

# Estimación en línea del efecto del oleaje para el control de un vehículo marino

*Delvis Garcia-Garcia, Jorge Peña-Martín, Luis Hernández Santana, Rubén Orozco-Morales*

## RESUMEN / ABSTRACT

El oleaje generado por el viento es un fenómeno totalmente aleatorio y constituye una de las principales perturbaciones que afectan el funcionamiento de los Vehículos Autónomos Subacuáticos (VAS) que operan a poca profundidad y en zonas costeras. Con el objetivo de atenuar el efecto indeseable de esta perturbación sobre el sistema de control de los VAS se filtran las mediciones obtenidas de los sensores haciendo uso de la frecuencia de incidencia del oleaje. Desarrollar un estimador capaz de brindar el valor de la frecuencia de incidencia del oleaje en tiempo real; mediante el método de Identificación Algebraica, constituye la finalidad de este trabajo. En el diseño del estimador algebraico propuesto se emplea una ecuación diferencial lineal para representar el espectro de las olas, lo cual simplifica el procedimiento matemático. Las simulaciones llevadas a cabo; tanto con datos simulados como con datos de un experimento real en el mar, muestran los excelentes resultados del estimador en cuanto a la exactitud en el valor final estimado y el tiempo de la estimación. Adicionalmente, se muestra el empleo de la estimación de la frecuencia de incidencia del oleaje para ajustar adecuadamente las técnicas de filtrado implementadas previamente para el vehículo, lo que trae consigo una reducción considerable de las vibraciones y del consumo de energía del sistema de timones del vehículo.

Palabras claves: Identificación Algebraica; estimación; frecuencia; oleaje marino; observador.

*Wind generated waves are a very random phenomenon and it is one of the main environmental disturbances that affect the operation of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) navigating in shallow waters and coastal zones. In order to attenuate the undesirable effect of the ocean waves on the control system of AUVs, the measurements from the sensors need to be filtered out, using the estimated wave encounter frequency. Developing an estimator capable of providing the encounter frequency in real time using the Algebraic Identification method, is fully reported in this paper. In the design of the proposed algebraic estimator, a linear differential equation to represent the waves spectrum is used, which simplifies the mathematical procedure. The simulations carried out with simulated data and with real data from an experiment at sea, show the excellent results of the estimator in terms of precision in the final value and estimation time. In addition, its show the use of the wave encounter frequency estimation to adjust the filtering techniques previously implemented for the vehicle in a proper way, which results in a reduction of vibrations and energy consumption of the vehicle's rudder system.*

*Keywords: Algebraic Identification, estimation, frequency, ocean waves, observer.*

*Wave's effect on-line estimation for controlling a marine vehicle.*

## 1. -INTRODUCCIÓN

El oleaje generado por el viento constituye una de las perturbaciones medioambientales que afecta de manera directa el desempeño del control automático para vehículos que operan en la superficie del mar o a poca profundidad [1,2]. EL impacto de las olas en los vehículos navales produce oscilaciones mecánicas considerables que son recogidas por el sistema sensorial instalado [3]. Por lo tanto, uno de los aspectos esenciales a tener en cuenta cuando se diseña el Sistema de Control de Movimiento (SCM) para este tipo de aplicaciones, es la compensación del efecto del oleaje [4,5]. Ello tiene como objetivo atenuar el comportamiento oscilatorio del sistema de actuadores del vehículo que provoca: desgaste mecánico, gasto adicional de energía y riesgos en el comportamiento dinámico del SCM [6]. Para cumplir este propósito, los modernos SCM incluyen

observadores; los cuales estiman las variables de posición y velocidad del vehículo y en algunas ocasiones también se componen de estimadores para determinar las características del oleaje provocado por los estados del mar [1]. Es posible encontrar sistemas diseñados a partir de la teoría de pasividad de Lyapunov y los basados en las ecuaciones de Kalman; destacándose por su importancia las publicaciones [4-12]. En la mayoría de los trabajos citados anteriormente se consideran las características del oleaje como invariantes en el tiempo, lo cual se cumple solo bajo determinadas condiciones. En [4] y [8] se estima en línea la frecuencia de incidencia de las olas mediante observadores no lineales, partiendo de las mediciones de los sensores inerciales instalados en el vehículo naval; con lo cual se reajustan los algoritmos de filtrado ante cambios en las condiciones ambientales durante la navegación.

Para estimar el comportamiento del oleaje han sido empleados también los métodos espectrales clásicos. En [2], [12] y [13] se utilizan los espectros de Welch, Wigner, Burg y de Yule-Walker respectivamente, técnicas por lo general no implementadas para su uso en línea, principalmente en aplicaciones con limitada capacidad de procesamiento y almacenamiento temporal de datos. Existen también otras dificultades de los métodos espectrales relacionadas con los cambios en el periodo de muestreo de la señal, el tamaño y el tipo de ventana empleados.

En Cuba, el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, investiga en un prototipo de VAS llamado HRC-AUV [3]. Hasta el momento, los filtros, observadores de estado y controladores desarrollados e implementados en el HRC-AUV, han sido diseñados bajo la consideración de los estados del oleaje invariantes en el tiempo [14-17]. Si se tiene en cuenta que las condiciones del mar donde navega el HRC-AUV pueden variar significativamente de un lugar a otro o en intervalos regulares de tiempo, esto provocaría una modificación en el valor de la frecuencia de las olas y por consiguiente una degradación en el desempeño de cada uno de los lazos de control del vehículo. Para llevar a cabo una adecuada compensación de esta perturbación, se necesita un conocimiento de manera regular de la frecuencia del oleaje; y de esta manera reajustar los algoritmos de filtrado para reducir sus efectos sobre el control. Atendiendo a los costos de implementación, las soluciones reportadas en la literatura de estimación en línea del oleaje [5], [8], [12] y [13] son muy poco atractivas para el proyecto HRC-AUV, dado su arquitectura de hardware.

Como una alternativa con un adecuado balance entre costo de implementación y prestaciones aparece la Identificación Algebraica [18-23]. Esta novedosa técnica de identificación se ha venido aplicando en el campo de la mecatrónica y el control, demostrando ser muy efectiva en cuanto a la calidad de la estimación y el tiempo de convergencia hacia el valor real. Este procedimiento, a diferencia de otros métodos de estimación frecuencial para sistemas dinámicos no necesita de una función para minimizar el error ya que hace uso del álgebra diferencial y el cálculo operacional para obtener en línea los parámetros que conforman las ecuaciones diferenciales que representan el sistema [24-29].

Específicamente la estimación de la amplitud, la fase y la frecuencia de señales de tipo sinusoidales ha sido ampliamente tratado desde el punto de vista algebraico. Por los importantes resultados alcanzados se destaca el trabajo [24] en el cual se muestra el desarrollo de un estimador algebraico para estimar en línea de manera rápida y confiable los parámetros de una onda sinusoidal en presencia de ruido. En [24] se obtiene una formulación exacta de los parámetros desconocidos una vez transformadas las expresiones al dominio temporal, partiendo de las expresiones en el dominio de la frecuencia. La propuesta citada anteriormente, combina la implementación de la metodología de estimación algebraica derivativa mediante expresiones lineales en la forma canónica de filtros Brunovsky, con filtrado paso bajo IIR de tipo Butterworth. Por lo que el estimador propuesto resulta ser robusto al ruido de alta frecuencia presente en la señal de entrada. Sin embargo, debido a la presencia de los filtros de Brunovsky, el algoritmo presenta inestabilidades, razón por la cual se hace necesario la desconexión de los mismos y el reinicio luego de cierto tiempo para obtener una nueva estimación.

En [25] los autores hacen uso del método algebraico derivativo, pero con sustanciales modificaciones al emplear varias ecuaciones adicionales, siendo el problema de estimación equivalente a encontrar una familia de soluciones basadas en las expresiones originales, y al final determinar la que posee una menor varianza. En el mismo se obtienen resultados satisfactorios estimando de manera simultánea los parámetros desconocidos de la señal de entrada sinusoidal contaminada con ruido de alta frecuencia, sin embargo, la complejidad de implementación es mayor en comparación con la metodología original en [24]. Las propuestas realizadas en [24] y [25] se extienden luego en [26] y [27] para el caso de estimación simultánea de los parámetros para dos sinusoides superpuestas, y son evaluadas ante señales de medición con sesgo y ruido.

Por otra parte, en [28] y [29] el algoritmo algebraico de estimación se basa en una discretización exacta de la señal nominal para una y dos sinusoides respectivamente. En [28] se muestra una solución interesante para los problemas causados por el ruido de media cero en la señal de entrada al estimador, mediante el empleo de filtrado no-lineal invariante en el tiempo tomando como base el método de mínimos cuadrados recursivo. Esta última alternativa descrita brinda mejores resultados en relación con los resultados discutidos en [24-27] en los cuales se emplea filtrado lineal invariante, al mismo tiempo que se logra eliminar en [28] el problema causado durante los cruces por cero en los estimadores algebraicos.

La primera exigencia para poder utilizar la Identificación Algebraica en el presente trabajo, ha sido encontrar un modelo en forma de ecuación diferencial que represente el oleaje. El modelo propuesto constituye una aproximación lineal del espectro Jonswap del oleaje [6]. Sobre estos principios se ha desarrollado un estimador algebraico para obtener la frecuencia de incidencia del oleaje sobre un vehículo marino. Para el estimador algebraico propuesto se toma como base la metodología clásica planteada en [20, 23] y [24], aplicada al problema real descrito. La efectividad del estimador es corroborada mediante varias simulaciones con el modelo general no lineal del vehículo y mediante el uso de datos recolectados de un experimento real en el mar, obteniéndose en ambos casos una estimación en línea del valor de frecuencia en un reducido periodo de tiempo. Adicionalmente, en las simulaciones mostradas se evalúa el estimador de frecuencia conjuntamente con el sistema de navegación en el plano horizontal para el HRC-AUV presentado en [15] y se obtiene una mejora en el desempeño del control de dirección del vehículo, reduciendo las oscilaciones en la señal de mando al timón ante cambios del oleaje. Estos aspectos constituyen la principal contribución del trabajo. Adicionalmente se discuten algunos aspectos relacionados con la utilización e implementación del estimador de frecuencia propuesto.

## 2.- NOMENCLATURA Y SISTEMAS DE COORDENADAS EMPLEADOS

La figura 1 muestra los sistemas de coordenadas y la notación adoptada en este trabajo para representar los movimientos de rotación y traslación del vehículo referido al sistema inercial definido como  $OE$ . Para sistemas de velocidades bajas y recorridos no muy extensos 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  $OE$  cuyos ejes de coordenadas  $X_E - Y_E - Z_E$  están direccionados hacia el Norte, el Este y centro de la Tierra respectivamente, puede ser considerado además como un sistema de navegación para el vehículo [3,6]. Por otra parte, tanto las velocidades lineales como angulares se encuentran referidas a un sistema de coordenadas situado en el móvil  $OB$  cuyo origen coincide con el centro de flotabilidad del HRC-AUV.

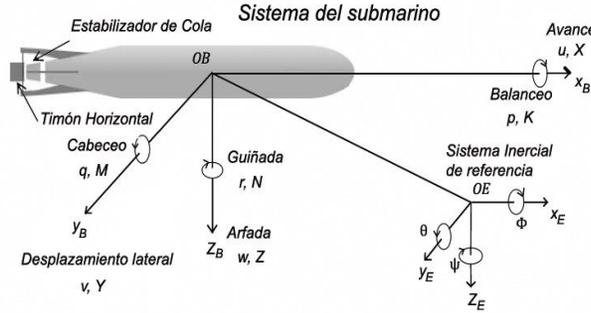


Figura 1

Sistemas de coordenadas empleados y definición de las variables del movimiento.

## 3.- MODELADO DE VEHICULOS MARINOS EN PRESENCIA DE OLAS

El modelo general en tres dimensiones, que describe el comportamiento de los vehículos que operan en el mar en presencia de olas, se describe mediante las ecuaciones (1), (2) y (3) teniendo en cuenta la estructura planteada en [6]:

$$\dot{\mathbf{n}}_{veh} = \mathbf{R}(\mathbf{n}_{veh})\mathbf{v} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{g}(\mathbf{n}_{veh}) \quad (2)$$

$$\mathbf{n}_{total} = \mathbf{n}_{veh} + \mathbf{n}_{olas} \quad (3)$$

Siendo  $\mathbf{M}$  la matriz de inercia del vehículo,  $\mathbf{C}(\mathbf{v})$  la matriz de fuerzas de Coriolis en función del vector de velocidad del vehículo  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$  es la matriz de amortiguamiento, que también depende de las velocidades,  $\mathbf{g}(\mathbf{n}_{veh})$  es el vector de fuerzas gravitatorias y de flotabilidad en función del vector de posición o movimientos del vehículo  $\mathbf{n}_{veh}$ , teniendo en cuenta solamente las acciones de control sobre el mismo,  $\mathbf{R}(\mathbf{n}_{veh})$  es la matriz que permite la transformación de coordenadas del sistema  $OB$  al  $OE$ ,  $\boldsymbol{\tau}$  constituye el vector de fuerzas y momentos generados por el control y  $\mathbf{n}_{total}$  representa el vector de desplazamientos o movimientos totales registrados por el sistema sensorial, constituyendo una superposición del término  $\mathbf{n}_{veh}$  con el movimiento inducido por las olas  $\mathbf{n}_{olas}$  [1]. La estructura de las matrices y vectores que conforman el modelo del vehículo HRC-AUV, así como los valores numéricos de los parámetros y las pruebas experimentales realizadas para su

determinación, se encuentran explicados detalladamente en [31]. De acuerdo con [6] y [12], el filtrado de las olas se define como la operación mediante la cual se atenúa o elimina el movimiento inducido por las olas presente en la señal de medición, con el objetivo de evitar un comportamiento indeseable del sistema de control, evitar desgastes mecánicos y ahorrar energía. En otras palabras, se trata de reconstruir o estimar el movimiento propiamente del vehículo utilizando las mediciones contaminadas que se componen del sistema cuerpo-oleaje. Para realizar una correcta compensación de esta perturbación se hace necesario conocer la frecuencia de las olas que inciden durante la navegación del vehículo naval, como uno de los principales parámetros relacionado con los estados de intensidad del mar. Para el vehículo HRC-AUV se han propuesto varias alternativas para la estimación del efecto de las corrientes [16, 17]. Sin embargo, la compensación del oleaje resulta una tarea relevante, cuya no consideración ha tenido impactos en las pruebas experimentales realizadas con el vehículo en el mar. Esto se debe a que el HRC-AUV es un vehículo naval diseñado para navegar en superficie o a muy pocos metros de profundidad.

### 3.1.-Representación espectral del oleaje

Debido a la incidencia del viento en la superficie del mar se generan ondas, las cuales varían su amplitud en la medida en que la fuerza del viento sea mayor o menor. Este efecto, unido a las corrientes oceánicas constituyen los factores ambientales que mayor incidencia tienen en la navegación de los vehículos marinos. La elevación de las olas medida en cualquier punto a lo largo del eje de propagación  $x$  se muestra en la figura 2, donde  $H$  representa la altura de las olas y  $A$  su amplitud. La expresión analítica para obtener los valores de elevación de la superficie constituye la suma de un gran número de componentes sinusoidales de acuerdo con la ecuación (4):

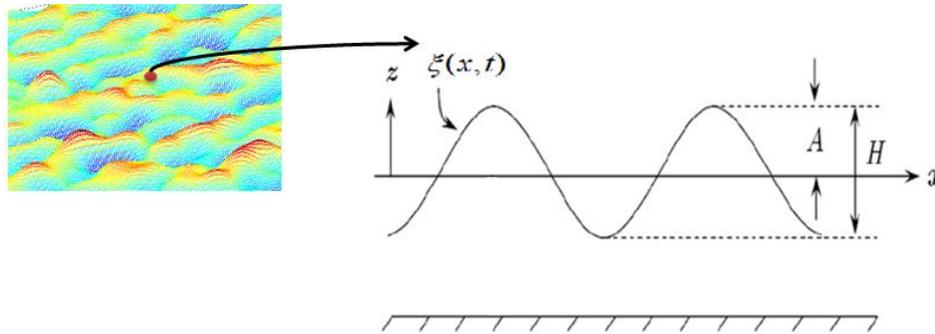


Figura 2

Oleaje provocado por la incidencia del viento en la superficie.

$$\xi(x,t) = \sum_{i=1}^N A_i \text{sen}(\omega_i t + \phi_i) \quad (4)$$

Donde  $A_i$ ,  $\omega_i$  y  $\phi_i$  representan la amplitud, la frecuencia angular y la fase de cada componente de las olas respectivamente [32]. De estos parámetros, la amplitud se expresa en función del espectro frecuencial  $S(\omega_i)$  como  $A_i^2 = 2S(\omega_i)\Delta\omega$ .

La anterior constituye una relación importante entre la solución en el dominio temporal de las olas y su representación frecuencial. El espectro de las olas puede ser estimado basado en mediciones realizadas o calculado mediante formulaciones conocidas que son tomadas internacionalmente como referentes. Dentro de las formulaciones más conocidas resaltan el espectro de Pierson-Moskowitz, el de Bretschneider, el de Ochi y el espectro Jonswap (Joint North Sea Wave Project) [6, 32]. Este último es muy empleado y ha sido tomado como referencia en el proyecto HRC-AUV al utilizarse para representar mares poco desarrollados en zonas con profundidad limitada, de acuerdo con las condiciones de los mares alrededor de Cuba y los estados del mar en los cuales opera el vehículo objeto del presente trabajo. Los parámetros que definen este espectro constituyen la distancia desde/hacia la costa denotada por  $l$  y la velocidad del viento  $V$  como se define en la ecuación (5).

$$S(\omega_i) = \alpha \frac{g^2}{\omega^5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_0}{\omega_i} \right)^4 \right] Y \quad (5)$$

Con:

$$\alpha = 0.076 \left[ \frac{gl}{V^2} \right]^{-0.22} \quad Y = \gamma \exp \left[ \frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2(\zeta\omega_0)^2} \right]$$

Donde  $\omega_0$  constituye la frecuencia fundamental de las olas en el rango de interés,  $g$  es la aceleración constante de la gravedad, mientras que  $\zeta = 0.09$  y  $\gamma = 3.3$  son constantes del espectro [32]. A pesar de que el espectro Jonswap ha sido validado mediante simulaciones y pruebas experimentales con el HRC-AUV [14, 17, 31], existe una obligación de tener una

representación en forma de ecuaciones diferenciales para poder usar este modelo en un método de Identificación Algebraica. Por esta razón se proponen en este trabajo los espectros de oleaje para obtener aproximaciones matemáticas, resultando en algoritmos más simples de implementar.

### 3.2.-Aproximación lineal del espectro Jonswap para el oleaje

Cuando un vehículo marino (VM) se encuentra detenido, las excitaciones de las olas sobre el mismo tienen una frecuencia constante  $\omega_0$ . Sin embargo, si el VM se desplaza con una velocidad de avance constante  $u$ , la frecuencia de incidencia de las olas será distinta y se le denomina frecuencia de encuentro  $\omega_e$ . Si se denota como  $\beta$  el ángulo que forma la dirección de avance del vehículo con la dirección del recorrido de las olas, el nuevo valor de frecuencia se obtiene mediante (6).

$$\omega_e(\omega_0, U, \beta) = \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} u(\cos(\beta)) \quad (6)$$

Dependiendo la frecuencia de encuentro  $\omega_e$  de la velocidad de avance del vehículo  $u$ , la frecuencia natural de las olas  $\omega_0$  y la dirección de incidencia de las mismas  $\beta$ , además de la aceleración constante de la gravedad  $g$ . Si bien el oleaje es un fenómeno aleatorio cuya serie temporal se representa por un gran número de componentes de magnitud, fase y frecuencia distintos, en el dominio frecuencial este fenómeno se encuentra muy bien definido con una mayor probabilidad de ocurrencia alrededor de un valor denominado frecuencia natural o fundamental [32].

Para favorecer el diseño de los filtros de oleaje y observadores de estados empleados en el HRC-AUV, así como del estimador algebraico propuesto, se emplea una función de transferencia lineal de segundo orden cuyo comportamiento alrededor de la frecuencia fundamental del oleaje sea similar al del espectro Jonswap. En este ámbito de aplicación, se han empleado distintas aproximaciones lineales; proponiéndose en los trabajos del profesor noruego Thor I. Fossen [6], el empleo de osciladores armónicos con y sin amortiguamiento para modelar el movimiento de alta frecuencia provocado por el oleaje en una embarcación. Similares aproximaciones del oleaje con distintos órdenes han sido empleadas en muchas publicaciones relacionadas, en las cuales se logran resultados satisfactorios con el uso de la misma en los diseños de filtros, observadores y controladores [1, 2, 11, 12]. En el presente trabajo se emplea el modelo lineal (7) para representar las oscilaciones provocadas por el oleaje en cada grado de libertad del movimiento del vehículo HRC-AUV.

$$h_{olas}(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\sigma\varphi\omega_e s + \omega_e^2} w(s) \quad (7)$$

Donde  $w(s)$  es un ruido blanco que representa la entrada, la salida  $h_{olas}(s)$  se corresponde con las variaciones del oleaje,  $\omega_e$  representa la frecuencia de incidencia de las olas (para  $U=0$  y/o  $\beta=90^\circ$ ;  $\omega_e = \omega_0$ ),  $\varphi$  es el factor de amortiguamiento y  $K_w = 2\sigma\varphi\omega_e$ , siendo  $\sigma$  una ganancia ajustable en dependencia del espectro de oleaje modelado [6]. En la ecuación (7) la entrada de ruido blanco posee una densidad espectral  $P_w = 1$  para todos los componentes de frecuencia. Al multiplicar este término de ruido por la función de transferencia dada la cual es representativa de un filtro pasobanda, se obtiene una salida oscilatoria cuyos componentes de frecuencia se agrupan alrededor de la frecuencia  $\omega_e$ , similar a la distribución de energía del espectro del oleaje analizado. Para el caso del espectro Jonswap utilizado en las investigaciones con el HRC-AUV, las constantes del modelo (7) toman los valores  $\sigma=0.5$  y  $\varphi=0.1$  de acuerdo con [6]. La función lineal dada por (7) con los parámetros numéricos definidos anteriormente, representa adecuadamente el espectro Jonswap (6) del oleaje para distintos valores de frecuencia correspondientes con los estados del mar en el rango de operación del HRC-AUV, el cual se define en la sección de resultados.

## 4.- METODOLOGIA DE IDENTIFICACIÓN ALGEBRAICA

El algoritmo a aplicar con el fin de determinar la frecuencia de incidencia del oleaje se basa en la metodología de Identificación o Estimación Algebraica. Como su nombre lo indica, se desarrolla a partir de las ecuaciones algebraicas que describen el comportamiento de los sistemas y las señales involucradas, basándose en el cálculo operacional y el álgebra diferencial para realizar una estimación en línea del parámetro deseado [20, 21, 24]. Es por ello que el desarrollo de estos estimadores es puramente matemático y dependiente de las ecuaciones que representan el comportamiento de los sistemas [18, 30]. El desarrollo de este tipo de identificadores de parámetros o estimadores en tiempo real consta de una metodología bien definida [20], cuyo desarrollo teniendo en cuenta la aproximación lineal (7) se ilustra en la siguiente sección.

### 4.1.-Propuesta de identificación para la frecuencia de incidencia del oleaje

A partir de este momento se hace uso de la expresión (7) como alternativa del espectro para representar los efectos del oleaje alrededor de la frecuencia de incidencia  $\omega_e$ . Dicha aproximación de 2do orden, se asemeja a la fluctuación  $h_{olas}$  que provoca el oleaje en cada variable del movimiento de los vehículos que operan en el mar. Para la aplicación de la metodología

algebraica se toma como punto de partida la representación de (7) en el dominio temporal y sustituyendo  $h_{olas}$  por  $\zeta$  y sus derivadas de primer y segundo orden, con el objetivo de simplificar la simbología empleada, siendo:

$$\ddot{\zeta}(t) + 2\varphi\omega_e\dot{\zeta}(t) + \omega_e^2\zeta(t) = K_w w(t) + b \quad (8)$$

Nótese la inserción en (8) de un término constante o *bias* que tiene como finalidad eliminar posteriormente el *bias* o deriva en la salida del estimador. Como se señala anteriormente,  $\zeta(t)$  representa las oscilaciones provocadas por el oleaje sobre la variable registrada las cuales se pueden separar aplicando el principio de superposición si se conocen las características de esta perturbación. Una vez obtenida la representación temporal (8), se aplica la transformada de Laplace unilateral para obtener la misma en el dominio de la frecuencia, quedando por consiguiente la expresión (9).

$$s^2Y(s) - sY(0) - \dot{Y}(0) + 2\varphi\omega_e[sY(s) - Y(0)] + \omega_e^2Y(s) = K_w[sW(s) - W(0)] + b/s \quad (9)$$

Siendo  $Y(s)$  la transformada de  $\zeta(t)$  y  $W(s)$  la transformada de  $w(t)$ . Con el objetivo de eliminar el término de deriva de la estimación, se multiplica la expresión (10) por  $s$ , obteniéndose la ecuación (10).

$$s^3Y(s) - s^2Y(0) - s\dot{Y}(0) + 2\varphi\omega_e[s^2Y(s) - sY(0)] + s\omega_e^2Y(s) = K_w[s^2W(s) - sW(0)] + b \quad (10)$$

Al hacer uso de la Transformada de Laplace sobre la función en el tiempo, su equivalente en el dominio de la frecuencia presenta ciertas condiciones iniciales:  $Y(0)$  y  $\dot{Y}(0)$  que en este caso no son más que las funciones del oleaje y su derivada evaluadas en el instante inicial, además de  $W(0)$ . Con el objetivo de que el estimador sea independiente de esas condiciones iniciales se deriva la ecuación (10)  $n$ -veces, de acuerdo con la máxima potencia  $s^n$  que aparece en la expresión. Obteniéndose de esta manera la ecuación (11), la cual no depende de las condiciones iniciales del proceso ni de la entrada  $w(t)$ .

$$6Y(s) + 18s \frac{dY(s)}{ds} + 9s^2 \frac{d^2Y(s)}{ds^2} + s^3 \frac{d^3Y(s)}{ds^3} + 2\varphi\omega_e \left[ 6 \frac{dY(s)}{ds} + 6s \frac{d^2Y(s)}{ds^2} + s^2 \frac{d^3Y(s)}{ds^3} \right] + \omega_e^2 \left[ 3 \frac{d^2Y(s)}{ds^2} + s \frac{d^3Y(s)}{ds^3} \right] = K_w \left[ 6 \frac{dW(s)}{ds} + 6s \frac{d^2W(s)}{ds^2} + s^2 \frac{d^3W(s)}{ds^3} \right] \quad (11)$$

Continuando con la aplicación de la metodología de Identificación Algebraica, la ecuación (11) se multiplica por  $s^{-v}$ , con el fin de eliminar las derivadas implícitas en las potencias de  $s$ , evitando de esta manera tener que derivar alguna señal del estimador en el dominio del tiempo. Por lo tanto, siendo  $v = 3$  correspondiente con la mayor potencia de  $s$  que aparece en (11); se obtiene como resultado la expresión (12).

$$6s^{-3}Y(s) + 18s^{-2} \frac{dY(s)}{ds} + 9s^{-1} \frac{d^2Y(s)}{ds^2} + \frac{d^3Y(s)}{ds^3} + 2\varphi\omega_e \left[ 6s^{-3} \frac{dY(s)}{ds} + 6s^{-2} \frac{d^2Y(s)}{ds^2} + s^{-1} \frac{d^3Y(s)}{ds^3} \right] + \omega_e^2 \left[ 3s^{-3} \frac{d^2Y(s)}{ds^2} + s^{-2} \frac{d^3Y(s)}{ds^3} \right] = K_w \left[ 6s^{-3} \frac{dW(s)}{ds} + 6s^{-2} \frac{d^2W(s)}{ds^2} + s^{-1} \frac{d^3W(s)}{ds^3} \right] \quad (12)$$

Al realizar la conversión nuevamente al dominio del tiempo de la ecuación (1) se obtiene (13):

$$6 \iiint \zeta(t) - 18 \iint t \zeta(t) + 9 \int t^2 \zeta(t) - t^3 \zeta(t) + 2\varphi\omega_e \left[ -6 \iiint t \zeta(t) + 6 \iint t^2 \zeta(t) - \int t^3 \zeta(t) \right] + \omega_e^2 [3 \iiint t^2 \zeta(t) - \iint t^3 \zeta(t)] = K_w [-6 \iiint t w(t) + 6 \iint t^2 w(t) - \int t^3 w(t)] \quad (13)$$

Con la finalidad de simplificar la notación matemática empleada en los pasos finales, se reescribe la ecuación (13) como (14):

$$a(t) + 2\varphi\omega_e b(t) + \omega_e^2 c(t) = K_w I(t) \quad (14)$$

siendo:

$$a(t) = 6 \iiint \zeta(t) - 18 \iint t \zeta(t) + 9 \int t^2 \zeta(t) - t^3 \zeta(t)$$

$$b(t) = \left[ -6 \iiint t \zeta(t) + 6 \iint t^2 \zeta(t) - \int t^3 \zeta(t) \right]$$

$$c(t) = [3 \iiint t^2 \zeta(t) - \iint t^3 \zeta(t)] \quad e \quad I(t) = [-6 \iiint t w(t) + 6 \iint t^2 w(t) - \int t^3 w(t)]$$

Si el vector de ruido blanco que constituye entrada al sistema se genera internamente en el estimador y este se multiplica por la ganancia  $K_w$ , el miembro derecho de la ecuación (14) queda entonces determinado y el sistema consta de dos incógnitas ( $\omega_e^2, 2\varphi\omega_e$ ). Consecuentemente con la idea planteada, se tiene el vector de parámetros desconocidos  $\Theta = (\omega_e^2, 2\varphi\omega_e)$  y una

sola ecuación. Con el objetivo de crear un sistema completamente determinado y con ello realizar una estimación lineal del parámetro desconocido se procede a la integración de la ecuación (14) con respecto al tiempo. Quedando así el sistema compuesto por dos ecuaciones y dos incógnitas las cuales se muestran de manera abreviada en (15).

$$\begin{aligned} a(t) + 2\varphi\omega_e b(t) + \omega_e^2 c(t) &= K_w I(t) \\ \int a(t) + 2\varphi\omega_e \int b(t) + \omega_e^2 \int c(t) &= K_w \int I(t) \end{aligned} \quad (15)$$

Expresando la ecuación (16) en forma de notación matricial se da lugar a la ecuación (17):

$$\begin{bmatrix} c(t) & b(t) \\ \int c(t) & \int b(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_e^2 \\ 2\varphi\omega_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_w I(t) - a(t) \\ K_w \int I(t) - \int a(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Del sistema anterior es posible plantear entre los términos desconocidos de la manera que se muestra en (17):

$$\begin{bmatrix} \omega_e^2 \\ 2\varphi\omega_e \end{bmatrix} = P^{-1}Q \quad (17)$$

Donde:

$$P = \begin{bmatrix} c(t) & b(t) \\ \int c(t) & \int b(t) \end{bmatrix} \quad y \quad Q = \begin{bmatrix} K_w I(t) - a(t) \\ K_w \int I(t) - \int a(t) \end{bmatrix}$$

Según la expresión (17), se dispone de dos términos para obtener una estimación del valor de la frecuencia de incidencia del oleaje. Finalmente se tiene el valor cuadrático de la frecuencia de interés, obteniéndose directamente:

$$\omega_e^2 = \frac{num(t)}{den(t)} = \frac{\int b(t)[K_w I(t) - a(t)] - b(t)[K_w \int I(t) - \int a(t)]}{det(P)} \quad (18)$$

El denominador de (18) se define como:  $det(P) = c(t) \int b(t) - b(t) \int c(t)$ . Con la ecuación (18) se obtiene finalmente una estimación del valor deseado de frecuencia al cuadrado a la cual se le determina la raíz cuadrada para obtener  $\hat{\omega}_e$ . Es necesario señalar, partiendo de la ecuación (18), que si  $det(P) = 0$  entonces la división queda indeterminada y por lo tanto el valor de  $\omega_e^2$  no puede ser calculado en ese instante de tiempo. Dicha situación ocurre generalmente en  $t = 0$  y puede presentarse también en otros instantes por lo que ese cálculo debe comprobarse antes de ser empleado en la división para que no resulte un problema al realizar la estimación. Quedan entonces definidos los momentos para la estimación de la frecuencia como:  $\hat{\omega}_e = \hat{\omega}_{e\_inic}$  para  $0 \leq t \leq \varepsilon$  y  $\omega_e = \text{sqr}t\left(\frac{num(t)}{den(t)}\right)$  para  $t > \varepsilon$ , siendo  $\varepsilon$  un instante de tiempo suficientemente pequeño el cual se selecciona en base a la precisión del procesador aritmético que procesa las señales y realiza los cálculos.

## 5.- RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSION

El HRC-AUV es un vehículo sumergible diseñado para operar desde la superficie hasta una profundidad máxima de 10 metros, o sea, en zonas costeras con poca profundidad, por lo que la incidencia del oleaje es considerable [3]. Su diseño estructural le permite navegar adecuadamente en condiciones de mar hasta la categoría 3 según se define en la tabla 1, como máximo oleaje permisible para esta embarcación. Las siguientes secciones tienen como finalidad evaluar el comportamiento del estimador de frecuencia, definiendo primeramente sus condiciones y rango de operación para asegurar una adecuada convergencia del mismo hacia el valor real de frecuencia.

### 5.1.-Rango de validez y condiciones de operación del estimador propuesto

De acuerdo con la escala de clasificación del oleaje generado por el viento definida en [8,32] y reproducida en la tabla 1, donde se ilustra la frecuencia natural de las olas para los estados mencionados (1-3) y 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 el estimador de frecuencia se encuentra en el rango siguiente:  $0.4 \text{ rad/seg} \leq \omega_e \leq 13 \text{ rad/seg}$ . Adicionalmente, se hace necesario definir otras condiciones de operación y ejecución del estimador algebraico de frecuencia, debido a las desventajas intrínsecas que posee esta técnica [19], [20]. Si bien la estimación obtenida como solución de la expresión (18) realiza la identificación de frecuencia de manera casi inmediata con tiempos de convergencia muy bajos, en el instante inicial  $t = 0$  ocurre una indeterminación del tipo “0/0” en el algoritmo. Este tipo de estimador tampoco se diseña bajo el principio de operación ininterrumpida, pues con el transcurso del tiempo la estimación realizada tiende a degradarse debido a las integrales múltiples que se encuentran tanto en el numerador como en el denominador de la representación (18). Lo anterior ha sido abordado detalladamente en las publicaciones [18, 24-28] y [30] relacionadas con el método algebraico, cuyo tratamiento presenta

diversas aristas. Para el caso de los resultados mostrados en las secciones 5.2 y 5.3 mediante la simulación de olas regulares e irregulares, fueron obtenidos tiempos de convergencia del algoritmo entre 3 y 6 segundos respectivamente. Luego de este tiempo, si la estimación de frecuencia no varía en más de un 5% durante un intervalo de tiempo de 2 segundos, se toma la misma como valor final y se mantiene como estimación hasta tanto no se reinicie nuevamente el estimador. En caso de no convergencia del valor final, se mantiene la estimación anterior o en su defecto su valor inicial.

**Tabla 1**  
**Estados del mar definidos para la operación del HRC-AUV.**

Categoría	Altura de las olas (m)	$T_{olas}$ (seg)	$\omega_n$ (rad/seg)	Velocidad del viento (m/s)
0-1	0 – 0.10	1 – 4	1.57 – 6.28	0 – 3.08
2-Suavizado	0.10 – 0.50	3.30 – 12.80	0.49 – 1.90	3.60 – 5.14
3-Ligero	0.50 – 1.25	5.00 – 14.80	0.42 – 1.26	5.65 – 8.23

## 5.2.-Evaluación del estimador conjuntamente con el modelo no lineal del vehículo HRC-AUV ante condiciones de oleaje irregular.

En la presente sección se muestran los resultados de evaluar el desempeño del estimador algebraico de frecuencia ante condiciones cambiantes del oleaje irregular, haciendo uso para ello del modelo no lineal de 6 grados de libertad (GDL) del vehículo el cual incluye el efecto del oleaje sobre cada GDL. El modelo no lineal de orden completo para simular los movimientos del HRC-AUV ha sido tomado como base para el diseño de varias estrategias de control, guiado y compensación de perturbaciones [14-17] y ha sido validado mediante diversas pruebas experimentales cuyos resultados se muestran en [31]. La idea general para las simulaciones de la presente sección se ilustra en la figura 3 mediante un esquema en bloques de cada elemento y la interacción entre los mismos.

El esquema de la figura 3 se compone de un controlador para simular el caso del control de rumbo o dirección  $\psi$  del vehículo, la salida de mando al timón de dirección  $\delta_T$  actúa como entrada al modelo de 6 GDL para la simulación del HRC-AUV. Las variables de posición obtenidas del modelo son contaminadas con la perturbación de oleaje en cada GDL, obteniéndose una simulación de medición con ambos componentes presentes. Se utiliza el ángulo de cabeceo  $\theta$  como entrada al algoritmo estimador de frecuencia compuesto por el estimador algebraico y el estimador de amplitud como complemento del primero. Los ángulos de cabeceo y balanceo  $\phi$  son los que exhiben una relación directa exacta con el impacto del oleaje por lo que son los utilizados frecuentemente para estimaciones de parámetros referidos al oleaje [4, 5]. Se ha colocado adicionalmente el filtro de oleaje basado en observador, diseñado previamente para el HRC-AUV y cuyas alternativas lineal y no lineal se muestran en [14] y [15] respectivamente. Este observador se ha implementado en el vehículo con el objetivo de compensar y/o estimar los efectos del oleaje sobre la variable de rumbo. Sin embargo, para el ajuste adecuado del mismo se requiere de una estimación de frecuencia del oleaje, no disponible hasta el momento por lo que se pretende evaluar el impacto en la calidad del filtrado teniendo en cuenta el método de estimación de frecuencia propuesto.

Las simulaciones mostradas en las figuras 4 y 5 fueron realizadas bajo las condiciones y con los parámetros que se ilustran a continuación:

- Se lleva a cabo el control del rumbo durante 600 segundos (10 minutos) de navegación utilizando un controlador tipo *PI* con ganancias  $K_p=1.5$  y  $K_i=0.1$ . Se provocaron los siguientes cambios tipo paso en el valor deseado de rumbo  $\psi_d$ :

$$\circ \quad \psi_{d1} = 0 \text{ rad } (0^\circ), t = 0; \quad \psi_{d2} = 1.57 \text{ rad } (90^\circ), t = 150 \text{ seg}; \quad \psi_{d3} = \pi \text{ rad } (180^\circ), t = 400 \text{ seg};$$

Bajo estas entradas se obtiene la trayectoria mostrada en la figura 4-(a).

- Para cerrar el lazo del rumbo, primeramente se emplea la señal contaminada con oleaje  $\psi$  (línea azul en la figura 3) y luego se utiliza la salida estimada por el observador de oleaje  $\hat{\psi}$  (línea roja en la figura 3) cuyas diferencias se discuten posteriormente.
- Fue generada la perturbación de oleaje para cada GDL mediante la aproximación lineal para el espectro Jonswap, ecuación (6), teniendo en cuenta la frecuencia fundamental  $\omega_0 = 2 \text{ rad/seg}$  y el ángulo de dirección de las olas  $\beta = 0^\circ$  para obtener la frecuencia de incidencia  $\omega_e$  correcta mediante (7). El oleaje generado se corresponde con la marea categoría 1.

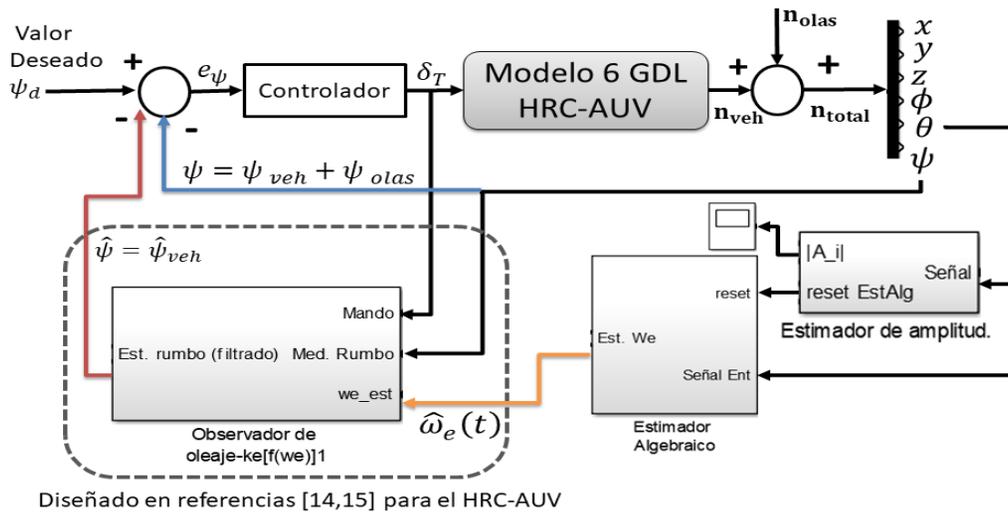


Figura 3

Esquema de simulación con el modelo de 6 GDL del vehículo, con controlador y filtro de oleaje ante oleaje irregular simulado.

Para generar la señal de reinicio de la estimación de frecuencia; se chequean, adicionalmente a la detección del módulo de la amplitud de la señal de entrada, los cambios en el rumbo del vehículo. Para generar la señal de reinicio (reset) al estimador algebraico debe cumplirse que se duplique o disminuya a la mitad la amplitud de la señal del ángulo  $\theta$  de cabeceo y al mismo tiempo que existan cambios en el rumbo  $\psi$  en más de 15 grados. Este elemento reduce la cantidad de estimaciones innecesarias para la frecuencia de incidencia del oleaje debido a que en ocasiones pueden detectarse cambios en la amplitud que no necesariamente impliquen una nueva estimación de la frecuencia.

Los movimientos con control de dirección simulados para el HRC-AUV bajo las condiciones establecidas se ilustran en la figura 4-(a), así como el ángulo de cabeceo del vehículo  $\theta$  en la figura 4-(b) empleado como entrada al estimador algebraico y la estimación del módulo de la amplitud del mismo utilizado para la decisión de reinicio para obtener una nueva estimación de frecuencia como se menciona anteriormente. Durante esta trayectoria simulada existen tres condiciones de excitación de las olas sobre el vehículo dados los cambios de frecuencia, denotados como  $\omega_{e1}$ ,  $\omega_{e2}$  y  $\omega_{e3}$ .

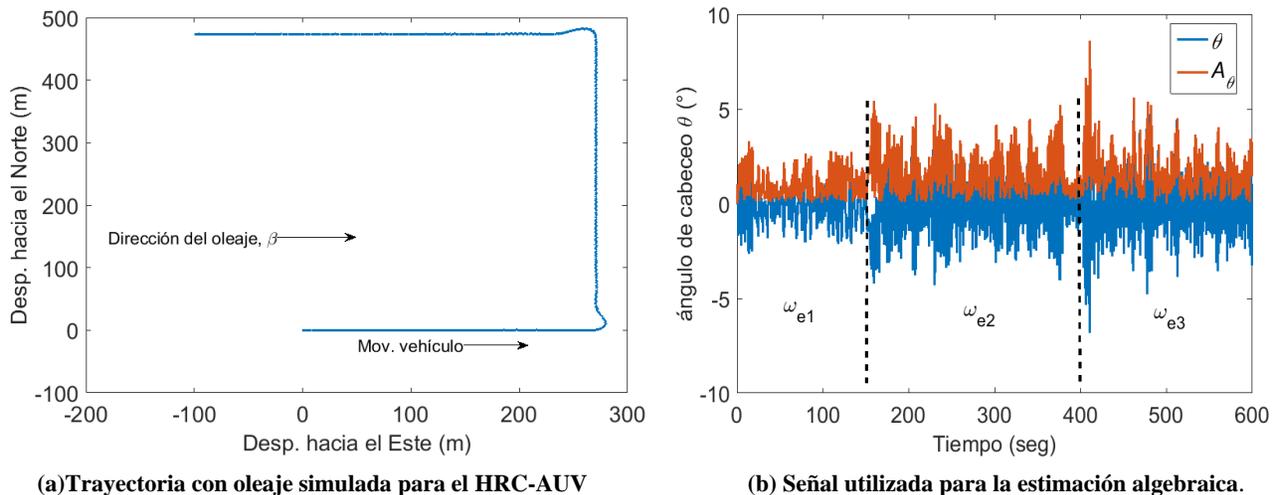
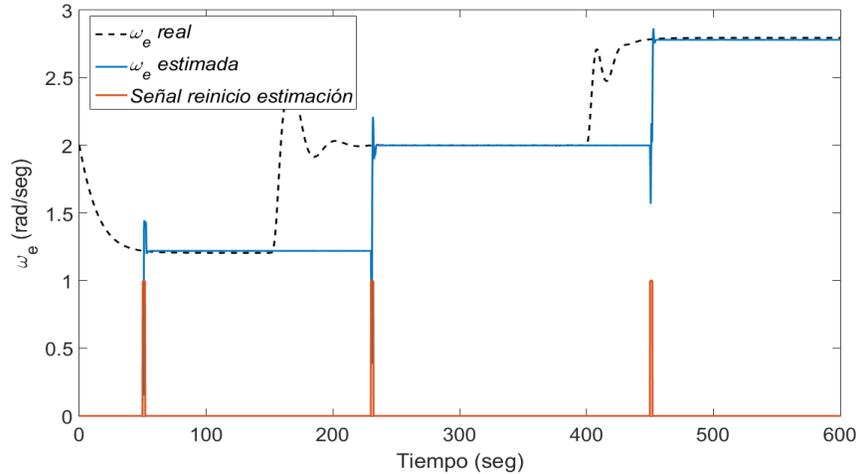


Figura 4

Simulación de movimientos del HRC-AUV ante oleaje irregular.

Consecuentemente con las condiciones de operación, se muestran en la figura 5 los valores reales de  $\omega_{ei}$  ( $i = 1 \dots 3$ ), así como los valores estimados. Los valores reales dependen tanto de la dirección de incidencia del oleaje como de la velocidad de avance del vehículo, por lo que exhiben variaciones durante los cambios tipo paso provocados en el rumbo del vehículo  $\psi$ .

Una vez que se ha estabilizado el rumbo del vehículo y se detectan cambios en la amplitud del cabeceo, se generan las señales para iniciar una nueva estimación y actualización de la frecuencia; estos momentos se representan en la parte inferior de la figura 5 en forma de pulsos estrechos. Se observa en la figura 5 una identificación casi de manera inmediata del valor de frecuencia  $\omega_e$ , siendo el tiempo de convergencia menor que dos veces el periodo de las olas simuladas. Además; con respecto al valor real, el valor final estimado exhibe un error muy pequeño, el cual se cuantifica de manera modular en la tabla 2.



**Figura 5**

**Salida del algoritmo de estimación propuesto, según la trayectoria mostrada en la Figura 4-(a).**

En la tabla 2 se resumen los resultados de las simulaciones mostradas en las figuras 4 y 5 para un tiempo de convergencia del estimador inferior a los 4 segundos. Luego de este tiempo de convergencia se detiene la estimación algebraica de la frecuencia y se mantiene la salida hasta tanto no se reinicie nuevamente el algoritmo.

**Tabla 2**  
**Resultados de la estimación de frecuencia de incidencia del oleaje irregular.**

	Dirección de las olas $\beta$ (°)	Frecuencia real $\omega_{ei}$ (rad/seg)	Frecuencia est. $\hat{\omega}_{ei}$ (rad/seg)	Error de estimación  (rad/seg)
1	0	1.22	1.205	0.015
2	90	2	2.005	0.005
3	180	2.78	2.795	0.015

Los resultados presentados sobresalen ante los obtenidos con otros estimadores de frecuencia del oleaje publicados recientemente, como los propuestos en [4, 5]. Las mejoras consisten precisamente en la reducción del tiempo de convergencia y la exactitud de la estimación. Seguidamente se ilustra la mejora en el desempeño obtenida cuando en una de las estrategias de filtrado de las olas implementada en el hardware a bordo del HRC-AUV se hace uso de la frecuencia estimada. En [14] se presenta el diseño de un filtro de oleaje basado en un observador pasivo lineal para el vehículo naval analizado, el observador para filtrar el oleaje posee una estabilidad demostrada, sin embargo, la sintonía del mismo se encuentra en función del valor de frecuencia angular del oleaje, el cual ha sido utilizado hasta el momento considerando frecuencias fijas colocadas a priori. Este hecho en ocasiones afecta el desempeño de tal algoritmo por lo que la estimación de frecuencia y el reajuste en línea de las ganancias del observador de oleaje trae consigo un incremento de la calidad en la compensación de los efectos del oleaje sobre el control del vehículo. La estrategia general para la simulación conjuntamente del estimador algebraico de frecuencia y el observador de oleaje propuesto en [14] para el caso lineal y en [15] para la variante no lineal, fue presentada en la figura 5. La finalidad del observador de oleaje es eliminar o atenuar los componentes del oleaje presentes en la señal de medición de los diferentes sensores, antes de que se empleen las mediciones en los lazos de control del HRC-AUV. En la figura 5 se muestra el esquema de simulación del lazo de control de dirección. En este esquema el estimador de frecuencia desempeña un papel vital para que el observador de oleaje atenúe de manera correcta los componentes de oleaje, utilizándose los valores de frecuencia estimados como parámetro variable que incide en los valores de ganancia del observador y, por consiguiente, en la calidad final de la señal estimada o filtrada. Al evaluar conjuntamente todos los elementos mostrados en la figura 5 para el control de dirección, se obtienen los resultados de seguimiento y filtrado de la variable rumbo  $\psi$  que se exhiben en la figura 6. Se aprecia la respuesta en color azul, que representa el rumbo real que experimenta el HRC-AUV, obtenido este del modelo matemático no lineal de 6 GDL del vehículo. En color naranja se representa la estimación de rumbo realizada por el observador

de oleaje, inicializado el mismo con un valor fijo de frecuencia angular  $\omega_e = 2 \text{ rad/seg}$ . Las señales en forma de pulso con color negro constituyen los momentos en los cuales se dispone de una nueva estimación de  $\omega_e$  y por lo tanto se produce esta señal para actualizar la dinámica del observador, obteniéndose una mejora en el desempeño como se puede distinguir en la respuesta filtrada (línea naranja) a partir de estos instantes de tiempo en los que ocurre la actualización.

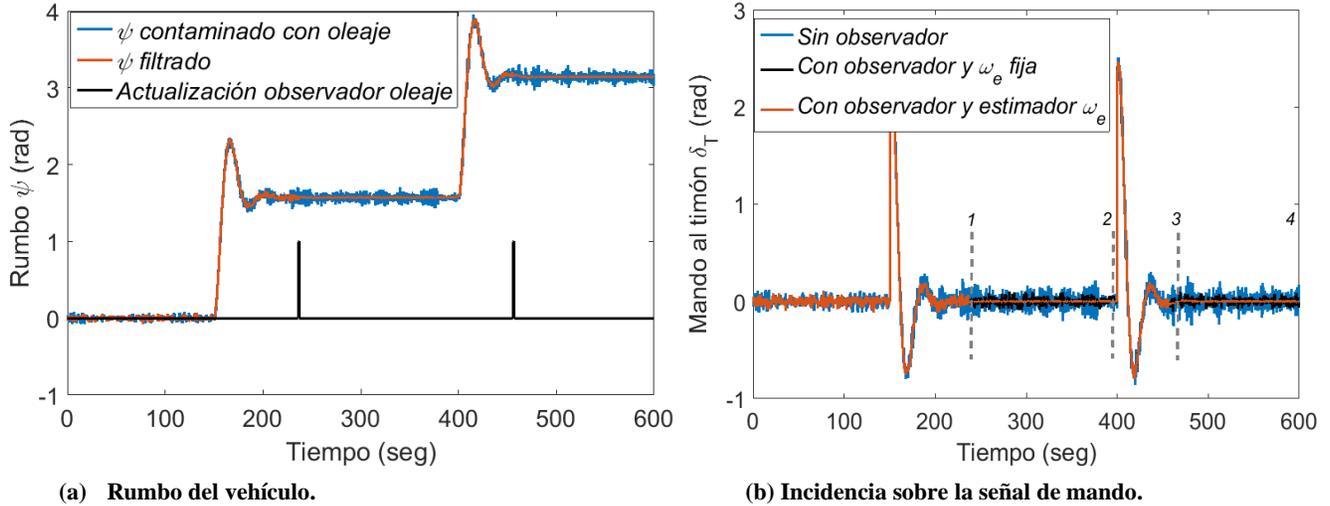


Figura 6

**Cambios en el rumbo del vehículo de acuerdo con la trayectoria deseada y la inserción del algoritmo de filtrado mediante observador.**

Se muestran en la figura 6-(b) las señales de mando del controlador de rumbo ( $PI$ ) al timón del vehículo para cada uno de los escenarios de la señal de medición ilustrados en la figura 6-(a). Cuando no se emplea el observador para filtrar los efectos del oleaje, y se utiliza para determinar el error directamente la salida de rumbo del modelo contaminado con el oleaje, se obtiene la respuesta en color azul. En el caso anterior se observa una excesiva acción de control, lo que provoca oscilaciones indeseables en los elementos de control final. Por el contrario, las respuestas en color negro y naranja se corresponden con la utilización de la salida filtrada del observador en la realimentación para llevar a cabo el control de rumbo. Ambas respuestas coinciden antes del punto 1 ( $t = 245 \text{ seg}$ ) y a partir de este momento se percibe una mejora significativa en el control al disponer de una estimación adecuada de la frecuencia de incidencia del oleaje y un ajuste en línea de las ganancias del observador.

Con la actualización de los valores de frecuencia utilizados como referencia en el observador de oleaje implementado en el HRC-AUV, se logra un reajuste en línea que permite adaptar el observador ante las condiciones cambiantes del oleaje durante el seguimiento de trayectorias por parte del vehículo objeto de estudio. Como elemento ilustrativo de la mejora en desempeño obtenida al utilizar la estrategia propuesta en el trabajo como elemento adicional de ajuste, se muestra en la tabla 3 los resultados del análisis estadístico a las tres señales de la figura 6-(b) en los segmentos 1-2 y 3-4 denotados por líneas discontinuas en la misma. Se constatan los excelentes resultados obtenidos en cuanto a la calidad en la atenuación de la perturbación, al comprobarse la media y la desviación estándar para los dos segmentos analizados de la respuesta del control. Este hecho finalmente se refleja en un aumento de la vida útil de los actuadores y sistema de timones instalados en el vehículo, reduciéndose el desgaste y la fricción mecánica. Por otra parte, se reduce el consumo de energía pues el sistema de timones constituye uno de los elementos de mayor consumo dentro de la arquitectura de hardware del HRC-AUV.

## 5.4.- Evaluación del estimador utilizando datos obtenidos de experimento real

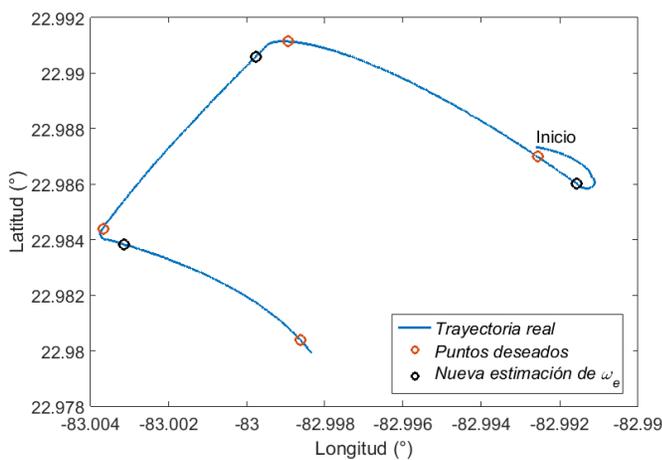
Una vez evaluado el estimador algebraico para la frecuencia de encuentro del oleaje utilizando datos simulados, se hace necesario verificar el comportamiento del algoritmo propuesto mediante la utilización de datos de experimentos reales con el vehículo HRC-AUV en el mar. Para llevar a cabo estas simulaciones se emplea una trama de datos adquirida durante una de las sesiones de experimento con el vehículo real operando en el mar, datos que se almacenan en la unidad de almacenamiento

**Tabla 3**  
**Diferencias en los valores estadísticos de la señal de mando al actuador del timón cuando se emplea filtro para el oleaje conjuntamente con el estimador algebraico.**

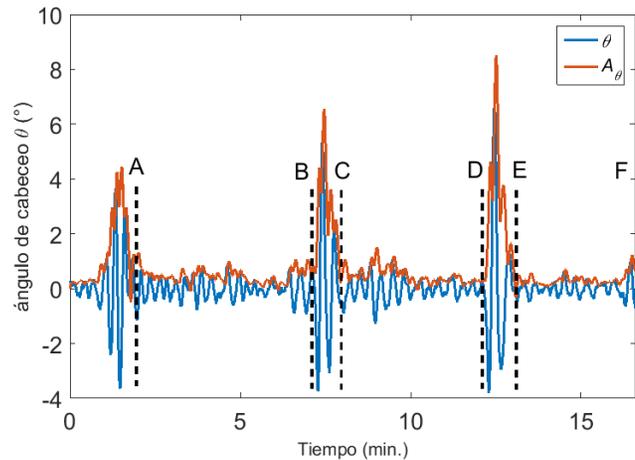
	Segmento 1-2		Segmento 3-4	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
1-Sin observador de oleaje	$7.36 * 10^{-4}$	$7.49 * 10^{-2}$	$7.75 * 10^{-4}$	$6.88 * 10^{-2}$
2-Con observador de oleaje	$5.28 * 10^{-4}$	$3.29 * 10^{-2}$	$9.16 * 10^{-5}$	$3.30 * 10^{-2}$
3-Con observador de oleaje + estimador de frecuencia	$4.30 * 10^{-4}$	$0.42 * 10^{-2}$	$7.09 * 10^{-5}$	$0.31 * 10^{-2}$

en el hardware a bordo para su posterior análisis y la validación de nuevos algoritmos. El juego de datos que se toma para su análisis ha sido muestreado con una frecuencia  $F_s = 100$  Hz y se corresponde con un experimento de seguimiento de puntos deseados, el cual tiene una duración aproximada de 16 minutos. Los resultados se muestran de manera similar a la sección anterior, primeramente, la trayectoria seguida por el vehículo se ilustra en la figura 7-(a) con el punto de partida denotado como “Inicio”.

En dicha figura se muestran en color naranja los puntos por donde debía pasar el vehículo y en color negro los momentos en donde se realiza una nueva estimación de la frecuencia de encuentro de las olas mediante el algoritmo propuesto. Para esta simulación la condición de reinicio del estimador algebraico fue definida para cambios de más de  $30^\circ$  en el rumbo del vehículo, ya que las condiciones de navegación no generan cambios significativos en la amplitud del cabeceo. Estos criterios de actualización del valor de frecuencia pueden variar en dependencia de las condiciones de navegación y otros factores relacionados con el control.



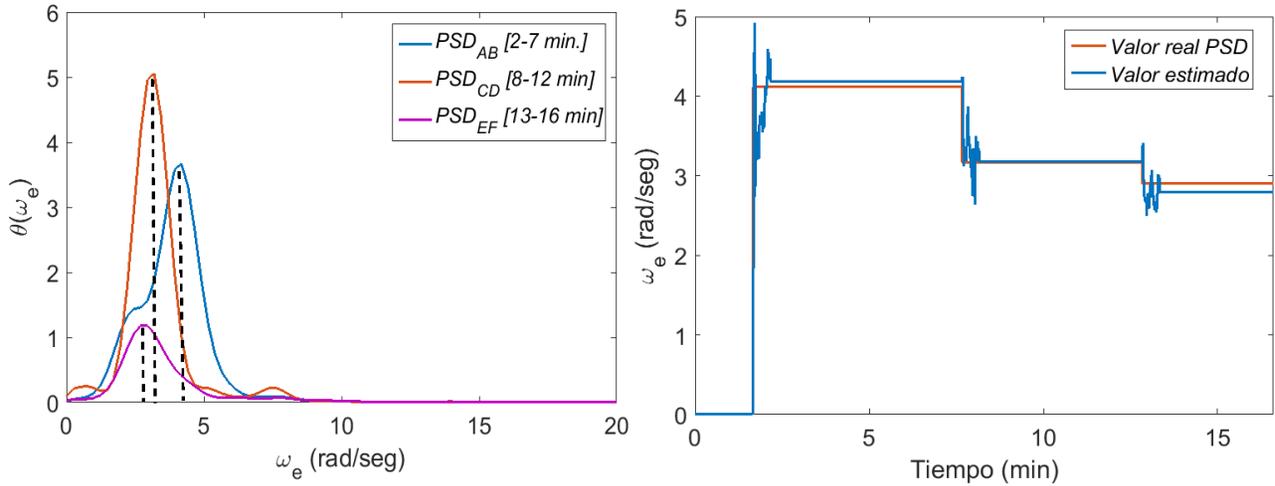
**(a) Trayectoria durante experimento real.**



**(b) Cabeceo experimentado por el vehículo.**

En la figura 7-(b) se muestra la medición real del ángulo de cabeceo  $\theta$  y su valor modular, se observan variaciones entre  $4^\circ$  y  $8^\circ$  solo en los momentos en que el vehículo gira, de acuerdo con la trayectoria mostrada en la figura 7-(a). Por otra parte, la figura 7-(c) muestra los resultados en la obtención de la densidad espectral de potencias (en inglés, PSD) del ángulo de cabeceo para los tramos denotados como AB, CD y EF, los cuales no incluye las variaciones durante los cambios de rumbo del vehículo como resultado de vencimiento de cada punto deseado. Ya que este experimento se corresponde con el ajuste y evaluación del control solamente en el plano horizontal, las variaciones presentes en el ángulo de cabeceo cuando no se experimentan giros bruscos, son el resultado de la incidencia del oleaje a una frecuencia de encuentro determinada, la cual analíticamente depende de la velocidad de avance del vehículo y la dirección del movimiento. Al no disponer de datos meteorológicos de validación durante la jornada de experimento real, la obtención de la densidad espectral constituye la única alternativa para lograr una validación del algoritmo de estimación de frecuencia propuesto. La figura 7-(d) muestra el resultado de la PSD obtenidos mediante la transformada Welch, con

una ventana de Káiser de 100 muestras sin solapamiento, aplicado por tramos a la medición real de cabeceo de la figura 7-(b), obteniéndose variaciones de frecuencia y amplitud en cada tramo analizado.



(c) Densidad espectral de potencias para cada tramo.

(d) Frecuencia obtenida mediante PSD y estimada.

Figura 7

**Simulaciones realizadas y resultados obtenidos con datos de experimento real.**

Consecuentemente con la metodología de estimación discutida en el artículo, se presenta en la figura 7-(d) los resultados de la estimación algebraica para la frecuencia de incidencia del oleaje empleando los datos del experimento real. Se toma solamente la estimación del algoritmo durante los 30 segundos iniciales y luego se mantiene el valor estimado hasta tanto no se lleve a cabo una nueva estimación. Se puede observar una convergencia de la estimación hacia el valor real obtenido mediante la PSD; valor tomado como referencia al no disponer de otros datos como pudiera ser la velocidad del viento, altura de las olas, entre otros. Los valores exactos obtenidos del análisis espectral y las estimaciones en cada tramo analizado se exhiben en la tabla 4. Con estos valores estimados se realiza una actualización del algoritmo de filtrado mediante observador implementado en el HRC-AUV para atenuar los efectos del oleaje en la señal de mando a los actuadores.

Finalmente se muestran un grupo de simulaciones realizadas tomando como base el esquema de simulación definido en la figura 3, pero sustituyendo el modelo de 6 GDL del vehículo por las mediciones reales obtenidas del experimento con el vehículo en el mar. Además se utiliza un controlador de tipo *P-D* con ganancias  $K_p = 1.5$  y  $K_d = 1$ , que coincide con el controlador utilizado en los experimentos reales. En el conjunto de gráficas agrupadas en la figura 8 se muestra el resultado de utilizar la estimación de frecuencia para actualizar el algoritmo de filtrado de oleaje.

**Tabla 4**  
**Valores de frecuencia de incidencia de oleaje real y estimados.**

	Valor real obtenido mediante PSD	Valor estimado por el método algebraico
$\omega_{e1}$ (tramo AB)	4.122	4.183
$\omega_{e2}$ (tramo CD)	3.171	3.178
$\omega_{e3}$ (tramo EF)	2.905	2.795

Primeramente, se inicializa el filtro de oleaje a 6 rad/seg, con lo cual no se obtienen resultados satisfactorios en cuanto al filtrado de esta perturbación en el tramo inicial. Los momentos en los cuales inicia una nueva estimación de la frecuencia del oleaje se muestran mediante círculos de color negro y 30 segundos después los instantes en los que se actualiza el filtro de oleaje con los valores de frecuencia estimados, se representan por círculos color verde en las gráficas. De esta manera se logra compensar adecuadamente los componentes de alta frecuencia inducidos por las olas en cada variable utilizada para el control del movimiento horizontal del vehículo HRC-AUV. La figura 8-(a) muestra los resultados del filtrado en la variable de rumbo,

con una ampliación en la figura 8-(b). Adicionalmente en las figuras 8-(c) y 8-(d) se ilustra la mejora en la estimación de la variación del rumbo (velocidad angular- $r$ ) y la atenuación de las oscilaciones en la señal de mando (salida del controlador) respectivamente.

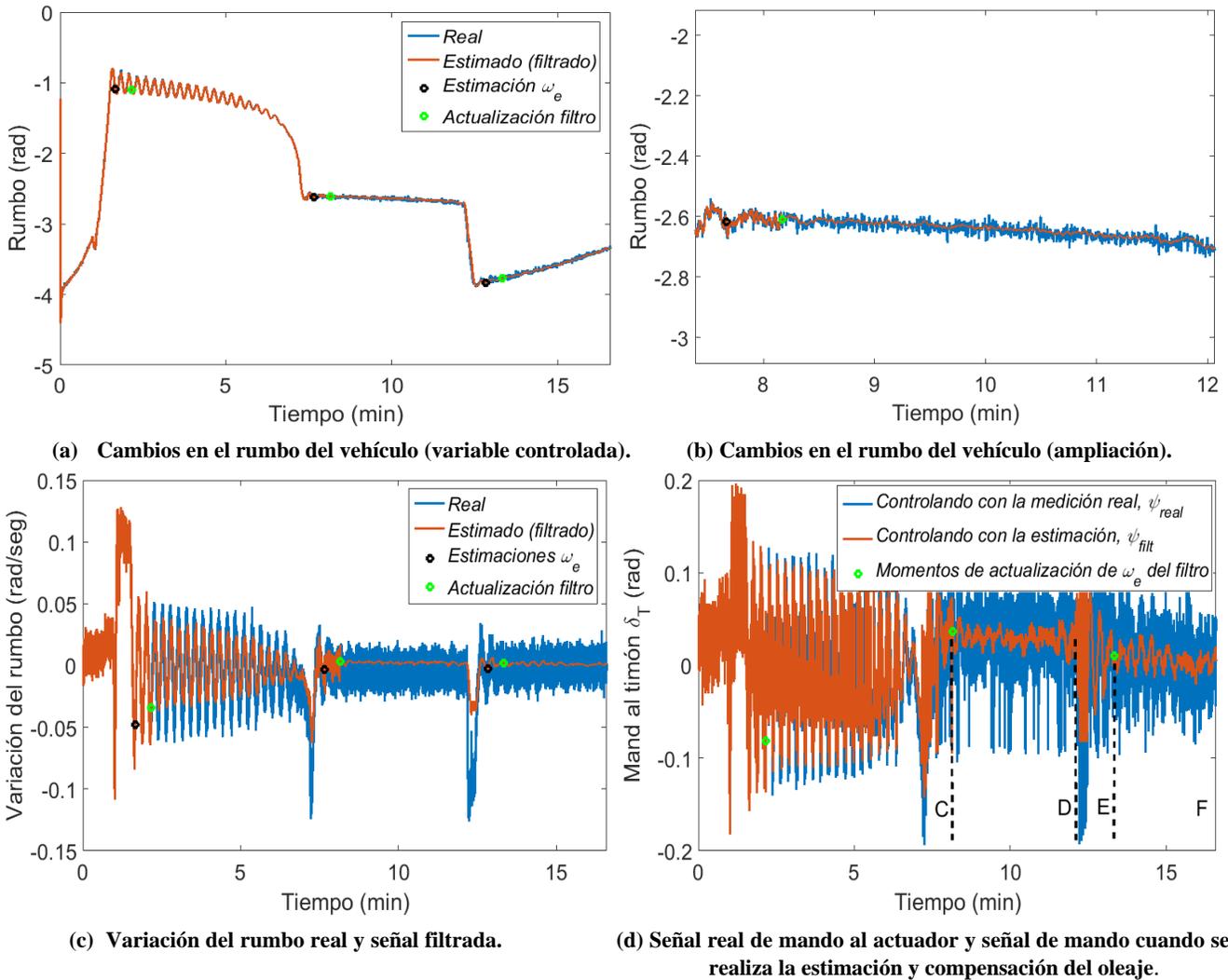


Figura 8

**Aplicación del algoritmo propuesto empleando las variables reales del control horizontal del vehículo.**

Mediante las gráficas anteriores se corrobora mediante el empleo de mediciones reales la mejora en el desempeño que se obtiene con la metodología propuesta, reduciéndose en cada tramo analizado las oscilaciones en la señal de mando en más de un 50 % para este experimento en particular.

## 6.- CONCLUSIONES

El desarrollo de un estimador algebraico y su aplicación para dar solución al problema de la estimación de la frecuencia de incidencia del oleaje sobre una embarcación marina, resulta el principal aporte del trabajo. Adicionalmente, su empleo en conjunto con la estrategia de filtrado de oleaje mediante observador de estados; empleada en el vehículo HRC-AUV, incrementa la calidad del control, reduciendo las oscilaciones en la señal de mando, incluso ante cambios en las condiciones del oleaje durante la navegación. Por lo tanto, la estimación de la frecuencia de incidencia del oleaje en el HRC-AUV tiene como finalidad realizar un adecuado ajuste de las técnicas de filtrado y compensación ya implementadas en el vehículo. Este hecho trae consigo, además, la reducción de las vibraciones en el sistema de timones del vehículo, disminuyendo la posibilidad

de desgastes y deterioro prematuro, unido a la reducción del consumo de energía lo cual resulta imprescindible en este tipo de medios autónomos que portan su propio suministro energético.

Con la propuesta de estimación algebraica de la frecuencia de incidencia de las olas haciendo uso de la aproximación lineal (8) se obtienen resultados excelentes en cuanto a la exactitud en el valor final estimado y el tiempo de convergencia. Mediante las simulaciones realizadas se constata que se puede llevar a cabo la identificación de frecuencia en un intervalo muy corto de tiempo; entre uno y dos periodos del oleaje, aspecto que lo sitúa por encima de otros estimadores empleados con esta finalidad y que emplean otras estrategias de estimación. La complejidad de la técnica algebraica mostrada resulta menor también en comparación con otros trabajos a la vez que resulta independiente de las condiciones iniciales del estimador.

Como trabajo futuro inmediato se define evaluar el empleo de distintas estrategias de estimación y filtrado para mejorar la respuesta del algoritmo ante distintos niveles de ruido en la medición utilizada, así como el comportamiento en los cruces por cero, con vistas a la implementación en el hardware de control a bordo del vehículo.

## REFERENCIAS

1. Battista T, Woolsey CA. Control of an underwater vehicle in irregular waves. Proceedings MTS/IEEE Oceans. Washington D.C.; Estados Unidos; 2015.
2. Zhongyuan L. Sensor fusion and observer design for dynamic positioning. Master Thesis. Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology; 2015. Disponible en: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A701c0244-0cb3-4e3a-99f8-52fe7bd854b9>
3. Fossen TI, Pettersen KY, Nijmeijer H. Sensing and Control for Autonomous Vehicles. 1ra. ed. Suiza: Springer International Publishing AG; 2017.
4. Belleter D, Galeazzi R, Fossen TI. Experimental verification of a global exponential stable nonlinear wave encounter frequency estimator. Ocean Engineering. 2015; 97 (2): 48-56.
5. Brodtkorb AH, Nielsen UD, Sørensen AJ. Sea state estimation using model-scale DP measurements. Oceans 2015 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Washington D.C.; Estados Unidos; 2015.
6. Fossen TI. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. 2da. ed. Noruega: John Wiley and Sons; 2011.
7. Hassani V, Sørensen AJ, Pascoal AM. A Novel Methodology for Robust Dynamic Positioning of Marine Vessels: Theory and Experiments. En: American Control Conference. Washington D.C.; Estados Unidos; Junio 17-19, 2013.
8. Bryne TH, Fossen TI, Johansen TA. 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. 2017; 31 (4): 443-444.
9. Ye H, Chen M, Zeng Q. Horizontal Motion Tracking Control for an Underwater Vehicle with Environmental Disturbances. En: Proceedings of the 36th Chinese Control Conference. Dalian; China; Julio 26-28, 2017.
10. Popov I, Koschorrek P, Haghani A, Jeansch T. Adaptive Kalman Filtering for Dynamic Positioning of Marine Vessels. IFAC Papers On Line. 2017; 50 (1): 1121-1126.
11. Liu Z. Ship Adaptive Course Keeping Control with Nonlinear Disturbance Observer. Special section on advanced modeling and control of complex mechatronic systems with nonlinearity and uncertainty. 2017; 5 (1): 17567-17575.
12. Torsetnes G. Nonlinear Control and Observer Design for Dynamic Positioning using Contraction Theory. Master Thesis. Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology NTNU; 2004.
13. Cherneva Z, Guedes C. Time-frequency analysis of the sea state with the Andrea freak wave. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014; 14: 3143-3150.
14. Garcia-Garcia D, Valeriano-Medina Y, Hernández L, Martínez A. Wave filtering for heading control of an AUV based on passive observer. Indian Journal of Geo-Marine Sciences (IJGMS). 2012; 41(6): 540-549.
15. Garcia-Garcia D, Valeriano-Medina Y, Portal-Linares JA, Hernández L. Sistema de navegación basado en modelo dinámico no lineal de vehículo autónomo sumergible. Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones RIELAC. 2015; 36(2): [13p.]. Disponible en: <http://rielac.cujae.edu.cu/index.php/riecac/article/view/285/199>

16. Valeriano-Medina Y, Hernández-Julián A, Hernández Luis. Controlador ILOS para el seguimiento de caminos en línea recta de un vehículo autónomo subacuático. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones RIELAC*. 2015; 36(2): [14p.]. Disponible en: <http://rielac.cujae.edu.cu/index.php/rieac/article/view/280/194>
17. Martínez A, Hernández L, Sahli H, Valeriano-Medina Y, Orozco-Montegudo M, Garcia-Garcia D. Model-aided navigation with sea current estimation for an autonomous underwater vehicle. *International Journal of Advanced Robotics Systems*. 2015; 12: 103–109.
18. Linares-Flores J, Hernández A, García-Rodríguez C, Sira-Ramírez H. Robust Nonlinear Adaptive Control of a “Boost” Converter via Algebraic Parameter Identification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014; 61(8): 4105 – 4114.
19. Pereira E, Trapero JR, Díaz IM, Batlle VF. Algebraic identification of the first two natural frequencies of flexible-beam-like structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011; 25 (7): 2324–2335.
20. Feliú M, San-Millan A. A fast online estimator of the two main vibration modes of flexible structures from biased and noisy measurements. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015; 20(1): 93–104.
21. Garrido R, Concha A. An algebraic recursive method for parameter identification of a servo model. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2013; 18(5): 1572–1580.
22. Beltrán F, Silva G, Sira H, Blanco A. Active vibration control using on-line algebraic identification and sliding modes. *Computación y Sistemas*. 2010; 13(3): 313–330.
23. Ghoshal D, Gopalakrishnan K, Michalska H. Algebraic Parameter Estimation Using Kernel Representation of Linear Systems. *Proceedings of the International Federation of Automatic Control, Elsevier*. 2017; 50(1): 12898-12904.
24. Trapero JR, Sira-Ramírez H, Batlle VF. An algebraic frequency estimator for a biased and noisy sinusoidal signal. *Signal processing*. 2007; 87(6): 1188-1201.
25. Ushirobira R, Perruquetti W, Mboup M, Fliess M. Algebraic parameter estimation of a biased sinusoidal waveform signal from noisy data. En: *Sysid 2012, 16th IFAC Symposium on System Identification*. Bruselas; Bélgica; 2012.
26. Trapero JR, Sira-Ramírez H, Batlle VF. On the algebraic identification of the frequencies, amplitudes and phases of two sinusoidal signals from their noisy sum. *International Journal of Control*. 2008; 81(3): 507-518.
27. Ushirobira R, Perruquetti W, Mboup M. An algebraic continuous time parameter estimation for a sum of sinusoidal waveform signals. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2016; 30(12): 1689-1713.
28. Luviano-Juárez A, Cortés-Romero J, Sira-Ramírez H. Parameter identification of a discretized biased noisy sinusoidal signal. *Measurement*. 2015; 60: 129-138.
29. Petrović P. Frequency and Parameter Estimation of Multi-Sinusoidal Signal. *Measurement Science Review*. 2012; 12(5).
30. Sira-Ramírez H, Rodríguez CG, Romero JC, Juárez AL. Algebraic identification and estimation methods in feedback control systems. 1ra. ed. Chennai, India: John Wiley & Sons; 2014.
31. Valeriano-Medina Y, Martínez A, Hernández L, Sahli H, Rodríguez Y, Cañizares JR. Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2013; 19: 175–200.
32. Ochi MK. *Ocean Waves. The stochastic approach*. 2da. ed. Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press. 1998.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses entre los mismos, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado, ni con ninguna otra institución.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

**Delvis Garcia Garcia:** contribuyó especialmente a la concepción y desarrollo de la metodología de identificación aplicada en el artículo, en la revisión bibliográfica y el estudio de los distintos métodos de estimación de parámetros utilizado en este tipo de aplicaciones. Jugó un papel fundamental en la redacción del artículo y la discusión y presentación de los

resultados obtenidos. De igual manera, participó en las correcciones realizadas derivadas del proceso de revisión, así como en la elaboración de las respuestas a los revisores.

**Jorge Peña Martín:** aporte importante también a la aplicación de la metodología de estimación empleada en el artículo al problema real planteado. Participó en la redacción del borrador del artículo, realizó una revisión bibliográfica actualizada, con el correspondiente análisis crítico e interpretación de las distintas alternativas reportadas.

**Luis Hernández Santana:** contribución en el análisis de los resultados obtenidos, así como en la propuesta de soluciones a los problemas afrontados durante el desarrollo de la metodología de identificación. Realizó importantes valoraciones para la presentación de la información. Participó en los procesos de revisión del artículo, así como en su aprobación y versión final.

**Rubén Orozco Morales:** realizó importante contribución en el análisis de la información y la discusión de los resultados. Brindó herramientas para la validación de los resultados alcanzados y participó en el proceso de corrección del artículo para su versión final.

## AUTORES

**Delvis Garcia Garcia.** M. Sc. en Automática y Sistemas Informáticos, Profesor Auxiliar del Departamento de Automática y Sistemas Computacionales de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Villa Clara, Cuba, miembro del Grupo de Automatización Robótica y Percepción, [dggarcia@uclv.edu.cu](mailto:dggarcia@uclv.edu.cu), <https://orcid.org/0000-0001-5748-581X>. Investiga en el desarrollo de estrategias de estimación e integración sensorial para su empleo en vehículos autónomos.

**Jorge Peña Martín.** Ingeniero en Automática, Profesor Instructor del Departamento de Automática y Sistemas Computacionales de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, UCLV, Villa Clara, Cuba, miembro del GARP, [jopena@uclv.edu.cu](mailto:jopena@uclv.edu.cu), <https://orcid.org/0000-0002-4627-8775>. Se encuentra investigando en tareas relacionadas con el procesamiento digital de señales, así como en estrategias de estimación y filtrado.

**Luis Hernández Santana.** Dr. C. y Profesor Titular del Departamento de Automática y Sistemas Computacionales de la UCLV, Villa Clara, Cuba, jefe del Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP), [luishs@uclv.edu.cu](mailto:luishs@uclv.edu.cu), <https://orcid.org/0000-0003-0558-3690>. Especialista en robótica, particularmente el modelado y control de robots móviles para distintas aplicaciones.

**Rubén Orozco Morales.** Máster en Sistemas y Redes de Telecomunicaciones (Univ. Politécnica de Madrid, 1994), Dr. C. (UCLV, 1998), Profesor Auxiliar del Departamento de Automática y Sistemas Computacionales de la UCLV, Villa Clara, Cuba, miembro del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP), [rorozco@uclv.edu.cu](mailto:rorozco@uclv.edu.cu), <https://orcid.org/0000-0002-6240-1569>. Especialista en procesamiento digital de señales y procesamiento de imágenes.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)