón umbilical en los modelamientos de ROVs se toman a partir de estimaciones experimentales. Es por esto que se toma como referencia un paper en el que desarrollan la medición experimental de la tensión que ejerce un cable sobre vehículos comerciales y se grafica respecto al tiempo [33].

Siguiendo esto se realizó una toma de datos con el vehículo en funcionamiento. Esta prueba consistió en una observación de la influencia del cable en el ROV a partir del arrastre que se pudiera generar. Para esto se realizó una navegación con lectura de datos en la que el cable era desplazado exteriormente (sin carga) y otra prueba igual en la que se le dejara una longitud considerable de cable para arrastrar en el fluido.



Figura 86 Foto de pruebas realizadas para el cable

De esta prueba se pudo observar que, por arrastre, los valores de fuerza ejercida en el vehículo son despreciables. Luego de esto, partiendo de los resultados de la simulación, se demuestra que las perturbaciones ejercidas en el vehículo por el cable son producto de tensiones en el estiramiento del cable, es por esto que se puede evitar la influencia del mismo si se logra evitar que el vehículo se desplace de modo que exceda la longitud máxima del cable disponible.

13.3 MODELO DE LOS ACTUADORES

Para el modelado del actuador se realizó la respectiva búsqueda bibliográfica sobre los métodos utilizados para la identificación de motores, donde se obtuvo

que debido a la dinámica de los motores utilizados se trabaja con un modelo estático, asumiendo el cambio de velocidades instantáneo [34].

Para obtener un modelo válido se deben obtener los datos de identificación para cada uno de los motores. Según la bibliografía consultada se necesita una estructura que permita tomar datos de empuje de los actuadores como la que se ilustra en la figura 87.

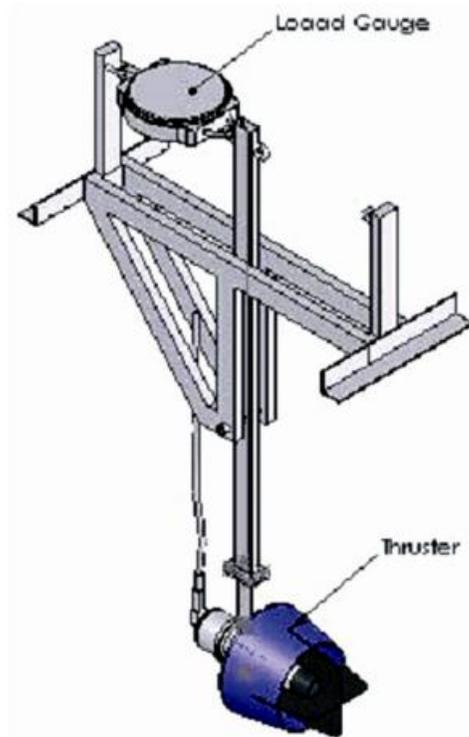


Figura 87 Estructura de pruebas utilizada en la bibliografía [34]

Tomando como punto de partida esta estructura se diseñó una estructura propia, donde se realizó un cambio de la rotación del apoyo del actuador por un desplazamiento lineal. Este cambio se consideró debido a que la relación entre brazos de palanca usada para la estructura planteada en la bibliografía es propensa a tener error de medida. Como resultado del diseño de la plataforma de pruebas se obtuvo el siguiente modelo CAD de la figura 88.

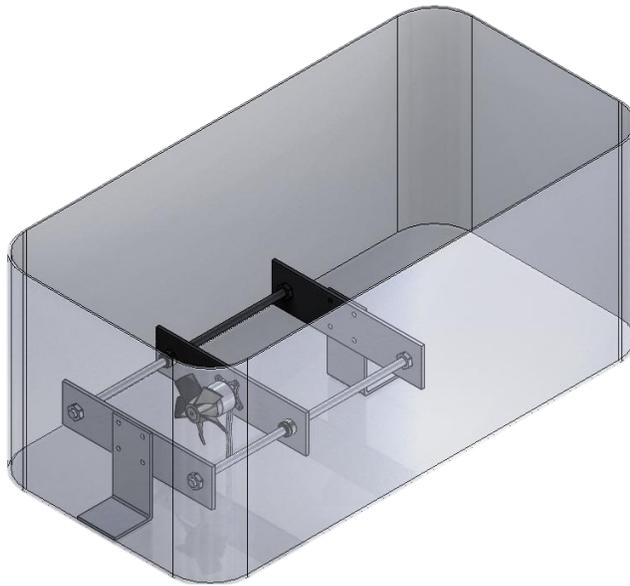


Figura 88 Estructura de pruebas diseñada

En esta estructura se utilizan rodamientos lineales para permitir el desplazamiento del motor libremente y se utilizó un ajuste de tuercas en los ejes para evitar la aplicación de puntos de soldadura. Estos detalles pueden ser observados en la figura 89.

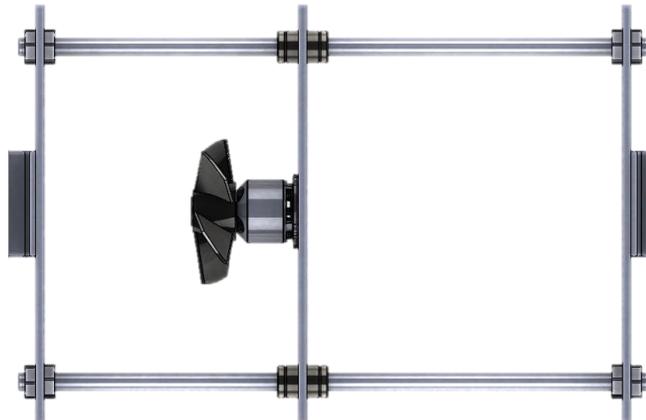


Figura 89 Vista detallada del sistema de desplazamiento

Este último diseño se realizó como prototipo, pero tuvo un problema en la implementación debido a que el sensor utilizado requería el uso de palanca en este caso, además que, al implementarse, no es posible tomar en cuenta los dos sentidos de avance de las turbinas. Es por esto por lo que se llegó a un tercer diseño a partir de los dos anteriores:

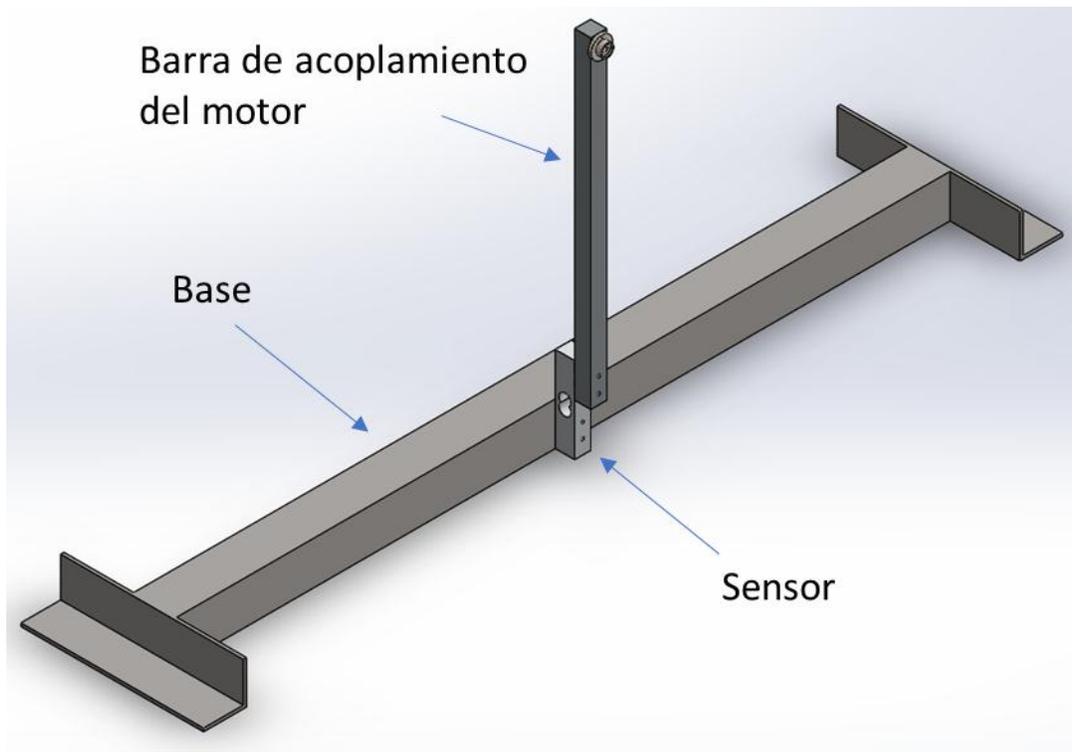


Figura 90 Diseño final del probador

Donde se puede observar que el motor es ubicado de tal modo que aplica directamente en el sensor. Este diseño fue implementado y se obtuvieron los siguientes resultados:



Figura 91 Montaje realizado para el experimento

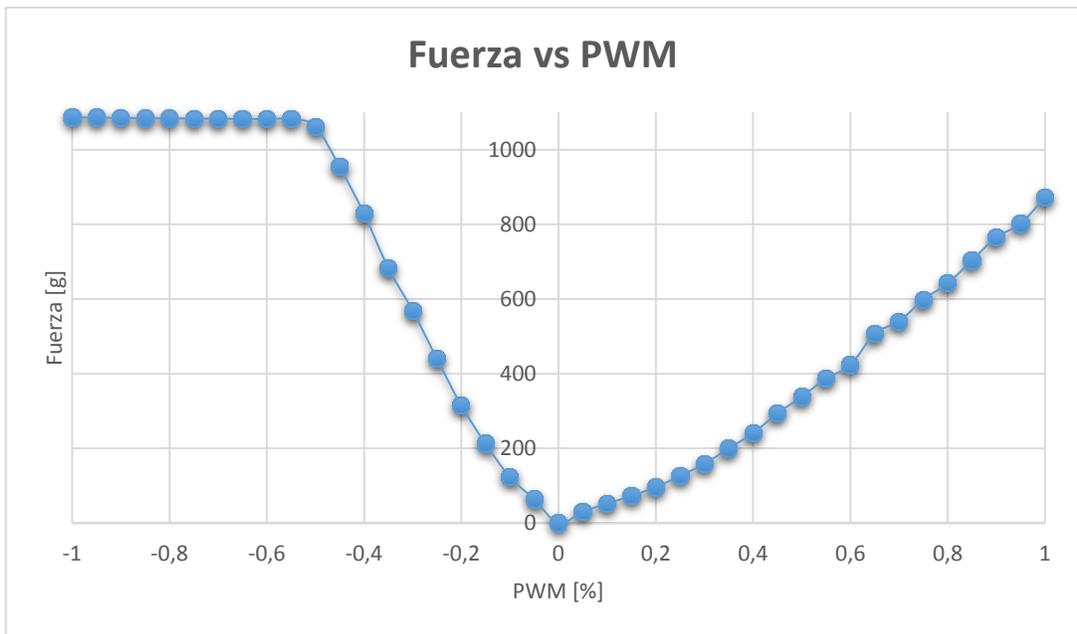


Figura 92 Gráfica correspondiente a motor superior

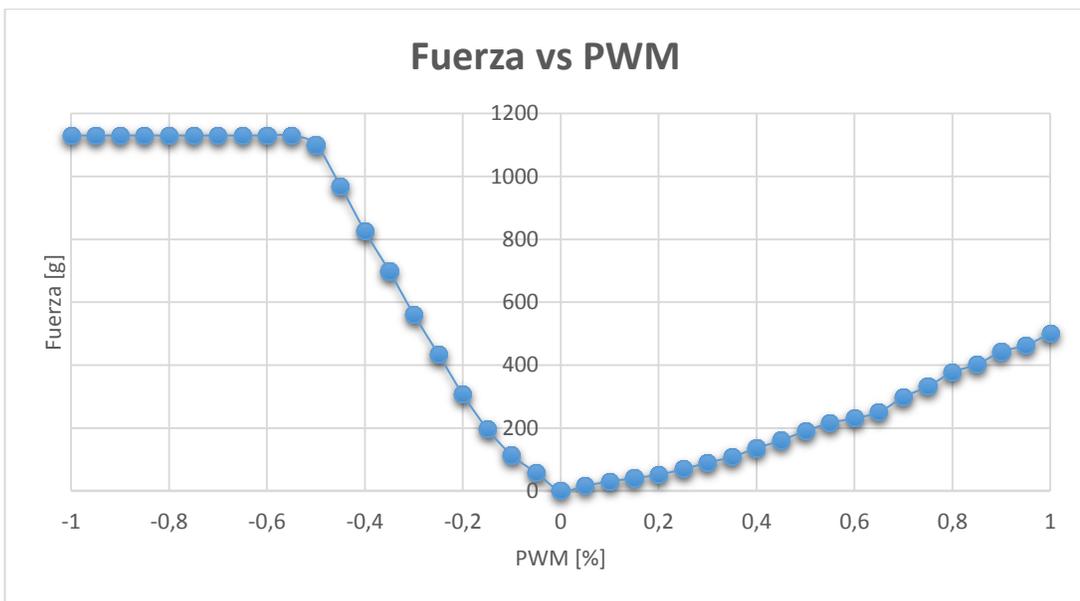


Figura 93 Gráfica correspondiente a motor lateral 1

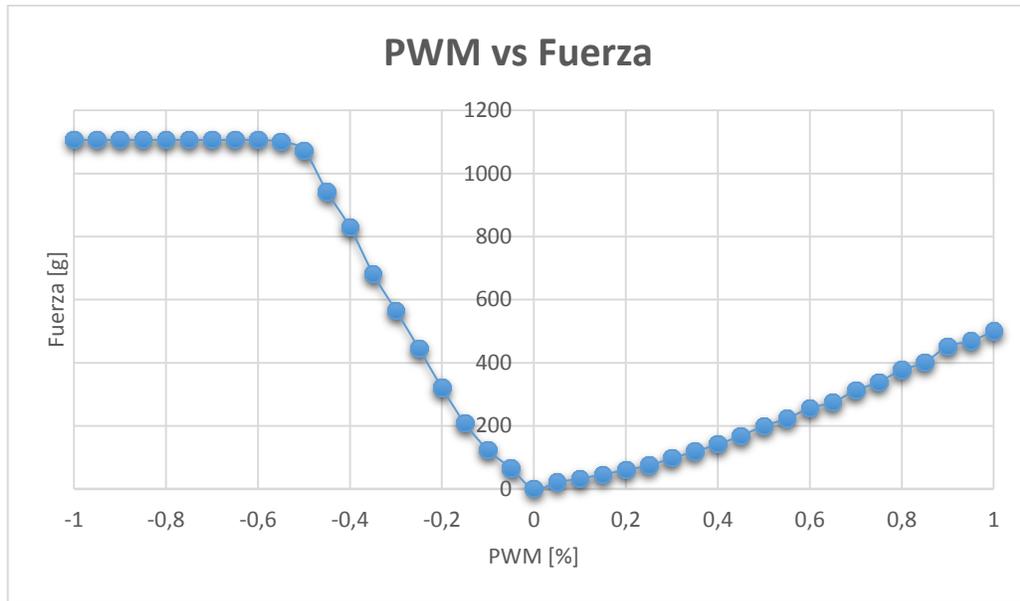


Figura 94 Gráfica correspondiente a motor lateral 2

En las gráficas anteriores se puede observar que en la sección de PWM negativo se encuentra la fuerza para el desplazamiento frontal de navegación (en el cual se llega al tope de la fuerza producida) y en el sector de PWM positivo se muestra la fuerza para desplazamiento en reversa, por lo que se observa una menor fuerza. Se muestra además que en las gráficas de los motores laterales hay una gran similitud, tanto cualitativa (forma de la curva) como cuantitativa (valores muy cercanos entre sí). A pesar de esto, se debe tener en cuenta que uno de los motores laterales genera mayor empuje, lo cual afectará la implementación.

13.4 TEORÍA DE MANIOBRABILIDAD

La ecuación de maniobrabilidad puede ser representada como:

$$M\dot{v} + Cv(v) + Dv(v) + g(\eta) + g_o = \tau + \tau_{wind} + \tau_{wave} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde se presenta la matriz de inercia del sistema y la matriz de Coriolis. Estas a su vez se conforman por las componentes de cuerpo rígido y de masa agregada (producido por la energía potencial producida por las ondas acuáticas). Además, se incluye la matriz de amortiguamiento que incluye las fuerzas hidrodinámicas y dos componentes que representan las fuerzas hidrostáticas:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}v(v) + M_A\dot{v} + C_Av(v) + Dv(v) + g(\eta) + g_o = \tau + \tau_w \text{ Ecuación 13}$$

Donde:

$M = M_{RB} + M_A$ representa la matriz de inercia del sistema (incluyendo masa agregada)

$C = C_{RB} + C_A$ representa la matriz de Coriolis (incluyendo masa agregada)

D representa la matriz de amortiguamiento

$g(\eta) + g_o$ representan las fuerzas hidrostáticas con el vector de fuerzas gravitacionales y de flotación y momentos y un vector sub cero para ajuste previo

$\tau + \tau_{wind} + \tau_{wave}$ Vector de fuerzas, tanto de entradas externas, fuerza del viento y fuerza inducida por las olas respectivamente.

Esta es la forma más general que se le puede dar a una nave. Teniendo en cuenta que se trata de un vehículo subacuático, la fuerza del viento es nula. Además de esto, la fuerza de las olas para el caso específico del proyecto, al trabajarse en un ambiente controlado, es despreciada. Por lo tanto, el modelo final queda representado como el conjunto formado por las ecuaciones de cuerpo rígido (RB), la matriz de amortiguamiento que se compone de los factores de interacción fluido estructura entre el ROV y el agua, los valores de hidrostática en los casos aplicables, es decir, teniendo en cuenta la flotabilidad neutra del vehículo para las fuerzas, pero incluyendo el momento generado en caso de giro, y finalmente, las fuerzas de los actuadores en el vector τ . Con esto, se tiene:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}v(v) + Dv(v) + g(\eta) = \tau \text{ Ecuación 14}$$

14. CONTROL DEL ROV

Para el desarrollo del controlador, es necesario plantear el modelo de la ecuación 14 de forma desglosada. Para esto se comienza por la matriz de inercia de cuerpo rígido, la cual está dada por:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & & & \\ 0 & m & 0 & & & \\ 0 & 0 & m & & & \\ & & & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ & & & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ & & & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \text{Ecuación 15}$$

Donde se incluye la masa en producto con la identidad y la matriz de inercias principales y productos de inercia. Por otro lado, se presenta la matriz de Coriolis y centrípeta de cuerpo rígido:

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & -mr & mq & & & \\ mr & 0 & -mp & & & \\ -mq & mp & 0 & & & \\ & & & 0 & pI_{zx} + qI_{zy} - rI_z & -pI_{yx} + qI_y - rI_{yz} \\ & & & -pI_{zx} - qI_{zy} + rI_z & 0 & -pI_x + qI_{xy} + rI_{xz} \\ & & & pI_{yx} - qI_y + rI_{yz} & pI_x - qI_{xy} - rI_{xz} & 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 16

Además, se incluye la matriz de amortiguamiento. La forma de la matriz para el caso particular del OpenRov es la siguiente:

$$D = \begin{bmatrix} X_{u|u}|u| & 0 & B2_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B1_{u|u}|u| & 0 & Z_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \text{Ecuación 17}$$

Donde,

$$X_{u|u|} = \left(\frac{1}{2} \rho C_d A_f \right) \text{ Ecuación 18}$$

En cuanto a la hidrostática, se debe tener en cuenta que, al tratarse de un vehículo con flotabilidad neutra, las fuerzas, tanto de peso, como flotación se anulan, por tanto, en el vector:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} f \\ r \times f \end{bmatrix} \text{ Ecuación 19}$$

Es luego representado como:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ r \times f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ \rho g V z_{GB} s \varphi c \theta \\ -\rho g V z_{GB} s \theta \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Ecuación 20}$$

Finalmente, se muestran las fuerzas aplicadas en el vector τ :

$$\tau = \begin{bmatrix} F_{T1} + F_{T2} \\ 0 \\ F_{T3} \\ 0 \\ L_z(F_{T1} + F_{T2}) + L_x F_{T3} \\ L_y(F_{T1} - F_{T2}) \end{bmatrix} \text{ Ecuación 21}$$

Con esto, se lleva a el montaje del modelo en el software Matlab® con el fin de diseñar los lazos de control. Este modelo es llevado a Simulink® con el propósito de obtener datos de este y comparar con datos experimentales obtenidos a partir de pruebas para realizar la respectiva validación del modelo. A continuación, se presenta una imagen del modelo en el software:

Figura 95 Modelo montado en Simulink

Y se muestra la comparación con los datos experimentales:

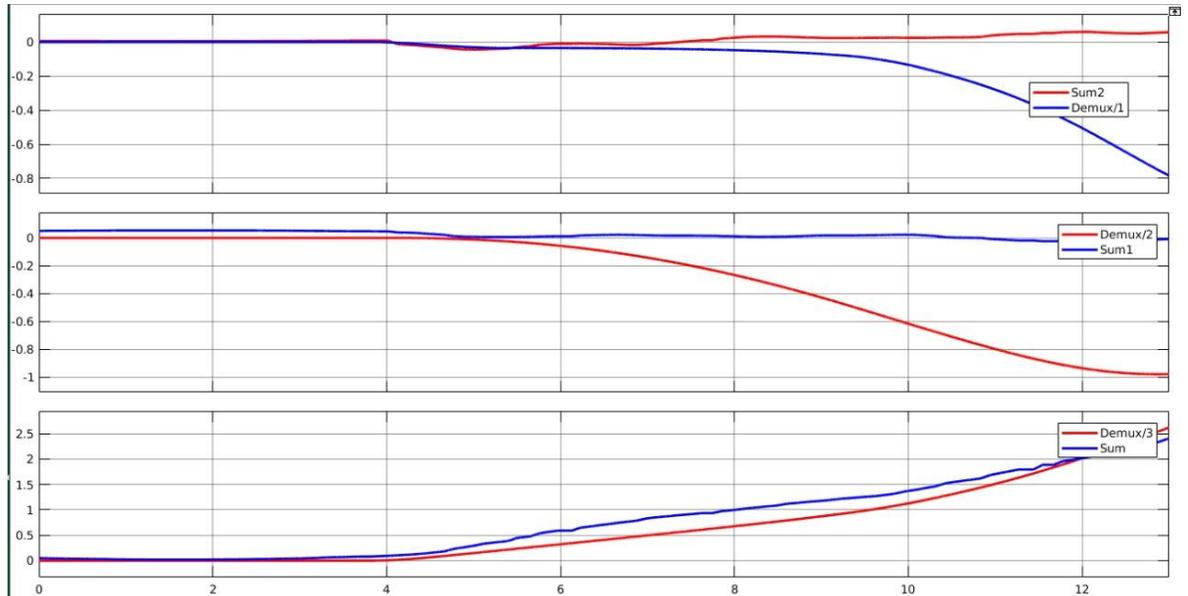


Figura 96 Validación del modelo con los datos experimentales

Con esto, se realiza el diseño de 3 controladores, un controlador PID para las variables de profundidad y control de ángulo Yaw de orientación, un controlador LQG para las variables de profundidad, ángulo Yaw y velocidad estimada, y finalmente, un controlador en modo deslizante para controlar una de las variables. A continuación, se muestran las imágenes de los controladores montados en el software Simulink®:

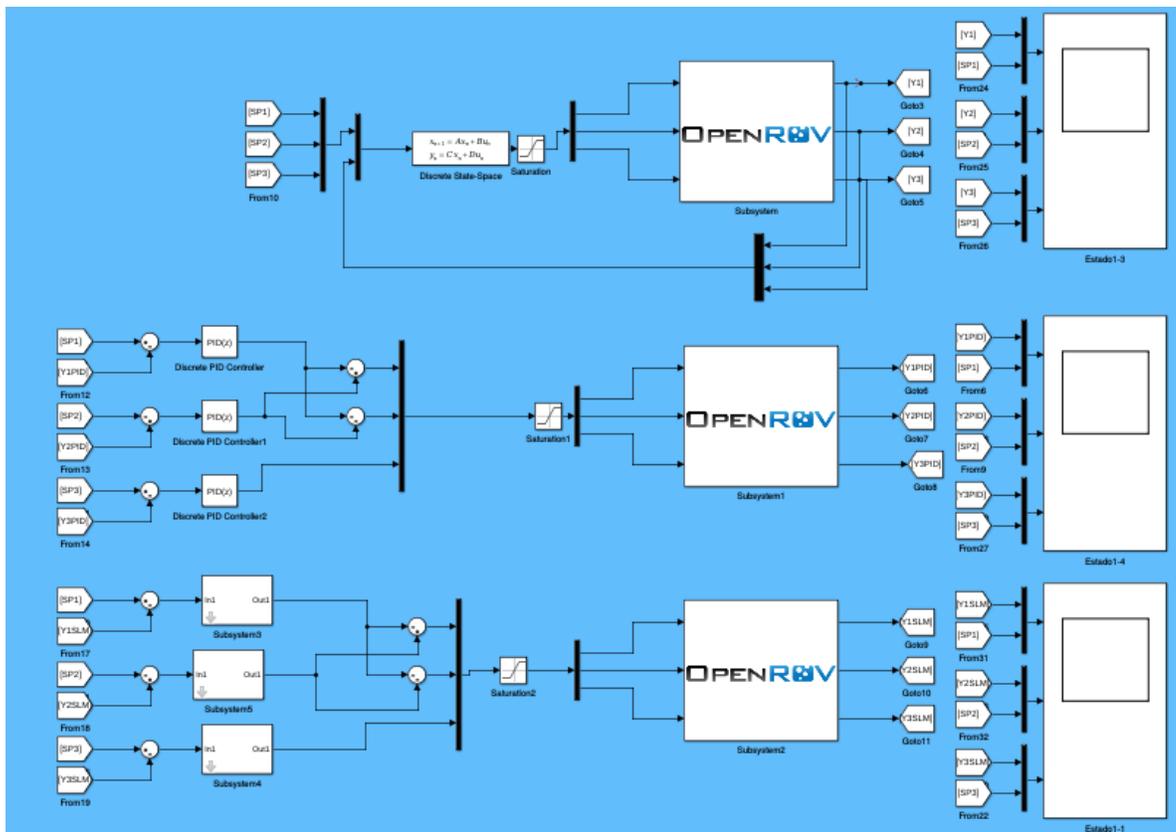


Figura 97 Simulación de controladores diseñados

Estos controladores tienen las siguientes características:

- PID: Fácil de sintonizar, solo se puede hacer con controladores desacoplados. Donde las tres acciones que se anejaron fueron diferencia de torque en los motores, un avance lineal en los dos motores de avance y la fuerza en el motor vertical.
- LQG: Para este controlador se diseñó el LQR para 3 grados de libertad, y el observador se diseñó para a partir de la salida de ángulo yaw, profundidad y los otros ángulos medibles hacer el sistema observable y hacer que el estado de la velocidad retroalimente al lazo de control
- SMC: Esta estrategia de control puede ser definida acoplada o desacoplada mente. Debido a la complejidad del sistema se trabajó con controladores desacoplados. En estos controladores se trabajaron las mismas acciones de control que en el PID. Para definir la acción de control se trabajó con la siguiente superficie de deslizamiento. $S(e) = \delta \int e + \beta e + \mu \dot{e}$. Donde las constantes fueron sintonizadas para cada grado de libertad.

Con esto, se realizan las correspondientes simulaciones y se obtienen las siguientes gráficas:

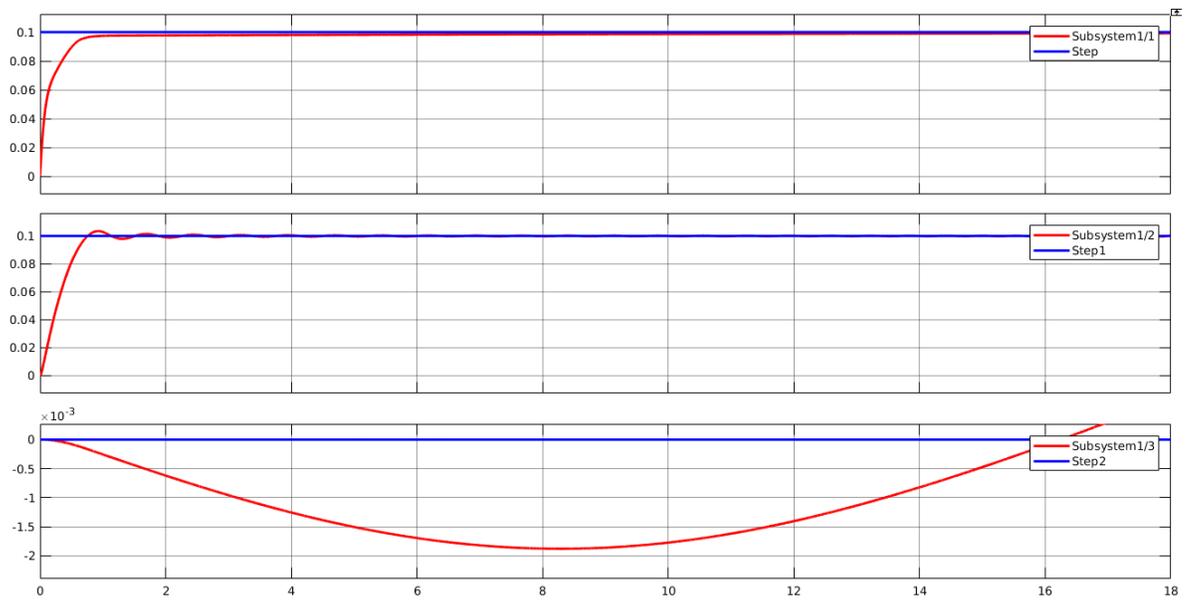


Figura 98 Simulación de controlador PID

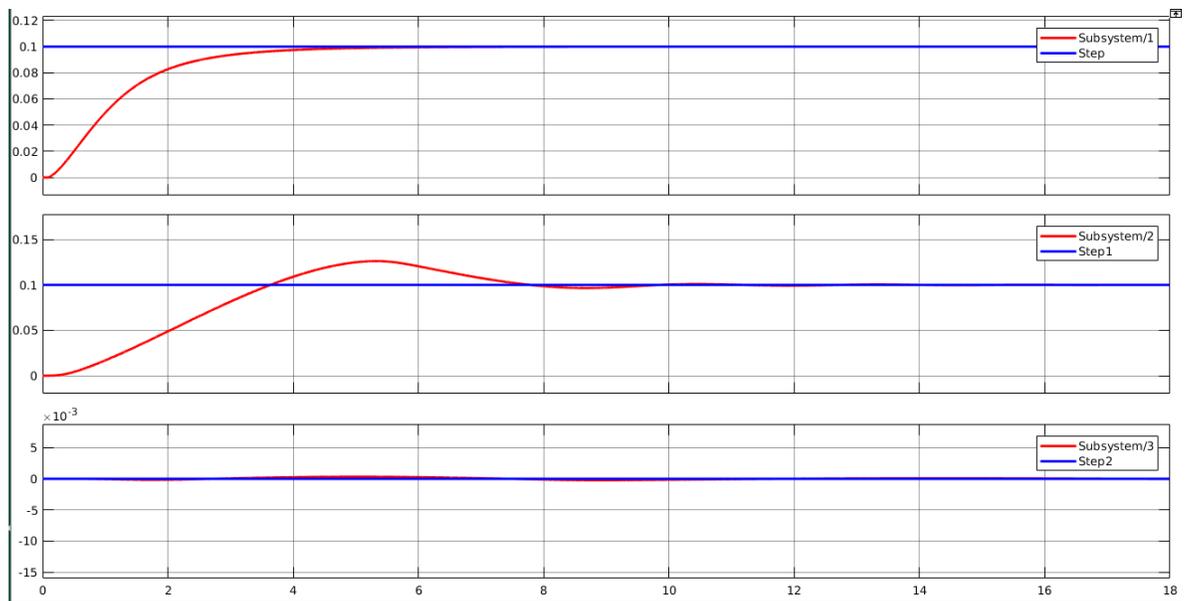


Figura 99 Simulación de controlador LQG

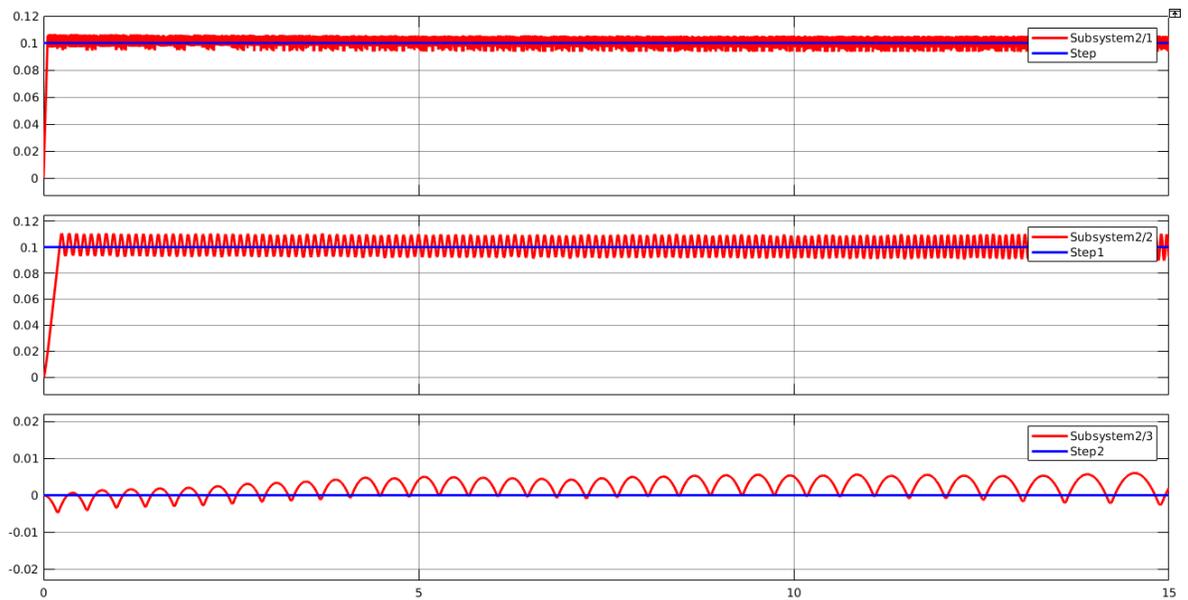


Figura 100 Simulación de controlador SMC

Estos resultados presentan las siguientes características:

| Controlador | Sobrepaso Mayor | Tiempo de establecimiento Mayor |
|-------------|-----------------|---------------------------------|
| PID | 5% | 1.1 seg |
| LQG | 3% | 3 seg |
| SMC | 8% | 0.7 seg |

Tabla 11 Resultados de simulaciones de controladores

Con esto se obtiene que el controlador simulado más eficiente es el modo deslizante. Finalmente, estos controladores se programan dentro del ROV. Esto se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Se abre el modelo para modificación en la plataforma de cloud9.
- Se modifica la interfaz gráfica para utilizar la herramienta de diagnóstico de motores como fuente de los setpoint de las 3 variables.
- Se modifica el control PID de punto de equilibrio que venía por defecto del fabricante para que reciba los valores de la interfaz.
- Se utiliza el habilitador de los controladores para cambiar entre controlador LQG y controlador PID
- Se importa las librerías de matrices para arduino en lenguaje C++
- Se programa el pseudocódigo de un controlador LQG utilizando las matrices y vectores obtenidos del diseño de controladores.

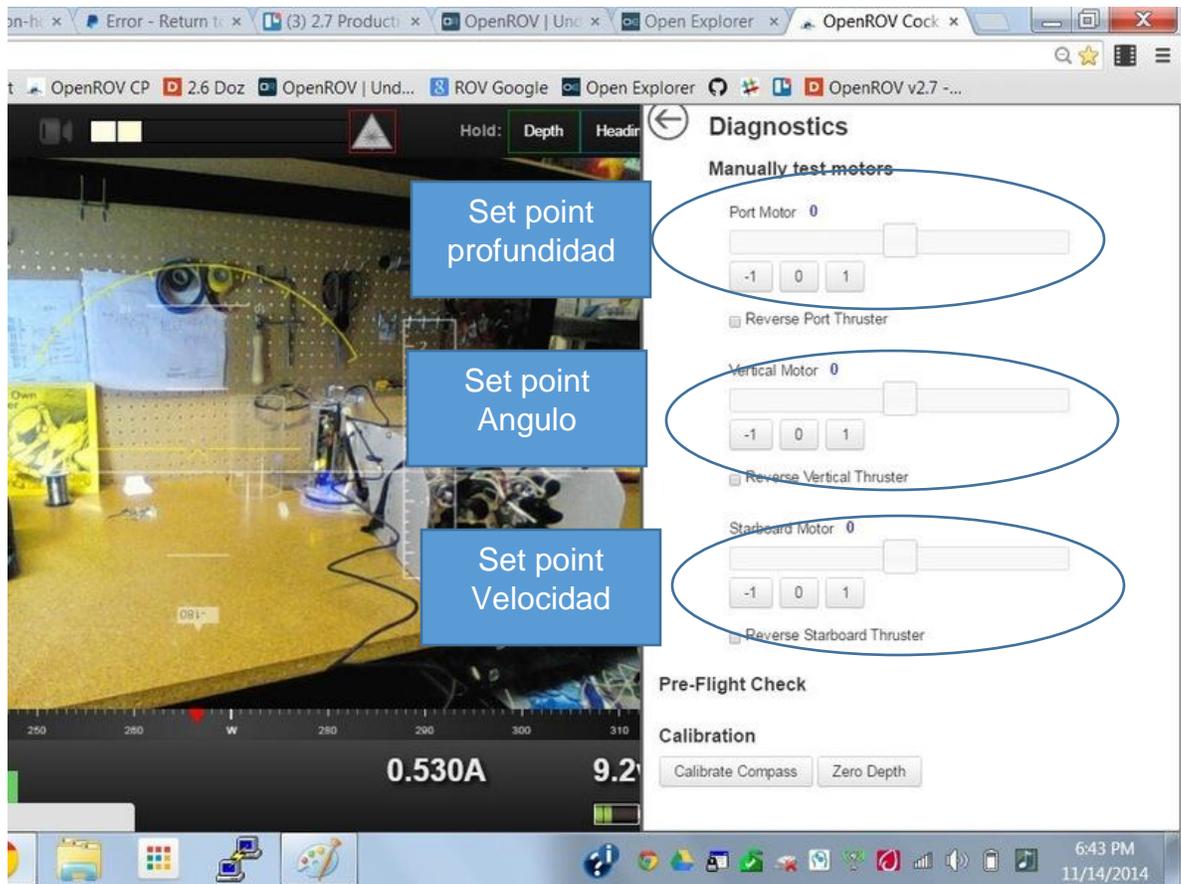


Figura 101 Parte de la interfaz gráfica destinada para Set points de los controladores

15.RESULTADOS

Con lo anterior, se implementaron en el vehículo lazos de control para velocidad y profundidad, con el fin de navegar con una velocidad específica en un plano deseado. Para verificar el funcionamiento de los controladores, se realizaron pruebas en piscina (ambiente controlado) y se realizó otra prueba en un pozo de cascada para verificar la respuesta ante perturbaciones. El material audiovisual será anexado en la entrega del CD. A continuación, se muestran algunas imágenes de las tomas de las pruebas:



Figura 102 Prueba de profundidad ROV en ambiente controlado



Figura 103 Prueba de velocidad ROV en ambiente controlado



Figura 104 Prueba de profundidad ROV en ambiente controlado



Figura 105 Prueba de profundidad ROV en ambiente con perturbaciones



Figura 106 Prueba de profundidad ROV en ambiente con perturbaciones



Figura 107 Prueba de velocidad ROV en ambiente con perturbaciones



Figura 108 Prueba de velocidad ROV en ambiente con perturbaciones

Para los resultados numéricos, se presenta a continuación una comparación entre las respuestas simuladas y reales, obtenidas a partir de una grabación de datos del ROV en navegación. Estas pruebas fueron realizadas aplicando los controladores embebidos. Se debe tener en cuenta que el controlador PID evaluado es el diseñado en la sección 14 y no el incluido por defecto en el OpenROV (punto de equilibrio para ángulo y profundidad):

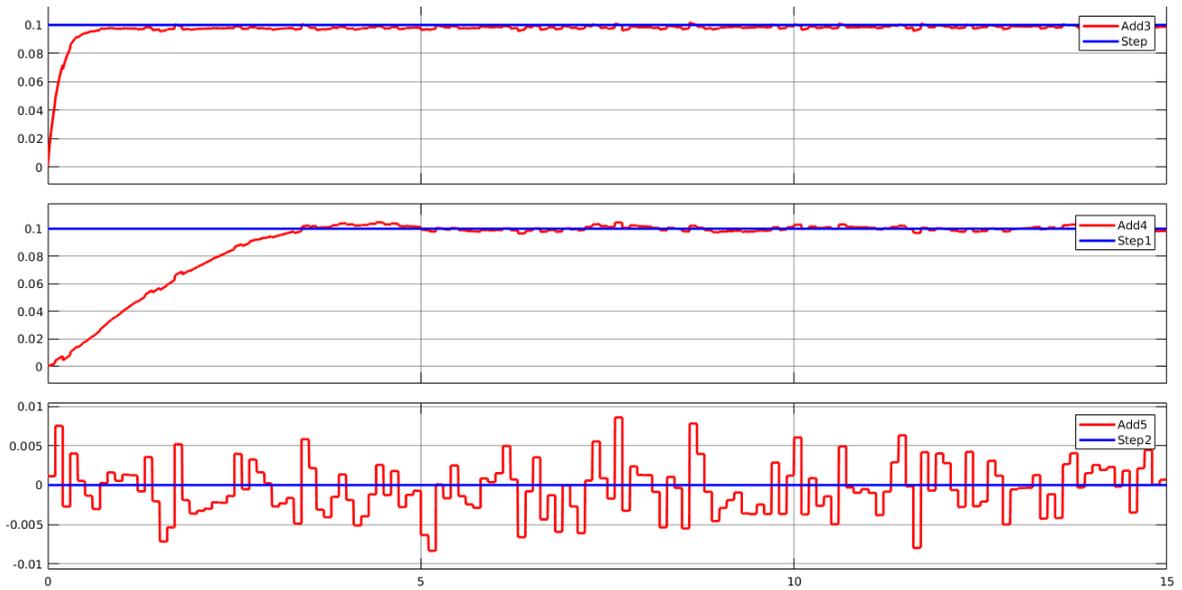


Figura 109 Resultados del controlador PID

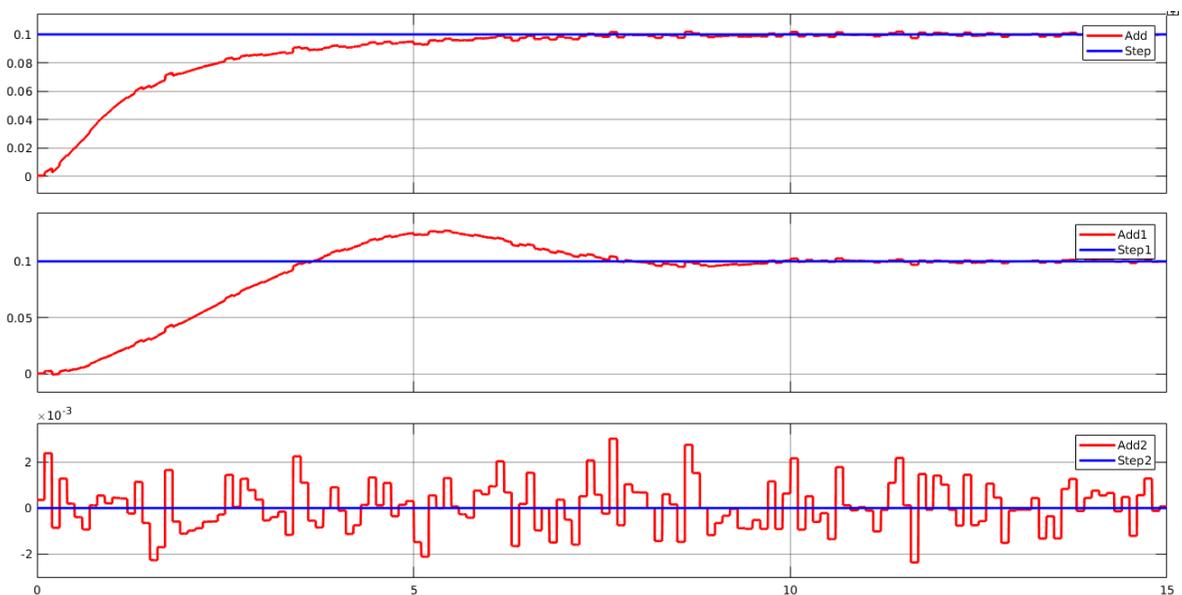


Figura 110 Resultados del controlador LQG

El controlador de modo deslizante no pudo ser implementado por razones que serán profundizadas en la sección 16 de Conclusiones. Se puede observar que la mejor respuesta fue dada por el controlador PID. Esto se puede corroborar en la siguiente tabla de error:

| Controlador | Índice de error ITSE |
|-------------|----------------------|
| PID | 0.0267 |
| LQG | 0.0389 |

Tabla 12 Evaluación de controladores con índice de error

16. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta las diferentes secciones del proyecto, se presentan las observaciones y conclusiones en orden del proceso de desarrollo del proyecto.

16.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ENSAMBLAJE

A partir de las siguientes observaciones:

- Se debe tener en cuenta la guía de armado del openROV, en la cual se encuentra toda la información necesaria para el correcto ensamble del vehículo
- Es necesario ser cuidadoso al realizar el sellamiento del vehículo, ya que de este proceso depende gran parte del funcionamiento del ROV
- Al realizarse el proceso adecuado, los sensores láser e IMU deben ser calibrados adecuadamente como se explica en la guía de ensamble, de modo que no presente futuros inconvenientes en la toma de datos
- La implementación de sensórica externa es viable electrónicamente, mas no mecánicamente, debido a que se perturba la flotabilidad neutra del vehículo y cambia el comportamiento del mismo.

Se llega a la conclusión:

El diseño del OpenROV 2.8 es óptimo para realizar tareas exclusivas de navegación a lazo abierto, sin muchas posibilidades de agregar instrumentación adicional. Se puede sensar la profundidad y los ángulos del vehículo, pero con tiempos de lectura de 100 milisegundos, lo que limita los tiempos de muestreo de los controladores a este valor mínimo. A pesar de esto, se debe recalcar que se trata de un vehículo de bajo costo, por lo que se puede esperar que al incrementar la inversión en hardware se omitan estos problemas.

16.2 CONCLUSIONES SOBRE EL DESARROLLO DE LAS SIMULACIONES CFD

A partir de las siguientes observaciones:

- La geometría pudo ser simplificada al punto de conservar las áreas proyectadas del vehículo y a su vez disminuir problemas de cómputo.

- La malla personalizada utilizada en el proyecto permitió una mejora en la calidad (como se observa en la figura 56) y gracias a esto, disminuyó la diferencia de error en la convergencia de la simulación
- La malla óptima para la simulación fue de 2'431.212 elementos con un error cercano al 0% (ver figura 63)

Se llega a la conclusión:

El vehículo no posee un buen diseño hidrodinámico debido a la gran burbuja de separación observada en los resultados. A nivel rotacional se observa incluso, que, en un fluido estacionario, el vehículo presenta una burbuja de separación que conlleva a una variación de velocidad del flujo con valor alto.

16.3 CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO

A partir de las siguientes observaciones:

- La realización de un modelo adecuado para un vehículo subacuático es una tarea de alta complejidad, teniendo en cuenta todos los factores que influyen en él
- La teoría de maniobrabilidad permite agregar términos al modelo no contemplados directamente en las ecuaciones obtenidas a partir del modelo de Newton-Euler
- Se debe tener en cuenta la importancia del producto de velocidades en la matriz de amortiguamiento D, con el fin de conservar el sentido del flujo, lo que puede causar problemas en los resultados
- Como se pudo observar, el modelo del cordón umbilical es un tema extenso y complejo, teniendo en cuenta que puede ser abordado a nivel experimental, estimado por métodos numéricos o a partir de aproximaciones analíticas. A pesar de esto, se obtuvieron los resultados necesarios para llegar al despreciamiento en el modelo.
- Respecto a los actuadores, se pudo observar que no trabajan en forma lineal, en especial en el cruce por cero en el que varían los resultados en magnitud de velocidad de una forma muy considerable

Se llega a la conclusión:

El modelo generado es adecuado teniendo en cuenta el peso que se le dio en el desarrollo del proyecto y en los resultados obtenidos en la validación del modelo.

16.4 CONCLUSIONES SOBRE EL CONTROL

Finalmente se concluye que los controladores simulados a partir del modelo cumplieron su función de forma eficiente, tanto en LQG como en modo deslizante. A pesar de esto, se presentaron múltiples complicaciones en la implementación real, debido a la sensórica utilizada. Esto impidió la implementación del controlador de modo deslizante debido a las bajas frecuencias que ocasionaban problemas de chattering. A pesar de que se hubieran obtenido mejores resultados en el PID, se debe tener en cuenta que la acción del controlador LQG incluye la estimación de la velocidad, de modo que al tener más estados por controlar presenta retardos.

17. BIBLIOGRAFÍA

[1] FOSSEN, Thor. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 1 ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 575 p. ISBN 978-1-119-99149-6.

[2] WAREHAM, M. ROVs Continue to Develop Capacity for Deepwater Operations. En: Offshore PennWell Magazine. Vol. 4, No. 73, 2013, p. 108-109.

[3] BORCHARDT, J.K. Robots of the Sea. En: Mechanical Engineering ASME Magazine. 2008, p. 36-39.

[4] IMCA. Code of Practice for the Safe & Efficient Operation of Remotely Operated Vehicles. En: IMCA. Vol. (4), No. 3, 2009, p. 5-10.

[5] CARACOL. La industria petrolera en Colombia está seriamente amenazada por consultas populares. En: Caracol Radio [en línea]. (5 de jun., 2017). Disponible en: <http://caracol.com.co/radio/2017/06/05/nacional/1496686943_796052.html> [Citado el 4 de agosto de 2017]

[6] CAMPETROL. Producción promedio de petróleo en Colombia sería de 885 mil barriles diarios en 2016. En: Campetrol [en línea]. (2015). Disponible en: <<http://campetrol.org/produccion-promedio-de-petroleo-en-colombia-seria-de-885-mil-barriles-diarios-en-2016/>> [Citado el 4 de agosto de 2017]

[7] ECONOMÍA Y NEGOCIOS. Hasta 105 por ciento más en recursos para el petróleo. En: El Tiempo [en línea]. (23 de feb., 2017). Disponible en: <<http://www.eltiempo.com/economia/sectores/inversion-en-petroleo-en-colombia-en-2017-61231>> [Citado el 4 de agosto de 2017]

[8] MENDOZA, Clara. Diseño Detallado de un ROV (Vehículo Operado Remotamente) Para Exploración Marítima. Bucaramanga, 2012, 28h. Trabajo de grado (Ingeniería Mecatrónica). Universidad Autónoma de Bucaramanga. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecatrónica.

[9] ALDANA, Andrés, ESTEBAN, Helio. Model-based optimal control of a small remotely operated vehicle. En: ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2017: 2017: Tampa, Florida). p. 1-14.

[10] GOHEEN, K., JEFFERYS, E. The application of alternative modelling techniques to ROV dynamics. En: IEEE International Conference on Robotics and Automation (1990: Cincinnati). p. 1302-1309 vol.2.

[11] CLARK, Linton, GOHEEN, Kevin, YOERGER, Dana. Practical Experiments in ROV System Identification. En: IEEE American Control Conference (1993: San Francisco). p. 575-579.

[12] SAVARESI, S., PREVIDI, F., DESTER, A., BITTANTI, S., RUGGERI, A. Modeling, identification, and analysis of limit-cycling pitch and heave dynamics in an ROV. En: IEEE Journal of Oceanic Engineering. No. 29, No. 2 (Abr., 2004); ISSN: 0364-9059

[13] PIENAAR, Riaan. Simulation and Modelling of ROVs and AUVs. Tasmania, 2011, 11 h. Trabajo de grado (Bachelor of Engineering). Australian Maritime College. Marine and Offshore Systems.

[14] RUSTRIAN, Wilmer, SHANKAR, Praveen. Modeling of a Small Remotely Operated Underwater Vehicle for Autonomous Navigation and Control. En: ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2016: 2016: Phoenix, Arizona). p. 1-11.

[15] GASKIN, Christopher. Design and Development of an ROV / AUV. Tasmania, 2009, 37 h. Trabajo de grado (Bachelor of Engineering). Australian Maritime College. Marine and Offshore Systems.

[16] WEST, William. Remotely Operated Underwater Vehicle. Tasmania, 2009, 83 h. Trabajo de grado (Bachelor of Engineering). Australian Maritime College. Marine and Offshore Systems.

[17] MADERO, Damian, DURAN, John. Diseño de un Prototipo ROV (Remotely Operated Vehicle) Subacuático Experimental. Bucaramanga, 2012, 128 h. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

[18] GOHEEN, K., JEFFERYS, E. Multivariable self-tuning autopilots for autonomous and remotely operated underwater vehicles. En: IEEE Journal of Oceanic Engineering. No. 15, No. 3 (Jul., 1990); ISSN: 0364-9059

[19] TREBI-OLLENNU, A., STACEY, B., WHITE, B. A multivariable decoupling design of an ROV depth control system: a direct adaptive fuzzy SMC approach. En: IEEE American Control Conference (1995: Seattle). p. 3244-3248 vol.5.

[20] CORRADINI, M., ORLANDO, G. A discrete adaptive variable-structure controller for MIMO systems, and its application to an underwater ROV. En: IEEE Transactions on Control Systems Technology. No. 5, No. 3 (Mayo, 1997); ISSN: 1063-6536

[21] MOREIRA, Lucia, GUEDES, C. H₂ and H_∞ Designs for Diving and Course Control of an Autonomous Underwater Vehicle in Presence of Waves. En: IEEE Journal of Oceanic Engineering. No. 33, No. 2 (Abr., 2008); ISSN: 0364-9059

[22] JAYASUNDERE, N.D., GUNAWICKRAMA, S.H. Underwater ROV with Fuzzy Logic Motion Control. En: IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (*ICIAFS2016: 2016: Galle*). p. 1-6.

[22] CHRIST, Robert, WERNLI, Robert. The ROV Manual: A User Guide for Observation Class Remotely Operated Vehicles. 1 ed. Oxford: Elsevier, 2007. 308 p. ISBN 978-0-7506-8148-3

[23] GALISTEO, Héctor. Propuesta de nuevos dispositivos, mejoras de circuitos y sistemas implementados en ROVs para trabajos de búsqueda y rescate. Universitat Politècnica de Catalunya, 2011. 127 p.

[24] ZHOU, Feng, GU, Linyi, LUO, Gaosheng, CHEN, Jiawang, ZHENG, Mengjun, SHAO, Zongze, DONG, Chunming. Development of a hydraulic propulsion system controlled by proportional pressure valves for the 4500m work-class ROV. En: IEEE Oceans (2013: San Diego). p. 1-6.

[25] KORVINK, Jan, PAUL, Oliver. MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications. 1 ed. New York: Springer, 2006. 965 p. ISBN: 3-540-21117-9

[26] KAAJAKARI, Ville. Practical MEMS: A New Textbook Focusing on Analysis and Design of Microsystems. 1 ed. Louisiana: Small Gear Publishing, 2009. 496 p. ISBN-13: 978-0982299104

[27] OPENROV. OpenROV v2.8 Kit [en línea]. <<https://store.openrov.com/collections/openrov/products/openrov-v2-8-kit>> [citado el 02 de agosto de 2017]

[28] OPENROV. Open Explorer [en línea]. <<https://www.openexplorer.com/home>> [citado el 02 de agosto de 2017]

[29] CENGEL, Yunus, CIMBALA, John. Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. 1 ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2006. 956 p. ISBN 970-10-5612-4

[30] OPENROV. OpenROV Dozuki [en línea]. <<https://www.openexplorer.com/home>> [citado el 04 de septiembre de 2017]

[31] BUCKHAM, Bradley. Dynamics Modelling of Low-Tension Tethers for Submerged Remotely Operated Vehicles. Victoria, 1997, 217p. Tesis doctoral

(Ingeniería Mecánica). University of Victoria. Department of Mechanical Engineering.

[32] TRIANTAFYLLOU, Michael, BLIEK, Antoine, BURGESS, Jim, HYUNKYOUNG, Shin. Mooring Dynamics for Offshore Applications: MIT, 1986. 252p. MIT-T-86-001 C2.

[33] MCLAIN, T., ROCK, S. Experimental Measurement of ROV Tether Tension. En: Proceedings of ROV'92 (1992: San Diego). 6p.

[34] MULJOWIDOKO, K., SAPTOADI, N. PRAYOGO, N., BUDIYONO, A. Design and Testing of Underwater Thruster for SHRIMP OV-ITB. En: Indian Journal of Marine Sciences. No. 38, No. 3 (Sep, 2009); pp. 338-345.

[35] Skorpa, Steinar. Numerical Simulation of Flow Around Remotely Operated Vehicle (ROV). Trondheim, 2012, 87p. Tesis de maestría (Tecnología Marina). Norwegian University of Science and Technology. Department of Marine Technology.