

CONTROL DE UN NUEVO DISPOSITIVO DE APROVECHAMIENTO DE CORRIENTES MAREALES DE SEGUNDA GENERACIÓN

Amable López Piñeiro¹, José Andrés Somolinos Sánchez¹
Grupo de Investigación Tecnológico en Energías Renovables Marinas –GIT-ERM–
ETS Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Memoria 4. 28040 Madrid.
{amable.lopez; joseandres.somolinos}@upm.es

Rafael Morales Herrera²
ETS Ingenieros Industriales. Universidad de Castilla-La Mancha.
Campus Universitario s/n. 02001. Albacete.
Rafael.morales@uclm.es

Resumen

En este trabajo se presenta un nuevo dispositivo para el aprovechamiento de energía de las corrientes de segunda generación, así como el modelado dinámico y el sistema de control propuesto para el aprovechamiento de corrientes mareales a partir de la gestión del agua de lastre contenida en sus torpedos. El modelo dinámico propuesto está basado en un modelo planar de tres masas distribuidas (ubicadas en los dos flotadores y en la góndola central) provisto de dos grados de libertad. Por otro lado, se ha desarrollado una ley de control no lineal basada en la compensación de los términos de fricción para el control de profundidad y/o de orientación de forma que se asegure un comportamiento adecuado cuando el dispositivo realice maniobras de cambios de profundidad y orientación. La validación del algoritmo de control ha sido llevada a cabo usando el modelo dinámico disponible en el entorno de simulación Orcina OrcaFlex mediante la interfaz Matlab-OrcaFlex de diseño propio.

Palabras clave: Energías Renovables Marinas. Control Multivariable. Dispositivos sumergidos.

1 INTRODUCCIÓN

La lucha contra el cambio climático y la búsqueda de las denominadas “energías limpias”, ha provocado un creciente interés en las energías renovables en general y en las energías renovables marinas en particular [20], [1]. Dentro de las fuentes de energía extraíble del océano, caben destacar las procedentes de: las olas, las mareas, las corrientes marinas, los gradientes térmicos y los gradientes salinos. Este conjunto supone uno de los campos con mayor potencial de desarrollo [24], [12]. En los últimos años se han concebido y desarrollado distintos

dispositivos para posibilitar el aprovechamiento energético proveniente del océano [8],[10], si bien todavía quedan por resolver una serie de retos ligados a la operación en el ámbito marino.

En estos momentos ya se puede considerar como consolidada a nivel industrial la energía eólica offshore (fuera-costa) en aguas poco profundas, con dispositivos apoyados en el fondo marino, denominados de 1ª generación [22], [16], [23]. Además ya existen dispositivos flotantes probados, que operan en aguas profundas, denominados de 2ª generación. Con ellos se están construyendo los primeros parques de dispositivos eólicos flotantes [18].

Con respecto a los dispositivos de aprovechamiento de la energía de las olas, se han desarrollado diferentes dispositivos [7], [3], [14], pero existen importantes dificultades de instalación y operación por problemas en su supervivencia ante temporales.

Mientras que el nivel de desarrollo de los dispositivos de aprovechamiento, tanto de gradientes térmicos como salinos, puede considerarse como embrionario, en lo relativo al aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas hay un desarrollo creciente, probablemente provocado por representar éstas, las corrientes marinas y las mareas, la fuente de energía renovable más predecible [12]. En la actualidad ya existen dispositivos de aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas operando en aguas poco profundas, apoyados en el fondo marino, denominados de 1ª generación [11], [21], [2], [5]. El desarrollo de estos dispositivos de aprovechamiento de las corrientes, comúnmente denominados Tidal Energy Converters (TECs) fondeados, en lugar de apoyados en el fondo, conocidos como dispositivos de 2ª generación [17], tiene un gran interés, ya que permite la extracción de energía en aguas profundas. Se estima que el 80% de la energía de las corrientes se localiza en zonas con más de 40 m de profundidad [9], que se considera la profundidad límite para los dispositivos de 1ª generación [15].

En la figura 1 se muestran algunos ejemplos de dispositivos de aprovechamiento de la energía de las corrientes de 2ª generación. En ellos las operaciones de instalación, movimientos en operación, mantenimiento y desmontaje son fundamentales. Para la realización de estas operaciones, la posibilidad de realizar de forma automática maniobras que conlleven cambios de profundidad y de orientación del TEC resulta de enorme importancia, sin embargo los artefactos oceánicos que operan sumergidos presentan una problemática singular para el control de sus movimientos (De la [4], [6]. Históricamente, los submarinos han sido los vehículos sumergidos pioneros, seguidos de los ROVs y AUVs como vehículos no tripulados, apareciendo en la última década nuevos tipos de artefactos, como los dispositivos objeto de estudio en este trabajo, todos ellos con capacidad de realizar movimientos.

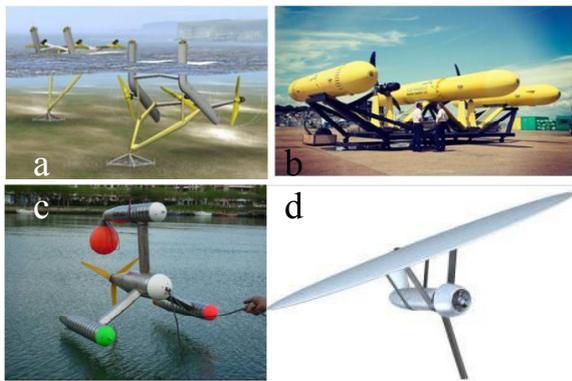


Figura 1: Ejemplos de TECs de 2ª generación; a) TidalStream, b) Plat-O, c) GESMEY y d) Minesto.

2 BREVE DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO HIVE-TEC/6fr

La figura 2 muestra el aspecto de un dispositivo de aprovechamiento de las corrientes (Denotado en el ámbito sajón como TEC, de Tidal Energy Converter) multirrotor, de segunda generación, y de disposición rectangular, que fue patentado por –GIT-ERM– [13]. En él puede apreciarse cómo se alternan los flotadores y las unidades generadoras de energía, unidos entre sí por una estructura en celosía. En el torpedo central se ubican los elementos eléctricos y electrónicos principales de potencia para la gestión y exportación de la energía eléctrica extraída, y de él parten dos cables responsables de las funciones de conexionado eléctrico con el exterior. Por último, un sistema de fondeo basado en cables de acero une al dispositivo con el fondo del mar.

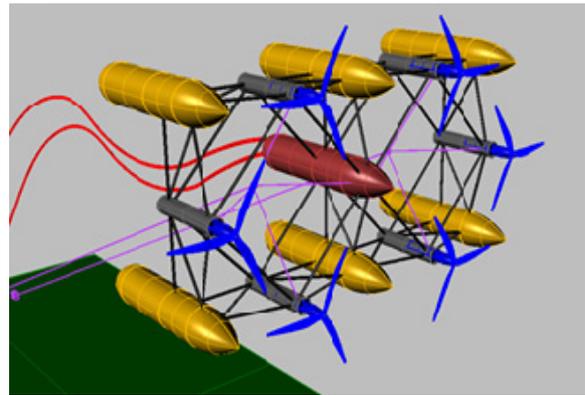


Figura 2: Perspectiva del generador multi-rotor.

Los principales valores y dimensiones del dispositivo propuesto se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros principales de HIVE-TEC/6fr.

Parámetros Principales	
Potencia nominal (kW)	6 x 120
Longitud de Torpedos (m)	11,5
Ancho (Sin palas)	22
Altura (Sin palas)	12
Desplazamiento (t)	204
Peso (t)	100,2
Capacidad de Lastre (m ³)	108

Este dispositivo está provisto de únicamente dos grados de libertad: la profundidad y la orientación de cabeceo. Por ello se propone trabajar únicamente con la proyección en dos dimensiones. En la figura 3 se muestra el aspecto general del TEC simplificado. Puede apreciarse cómo el dispositivo objeto de estudio está provisto de sólo dos flotadores, donde se sitúan los tanques de lastre, además de una unidad generadora, unida a los flotadores mediante cuatro riostras.

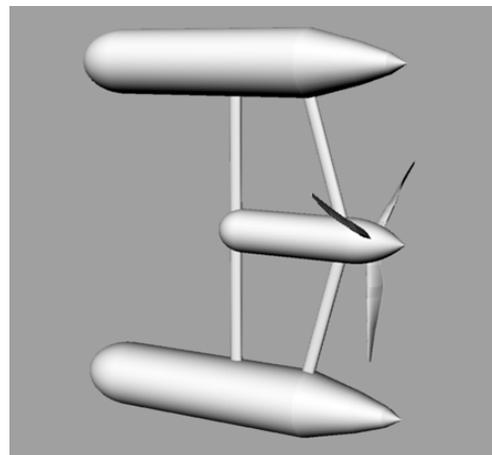


Figura 3. Aspecto general del dispositivo 2D simplificado

3 SISTEMA DE CONTROL

3.1 MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DEL DISPOSITIVO 2D

El modelo dinámico que se propone para el diseño del sistema de control del dispositivo 2D se considera de máxima sencillez, aunque fuertemente acoplado en lo que se refiere a los movimientos vertical y de rotación. Se parte de una distribución de tres masas puntuales, dos de las cuales se ubican en los dos flotadores, m_1 y m_2 , y la tercera en la góndola central, m_C . La masa total del dispositivo resulta $m = m_C + m_1 + m_2$. Cada una de las masas ubicadas en los respectivos flotadores está situada a una distancia vertical L con respecto al centro de carena del dispositivo (CC).

La figura 4 muestra la disposición de las tres masas así como las fuerzas hidrostáticas generadas por los actuadores, f_1 y f_2 . También se han representado la posición y orientación de los sistemas de referencia locales, del sistema de referencia fijo S_0 , sobre el que se mide la profundidad del dispositivo con respecto a la superficie del mar, y del sistema de referencia S_C sobre el que se mide la orientación con respecto a su eje y_C , con origen en el CC, siendo y_C perpendicular al dispositivo, y el plano $x_C y_C$ paralelo al lecho marino. Con el fin de evitar singularidades con respecto al eje de giro y_C , se modela la ubicación de la masa m_2 ligeramente desplazada una distancia ϵ_x según el eje u_2 local (popa en la figura 4).

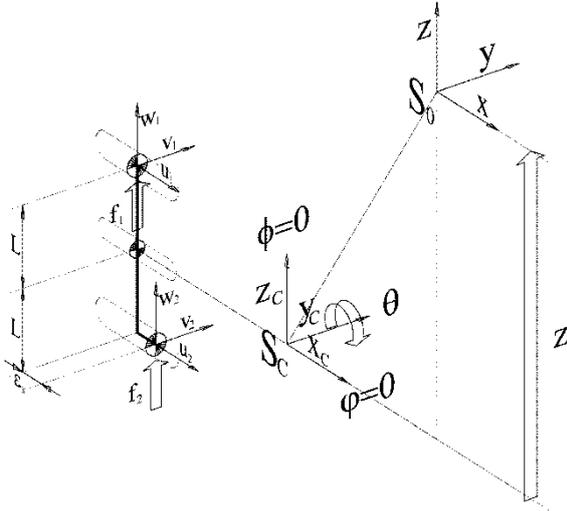


Figura 4: Sistemas de referencia y variables

Las fuerzas verticales que se aplican sobre cada una de las masas del modelo son las siguientes, considerando que la fuerza total aplicada al CC es nula, ya que no existe accionamiento hidrostático alguno en el cilindro central.

$$f_1 = f_{1g} + f_{1e} \quad f_2 = f_{2g} + f_{2e} \quad f_C = f_{Cg} + f_{Ce} = 0 \quad (1)$$

Los subíndices g y e denotan las componentes de fuerzas de gravedad y empuje hidrostático, respectivamente. Estas fuerzas se computan como sigue:

$$\begin{aligned} f_{ig} &= -m_i g \\ f_{ie} &= V_i(t) \rho_W g \\ V_i(t) &= V_{i0} + \frac{1}{2} [V_{Compr} - V_{Flot}] + \Delta V_{u_i}(t) \\ V_{Compr} &= \gamma_0 z \\ V_{Flot} &= V_{Flot}(z, \theta) \\ \rho_W &= \rho_W(z, T, Sal) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde el subíndice $i = 1, 2, C$ denota cada una de las masas, z la profundidad del CC del dispositivo, y θ el ángulo con respecto al eje y_C , ambas dependientes del tiempo. Las masas se consideran constantes, así como la constante de gravedad g y la densidad del agua ρ_W , si bien ésta suele ofrecer una mínima dependencia con la profundidad z , la temperatura T y la salinidad Sal , que aquí se desprecia. Por otro lado, $V_0 = V_{C0} + V_{10} + V_{20}$ representa el volumen total del dispositivo obtenido como la suma de volúmenes equivalentes de los tres cilindros principales, considerados éstos nominales y en la superficie del mar, sin compresión. Recuérdese que la flotabilidad neutra del conjunto requiere que $V_0 \rho_W g = m$ cuando está completamente sumergido.

Por último, mencionar que cada una de las fuerzas de empuje es función de la fracción i -ésima del volumen sumergido $V_i(t)$: se denota como V_{Compr} el volumen comprimido del dispositivo por el efecto de la profundidad y modelado como lineal, mientras que V_{Flot} representa el volumen no sumergido, que provoca una pérdida de empuje fuertemente no lineal, función de la forma del dispositivo, su profundidad y orientación. En este estudio este volumen resulta nulo al estar el dispositivo completamente sumergido. Los volúmenes de control en cada uno de los dos actuadores basados en el Sistema de Control de Lastres (SCL) se denotan por $\Delta V_{u_i}(t)$, sólo para $i = 1, 2$.

La fuerza total que permite el desplazamiento vertical del dispositivo es $f_Z = f_1 + f_2$.

Para calcular el par que permite el cambio de orientación, se debe obtener en primer lugar las coordenadas locales de las masas con respecto a cada uno de los sistemas de referencia locales.

$$P_{C,Loc} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad P_{1,Loc} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{pmatrix} \quad P_{2,Loc} = \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ 0 \\ -L \end{pmatrix} \quad (3)$$

A continuación se utiliza la matriz de rotación básica con respecto al eje y_C , con la notación habitual $c\theta \equiv \cos \theta$ y $s\theta \equiv \sin \theta$.

$$R(y, \theta) = \begin{pmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

Obteniéndose las coordenadas de las masas con respecto al sistema de referencia S_C :

$$\mathbf{P}_{1c} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Ls\theta \\ 0 \\ Lc\theta \end{pmatrix} \quad \mathbf{P}_{2c} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ 0 \\ -L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -Ls\theta + \epsilon_x c\theta \\ 0 \\ -Lc\theta - \epsilon_x s\theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

El par de rotación producido a partir de las fuerzas f_1 y f_2 de los SCL resulta inmediato:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \mathbf{P}_{1c} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_1 \end{pmatrix} + \mathbf{P}_{2c} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_2 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ -Ls\theta \cdot f_1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ (Ls\theta - \epsilon_x c\theta) \cdot f_2 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Agrupando la fuerza f_z y el par Γ_y (componente y de la ecuación (6)) se obtiene la siguiente relación entre las señales de control $[\Delta V_{u,1} \ \Delta V_{u,2}]^T$ y las fuerzas generalizadas: $\mathbf{F}_q = [f_z \ \Gamma_y]^T$:

$$\begin{pmatrix} f_z \\ \Gamma_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -s\theta L & s\theta L - c\theta \epsilon_x \end{pmatrix} \rho_w g \begin{pmatrix} \Delta V_{u,1} \\ \Delta V_{u,2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

A partir de las ecuaciones anteriores se obtiene el modelo dinámico completo del dispositivo provisto de dos grados de libertad $\mathbf{q}(t) = [z(t) \ \theta(t)]^T$. La inercia del dispositivo con respecto al eje y_c es $I_{yy} = (m_1 + m_2)L^2$. Tanto la masa añadida m_{Add} como la inercia añadida I_{yyAdd} se modelan como valores constantes.

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} m + m_{Add} & 0 \\ 0 & I_{yy} + I_{yyAdd} \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}}_{\ddot{\mathbf{q}}} + \underbrace{\begin{bmatrix} v_z \text{signo}(\dot{z}) \dot{z}^2 \\ v_\theta \text{signo}(\dot{\theta}) \dot{\theta}^2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})} - \underbrace{\begin{bmatrix} \gamma_0 z \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{F}} &= \\ = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -s\theta L & s\theta L - c\theta \epsilon_x \end{bmatrix}}_{\mathbf{N}(\mathbf{q})} \underbrace{\rho_w g \begin{bmatrix} \Delta V_{u,1} \\ \Delta V_{u,2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{F}} & \end{aligned} \quad (8)$$

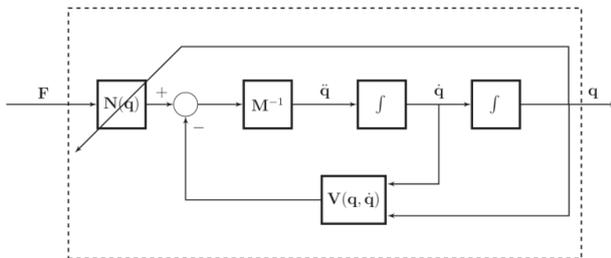


Figura 5: Modelo dinámico propuesto para el diseño del controlador

La figura 5 muestra el diagrama de bloques del modelo dinámico propuesto. Puede observarse que no se han incorporado ni los efectos de las fuerzas y

pares que provocan los cables de fondeo ni las fuerzas hidrodinámicas que provocan las corrientes sobre el dispositivo, y son consideradas ambas, como perturbaciones externas de dimensión 2.

3.2 SISTEMA DE CONTROL PROPUESTO

La figura 6 muestra el esquema de control propuesto. Bajo una trayectoria de referencia deseada, $\mathbf{q}^* = [z^*(t) \ \theta^*(t)]^T$ definida por la profundidad y la orientación deseadas, se utiliza un controlador multivariable no lineal para el seguimiento de las variables del sistema a controlar $\mathbf{q}(t)$, de la forma:

$$\mathbf{F} = \mathbf{N}^{-1}(\mathbf{q}) \cdot \left[\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_I \int [\mathbf{q}^* - \mathbf{q}] d\tau - \mathbf{K}_P \mathbf{q} - \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{q}} \right] \quad (9)$$

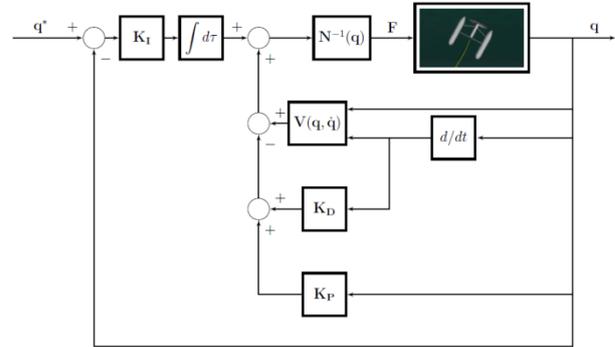


Figura 6. Sistema de control multivariable no lineal.

Bajo condiciones nominales, la dinámica conjunta sistema-controlador se obtiene sustituyendo la ecuación (9) en (8):

$$\mathbf{M} \mathbf{q}^{(3)} + \mathbf{K}_D \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_P \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_I \mathbf{q} = \mathbf{K}_I \mathbf{q}^* \quad (10)$$

Obteniéndose un sistema realimentado que ofrece errores nulos en régimen permanente, y siendo las matrices de ganancias \mathbf{K}_I , \mathbf{K}_P y \mathbf{K}_D diagonales y definidas positivas. Estas matrices se diseñan para igualarse al siguiente polinomio Hurwitz matricial de 2×2 , diagonal, y de orden 3:

$$\mathbf{p}(s) = \mathbf{I}^{2 \times 2} s^3 + 5a \mathbf{I}^{2 \times 2} s^2 + 8a^2 \mathbf{I}^{2 \times 2} s + 4a^3 \mathbf{I}^{2 \times 2} \quad (11)$$

Este polinomio característico se diseña en función de un único parámetro a , habida cuenta de que la respuesta temporal de este sistema corresponde de forma muy aproximada a la de un sistema de segundo orden críticamente amortiguado con frecuencia natural a . En general, la estabilidad de la ecuación (10) puede estudiarse fácilmente por el criterio de Routh-Hurwitz, del cual se obtiene que han de cumplirse simultáneamente $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii} > 0$ y $0 < M_i K_{Ii} < K_{Pi} K_{Di}$ para $i = 1, 2$.

4 PROCEDIMIENTO DE MODELADO Y SIMULACIÓN

Ante la evidente dificultad de construcción de prototipos a escala para la validación experimental de los algoritmos de control propuestos, se recurre a sistemas de simulación dinámica por computador. La elección de OrcaFlex como software de modelado y simulación se justifica por ser éste un código certificado y ampliamente utilizado en el mundo offshore, con un buen tratamiento para la implementación de diversos sistemas de fondeo [19]. Además dispone de amplias posibilidades de introducción de parámetros hidrodinámicos y de presentación de resultados, numéricos y gráficos de realidad virtual.

El modelo dinámico requerido por OrcaFlex resulta un modelo muy complejo y completo, donde es necesario el cálculo previo de un gran número de parámetros, los cuales se pueden agrupar en los siguientes: i) parámetros del entorno: estado de la mar, olas, corrientes, profundidad y tipo del fondo marino, etc, ii) parámetros de forma del dispositivo: dimensiones, materiales, fricciones y masas añadidas, entre otros, iii) parámetros del sistema de fondeo, tipos de cables y tipos de anclaje al fondo marino, principalmente.

4.1 INTEGRACIÓN OrcaFlex-MATLAB

Habida cuenta que OrcaFlex no permite el cómputo de variables realimentadas, se ha elegido el entorno de Matlab y su interfaz con la API de OrcaFlex para la implementación de los algoritmos de control propuestos en la sección 3. El resultado de esta integración es una herramienta conjunta que permite validar en simulación, los sistemas de control diseñados, implementados en Matlab (Mathworks 2016), en el modelo dinámico del dispositivo submarino desarrollado en OrcaFlex. Esta integración se lleva a cabo mediante una DLL que actúa como interfaz entre ambos paquetes software. En la figura 7 se muestra el esquema de integración utilizado.

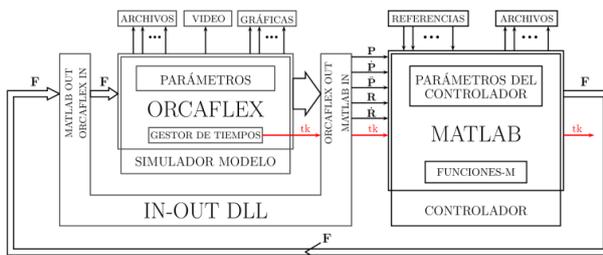


Figura 7. Sistema de Integración Matlab-OrcaFlex

5 RESULTADO DE LAS SIMULACIONES

En este apartado se muestran los resultados de diversas simulaciones llevadas a cabo para validar el correcto comportamiento del sistema de control propuesto, en la realización de maniobras del TEC de dos grados de libertad provisto de actuadores basados en SCL. Se evalúa la bondad de las simulaciones en términos de controlabilidad del dispositivo, su capacidad de llevar a cabo maniobras de movimiento simultáneo de profundidad y orientación, z^* y θ^* , con sólo fuerzas pasivas obtenidas a partir del SCL. Todas las matrices de ganancias se han ajustado de acuerdo con las ecuaciones (9) y (10) para obtener una respuesta dinámica del sistema realimentado con un polinomio característico según la ecuación (11) y diversos valores del parámetro de diseño a .

5.1 VALIDACIÓN DEL DESACOPLAMIENTO

Tal como se presentó en las ecuaciones (7) y (8), la matriz $\mathbf{N}(\mathbf{q})$ representa el acoplamiento entre las señales de mando reales de los SCL $\mathbf{F} = \rho_{wg}[\Delta V_{u,1} \ \Delta V_{u,2}]^T$ y el vector de fuerzas generalizadas $\mathbf{F}_q = [f_z \ \Gamma_Y]^T$. En estas primeras simulaciones se evalúa la capacidad de la matriz inversa $\mathbf{N}^{-1}(\mathbf{q})$, denominada matriz de desacoplamiento, para desacoplar los movimientos de traslación vertical y rotación de cabeceo $\mathbf{q} = [z \ \theta]^T$ en el sistema conjunto modelo-controlador ante distintos reguladores ajustados a partir de diversos valores del parámetro de diseño a y entradas en escalón.

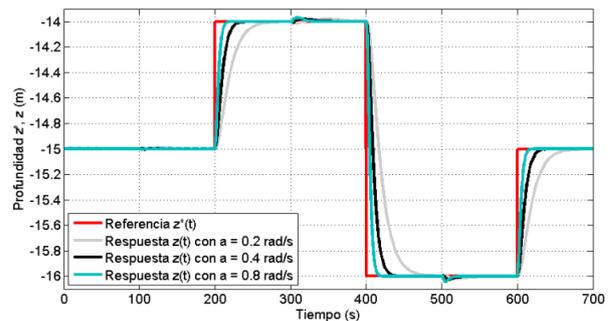


Figura 8.a. Respuestas temporales de la profundidad $z(t)$

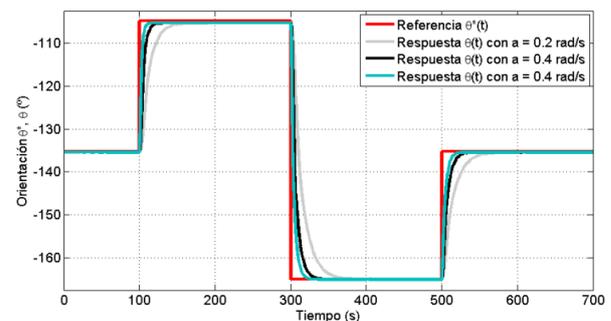


Figura 8.b. Respuestas temporales de la orientación $\theta(t)$

Las simulaciones mostradas en la figura 8.a ofrecen las respuestas temporales de la variable $z(t)$ para las ganancias de los reguladores obtenidas a partir del parámetro de diseño $a = 0.2, 0.4$ y 0.8 rad/s ante una única señal de referencia escalonada $z^*(t)$ con transiciones en $t = 200, 400$ y 600 s. Por su parte, la figura 8.b muestra la señal de referencia de la orientación $\theta^*(t)$, correspondiente a una señal escalonada de varias transiciones en los instantes $t = 100, 300$ y 500 s, y las respuestas temporales de la orientación $\theta(t)$ también para los mismos valores de $a = 0.2, 0.4$ y 0.8 rad/s. Se ha partido de un punto de funcionamiento inicial $\mathbf{q}_0 = [-15 \text{ m} \quad -135^\circ]^T$ y se han tomado incrementos de ± 1 ó -2 m y $\pm 30^\circ$ y -60° en profundidad y orientación, respectivamente.

En estas figuras se puede apreciar la bondad del desacoplamiento que ofrece $\mathbf{N}^{-1}(\mathbf{q})$ para diversas ganancias del controlador multivariable propuesto. Los errores observados se consideran plenamente satisfactorios habida cuenta de su pequeña cuantía tanto en profundidad como en orientación.

5.2 MANIOBRA DE CAMBIO DE ORIENTACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA PROFUNDIDAD

Maximizar el aprovechamiento de la energía de las corrientes mareales, con cambios de orientación cada 12 horas, pasa por dotar al dispositivo de la capacidad de cambio de orientación automática y así, poder generar energía aprovechando las corrientes en ambos sentidos. En este caso de estudio se trabaja con una corriente mareal de 2.5 m/s de velocidad máxima, que cambia de sentido cada 12 horas, siendo aprovechable la energía de las corrientes hasta una velocidad mínima de $\pm 0.5 \text{ m/s}$. El periodo de tiempo en que la velocidad de la marea está en este intervalo de $[-0.5 \text{ m/s}, 0.5 \text{ m/s}]$ resulta de 2700 s, tiempo más que suficiente para poder efectuar la maniobra controlada de cambio de orientación y disponer al dispositivo alineado con la corriente de sentido contrario al anterior para el siguiente semiperiodo.

En los intervalos de la velocidad de la corriente $[-2.5 \text{ m/s}, -0.5 \text{ m/s}]$ y $[0.5 \text{ m/s}, 2.5 \text{ m/s}]$ las fuerzas hidrodinámicas y las formas cilíndricas del dispositivo facilitan su alineación con el sentido de la corriente, dedicando el regulador su mayor esfuerzo al mantenimiento de la profundidad. En el intervalo restante, se ha seleccionado una referencia que mantiene la profundidad en $z^*(t) = -15 \text{ m}$, mientras la referencia temporal de la orientación $\theta^*(t)$ permite el giro del dispositivo de -176.6° a -3.4° en tres etapas: Una primera etapa $\mathbf{q}_1^*(\Delta t_1 = 300 \text{ s}) = [-15 \text{ m} \quad (\text{de } -176.6^\circ \text{ a } -90.0^\circ)]^T$; en la segunda etapa se mantienen tanto la profundidad como la orientación en $\mathbf{q}_2^*(\Delta t_2 = 2100 \text{ s}) = [-15 \text{ m} \quad -90^\circ]^T$, manteniendo orientación de estabilidad máxima, y una última etapa $\mathbf{q}_3^*(\Delta t_3 = 300 \text{ s}) =$

$[-15 \text{ m} \quad (\text{de } -90.0^\circ \text{ a } -3.4^\circ)]^T$ siendo \mathbf{q}_1^* y \mathbf{q}_3^* las etapas en las que se dedica el mayor esfuerzo del regulador. Para los intervalos temporales de la primera y tercera etapa se han utilizado trayectorias temporales lineales con tramos de aceleración polinómicos de orden 6.

La figura 9 visualiza la referencia de mantenimiento de la profundidad en $z^*(t) = -15 \text{ m}$ así como la respuesta temporal de la profundidad del sistema $z(t)$, observándose unos errores mínimos, incluso en los intervalos temporales en los que se está llevando a cabo el giro del dispositivo.

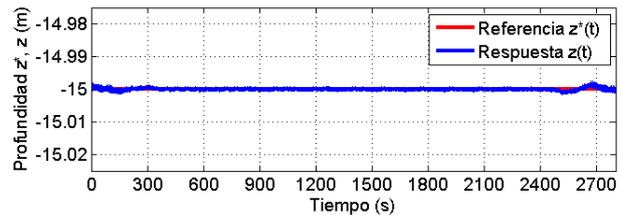


Figura 9. Respuesta temporal de la profundidad, durante la realización de la maniobra de cambio de orientación

En la figura 10 (superior) se muestra la trayectoria de cambio de orientación en las tres etapas $\{\mathbf{q}_1^*(\Delta t_1), \mathbf{q}_2^*(\Delta t_2), \mathbf{q}_3^*(\Delta t_3)\}$ junto con la respuesta temporal de la orientación del dispositivo. Puesto que, debido al gran intervalo temporal no se aprecia la diferencia entre la referencia y la orientación, la figura 20 (inferior) muestra el pequeño error existente entre la consigna y la respuesta del dispositivo $\theta^*(t) - \theta(t)$.

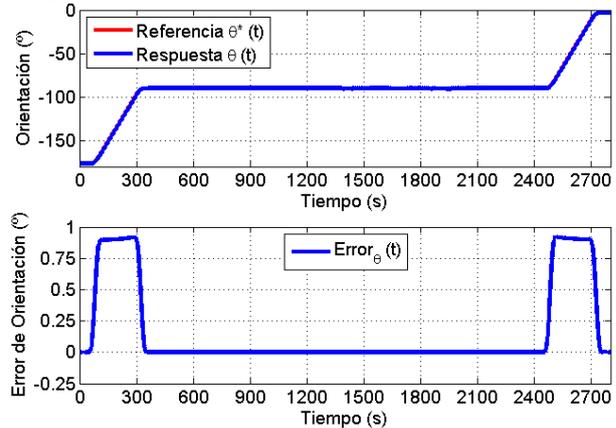


Figura 10. Respuesta temporal del ángulo, durante la realización de la maniobra de cambio de orientación.

A partir de estos resultados puede concluirse la bondad del regulador multivariable con el desacoplamiento propuesto y el excelente comportamiento dinámico del conjunto sistema-control obtenido a partir de la integración OrcaFlex-Matlab. La figura 11 muestra los niveles de agua de lastre en uno de los tanques de cada flotador superior e inferior. Puede comprobarse la verificación de las restricciones tanto en volumen como en caudal.

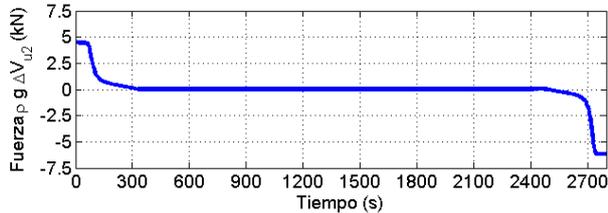
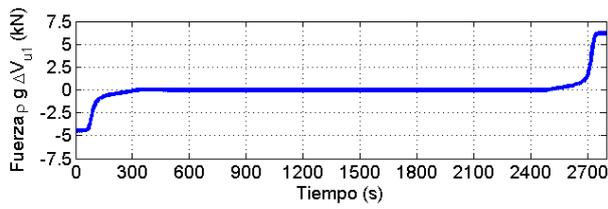
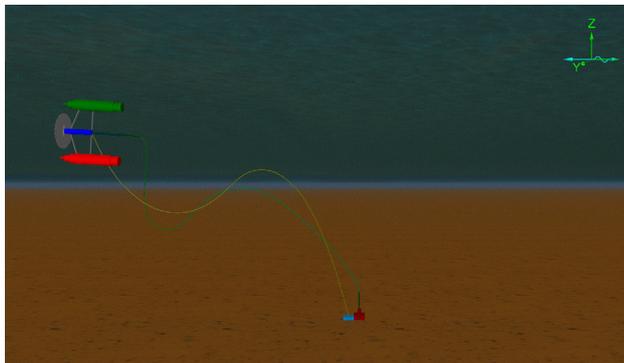


Figura 11. Fuerzas aplicadas por los flotadores durante la realización de la maniobra de cambio de orientación

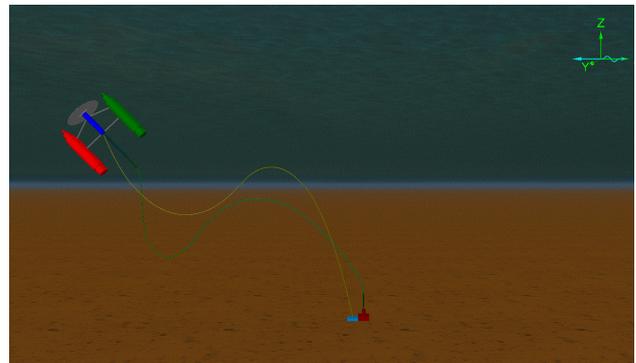
Por último, en el conjunto de figuras últimas, en la parte inferior de esta página se muestra una secuencia gráfica de la realización, en simulación, de la anterior maniobra completa de cambio de orientación del dispositivo a la vez que se mantiene simultáneamente la profundidad.

Esta maniobra se lleva a cabo cuando se produce el cambio de semiciclo en la marea. Puede observarse cómo las fuerzas horizontales del cambio de marea modifican la posición x del generador, así como puede comprobarse de una forma más visual, de nuevo, la efectividad del sistema de control propuesto.

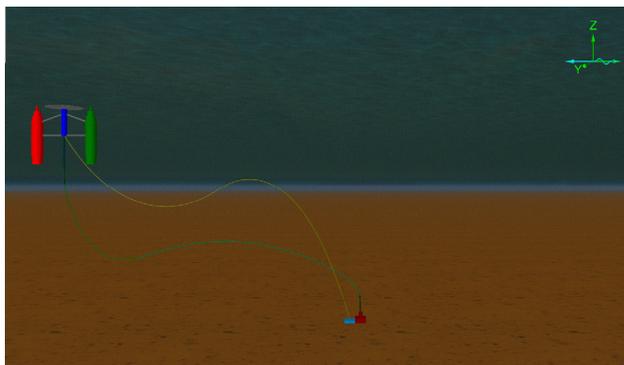
Previo a las conclusiones finales, resulta evidente que ésta es una de las aplicaciones del control en las que se facilita enormemente una tarea como es, el aprovechamiento de la energía de las corrientes mareales, que cambian de sentido periódicamente.



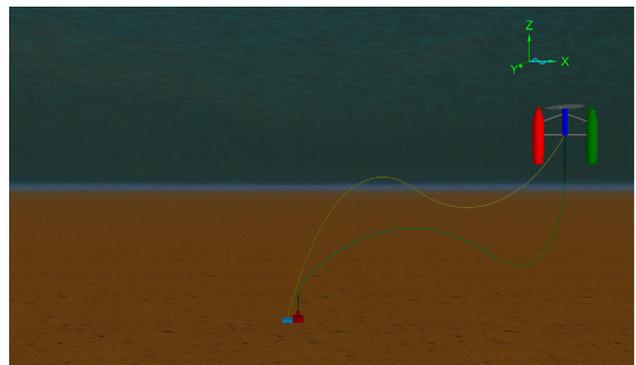
$t = 50$ s (inicio del tramo \mathbf{q}_1^*)



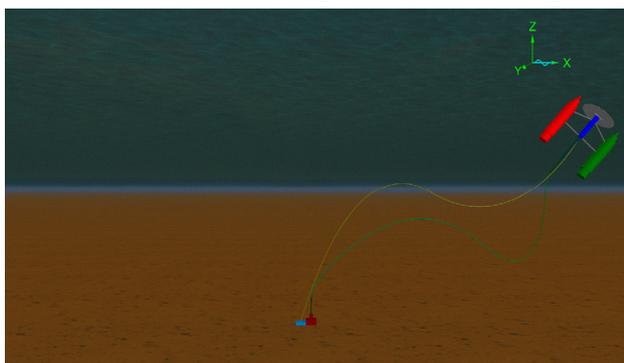
$t = 200$ s (instante intermedio del tramo \mathbf{q}_1^*)



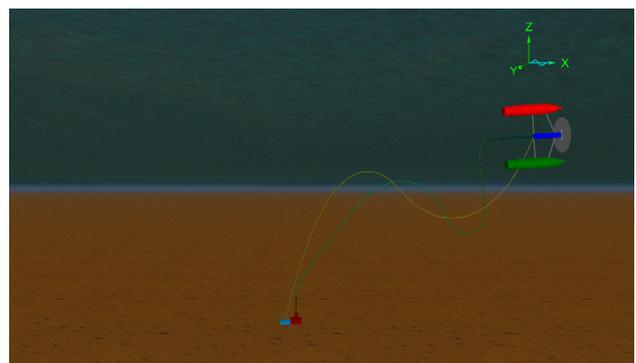
$t = 350$ s (final del tramo \mathbf{q}_1^* e inicio del tramo \mathbf{q}_2^*)



$t = 2450$ s (final del tramo \mathbf{q}_2^* e inicio del tramo \mathbf{q}_3^*)



$t = 2600$ s (instante intermedio del tramo \mathbf{q}_3^*)



$t = 2750$ s (final del tramo \mathbf{q}_3^*)

6 CONCLUSIONES

Este trabajo propone un modelo dinámico simple que puede ser utilizado para controlar un TEC de segunda generación concebido y diseñado para el aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas. El modelo dinámico desarrollado posee dos grados de libertad y está compuesto por tres masas distribuidas ubicadas en un plano. Como accionamientos se utiliza un sistema de control de lastre que genera únicamente fuerzas hidrostáticas verticales. Por otro lado, también se ha desarrollado una ley de control no lineal basada en una matriz de desacoplamiento y realimentación no lineal con el fin de asegurar un comportamiento adecuado del dispositivo cuando éste lleva a cabo maniobras de cambio de orientación y/o de la profundidad. A partir de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones: (i) el modelo dinámico desarrollado es suficientemente preciso para describir el TEC de segunda generación y suficientemente sencillo para ser usado en el diseño de la ley de control no lineal; (ii) la ley de control no lineal propuesta es computacionalmente sencilla y eficiente para ser fácilmente instalada en un sistema basado en microprocesador. Se muestran varios resultados de simulación con la finalidad de ilustrar tanto la controlabilidad del sistema como la capacidad de llevar a cabo movimientos simultáneos en la profundidad y en la orientación del dispositivo. Los resultados obtenidos muestran que el sistema realiza las maniobras de forma precisa con un adecuado tiempo de establecimiento y sin sobreoscilación.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con financiación parcial del M^o de Ciencia e Innovación, a través del Proyecto de Investigación Fundamental DPI2014-53499-R.

Referencias

- [1] Bahaj, A.S. (2011). Generating electricity from the oceans. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 15, 3399-3416.
- [2] Brito A., y Villate J.L., (2014). *Implementing Agreement on Ocean Energy Systems*. (OES-IEA).
- [3] Clément, A, y otros. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 6. Pp 405-431.
- [4] De la Cruz, J. M., Aranda, J. y Girón, J.M. (2012). Automática marina: una revisión desde el punto de vista del control. *RIAI* Volumen 9, nº3. Pp 205-218.
- [5] FORCE (2016) web page. Disponible online: <http://fundyforce.ca/renewable-and-predictable/> (accedido el 22 de noviembre de 2016).
- [6] García, E., Correcher, A., Quiles, E. y Morant, F. (2016). Recursos y sistemas energéticos renovables del entorno marino y sus requerimientos de control. *RIAI*, Volumen 13, nº2. Pp 141-161.
- [7] Guedes, C., Bhattacharjcc, J., Tello, M. y Pietra, L. (2012). Review and classification of wave energy converters. *Maritime Engineering and Technology*. Taylor & Francis Group: USA, 2012, pp. 585-594
- [8] Hardisty J. (2009). *The Analysis of Tidal Stream Power*, Wiley,
- [9] Khan J. y Bhuyan, G. (2009). *Ocean Energy Global Technology, Development Status, Final Technical Report*, IEA-OES.
- [10] King J. y Tryfonas, T. (2009). *Tidal stream power technology-state of the art*. Proceedings of the IEEE (OCEANS '09), pp 1-8, Bremen, Germany.
- [11] López, A., Somolinos, J.A., Núñez, L.R. y Valle, J. (2011). Dynamic behaviour of a second generation hydrokinetic converter. *Proceedings IEEE (OCEANS'11)*, Santander, España.
- [12] López A., Somolinos, J.A., Núñez, L.R. (2014) Modelado Energético de Convertidores Primarios para el Aprovechamiento de las Energías Renovables Marinas. *RIAI*. Vol.11, nº2, pp. 224-235.
- [13] López, A., Somolinos, J.A. y Núñez L.R. (2015b). Dispositivo para el aprovechamiento de las corrientes marinas multi-rotor con estructura poligonal. Concesión ES2461440. PCT/ES2015/070071. 2015
- [14] López I, Andreu, J., Ceballos, S., Martínez, y Kortabarria, I., (2013b). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. vol 27.
- [15] Lynn, P.A. (2014) *Electricity from Wave & Tide*. Wiley.
- [16] Möller, B., Hong, L., Lonsing, R. y Hvelplund, F. (2012). Evaluation of offshore wind resources by scale of development. *Energy*, vol 45, nº1.
- [17] Myers, L.E., Bahaj, A.S., Retzler, C., Pizer, D., Gardner, F., Bittencourt, C y Flinn, J. (2010). *Equimar Deliverable D5.2: Device classification template*.
- [18] Onstad, A.E., Stokke, M. y Saetran, L. (2016). Site assessment of the floating wind turbine Hywind Demo. *Energy Procedia*, vol 94, pp 409-416.
- [19] Orcina (2016) web page. Disponible online: <https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/>
- [20] Owen, A. y Trevor, M.L. (2008). Tidal current energy: origins and challenges. *Future Energy*, Oxford. Elsevier, pp 111-128.
- [21] Rourke, F.O., Boyle, F. y Reynolds, A. (2010). Marine current energy devices: current status and possible future applications in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 14.
- [22] Sclavounos, P. (2008). Floating Offshore Wind Turbines. *Marine Technology Society Journal*, vol. 42, nº2, pp 39-43.
- [23] Sun, X., Huang, D. y Wu, G. (2012). The current state of offshore wind energy technology development. *Energy*, vol 41, nº 1.
- [24] Villate J.L. Brito 2015 A. Annual Report Ocean Energy Systems 2015. www.iea-oceans.org.



© 2018 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>).