

Piloto Automático para Vehículo Subacuático Autónomo con Rumbo y Profundidad Controlada

Autoría principal

Luis Hernández Santana¹, Luis Antonio Balaguer Labrada².

Otros autores

Alain Martínez La Guardia¹, Yunier Valeriano Medina¹, Delvis García García¹, Yeiniel Suárez Sosa¹, Carlos Enrique Guerra Morales², Elpidio Pérez Rivero², Rolando Mondui Fernández², Cesar Muñoz Pedroso², Yohelvis Febles Martínez², Dalila Mena Díaz², Leticia Bocourt Hernández².

Entidad ejecutora principal

¹Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Entidades participantes

²Centro de Investigación y Desarrollo de Naval. (CIDNAV). Estrada Palma No 13, Regla, La Habana, Teléfono 07 793 7770. e-mail: cid5@reduim.cu

Resumen

Un Vehículo Autónomo Subacuático (AUV) es un submarino que porta su propia fuente de energía y una unidad de cómputo con un software de control que permite la ejecución de diferentes misiones sin intervención humana. Con el presente trabajo GARP de la UCLV y CIDNAV muestran el desarrollo de un Vehículo Autónomo Subacuático (HRC-AUV) como plataforma de pruebas para la implementación de aplicaciones científicas, industriales y medioambientales.

Para el desarrollo del HRC-AUV ha sido necesario tener en cuenta la: construcción mecánica del vehículo, arquitectura de software y hardware, integración sensorial, modelación dinámica, rechazo a las perturbaciones marinas, planificación de trayectoria e implementación del control. La obtención de estos resultados basados en tecnología de bajo costo con soluciones novedosas, avaladas por publicaciones en revistas de primer nivel, en: la arquitectura de software y hardware, la modelación dinámica y el rechazo a las perturbaciones marinas, es el aporte científico principal de este trabajo.

El sistema ha sido sometido a evaluaciones experimentales en polígono de mar durante el 2009 y 2010 y posteriormente, luego de una actualización tecnológica, durante el 2013 y el 2014.

Con el estado actual del trabajo se ha completado el desarrollo de un sistema de control automático (piloto automático) para aparatos sumergibles, lográndose su validación con resultados positivos, demostrados a escala real en pruebas de polígono de mar, donde se garantizó la navegación estable con control en los planos horizontal, rumbo; y vertical, profundidad, así como el seguimiento automático de una trayectoria por indicación de GPS del vehículo naval con profundidad controlada. El prototipo

funcional exitoso de esa avanzada tecnología constituye la principal contribución práctica de este trabajo. Reconocido en el marco de la Tarea Triunfo.

El trabajo ha sido presentado en eventos nacionales e internacionales y ha sido publicado en tres oportunidades en revistas de alto impacto, relacionadas con la temática. En el 2011 recibió el Premio al Resultado de Mayor Aporte a la Defensa del País del Ministerio de Educación Superior y en el 2012 un premio provincial del CITMA.

Comunicación Corta

Introducción

Un Vehículo Autónomo Subacuático (AUV) es un submarino que porta su propia fuente de energía y una unidad de cómputo con un software de control que permite la ejecución de diferentes misiones sin intervención humana, Fig. 1.

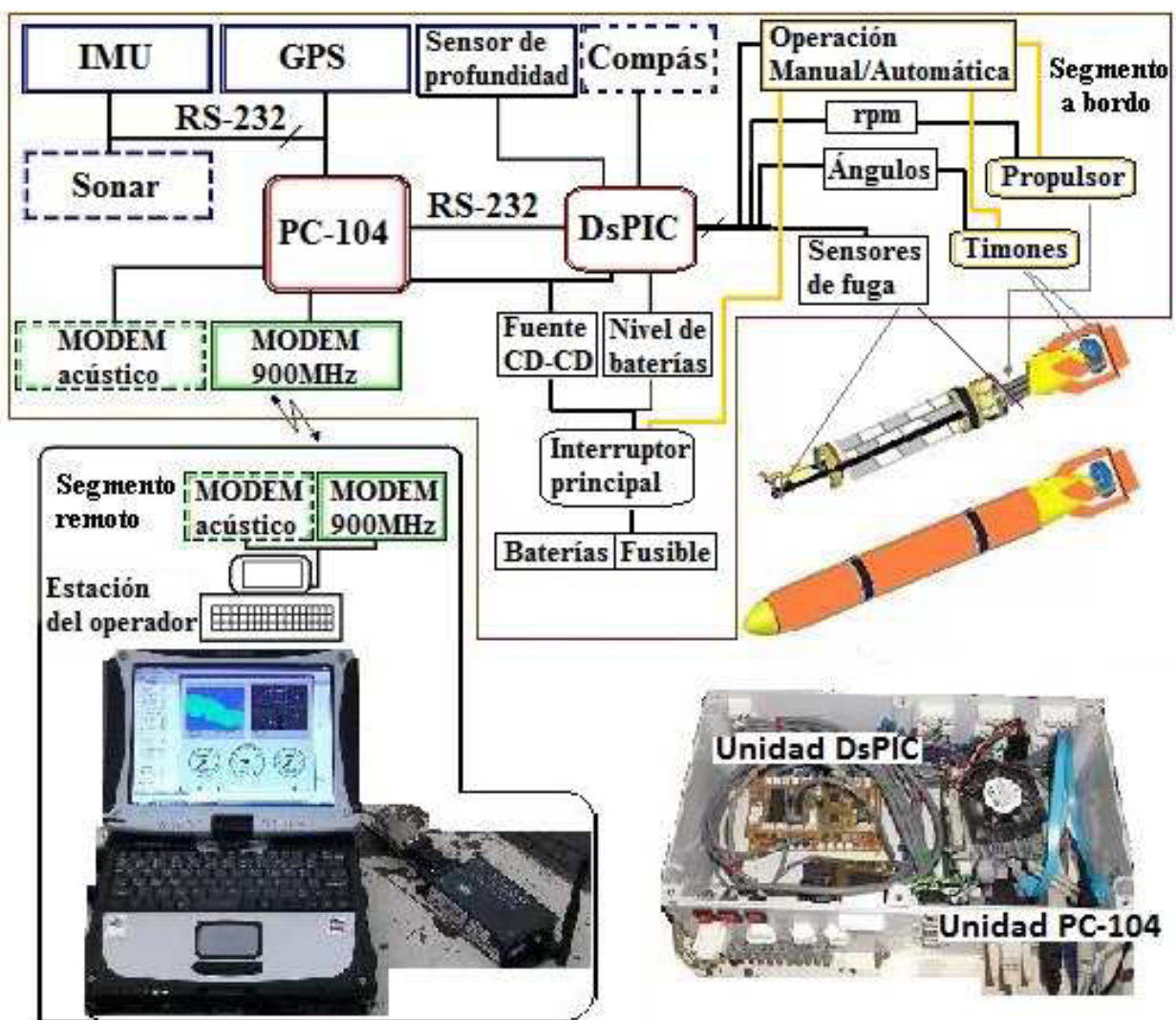


Fig. 1. Estructura del sistema

Con el presente trabajo GARP de la UCLV y CIDNAV muestran el desarrollo de un Vehículo Autónomo Subacuático (HRC-AUV) como plataforma de pruebas para la implementación de aplicaciones científicas, industriales y medioambientales.

Para el desarrollo del HRC-AUV ha sido necesario tener en cuenta la: construcción mecánica del vehículo, arquitectura de software y hardware, integración sensorial, modelación dinámica, rechazo a las perturbaciones marinas, planificación de trayectoria e implementación del control [1], [2]. La obtención de estos resultados basados en tecnología de bajo costo es el aporte científico principal de este trabajo.

El sistema ha sido sometido a evaluaciones experimentales en polígono de mar durante el 2009 y 2010 y posteriormente, luego de una actualización tecnológica, entre el 2013 y el 2014. Con el estado actual del trabajo se ha completado el desarrollo de un sistema de control automático (piloto automático) para aparatos sumergibles, lográndose su validación con resultados positivos, demostrados a escala real en pruebas de polígono de mar, donde se garantizó la navegación estable con control en los planos horizontal, rumbo, y vertical, profundidad, así como el seguimiento automático de una trayectoria por indicación de GPS del vehículo naval con profundidad controlada.

El trabajo ha sido presentado en eventos nacionales e internacionales y ha sido publicado en tres oportunidades en revistas de alto impacto, relacionadas con la temática.

En el 2011 recibió el Premio al Resultado de Mayor Aporte a la Defensa del País del Ministerio de Educación Superior.

Arquitectura de Hardware y Software

El HRC-AUV es un vehículo en forma de "tabaco" con una longitud 8.0m, diámetro 0.8m y una masa aproximada de 4100Kg. El sistema de actuadores está compuesto por un propulsor y dos timones de control, todos operados eléctricamente. Puede navegar a profundidades de hasta 10m con una velocidad crucero de 1.9m/s.

Una visión general del sistema puede ser observada en la Fig. 1, donde el sistema está dividido en dos grandes segmentos, el que se encuentra a bordo y el remoto. El segmento a bordo está destinado al control del vehículo, la ejecución del algoritmo de navegación y el manejo de errores y alarmas. La estación remota constituye el eslabón más alto destinado a la planificación de tareas, ajuste de reguladores y la supervisión, Fig, 2.

La arquitectura de hardware de a bordo está compuesta por dos unidades de cómputo: una computadora industrial PC-104 y un sistema empujado basado en un DsPIC 30F4013. Estas dos unidades se dividen el trabajo de adquisición de datos desde los sensores y las tareas de navegación y control. Haber logrado una solución efectiva de arquitectura de software y hardware basada en equipamiento de hardware y sensores que clasifican en la gama media y baja que proporcionan los fabricantes, ha sido

reconocido por la comunidad científica con la publicación de los trabajos de Martínez [1], [2].

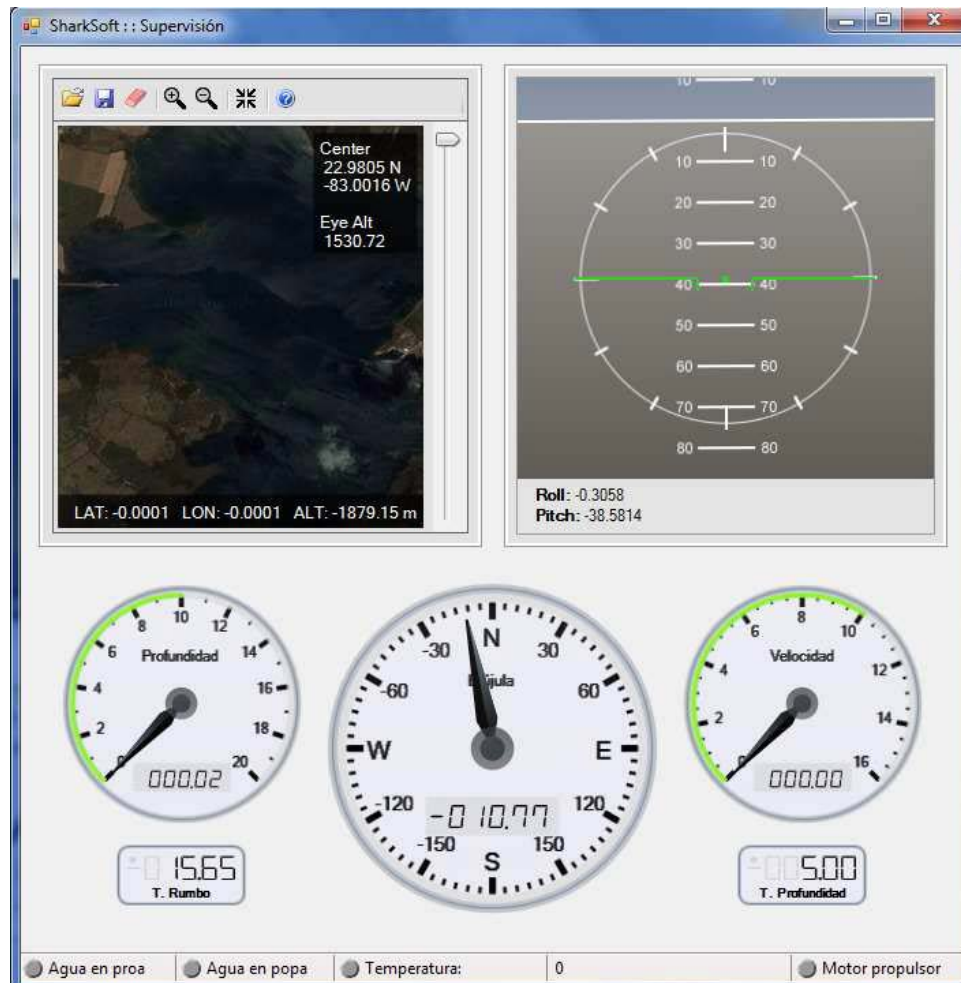


Fig. 2. Interfaz de supervisión

AUV Modelado Matemático

En la literatura es común el uso de los métodos de Fossen [3], [4] para la modelación dinámica de vehículos subacuáticos con geometría de tipo "tabaco". Siguiendo ese método el modelo dinámico del HRC-AUV, incluyendo las fuerzas medioambientales (olas y corrientes), ha sido obtenido. De dicho modelo la mayoría de los coeficientes son calculados basados en datos geométricos e inerciales, no obstante, los relacionados con la fricción y los mandos son encontrados experimentalmente, basados en un método semi-empírico, teniendo como soporte tecnología de medición y experimentación de bajo costo.

La Fig. 3 muestra el sistema de coordenadas y la definición los movimientos de traslación y rotación del vehículo.

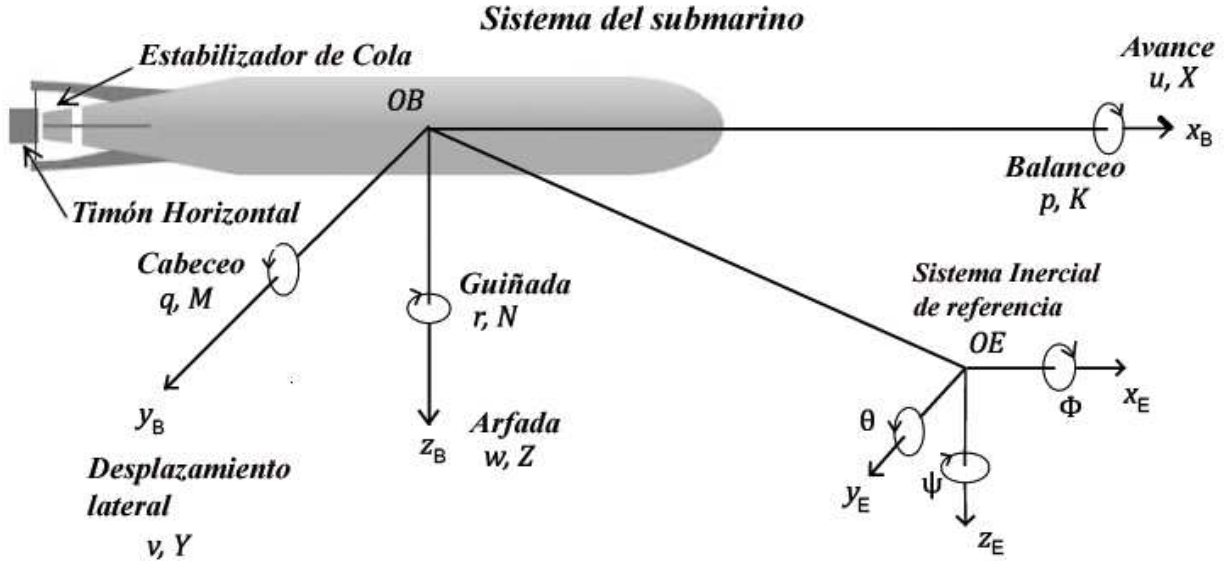


Fig. 3. Notación para AUV

Las ecuaciones no lineales de movimiento de un sólido de 6 grados de libertad (6 GDL) en el espacio tridimensional se pueden obtener a partir de las leyes de conservación del momento lineal y angular con respecto a un sistema de referencia inercial. Una representación de las ecuaciones dinámicas tiene la forma:

$$M_{RB}\ddot{\nu} + C_{RB}(\nu)\dot{\nu} + M_A\ddot{\nu} + C_A(\nu)\dot{\nu} + D(\nu)\dot{\nu} + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

donde

$$\nu = [u, v, w, p, q, r]^T \quad \text{y} \quad \eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$$

La ecuación (1) puede representarse de forma compacta como:

$$M\ddot{\nu} + C(\nu)\dot{\nu} + D(\nu)\dot{\nu} + g(\eta) = \tau \quad (2)$$

donde, $M = (M_{RB} + M_A)$ es la matriz de inercia (incluyendo las masas añadidas). $C(\nu)$ es la matriz de Coriolis matrix (incluyendo las masas añadidas), $D(\nu)$ es la matriz de amortiguamiento y $g(\eta)$ es el vector de fuerzas y momentos gravitacionales. Finalmente (τ) es el vector de entrada de control.

A. Modelo dinámico lineal.

Tomando como base la simetría del HRC-AUV es común dividir las ecuaciones de movimiento (2) en dos subsistemas desacoplados. Subsistema Longitudinal : estados (u, w, q) y (x, z, θ) ; y Subsistema Lateral : estados (v, p, r) y (y, Φ, Ψ) .

Además, si estos subsistemas se hacen independientes y se considera que $w' = w = 0$ y θ es pequeño, entonces $\sin\theta = \theta$, la dinámica del cabeceo se convierte en la ecuación lineal en el tiempo y en la función de transferencia siguientes:

$$(I_{yy} - M_{\dot{q}})\ddot{\theta} - M_q\dot{\theta} + WBG_z\theta = \tau_M$$

$$\frac{\theta(s)}{\delta_s(s)} = \frac{b_1}{(I_{yy} - M_{\dot{q}})s^2 - M_qs + WBG_z} \quad (3)$$

con ángulo de timón $\delta_s = \tau_M b_1$.

Para encontrar la relación entre el ángulo θ y la profundidad z , considerando las condiciones descritas de aproximación lineal y trabajando con las ecuaciones cinemáticas con u_0 como la velocidad del vehículo, se obtiene:

$$\frac{Z(s)}{\theta(s)} = \frac{-u_0}{s} \quad (4)$$

Para el Subsistema Lateral, la ecuación desacoplada de Guiñada, Rumbo, para pequeñas variaciones de Ψ , convierte en la ecuación en el tiempo y en la función de transferencia siguiente,

$$(I_{zz} - N_{\dot{r}})\ddot{\psi} - N_r\dot{\psi} = \tau_N$$

$$\frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{b_2}{(I_{zz} - N_{\dot{r}})s^2 - N_rs} \quad (5)$$

con ángulo de timón $\delta_R = \tau_N b_2$.

Los términos inerciales $(I_{zz} - N_{\dot{r}})$ y $(I_{yy} - M_{\dot{q}})$ y los términos gravitacionales WBG_z fueron calculados de acuerdo a la geometría del vehículo y el diseño CAD-CAM del HRC-UAV [5].

Los parámetros de la matriz $D(v)$, N_r y M_q ; y las ganancias b_1 and b_2 del vector $\mathcal{T}$ se obtienen mediante identificación experimental utilizando un método semi-empírico como es demostrado por Valeriano, [5].

B. Modelo simplificado de las perturbaciones marinas.

Las principales perturbaciones que afectan a los vehículos subacuáticos durante la navegación lo constituyen el oleaje generado por el viento y las corrientes marinas. A la ecuación 2 se le incorporan los términos relativos al oleaje y a las corrientes marinas quedando como sigue:

$$M\dot{\nu}_r + C(\nu_r)\nu_r + D(\nu_r)\nu_r + g(\eta) = \tau_{olas} + \tau \quad (6)$$

donde $(\tau_{olas} = [X_{olas}, Y_{olas}, N_{olas}]^T)$ representa las fuerzas y momentos provocados por las olas, mientras que (V_r) simboliza la velocidad relativa a las corrientes.

1) Modelo de la olas: Una representación adecuada del efecto de las olas se puede realizar con el espectro JONSWAP (Joint North SeaWave Project). Una aproximación lineal del espectro del oleaje que puede ser incluida en los lazos de control tiene la forma de una función de transferencia de segundo orden, con la forma:

$$y(s) = \frac{K_{\omega}s}{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2}w_H(s) \quad (7)$$

donde $y(s)$ representa a la salida del modelo de las olas, $w_H(s)$ se representa mediante un ruido blanco de media cero, mientras la ganancia constante $K_{\omega} = 2\zeta\omega_0\sigma_{\omega}$, siendo σ_{ω} una constante que describe la intensidad de las olas, ζ es el coeficiente de amortiguamiento, por lo general elegido 0,1 y; ω_0 es la frecuencia fundamental de las olas.

C. Modelos dinámicos del HRC-AUV

El método analítico y semi-empírico para la obtención de los parámetros de la ecuación (2) y los valores específicos para el HRC-AUV se pueden encontrar en el trabajo de Valeriano, [5].

Para validar del modelo no lineal de 6 GDL obtenido en [5] para el HRC – AUV se realiza una comparación entre los resultados que brinda el modelo y los obtenidos durante un experimento realizado en el mar con el vehículo al aplicar una deflexión constante de -0.455 rad en el timón horizontal, logrando un trayectoria circular en el plano x – y, que es medida con el GPS instalado en AUV . En la Fig. 4,

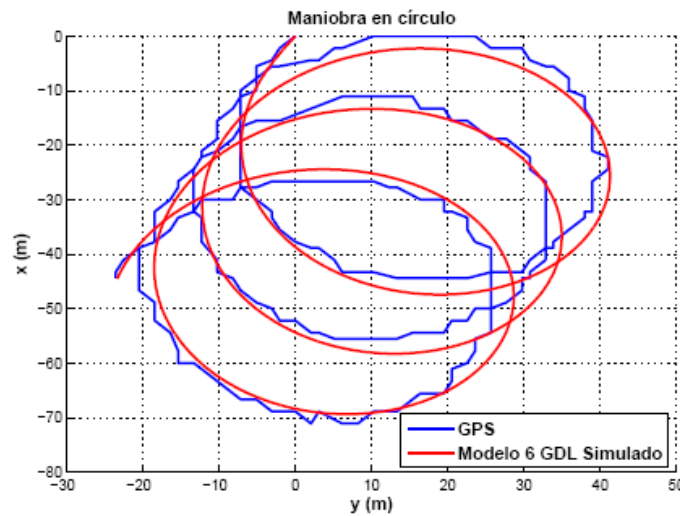


Fig. 4. Trayectoria simulada y real del HRC – AUV.

se presenta la curva que se obtiene al simular esta maniobra con el modelo no lineal de 6 GDL, incluyendo el efecto de las perturbaciones; y la curva de experimento medido con el GPS. La coincidencia de la salida del modelo con la curva experimental es evidente. No obstante, el resultado ha sido avalado por el test estadístico de Kolmogorov-Smirnov para un intervalo de confianza ($\alpha = 0.05$) con un valor de probabilidad (pvalue = 0.4087). Estos resultados de modelado, al ser logrados con un diseño de experimento de bajo costo, realza el valor científico del mismo.

Sobre la base del modelo no lineal de 6 GDL obtenido puede realizarse la simulación de los movimientos del vehículo para la validación de diferentes estrategias de navegación y control [7]. El modelo da además brinda la información necesaria para la obtención de los modelos simplificados de los Subsistemas Lateral y Longitudinal, así como de las funciones de transferencia para el diseño de los sistemas de control de rumbo, ecuación (5) la que queda como [5]:

$$\frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{0.14}{4s^2 + s} \quad (8)$$

para el sistema lateral, y;

$$\frac{\theta(s)}{\delta_s(s)} = \frac{2644}{36580s^2 + 9096.9s + 883.7} \quad (9)$$

para el sistema longitudinal.

IV. Filtrado del efecto de las olas

El filtrado de las olas se define como: la operación mediante la cual se atenúa el movimiento inducido por las olas de la señal de medición. La principal razón para insertar los filtros como elementos en los lazos de control es para reducir el movimiento oscilatorio provocado por las olas y por consiguiente el desgaste del sistema de actuadores, incrementando la vida útil de la estructura mecánica y disminuyendo el consumo de energía.

En el caso del HRC-AUV, la estrategia de filtrado abarca las variables de rumbo y variación de rumbo que se realimentan en el lazo de control de dirección y las variables de: profundidad, ángulo de cabeceo y variación del cabeceo en el lazo de control de profundidad. Para el diseño del filtro en el lazo de control de dirección se utilizan las ecuaciones (7) y (5); para el movimiento del vehículo y para el oleaje respectivamente.

El estudio detallado de este proceso es presentado por García en [6]. En el filtro del lazo de profundidad se hace uso de las ecuaciones: (7), (3) y (4) [8].

La Fig. 5 presenta los resultados de filtrado de la variable de rumbo y variación de rumbo, durante sesiones de experimento en el mar a mediados del 2014, En azul la señal sin filtrar y en rojo la filtrada, nótese la respuesta suavizada de la señal filtrada y por otra parte de la entrada de mando al timón de dirección en la Fig. 6, donde

igualmente se aprecia, en negro, una apreciable reducción del movimiento oscilatorio de los actuadores.

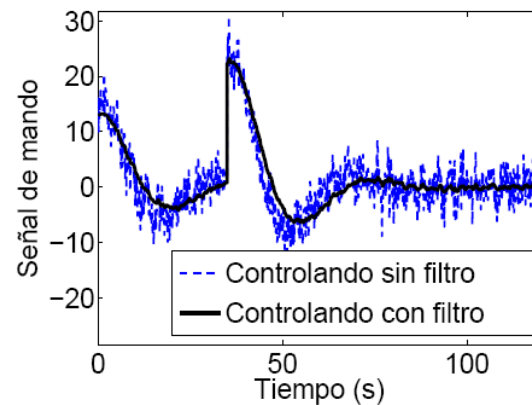
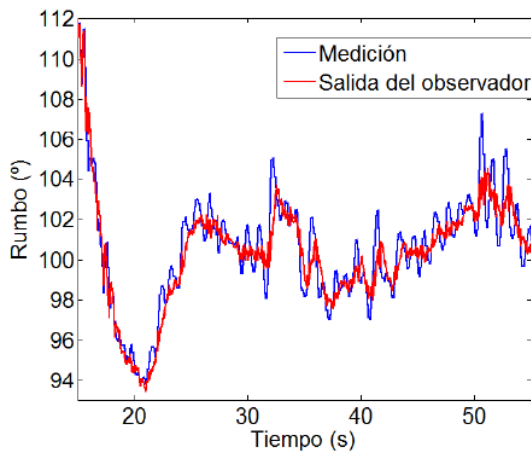


Fig. 5. Medición de rumbo y variación de rumbo filtrada y sin filtrar.

Fig. 6. Diferencia en la señal de mando del timón al filtrar.

V. Sistema de Control del HRC-AUV.

Teniendo como soporte la arquitectura de Hardware y Software desarrollada para el HRC-AUV [2] y partiendo del modelo dinámico desarrollado para el vehículo, incluyendo el filtrado de las perturbaciones, es implementada la estrategia de control. La misma cuenta con dos lazos desacoplados, uno para el control de rumbo, que se diseña a partir de la ecuación (8) y otro para el control de profundidad basado en las ecuaciones (9) y (4), Fig. 7.

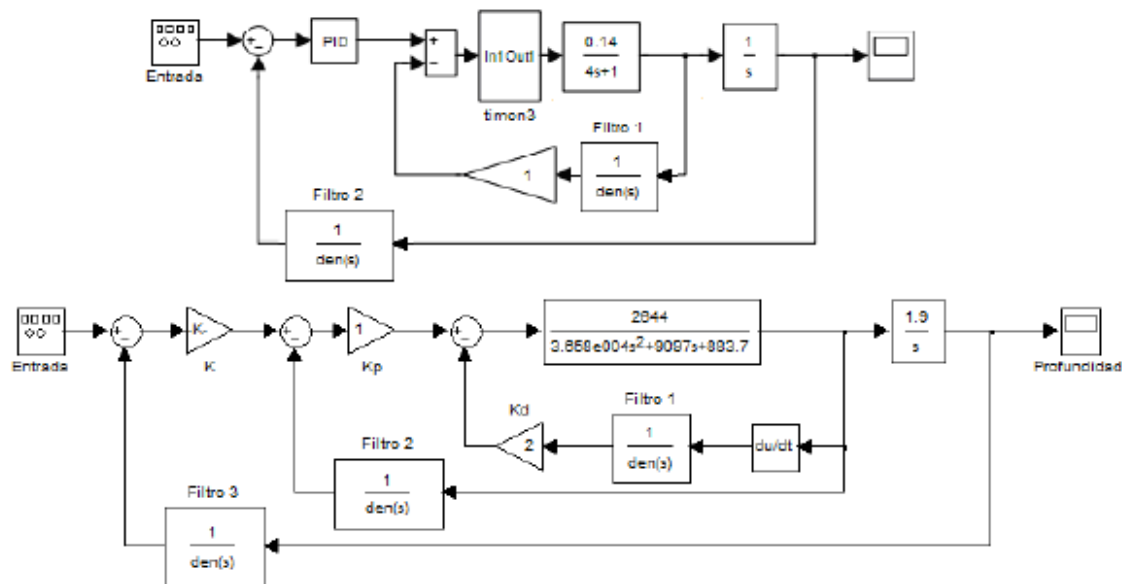


Fig. 7. Lazos desacoplados para control de rumbo y profundidad.

La efectividad del control de rumbo se aprecia en un experimento de seguimiento de puntos por mapa como se muestra en la Fig. 8.



Fig. 8. Seguimiento de puntos por mapa.

En azul el camino deseado, en rojo la trayectoria real seguida por el vehículo. Este trayecto fue ejecutado con profundidad controlada siguiendo valores deseados entre 2 y 3 metros, como se aprecia en la Fig. 9.

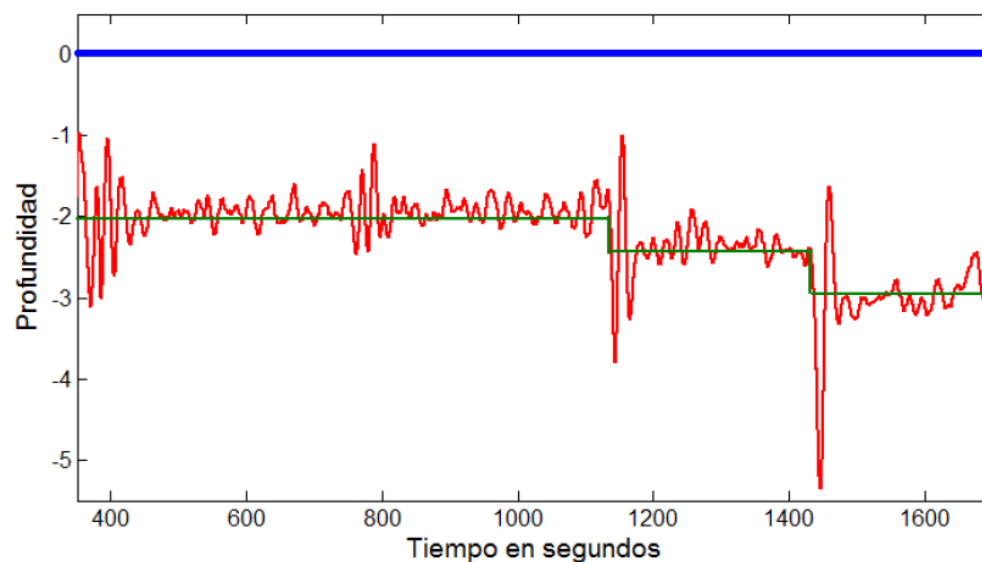


Fig. 9. Profundidad controlada durante experimento de seguimiento de puntos por mapa de la Fig. 8

VI. Conclusiones

Con el presente trabajo se demuestra la eficacia del piloto automático desarrollado para Vehículo Subacuático Fig. 7. Lazos desacoplados para control de rumbo y profundidad. Autónomo del CIDNAV, HRC-AUV. El trabajo realizado incluyó: la arquitectura de software y hardware, integración sensorial, modelación dinámica, planificación de camino e implementación del control. Sistemas que fueron validados a escala real en pruebas de polígono de mar, donde se garantizó la navegación estable con control en los planos horizontal, rumbo, y vertical, profundidad, así como el seguimiento automático de puntos por indicación de GPS del vehículo naval con profundidad controlada.

Referencias

- [1] Martínez, A.; Rodríguez, Y.; Hernández, L.; Guerra, C.; Lemus, J.; Sahli, H. Hardware and Software Architecture for AUV based on Low-cost Sensors. IEEE(ed.), The 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV, Singapore, 2010.
- [2] Martínez, A.; Rodríguez, Y.; Hernández, L.; Guerra, C.; Lemus, J.; Sahli, H. Arquitectura de hardware y software para AUV , resultados experimentales. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, RIAI, Vol. 10 No 3, Pages 333-343, (2013).
- [3] Fossen, T. I. Guidance and Control of Ocean Vehicles., John Wiley & Sons. Nueva York, Estados Unidos,(1994).
- [4] Fossen, T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control., John Wiley & Sons. Nueva York, Estados Unidos,(2011).
- [5] Valeriano-Medina, Y.; Martínez, A.; Hernández, L.; Sahli, H.; Rodríguez, Y.; Cañizares, J. R. Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences, Vol. 19 No 2, Pages 175-200, (2013).
- [6] Garcia-Garcia, D.; Valeriano-Medina, Y.; Hernández, L.; Martínez-Laguardia, A. Wave filtering for heading control of an AUV based on passive observer. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, Vol. 41No 6, Pages 540-549, (2012).
- [7] Li, P.; Xu, X.; Zhang, X.; Liu, Y. Reserch of autonomous navigation system for AUV based on SDVM 2013 Sixth International Symposium on Computational Intelligence and Design, Pages = 189-192, Hangzhou, China, IEEE Xplore, (2013).
- [8] Garcia Garcia, D. Desarrollo de técnicas de filtrado de las olas para la navegación y el control de un AUV, Tesis de maestría, Universidad Marta Abreu de las Villas, Villa Clara, Cuba, (2014).