

Desarrollo de un vehículo de observación oceanográfica autónomo

J. González, I. Masmitja, G. Masmitja, J. Prat, S. Gomáriz
Grupo SARTI. Departamento de Ingeniería Electrónica. Universidad Politécnica de Cataluña.
Rambla de l'Exposició, 61-69. Neàpolis Building. 08800 Vilanova i la Geltrú. Barcelona. Spain.

Abstract-En este trabajo se presenta el diseño y construcción del vehículo Guanay II. Es un vehículo autónomo submarino que navega sobre la superficie marina y en determinados puntos preestablecidos realiza inmersiones en vertical para obtener perfiles de la columna de agua. El vehículo diseñado tiene una estructura de doble casco. La estructura exterior, realizada en fibra de vidrio y no estanca, ha sido diseñada acorde con los perfiles de Myring para proporcionar al vehículo un buen comportamiento hidrodinámico. En el interior de esta estructura se acopla un módulo cilíndrico estanco de aluminio que contiene el actuador de inmersión, las baterías de alimentación y el sistema electrónico para el control de operaciones del vehículo. El sistema de control se encuentra dividido en los sistemas de: navegación, propulsión e inmersión, seguridad, comunicación y adquisición de datos. El vehículo mide 2.300mm de largo por 320mm de ancho y tiene un peso de 90kg.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de los mares y los océanos está en constante progreso. Actualmente, las tecnologías aeroespaciales pueden centrarse en el estudio de los océanos a un nivel global, abarcando grandes terrenos oceánicos pero sin poder entrar en hacer observaciones detalladas y meticulosas para un sector en concreto.

Los buques oceanográficos pueden solventar este problema al estar en contacto directo con los océanos, sin embargo su alto coste de implementación en cuanto a la planificación y el despliegue de las misiones impide obtener datos con la resolución espacio-tiempo requerida.

Como respuesta a estas necesidades, las herramientas para el estudio oceanográfico están migrando a la creación de vehículos marinos como Gliders, AUV (Autonomous Underwater Vehicles) y ASV (Autonomous Surface Vehicles) [1] [2]. El Guanay II, propuesto en este trabajo, es un vehículo híbrido entre los AUV y los ASV, dado que navega sobre la superficie del mar para alcanzar determinados *waypoints*, en los cuales se detiene y realiza una inmersión en vertical para obtener perfiles de una columna de agua [3] [4] [5] [6].

El AUV Guanay II posee una estructura de doble casco donde el casco exterior, no estanco y realizado en fibra de vidrio, ha sido desarrollado siguiendo los perfiles de Myring [7]. Este diseño proporciona un buen comportamiento hidrodinámico, que minimiza el consumo energético y permite, en lo posible, aumentar la operatividad del vehículo.

En el interior del casco exterior se acopla un módulo cilíndrico estanco de aluminio 6063 que contiene el actuador de inmersión, las baterías de alimentación y el sistema de control. El módulo ha sido diseñado para garantizar una estanqueidad para una presión máxima de 30 AT.

Para el sistema de control se utiliza un dispositivo embebido PC104, desde donde se coordinan los sistemas de navegación, adquisición de datos, propulsión e inmersión, el sistema de seguridad y la comunicación vía radio módem. Dado que el vehículo se desplaza por superficie se recurre a un sistema de posicionamiento global (GPS) para fijar su navegación y un sistema de radio-módem para garantizar la comunicación y la telemetría. El sistema de adquisición de datos no ha sido desarrollado.

Este trabajo se organiza con los siguientes apartados: En la sección II se presenta el diseño mecánico del prototipo. Posteriormente, el sistema de control electrónico del vehículo y la interfaz gráfica se presenta en el apartado III. El apartado IV presenta los resultados experimentales de las pruebas de navegación. Finalmente, en el apartado V se exponen las conclusiones del trabajo.

II. DISEÑO MECÁNICO DEL VEHÍCULO

Como se muestra en la figura 1, el casco exterior se compone de una estructura cilíndrica de fibra de vidrio de 2.300mm de largo por 320mm de diámetro. En la popa y sobre el eje longitudinal del vehículo está ubicado el motor principal de propulsión de la empresa Seaeye. Es un motor de tecnología sin escobillas (brushless), que requiere una tensión de alimentación de 24V DC y desarrolla un empuje máximo de 110N a una potencia de 300W [8]. Dos motores laterales se han colocado a ambos lados de la popa para controlar la trayectoria del vehículo. Estos motores se alimentan con 24V DC y proporcionan un empuje máximo de 24 N a una potencia máxima de 80W. Por último, se han situado en la popa y en el centro del vehículo estabilizadores de dirección para garantizar su estabilidad durante la navegación.



Fig. 1. AUV Guanay II. Vista axonométrica

En la figura 2 se muestra el interior del casco exterior. En él se ubica el cilindro estanco de aluminio que contiene el actuador de inmersión, las baterías de alimentación y el sistema de control [9] [10]. En esta figura también se especifica la posición de la flotabilidad añadida para equilibrar el vehículo. La ubicación del centro de flotabilidad (CB) y del centro de gravedad (CG) garantizan la estabilidad del vehículo y el funcionamiento de las operaciones de inmersión/emersión.

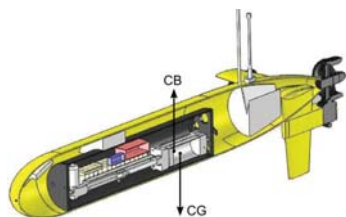


Fig. 2. AUV Guanay II. Corte longitudinal

II-A. Estructura externa: Perfil de Myring

La estructura externa del vehículo ha sido diseñada según las ecuaciones de Myring, las cuales permiten un coeficiente de resistencia hidrodinámica mínimo para unas dimensiones dadas [11] [12]. Estas ecuaciones se basan en los siguientes parámetros (ver figura 3):

- a, largo del casco de proa.
- b, largo del cilindro central de radio constante.
- c, largo del casco de popa.
- n, parámetro exponencial que varía según el perfil escogido.
- 2θ, ángulo de la punta de popa.
- d, diámetro máximo del casco.

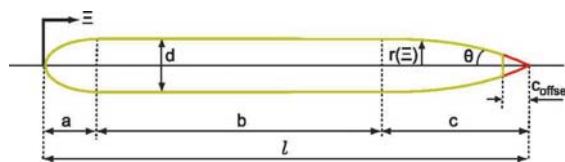


Fig. 3. Perfil de Myring

Estas ecuaciones se asumen con un origen en el extremo de proa del vehículo. Para la configuración de proa, los radios que definen el casco son:

$$r(\Xi) = \frac{1}{2}d \left[1 - \left(\frac{\Xi - a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

Donde r(Ξ) son los radios para las diferentes distancias, y Ξ la distancia medida a partir del extremo de proa del vehículo. Igualmente, la definición del casco de popa se determina según la ecuación (2).

$$r(\Xi) = \frac{1}{2}d - \left[\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan\theta}{c} \right] (\Xi - a - b)^2 + \left[\frac{d}{c^3} - \frac{\tan\theta}{c^2} \right] (\Xi - a - b)^3 \quad (2)$$

Se ha tomado para el vehículo la configuración tipo B de Myring, la cual define medidas con proporciones del tipo:

$$a/b/n/\theta/\frac{1}{2}d = 15/55/1.25/0.4363/5 \quad (3)$$

Estas proporciones han sido dimensionadas según las necesidades del Guanay II, dando como resultado las medidas mostradas en la Tabla I.

TABLA I.
MEDIDAS GUANAY II

Parámetro	Valor	Unidades
a	0.325	m
b	1.116	m
c	0.924	m
c _{offset}	0.070	m
n	2	m
θ	0.4363	n/a
d	0.326	m
l	2.365	m

II-B. Estructura externa: Estabilizadores de dirección

Adicionalmente, el vehículo posee 5 estabilizadores, 2 pares de estabilizadores en posición horizontal y uno en posición vertical, los cuales dan estabilidad al submarino para minimizar el balanceo. Cada estabilizador ha sido diseñado según el perfil NACA63-012a como se muestra en la figura 4.

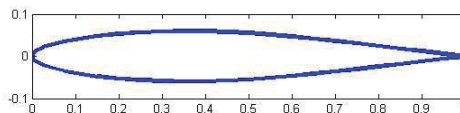


Fig. 4. Proporciones del perfil de aleta NACA63-012a

En la TABLA II se muestran las posiciones de cada par de estabilizadores referenciados desde el extremo de proa del vehículo, lo mismo que sus dimensiones.

TABLA II.
POSICIÓN DE LOS ESTABILIZADORES DESDE PROA

Parámetro	Valor	Unidades
Inicio estabilizadores centrales	1.204	m
Fin estabilizadores centrales	1.434	m
Inicio estabilizadores proa	2.026	m
Fin estabilizadores proa	2.256	m
Inicio estabilizador vertical	2.026	m
Fin estabilizador vertical	2.256	m
Ancho estabilizadores	0.23	m
Largo estabilizadores	0.40	m

II-C. Modelo del vehículo en 3 grados de libertad

La dinámica de movimiento del vehículo se basa en un movimiento sobre superficie, donde se busca alcanzar determinados waypoints para realizar inmersiones en vertical. Usando este principio se ha obtenido un modelo matemático del vehículo en 3 grados de libertad, ver (3), (4) y (5). Modelo en el que se considera el avance (x), el desplazamiento lateral (y) y el ángulo de guiñada (ψ) [13].

$$m\dot{u} - mvr = X_u \dot{u} - Y_v vr - Y_r r^2 + X_{u|u}|u| + X_{prop} + X_l + X_r \quad (3)$$

$$m\dot{v} + mur = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + X_u ur + Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{uv} uv + Y_{ur} ur \quad (4)$$

$$I_z \dot{r} = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + Y_r ur - (X_u - Y_v) uv + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{uv} uv + N_{ur} ur + a_{fm} (X_r - X_l) \quad (5)$$

Este modelo incluye la masa y momentos de inercia del cuerpo rígido, las contribuciones de las fuerzas centrípetas y de Coriolis, las fuerzas de masas inerciales adicionales, la amortiguación hidrodinámica y las fuerzas de propulsión y dirección. Así mismo, se calcularon los diferentes coeficientes hidrodinámicos del vehículo, los cuales están determinados estrictamente por la geometría del vehículo, que en este caso es forma de torpedo. Los diferentes coeficientes se muestran en las tablas III y IV.

TABLA III. COEFICIENTES HIDRODINÁMICOS GUANAY-II

Parámetro	Valor	Unidades
$X_{u u}$	-12.8334	Kg/m
$Y_{v v}$	-425.6532	Kg/m
$Z_{w w}$	-425.6532	Kg/m
$M_{w w}$	42,8456	Kg
$N_{v v}$	-42.8456	Kg
$Y_{r r}$	-43.2557	Kg m/rad ²
$Z_{q q}$	-43.2557	Kg m/rad ²
$M_{q q}$	-43.6539	Kg m ² /rad ²
$N_{r r}$	-43.6539	Kg m ² /rad ²
X_u	-4.5983	Kg
Y_v	-509.7220	Kg
Z_w	-509.7220	Kg
M_w	176.3057	Kg m
N_v	-176.3057	Kg m
Y_r	-176.3057	Kg m / rad
Z_q	176.3057	Kg m / rad

TABLA IV. COEFICIENTES HIDRODINÁMICOS GUANAY-II (CONTINUACIÓN)

Parámetro	Valor	Unidades
$M_{\dot{q}}$	-224.5006	Kg m ² / rad
N_r	-224.5006	Kg m ² / rad
K_p	24.9127	Kg m ² / rad ²
a_{fm}	0.44	m

II-D. Cilindro estanco

En el interior de la estructura exterior se encuentra un cilindro estanco de aluminio 6063, con un proceso de anodizado duro de 50 micras, de diámetro de 250mm y largo de 1100mm. El grosor del cilindro es de 5mm y no posee ninguna soldadura.

Las tapas se han diseñado sin soldaduras y de un grosor que permite soportar la presión de inmersiones hasta 300m de profundidad. La estanqueidad del módulo se garantiza con una junta tórica y la fijación de la tapa al cilindro es por presión. Posee una ranura con un hilo de nylon que asegura la fijación de ambos elementos sin presión exterior. Con el fin de facilitar la abertura y comprobar la estanqueidad se han ubicado en la tapas dos válvulas de vacío. En la figura 5 se muestra la tapa con los diferentes conectores.

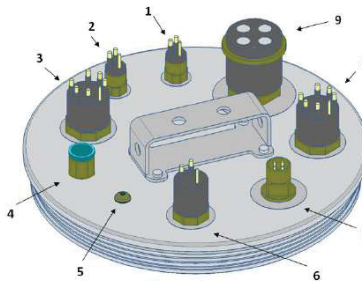


Fig. 5. Tapa frontal con conectores

Dentro del cilindro estanco se ha colocado la electrónica de control, las baterías de alimentación y el sistema de inmersión compuesto por un pistón neumático unido mediante un chasis realizado con tubo de acero, tal como muestra la figura 6. Dado que las baterías y el pistón de inmersión son los componentes más pesados se han ubicado en la parte inferior para garantizar una buena posición del centro de gravedad del vehículo. Todo el sistema electrónico de control se ha ubicado en una bandeja colocada sobre las baterías y el sistema de inmersión. En esta bandeja, construida en aluminio que permite un cómodo manejo e instalación, se ha colocado 4 cajas de PVC donde se ha distribuido el sistema de control.

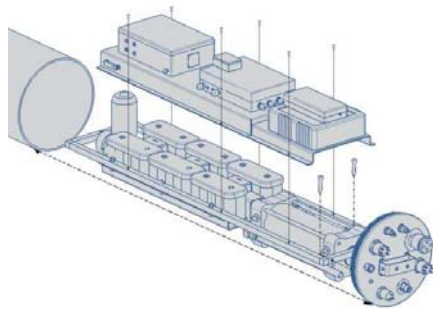


Fig. 6. Interior del cilindro estanco

El sistema de inmersión está compuesto por un cilindro neumático comercial de acero inoxidable con desplazamiento de 1500 cm³, un actuador eléctrico lineal con una carrera de 200 mm y un empuje de 3KN de fuerza.

Aunque la acción del sistema de inmersión provoca que el vehículo pierda la comunicación de RF con la estación base, el software del propio vehículo se sigue encargando del monitoreo y el correcto funcionamiento del sistema. De igual forma la comunicación GPS del vehículo se pierde durante la inmersión.

Las baterías de alimentación son de Ni-Cd y tienen capacidad de 21Ah, proporcionando una tensión de 24V. Se han utilizado convertidores dc-dc de la serie VRB de *Mornsun* para suministrar tensiones de 5V y 12V.

En la bandeja de aluminio de la parte superior se encuentran los diferentes componentes electrónicos distribuidos en cajas.

La unidad de control, situada en primer lugar, dispone de ventilación forzada y de conexiones externas para el control de la CPU. A continuación se encuentra una caja con los reguladores conmutados de alimentación a 12V y 5 V. En otra caja se han agrupado los drivers de control de los motores y el controlador SSC-32 de *Linxmotion* [14]. Para terminar, se encuentra la caja de navegación con el GPS y la brújula/inclinómetro, el radio modem y el sensor de humedad.

II-E. Estructura completa del vehículo

En las figuras 8 y 9 se observa la estructura externa y el cilindro estanco del vehículo respectivamente. La carga útil que puede soportar el vehículo es de 20kg aproximadamente, y tiene un peso de 90kg.



(a)



(b)

Fig. 7. Estructura externa. (a) Vista lateral (b) Vista de popa.



Fig. 8. Cilindro estanco. vista lateral.

III. DESARROLLO ELECTRÓNICO

El sistema de control se diseña de forma modular con diferentes subsistemas, gestionados mediante la unidad de control compuesta por un ordenador embebido PC104. En la figura 9 se presenta un diagrama de bloques con la estructura del sistema de control diseñado. Como se observa, hay seis módulos: la unidad de control, el sistema de navegación, el sistema de propulsión/inmersión, el sistema de seguridad, el sistema de comunicación y el sistema de adquisición de datos.

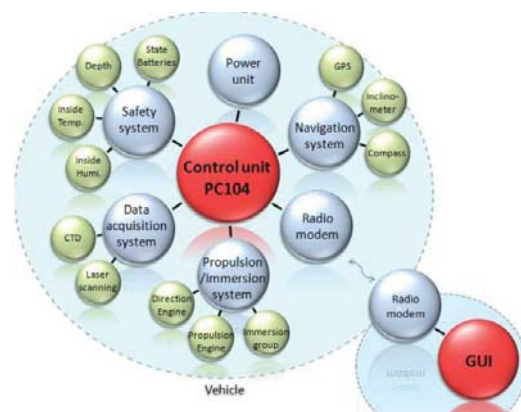


Fig. 9. Diagrama de bloques del sistema de control

III-A. Unidad de Control

El vehículo está controlado mediante un ordenador embebido con ensamblaje PC104+, modelo PM-6100 de *Aewin* [15]. Opera con Windows XP, y su programación se ha hecho en NI-LabVIEW. El sistema de almacenamiento

de datos es mediante una *compact flash* que proporciona una buena protección frente a vibraciones. Adicionalmente está equipada con: Una tarjeta de expansión de puertos RS232/RS485, modelo MSMX104+ para tener 8 puertos; y una tarjeta de adquisición de datos PC104-DAS16JR/12 para datos de sensores analógicos y digitales.

III-B. Sistema de navegación

Con el fin de conocer la posición del vehículo se ha dotado de un sistema de navegación por GPS. Se usa un receptor DG14TM de *Magellan* [16], el cual incorpora *Satellite Based Augmentation System (SBAS)*, permitiendo una óptima navegación en tiempo real controlada mediante un puerto RS232. La antena usada es de modelo WS3910, pasiva, de 50Ω, 28.5dB y NF de 0.8dB.

Así mismo, se dispone de una brújula y un inclinómetro integrados en el dispositivo TCM-2.6, con un rango de inclinación de $\pm 80^\circ$, y precisiones de 0.8° y 0.1° en los inclinómetros y la brújula respectivamente [17].

III-C. Sistema de propulsión/inmersión

El sistema de propulsión/inmersión consta de un motor principal, que proporciona la propulsión, dos motores laterales, encargados de controlar la dirección del vehículo y un conjunto motor-pistón que permite la inmersión. El motor principal, modelo SI-MCT01-B de *Seaeye*[18], es de una potencia de 300W a 960rpm. Se ha diseñado un adaptador RS232/RS485 para realizar la comunicación half-duplex con el PC104. Los motores laterales de modelo BTD150 de *Seabotix*[19], proporcionan un empuje de 25N a 80W, se ha diseñado un driver de control y potencia ya que no disponen de electrónica incorporada. Finalmente, el sistema de inmersión/emersión usa un motor-pistón de *Festo*[20] modelo CRDNG-100PPV-A, controlado por un puente en H.

III-D. Sistema de seguridad

Este sistema se encarga de monitorizar las variables críticas. - Carga de las baterías: Se monitoriza por puerto RS232 la energía restante en las baterías a través de un indicador de estado de carga de Texas Instruments.

- Profundidad: Se usa un sensor GEMS 2200 que proporciona un rango de 0-6 bares.

- Humedad y Temperatura interior: Se disponen de sensores de humedad y temperatura para garantizar el correcto entorno de funcionamiento de los componentes electrónicos.

III-E. Sistema de radioenlace

El vehículo está conectado con la estación base mediante un radio-enlace, permitiendo la comunicación en tiempo real. Éste se hace mediante un radio módem TMOD-C48 [21], el cual tiene un rango de frecuencias 403MHz-470MHz, velocidad de transmisión de 4800bps y potencia de 0.1W a 5W, permitiendo un alcance máximo de 10km.

III-F. Implementación del sistema electrónico de control.

En la implementación del sistema electrónico se ha buscado optimizar el espacio del interior del módulo estanco. Por otro lado, también se ha pretendido una mayor facilidad de montaje, reparación y ampliación, además de una buena organización.

Todo el sistema electrónico de control del vehículo se ha ubicado en el interior de 4 cajas de PVC (ver figura 10). Se ha verificado su correcto funcionamiento mediante pruebas de laboratorio tanto en el arranque de los motores, como en el accionamiento del pistón y la adquisición de datos por parte de los demás sistemas de control.



Fig. 10. Implementación del sistema de control electrónico

III-G. Software e Interfaz Gráfica

Todo el sistema se controla mediante un software dividido en dos partes: Uno ubicado en el vehículo y otro en la estación base. El software del vehículo tiene como misión transmitir datos de telemetría y controlar todos los parámetros descritos anteriormente para el vehículo. El software ubicado en tierra se encarga de enviar y recibir los datos de telemetría, y mostrarlos mediante una interfaz gráfica usando indicadores y accionamientos. En la figura 11 se muestra el panel principal, que incorpora los indicadores de navegación y controles para actuar manualmente sobre los motores. Se han creado tres paneles más que muestran los diferentes valores instantáneos de los sensores, las gráficas temporales de las variables y el posicionamiento del vehículo integrado a Google Earth, respectivamente.



Fig. 11. Software: Interfaz gráfica

III-H. Navegación autónoma

Al vehículo aún no se le han integrado los algoritmos de control para el seguimiento de trayectorias usando waypoints, sin embargo, el vehículo dispone de todo el soporte de hardware necesario para realizar dichas operaciones.

Para realizar un seguimiento de trayectorias se pretende aplicar un control zonal tipo fuzzy-TSK al realizar maniobras con la acción del timón. Cada velocidad constante de avance puede definir de manera clara un sistema linealizado para el vehículo, de forma que pueda ser aplicado un control lineal a cada uno de estos sistemas, y por tanto un control zonal que actúe sobre cada control lineal.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han realizado diferentes pruebas experimentales que han garantizado la estanqueidad del módulo interior, la operatividad del sistema electrónico y las correctas operaciones de navegación e inmersión del vehículo.

La estanqueidad del módulo interior y el correcto funcionamiento del sensor de profundidad se han comprobado mediante la realización de pruebas en una cámara hiperbárica. Las pruebas realizadas han garantizado una estanqueidad del módulo para una profundidad de 60m siendo su profundidad nominal de trabajo de 30m. También se ha corroborado el correcto funcionamiento del sensor de profundidad en todo su rango, hasta los 10 bares.

Todo el sistema electrónico implementado se ha sometido a diferentes pruebas de laboratorio que han demostrado su buen funcionamiento. Se han verificado las adecuadas dinámicas de las tensiones y corrientes en los diferentes modos de operación del sistema de propulsión e inmersión, así como el correcto funcionamiento del sistema de navegación y del radio enlace mediante pruebas de campo en tierra, verificando diferentes distancias de alcance y posicionamiento en tiempo real del vehículo en movimiento.

Finalmente se han realizado pruebas del vehículo en el agua que inicialmente han permitido ajustar la flotabilidad mediante la incorporación de 13kg de empuje ubicada mayoritariamente en popa. Esto fue suficiente para iniciar las pruebas de navegación e inmersión.

En la prueba de navegación la velocidad fue aproximadamente de 1.5 m/s con el control del motor de propulsión al 70%. Mediante el uso de los motores laterales a plena potencia y la disminución de la propulsión del motor principal, la variación de la trayectoria se conseguía fácilmente. Las pruebas de inmersión, a una profundidad de 2,5m se llevaron a cabo con total normalidad actuando sobre el equipo del motor del pistón de inmersión.

Durante las pruebas de navegación se han testeado el sistema de posicionamiento del vehículo y los diferentes sensores del sistema de seguridad. En la figura 13 se muestra el balanceo, cabeceo y guiñada generados por el movimiento del vehículo.

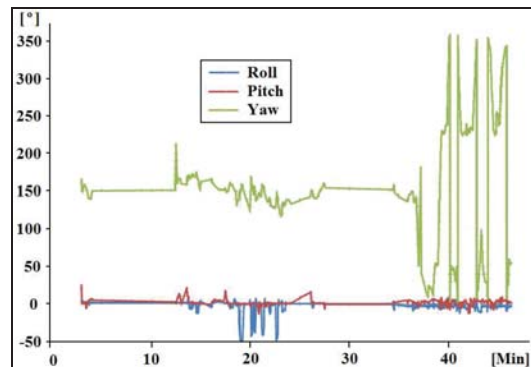


Fig. 13. Balanceo, cabeceo y guiñada

V. CONCLUSIONES

El resultado ha sido la realización de un vehículo autónomo submarino robusto y relativamente pequeño factor que facilita su maniobrabilidad y operatividad.

El vehículo se ha diseñado con una geometría hidrodinámica que mejora su rendimiento y permitirá la obtención de un modelo dinámico con un coste mínimo de pruebas experimentales para su validación.

Se ha implementado un sistema de control electrónico capaz de realizar las tareas definidas como objetivo del proyecto, tal y como demuestran las pruebas efectuadas al sistema. Además, dada sus características es fiable la implementación de los algoritmos de control de las trayectorias de navegación así como el control de misión para garantizar la autonomía del vehículo.

En resumen se puede decir que se ha desarrollado una plataforma de observación oceánica capaz de navegar por la superficie del mar y realizar inmersiones verticales para obtener perfiles de columnas de agua.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España y la Unión Europea (FEDER), proyecto nº: CTM2010-16274/MAR y proyecto nº: CTM2009-08867.

REFERENCIAS

- [1] Meyrowitz, A. L.; Blidberg, D. R. and Michelson, R. C. "Autonomous vehicles" Proceedings of the IEEE. Volume 84, Issue 8, pp 1147-1164. 1996.
- [2] Blidberg, D. R. "The development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV); A brief summary" Autonomous Undersea Systems Institute publications (AUSI), ICRA, Seoul, Korea, May 2001.
- [3] Dabholkar, N., Desa, E., Afzulpurkar, S., Madhan, R., Mascarenhas, A.A.M.Q., Navelkar, G., Maurya, P.K., Prabhudesai, S., Nagvekar, S., Martins, H., Sawkar, G., Fernandes, P. and Manoj, K.K. "Development of an autonomous vertical profiler for oceanographic studies", Proceedings of the International Symposium on Ocean Electronics (SYMPOL-2007), 11-14 December, Cochin, India, pp. 250-256. 2007.

Actas ROBOT 2011. 28-29 de Noviembre de 2011. Sevilla (España)

- [4] Byron, J. and Tyce, R. "Designing a Vertical / Horizontal AUV for Deep Ocean Sampling" Proceedings of MTS/IEEE Conference and Exhibition Oceans 2007. Sept. 29 2007-Oct. 4. Vancouver, Canada pp. 1-10. 2007.
- [5] Spartacus Gomariz Castro; Jorge Prat Tacias; Pedro Francisco Gaya Suñer; Juan Sole Rovira. An autonomous vehicle development for submarine observation. Journal of maritime research.VI - 2,pp. 23 - 35.01/08/2009 .ISSN 1697-4840
- [6] D. Roig, M. Martinez, B. Garau, A. Alvarez y J. Tintoré. "A low-cost autonomous vehicle for coastal sea monitoring", Instrumentation Viewpoint, pp. 16-17, Otoño 2005.
- [7] D. F. Myring, "A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow", Aeronautical Quaterly, pp. 186-194, Agosto 1976.
- [8] DeWijs, B. "AUV/ROV propulsion thrusters". Proceedings of MTS/IEEE Conference and Exhibition OCEANS 2000. 11-14 September, Providence, Rhode Island, USA, pp 173-176 vol.1.2000.
- [9] Spartacus Gomariz Castro; Jorge Prat Tacias; Antonio Galo Ruiz; Pedro Francisco Gaya Suñer; Joan Sole; Joaquin Del Rio Fernandez."Development of a low-cost autonomous oceanographic observation vehicle".En: *Actes Oceans'09*. IEEE Press. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 11/05/2009. .ISBN 978-1-4244-2523-5
- [10] Masmítja, I., Masmítja, G., González, J., Shariat-Panahi, S., and Gomáriz, S., "Development of a control system for an Autonomous Underwater Vehicle". OES-IEEE AUV'10. September 2010. Monterey, California.
- [11] Prestero, T., "Verification of a six degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle", Master's thesis, September 2001.
- [12] Gomáriz, S., González, J., Arbos, A., Masmítja, I., Masmítja, G., Prat, J., "Design and construction of the Guanay-II autonomous underwater vehicle". Oceans'11 OES-IEEE. June 2011. Santander, Spain.
- [13] Fossen, T. I. (2002). "Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles", Marine Cybernetics AS, Trondheim. ISBN 82-92356-00-2
- [14] Lynxmotion, <http://www.lynxmotion.com/p-395-ssc-32-servo-controller.aspx> (sep-2011)
- [15] Aewin, http://www.aewin.com.tw/main/product_info.aspx?&pid=27 (sep-2011)
- [16] Magallen, <http://www.ashtech.com/dg-14-2663.kjsp> (sep-2011)
- [17] PNI, <http://www.pnicorp.com/products/tcm-legacy> (sep-2011)
- [18] Seaye, <http://www.seaye.com/thrusters.html> (sep-2011)
- [19] Seabotix, http://www.seabotix.com/products/auv_thrusters.htm (sep-2011)
- [20] Festo, <http://www.festo.com/> (sep-2011)
- [21] Farrel, <http://www.farell-i.com/en/product/2> (sep-2011)