

Navigation System with Adaptive Disturbances Compensation for an Autonomous Underwater Vehicle

D. Garcia, J. Peña, Y. Valeriano, and L. Hernández

Abstract—In this paper is presented an adaptive observer based on gain-scheduled principle as a core in the navigation system of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) moving in the horizontal plane. The estimated wave-frequency motions are removed from the measurements and the resulting smoothed signals are sent as feedback to the heading controller for horizontal motions control. As an important improvement, the adaptive capabilities are obtained setting the observer gains as function of the wave frequency, which represents the sea states. The wave encounter frequency is estimated using an algebraic approach with good results. Simulation results show an excellent performance of the observer and the resulting horizontal motion control system of the vehicle.

Index Terms—Adaptive estimation, Filtering, Frequency estimation, Nonlinear observer, Surface waves.

I. INTRODUCCIÓN

EN los modernos Sistemas de Control de Movimiento (SCM) para vehículos marinos autónomos se definen tres componentes fundamentales o subsistemas. El subsistema de guiado que proporciona la ruta deseada, el subsistema de control que genera las acciones de control necesarias para mantener el vehículo sobre la trayectoria deseada y el subsistema de navegación, encargado de procesar las mediciones de los diferentes sensores y/o modelos matemáticos. Este último subsistema, también es el encargado de proporcionar la información acondicionada de manera fiable en relación con la trayectoria o estado real del vehículo [1].

Los efectos medioambientales provocados por el viento, las corrientes marinas y el oleaje, constituyen las principales perturbaciones que afectan el desempeño de los vehículos que operan en el mar. Por tal motivo, muchos han sido los esfuerzos destinados a incrementar las prestaciones de los SCM para este tipo de aplicaciones [2].

La evolución en los sistemas de navegación como elemento fundamental de los SCM, ha propiciado la aparición de nuevos algoritmos de estimación de corrientes, así como estrategias de filtrado de los efectos del oleaje [3]-[7]. En sus comienzos los SCM para vehículos marinos emplearon controladores clásicos PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Para atenuar las vibraciones provocadas por las olas en el sistema de actuadores y timones se empleaban filtros paso bajo y supresores de bandas (notch) [8]. Sin embargo, el empleo de este tipo de filtros puede afectar de manera considerable el desempeño de los lazos de control al introducir retardo de fase, comprometiendo en ocasiones la estabilidad del sistema.

Una mejora significativa a este problema se logró con el empleo de filtros de Kalman (FK) como núcleo de los sistemas de navegación, tanto en su variante lineal como no-lineal. De esta manera se aprovecha la capacidad que poseen estos filtros de extraer la señal del ruido no estacionario en un sentido óptimo, en base al mínimo error cuadrático medio. Muchos son los autores que han utilizado esta alternativa en distintas aplicaciones relacionadas con el entorno marino [1], [2], [6], [9], [10].

A pesar del amplio uso de este tipo de observadores en los SCM para vehículos marinos, en la gran mayoría de estas publicaciones no se garantiza la estabilidad global del estimador al no disponer de una metodología óptima para su ajuste o sintonía. Este algoritmo requiere de un conocimiento a priori en relación con las matrices de covarianza del modelo utilizado y de las mediciones o sensores empleados. Estas covarianzas se emplean en el cálculo de las ganancias del filtro, por lo que tienen un impacto directo en el desempeño del mismo. A pesar de ello, no existen investigaciones en las que se establezca un procedimiento certero para la sintonía de un FK, ya que los criterios existentes varían considerablemente de una aplicación a otra [6], [10].

Una alternativa muy utilizada desde hace varios años resulta el empleo de observadores pasivos (OP) de ganancia ajustable como elemento principal del subsistema de navegación [11]-[14]. Estos observadores generalmente se diseñan haciendo uso de modelos no lineales debido a la propia dinámica asociada a estos vehículos, con fuertes interacciones y no linealidades. A la adecuada aplicación de esta técnica han contribuido la teoría de pasividad de Lyapunov y los distintos conceptos para probar tanto la estabilidad global, como la estabilidad asintótica del sistema en ciertos casos [11], [14].

En aplicaciones marinas que emplean OP o FK, es común la

D. Garcia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Villa Clara, Cuba, dggarcia@uclv.edu.cu. *Corresponding author.*

J. Peña, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Villa Clara, Cuba, jopena@uclv.cu

Y. Valeriano, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Villa Clara, Cuba, yunierv@uclv.edu.cu

L. Hernández, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Villa Clara, Cuba, luishs@uclv.edu.cu.

utilización de modelos matemáticos para representar no solo la dinámica del vehículo, sino también las perturbaciones que lo afectan. Sin embargo, excepto en [3], en el resto de los trabajos los autores consideran las perturbaciones como invariantes en el tiempo y los parámetros asociados a las corrientes y el oleaje conocidos a priori.

El Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP), de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, se encuentra desarrollando un prototipo de Vehículo Autónomo Sumergible (VAS) para el estudio de los ecosistemas marinos. Para este vehículo denominado HRC-AUV, han sido diseñadas varias estrategias de control y guiado en el plano horizontal por lo que se hace necesario poder contar con un sistema de navegación, que estime adecuadamente las variables del movimiento en este plano.

En el presente trabajo, se propone el diseño de un observador no lineal de ganancias ajustables como sistema de navegación en el plano horizontal para el HRC-AUV. Para ello, se utiliza el modelo no lineal de 3 grados de libertad (GDL) que caracteriza el movimiento del vehículo, así como representaciones matemáticas que permiten modelar las corrientes marinas y el efecto del oleaje. El modelo de las olas se considera variable en el tiempo (no estacionario). La estimación de la frecuencia de incidencia del oleaje se realiza en línea, mediante un estimador algebraico que se actualiza de manera periódica, conjuntamente con las ganancias del observador. La vinculación de ambas estrategias resulta novedosa y da continuidad a los trabajos previos realizados con este vehículo [15], [16].

Otro elemento que aporta valor al trabajo lo constituye la demostración de estabilidad del observador, a partir de una selección adecuada de las matrices de ganancias. Estas ganancias se expresan en función de la frecuencia estimada del oleaje, con lo cual se asegura que las mismas se actualicen ante los cambios que se producen en el estado del mar. La estimación de frecuencia permite la compensación de los efectos adversos que provoca el oleaje en las mediciones, realimentando hacia el controlador de dirección una señal de mayor calidad que la que se mide.

La organización del artículo es la siguiente: en la sección II se establece la nomenclatura y el sistema de coordenadas empleado para representar las distintas variables. En la sección III se abordan los principales elementos teóricos sobre el modelado dinámico del vehículo, así como las perturbaciones que lo afectan. En la sección IV se presenta el diseño del observador, teniendo en cuenta los modelos definidos y las condiciones que aseguran su estabilidad de acuerdo con la teoría de Lyapunov. En la sección V se describe el estimador algebraico empleado para estimar la frecuencia de incidencia de las olas. En la sección VI se muestran los resultados obtenidos mediante simulación para el observador propuesto, en conjunto con el estimador de frecuencia. Por último, se presentan las principales conclusiones del trabajo

II. NOMENCLATURA Y SISTEMAS DE COORDENADAS EMPLEADO

El movimiento de vehículos marinos y en particular de un

submarino se describe con respecto a un marco de referencia inercial. Para sistemas de velocidades bajas y recorridos no muy largos, se puede considerar que un sistema de referencia situado en tierra (OE) es un sistema inercial al no tener en cuenta la razón de rotación de la Tierra. Por lo tanto, este sistema de coordenadas OE cuyos ejes $x-y-z$ están direccionados hacia el Norte, el Este y centro de la Tierra respectivamente, puede ser considerado como un sistema de navegación para el vehículo [8].

La Fig. 1 muestra la notación adoptada en este trabajo para representar los movimientos de rotación y traslación del vehículo referido al sistema OE . Por otra parte, tanto las velocidades lineales como angulares se encuentran referidas a un sistema de coordenadas situado en el cuerpo del vehículo (OB). Para el caso del HRC-AUV el origen del sistema de coordenadas OB coincide con su centro de flotabilidad.

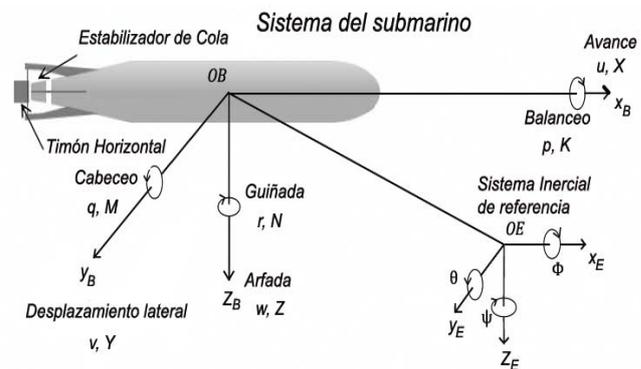


Fig. 1. Sistemas de coordenadas empleado y la definición de las variables utilizadas.

Adicionalmente, en la Tabla I se resume la nomenclatura utilizada para describir cada uno de los movimientos del vehículo, así como las fuerzas y los momentos que actúan en el mismo.

TABLA I
NOMENCLATURA UTILIZADA EN EL HRC-AUV

Movimiento	Fuerzas y momentos	Velocidades	Posiciones
Avance	X	u	x
Desplazamiento lateral	Y	v	y
Arfada	Z	w	z
Balanceo	K	p	ϕ
Cabeceo	M	q	θ
Guiñada	N	r	ψ

III. MODELOS MATEMÁTICOS EMPLEADOS PARA EL DISEÑO DEL OBSERVADOR

El hecho de poder contar con un modelo matemático del vehículo, es indispensable para el adecuado diseño de estrategias de filtrado y compensación de perturbaciones basadas en modelo. Estas, a su vez, tienen como finalidad elevar la calidad de los distintos lazos de control atenuando los efectos de las perturbaciones externas.

En esta sección se presenta el modelo dinámico no lineal de 6 GDL que caracteriza el movimiento del HRC-AUV en tres

dimensiones y luego el modelo reducido de 3 GDL referido al movimiento en el plano horizontal. Este último, en combinación con el modelo de las principales perturbaciones que afectan al vehículo durante su operación, constituyen la base para posteriormente realizar el diseño del observador de estados propuesto.

A. Modelo General Para la Simulación de los Movimientos del HRC-AUV

Las ecuaciones que describen el movimiento del vehículo en el espacio tridimensional se obtienen mediante la aplicación de las leyes de conservación de los momentos lineales y angulares referidos a un sistema de referencia inercial. En [8], se plantea que la segunda ley de Newton puede expresarse para cualquier vehículo subacuático con un sistema de coordenadas fijo al cuerpo y en presencia de perturbaciones, de la forma:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\phi, \theta, \psi)\mathbf{v}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{olas} + \boldsymbol{\tau}_{corr} - \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}), \quad (2)$$

donde:

- $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$: Matriz de inercia la cual contiene la suma de los términos de masa del cuerpo rígido mediante la matriz \mathbf{M}_{RB} y la matriz de masas añadidas \mathbf{M}_A .
- $\mathbf{C}(\mathbf{v}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6} = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})$: Matriz que abarca los efectos de *Coriolis* y de fuerzas centrípetas dados por $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$ e incluye también los efectos de las masas añadidas $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$. Esta se encuentra en función del vector de velocidades \mathbf{v} .
- $\mathbf{D}(\mathbf{v}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$: Matriz que agrupa los términos relacionados con el amortiguamiento hidrodinámico, también en función de \mathbf{v} .
- $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$: Vector que representa las fuerzas y momentos gravitacionales en función de la posición $\boldsymbol{\eta}$.
- $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{6 \times 1} = [\tau_X, \tau_Y, \tau_Z, \tau_K, \tau_M, \tau_N]^T$: Vector que representa las fuerzas ejercidas sobre el vehículo por las entradas de control.
- $\boldsymbol{\tau}_{olas} \in \mathbb{R}^{6 \times 1} = [\tau_{Xolas}, \tau_{Yolas}, \tau_{Zolas}, \tau_{Kolas}, \tau_{Molas}, \tau_{Nolas}]^T$: Vector que representa los momentos y fuerzas debidos a los efectos de las olas sobre el vehículo.
- $\boldsymbol{\tau}_{corr} \in \mathbb{R}^{6 \times 1} = [\tau_{Xcorr}, \tau_{Ycorr}, \tau_{Zcorr}, \tau_{Kcorr}, \tau_{Mcorr}, \tau_{Ncorr}]^T$: Vector que representa los momentos y fuerzas debidos a los efectos de las corrientes marinas.
- $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^{6 \times 1} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$: Vector que incluye los estados de movimientos de traslación y rotación del vehículo.
- $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{6 \times 1} = [u, v, w, p, q, r]^T$: Vector estados que agrupa las velocidades lineales y angulares del vehículo.
- $\mathbf{R}(\phi, \theta, \psi) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$: Matriz de rotación mediante la cual se realiza la transformación de magnitudes del plano *OB* al *OE*. Se encuentra en función de los llamados ángulos de Euler (ϕ, θ, ψ) que representan el balanceo, el cabeceo y la guiñada del vehículo respectivamente. Estos se ilustran en la Fig. 1.

Las ecuaciones (1) y (2) con las matrices y vectores de orden 6 definidos anteriormente, constituyen la estructura del modelo no lineal de orden completo para el HRC-AUV. Este es el modelo que se utiliza en la sección de resultados como referencia para las simulaciones. El mismo, representa con una elevada exactitud el comportamiento del vehículo bajo estudio y sus parámetros han sido calculados combinando diversos métodos [17]. Debido a que en el presente trabajo solo se evalúa el comportamiento del vehículo en un plano horizontal, a continuación, se obtiene el modelo reducido empleado en el diseño del observador para este plano.

B. Modelo del Vehículo en el Plano Horizontal

A partir del modelo general de 6 GDL del HRC-AUV determinado por las ecuaciones (1) y (2), es posible obtener representaciones dinámicas simplificadas desacopladas o débilmente acopladas. Los modelos reducidos del movimiento del vehículo en los distintos planos, favorecen el diseño de estrategias de control, leyes de guiado y observadores de estados [2].

Los términos del modelo no lineal (1) y (2) que caracterizan la dinámica del movimiento en el plano horizontal del HRC-AUV son de 3er orden, por lo que se emplea en lo adelante el subíndice 3 para denotar los mismos. Las variables de estado en este plano son: la posición lineal (x), la posición lineal (y) y la orientación o posición angular (ψ). Las variables anteriores se agrupan en el vector de posición en el plano horizontal $\boldsymbol{\eta}_3 = [x, y, \psi]^T$, así como las velocidades respectivas $\mathbf{v}_3 = [u, v, r]^T$. El modelo simplificado de 3 GDL presentado en la presente sección es el que se toma como base para el diseño del observador, este modelo continúa siendo no lineal y tiene la misma estructura de las ecuaciones (1) y (2), pero denotadas con el subíndice 3. Los componentes del vector $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ para los estados de interés en $\boldsymbol{\eta}_3$ son iguales a cero por no existir movimiento en el plano vertical. Como entradas para controlar los movimientos del vehículo en el plano horizontal se utilizan: la velocidad de giro del motor (n) y la deflexión angular del timón (δ_T). Por lo que el vector de entradas de control $\boldsymbol{\tau}_3$ tiene la forma:

$$\boldsymbol{\tau}_3 = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & b_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \cdot |n| \\ \delta_T \end{bmatrix}. \quad (3)$$

El resto de las matrices y vectores que determinan el modelo no lineal del vehículo para el subsistema horizontal se definen como:

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} - N_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_3(\mathbf{v}_3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -mv + Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & mu - X_{\dot{u}}u \\ mv - Y_{\dot{v}}v & -mu + X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_3(\mathbf{v}_3) = - \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| & 0 \\ 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_3(\phi, \theta, \psi)|_{\phi \approx \theta \approx 0} = \mathbf{R}_3(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Para la transformación de coordenadas en el plano horizontal solo interviene el ángulo de guiñada ψ que representa los cambios de dirección del vehículo. Las matrices anteriores dependen de la masa del vehículo m , el momento de inercia I_{zz} , los coeficientes de masas añadidas X_u, Y_v, N_r , los términos de amortiguamiento hidrodinámico $X_u + X_{u|u}|u|, Y_v + Y_{v|v}|v|, N_r + N_{r|r}|r|$ y las ganancias de los actuadores b_1, b_2 y b_5 que multiplican las entradas de control en (3). En la Tabla II se resumen los valores geométricos e inerciales, así como los parámetros del modelo horizontal obtenidos experimentalmente para el HRC-AUV. Las pruebas experimentales realizadas se abordan de manera detallada en [17].

De acuerdo con la Tabla II, los valores numéricos de las matrices y vectores que definen el modelo no lineal de 3 GDL para el movimiento en el plano horizontal son:

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 4345.40 & 0 & 0 \\ 0 & 7928.56 & 0 \\ 0 & 0 & 36388 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{C}_3(\mathbf{v}_3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -7928.56v \\ 0 & 0 & 4535.40u \\ 7928.56v & -4535.40u & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{D}_3(\mathbf{v}_3) = - \begin{bmatrix} 181.45 + 47.49u & 0 & 0 \\ 0 & 1219.80 & 0 \\ 0 & 0 & 9096.90 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\tau}_3 = \begin{bmatrix} 0.1946 & 0 \\ 0 & 318.39 \\ 0 & 1273.56 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \cdot |n| \\ \delta_T \end{bmatrix}. \quad (7)$$

TABLA II
RESUMEN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS, GEOMÉTRICOS E INERCIALES DEL
HRC-AUV

Parámetro	Descripción	Valor [unidad]
m	masa	4094.56 [kg]
L	longitud	9.46 [m]
R	radio	0.40 [m]
I_{zz}	momento de inercia	20816 [kgm ²]
X_u	masa añadida	-250.84 [kg]
Y_v	masa añadida	-3834 [kg]
N_r	masa añadida	-15572 [kgm ²]
b_1	ganancia de actuador	0.1946
b_2	ganancia de actuador	318.39
b_5	ganancia de actuador	1273.56
$X_u + X_{u u}$	amortiguamiento	181.45 + 47.49u
$Y_v + Y_{v v}$	amortiguamiento	1219.80
$N_r + N_{r r}$	amortiguamiento	9096.90

Las matrices (4)-(7) conforman el modelo de 3 GDL del vehículo para ser utilizado en el observador de estados. El oleaje provocado por el viento y las corrientes marinas

constituyen las principales fuerzas externas medioambientales que inciden desfavorablemente sobre el control de los vehículos acuáticos [8]. A continuación, se muestran las expresiones matemáticas para representar las perturbaciones de las olas $\boldsymbol{\tau}_{olas}$ y las corrientes $\boldsymbol{\tau}_{corr}$, de acuerdo con (2).

C. Modelo Para Representar el Oleaje

Al incidir el viento sobre la superficie del mar se generan crestas u ondas las cuales matemáticamente pueden ser representadas como una suma infinita de términos sinusoidales aleatorios, cada uno de los mismos con diferente amplitud, frecuencia y fase [18]. En los vehículos que operan en el mar se experimenta una frecuencia de incidencia de las olas la cual presenta variaciones en función de la velocidad de avance del vehículo y la dirección de su movimiento. Este fenómeno recibe el nombre de frecuencia de encuentro, por lo que conocer su valor, resulta imprescindible para el adecuado ajuste de los algoritmos de control y filtrado [3].

En relación con el modelo general del vehículo, el término $\boldsymbol{\tau}_{olas}$ en (2) hace referencia a los componentes oscilatorios provocados por las olas alrededor de la frecuencia de encuentro [2]. Los componentes oscilatorios del oleaje se relacionan directamente con los espectros de oleaje [8], [18]. Sin embargo, dada la complejidad de las representaciones espectrales para el análisis del oleaje y el gran número de parámetros de los que dependen, en los sistemas automáticos para el diseño de controladores y observadores, es conveniente tener una aproximación del espectro de las olas que pueda ser incluida en los lazos de control de manera sencilla. En este trabajo se utiliza la función de transferencia de segundo orden (8), como representación del oleaje [1].

$$h_{olas}(s) = \frac{K_\omega s}{s^2 + 2\zeta\omega_e s + \omega_e^2} w(s), \quad (8)$$

$$\text{donde: } K_\omega = 2\zeta\omega_e\sigma. \quad (9)$$

En (8), h_{olas} representa la modelación del movimiento oscilatorio inducido por las olas sobre cada estado del modelo de 3 GDL del vehículo, ω_e constituye la frecuencia fundamental de incidencia del oleaje, ζ es una razón de amortiguamiento y w es un ruido blanco de entrada. En (9), σ es un parámetro que conjuntamente con el amortiguamiento, ajustan de manera adecuada el modelo de segundo orden (8) al espectro de oleaje deseado. En este caso fue utilizado el Jonswap [8]. El espectro Jonswap es el que más se ajusta a las condiciones de navegación de este vehículo, en mares poco desarrollados con una profundidad limitada. Los valores de los parámetros del oleaje que han sido utilizados y validados para el HRC-AUV como parte de investigaciones previas son $\zeta = 0.1$ y $\sigma = 0.5$ [12], [17], [18]. Representar la incidencia de las olas sobre las variables del plano horizontal, requiere primeramente transformar al dominio del tiempo la aproximación lineal (8) del oleaje y luego extender la expresión resultante para cada componente del movimiento del vehículo en $\boldsymbol{\eta}_3$. Luego de realizar el proceso descrito, se obtiene el sistema de ecuaciones:

$$\dot{\xi}_x = x_{olas},$$

$$\begin{aligned}\dot{\xi}_y &= y_{olas}, \\ \dot{\xi}_\psi &= \psi_{olas}, \\ \dot{x}_{olas} &= -\omega_{ex}^2 \xi_x - 2\varphi\omega_{ex} x_{olas} + K_{\omega x} w_x,\end{aligned}\quad (10)$$

$$\dot{y}_{olas} = -\omega_{ey}^2 \xi_y - 2\varphi\omega_{ey} y_{olas} + K_{\omega y} w_y, \quad (11)$$

$$\dot{\psi}_{olas} = -\omega_{e\psi}^2 \xi_\psi - 2\varphi\omega_{e\psi} \psi_{olas} + K_{\omega\psi} w_\psi. \quad (12)$$

En las expresiones (10), (11) y (12) los subíndices representan la incidencia de las olas sobre las variables del vector $\mathbf{n}_{3-veh} = [x', y', \psi']^T$. En este trabajo los estados del oleaje $\mathbf{n}_{olas} = [x_{olas}, y_{olas}, \psi_{olas}]^T$ son adicionados a las variables de movimiento del vehículo en el plano horizontal aplicando el principio de superposición lineal. Esto resulta posible debido a que el movimiento de baja frecuencia de los vehículos marinos en presencia de oleaje se compone de ambos términos, tal como se ilustra mediante (13).

$$\mathbf{n}_3 = \mathbf{n}_{3-veh} + \mathbf{n}_{olas} = [x', y', \psi']^T + [x_{olas}, y_{olas}, \psi_{olas}]^T. \quad (13)$$

Los estados de las ecuaciones (10), (11) y (12) correspondientes a los 3 GDL del oleaje se representan en forma matricial compacta tal como se muestra en (14) y (15).

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \boldsymbol{\Omega}_1(\omega_e) & \boldsymbol{\Omega}_2(\omega_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3 \\ \boldsymbol{\Sigma} \end{bmatrix} \mathbf{w}, \quad (14)$$

$$\mathbf{n}_{olas} = [\mathbf{O}_3 \quad \mathbf{I}_3] \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{\Lambda} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

donde $\xi \in \mathbb{R}^{6 \times 1} = [\xi_1, \xi_2]^T$, $\xi_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 1} = [\xi_x, \xi_y, \xi_\psi]^T$, $\xi_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 1} = [x_{olas}, y_{olas}, \psi_{olas}]^T$, $\boldsymbol{\Omega}_1(\omega_e) \in \mathbb{R}^{3 \times 3} = -diag[\omega_{ex}^2, \omega_{ey}^2, \omega_{e\psi}^2]$, $\boldsymbol{\Omega}_2(\omega_e) \in \mathbb{R}^{3 \times 3} = -diag[2\varphi\omega_{ex}, 2\varphi\omega_{ey}, 2\varphi\omega_{e\psi}]$, $\boldsymbol{\Sigma} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} = diag[K_{\omega x}, K_{\omega y}, K_{\omega\psi}]$, $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{3 \times 1} = [w_x, w_y, w_\psi]^T$, $\boldsymbol{\Lambda} \in \mathbb{R}^{3 \times 6} = [\mathbf{O}_3 \quad \mathbf{I}_3]$,

y la matriz de transición de los estados del oleaje $\boldsymbol{\Omega} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ es:

$$\boldsymbol{\Omega}(\omega_e) = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \boldsymbol{\Omega}_1(\omega_e) & \boldsymbol{\Omega}_2(\omega_e) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

la cual depende de la frecuencia de encuentro del oleaje ω_e .

D. Modelo Para Representar las Corrientes y Fuerzas de Deriva de las Olas

Teniendo en cuenta únicamente el movimiento del vehículo en el plano horizontal $x-y$, las corrientes marinas se describen solamente en función de las velocidades inducidas por estas, o sea, resultan de interés solamente los componentes u_c y v_c que provocan una velocidad relativa respecto al móvil

[8], [10]. Esta incidencia puede ser mayor o menor en dependencia del ángulo de navegación del vehículo respecto a las corrientes. Dado que esta perturbación provoca un efecto de corrimiento o desplazamiento indeseado del vehículo, alejándolo de la trayectoria deseada, existen publicaciones en las cuales se realiza la estimación de la velocidad de las corrientes para contrarrestar su efecto sobre el control [5], [10]. Sin embargo, en este trabajo se hace uso de un enfoque distinto, considerando el efecto de las corrientes como un corrimiento o deriva en cada variable de estado del modelo de 3 GDL no lineal del HRC-AUV. Esta alternativa ha sido empleada también por otros autores con resultados satisfactorios [1], [7], [9], [14].

En este trabajo para representar las corrientes marinas se utiliza un modelo Gauss-Markov de primer orden, de acuerdo con (17).

$$\dot{\mathbf{b}} = -\mathbf{T}_b \mathbf{b}. \quad (17)$$

En el modelo (17), la matriz $\mathbf{T}_b \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es diagonal y agrupa los términos T_{bx} , T_{by} y $T_{b\psi}$ que permanecen constantes para cada estado del modelo horizontal determinados por el vector \mathbf{v}_3 . Mediante \mathbf{T}_b , se modela en el observador tanto el efecto de las corrientes marinas, como las fuerzas de deriva del oleaje y otros elementos de incertidumbre propios del proceso de modelado semi-empírico y experimental aplicado al HRC-AUV. La representación de (17) en el espacio de estados para las variables x , y y ψ analizadas, queda de la forma (18).

$$\begin{bmatrix} \dot{b}_x \\ \dot{b}_y \\ \dot{b}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_{bx} & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_{by} & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{b\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_\psi \end{bmatrix}. \quad (18)$$

IV. DISEÑO DEL OBSERVADOR DE ESTADOS

Haciendo uso de la dinámica del vehículo determinada por (3)-(7) y agregando las perturbaciones representadas por (14), (15) y (17); queda definido el modelo dinámico de 3 GDL para el movimiento en el plano horizontal del sistema de la forma:

$$\begin{aligned}\dot{\xi} &= \boldsymbol{\Omega}\xi, \\ \dot{\mathbf{n}}_{3-veh} &= \mathbf{R}_3(\psi)\mathbf{v}_3, \\ \dot{\mathbf{b}} &= -\mathbf{T}_b\mathbf{b}, \\ \mathbf{M}_3\dot{\mathbf{v}}_3 &= \boldsymbol{\tau}_3 - \mathbf{D}_3(\mathbf{v}_3)\mathbf{v}_3 - \mathbf{C}_3(\mathbf{v}_3)\mathbf{v}_3 + \mathbf{R}_3^T(\psi)\hat{\mathbf{b}},\end{aligned}\quad (19)$$

y la ecuación que representa las salidas del modelo se define como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{n}_3 = \mathbf{n}_{3-veh} + \mathbf{n}_{olas}. \quad (20)$$

La dinámica del observador es similar a la dinámica del sistema mostrada en (19) y (20), a la cual se le agregan los términos de corrección constituidos por las ganancias del observador que se multiplican por el vector de los errores de estimación para cada variable medida. De esta manera, se

obtiene el sistema de ecuaciones (21) con el cual se define completamente el observador. En todos los casos el sobre índice $\hat{\cdot}$ en las distintas variables denota la señal observada y $\tilde{\cdot}$ la diferencia entre variable real (medición) y observada. Para dotar al observador de las capacidades necesarias de adaptabilidad a las características del mar, específicamente del oleaje, los estados y las ganancias directamente relacionados con el oleaje se han definido en función de la frecuencia estimada de incidencia del oleaje $\hat{\omega}_e$. La estimación de la frecuencia del oleaje se realiza de manera periódica mediante un estimador algebraico-derivativo, el cual se explica en la siguiente sección. Según las ideas planteadas, la dinámica del observador es:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\xi}} &= \Omega(\hat{\omega}_e)\hat{\xi} + \mathbf{K}_1(\hat{\omega}_e)\tilde{\mathbf{y}}, \\ \dot{\hat{\mathbf{n}}}_{3-veh} &= \mathbf{R}_3(\hat{\psi})\hat{\mathbf{v}}_3 + \mathbf{K}_2(\hat{\omega}_e)\tilde{\mathbf{y}}, \\ \dot{\hat{\mathbf{b}}} &= -\mathbf{T}_b\hat{\mathbf{b}} + \mathbf{K}_3\tilde{\mathbf{y}}, \\ \mathbf{M}_3\hat{\mathbf{v}}_3 &= \boldsymbol{\tau}_3 - \mathbf{D}_3(\hat{\mathbf{v}}_3)\hat{\mathbf{v}}_3 - \mathbf{C}_3(\hat{\mathbf{v}}_3)\hat{\mathbf{v}}_3 + \mathbf{R}_3^T(\hat{\psi})\hat{\mathbf{b}} + \mathbf{R}_3^T(\hat{\psi})\mathbf{K}_4\tilde{\mathbf{y}}, \\ \hat{\mathbf{y}} &= \hat{\mathbf{n}}_{3-veh} + \hat{\mathbf{n}}_{olas} = \hat{\mathbf{n}}_{3-veh} + \Lambda\hat{\xi}.\end{aligned}\quad (21)$$

En (21), $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = [x, y, \psi]^T - [\hat{x}, \hat{y}, \hat{\psi}]^T$ representa la expresión para el error de estimación que comprende las tres variables medidas. Seguidamente se muestra la estructura que se utilizó para las matrices de ganancias $\mathbf{K}_i (i = 1, \dots, 4)$ del observador, partiendo del análisis de estabilidad del mismo.

A. Determinación de las Ganancias y Estabilidad del Observador Propuesto

Para una mayor simplicidad en la notación empleada en el análisis de estabilidad, las ecuaciones asociadas con los estados $\hat{\xi}$, $\hat{\mathbf{n}}_{3-veh}$ y las mediciones estimadas $\hat{\mathbf{y}}$ son reescritas en el espacio de estados de manera reducida como:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{n}}}_0 &= \mathbf{A}_0(\hat{\omega}_e)\hat{\mathbf{n}}_0 + \mathbf{B}_0\mathbf{R}_3(\hat{\psi})\hat{\mathbf{v}}_3 + \mathbf{K}(\hat{\omega}_e)\tilde{\mathbf{y}}, \\ \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{C}_0\hat{\mathbf{n}}_0,\end{aligned}\quad (22)$$

donde $\hat{\mathbf{n}}_0 \in \mathbb{R}^{6 \times 1} = [\hat{\xi}, \hat{\mathbf{n}}_{3-veh}]^T$ y:

$$\mathbf{A}_0(\hat{\omega}_e) = \begin{bmatrix} \Omega(\hat{\omega}_e) & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$\mathbf{C}_0 = [\Lambda \quad \mathbf{I}_3], \quad \mathbf{K}(\hat{\omega}_e) = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1(\hat{\omega}_e) \\ \mathbf{K}_2(\hat{\omega}_e) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

En (24), $\Omega(\hat{\omega}_e)$ es la matriz de transición de los estados del oleaje definida en (16), la cual depende de $\hat{\omega}_e$ en el observador. Consecuentemente con esta última notación simplificada, las ecuaciones dinámicas de los errores de estimación $\tilde{\mathbf{n}}_0 = \mathbf{n}_0 - \hat{\mathbf{n}}_0$, $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b} - \hat{\mathbf{b}}$ y $\tilde{\mathbf{v}}_3 = \mathbf{v}_3 - \hat{\mathbf{v}}_3$ se establecen como:

$$\dot{\tilde{\mathbf{n}}}_0 = (\mathbf{A}_0(\hat{\omega}_e) - \mathbf{K}(\hat{\omega}_e)\mathbf{C}_0)\tilde{\mathbf{n}}_0 + \mathbf{B}_0\mathbf{R}_3(\hat{\psi})\tilde{\mathbf{v}}_3, \quad (25)$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{b}}} = -\mathbf{T}_b\tilde{\mathbf{b}} - \mathbf{K}_3\tilde{\mathbf{y}}, \quad (26)$$

$$\mathbf{M}_3\dot{\tilde{\mathbf{v}}}_3 = -\mathbf{D}_3(\hat{\mathbf{v}}_3)\tilde{\mathbf{v}}_3 - \mathbf{C}_3(\hat{\mathbf{v}}_3)\tilde{\mathbf{v}}_3 + \mathbf{R}_3^T(\hat{\psi})\tilde{\mathbf{b}} - \mathbf{R}_3^T(\hat{\psi})\mathbf{K}_4\tilde{\mathbf{y}}. \quad (27)$$

Tomando como base las expresiones (25)-(27) pueden ser determinadas las matrices de ganancia del observador realizando el correspondiente análisis de estabilidad basado en la teoría de Lyapunov [5], [7], [22].

Teorema 1: Teorema de Kalman-Yakubovich-Popov conocido por sus siglas (KYP-Lemma), establece que siendo $\mathbf{Z}(s) = \mathbf{C}(\mathbf{sI} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$ una matriz de $n \times n$ que representa la dinámica del error de estimación, en la cual \mathbf{A} tiene la característica de ser Hurwitz, (\mathbf{A}, \mathbf{B}) es controlable y (\mathbf{A}, \mathbf{C}) observable. Entonces, $\mathbf{Z}(s)$ sería estrictamente positiva real (SPR) si y solo si existen matrices definidas positivas $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T$ y $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T$ tal que se cumpla lo establecido en (30) según [21]:

$$\begin{aligned}\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} &= -\mathbf{Q} \\ \mathbf{B}^T\mathbf{P} &= \mathbf{C}\end{aligned}\quad (29)$$

En este caso particular quedan definidas las matrices:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0(\hat{\omega}_e) - \mathbf{K}(\hat{\omega}_e)\mathbf{C}_0 & \mathbf{O}_3 \\ -\mathbf{K}_3\mathbf{C}_0 & -\mathbf{T}_b \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 \\ \mathbf{C} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_4\mathbf{C}_0 \\ \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}^T. \quad (31)$$

Si se seleccionan las ganancias del observador con la estructura mostrada en (32), entonces se cumple con el Teorema 1 (KYP).

$$\begin{aligned}\mathbf{K}_1(\hat{\omega}_e) &= \begin{bmatrix} k_{11}(\hat{\omega}_e) & 0 & 0 \\ 0 & k_{12}(\hat{\omega}_e) & 0 \\ 0 & 0 & k_{13}(\hat{\omega}_e) \\ k_{14}(\hat{\omega}_e) & 0 & 0 \\ 0 & k_{15}(\hat{\omega}_e) & 0 \\ 0 & 0 & k_{16}(\hat{\omega}_e) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{K}_2(\hat{\omega}_e) &= \begin{bmatrix} k_{21}(\hat{\omega}_e) & 0 & 0 \\ 0 & k_{22}(\hat{\omega}_e) & 0 \\ 0 & 0 & k_{23}(\hat{\omega}_e) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{K}_3 &= \begin{bmatrix} k_{31} & 0 & 0 \\ 0 & k_{32} & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_4 = \begin{bmatrix} k_{41} & 0 & 0 \\ 0 & k_{42} & 0 \\ 0 & 0 & k_{43} \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (32)$$

Nótese que $\mathbf{K}_1(\hat{\omega}_e) \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ y $\mathbf{K}_2(\hat{\omega}_e) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ se definen ambas en función de la frecuencia de incidencia del oleaje estimada $\hat{\omega}_e$. Esta frecuencia debe obtenerse como resultado del estimador de frecuencia que se presenta en la siguiente sección, mientras que $\mathbf{K}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ y $\mathbf{K}_4 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ son independientes de la misma. La estructura diagonal planteada para las matrices de ganancias, establece un desacople entre los términos de los errores de estimación. Finalmente, para determinar los parámetros de las matrices definidas en (32), se realiza una equivalencia entre los términos del modelo del oleaje (9) para cada GDL, con la función de transferencia de un filtro supresor de bandas (*notch*). De esta forma se logra el efecto de atenuación de los componentes de frecuencia en la banda cercana a la frecuencia de incidencia del oleaje, quedando los parámetros de las matrices definidos en las expresiones (33)-(36). Variantes de filtros *notch* utilizados en vehículos marinos se discuten en [8].

$$k_{1i(i=1,2,3)} = -2\varphi(\hat{\omega}_e), \quad k_{1i(i=4,5,6)} = 2\varphi(\hat{\omega}_e), \quad (33)$$

$$k_{2i(i=1,2,3)} = 2(\hat{\omega}_e), \quad (34)$$

$$0 < k_{3i(i=1,2,3)} \leq 1, \quad (35)$$

$$k_{4i(i=1,2,3)} \leq k_{3i}/T_{bx}. \quad (36)$$

El parámetro φ fue definido en la sección III-C (modelo de las olas), al igual que los componentes de T_b en el modelo Gauss-Markov para las corrientes y fuerzas de deriva del oleaje. Las correspondientes matrices de ganancias relacionan ambos parámetros con las ecuaciones (27)-(29), representativas de los errores de estimación. De esta manera se satisfacen las condiciones del teorema *KYP* establecido en (30), y por consiguiente los requisitos para que el sistema sea *SPR*. Similares análisis de estabilidad tomando como base la teoría de Lyapunov se muestran en trabajos como [7], [11], [22] para distintas aplicaciones de control.

V. ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DE ENCUENTRO DEL OLEAJE

Como se aprecia en el conjunto de ecuaciones (25), (32), (33) y (34), las matrices $\Omega(\hat{\omega}_e)$, $K_1(\hat{\omega}_e)$ y $K_2(\hat{\omega}_e)$ tienen relación directa con los estados afectados por el oleaje pues las mismas se encuentran en función de la frecuencia $\hat{\omega}_e$. Por lo tanto, resulta necesario poder contar con una estimación de este importante parámetro de manera regular. Para estimar la frecuencia y sintonizar adecuadamente el observador no lineal, se implementa un método de estimación puramente algebraico, dadas las ventajas de este tipo de técnica, en especial en cuanto a la rapidez de la estimación [19], [20].

Para el desarrollo del estimador algebraico de frecuencia se parte de llevar al dominio temporal la función transferencial (10) que representa la aproximación de 2do orden para el oleaje, obteniéndose:

$$\ddot{\xi}(t) + 2\varphi\omega_e\dot{\xi}(t) + \omega_e^2\xi(t) = K_\omega w(t). \quad (37)$$

Al aplicar la metodología de identificación algebraica clásica discutida en [19] a este problema real de identificación de frecuencia del oleaje, se obtiene una expresión para $\hat{\omega}_e$ dada por (38).

$$\hat{\omega}_e(t) = \sqrt{\frac{[K_\omega U(t) - A(t)] \int B(t) dt - B(t) [K_\omega \int U(t) dt - \int A(t) dt]}{C(t) \int B(t) dt - B(t) \int C(t) dt}}, \quad (38)$$

donde:

$$\begin{aligned} A(t) &= 6 \int^{(3)} \xi(t) dt - 18 \int^{(2)} t \xi(t) dt + 9 \int t^2 \xi(t) dt - t^3 \xi(t), \\ B(t) &= -6 \int^{(3)} t \xi(t) dt + 6 \int^{(2)} t^2 \xi(t) dt - \int t^3 \xi(t) dt, \\ C(t) &= 3 \int^{(3)} t^2 \xi(t) dt - \int^{(2)} t^3 \xi(t) dt, \\ U(t) &= -6 \int^{(3)} t w(t) dt + 6 \int^{(2)} t^2 w(t) dt - \int t^3 w(t) dt. \end{aligned} \quad (39)$$

Nótese el empleo en (39) de la notación matemática $\int^{(n)} f(t) dt$ de manera simplificada para hacer referencia a $\int_0^t \int_0^{\beta_1} \int_0^{\beta_2} \dots \int_0^{\beta_{n-1}} f(\beta_n) d\beta_n \dots d\beta_2 d\beta_1$, realizando el correspondiente cambio de variable como determinación de las integrales múltiples en función del tiempo que brindan la solución de (38).

La aplicación de este tipo de estimador al problema real abordado, resulta un aporte de este trabajo pues no se han encontrado reportes de la utilización de esta técnica en aplicaciones como la de esta investigación. Con la estimación algebraica de la frecuencia de las olas, haciendo uso de la expresión (38), se obtienen resultados excelentes en cuanto a la calidad de la estimación y el tiempo de convergencia, tal como se puede apreciar en la Fig. 2. En la misma se muestra el valor de frecuencia estimado para cambios tipo paso provocados en la entrada con valores $\omega_e=0.49, 1.26, 1.9$ y 3.14 rad/s, respectivamente. Estos representan valores típicos de frecuencia relacionados con los estados del mar de la Tabla III que se presenta en la sección de resultados. Estos valores estimados representan el rango de operación para el HRC-AUV según su diseño mecánico y estructural.

TABLA III
ERRORES EN LA ESTIMACIÓN DE ω_e (RAD/S) PARA VALORES EN EL RANGO DE OPERACIÓN DEL VEHÍCULO

Valor real	Valor estimado	Error
0.49	0.476	2.8 %
1.26	1.242	1.4 %
1.90	1.94	2.1%
3.14	3.21	2.2%

En la Fig. 2 se observan tiempos de convergencia muy pequeños, pues el estimador algebraico propuesto realiza estimaciones de manera casi instantáneas. Por otra parte se produce un aumento del sobre-impulso en la estimación al incrementarse el valor real de $\hat{\omega}_e$, pero que rápidamente converge al valor final. En la Tabla III se muestran los errores cometidos en las estimaciones mostradas en la Fig. 2. Se observa exactitud en la estimación hacia el valor real de referencia. Esta estimación de frecuencia actúa como entrada al observador no lineal mostrado en la sección anterior como se puede apreciar en el esquema de simulación de la Fig. 3.

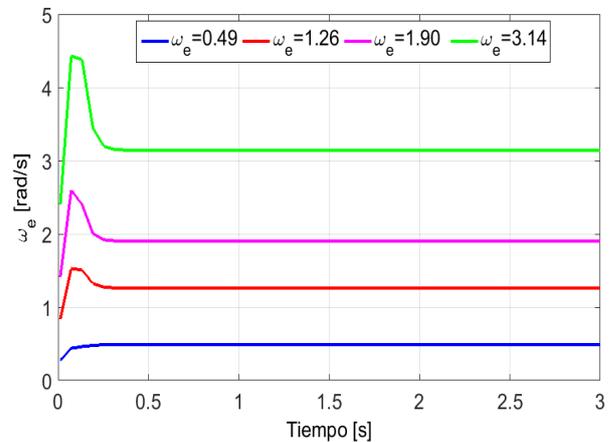


Fig. 2. Estimación algebraica de la frecuencia de impacto de las olas para valores comprendidos entre mar fuerza 1 y 3.

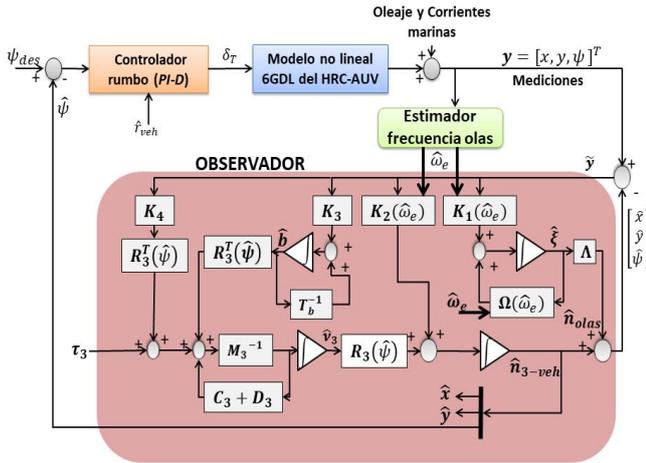


Fig. 3. Esquema para las simulaciones del observador no lineal insertado en el lazo de control de dirección.

A. Condiciones de Operación Para el Estimador de Frecuencia Propuesto y Actualización de las Ganancias del Observador

Como se menciona anteriormente, el vehículo naval para el cual se desarrolla este sistema de navegación, ha sido diseñado estructuralmente para operar normalmente en zonas poco profundas ($< 10\text{m}$) y en mares poco desarrollados. Estos límites de funcionamiento resultan suficientes para acometer las tareas de inspección y estudios del fondo marino en zonas costeras, para lo cual ha sido concebido. En cuanto a las características del mar, se garantiza un adecuado desempeño del sistema de control entre las categorías 1 y 3 del oleaje, esta última solo en sus límites inferiores, de acuerdo con la escala de clasificación de las mareas definida en [8] y reproducida en la Tabla IV. Dado que el HRC-AUV posee una velocidad lineal de avance máxima $u = 1.9\text{ m/s}$, la frecuencia de encuentro para la cual debe operar teóricamente este estimador se encuentra en el rango: $0.38\text{ rad/s} \leq \omega_e \leq 13.90\text{ rad/s}$.

TABLA IV

ESTADOS DEL MAR DEFINIDOS PARA LA OPERACIÓN DEL HRC-AUV

Estado	Altura de las olas (m)	T_{olas} (s)	ω_n (RAD/S)
0-1	0 – 0.1	1 – 4	1.57 – 6.28
2-Suavizado	0.1 – 0.5	3.3 – 12.8	0.49 – 1.9
3-Ligero	0.5 – 1.25	5.0 – 14.8	0.42 – 1.256

Adicionalmente, se hace necesario definir otras condiciones de operación y ejecución del estimador algebraico de frecuencia debido a las propias desventajas que posee esta técnica [19], [20]. Si bien el estimador dado por la expresión (38) realiza la identificación de la frecuencia de manera casi inmediata con tiempos de convergencia muy bajos, en el instante inicial $t = 0$ dicho valor resulta arbitrario pues ocurre una indeterminación del tipo “0/0”. Este tipo de estimadores no se diseñan bajo el principio de operación ininterrumpida. Esto se debe a que al pasar el tiempo su salida se puede degradar debido a las integrales múltiples que conforman la solución del parámetro desconocido [19], como se aprecia en este caso en (38) y (39).

Por las mencionadas razones, en las simulaciones mostradas en la siguiente sección con el modelo general no lineal del

HRC-AUV, se toman como entrada al estimador de frecuencia las variables de movimiento x, y contaminadas con el oleaje. Con cada una de las mismas se realiza una estimación de frecuencia y la salida constituye el promedio de ambas, se chequea el rango para detectar si la estimación es adecuada y se actualizan entonces las matrices $K_1(\hat{\omega}_e)$, $K_2(\hat{\omega}_e)$ y $\Omega(\hat{\omega}_e)$ del observador. La idea general de esta estrategia se ilustra en la Fig. 3. Se considera la convergencia del estimador si el valor de frecuencia no varía en más de un 5% por intervalo de tiempo de 2 segundos. Este proceso de actualización de $\hat{\omega}_e$ y las matrices del observador que dependen de la misma se realiza de manera independiente, o sea, no se detiene en ningún momento la operación del observador, solo se realizan los nuevos cálculos de las matrices cuando se dispone de una nueva estimación de frecuencia válida. Una vez obtenida la estimación de frecuencia se mantiene este valor hasta tanto no se ejecute nuevamente el estimador, momento en el que se resetean los integradores y comienza su operación como un estado inicial.

Los estados del mar son procesos que se consideran estacionarios para períodos de tiempo menores a 20 minutos y algunos autores coinciden que hasta 30 minutos en condiciones normales [2], [8], [9], [18]. Es por ello que poder contar con una actualización de la frecuencia de impacto del oleaje cada cierto tiempo resulte conveniente en lugar de actualizar constantemente las matrices del observador, reduciéndose de esta manera la carga computacional del algoritmo propuesto.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El propósito principal del observador o estimador de estados es reconstruir los componentes de baja frecuencia propios del movimiento del vehículo, partiendo de una medición ruidosa. Esto es crucial en los sistemas de control de los VAS debido al movimiento oscilatorio de 1er orden inducido por las olas [2], [4]. Estas oscilaciones, al entrar en los lazos de control causan desgaste y en algunos casos la ruptura de los actuadores; además de aumentar considerablemente el consumo de energía. Por lo tanto, el filtrado de las olas se debe realizar antes de la utilización de las señales en el sistema de control, entrando al mismo solamente señales suavizadas que contienen la parte que realmente se desea controlar del movimiento.

En esta sección se muestran un conjunto de resultados relacionados con la inserción del observador como elemento adicional en el lazo de control de dirección del vehículo, con el objetivo de demostrar la factibilidad del sistema en lazo cerrado.

A. Pruebas de Simulación con Control de Dirección

En las siguientes simulaciones se hace uso del modelo general de 6 GDL para la simulación del HRC-AUV, descrito en la sección III-A mediante (1) y (2). El modelo general se utiliza como referencia para validar las estimaciones del observador. Por el contrario, en el observador se usan las matrices de 3 GDL dadas por (3)-(7).

Los elementos que se tuvieron en cuenta para las simulaciones son:

- Fueron incluidas las fuerzas centrípetas y de Coriolis tanto en el modelo de simulación de 6 GDL como en el observador de estados.
- Fue utilizado un controlador *PI-D* con ganancias: $K_p=3$; $K_d=1$ y $K_i=0,2$ para controlar el rumbo ψ del vehículo.
- El vehículo HRC-AUV fue sometido solamente a variaciones en el timón de dirección, el motor en su valor máximo de 500 revoluciones por minuto, manteniendo la navegación en superficie y con los siguientes valores deseados de rumbo:

$$\begin{aligned} \psi_{des1} &= 30^\circ, & \text{en } t &= 0, \\ \psi_{des2} &= 0^\circ, & \text{en } t &= 120 \text{ s}, \\ \psi_{des3} &= -60^\circ, & \text{en } t &= 200 \text{ s}, \\ \psi_{des4} &= -150^\circ, & \text{en } t &= 250 \text{ s}, \end{aligned}$$

- En el modelo de 6 GDL fueron establecidas las corrientes marinas en el plano horizontal con una velocidad de 0.2 m/s y un ángulo de incidencia de 30° . La frecuencia de encuentro del oleaje $\omega_e = 5 \text{ rad/s}$ para $t < 150 \text{ s}$ y $\omega_e = 1.2 \text{ rad/s}$ para $t \geq 150 \text{ s}$. Adicionalmente, en el modelo de las olas $\varphi = 0.1$ y $\sigma = 0.5$.
- En el observador, $T_b = -diag[100,100,100]$ y los valores para las matrices de ganancia fueron establecidos como:

$$\begin{aligned} K_1(\hat{\omega}_e) &= 2 \begin{bmatrix} -\varphi I_3 \\ \varphi I_3 \end{bmatrix} \hat{\omega}_e, & K_2(\hat{\omega}_e) &= 2 \begin{bmatrix} I_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \hat{\omega}_e, \\ K_3 &= I_3, & K_4 &= diag[0.01,0.01,0.01]. \end{aligned}$$

De esta manera se cumple con lo discutido en la sección IV-A para asegurar la estabilidad del observador, de acuerdo con la teoría de Lyapunov. El esquema general de simulación en este caso, compuesto por el observador propuesto, el estimador de frecuencia y el controlador de dirección del HRC-AUV se muestra de manera detallada en la Fig. 3.

Como parte de las simulaciones para demostrar la validez del diseño propuesto, en la Fig. 4 se muestra la trayectoria del vehículo según el modelo general no lineal (referencia) y la estimada por el observador. El modelo para la simulación en los 6 GDL del HRC-AUV, ha sido utilizado para validar distintas estrategias de control, guiado y navegación con excelentes resultados [12], [16], [17].

Se puede observar como en la mitad del trayecto, cuando se ha simulado un cambio en el estado del mar, las oscilaciones inducidas por el oleaje comienzan a ser mayores al aumentar la amplitud de las olas y disminuyendo la frecuencia de las mismas. A pesar de ello, el observador es capaz de mantener su desempeño al contar con la estimación de frecuencia, lo que da como resultado una adaptación a estos cambios, con la consecuente actualización de sus ganancias.

Por otra parte, en la Fig. 5 se exhibe la salida de rumbo del

modelo, tomada como medición y la correspondiente estimación del observador.

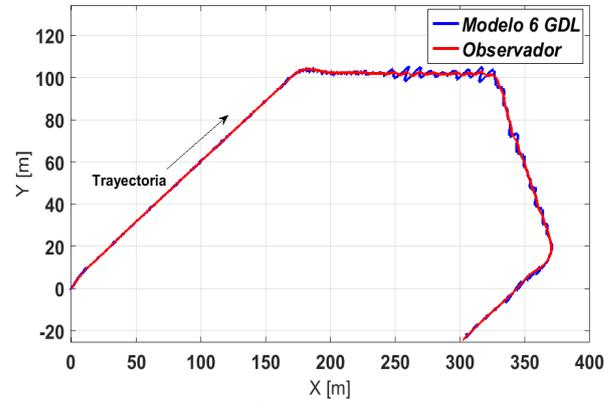


Fig. 4. Trayectoria real y estimada en presencia de oleaje y corrientes.

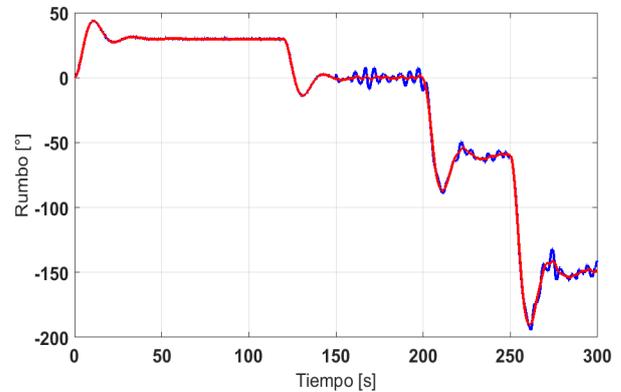


Fig. 5. Referencia de rumbo del modelo contaminado con el oleaje y la correspondiente estimación del observador.

Las dos gráficas anteriores, Fig. 4 y Fig. 5 muestran por separado las estimaciones de cada uno de los componentes del vector de posición \mathbf{n} . Adicionalmente, en la Fig. 6, se muestra el comportamiento de cada componente del vector de velocidad del cuerpo \mathbf{v} . En la Fig. 6 se observa una estimación adecuada de los componentes de velocidad del cuerpo, a pesar de la presencia de las corrientes en el modelo de simulación de 6 GDL del cual se obtienen las mediciones simuladas.

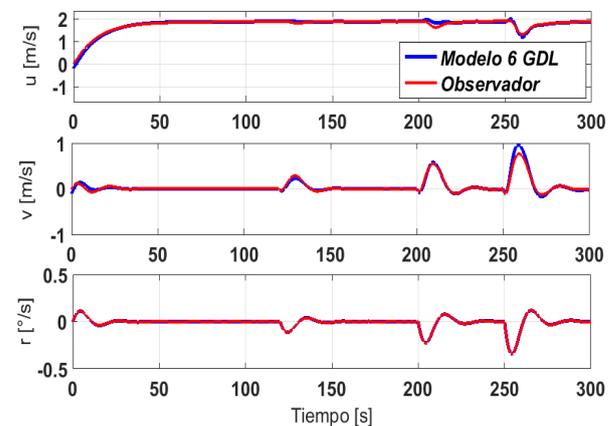


Fig. 6. Velocidades del vehículo u, v, r y las correspondientes estimaciones del observador.

El comportamiento del estimador algebraico para la identificación de la frecuencia de incidencia de las olas se ilustra en la Fig. 7. En la misma se aprecia que se lleva a cabo una ejecución del estimador al comienzo del recorrido, para ello se ejecuta el observador paralelamente con un valor inicial $\hat{\omega}_{e,ini} = 1.5 \text{ rad/s}$ para que no se afecte su funcionamiento en el instante inicial $t=0$.

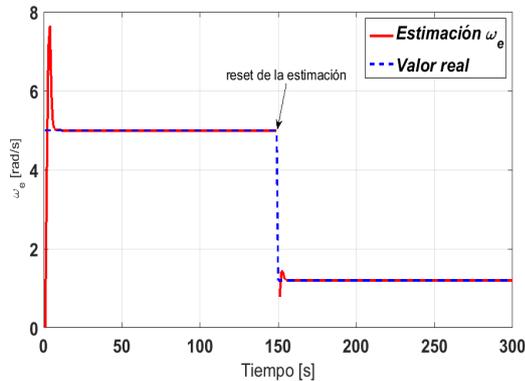


Fig. 7. Salida del estimador algebraico para la frecuencia de incidencia de las olas en dos corridas independientes.

Una vez que converge la estimación de frecuencia, se detiene el estimador algebraico y se mantiene dicho valor hasta que se realiza de manera intencionada otra corrida del estimador en $t=150 \text{ s}$. Ambas estimaciones se realizan de manera precisa y con un tiempo de convergencia menor de 3 segundos. Esta rapidez en la estimación de la frecuencia constituye la principal ventaja para la utilización del algoritmo propuesto.

La Fig. 8 muestra el comportamiento de la señal de mando al timón de dirección del vehículo. Se aprecian considerables oscilaciones dada la frecuencia ω_e cuando no se emplea el observador en el lazo de control (respuesta en color azul), las cuales aumentan en amplitud y se vuelven más bruscas al cambiar el valor de frecuencia en el instante $t = 150 \text{ s}$. Estas oscilaciones son atenuadas al compensar el oleaje directamente sobre las mediciones y realimentar entonces la señal resultante suavizada hacia el controlador de dirección *PI-D*, como parte de la propuesta de control para el HRC-AUV en superficie o en un plano paralelo a la superficie.

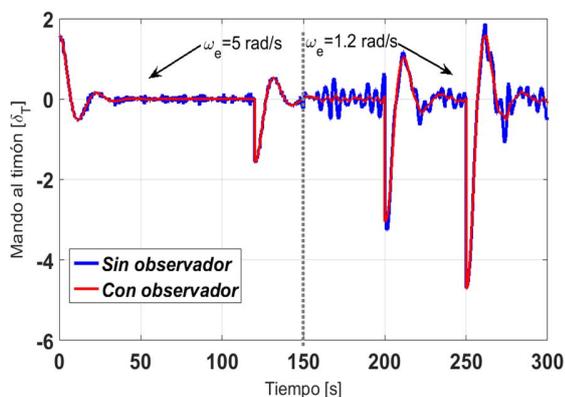


Fig. 8. Diferencias en la señal de mando al timón al utilizar la propuesta de compensación de oleaje mediante observador con ganancia ajustable.

Finalmente, en la Tabla V se muestran los valores estadísticos de las señales mostradas en la Fig. 8, tomando para el cálculo estadístico los tramos de estabilidad, sin considerar los estados transitorios o giros.

TABLA V
VALORES ESTADÍSTICOS DE LA SEÑAL DE MANDO EN LAZO CERRADO

	Controlando sin observador	Controlando con observador
Media (rad)	$0.91 \cdot 10^{-2}$	$0.34 \cdot 10^{-2}$
Desviación estándar (rad)	0.0950	0.0151

Tales valores corroboran lo acertado del diseño propuesto, como mecanismo de filtrado adaptable y posicionamiento para el HRC-AUV, el cual puede ser extrapolado a otros vehículos similares. Mediante la información estadística en la Tabla V, se constata una reducción considerable en la desviación de la señal de mando al timón mediante el empleo del observador. De esta manera, se reducen también el consumo de energía y el desgaste sistemático en el sistema de actuadores y timones del vehículo.

Estos constituyen elementos de suma importancia para todo tipo de medios autónomos. En adición a las ideas anteriores, mediante la propuesta se logra una mayor exactitud en el posicionamiento dinámico del vehículo en presencia de perturbaciones de oleaje y corrientes marinas.

VII. CONCLUSIONES

En el trabajo se propone una alternativa de Sistema de Navegación con compensación de perturbaciones ambientales para un Vehículo Autónomo Sumergible. Se toma como base un observador no lineal, debido a la compleja dinámica de estos sistemas.

El diseño del observador realizado para el HRC-AUV ha sido evaluado mediante simulación, exhibiendo un desempeño muy satisfactorio ante cambios en las condiciones del oleaje. Las capacidades de adaptabilidad del observador se logran con la estimación en línea de la frecuencia del oleaje mediante un estimador algebraico, lo que permite el ajuste de las ganancias del observador. El procedimiento mostrado para la selección de las ganancias del observador asegura la estabilidad y convergencia del sistema. La estrategia planteada para atenuar los componentes del oleaje directamente sobre las mediciones y obtener la señal de control resulta eficiente, observándose una reducción considerable en la señal que gobierna el timón. Con el algoritmo propuesto, unido a una mejora en la precisión del posicionamiento del vehículo, se logra una reducción del consumo de energía y el desgaste de las partes mecánicas involucradas en el control. Como trabajo futuro se pretende la aplicación de esta propuesta también para el movimiento en el plano vertical del vehículo, controlando las variables de profundidad y cabeceo del mismo.

REFERENCIAS

- [1] Z. Liu, "Sensor Fusion and Observer Design for Dynamic Positioning", Tesis de Maestría, Delft University of Technology, 2015.
- [2] T. I. Fossen and T. Pérez, "Kalman Filtering for Positioning and Heading Control of Ships and Offshore Rigs", IEEE Control Systems Magazine, vol. 29, no. 15, pp. 33–46, 2009.

- [3] D. Belleter, R. Galeazzi R and T. I. Fossen, "Experimental verification of a global exponential stable nonlinear wave encounter frequency estimator", *Ocean engineering*, vol. 97, no. 2, pp. 48-56, 2015.
- [4] T. H. Bryne, T. I. Fossen and T.A. Johansen, "Design of inertial navigation systems for marine craft with adaptive wave filtering aided by triple-redundant sensor packages", *International journal of adaptive control and signal processing*, vol. 31, no. 4, pp. 443-444, 2017.
- [5] H. Ye, M. Chen and Q. Zeng, "Horizontal Motion Tracking Control for an Underwater Vehicle with Environmental Disturbances", En: *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*, Julio 26-28, 2017, Dalian, China.
- [6] I. Popov, P. Koschorrek, A. Haghani and T. Jeansch, "Adaptive Kalman Filtering for Dynamic Positioning of Marine Vessels", *IFAC Papers On Line*, vol. 50, no. 1, pp. 1121-1126, 2017.
- [7] Z. Liu, "Ship Adaptive Course Keeping Control with Nonlinear Disturbance Observer", *Special section on advanced modeling and control of complex mechatronic systems with nonlinearity and uncertainty*, vol. 5, no. 1, pp. 17567-17575, 2017.
- [8] T.I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, Nueva York, 2011.
- [9] V. Hassani, A. J. Sørensen and A. M. Pascoal, "A Novel Methodology for Robust Dynamic Positioning of Marine Vessels: Theory and Experiments", *American Control Conference*, Junio 17-19, 2013, Washington DC, USA.
- [10] A. Martínez, L. Hernández, H. Sahli, Y. Valeriano, M. Orozco and D. García, "Model-aided navigation with sea current estimation for an autonomous underwater vehicle", *International journal of advanced robotics systems*, vol. 12, pp. 103-109, 2015.
- [11] T. I. Fossen, J. P. Strand, "Passive nonlinear observer design for ships using Lyapunov methods: Full-Scale experiments with a supply vessel". Elsevier Science Ltd., vol. 35, pp. 14, 1999.
- [12] D. G. Garcia, et al., "Wave filtering for heading control of an AUV based on passive observer", *Indian Journal of Geo-Marine Sciences (IJGMS)*, vol. 41, no. 6, pp. 540-549, 2012.
- [13] D. Fang, W. Long and J. Dong, "Adaptive Observer Based Backstepping Controller Design for Dynamic Ship Positioning", *China Ocean Engineering*, vol. 31, no. 5, pp. 639-645, 2017.
- [14] Z. Peng, N. Gu, L. Liu, B. Zhang and D. Wang, "Extended State Observer Design for Autonomous Surface Vehicles Using Position-Yaw Measurements", *4th International Conference on Information, Cybernetics and Computational Social Systems*, 2017.
- [15] D. García, Y. Valeriano, J. A. Portal and L. Hernández, "Sistema de navegación basado en modelo dinámico no lineal de vehículo autónomo sumergible", *Revista ingeniería electrónica, automática y comunicaciones RIELAC*, vol. 36, no. 2, 2015.
- [16] Y. Valeriano, A. Fernández, L. Hernández and P. J. Prieto, "Yaw Controller in Sliding Mode for Underwater Autonomous Vehicle", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 3, pp. 1213-1220, 2016.
- [17] Y. Valeriano, A. Martínez, L. Hernández, H. Sahli, Y. Rodríguez and J.R. Cañizares, "Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data", *Math. Comput. Model. Dyn. Syst. Methods Tools Appl. Eng. Relat. Sci.*, vol. 19, no. 2, pp. 175-200, 2013.
- [18] M. K. Ochi, *Ocean Waves: The Stochastic Approach*, 1ra Edición, Cambridge University Press, Reino Unido, 2005.
- [19] H. Sira, C. G. Rodríguez, J. C. Romero and A. L. Juárez, *Algebraic identification and estimation methods in feedback control systems*, 1ra Edición, John Wiley & Sons, Chennai, India, 2014.
- [20] M. Feliú and A. S. Millan, "A fast online estimator of the two main vibration modes of flexible structures from biased and noisy measurements", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 1, pp. 93-104, 2015.
- [21] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3ra Edición. Prentice Hall Inc. ISBN-13: 978-0130673893, New Jersey, Estados Unidos, 2002.
- [22] F. R. López, C. M. Astorga, G. Valencia, C. Ríos, C. Galicia and E. Escobar, "Observer-based LPV stabilization system for a riderless bicycle", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 4, pp. 1076-1083, 2018.



Delvis Garcia Garcia, graduado de Ingeniería en Automática en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Villa Clara, Cuba en el 2010. Graduado de Máster en Automática en el año 2014. Actualmente es profesor Auxiliar del Departamento de Automática de la UCLV. Miembro del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la UCLV. Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba en el año 2015 por sus investigaciones relacionadas con el control y compensación de perturbaciones en vehículos autónomos. Ha participado en varias estancias de trabajo con vehículos autónomos, específicamente en la universidad KULeuven, Bélgica. dggarcia@uclv.edu.cu.



Jorge Peña Martín graduado de Ingeniería en Automática en la UCLV, Santa Clara, Villa Clara, Cuba en el 2016. Actualmente cursa la maestría en Automática, se desempeña además como profesor del Departamento de Automática de la UCLV e investigador del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) desde el propio 2015. jopena@uclv.edu.cu.



Yunier Valeriano Medina graduado de Ingeniería en Automática en la UCLV, Santa Clara, Villa Clara, Cuba en el 2009. Graduado de Máster en Automática en el año 2014. Es profesor Auxiliar y Jefe del Departamento de Automática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Miembro del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la UCLV desde el 2009. Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba en el año 2015 por sus investigaciones relacionadas con vehículos marinos. Merecedor de una estancia doctoral en la Universidad de Sao Paulo, Brasil, específicamente en el Laboratorio de Vehículos no Tripulados. yunierv@uclv.edu.cu.



Luis Hernández Santana graduado de Ingeniería en Automática en la UCLV, Santa Clara, Villa Clara, Cuba en el año 1981. Graduado de Doctor en Automática en el año 1994. Profesor Titular del Departamento de Automática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Líder científico y fundador del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la UCLV. Ha recibido importantes premios y reconocimientos tanto a nivel nacional como internacional, relacionados con su labor científica. Premio nacional de la Academia de Ciencias de Cuba. Ha dirigido importantes investigaciones en las universidades VUB y KULeuven en Bélgica. luishs@uclv.edu.cu.