

CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO CONTROLADO EN FORMA DUAL: AUTÓNOMAMENTE Y VÍA CABLE

Julio César Correa Rodríguez, Luis Benigno Gutiérrez Zea y Laszlo Jurko Vásquez

*Escuela de Ingeniería, Universidad Pontificia Bolivariana
e-mail: jccorrea@janua.upb.edu.co
Circular 1ª No. 70-01, Medellín, Colombia*

Resumen: Este documento muestra el desarrollo de un prototipo de ROV (Remotely Operated Vehicle). El nombre de este prototipo es VISOR. Se describen las consideraciones de diseño de un nuevo prototipo de UUV (Unmanned Underwater Vehicle) con una filosofía de control mixta que incorporará operación remota y autónoma. Actualmente el prototipo se encuentra en fase de fabricación.

Abstract: This paper shows the development of an ROV prototype (Remotely Operated Vehicle). This prototype is called VISOR. The design considerations of the new UUV (Unmanned Underwater Vehicle) with a mixt control philosophy including remote and autonomous operation are described. Actualy the prototype is in the fabrication stage.

Keywords: Autonomous vehicles, Intelligent control.

1. INTRODUCCIÓN

Los submarinos han sido usados desde el siglo pasado para incursionar en el mundo subacuático. Sólo ha sido en las últimas dos décadas que la investigación sobre submarinos para fines no militares ha tenido lugar. Como resultado de estos trabajos aparecen los submarinos no tripulados o UUV (Unmanned Underwater Vehicles). Puede verse una reseña de algunos sumergibles desarrollados desde 1951 en Nash, 1995.

Los UUV presentan una limitación importante: las comunicaciones subacuáticas vía ultrasonido o por medio de ondas electromagnéticas tienen restricciones severas en su ancho de banda lo que

hace necesario el control remoto vía cable o la operación autónoma.

Los submarinos tipo ROV (Remotely Operated Vehicles) tienen un cable o cordón umbilical que conecta la nave con la superficie que permite enviar órdenes y recibir señales. Las decisiones son tomadas por el operador en superficie, por lo tanto el elemento que aquí prima es la destreza del operario.

Los AUV (Autonomous Underwater Vehicles) son autónomos, es decir, se les puede programar una misión y al finalizar la inmersión retornan a un sitio específico, señalado previamente. La comunicación entre el centro de control y el aparato queda suspendida durante toda la operación, excepto

cuando intervengan señales acústicas. El principal elemento que interviene en su diseño es la inteligencia, porque la nave debe ser capaz de tomar decisiones en un ambiente desconocido.

2. LA SITUACIÓN EN COLOMBIA

El uso de un ROV en Colombia se justifica por las muchas aplicaciones que tendría. En el país existe una gran cantidad de estructuras sumergidas, que se deben inspeccionar periódicamente, como las torres de captación, presas, muelles, túneles de conducción, cables submarinos, tramos sumergidos de oleoductos y cascos de buques. Para inspección de obras civiles sumergidas se han establecido contactos con las Empresas Públicas de Medellín. En el campo de la geología submarina, se pueden efectuar levantamientos de perfiles del fondo, medir pendientes, hacer el seguimiento de terrenos y facilitar el estudio de la dinámica de lechos estuarinos o de ríos. Para esta aplicación particular es necesario tomar muestras de sedimentos tanto superficiales como profundas en puntos perfectamente establecidos del área de estudio. También es importante tener información visual del relieve subacuático. En este sentido se han hecho contactos con el grupo de investigadores del área de Ciencias del Mar, del Departamento de Geología de la Universidad Eafit de Medellín que actualmente desarrolla su trabajo en las bocas San Juan y Chavica del delta del Río San Juan, Pacífico Colombiano.

Otras aplicaciones muy interesantes se encuentran en el área de la Biología Marina. En particular el Bentos del Pacífico Colombiano, es decir, el conjunto de especies que viven en el fondo marino, está prácticamente por conocer. Aquí existe una propuesta para trabajar en el futuro cercano con el Proyecto de Ecología Trófica del Pacífico de INVEMAR con sede en Cali.

3. EL VISOR

En 1994 se comenzó con la construcción del prototipo de un ROV al cual se le dio el nombre de VISOR, acrónimo de Vehículo de Investigación Subacuática Operado Remotamente, que finalmente terminó identificando al grupo de trabajo. El minisubmarino de observación construido es del tipo ROV, capaz de descender hasta 40 metros de profundidad de manera confiable (Fig. 1). A bordo, el VISOR está equipado con una cámara de vídeo de alta resolución y cuenta con sistemas de iluminación para situaciones de extrema oscuridad. La propulsión está a cargo de 4 motores, 2 de ellos le permiten

desplazarse horizontalmente y controlar la velocidad y la dirección de avance, los otros dos le permiten ascender y descender. Tiene además un compartimiento central en el cual se aloja parte de la electrónica y de los sistemas de distribución de potencia. Un cable lo comunica con la superficie donde se encuentran los controles, las baterías que suministran la energía para el aparato y el monitor que recibe las imágenes que envía la cámara de vídeo.

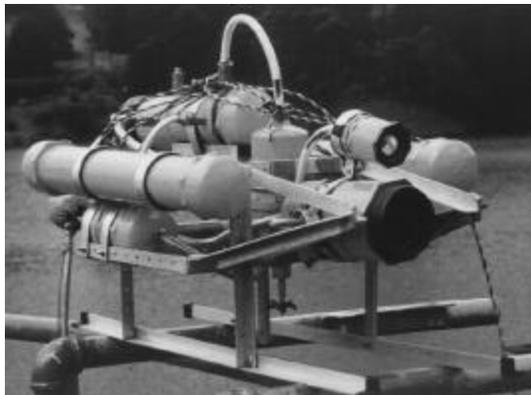


Fig. 1. Primer prototipo construido.

4. DISEÑO DEL NUEVO PROTOTIPO

El nuevo prototipo contempla una filosofía híbrida entre la operación remota y la operación autónoma. La autonomía incluye el manejo de potencia a bordo y la realización de misiones simples sin la intervención directa del operador. Se tendrá también la posibilidad de operación remota como en un ROV convencional.

La primera etapa del proyecto consiste en la construcción del soporte físico que alberga todos los componentes del sistema y que servirá como plataforma para probar los algoritmos de control desarrollados.

Las especificaciones de este prototipo son las siguientes:

- Profundidad de operación: 100m
- Velocidad máxima: 1 nudo
- Grados de libertad: 4
 - Desplazamiento longitudinal.
 - Rotación alrededor del eje vertical.
 - Desplazamiento transversal.
 - Desplazamiento vertical.
- Navegación autónoma o remota.
- Sistema de adquisición de imágenes.

- Diseño flexible para la adecuación de otros accesorios.
- Sistema de emergencia independiente del control principal.

Los sistemas considerados son: estructura del buque, propulsión, potencia, control y navegación, vídeo e iluminación, comunicación y administración de señales y manipulación (Fig. 2)

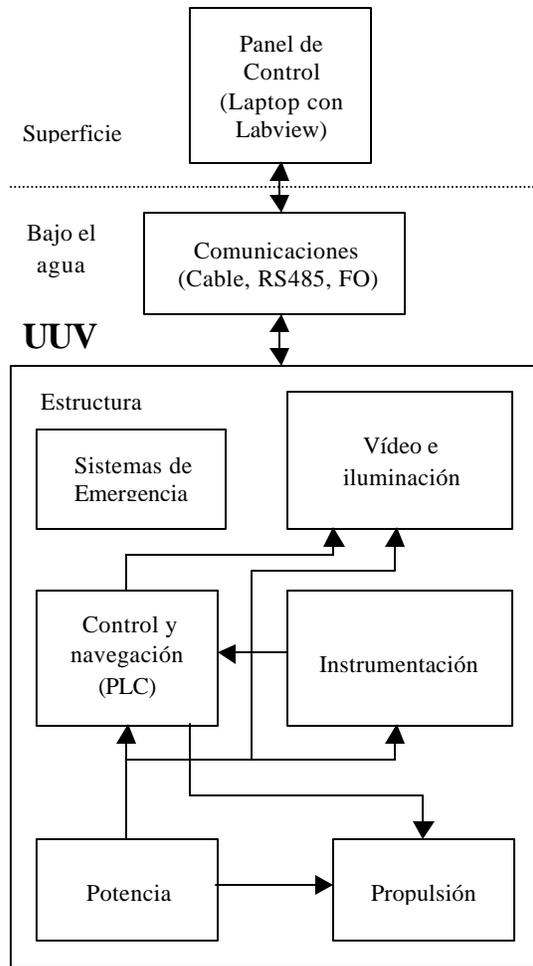


Fig. 2. Diagrama de bloques de VISOR

4.1. Estructura del buque

Es el armazón que conforma el casco del ROV en el cual se albergan todos los componentes de a bordo garantizando la estanqueidad de la estructura.

El material seleccionado debe soportar la presión ejercida por una columna de 100 metros de agua, ser resistente a los agentes agresivos y facilitar eventuales reparaciones conservando su resistencia

estructural. Los materiales seleccionados han sido fibra de vidrio y acero inoxidable.

El diseño interior debe permitir la adecuada distribución de los componentes, de modo que la nave sea hidrostáticamente estable y se tenga fácil acceso al interior de la misma para efectuar operaciones de inspección y mantenimiento.

La forma exterior del casco debe minimizar las pérdidas por arrastre y evitar que se generen fuerzas indeseables de empuje ascensional, cuando la nave propulse en el plano horizontal. Un modelo a escala del diseño de la forma del casco se muestra en la Fig. 3. Las dimensiones máximas del prototipo son 750x450x1050mm.

Una condición de diseño es que tenga flotabilidad ligeramente positiva, lo que dependerá enormemente del peso de los componentes que en un momento dado se encuentren en el interior y de la densidad del agua del entorno. Por este motivo es necesario dotar al minisubmarino de sistemas de lastrado que faciliten el ajuste de la flotabilidad.

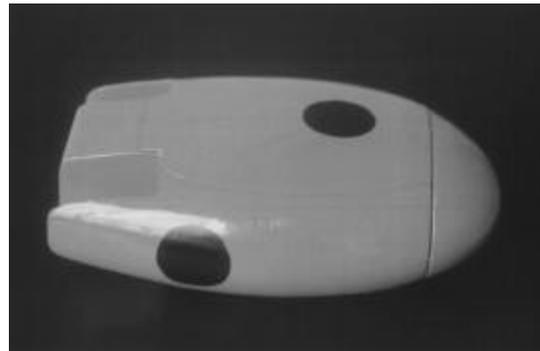


Fig. 3. Modelo a escala del casco del ROV.

4.2. Sistema de propulsión

Los impulsores del minisubmarino deben permitir una excelente maniobrabilidad y proporcionar movimientos suaves con el fin de poder operar en espacios reducidos, su velocidad podrá variarse fácilmente lo mismo que su sentido de propulsión para direccionar la nave.

Se tendrán cuatro grados de libertad: tres para el desplazamiento a lo largo de cada uno de los ejes y uno más para la rotación alrededor del eje vertical.

El sistema de propulsión podrá operar en forma continua a una velocidad máxima de 0.5m/s (1 nudo), cuando se desplace en aguas tranquilas.

Se usarán 4 motores de ¼ HP a 220VAC trifásicos que serán controlados por cuatro variadores de velocidad. Los variadores de velocidad admiten alimentación de AC cuando la potencia es suministrada desde superficie o de DC cuando el sistema es alimentado por las baterías de a bordo. Las hélices seleccionadas son de 8" de diámetro y están construidas en material plástico. Los motores están alojados en compartimientos separados del casco principal para evitar problemas severos de inundación en caso de falla de los elementos de sellado de los motores.

También es importante considerar el diseño de los elementos de sellado, para minimizar las pérdidas por fricción.

Una vez se tenga una idea aproximada de la forma del casco y de su sistema de propulsión, es necesario modelar el conjunto para predecir su respuesta dinámica y de esta forma poder elaborar los algoritmos de control para la navegación automática del minisubmarino.

4.3. Sistema de potencia

El sistema de potencia debe estar en condiciones de suministrar toda la energía requerida por los distintos componentes del minisubmarino como son: sistema de propulsión, sistema de vídeo e iluminación, sistema de control y navegación, instrumentación, sistema de emergencia, etc.

El suministro de potencia podrá hacerse de dos formas: por medio de un cable de alimentación que entregue la energía generada en superficie por una fuente de corriente alterna de 220V con el fin de disminuir pérdidas de energía en el cable o a partir de un conjunto de baterías instalado en el interior del submarino. Se tendrán 32 baterías de 12V, 5Ah, que permitirán la operación autónoma de la nave al menos durante una hora.

4.4. Sistemas de control

Los sistemas de control del ROV constarán básicamente de un panel de control en superficie conectado a través del cordón umbilical, vía RS485, al cerebro a bordo del ROV. Este cerebro constará de un PLC de última generación con toda la instrumentación necesaria y tendrá implementados por software los sistemas de control de navegación, administración de señales y monitoreo de algunas situaciones de emergencia. Habrá otro PLC alimentado por baterías independientes que se

encargará de tomar acciones en caso de situaciones críticas de emergencia.

Panel de control.

El panel de control estará ubicado en superficie y permitirá el control del ROV de manera amigable tanto en modo manual como en modo automático. Dado que cada una de las funciones de navegación se pueden comandar en ambos modos, la consola de control se diseñará para admitir estas dos posibilidades. Las funciones asociadas al modo automático se comandarán desde un laptop usando instrumentación virtual (LabView). Para el modo manual se utilizará otra consola, con todos sus controles.

Los paneles se diseñaran con una arquitectura abierta para facilitar su conexión. Esto permite que los sistemas de comando sean redundantes aumentando la confiabilidad de operación. Además impedirá operaciones riesgosas por parte del operador en forma involuntaria.

De esta manera se podrá diseñar un panel de presentación programable de acuerdo con las tareas realizadas, con un interface gráfico amigable al usuario que permita visualizar todas las señales provenientes del ROV, realizar una simulación virtual en pantalla de la situación del submarino (ubicación, orientación, posición del brazo mecánico), controlar de manera sencilla la posición del ROV, el accionamiento de las cámaras, las luces y monitorear las diferentes alarmas de situaciones críticas o de emergencia.

Control de navegación.

Este permitirá controlar la posición, orientación y trayectoria seguida por el ROV, con la máxima autonomía de acuerdo a la misión establecida desde el panel de control.

Se pretende que las órdenes impartidas desde el panel de control, tareas como ir de un sitio a otro, mantener una profundidad, mantener una posición y orientación deseadas, sean de alto nivel.

Para lograr las características de autonomía, confiabilidad y precisión deseadas se tendrán que combinar muy buenos sistemas de instrumentación con unos algoritmos de control, que usen estrategias de control inteligente. El control inteligente se desarrollará en una estructura jerárquica con varios niveles de decisión.

Los niveles mas altos tendrán que ver con la planeación de misiones, trayectorias, la toma de decisiones en situaciones de emergencia y se tomarán decisiones generales. En los niveles más bajos se implementarán controladores que permitan llevar a cabo esas decisiones con la confiabilidad, precisión, robustez ante perturbaciones e inmunidad ante el ruido.

La inteligencia del control se refiere a la capacidad de controlar al aparato independientemente del modelo del mismo (model-free control). Esto implica que el control tendrá la capacidad de aprenderse el modelo del vehículo y de compensar las perturbaciones que se presenten sin que el operario tenga que encargarse de ello. Esto es crítico para este tipo de sistemas dada la presencia de olas y corrientes que pueden alterar el movimiento del aparato.

Para lograr lo anterior habrá dos controladores de bajo nivel independientes: uno encargado del control de profundidad y otro del control del movimiento en el plano horizontal. El diseño de la estructura buscará evitar el balanceo e inclinación de modo que se puedan realizar estos dos controles independientemente. En el proyecto se contempla probar varias estrategias de control (Fossen, 1995; Fryxell, 1994; Jalving and Storkersen, 1994): control PID, control por modo deslizante, control usando linealización por retroalimentación de estado, control usando linealización por retroalimentación de estado adaptativo robusto, y, por último, se probará una novedosa estrategia de control usando redes neuronales. Esta última estrategia ya ha sido probada en robots formados por cadenas de elementos rígidos pero no en vehículos subacuáticos (Lewis et al, 1995). Se compararán las diferentes estrategias y se elegirá la más adecuada buscando que el sistema de control se ajuste a las variaciones del modelo del sistema y sea poco sensible a las perturbaciones del medio y el ruido de los sensores.

Sistemas de emergencia

Los sistemas de emergencia a bordo del ROV serán sistemas de respaldo que permitan generar señales de alarma en caso de situaciones de riesgo para el trabajo normal del aparato y que tome acciones de salvamento no controladas por el operador en situaciones críticas que comprometan la integridad del sistema.

Se distinguen dos tipos de emergencia:

- Situaciones anómalas: son situaciones de funcionamiento anormal que no comprometen la

integridad del submarino: fallas de instrumentación, luces, vídeo.

- Situaciones críticas: son situaciones que comprometen seriamente la integridad del sistema como por ejemplo: pérdida de comunicación, filtraciones graves de agua, pérdida de control de profundidad, pérdida de potencia.

Los sistemas de emergencia tendrán su propia instrumentación y serán alimentados por una fuente de potencia independiente y altamente confiable.

De acuerdo con una jerarquía previamente establecida, las acciones a tomar en caso de una situación de emergencia, pueden ir desde la mera presentación de señales de alarma, hasta la recuperación inmediata del ROV.

4.5. Sistema de vídeo e iluminación

Una de las principales tareas de un ROV es la inspección del mundo subacuático por lo que el sistema de vídeo e iluminación debe poseer alta resolución a color y capacidad de trabajo en condiciones de mínima iluminación, típica de ambientes marinos, lagos o ríos.

Debido a la alta dispersión de la luz en los ambientes acuáticos es necesario que el sistema de iluminación entregue una luz altamente coherente para facilitar el enfoque e inspección por medio de las cámaras de vídeo.

El sistema de vídeo debe estar en capacidad de transmitir las imágenes a superficie en formatos universales con el fin de que estas puedan ser almacenadas para su análisis posterior.

4.6. Sistema de comunicaciones y administración de señales

El sistema de comunicaciones es el encargado de transmitir todas las señales que entran y salen del ROV, tales como: comandos de control de navegación y manipulación, posición, instrumentación y vídeo análogo y digital.

Para la transmisión de señales de control e instrumentación se usará el formato RS485 que es bastante inmune al ruido dado que está diseñado para ambientes industriales. La señal de vídeo será enviada a través de fibra óptica para evitar el ruido electromagnético generado en el cable de potencia.

La pérdida de comunicación con superficie, será detectada por el sistema de control de comunicaciones, el cual le informará al ROV sobre la anomalía para que el sistema de control de emergencia, tome la acción pertinente.

4.7. Sistema de manipulación

Con el fin de ampliar las posibilidades de aplicación, el ROV proyectado no sólo podrá realizar tareas de observación, sino que también contará con un sistema de manipulación compuesto por un brazo mecánico, el cual le permitirá interactuar con su entorno.

Para que se pueda utilizar confiablemente en ambientes agresivos, como son los que se encuentran en lechos marinos o de ríos, es necesario que este sistema sea robusto. Además incluirá detectores de torque de apriete máximo para asegurar que ni la muestra a recolectar ni el manipulador en sí, sufran daño alguno. Así mismo la carga máxima permitida estará supervisada por el sistema de control del manipulador evitando esfuerzos indeseables en la estructura del brazo mecánico. El brazo mecánico diseñado para VISOR se muestra en la Fig. 4.



Fig. 4. Brazo mecánico de VISOR.

Para facilitar la operación del brazo, se contará con sensores de posición, que ejercerán funciones de feed-back y control. Se contará con posiciones prefijadas como Home-position y Total extension.

Dado que la presencia de corrientes dificultan mantener una posición estática en ambientes subacuáticos, los sistemas convencionales necesitan de dos operadores, uno para controlar la posición del ROV y otro para manipular el brazo. Una novedad importante del diseño propuesto, es integrar las dos funciones de modo que un sólo operario pueda realizar ambas tareas.

Los controles de mando del manipulador, serán ergonómicos, con el fin de permitir una manipulación cómoda, suave y precisa.

El diseño aquí propuesto es sencillo, flexible, no necesita plataformas especiales, es de fácil transporte y la estructura de su casco será cerrada con un perfil hidrodinámico que permitirá que el coeficiente de arrastre esperado sea de 0,2. Se involucran elementos novedosos: un mismo vehículo tendrá la posibilidad de tener dos modos de operación y el control de la posición del brazo y la posición de la nave estarán unificados.

El costo estimado de los materiales y equipos es de U.S.\$ 30.000 y estará al alcance de usuarios tanto de aguas costeras, como en cuerpos de agua de las zonas del interior. La construcción del nuevo ROV comenzará durante el primer trimestre de 1998 y estará sometándose a pruebas a comienzos de 1999.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se describieron las consideraciones de diseño para un nuevo prototipo de UUV desarrollado por el grupo VISOR de la Universidad Pontificia Bolivariana. El prototipo se encuentra actualmente en etapa de diseño y construcción. El minisubmarino presenta un diseño híbrido que permitirá combinar operaciones autónoma y remota. Se mencionaron algunas aplicaciones posibles en Colombia resaltándose la intención de varias instituciones en utilizarlo en inspección, investigaciones geológicas y biológicas.

REFERENCIAS

- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, New York.
- Fryxell, D., Oliveira, P., Pascoal, A., and Silvestre, C. (1994). Integrated design of navigation, guidance and control systems for unmanned underwater vehicles. In: *OCEANS'94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.'* Proceedings. III/105-III/110.
- Jalving, B., and Storkersen, N. (1994). The control system of an autonomous underwater vehicle. In: *Proc. of the Third IEEE Conf. on Control Applications*. 851-856.
- Lewis, F. L., K. Liu, and A. Yesildirek (1995). Neural net robot controller with guaranteed tracking performance. *IEEE Trans. Neural Networks*, **6**, 703-715.
- Nash, W. A. (1995). *Hydrostatically Loaded Structures*. Pergamon, Oxford.