

# AUTOMATIZACIÓN DE MANIOBRAS PARA UN TEC DE 2GdL

Marina P. Portilla, José A. Somolinos, Amable López

E.T.S.I. Navales, U. Politécnica de Madrid. {marinap.portilla; joseandres.somolinos; amable.lopez}@upm.es

Rafael Morales, Eva Segura

E.I. Industriales de Albacete, U. de Castilla-La Mancha. {rafael.morales; eva.segura}@uclm.es

## Resumen

*En los últimos años ha habido una gran evolución en los dispositivos de aprovechamiento de la energía de las mareas y corrientes marinas. Los dispositivos cuya profundidad de operación no excede de los 40 metros, denominados TECs de primera generación, suelen fijarse al fondo marino mediante una estructura de obra civil, por lo que requieren que sus góndolas sean extraídas de sus bases para realizar las operaciones de mantenimiento. Actualmente se necesitan buques de muy altas prestaciones muy costosos para realizar las operaciones de extracción de las góndolas. La automatización de estas maniobras de emersión e inmersión de las góndolas conducirá, sin duda, a una importante reducción de costes, precisando buques de menores prestaciones para llevar a cabo estas tareas. En este trabajo se presenta un modelo dinámico simple, de dos grados de libertad, para un TEC de primera generación, además de un sistema de control de profundidad y/u orientación mediante actuadores pasivos, utilizando un sistema de agua de lastre interno a la góndola. Por último, se presentan diferentes simulaciones numéricas, tanto de la maniobra de emersión para proceder a las tareas de mantenimiento generales, como de la maniobra para la limpieza de palas, con el fin de poder juzgar la eficacia del modelo dinámico y del regulador diseñado.*

**Palabras clave:** Convertidores de energía de las corrientes marinas, energía renovable marina, modelado dinámico, control no lineal.

## 1. INTRODUCCIÓN

La energía de las mareas y corrientes marinas es una fuente renovable que puede ayudar a alcanzar los objetivos de cambio climático marcados por la UE además de aportar un valor adicional en un mercado energético futuro con respecto a otras fuentes de energía renovable gracias a su alta previsibilidad ([3] y [6]). Es por esto que varios fabricantes están desarrollando dispositivos para su aprovechamiento en áreas donde la profundidad no excede los 40 metros ([2], [1], [13], [7]), como el mostrado en la figura 1.

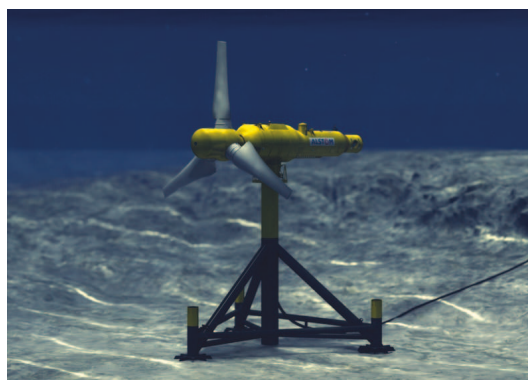


Figura 1: TEC de primera generación

Al tratarse de dispositivos completamente sumergidos, las tareas de mantenimiento de las unidades principales de potencia requieren de su extracción del lecho marino [10], [12]. Estas maniobras se realizan utilizando buques especiales, de muy altas prestaciones, equipados con posicionamiento dinámico, grúas, etc. además realizarse durante una ventana temporal apropiada, lo que da como resultado un alto costo en estas tareas. En la figura 2 se muestra un ejemplo de buque necesario para el manejo de la unidad de potencia principal de un TEC de primera generación.



Figura 2: Buque sofisticado manejando una unidad de generación de energía

Para promover la viabilidad de este tipo de dispositivos resulta primordial la reducción de costes [11], ya sean de instalación, operación o de mantenimiento. La reducción de estos últimos pasa por la realización de maniobras de emersión y de inmersión de manera automática ([4], [8]). Esto puede llevarse a cabo mediante un sistema de las-

tres que, generando únicamente fuerzas verticales, permita controlar sus movimientos de emersión y de inmersión. Esta automatización permitirá reducir el número y duración de los procedimientos de instalación, reducirá el coste de la energía produciendo un aumento en la rentabilidad del proyecto, además de ser precisa una menor intervención humana, maximizando las ventanas temporales favorables y sustituyendo los buques altamente especializados por buques de propósito general, y por tanto menos costosos, como remolcadores, para llevar a cabo estas tareas. (Ver figura 3, de [9]).



Figura 3: Ejemplo de maniobra de inmersión automatizada con control de agua de lastre

Este trabajo presenta un modelado dinámico muy simple para un TEC de primera generación, cuya forma ha sido adaptada para incluir los tanques de lastre necesarios. Se presenta también un sistema de control no lineal basado en un término de desacoplamiento y compensación de términos no lineales, para el control en bucle cerrado de la profundidad y/u orientación del dispositivo, asegurando un comportamiento adecuado cuando el TEC realiza maniobras de emersión e inmersión manejando actuadores que generan fuerzas únicamente hidrostáticas.

## 2. Modelo Dinámico

El TEC presentado en este trabajo ha sido diseñado para realizar maniobras de emersión/inmersión automáticas. Para ello se ha tenido que alargar la góndola e incluir los tanques de lastre ([5]) tal y como muestra la figura 4.

Para el diseño del modelo para control se utilizan dos sistemas de referencia, por un lado un sistema de referencia fijo, denominado  $S_0$  y un sistema de referencia local, denominado  $S$ . Las coordenadas del dispositivo se definen con respecto a  $S_0$ , cuyo eje  $x$  es perpendicular al plano del dispositivo, horizontal y sigue la dirección de la corriente, el eje  $z$  es vertical con orientación ascendente; y el eje  $y$  conforma un sistema dextrógiro. El origen de  $S_0$  está situado sobre la vertical del dispositivo y en el nivel nominal del mar.

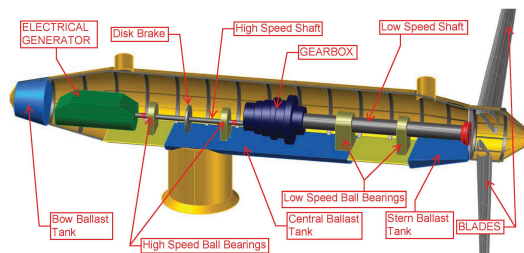


Figura 4: Aspecto de la góndola central modificada del TEC de primera generación

Para la obtención del modelo dinámico para control, de dos grados de libertad (la profundidad,  $z(t)$ , y la rotación alrededor del  $y$ ,  $\theta(t)$ ) se utilizan únicamente dos masas concentradas [9] tal y como se ve en la figura 5, donde se representa su posición así como las fuerzas hidrostáticas aplicadas y el criterio de signos. En esta figura se puede ver la existencia de un pequeño desplazamiento vertical  $\epsilon_z$  de  $m_2$  con el que se modela que el centro de gravedad del dispositivo está por debajo de su centro de carena para asegurar su estabilidad.

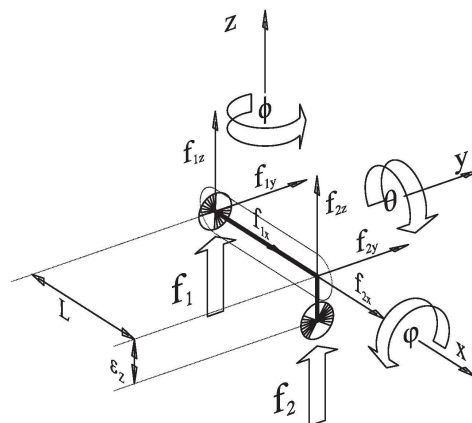


Figura 5: Modelo dinámico de dos masas concentradas

Se consideran por separado la dinámica de traslación según el eje  $z$  y la dinámica de rotación con respecto al eje  $y$ , un ángulo  $\theta$ . Comenzando por la dinámica de traslación vertical se tiene:

$$(m_1 + m_2 + m_{Add}) \ddot{z} + \nu_z \cdot \text{sign}(\dot{z}) \cdot \dot{z}^2 = f_g + f_b \quad (1)$$

donde los subíndices  $i = 1, 2$  representan la masa a la que hacen referencia,  $m_{Add} = m_{Add}(z(t), \theta(t))$  expresa la masa añadida, el coeficiente  $\nu_z$  denota el coeficiente de fricción y  $f_g$  y  $f_b$  son respectivamente las fuerzas de gravedad y de empuje, que se calculan como:

$$\begin{aligned} f_{ig} &= -m_i \cdot g \\ f_{ib} &= V_i(t) \cdot \rho_w \cdot g \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_i(t) &= \frac{1}{2} \cdot [V_0 + V_{Compr}] - V_{Buoy-i} + \Delta V_{u-i} \\ V_{Buoy-i}(t) &= V_{Buoy-i}(z(t), \theta(t)) \\ V_{Compr}(t) &= \gamma_0 \cdot z(t) \end{aligned}$$

donde  $f_g = f_{1g} + f_{2g}$  y  $f_b = f_{1b} + f_{2b}$ ,  $g$  es la constante de la gravedad,  $V_i(t)$  expresa el volumen sumergido,  $V_0$  representa el volumen nominal del dispositivo por lo que  $m_1 + m_2 = \rho_w \cdot V_0$ ,  $V_{Buoy-i}$  es la pérdida de empuje que se produce cuando el dispositivo no está completamente sumergido,  $\gamma_0$  denota el coeficiente de compresibilidad,  $\Delta V_{u-i}(t)$  es el volumen de control,  $V_{Compr}(t)$  expresa la pérdida de volumen debido a la compresibilidad,  $\rho_w$  es la densidad del agua del mar, considerada constante.

En lo relativo al movimiento de rotación se tiene:

$$(I_{yy} + I_{yy-Add}) \ddot{\theta} + \nu_\theta \cdot \text{sign}(\dot{\theta}) \dot{\theta}^2 = (f_1 - f_2) \frac{LC_\theta}{2} + f_2 \epsilon_z S_\theta$$

$$I_{yy} = (m_1 + m_2) \frac{L^2}{4} + m_2 \epsilon_z^2 \quad (3)$$

donde  $S_\theta \equiv \sin \theta$ ,  $C_\theta \equiv \cos \theta$ ,  $I_{yy}$  es el momento de inercia en el eje  $y$ ,  $I_{yy-Add}$  representa el efecto de la masa añadida,  $\nu_\theta$  es el coeficiente de fricción,  $L$  indica la eslora nominal del cilindros y  $\epsilon_z$  denota el desplazamiento vertical de  $m_2$  comentado anteriormente.

Finalmente se define la matriz de desacoplamiento que relaciona las fuerzas  $f_z$  y momentos  $\Gamma_y$ , con los volúmenes de control  $V_{u-i}(t)$ :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} f_z \\ \Gamma_y \end{bmatrix}}_{\Xi} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{LC_\theta}{2} & -\frac{LC_\theta}{2} + \epsilon_z S_\theta \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}(\mathbf{q})} \cdot \underbrace{\rho_w \cdot g \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{u-1} \\ \Delta V_{u-2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{F}} \quad (4)$$

Se observa que la matriz  $\mathbf{M}$  es invertible para todo el rango deseado de  $-\pi/2 \leq \theta \leq 0 \text{ rad}$  debido al desplazamiento  $\epsilon_z$ , incluido en el modelo.

Finalmente, el modelo dinámico en forma matricial, se expresa como (donde  $\mathbf{q}(t) = [z(t) \ \theta(t)]^T$ ):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} f_z \\ \Gamma_y \end{bmatrix}}_{\Xi} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{LC_\theta}{2} & -\frac{LC_\theta}{2} + \epsilon_z S_\theta \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}(\mathbf{q})} \cdot \underbrace{\rho_w \cdot g \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{u-1} \\ \Delta V_{u-2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{F}} \quad (5)$$

### 3. Esquema de Control

La figura 6 muestra el esquema de control propuesto de dos grados de libertad para un TEC de primera generación. El regulador, con realimentación no lineal,  $\mathbf{q}(t) = [z(t), \theta(t)]^T$ , cumple:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{q}(t)] \cdot [\mathbf{B} \cdot \mathbf{\Gamma}(t) + \mathbf{V}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))] \quad (6)$$

donde  $\mathbf{\Gamma}(t)$  es:

$$\mathbf{\Gamma}(t) = \ddot{\mathbf{q}}^* - \mathbf{K}_D [\dot{\mathbf{e}}_q] - \mathbf{K}_P [\mathbf{e}_q(t)] - \mathbf{K}_I \int [\mathbf{e}_q] d\tau \quad (7)$$

siendo  $\mathbf{e}_q(t) = \mathbf{q}(t) - \mathbf{q}^*(t)$  y  $\mathbf{K}_P$ ,  $\mathbf{K}_I$  y  $\mathbf{K}_D \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$  matrices diagonales definidas positivas.

Como se puede observar en la figura 6, el esquema de control está compuesto por un término de compensación y una matriz de desacoplamiento, basado en el modelo dinámico del TEC propuesto, que obtiene una relación entre entrada/salida lineal y desacoplada; y un bucle externo, basado en una acción de control lineal estabilizante. Los términos,  $\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}(t))$  y  $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})(t)$ , son computados en línea, ya que las matrices que componen el bucle de realimentación dependen de los valores actuales de las variables internas del sistema  $\mathbf{q}$  y  $\dot{\mathbf{q}}$ . Por otro lado, el objetivo principal del bucle exterior es estabilizar el sistema global. Hay que reseñar que se está operando con un sistema multivariable, y dependiente del tiempo de  $2 \times 2$ .

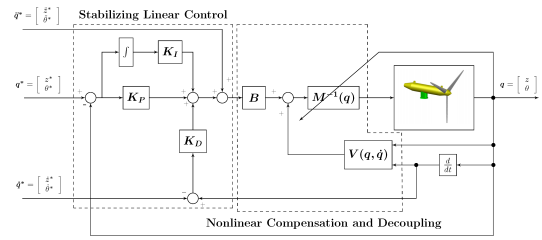


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema de control no lineal propuesto

Sustituyendo las expresiones (6) y (7) en la ecuación obtenida del modelo dinámico diseñado, se tiene:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}^* - \mathbf{K}_D [\dot{\mathbf{e}}_q] - \mathbf{K}_P [\mathbf{e}_q] - \mathbf{K}_I \int [\mathbf{e}_q(\tau)] d\tau \quad (8)$$

La señal del error en bucle cerrado,  $\mathbf{e}_q$  evoluciona según la siguiente ecuación diferencial de  $2 \times 2$ , de tercer orden:

$$\mathbf{e}_q^{(3)}(t) + \mathbf{K}_D \ddot{\mathbf{e}}_q(t) + \mathbf{K}_P \dot{\mathbf{e}}_q(t) + \mathbf{K}_I \mathbf{e}_q(t) = 0 \quad (9)$$

Las matrices del regulador,  $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$  deben diseñarse de modo que se ajuste al siguiente polinomio de  $2 \times 2$ , matricial, complejo y diagonal,  $\mathbf{p}(s)$ , definido como:

$$\mathbf{p}(s) = \mathbf{I}^{2 \times 2} s^3 + \mathbf{K}_D s^2 + \mathbf{K}_P s + \mathbf{K}_I = 0 \quad (10)$$

como polinomios Hurwitz de tercer grado. La estabilidad de la expresión (9) puede estudiarse utilizando el criterio de Routh-Hurwitz. Teniendo en cuenta que las matrices  $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$  son diagonales, la estabilidad de  $\mathbf{e}_q(t) = [e_z(t); e_\theta(t)]^T = [z(t) - z^*(t); \theta(t) - \theta^*(t)]^T$ , puede estudiarse de forma independiente. Aplicando el criterio de Routh-Hurwitz se obtienen las siguientes condiciones de

estabilidad: (i)  $K_{D_i}, K_{P_i} > 0$ ; (ii)  $0 < K_{I_i} < K_{D_i} K_{P_i}$  para  $i = z, \theta$ .

$$\mathbf{p}^{\text{des}}(s) = (\mathbf{I}^{2 \times 2} s^2 + 2\zeta_c \omega_c s + (\omega_c)^2) \cdot (\mathbf{I}^{2 \times 2} s + \mathbf{p}_c) \quad (11)$$

donde  $\zeta_c$ ,  $\omega_c$  y  $\mathbf{p}_c \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  son matrices diagonales definidas positivas. Los valores de las ganancias se obtienen identificando los términos de la expresión (10) con los de (11). El valor de las matrices de las ganancias del regulador,  $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$  del controlador no lineal propuesto, queda como:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_D &= 2\zeta_c \omega_c + \mathbf{p}_c \\ \mathbf{K}_P &= (\omega_c)^2 + 2\zeta_c \omega_c \mathbf{p}_c \\ \mathbf{K}_I &= (\omega_c)^2 \mathbf{p}_c \end{aligned} \quad (12)$$

## 4. Simulaciones

Se han realizado diferentes simulaciones numéricas para verificar el comportamiento del regulador en términos de controlabilidad del generador, capacidad de realizar maniobras de emersión e inmersión, convergencia rápida de los errores de seguimiento, respuestas transitorias suaves, bajo esfuerzo de control y robustez respecto a las incertidumbres paramétricas del modelo. Los valores de los parámetros físicos del TEC de primera generación utilizados son:  $m_1 = m_2 = 38545$  [kg],  $m_{Add} = 55119$  [kg],  $L = 16,8$  [m],  $\rho_W = 1025$  [kg/m<sup>3</sup>],  $g = 9,81$  [m/s<sup>2</sup>],  $I_{yy} = 5439470,4$  [kgm<sup>2</sup>],  $I_{yy \text{ Add}} = 3889197$  [kgm<sup>2</sup>],  $\nu_z = 24830$  [kg/m],  $\nu_\theta = 18204$  [kgm] y  $\epsilon_z = 0,1$  [m]. Además hay que mencionar que, debido a la dificultad de modelar adecuadamente todos los términos dinámicos, se han incluido errores del 10% en todos los términos que componen las matrices  $\mathbf{M}(\mathbf{q}(t))$  y  $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}(t))$ . Los valores de  $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$  se calcularon según el procedimiento explicado en la sección anterior, considerando raíces reales puras y teniendo en cuenta la evolución deseada del vector de error de seguimiento  $\mathbf{e}_q(t)$ . Los valores de las matrices del vector polinómico de Hurwitz deseado, se han fijado como  $\zeta_c = \text{diag}(1,2,1,2)$ ,  $\omega_c = \text{diag}(0,15,0,15)$  y  $\mathbf{p}_c = \text{diag}(2,2)$ . El tiempo de muestreo utilizado en las simulaciones es de 0,2s.

### 4.1. Tarea general de mantenimiento

La saturación de los actuadores utilizados para producir fuerzas verticales limita la posibilidad de realizar maniobras de emersión/inmersión. En esta simulación, se mantiene la orientación del TEC y se diseña una trayectoria de tipo lineal con tramos polinómicos de orden 6 para la profundidad, asignando un perfil de velocidad cuasi trapezoidal, una velocidad de crucero y una desaceleración constante.

En la figura 7 se puede ver la evolución de los estados dinámicos del sistema no lineal obtenida para

cada uno de los movimientos independientes del TEC. El sistema funciona extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin sobreoscilaciones. Como se puede ver la góndola está en todo momento completamente sumergida mientras que una fracción de la hélice permanece fuera del mar. La figura 8 muestra la evolución de los volúmenes de control encargados de producir las fuerzas verticales adecuadas que permiten el control de la profundidad y la orientación del dispositivo. Finalmente, en la figura 9 se muestra la secuencia realizada, donde se puede comprobar como la orientación del dispositivo se mantiene todo el tiempo prácticamente constante, a pesar de la pérdida no lineal de flotabilidad causada por la hélice.

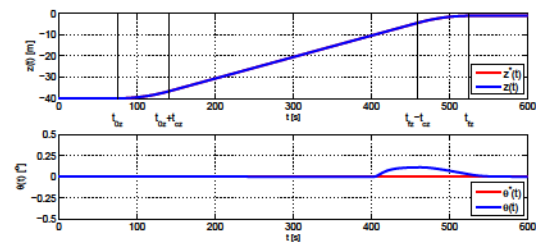


Figura 7: Maniobra de emersión. Evolución de la profundidad y la orientación del dispositivo

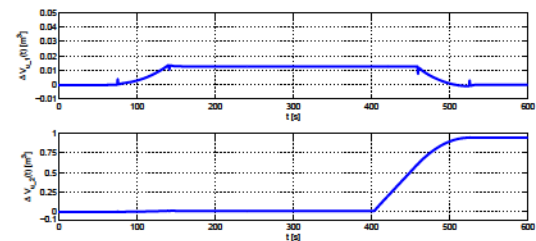


Figura 8: Maniobra de emersión. Evolución de los volúmenes de control

### 4.2. Tareas de mantenimiento de limpieza de palas

En este caso, se necesita variar de forma simultánea tanto la profundidad, como la orientación, partiendo de una posición del TEC horizontal para terminar en vertical con las palas hacia arriba facilitando así la tarea de mantenimiento. En la figura 10 se muestra la evolución tanto de la profundidad como de la orientación. Al igual que en el caso anterior, el sistema funciona extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin presentar sobreoscilación. La figura 11 muestra la evolución de los volúmenes de control encargados de producir las fuerzas verticales adecuadas que permiten el control de la profundidad y la orientación del dispositivo. En ella se

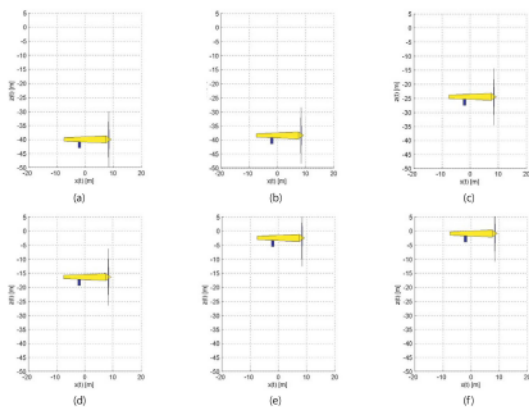


Figura 9: Secuencia visual de la maniobra de emergencia: (a)  $t = 0s$ , (b)  $t = 120s$ , (c)  $t = 260s$ , (d)  $t = 340s$ , (e)  $t = 480s$  y (f)  $t = 600s$

observa un aumento considerable de los volúmenes de control cuando la orientación del sistema es cercana a  $90^\circ$ , debido a que el sistema está cerca de una configuración singular, aunque  $M(q)$  sigue siendo no singular. Por último, la figura 12 muestra la secuencia de emergencia para la realización de la tarea de mantenimiento de limpieza de palas.

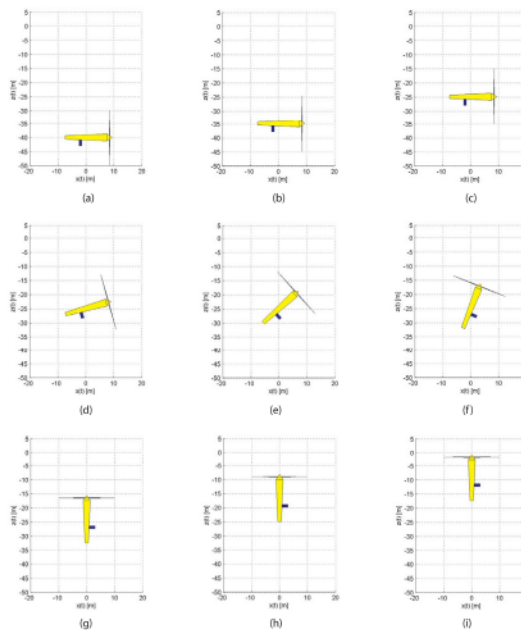


Figura 12: Secuencia visual de la maniobra de emergencia para limpieza de palas: (a)  $t = 0s$ , (b)  $t = 60s$ , (c)  $t = 160s$ , (d)  $t = 230s$ , (e)  $t = 275s$ , (f)  $t = 320s$ , (g)  $t = 400s$ , (h)  $t = 480s$  e (i)  $t = 600s$

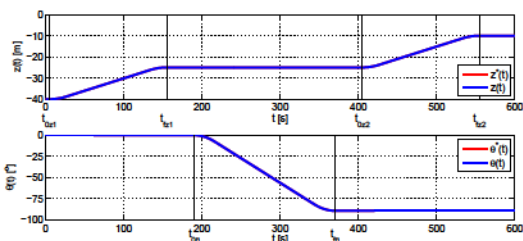


Figura 10: Maniobra de emergencia para limpieza de palas. Evolución de la profundidad y la orientación del dispositivo

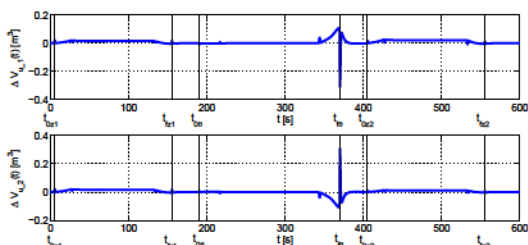


Figura 11: Maniobra de emergencia para limpieza de palas. Evolución de los volúmenes de control

### 5. Conclusiones

La explotación de energías renovables de mareas y corrientes oceánicas cuando la columna de agua es inferior a 40 metros permite la instalación de

los denominados dispositivos de primera generación. Se buscan nuevas soluciones para la automatización de las maniobras de emergencia/inmersión del TEC para mejorar su competitividad económica, ya que se disminuirían enormemente los costos de mantenimiento. El rendimiento de estas maniobras automatizadas se basa en el correcto control en bucle cerrado del agua de lastre utilizada como actuador hidrostático para producir fuerzas verticales. Se han rediseñado algunos aspectos de la góndola con el fin de incluir los tanques de lastre.

Este artículo propone un modelo dinámico muy simple, que puede ser utilizado para controlar un TEC de primera generación, concebido para aprovechar la energía de las corrientes marinas. El modelo dinámico, de dos grados de libertad se obtiene de únicamente dos masas concentradas, colocadas en un plano. El control de estos dos grados de libertad se realiza únicamente por control de agua de lastre. También se ha presentado una ley de control no lineal, para asegurar un comportamiento adecuado cuando el TEC realiza maniobras de emergencia e inmersión. El esquema de control está compuesto por un término de compensación de la fricción y una matriz de desacoplamiento basados en el modelo dinámico del TEC de primera generación y un bucle de realimentación, basado en una acción de control lineal estabilizante que opera con el vector de error de seguimiento. El método de control propuesto es simple, computacio-

nalmente eficiente y fácilmente implementable en un sistema basado en microprocesador. Finalmente, se han llevado a cabo diferentes simulaciones numéricas verificando el buen comportamiento del regulador diseñado en términos de controlabilidad del generador, capacidad de realizar maniobras de emersión e inmersión con actuadores hidrostáticos (o pasivos), convergencia rápida de los errores de seguimiento en el entorno del cero, respuestas transitorias suaves, el bajo esfuerzo de control y la robustez en el caso de las incertidumbres paramétricas del modelo. Se han diseñado diferentes secuencias de emersión para mostrar la capacidad del TEC para realizar diferentes maniobras, manteniendo la orientación o tareas de mantenimiento para la limpieza de palas con cambio simultáneo de profundidad y orientación. Los resultados obtenidos muestran que el sistema funciona extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin sobreoscilaciones incluso cuando el dispositivo no está completamente sumergido y tiene una fuerte interacción con la superficie libre.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, bajo los Proyectos Nacionales DPI2014-53499R y TEC2016-80986R. Los autores agradecen a Lorenzo Fernández la realización de las simulaciones gráficas.

### Referencias

- [1] Alstom Tidal Turbines Web Page. Disponible online: <http://alstomenergy.gepower.com/products-services/product-catalogue/power-generation/renewable-energy/ocean-energy/tidal-energy/tidal-power/index.html>.
- [2] Andritz Hydro Hammerfest. How it Works. Disponible online: <http://www.andritz.com/hy-hammerfest.pdf>.
- [3] Brito, A; Villate, J.L., (2014) Implementing Agreement on Ocean Energy Systems. Annual Report; The Executive Committee of Ocean Energy Systems: Lisbon, Portugal.
- [4] Carbon Trust, (2011) "Accelerating Marine Energy: The Potential for Cost Reduction Insights from the Carbon Trust Marine Energy Accelerator". Disponible online: <https://www.carbontrust.com/media/5675/ctc797.pdf>.
- [5] Espín, G. Montserrat, M., (2015) "Modelado Dinámico y Control de Maniobras de Dispositivos Submarinos." Ph.D. Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- [6] Hardisty, J., (2009) *The Analysis of Tidal Stream Power*; Wiley: Hoboken, NJ, USA.
- [7] López, A.; Núñez, L.R.; Somolinos, J.A., (2011) "Modelado energético de convertidores primarios para el aprovechamiento de las energías renovables marinas", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol 11, pp 224-235.
- [8] López, A., Núñez, L.R., Somolinos, J.A., Valle, J., (2011) "Dynamic behavior of a second generation hydrokinetic converter." *Proceedings IEEE International Conference on Oceanic Engineering (OCEANS 11)*, Santander, España, 6-9 de junio de 2011.
- [9] Morales, R.; Fernández, L.; Segura, E.; Somolinos, J.A., (2016) "Maintenance Manuever Automation for an Adapted Cylindrical Shape TEC." *Energies*, 9, 746.
- [10] Nautricity Web Page, (2016). Disponible online: <http://www.nautricity.com/cormat/>.
- [11] Núñez, L.R.; López, A.; Somolinos, J.A.; Robledo, F., (2012), "Conceptual design of an ocean current turbine for deeper waters" *.Maritime Engineering and Technology*, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2012, pp 607-612.
- [12] Tocardo Web Page, (2016). Disponible online: <http://www.tocado.com>.
- [13] Verdant Power. Kinetic Hydropower System (KHPS), (2006). Disponible online: <http://www.verdantpower.com/kinetic-hydropower-system.html>.