



## **8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA**

Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007

### **DISEÑO MECÁNICO DE UN VEHÍCULO SUMERGIDO OPERADO REMOTAMENTE PARA INSPECCIÓN SUBACUÁTICA**

**Ramírez, J. A., Gutiérrez, L. B., Vásquez, R. E., Flórez, D. A.\***

\*Grupo de Automática y Diseño A+D, Universidad Pontificia Bolivariana,  
Circular 1 #70-01 Bl. 11 Of. 255, Medellín, COLOMBIA  
\*e-mail: [juan.ramirez@upb.edu.co](mailto:juan.ramirez@upb.edu.co)

#### **RESUMEN**

En este artículo se presenta el diseño mecánico de un vehículo sumergible operado remotamente ROV, con el que se busca entregar información visual confiable para inspección y mantenimiento de cascos de barcos y estructuras sumergidas, en los puertos de intercambio comercial colombianos. El diseño se parte en tres grandes etapas (preliminar, básica y detallada), las cuales comprenden la ejecución de actividades como la exploración del estado del arte, la definición de las restricciones y especificaciones de diseño, la división del vehículo en subsistemas funcionales, el planteamiento y selección de alternativas para cada subsistema, el análisis y síntesis de piezas que requieren ser manufacturadas, la selección de partes comerciales y la integración de los subsistemas en un solo conjunto. La validación y definición de cada uno de los elementos del vehículo se hace utilizando herramientas CAD/CAE y software de programación de alto nivel, basados en principios de ingeniería como la mecánica de sólidos, materiales y fluidos. Los resultados obtenidos, tales como planos de taller y ensamble y la documentación del diseño tanto en medios magnéticos como escritos, permitirán que la construcción y la correcta operación de un prototipo de ROV sean posibles.

**PALABRAS CLAVE:** ROV, Inspección subacuática, Diseño de vehículos.

**Código 1450**

## **INTRODUCCIÓN**

Debido a los sucesos ocurridos el 11 de Septiembre de 2001, se ha incrementado la preocupación internacional con respecto a la seguridad. Debido a esto, la Organización Marítima Internacional ha tomado como política el refuerzo de la seguridad portuaria, a través del Código para la Protección de Buques e Instalaciones Portuarias, Código PBIP [1]. Existe entonces la necesidad de implementar métodos de inspección subacuática que presenten bajo riesgo para los operarios, y que sean desarrollados con ingeniería local, favoreciendo el desarrollo de productos de innovación en el país, con los cuales se da cumplimiento a las políticas de seguridad establecidas para los puertos que poseen comercio internacional.

El Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana y el Grupo de Investigación en Ingeniería Naval GIIN de la Escuela Naval Almirante Padilla, iniciaron en enero de 2006 la ejecución del proyecto “Desarrollo de un vehículo sumergible operado remotamente ROV, para inspección subacuática”. Este proyecto fue formulado con el objetivo de diseñar y construir un robot subacuático no tripulado, que esté en la capacidad de entregar información visual confiable para realizar labores de vigilancia y mantenimiento en estructuras sumergidas, cascos de barcos y secciones subacuáticas de instalaciones portuarias.

Para la ejecución del proyecto se conformaron cuatro grupos de trabajo: diseño mecánico y naval, modelación y simulación, hardware, y software y control. La división por subsistemas, nace de las experiencias previas que se tienen en el desarrollo de vehículos subacuáticos no tripulados, [2, 3, 4, 5], buscando el desarrollo conjunto de todos los subsistemas que conforman el vehículo.

El presente artículo se centra en el diseño de la plataforma mecánica de un robot subacuático operado remotamente, abordándolo en sus tres etapas fundamentales: diseño preliminar, diseño básico y diseño de detalle.

## **METODOLOGÍA DE DISEÑO**

Para el diseño de la plataforma mecánica del ROV se ha usado la metodología general del proceso de diseño de máquinas [6], complementada con la metodología clásica de diseño naval conocida como la espiral de diseño [7, 8 y 9]. El diseño se divide en tres etapas: diseño conceptual, diseño básico y diseño detalle.

La etapa de diseño preliminar tiene como propósito determinar claramente las características y especificaciones del diseño, para ello es necesario hacer un estudio del estado del arte y, a partir de la necesidad planteada, fijar los alcances que condicionan el diseño.

La etapa de diseño básico busca seleccionar las alternativas más convenientes para los subsistemas que componen el ROV. La selección de alternativas se hace de acuerdo con los resultados de la etapa de diseño preliminar.

La etapa de diseño de detalle parte de los resultados del diseño básico y mediante procesos de síntesis y análisis evoluciona hasta definir exactamente cómo se construirá el ROV.

Debido a la cantidad de variables que afectan el diseño y sus estrechas relaciones, es necesario fijar unas condiciones y limitaciones que sirvan de referencia durante todas las etapas del proceso. De esta forma se asegura que el resultado final converge en las especificaciones establecidas para el diseño.

## **DISEÑO PRELIMINAR**

A partir de la necesidad planteada, se realizó una búsqueda de información relacionada con vehículos subacuáticos y con las condiciones de operación que debería de cumplir. De esta forma se logró definir las características de la solución al problema de diseño. Los resultados de mayor importancia se describen a continuación.

### **Estado del arte**

Los vehículos subacuáticos operados remotamente (ROV) han tenido un desarrollo amplio en países industrializados, y se puede encontrar una gran cantidad de experiencias en el ámbito industrial, comercial y académico, para aplicaciones como mantenimiento y operaciones fuera de borda para la industria petrolera, aplicaciones militares (vigilancia, reconocimiento), inspección y mantenimiento para la industria portuaria e investigación subacuática [10 y 11].

## **Clasificación de los ROV**

De acuerdo a sus aplicaciones, se pueden definir tres categorías para este tipo de vehículos: trabajo pesado, observación y mini/micro ROV.

**Trabajo pesado.** Usualmente de gran tamaño y operados por un equipo de trabajo calificado, son utilizados para excavaciones, enterrado de cables, reparaciones y recuperación de objetos pesados, a grandes profundidades.

**Observación.** Son más pequeños comparados con los de trabajo pesado, pero están en capacidad de realizar una gran cantidad de tareas, especialmente en sitios a los cuales los de trabajo no pueden llegar o serían subutilizados. Las tareas típicas son: inspección de puertos, barcos y tuberías, operaciones de búsqueda y rescate, entre otros.

**Mini/micro ROV.** Este tipo de vehículos son los más pequeños en tamaño y peso, pueden ser de 15 kg para los mini y de 3 kg para los micro. Son utilizados para labores de inspección, visualización e investigación.

## **Experiencias previas**

El Grupo de Automática y Diseño A+D tiene algunas experiencias previas en el desarrollo de ROV, las cuales han aportado información valiosa para el desarrollo del nuevo prototipo.

**VISOR I.** Fue desarrollado en el año 1994, para ejecutar labores de investigación a una profundidad máxima de 40 m. Contiene una cámara de video y un sistema de iluminación. Para el desplazamiento cuenta con cuatro propulsores: dos para movimiento de avance y dos para ascenso y descenso. Está equipado con compartimientos estancos para alojar parte de la electrónica y los sistemas de distribución de potencia, [3].

**VISOR II.** Fue desarrollado en 1998 como un vehículo de funcionamiento dual: autónomo y operado remotamente. Fue diseñado para operar a una profundidad máxima de 100 m, para desplazarse a una velocidad máxima de 1 nudo (0.5 m/s) y moverse con cuatro grados de libertad (desplazamiento longitudinal, rotación alrededor del eje vertical, desplazamiento transversal y desplazamiento vertical), con un sistema de adquisición de imágenes, entre otros, [3].

## **CONSIDERACIONES Y VARIABLES DE DISEÑO PARA EL VEHÍCULO**

Las consideraciones y variables de diseño se desprenden de las características del ambiente de trabajo al cual estará sometido el vehículo. Éstas determinan aspectos como la presión de trabajo, la velocidad de operación, las condiciones de flotabilidad, las condiciones ambientales, entre otros. En esta sección se describen las más relevantes.

### **Consideraciones ambientales**

Entre las características a resaltar del agua, que tienen relación con el problema a resolver, están: baja compresibilidad, alta capacidad calorífica y conductividad térmica, opacidad para la transmisión de radiación electromagnética en el espectro visible, opacidad para la transmisión de radiación en los espectros de ondas de radio y radar [8].

**Densidad, temperatura y salinidad.** La densidad del agua de mar varía dependiendo de la profundidad, de la temperatura y de la salinidad. En términos de la temperatura, el agua toma una densidad máxima alrededor de los 4°C. En términos de la salinidad, ésta produce un aumento en la densidad. En términos de la profundidad, la densidad del agua de mar varía desde 1012 kg/m<sup>3</sup> en la superficie, hasta 1070 kg/m<sup>3</sup> a 1000 m de profundidad. En cuanto a la temperatura, ésta varía dependiendo de la profundidad, para la zona entre 0 y 200 m de profundidad, la temperatura es muy similar a la superficial, y se acerca a 0°C conforme la profundidad aumenta a más de 4000 m, [8].

**Propagación de la radiación electromagnética.** Conforme aumenta la profundidad, la cantidad total de radiación disminuye considerablemente. Para propósitos prácticos, se puede asumir que no hay radiación solar a una profundidad de 100 m, fenómeno que se acelera para aguas costeras y turbias, [8]. Esto indica que se requiere de un sistema de iluminación que permita la toma de video en ausencia de la luz solar.

**Profundidad de trabajo.** La profundidad de operación de un ROV determina la resistencia mecánica de los componentes, debido a que la presión hidrostática que genera la columna de líquido produce el colapso de las estructuras sumergidas.

Los sitios de operación del vehículo son los puertos de intercambio comercial de Colombia, tales como: Cartagena, Barranquilla, Santa Marta y Buenaventura. Estas ubicaciones, establecen los parámetros de profundidad, densidad, salinidad, temperatura y corrientes.

Según reporte de las sociedades portuarias regionales de Barranquilla, Buenaventura, Cartagena y Santa Marta, las profundidades máximas reportadas en puerto son las que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Profundidad de puertos de Colombia

<b>Puerto</b>	<b>Profundidad máxima (m)</b>
Barranquilla	12
Buenaventura	13.7
Cartagena	13.7
Santa Marta	18.3

Esto sugiere que la profundidad máxima esté alrededor de 18.3 m. Sin embargo, con el fin de no limitar las capacidades del vehículo y la posibilidad de hacer exploración marina a mayores profundidades con el mismo producto, se define un valor de 100 m, la cual corresponde a una presión hidrostática de 1.00 MPa (145.5 psi). Este valor se sustenta con base en las profundidades típicas de vehículos comerciales del mismo tipo.

Profundidad de diseño. La profundidad de diseño, mayor a la de trabajo, busca definir un margen de seguridad para los componentes estructurales del vehículo. Esto quiere decir que los componentes se diseñan para que resistan una presión mayor que la presente en la profundidad de diseño, para que funcionen de forma correcta a la profundidad de trabajo.

La profundidad de diseño es de 165 m, la cual corresponde a una presión hidrostática de 1.66 MPa (240 psi). Ésta se escoge de tal forma que el vehículo esté en capacidad de resistir un 10% de presión por encima de la que estaría sometido a una profundidad de 150 m, distancia que equivale a la longitud de un cable umbilical que permite la exploración a un radio de 50 m en una profundidad de 100 m.

### **Masa y dimensiones del vehículo**

En cuanto a la masa y dimensiones del vehículo, se busca que éstas tengan el valor más bajo posible. Esto se justifica dado que para que el volumen de agua desplazado sea pequeño, la masa del vehículo debe ser poca, de manera que el sistema sea fácil de manipular y transportar. El diseño se debe ajustar para que el volumen desplazado equivalga al peso de todos los componentes. Para definir un valor máximo que acote las dimensiones del vehículo se define que el peso no debe superar 100 kg y las dimensiones deben ser lo suficientemente pequeñas como para que el ROV pueda ser introducido en una caja cúbica con 1 m de lado.

### **Consideraciones hidrostáticas e hidrodinámicas.**

Para el diseño de un vehículo sumergible, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones hidrostáticas e hidrodinámicas, [7].

Cargas de interés. Las cargas de interés que influyen en el comportamiento de un vehículo sumergible son: peso, desplazamiento (peso del volumen desalojado), arrastre y sustentación, propulsión, fuerzas de contacto, cargas inerciales.

Equilibrio estático. La flotabilidad se define como la diferencia algebraica entre el desplazamiento y el peso. Se dice que existe flotabilidad positiva cuando el desplazamiento es mayor que el peso, negativa cuando el desplazamiento es menor que el peso y neutra cuando el desplazamiento y el peso son equivalentes.

El diseño se desarrolla para que la flotabilidad sea neutra - positiva. Esto quiere decir que la diferencia entre el desplazamiento y el peso debe ser muy pequeña y positiva. Dado que no es posible lograr un equilibrio exacto entre las dos fuerzas, es preferible que el vehículo tenga tendencia a flotar y salir a superficie, que a hundirse y necesitar ser izado.

Estabilidad estática. Se debe lograr que el vehículo tenga una condición de equilibrio estable, que recupere de forma natural su inclinación ante la incidencia de cargas perturbadoras. Ésta se asegura logrando que el centro de volumen esté por encima del centro de masa.

Estabilidad dinámica. Se debe lograr que el vehículo cuente con la energía suficiente para que tienda naturalmente a su posición de equilibrio estable. Ésta depende de la ubicación relativa del centro de masa y del centro de volumen, la estabilidad mejora con el aumento de esta distancia.

Arrastre y propulsión. Se debe lograr que la potencia de los propulsores permita vencer las fuerzas de arrastre hidrodinámico y éste pueda moverse según los requerimientos de velocidad y aceleración.

## Movilidad

Se busca que el vehículo esté en la capacidad de trasladarse en tres direcciones no paralelas: avance longitudinal (*surge*), avance lateral (*sway*), movimiento vertical (*heave*) y que sea capaz de cambiar su orientación sobre el plano horizontal rotando alrededor del eje vertical (*yaw*).

## Velocidad de operación

La velocidad de operación del vehículo está sujeta a la velocidad de las corrientes a las cuales estará sometido en el sitio de operación (puertos), con el fin de garantizar que el sumergible esté en la capacidad de mantenerse estático sin importar la incidencia directa de éstas. Según las condiciones de velocidad de corrientes en puerto, se establece que la velocidad máxima de operación debe ser de 1.5 m/s (3 nudos aproximadamente).

## Instrumentación, control, potencia y comunicaciones

Para cumplir con las tareas de inspección y permitir una mayor facilidad en la operación del vehículo, se plantea el uso de los siguientes dispositivos de hardware:

Control. Para el control se requiere del uso de un computador a bordo, que recibe la referencia del operador en superficie, que esté en la capacidad de tomar información de los instrumentos de medición, procesarla y entregar señales de control a los dispositivos actuadores (propulsores), con el fin de desarrollar labores de estabilización de bajo nivel (capacidad de responder controladamente a las indicaciones del operador).

Instrumentación. Para la toma de información se requiere del uso de los siguientes instrumentos: unidad inercial para la medición de aceleraciones lineales y velocidades angulares, compás digital para medir la orientación, profundímetro para determinar la posición vertical, termómetro.

Potencia. Para la alimentación del vehículo se usa corriente alterna a 110 V. A bordo se usa una fuente de voltaje para la instrumentación y otra para los propulsores. También se deben tener en cuenta los amplificadores (*drivers*) que permiten hacer un enlace entre las señales de control y la alimentación de potencia que requieren los actuadores.

Comunicación. Para la comunicación se requiere del uso de fibra óptica y de dispositivos convertidores que permiten la conexión con el procesador a bordo y demás dispositivos que se comuniquen directamente con la estación en superficie.

## Especificaciones del vehículo

Las especificaciones se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Especificaciones del vehículo

Característica	Valor
Categoría	Observación
Ambiente de operación	Agua salada (puerto)
Densidad agua salada	1024 kg/m <sup>3</sup>
Profundidad de operación	100 m (1.00 Mpa)
Profundidad de diseño	165 m (1.66 Mpa)
Temperatura de operación	0 – 40 °C
Movilidad	Cuatro grados de libertad: <i>surge</i> , <i>sway</i> , <i>heave</i> , <i>yaw</i>
Velocidad máxima	1.5 m/s (3 nudos)
Flotabilidad	Neutra – positiva (margen de 2.5 N)
<i>Trim</i> máximo	±5°
<i>List</i> máximo	±5°
Peso máximo	100 kg
Sistema de comunicación y alimentación	Cable umbilical con fibra óptica
Instrumentos para navegación	Unidad inercial, profundímetro y compás digital.
Instrumentos de análisis	Termómetro
Sistemas auxiliares	Sistema de iluminación, sistemas auxiliares de comunicación (convertidores)
Características cualitativas	Robustez, confiabilidad, apariencia, facilidad en el transporte, mantenibilidad, funcionalidad.

## DISEÑO BÁSICO

En el diseño del vehículo, se deben tener en cuenta todos los elementos requeridos para la ejecución exitosa de la misión para la cual fue diseñado, [7]. Estos subsistemas son: la estación en superficie, el vehículo sumergible, el sistema de comunicación y enlace entre la estación en superficie y el vehículo. Se tratará a continuación lo relacionado directamente con el diseño básico del vehículo sumergible.

### División en subsistemas

El vehículo sumergible fue dividido en subsistemas para facilitar su análisis. Cada subsistema fue objeto de estudio y discusión de todos los integrantes de equipo de investigación. Se contemplaron múltiples alternativas y, mediante procesos de evaluación cualitativa y cuantitativa, se seleccionaron las más adecuadas para cumplir las especificaciones definidas en el diseño preliminar, [12]. Los subsistemas estudiados fueron el casco, los propulsores y las luces.

### Casco

El casco es el armazón mecánico que contendrá los elementos de instrumentación y control, alimentación de potencia y cámara a bordo. Debe brindar protección mecánica a todos estos elementos, especialmente impidiendo el paso de agua desde el exterior, pero a su vez de permitir la visibilidad para realizar las observaciones. Las consideraciones de diseño más importantes para la determinación del casco fueron la forma, el sistema de sellos, la visibilidad, el tamaño y los materiales.

La forma del casco condiciona la distribución de esfuerzos sobre el ROV y las cargas de arrastre en el momento de desplazarse. Debe ser de manufactura sencilla y agradable a la vista. Se adoptó un casco cilíndrico con dos tapas semiesféricas como se puede ver en la Fig. 1a.

El sistema de sellos que se implementó en el casco es de tipo estático, se decir, los sellos se realizan sobre piezas que no tienen movimiento relativo entre sí mismas. Se determinó que el acceso al interior del casco se haría por las tapas semiesféricas y para sellar dicho accesos se adoptó el uso de sellos tipo o-ring.

La visibilidad en el casco es fundamental dado que en su interior se alojará la cámara que permite realizar las observaciones. La cámara seleccionada es tipo IP con movimientos de *zoom*, *pan* y *tilt*. Para permitir el trabajo de la cámara se construirán los domos en acrílico translúcido.

El tamaño se refinó en el diseño de detalle. Sus principales condicionamientos están relacionados con el requerimiento de contener toda la instrumentación, elementos de control, elementos de manejo eléctrico y la cámara.

Los materiales seleccionados para la fabricación del casco deben brindar protección mecánica a los elementos que contiene, así mismo, deben ser resistentes a la corrosión y de fácil manufactura.

Además se implementó un marco externo para proteger las tapas semiesféricas de acrílico.

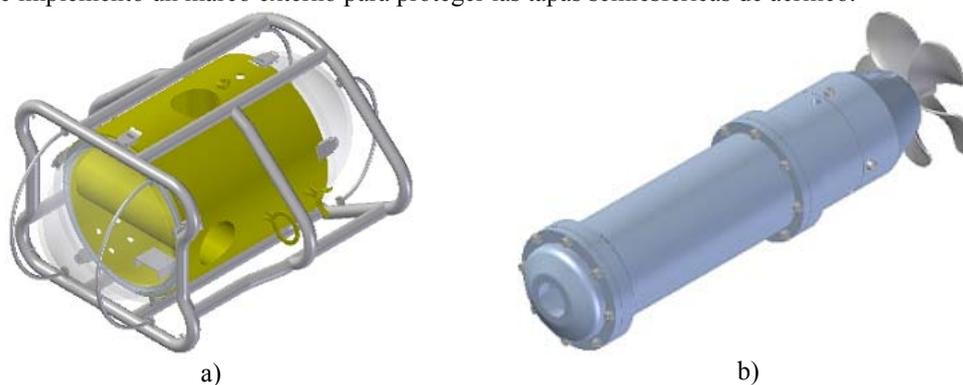


Fig. 1: Diseño básico de la estructura y del propulsor

### Propulsores

Se utiliza una configuración de cuatro propulsores. Dos de ellos permiten el avance longitudinal y rotación alrededor del eje vertical, uno para avance lateral y uno para avance vertical. Cada propulsor (Fig. 1b) cuenta con un motor DC sin escobillas y sellos mecánicos para el eje de la propela.

## Luces

Se usa una configuración de cuatro luminarias ubicadas en la parte frontal del vehículo, dos en la parte superior y dos en la parte inferior. Se tiene la posibilidad de cambiar manualmente la orientación de cada luminaria.

## Integración de subsistemas

Los subsistemas con todos los componentes contienen se integran para formar el ROV. Al realizar esta integración se tiene en cuenta que la flotabilidad del ROV debe ser neutra (evitando la tendencia a la inmersión o emersión), lo cual se logra haciendo que el peso de todo el conjunto sea igual al peso del volumen de agua desalojada. También se debe asegurar que el centro de masa esté por debajo del centro de volumen, para garantizar la estabilidad del ROV. La Fig. 2 resume el resultado del diseño básico de ROV.



Fig. 2: Diseño básico del vehículo.

## DISEÑO DE DETALLE

Para la realización de esta fase del diseño es fundamental el uso de herramientas de ingeniería asistida por computador, estas herramientas facilitan las actividades de modelación y agilizan cálculos complejos.

A partir de los resultados de la fase de diseño básico, se seleccionan elementos comerciales y se realizan cálculos que permiten verificar el dimensionamiento de piezas y el cumplimiento de las especificaciones definidas desde la etapa preliminar. A partir de esta información se realizan los planos constructivos de las partes que constituyen el vehículo y la información necesaria para ensamblarlo. En esta sección se muestran algunos de los resultados que respaldan el diseño obtenido.

## Casco

El casco está conformado por un cilindro de aluminio, construido a partir de una lámina rolada y soldada. En los extremos se instalan anillos, también de aluminio, que permiten el centrado y sello de las tapas semiesféricas. Para la instalación de los propulsores de avance lateral y vertical se disponen dos cavidades que cruzan el casco, logradas con tubos comerciales de aluminio que se sueldan al cilindro mayor.

La condición de carga del casco se debe a la presión externa que ejerce el agua sobre él. El efecto de la presión externa es la tendencia al colapso o implosión del mismo. Para ello se calcula la presión de colapso de elementos cilíndricos definida por Nash, [13] en la Ec. (1).

$$p = \frac{2.42E}{(1 - \mu^2)^{3/4}} \left[ \frac{\left(\frac{h}{2R}\right)^{5/2}}{\frac{L}{2R} - 0.45\left(\frac{h}{2R}\right)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

Donde  $p$  es la presión de colapso,  $h$  es el espesor del casco,  $L$  es la longitud del cilindro,  $R$  es el radio del cilindro medido en la superficie media,  $E$  el módulo de Young del material, y  $\mu$  es la relación de Poisson. Los datos y resultados se muestran en la Tabla 3. Los resultados fueron corroborados contemplando las variaciones geométricas con la ayuda de un *software* de elementos finitos (*UnigraphicsNX<sup>TM</sup>*) algunos resultados de este análisis se muestran en la Tabla 4 y en la Fig. 3.

Tabla 3: Datos y resultados de la presión al colapso del casco

Propiedad	Magnitud
$E$	68.9 GPa
$\mu$	0.33
$R$	163.4 mm
$L$	388 mm
$h$	4mm
$p$	2.68MPa

Tabla 4: Simulación elementos finitos del casco

$S_y$ (límite elástico)	68.9 GPa
Máximo esfuerzo de Von Mises	203MPa
Máximo desplazamiento	0.796mm
Factor de seguridad estático	1.18

Se hicieron análisis similares con las tapas semiesféricas de acrílico (empleando una ecuación adecuada para esta aplicación) y con las carcasas de las luces y los propulsores, verificando que las presiones de colapso estuvieran por encima de la presión de diseño.

También se hicieron análisis en CFD (*Computational Fluid Dynamics*) con el software Cosmoflow™ para encontrar fuerzas de arrastre del modelo del ROV en el agua. Los principales resultados se muestran en la Fig. 3.

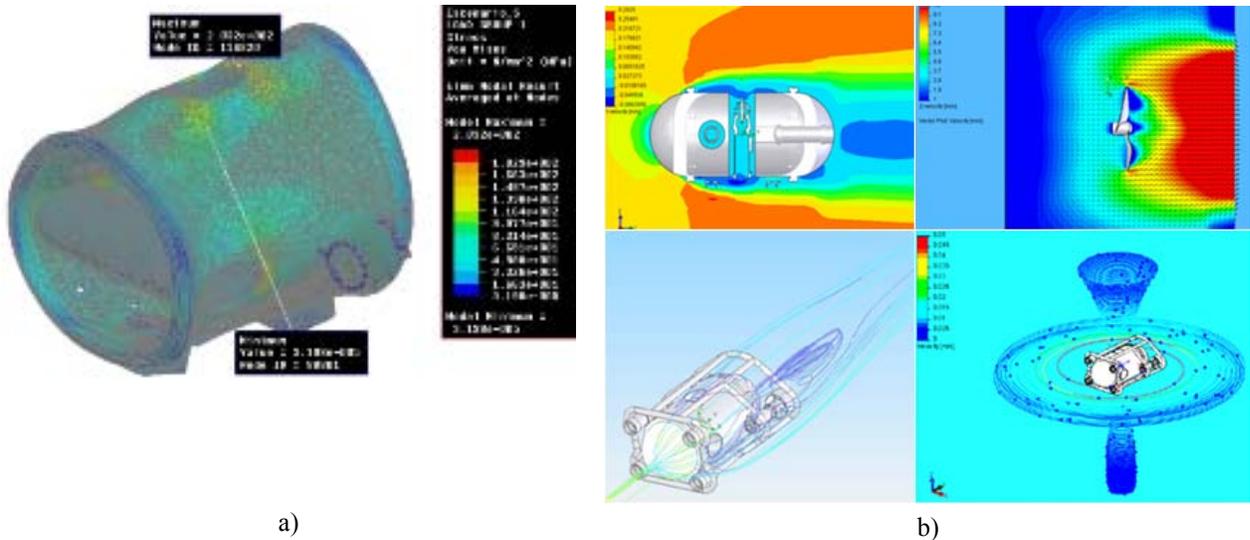


Fig. 3: Análisis usando software a) FEA y b) CFD

Los resultados de dichos análisis fueron usados para determinar las condiciones de operación de los propulsores y para seleccionar sus motores.

### Integración del diseño

Una vez sintetizados y analizados los componentes, nuevamente debe realizarse una adecuada integración con el fin de garantizar la estabilidad estática y dinámica del ROV. El comportamiento del vehículo en condiciones estáticas (ante la ausencia de cargas perturbadoras externas y de fuerzas de propulsión) se garantiza manteniendo las condiciones de flotabilidad neutra (neutra-positiva en el caso real) y logrando que el centro de flotabilidad permanezca por encima del centro de masa. El comportamiento bajo condiciones dinámicas se garantiza verificando que los productos de inercia del vehículo sean cero (o que los ejes principales de inercia coincidan con los ejes de movimiento) y logrando que la ubicación relativa del centro de masa respecto al centro de flotabilidad sea lo más

grande posible. En la Tabla 5 se muestran las propiedades de masa del vehículo antes de garantizar las condiciones mencionadas atrás.

Tabla 5: Propiedades de masa y volumen iniciales

Característica	Valor	Característica	Valor
Desplazamiento	56.74 kg	Centro de masa $x$	5.40 mm
Centro flotabilidad $x$	-3.21 mm	Centro de masa $y$	1.19 mm
Centro flotabilidad $y$	0.66 mm	Centro de masa $z$	16.21 mm
Centro flotabilidad $z$	1.49 mm	Producto de inercia $xy$	0.010810 kg-m <sup>2</sup>
Masa	51.67 kg	Producto de inercia $xz$	-0.004656 kg-m <sup>2</sup>
		Producto de inercia $yz$	-0.003811 kg-m <sup>2</sup>

## CONCLUSIONES

Se determinaron las condiciones de diseño requeridas para el desarrollo de un vehículo sumergible que esté en la capacidad de ejecutar labores de inspección visual de cascos de barcos y estructuras sumergidas, con base en las restricciones de diseño establecidas para los puertos colombianos de intercambio comercial internacional.

Se desarrolló el diseño básico del vehículo, el cual permite tener una idea clara de cómo será el ROV una vez se construya. Esto incluye conocer cómo será la distribución de cada uno de los componentes y las características técnicas de cada uno de los subsistemas que hacen que el vehículo sea funcional.

Durante el diseño de detalle se evaluó la capacidad del vehículo a resistir las condiciones de operación, se simuló el desplazamiento bajo el agua y se integró de tal forma que fuera estable. Todo esto de acuerdo con las condiciones definidas en las etapas de diseño anteriores.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se desarrolla gracias a la financiación del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" COLCIENCIAS, la Universidad Pontificia Bolivariana y la Escuela Naval Almirante Padilla. Código 121014-17909, contrato 300 de 2005.

## REFERENCIAS

1. Organización Marítima Internacional OMI, Código Internacional para la Protección de los Buques y de las Instalaciones Portuarias (Código PBIP), Génova, 2002.
2. J. Arias y J. Tobón, *Adecuación de instrumentación, pruebas e implementación de algoritmos de navegación para vehículos autónomos*, UPB, Medellín, 2000.
3. J. Correa, et al. Consideraciones de diseño para un vehículo subacuático controlado en forma dual: autónomamente y vía cable, *Mem. Congreso. Anales VII Congreso Latinoamericano de Control Automático*, Viña del Mar: ACCA, 1998.
4. D. García, y C. Sarria, *Diseño y construcción de la carcasa estructural de un ROV*, trabajo de grado UPB, Medellín, 1999.
5. L. Gutiérrez, Control de navegación de un vehículo autónomo, En: *Omega*, Vol 9, 1999.
6. R. Norton, *Machine Design: An Integrated Approach*, 3rd ed. Prentice Hall, New Jersey, 2005.
7. E. Allmendinger, *Submersible vehicle systems design*, The society of naval architects and marine engineers, Jersey City (NJ), 1990.
8. T. Lamb, *Ship design and construction, Vol. 1*, The society of naval architects and marine engineers, Jersey City (NJ), 2003.
9. P. Gale, The ship design process, *Ship design and construction, Vol. 1*, the society of naval architects and marine engineers, Jersey City (NJ), 2003.
10. G. Griffiths, *Technology and applications of autonomous underwater vehicles*, Taylor & Francis, London, 2003.
11. L. Linnett, Underwater vehicles for information retrieval, *Guidance and control of underwater vehicles*, IFAC Workshop, South Wales, UK, 2003
12. J. Ramírez, *Diseño mecánico de un vehículo sumergible operado remotamente*, Trabajo de grado (Especialización en Automática), Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2007.
13. J. Nash, *Hydrostatically loaded structures*, Pergamon, New York, 1995.