

# Diseño básico de un vehículo operado remotamente (ROV) para inspección subacuática de instalaciones portuarias

Luis B. Gutiérrez, Juan A. Ramírez, Carlos A. Zuluaga, Rafael E. Vásquez, Diego A. Flórez y Raúl A. Valencia  
 Grupo de Automática y Diseño A+D  
 Escuela de Ingenierías, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia.  
 Email: lbgutie@ieee.org

**Abstract**— This paper shows the basic design of an underwater remotely operated vehicle ROV, required to bring reliable visual information, used for surveillance and maintenance of ship shells and underwater structures of Colombian port facilities. The most relevant design constraints are evaluated by considering environmental conditions, dimensional restrictions, hydrostatics, hydrodynamics, degrees of freedom and the availability of instrumentation and control hardware. The design of the robot is divided into four main subsystems: mechanic/naval, hardware, surface station and software & control. The design is developed through an iterative process by using computational tools, including CAD/CAE/CFD software and a high level programming environment. The performed basic design guarantees that the reliable operation of the robot shall be achieved by using appropriate construction and integration processes. This robot constitutes an innovation product that will be used during inspection tasks of the trade seaports of Colombia.

**Resumen**— Este artículo muestra el diseño básico de un vehículo subacuático operado remotamente ROV, requerido para entregar información visual confiable, usado para vigilancia y mantenimiento de cascos de barcos y estructuras sumergidas de instalaciones portuarias colombianas. Las restricciones de diseño más importantes son evaluadas considerando condiciones ambientales, límites dimensionales, hidrostática, hidrodinámica, grados de libertad y la disponibilidad de instrumentación y hardware de control. El diseño básico del robot es dividido en cuatro subsistemas principales: mecánico/naval, hardware, estación de superficie y software & control. El diseño es llevado a cabo a través de un proceso iterativo usando herramientas computacionales que incluyen software CAD/CAE/CFD y un lenguaje de programación de alto nivel. El diseño básico realizado asegura que la operación confiable del robot puede ser alcanzada con procesos de construcción e integración apropiados. Este robot constituye un producto de innovación que será utilizado durante tareas de inspección de los puertos marítimos comerciales de Colombia.

**Index Terms**— ROV, UUV, Underwater surveillance, Underwater maintenance, Underwater robotics.

## I. 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 ISPS [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]–[6], buscando el desarrollo conjunto de todos los subsistemas que conforman el vehículo.

El presente artículo se centra en la ingeniería básica para el diseño de un robot subacuático operado remotamente, a partir de los requerimientos de operación establecidos.

## II. VEHÍCULOS SUBACUÁTICOS OPERADOS REMOTAMENTE (ROV)

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 [7], [8].

### A. Clasificación de los ROV

Se pueden definir tres categorías para este tipo de vehículos: trabajo pesado, observación y mini/micro ROV.

1) *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.

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

3) *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.

### B. 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.

1) *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].

2) *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].

## III. CONSIDERACIONES Y VARIABLES DE DISEÑO PARA EL ROV

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, la corrosión, las condiciones de flotabilidad, entre otros. En esta sección se describen las más relevantes.

### A. Consideraciones ambientales

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

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 [9].

1) *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 [9].

2) *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, [9]. Esto indica que se requiere de un sistema de iluminación que permita la toma de video en ausencia de la luz solar.

3) *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.

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 I. Esto sugiere que la profundidad

TABLA I  
PROFUNDIDAD DE PUERTOS EN COLOMBIA

Puerto	Profundidad máxima (m)
Barranquilla	12
Buenaventura	13.7
Cartagena	13.7
Santa Marta	18.3

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.

4) *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.

## B. 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.

## C. Consideraciones hidrostáticas e hidrodinámicas

Para el diseño de un vehículo sumergible, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones hidrostáticas e hidrodinámicas, [10]. Cargas de interés. Las cargas de interés que influyen en el comportamiento de un vehículo sumergible son:

- Peso: fuerza gravitatoria.
- Desplazamiento: fuerza de empuje debida al gradiente de presión vertical (peso del volumen desalojado).
- Arrastre y sustentación: fuerzas generadas por el movimiento relativo del sumergible y el fluido.
- Propulsión: fuerzas generadas por reacciones a la rata de cambio del momentum angular y lineal de partículas de fluido.
- Fuerzas de contacto: generadas por olas, el viento o por el contacto con objetos.
- Cargas inerciales: visto desde el punto de vista de la ecuación de equilibrio dinámico, el producto entre la masa y la aceleración o el vector derivada del momentum angular del vehículo.

1) *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 en caso de falla.

2) *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.

3) *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.

4) *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.

## D. 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).

## E. 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).

## F. Control, instrumentación, 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:

1) *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).

2) *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 para análisis.

3) *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.

4) *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.

## G. Características cualitativas

El diseño estará guiado por conceptos de robustez, funcionalidad, facilidad en el transporte, ensamble y mantenimiento, conservando una apariencia agradable. Las especificaciones de diseño se resumen en la Tabla II.

TABLA II  
ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

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 surge, sway, heave, yaw
Velocidad máxima	1.5 m/s (3 nudos)
Flotabilidad	Neutra-positiva (margen de 2.5 N)
Trim máximo	±5°
List 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.

#### IV. DISEÑO BÁSICO DE LOS ELEMENTOS DEL ROV

En el diseño del vehículo, se deben tener en cuenta todos los elementos requeridos para la ejecución exitosa de la misión para la cual es diseñado [11]. Estos elementos son: el vehículo sumergible, los elementos de hardware, la estación en superficie que incluye el sistema de comunicación y la infraestructura de software y control. Las especificaciones del vehículo obtenido se resumen en la Tabla III.

TABLA III  
ESPECIFICACIONES DEL VEHÍCULO

Característica	Valor
Profundidad máxima	100 m
Dimensiones	745 mm × 605 mm × 422 mm
Peso	56.7 kg
Alimentación	110 VAC
Potencia motores	4 × 150 W
Potencia luminarias	4 × 50-150 W

##### A. Diseño mecánico y naval

Este sistema está conformado por todos los elementos mecánicos, de propulsión y estructurales que conforman el ROV. El diseño es realizado con el apoyo de herramientas computacionales que incluyen software de diseño asistido por computador CAD (Solid-Edge™), ingeniería asistida por computador CAE (UnigraphicsNX™), dinámica computacional de fluidos CFD (Cosmosflow™) y un entorno de programación de alto nivel (Matlab™).

1) *Estructura*: Se utiliza una configuración con un único casco cilíndrico con domos semiesféricos, protegido por un marco estructural. Todos los componentes de hardware se alojan dentro del casco cilíndrico. La Fig. 1 muestra el diseño básico final obtenido. La Fig. 2 muestra el análisis estructural de uno de los domos usando el método de elementos finitos.

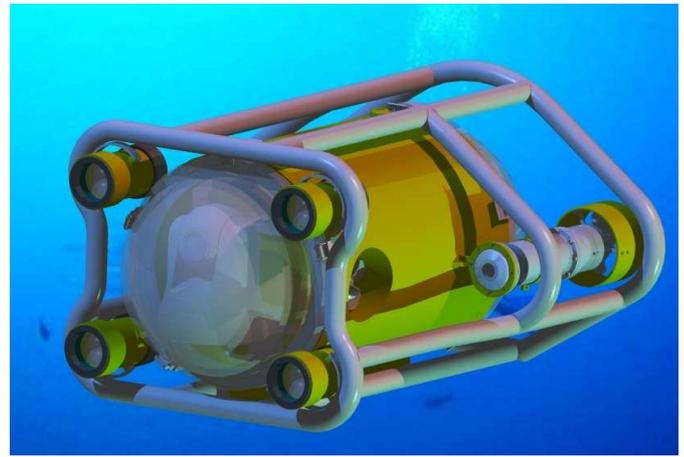


Fig. 1. Diseño básico del vehículo

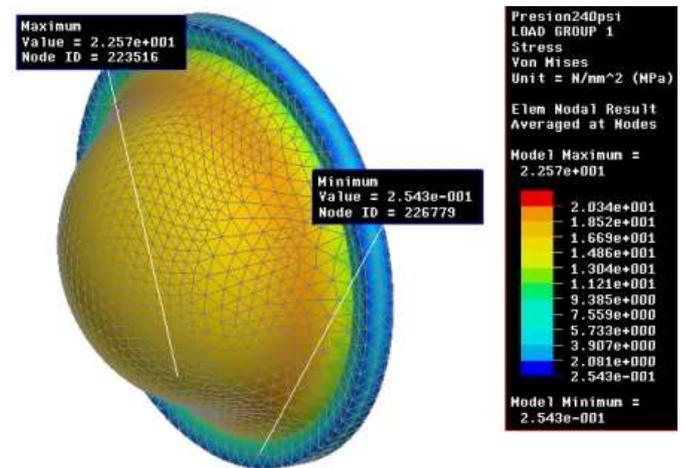


Fig. 2. Análisis con elementos finitos del domo. Esfuerzo de Von Mises.

2) *Sistema de propulsión*: 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 cuenta con un motor DC sin escobillas y sellos mecánicos para el eje de la propela. La Fig. 3 muestra cuatro de los diferentes escenarios que se usaron para el análisis de la interacción del ROV con el medio con el fin de dimensionar apropiadamente el sistema de propulsión.

##### B. Elementos de hardware

1) *Computador a bordo*: Se utiliza un procesador embebido con factor de forma PC104, que cuenta con un sistema operativo en tiempo real RTLinux™.

2) *Instrumentos de navegación*: Se selecciona como profundímetro un medidor de presión de membrana con rango de 0 a 200 psia. Se selecciona un compás digital y una unidad inercial con acelerómetros y giróscopos en tres ejes ortogonales.

3) *Instrumentos para análisis*: Se selecciona un medidor de temperatura del tipo RTD Pt100 con transmisor que genera una señal de salida de 4 a 20 mA.



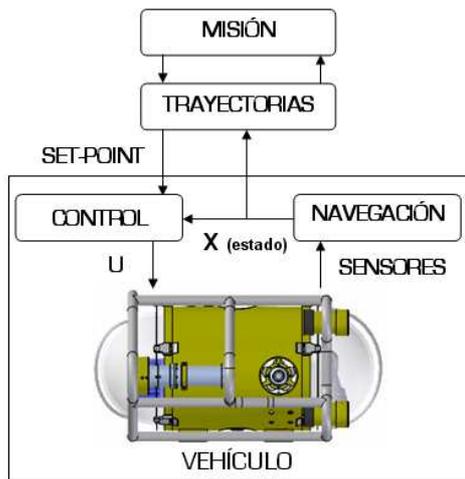


Fig. 5. Arquitectura del sistema de control

3) *Infraestructura de simulación:* Se requiere una infraestructura de simulación adecuada para realizar las pruebas de comportamiento del sistema y así realizar los ajustes y correcciones necesarias sobre el vehículo en tiempo de diseño [15]. El Grupo A+D ha desarrollado una infraestructura que permite implementar y simular sistemas de control que requieren la validación del modelo del vehículo y los algoritmos de control y navegación usando el mismo software que correrá en la aplicación final. Las simulaciones se pueden hacer con software en el lazo de control (*Software-In-The-Loop Simulation*) o con hardware en el lazo de control (*Hardware-In-The-Loop Simulation*). Uno de los procedimientos que se pueden realizar con esta infraestructura es la ejecución de componentes en máquinas independientes, Fig. 6.

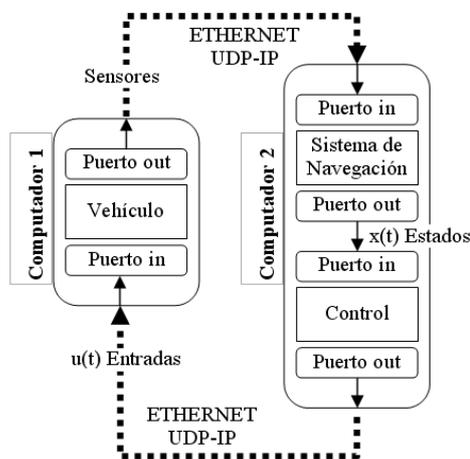


Fig. 6. Implementación del sistema de simulación

### V. 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.

Para el desarrollo del vehículo subacuático se planteó una arquitectura de hardware que usa equipos comerciales, lo cual hace más sencilla la reconfiguración y reparación del sistema.

La estructura modular del hardware del ROV, basada en una red CAN, facilita el acceso a los componentes incluyendo sensores, actuadores y procesadores.

La infraestructura de software de simulación permite implementar y simular sistemas de control que requieren la validación del modelo y de los algoritmos de guía, navegación y control para el ROV, usando el mismo software que correrá en la aplicación final dentro del procesador a bordo.

### 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, de la Universidad Pontificia Bolivariana y de la Escuela Naval Almirante Padilla. Código 121014-17909, contrato 300 de 2005.

### REFERENCIAS

- [1] International Maritime Organization, "The International Ship and Port Facility Security Code (ISPS Code)," 2002.
- [2] Cadavid, R. et al., "VISOR: Vehículo para investigación subacuática operado remotamente," 1995, tesis Ingeniería Mecánica, UPB, Medellín.
- [3] Correa, J. et al., "Consideraciones de diseño para un vehículo subacuático controlado en forma dual: autónomamente y vía cable," in *Memorias del 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," 1999, tesis Ingeniería Mecánica, UPB, Medellín.
- [5] L. Gutiérrez, "Control de navegación de un vehículo autónomo," *Omega*, vol. 9, 1999.
- [6] J. Arias y J. Tobón, "Adecuación de instrumentación, pruebas e implementación de algoritmos de navegación para vehículos autónomos," 2000, tesis Ingeniería Electrónica, UPB, Medellín.
- [7] G. Griffiths, *Technology and applications of autonomous underwater vehicles*. London: Taylor & Francis, 2003.
- [8] L. Linnett, "Underwater vehicles for information retrieval," in *Guidance and control of underwater vehicles 2003*. South Wales, UK.: IFAC, April 2003.
- [9] Meadows, G. and Meadows, L., *Ship design and construction*. Jersey City (NJ): The society of naval architects and marine engineers, 2003, vol. 1, ch. The marine environment, pp. 1 – 16.
- [10] Allmendinger, E. et al., *Submersible vehicle systems design*. Jersey City (NJ): The society of naval architects and marine engineers, 1990, ch. Hydromechanical principles, pp. 191–269.
- [11] E. Allmendinger, *Submersible vehicle systems design*. Jersey City (NJ): The society of naval architects and marine engineers, 1990.
- [12] J.F. Franco y L.B. Gutiérrez, "Análisis de dominio de un marco de tiempo real para vehículos autónomos no tripulados," in *Memorias del VII Congreso de la Asociación Colombiana de Automática*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana, 2007.
- [13] L.B. Gutiérrez, M. Osorio y J.A. Álvarez, "Sistema de guía, navegación y control para aeronaves autónomas," in *Memorias del I IEEE Colombian Workshop on Robotics and Automation*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2005.
- [14] L.B. Gutiérrez y C. Chamorro, "Modelación y control de un vehículo subacuático," in *Memorias del VII Congreso de la Asociación Colombiana de Automática*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana, 2007.
- [15] C.A. Zuluaga y L.B. Gutiérrez, "Infraestructura de simulación para vehículos no tripulados," in *Memorias del VII Congreso de la Asociación Colombiana de Automática*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana, 2007.