

# CONTROL DE NAVEGACIÓN DE UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO

Luis Benigno Gutiérrez Zea, Laszlo Jurko Vásquez y Carlos Alejandro Zuluaga

*Grupo de Diseño Mecánico y Control VISOR*  
*Escuela de Ingeniería, Universidad Pontificia Bolivariana*  
*e-mail: [caz@epm.net.co](mailto:caz@epm.net.co)*  
*Internet: <http://www.upb.edu.co/visor>*  
*Circular 1ª No. 70-01, Medellín, Colombia*

Resumen: Este documento muestra el diseño e implementación del sistema de control de navegación un prototipo de UUV (Unmanned Underwater Vehicle). El nombre de este prototipo es VISOR. Se describen diferentes aspectos del diseño del sistema de control con una filosofía mixta que incorpora operación remota y autónoma. Actualmente el prototipo se encuentra en la fase de pruebas.

Abstract: This paper shows the design and implementation of the navigation control system for an UUV prototype (Unmanned Underwater Vehicle). This prototype is called VISOR. Different design aspects of the control system design with a mixt philosophy including remote and autonomous operation are described. Right now the prototype is in the test stage.

Keywords: Autonomous vehicles.

## 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 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.

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.

En este trabajo se muestra las características generales del un prototipo de UUV y cada una de las consideraciones tenidas en cuenta para el diseño de los sistemas del aparato, especialmente el sistema de control.

## 2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DISEÑO DEL PROTOTIPO DE UUV

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

El prototipo diseñado 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 tiene también la posibilidad de operación remota como en un ROV convencional.

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.

Un diagrama de bloques de los sistemas electrónicos del vehículo se presenta en la Fig. 1.

## 3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

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

Los materiales que conforman la estructura son: fibra de vidrio, fibra de carbono y acero inoxidable. Estos materiales se han seleccionado para 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. El acero inoxidable se usa en los compartimentos que albergan los motores y las luces además de los dispositivos pasa cables.

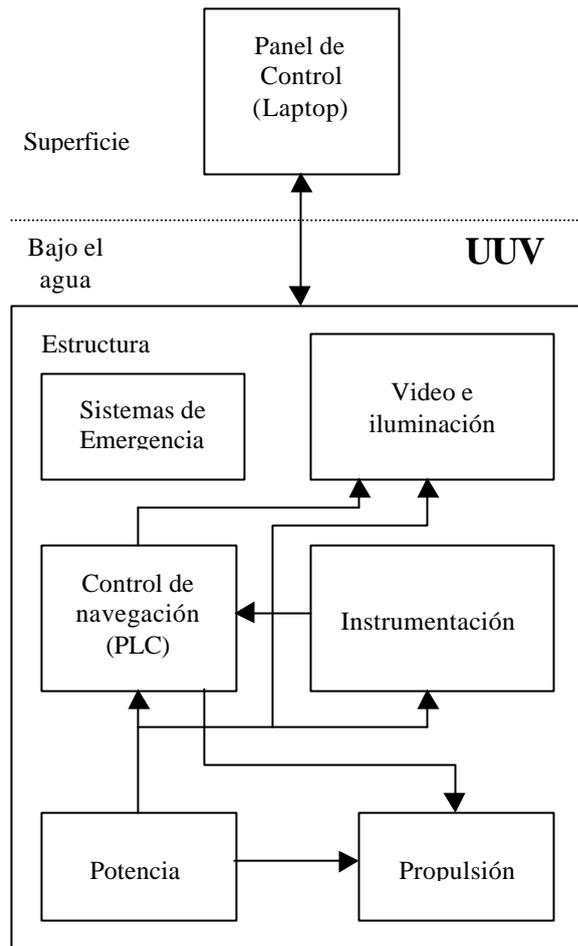


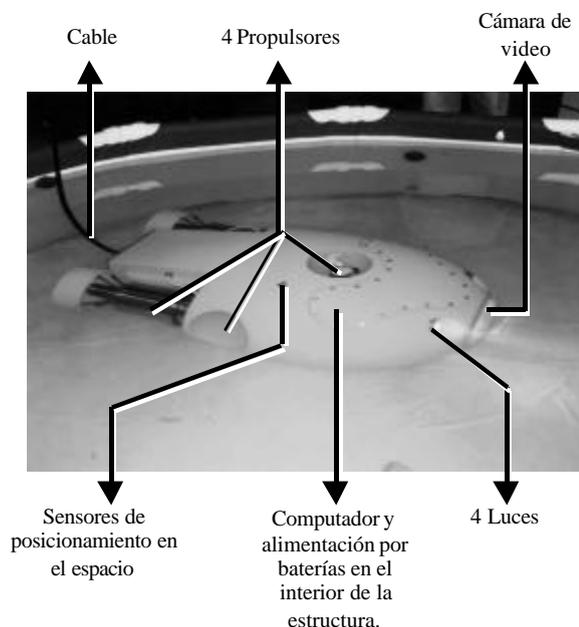
Fig. 1. Diagrama de bloques de VISOR.

El diseño interior incluye el espacio suficiente que permite la adecuada distribución de los componentes. Para garantizar que la nave sea hidrostáticamente estable se hicieron compensaciones usando flotadores en la parte posterior y lastre adicional en la parte frontal. Se tiene fácil acceso al interior de la misma por medio de dos compuertas, una frontal en la parte superior y otra posterior, para efectuar operaciones de inspección y mantenimiento.

La forma exterior del casco se diseñó para minimizar las pérdidas por arrastre y evitar que se generen fuerzas indeseables de empuje ascensional, cuando la nave se desplaza en el plano horizontal. La forma resultante es como la de un pez.

Las dimensiones del prototipo real son 750x450x1200mm. Para el desarrollo de la estructura se diseñó y construyó primero un modelo tamaño natural. Del modelo se obtuvo un molde en fibra de vidrio a partir del cual se fabricó el casco. Finalmente se hicieron las aberturas, se colocaron los tubos

pasantes para ubicar los motores transversal y vertical, y se hicieron los refuerzos estructurales internos. Los recipientes que albergan a los motores fueron diseñados y maquinados aparte (Fig. 2).



**Fig. 2.** Prototipo definitivo del ROV.

Todos los elementos y sellos fueron probados a la presión máxima de operación (aproximadamente 150 psi).

#### 4. SISTEMA DE PROPULSIÓN

El vehículo tiene 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.

Para desplazamiento del vehículo se usan 4 motores trifásicos de 1/3 HP a 220VAC 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 propelas 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 dinámico.

La fuerza de empuje producida por los propulsores se controla cambiando la velocidad y/o sentido de giro de los motores por medio de los variadores de velocidad.

#### 5. SISTEMA DE POTENCIA

El sistema de potencia se ha diseñado para permitir el funcionamiento autónomo o remoto. Cuando se trabaja en modo de alimentación remoto, la potencia proviene de una fuente de 220VAC ubicada en superficie y se transmite al vehículo a través del cordón umbilical. Cuando se trabaja en modo autónomo la potencia que alimenta los sistemas del vehículo proviene de los bancos de baterías incorporados en el mismo. Existen cargadores de baterías que permiten recargarlas cuando está presente la alimentación de 220VAC.

Los bancos de baterías están conformados así: 4 baterías para el sistema de iluminación, 2 para el PLC y la instrumentación, y 22 para la alimentación de los motores. Se usaron baterías de ácido selladas de 12VDC. Se estima que la autonomía del vehículo pueda ser de una a dos horas utilizando las baterías.

#### 6. SISTEMA DE VIDEO 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 posee alta resolución a color y capacidad de trabajo en condiciones de mínima iluminación, típica de ambientes marinos, lagos o ríos.

El sistema de iluminación cuenta con cuatro luces halógenas de 50W para facilitar las labores de inspección en las zonas más profundas.

El sistema de vídeo usa una cámara de alta definición y muy buena sensibilidad. Las imágenes se transmiten a superficie donde se cuenta con un monitor y un VCR con el fin de que estas puedan ser almacenadas para su análisis posterior.

#### 7. SISTEMA DE CONTROL

Los sistemas de control del ROV en superficie se componen de un panel de control, y un computador portátil. En el vehículo está ubicado un PLC (cerebro de a bordo) y la instrumentación.

##### 7.1. El computador portátil.

El computador en superficie realiza la comunicación con el PLC dentro del minisubmarino, en él se traza la trayectoria deseada, se definen los parámetros de control, y se monitorea la lectura de los sensores y alarmas que se generan dentro del vehículo. Actualmente la comunicación con el computador se

realiza gracias al programa del PLC *STEP 7* de SIEMENS a través de la interfaz MPI.

Dentro de los planes de desarrollo futuro se plantea diseñar un panel de presentación programable de acuerdo con las tareas realizadas, con un interfaz 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. Este interfaz se está desarrollando en LabView.

### 7.2. Panel de control.

El panel de control ubicado en superficie permite la conexión del cordón umbilical con el suministro de potencia, el monitor y el computador portátil. Además, en el panel de control se encuentra el interruptor general con el que se inicia todo el sistema, la palanca de mando para el control manual y los térmicos de protección general.

### 7.3. PLC.

El PLC usado es un S7-300 de Siemens. La programación se realiza desde el PC usando el software STEP-7. El programa permite una constante visualización de todas las señales y cambiar los parámetros del algoritmo de control. Conectados al PLC se encuentran los módulos de entrada para leer la instrumentación y las señales de alarma, y los módulos de salida para controlar los variadores de velocidad.

### 7.4. Instrumentación.

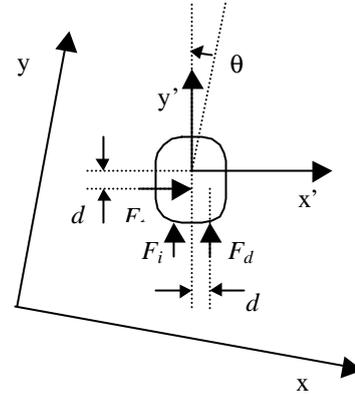
La instrumentación necesaria para la navegación está compuesta por un sensor de profundidad, una brújula electrónica y un acelerómetro biaxial. Actualmente se está desarrollando el sistema de adecuación de las señales que suministran los diferentes sensores para que puedan ser leídas por el PLC.

## 8. ALGORITMO DE CONTROL DE NAVEGACIÓN

El Algoritmo de control de navegación tiene en cuenta el control de posición y orientación en el plano x-y buscando que el aparato siga una trayectoria preestablecida (Gutiérrez, 1999). Este mismo algoritmo de control sería aplicable a otros vehículos autónomos como son los robots móviles

tipo AGV. El control de profundidad se hace independiente por medio de un algoritmo PID.

El vehículo tiene dos propulsores traseros y un propulsor transversal que generan tres fuerzas de propulsión  $F_i$ ,  $F_d$  y  $F_t$  como se muestra en la Fig. 3.



**Fig. 3.** Definición de fuerzas y ejes de coordenadas para el vehículo subacuático

Para el desarrollo del algoritmo de control primero se obtiene el modelo matemático de la dinámica del minisubmarino, usando la segunda ley de Newton. Con respecto a las coordenadas x-y se plantean las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} M \frac{d\dot{x}}{dt} &= F_t \cos(\mathbf{q}) - (F_d + F_i) \text{Sen}(\mathbf{q}) - F_{f_x}(\dot{q}) \\ M \frac{d\dot{y}}{dt} &= F_t \text{Sen}(\mathbf{q}) + (F_d + F_i) \cos(\mathbf{q}) - F_{f_y}(\dot{q}) \\ I \frac{d\dot{\mathbf{q}}}{dt} &= d(F_d - F_i) + F_t d_t - F_{f_q}(\dot{q}) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $d$  es la distancia entre los propulsores posteriores y el eje longitudinal del vehículo,  $y'$ , y  $d_t$  es la distancia entre el propulsor transversal y el eje transversal del vehículo,  $x'$  (Fig. 3). En este modelo la fuerza de arrastre del agua es

$$F(\dot{q}) = [F_{f_x}(\dot{q}), F_{f_y}(\dot{q}), F_{f_q}(\dot{q})]^T \quad (2)$$

El modelo matemático dado en (1) puede plantearse en forma matricial de la forma

$$M(\ddot{\mathbf{q}}) + F(\dot{q}) = \mathbf{t} \quad (3)$$

donde  $q(t) = [x(t), y(t), \mathbf{q}(t)]^T$  es el vector de posición,  $\dot{q}(t) = [\dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)]^T$  es el vector de velocidad,  $\ddot{q}(t) = [\ddot{x}(t), \ddot{y}(t), \ddot{\mathbf{q}}(t)]^T$  es el vector de aceleración.

El vector de fuerzas aplicadas al vehículo es

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} F_t \cos(\mathbf{q}) - (F_d + F_i) \text{Sen}(\mathbf{q}) \\ F_t \text{Sen}(\mathbf{q}) + (F_d + F_i) \cos(\mathbf{q}) \\ d(F_d - F_i) + F_t d_t \end{bmatrix}$$

o sea

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} -\text{Sen}(\mathbf{q}) & -\text{Sen}(\mathbf{q}) & \text{Cos}(\mathbf{q}) \\ \text{Cos}(\mathbf{q}) & \text{Cos}(\mathbf{q}) & \text{Sen}(\mathbf{q}) \\ d & -d & d_t \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (4)$$

donde  $\mathbf{u} = [F_d, F_i, F_t]^t$  es el vector de fuerzas de empuje de los propulsores.

Las matriz de inercia se define por

$$M(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (5)$$

Asumiendo que estas fuerzas de arrastre son proporcionales al cuadrado de la velocidad se define el vector de fuerzas de arrastre

$$F(\dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} F_{fx}(\dot{\mathbf{q}}) \\ F_{fy}(\dot{\mathbf{q}}) \\ F_{fq}(\dot{\mathbf{q}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\mathbf{q}) & -\text{Sen}(\mathbf{q}) & 0 \\ \text{Sen}(\mathbf{q}) & \text{Cos}(\mathbf{q}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{fx}(\dot{\mathbf{q}}) \\ F_{fy}(\dot{\mathbf{q}}) \\ F_{fq}(\dot{\mathbf{q}}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

con

$$\begin{bmatrix} F_{fx}(\dot{\mathbf{q}}) \\ F_{fy}(\dot{\mathbf{q}}) \\ F_{fq}(\dot{\mathbf{q}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \dot{x}^2 \text{Sgn}(\dot{x}') \\ K_y \dot{y}^2 \text{Sgn}(\dot{y}') \\ K_q \dot{q}^2 \text{Sgn}(\dot{q}) \end{bmatrix}$$

siendo  $\dot{x}' = \dot{x} \text{Cos}(\mathbf{q}) + \dot{y} \text{Sen}(\mathbf{q})$  y  $\dot{y}' = \dot{y} \text{Cos}(\mathbf{q}) - \dot{x} \text{Sen}(\mathbf{q})$ .  $K_x$ ,  $K_y$  y  $K_q$  son las constantes de arrastre de movimiento transversal, longitudinal y rotacional respectivamente.

Para desarrollar el algoritmo de control se asume que el minisubmarino está dotado con la instrumentación descrita en la sección 7.4, de modo que se puedan medir en todo instante los valores de  $\mathbf{q}(t) = [x(t), y(t), \mathbf{q}(t)]^t$  y  $\dot{\mathbf{q}}(t) = [\dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)]^t$ . Además se supone que como etapa previa al control se ha especificado una trayectoria deseada, y se han generado las funciones que definen esa trayectoria  $\mathbf{q}_d(t) = [x_d(t), y_d(t), \mathbf{q}_d(t)]^t$ , su velocidad  $\dot{\mathbf{q}}_d(t) = [\dot{x}_d(t), \dot{y}_d(t), \dot{\mathbf{q}}_d(t)]^t$  y su aceleración  $\ddot{\mathbf{q}}_d(t) = [\ddot{x}_d(t), \ddot{y}_d(t), \ddot{\mathbf{q}}_d(t)]^t$ .

Se define el vector de error

$$\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q} = [x_d - x, y_d - y, \mathbf{q}_d - \mathbf{q}]^t \quad (7)$$

y el vector de error filtrado

$$\mathbf{r} = \mathbf{e} - \Lambda \dot{\mathbf{e}} \quad (8)$$

Reescribiendo la dinámica del vehículo dada por la ecuación (3) en términos del error filtrado queda

$$M(\mathbf{q})\dot{\mathbf{r}} = -\mathbf{t} + h(\mathbf{x}) \quad (9)$$

donde

$$h(\mathbf{x}) = M(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda \dot{\mathbf{e}}) + F(\dot{\mathbf{q}}) \quad (10)$$

con  $\mathbf{x} = [q_d(t), \dot{q}_d(t), \ddot{q}_d(t), q(t), \dot{q}(t)]^t$ .

El control se define por

$$\mathbf{t} = K_v \mathbf{r} + h(\mathbf{x}) \quad (11)$$

De este modo los términos no lineales incluidos en  $h(\mathbf{x})$  se anulan y la dinámica del vehículo incluyendo el controlador se convierte en

$$M(\mathbf{q})\dot{\mathbf{r}} = -K_v \mathbf{r} \quad (12)$$

Utilizando la teoría de Lyapunov se puede demostrar que eligiendo adecuadamente a  $K_v$  se puede lograr que  $\mathbf{r} \rightarrow 0$  y por lo tanto que  $\mathbf{e} \rightarrow 0$  (de la ecuación (8)). La estrategia usada aquí corresponde a una técnica de linearización por retroalimentación que para el control de robots se conoce como control por torque computado.

Una vez calculado  $\tau$  a partir de (11) se puede calcular el vector de fuerzas de empuje invirtiendo (4) así

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} -\text{Sen}(\mathbf{q}) & -\text{Sen}(\mathbf{q}) & \text{Cos}(\mathbf{q}) \\ \text{Cos}(\mathbf{q}) & \text{Cos}(\mathbf{q}) & \text{Sen}(\mathbf{q}) \\ d & -d & d_t \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{t} \quad (14)$$

## 9. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE NAVEGACIÓN EN EL PLC

El sistema de control de navegación reside en el PLC (cerebro de a bordo). El programa dentro del bloque de control se distribuye de la siguiente forma:

Se realiza la lectura de sensores y luego, de acuerdo con el modo seleccionado, se realiza la acción de control correspondiente. Se tienen dos modos de operación: manual o automático.

En el modo manual, se tiene control directo de los motores desde superficie. En este modo se pueden desarrollar pruebas y ensayar algoritmos de control desarrollados en el computador de superficie.

En el modo automático se usa el algoritmo de control de navegación descrito en la sección 8. Se tienen tres formas de operación en el modo automático: control usando palanca de mando, mantener posición o seguir una ruta predeterminada.

Para el modo "mantener posición" se lee el valor de la posición actual y se usa esta como punto de consigna para el algoritmo de control.

Para el modo "seguir una ruta predeterminada" es posible definir en superficie una trayectoria a seguir

especificando el perfil de velocidad deseado. En el vehículo se calcula la trayectoria con los datos que fueron enviados por el computador desde superficie. El punto de consigna de posición se varía en el tiempo para lograr que el vehículo siga la trayectoria deseada.

En el modo “control usando palanca de mando” el punto de consigna es recalculado continuamente en superficie de acuerdo con la posición de la palanca de mando y es enviado al PLC.

El control de profundidad se hace utilizando un algoritmo PID independiente que actúa únicamente sobre el propulsor vertical.

El programa de control también mantiene un registro de las señales más importantes durante un período de tiempo y permite que esta información sea leída desde superficie para hacer un monitoreo de la situación del vehículo. En la Fig. 4 se muestra un diagrama de flujo del programa de control residente en el PLC.

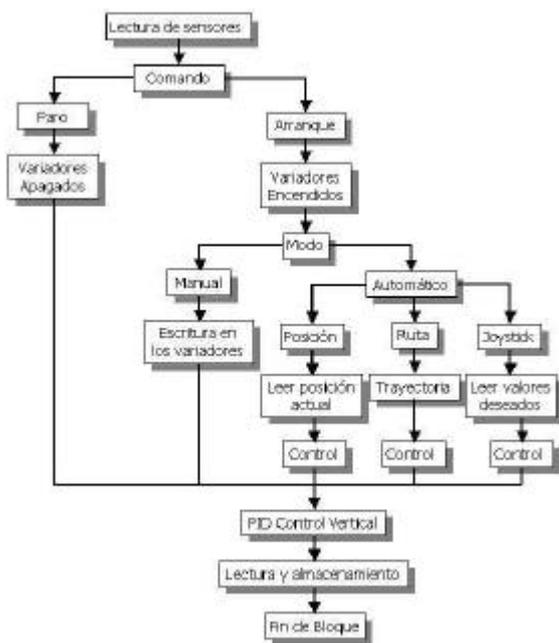


Fig.4 Diagrama de flujo del bloque de control.

## 10. CONCLUSIONES

En este trabajo se describió el diseño y construcción de un prototipo de UUV desarrollado por el Grupo de diseño Mecánico y Control VISOR de la Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana

de Medellín y los sistemas de control empleados en él.

El vehículo subacuático desarrollado permitirá realizar labores de exploración, manipulación y toma de muestras hasta 100 metros de profundidad.

Este vehículo se encuentra actualmente en la fase de pruebas. Además se están realizando contactos para utilizarlo en diferentes aplicaciones de exploración subacuática.

## REFERENCIAS

- Correa, J. C., L. B. Gutiérrez and L. Jurko, “Consideraciones de diseño para un vehículo autónomo controlado en forma dual: autónomamente y vía cable,” in *Anales VIII Congreso Latinoamericano de Control Automático*, Viña del Mar, Chile, 1998, vol. 2, pp. 785-790.
- 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*.
- Gutiérrez Z., L. B. Navigation control for an autonomous underwater vehicle. In: *Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future*. (Águas de Lindóia, SP, Brasil: 1999). *Proceedings 15th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future*. Águas de Lindóia, SP, Brasil August, 1999.
- 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.