

Modelado Dinámico y Control de un Dispositivo Sumergido Provisto de Actuadores Hidrostáticos

Marina Pérez de la Portilla ^{a,*}, Amable López Piñeiro ^a, José Andrés Somolinos Sánchez ^a, Rafael Morales Herrera ^b

^a Grupo de I+D GITERM-UPM Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Av. De la Memoria, 4, 28040 Madrid, España.

^b E.T.S. Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha, Campus Universitario, Av. España s/n, 02071, Albacete, España.

Resumen

Las corrientes marinas, fuente de energía renovable más predecible, localizan la mayor parte de su energía en altas profundidades. Para aprovechar esta energía se están desarrollando dispositivos flotantes, de tipo fondeado. La viabilidad económica de estos dispositivos requiere el abaratamiento de costos. El desarrollo de sistemas de control que permitan el cambio automático de orientación y profundidad del generador, con el fin de abaratar las maniobras de mantenimiento y aprovechar el recurso energético de forma óptima, resulta imprescindible. En este trabajo se presenta un actuador hidrostático y se realiza un modelo dinámico simple para control, de un dispositivo de dos grados de libertad, con un sistema de control de lastre. A partir de este modelo se ha desarrollado una ley de control multivariable, basada en una matriz de desacoplamiento no lineal y en la compensación de los términos de fricción y compresibilidad. Finalmente, la bondad del controlador ha sido validada mediante simulación.

Palabras Clave:

Energías Renovables, Sistemas Marinos, Control Multivariable, Sistemas variables con el tiempo, Integración OrcaFlex-Matlab.

Dynamic Modelling and Control of a Submerged Device with Hydrostatic Actuators

Abstract

Marine currents represent the most predictable source of renewable energy. The greatest percentage of its energy is located in areas with high depths. In order to be able to operate at these depths, new devices are being developed, floating anchoring type. The economically viable harnessing of the tidal energy with these devices requires the development of control systems. These systems must allow the automatic change of orientation and depth of the generator to harness the energy in an optimal way. In this paper, a type of hydrostatic actuator based on the controlled handling of water ballast is selected. Next, a dynamic model, provided with two degrees of freedom, is presented for the control of a submerged device for the exploitation of tidal currents. From this model, a multivariate control law has been developed, based on a non-linear decoupling matrix and on the compensation of the terms of friction and compressibility. Finally, the controller's goodness has been validated by the development of several simulations.

Keywords:

Renewable Energies, Marine Systems, Multivariable Control Systems, Time varying systems, OrcaFlex-Matlab Integration.

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 (Owen y Trevor 2008) (Bahaj 2011). 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 (Villate y Brito 2015) (López et al. 2014). En los últimos años se han concebido y desarrollado distintos dispositivos para posibilitar el aprovechamiento energético proveniente del océano (Hardisty 2009) (King y Tryfonas 2009), si bien todavía

*Autor para la correspondencia: marinap.portilla@upm.es

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 (Sclavounos, 2008) (Möller et al. 2012) (Sun et al. 2012). 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 (Onstad et.al. 2016).

Con respecto a los dispositivos de aprovechamiento de la energía de las olas, se han desarrollado diferentes dispositivos (Guedes et al. 2012) (Clément et al. 2002) (López et al. 2013b), 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 (López et al. 2014). 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 (López et al. 2011) (Rourke et al. 2010) (Brito y Villate 2014) (FORCE 2016). 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 (Myers et al. 2010), 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 (Khan y Bhuyan 2009), que se considera la profundidad límite para los dispositivos de 1ª generación (Lynn 2014).

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/o 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 Cruz et al. 2012) (García et al. 2016). 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.

Este trabajo está organizado en 7 secciones. En la Sección 2 se presentan los tipos de actuadores para el control de cuerpos sumergidos, mientras que en la Sección 3 se selecciona el sistema de control de lastres a utilizar. Un modelo dinámico de extrema sencillez se propone en la Sección 4 junto con el algoritmo de control diseñado. La Sección 5 desarrolla las herramientas utilizadas con las que

se han obtenido los resultados de simulación que se presentan en la Sección 6. Finalmente se resumen las principales conclusiones.



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

2. Tipos de actuadores para el control de movimiento de cuerpos sumergidos

Si se desea controlar la profundidad y la orientación de los mencionados TECs cuando se encuentran sumergidos o semi-sumergidos, se requiere de un conjunto de sensores y actuadores, además de una estrategia de control diseñada específicamente para la realización de estas maniobras de movimiento. La elección del sistema sensorial necesario se resuelve generalmente con el uso de medidores de profundidad y de Unidades Inerciales de Medida (IMU), ampliamente extendidos. Sin embargo, la selección de los actuadores requiere de un análisis más detallado.

En la Figura 2 se muestran algunos de los actuadores más habituales para cuerpos sumergidos de distinta naturaleza: Timones, Unidades de Propulsión y Sistemas de Control de Lastres (SCL).

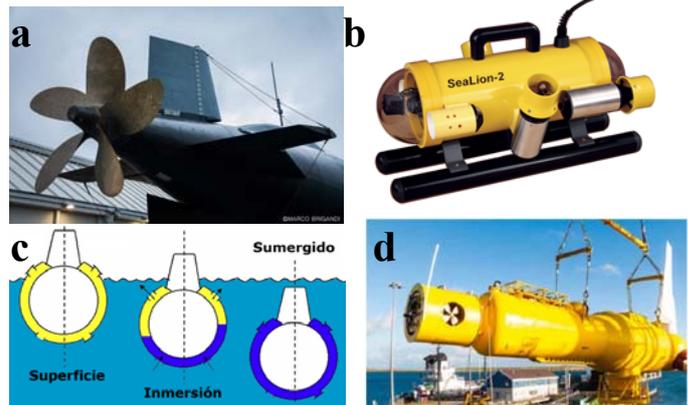


Figura 2: a) Popa de un submarino con timones. b) ROV con 4 propulsores. c) SCL de un submarino. d) Ocean Tidal Energy Turbine de Alstom.

El uso del timón como actuador para un TEC de 2ª generación, a pesar de ser el actuador más extendido, queda descartado dadas las bajas velocidades de operación durante la realización de las maniobras de movimiento. Por otra parte, los ROVs hacen uso de una o más unidades de propulsión tipo *Thusters*. Esta opción fue la seleccionada por Alstom en el TEC mostrado en la figura 2d, cuya finalidad es la realización del giro acimutal cuando cambia la dirección de

la corriente de la marea. La tercera posibilidad de actuación mencionada, el SCL, se basa en el cambio del equilibrio peso-empuje del cuerpo sumergido, conseguido variando el volumen de agua en un conjunto de tanques de agua de lastre. Esta solución, ampliamente utilizada en vehículos sumergidos como buques submarinos tripulados, *gliders* o AUVs de alta autonomía, etc. se considera muy adecuada para bajas velocidades del fluido y ofrece un consumo energético muy reducido, por lo que se toma como solución de base para el control de maniobras de TECs. Su principal limitación es que únicamente produce fuerzas verticales.

3. Propuesta de un sistema de control de lastres

El grupo de investigación GITERM-UPM, al que pertenecen los autores de este trabajo, ya estudió y evaluó la opción de utilizar globos como SCL en un prototipo de dispositivo GESMEY (López 2007) (Núñez et al. 2011) (Núñez et al. 2013) realizando ensayos a escala 1:10 en el mar.

Estas soluciones para el SCL permitieron realizar maniobras complejas de emersión y giro en bucle abierto, validándose los resultados de los modelos y las herramientas previos de simulación, tal y como se muestra en la Figura 3 (López et al. 2015a). Sin embargo, durante la realización de estos ensayos se observó la existencia de pequeños intervalos de tiempo con valores inadmisibles de aceleración que pueden comprometer el buen estado de las palas del rotor, requiriéndose el control de maniobras del dispositivo en bucle cerrado y la búsqueda de otro sistema de actuadores.

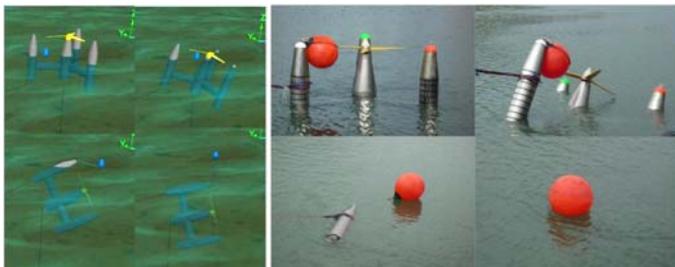


Figura 3: Simulación y pruebas de inmersión y giro del prototipo GESMEY dentro del proyecto PROCODAC.

En el marco del proyecto DPI2014-53499R (Somolinos 2015) se ha llevado a cabo un estudio minucioso y sistemático de los distintos tipos de actuadores integrables en un SCL. A modo de resumen, los tipos más significativos de SCL se esquematizan en la Figura 4 y se resumen a continuación:

- Pistón (*pm*): pieza rígida que se mueve dentro de un cilindro.
- Membrana (*mw/a*): placa flexible con movimiento perpendicular a la superficie libre.
- Fuelle (*ba*): cuerpo deformable en una dirección principal.
- Balón o globo (*ga*): envoltente elástica con una entrada de fluido de tamaño reducido.
- Tanques con Superficie Libre: tanques donde el agua y el aire están libremente en contacto, lo que conlleva una disminución de la estabilidad ante giros. Se distinguen dos variantes, en función de si se actúa sobre el aire (*fa*) o sobre el agua (*fw*).

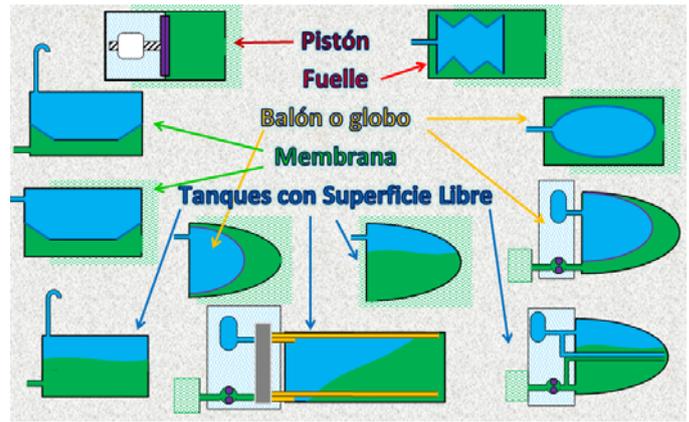


Figura 4: Tipos significativos de SCL.

3.1. Selección cualitativa del SCL

Para la selección del SCL más adecuado para los TECs de 2ª generación, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Posibilidades de sensorización, especialmente de la medida de volumen de agua en los tanques de lastre.
- Sensibilidad de actuación que permita la generación de fuerzas válidas para un sistema de control realimentado de precisión.
- Capacidad de generación de fuerzas con dinámicas intermedias que resulten despreciables, frente a la dinámica propia del dispositivo sumergido.
- La existencia de movimientos internos del agua no controlados, que podría provocar cierta pérdida de estabilidad, fundamentalmente por superficies libres.
- Capacidad de adaptarse al diseño del TEC.
- Coste y complejidad de construcción.
- Complejidad de operación, fiabilidad y mantenibilidad.

La comparación de los distintos tipos de actuadores se ha realizado siguiendo el procedimiento formal AHP (Saaty 2008) (Núñez et al. 2015), agrupando los parámetros en tres grupos: i) Calidad del control, ii) Capacidad de actuación y iii) Posibilidades de uso industrial. En la figura 5 se resume el resultado de este análisis, donde se muestra la evaluación de los distintos actuadores, comparando la calidad del control en el eje de ordenadas, sus posibilidades de uso industrial en el eje de abscisas, y la capacidad de actuación representada en el diámetro de cada círculo.

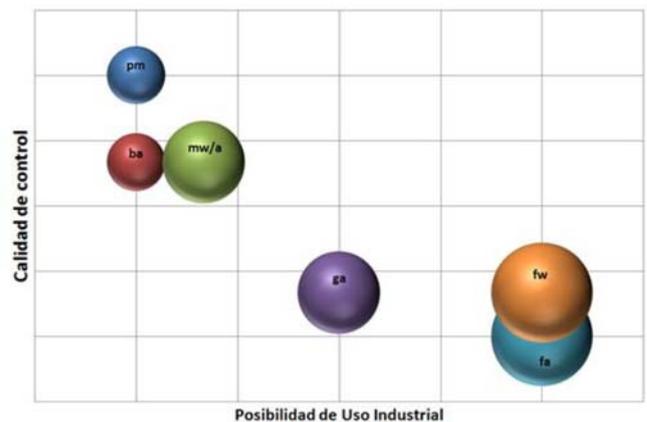


Figura 5: Resultados de la comparación de los SCL con la metodología AHP

Tras la realización del estudio y comparación de los distintos tipos de actuadores para el SCL, se ha seleccionado un SCL basado en tanques con superficies libres principalmente por:

- Es la opción con mayor posibilidad de uso industrial.
- Se adapta perfectamente al diseño del TEC, con formas cilíndricas, permitiendo además la posibilidad de poder flotar en superficie, con gran volumen fuera del agua, facilitando así las operaciones de transporte y mantenimiento.
- La necesidad de utilización de equipos de alta fiabilidad, como la que ofrecen los tanques de lastre con superficie libre, para operar en el entorno marino.

Sin embargo, la opción escogida presenta dos limitaciones principales:

- Cada tanque de lastre, debido al movimiento de la superficie libre, es una fuente de perturbaciones, produciendo fuerzas y pares adicionales que pueden tener influencia en la estabilidad del sistema y en el funcionamiento del algoritmo de control.
- La imprecisión en la medida del volumen de agua y en la posición de su centro de gravedad, origina que la fuerza y posición del actuador, tenga un cierto nivel de incertidumbre.

Con el objetivo de obtener una calidad mejorada de las cualidades del SCL seleccionado, se busca reducir los efectos producidos por las limitaciones anteriores. Para resolver el primer problema se ha realizado un análisis detallado de los efectos de las superficies libres (López et al. 2013a), generándose una metodología que permite acotar su perturbación y modelar su efecto sobre el control, fundamentalmente a través del cálculo de pérdida de altura metacéntrica, en base a la división de los tanques en múltiples recintos. Para resolver el segundo problema se ha desarrollado un sistema de medida de volumen multi-sensor, provisto de un sistema tolerante a fallos y con precisión mejorada.

En la Figura 6 se puede ver el resultado de una medida resultante de la integración de un caudalímetro y ocho sensores de nivel binarios para un tanque cilíndrico de 2 m de diámetro, 4 m de largo, y un volumen de $12m^3$. En ella se muestra el porcentaje de volumen de agua de lastre sobre el volumen total del tanque, en el eje de ordenadas izquierdo, y el error en la medida, también en porcentaje, en el eje de ordenadas derecho, apreciándose un error máximo en la medida del volumen del 0,3%.

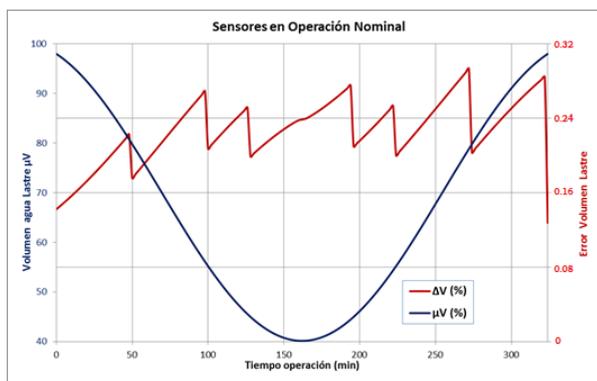


Figura 6: Error en la medida del volumen en un tanque de grandes dimensiones durante una de las maniobras del SCL con superficie libre.

3.2. Integración del SCL en dispositivos sumergido

El objetivo del SCL seleccionado es ser utilizado para la ejecución de maniobras automáticas de movimiento de dispositivos sumergidos, en concreto, dispositivos para el aprovechamiento energético de las mareas y corrientes marinas de distintas topologías. Estas maniobras permiten el cambio de profundidad y de orientación del dispositivo con tres objetivos principales: i) posibilitar el aprovechamiento no convencional del recurso energético, por ejemplo: corrientes variables, mareales, inerciales, etc., ii) mejorar la eficiencia del aprovechamiento energético ante corrientes marinas de gran variabilidad y iii) extraer el dispositivo de su profundidad de operación a la superficie del mar para llevar a cabo tareas periódicas de mantenimiento o reparación in situ y volver a ubicar al mismo en su posición normal de operación.

Desde un punto de vista de diseño, estos SCL se conciben con formas de torpedos cilíndricos, los cuales definen el aspecto final de los diversos TEC que los contienen.

La Figura 7 muestra los principales bloques que se integran para el diseño del sistema de control de maniobras propuesto, basado en el SCL seleccionado.

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 7 se supone suficientemente general para distintos dispositivos con múltiples SCL, múltiples tanques, diversas configuraciones, formas, etc.

En este esquema, partiendo de la situación analizada: maniobra de cambio de orientación, de profundidad, de ambas, o de mantenimiento de ambas, se generan trayectorias temporales de referencias, para el sistema realimentado. Con estas señales y con la realimentación, el regulador envía la señal de control al SCL, generando así las fuerzas verticales en los tanques de lastre. Estas fuerzas, junto con las fuerzas exteriores, tales como oleaje, corrientes, fuerzas de empuje del rotor, etc. que son dependientes de la situación analizada y son incorporadas en las simulaciones, determinarán la respuesta dinámica completa del TEC.

En la misma figura, se encuentran las matrices para la selección de los tanques correspondientes en función de la situación analizada, donde se incluye la dinámica interna de los tanques de lastre y las perturbaciones que produce el hecho de utilizar tanques de superficie libre. A través de estas matrices se obtiene qué grado de error se maneja, el cálculo de volúmenes de lastre y la posición de su centro de gravedad, así como la corrección de la altura metacéntrica por existencia de superficies libres, que produce pérdida de estabilidad en los movimientos de balance y cabeceo, la cual modifica, a la vez, la respuesta dinámica del TEC.

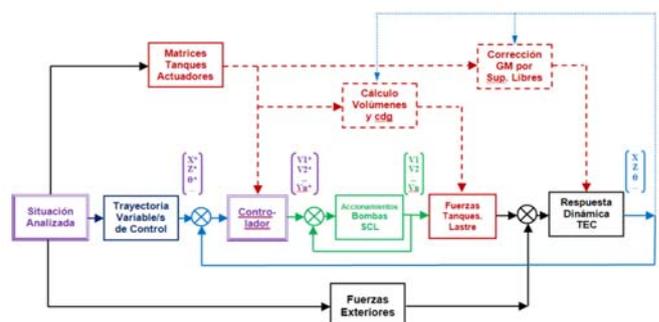


Figura 7: Diagrama simplificado de la integración de la actuación del SCL con la dinámica del TEC.

4. Modelo dinámico y algoritmo de control para un TEC con dos grados de libertad

Como ejemplo de aplicación del sistema propuesto, se parte de uno de los tipos de generador multirrotor patentado (López et al. 2015b) donde se alternan flotadores con unidades generadoras de energía, el cual se muestra en la Figura 8. Este dispositivo está provisto de únicamente dos grados de libertad: la profundidad z y la orientación θ con respecto al plano horizontal.

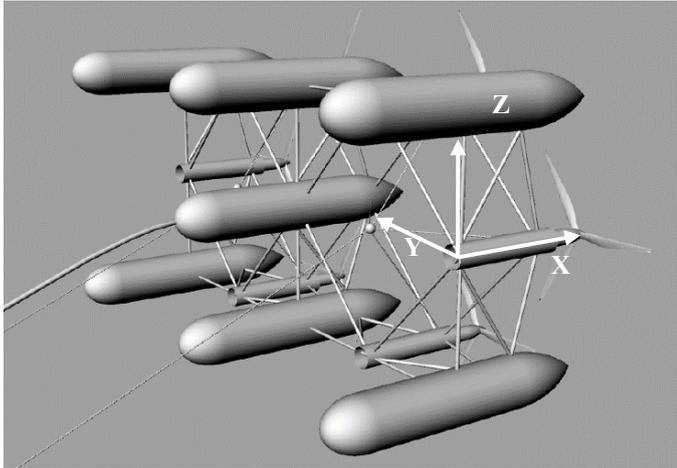


Figura 8: Perspectiva del generador multi-rotor.

Por tratarse de un dispositivo de únicamente dos grados de libertad, se propone trabajar únicamente con la proyección en dos dimensiones. En la Figura 9 se muestra el aspecto general del TEC simplificado. Puede apreciarse cómo el dispositivo simplificado objeto de estudio, está provisto de sólo dos flotadores, donde en cada uno de ellos se sitúan tres tanques internos de lastre, además de una unidad generadora, unida a los flotadores mediante cuatro riostras.

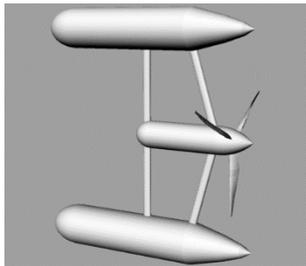


Figura 9. Aspecto general del dispositivo 2D simplificado

4.1. 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 de traslación 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 10 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 plano horizontal. 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 hacia el sentido positivo del eje u_2 local (popa en la representación de la Figura 10).

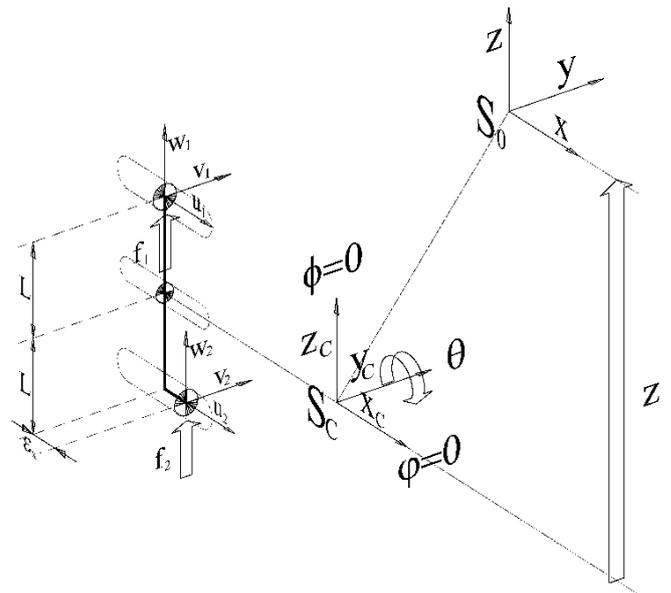


Figura 10: Sistemas de referencia y parámetros principales

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.

$$f_1 = f_{1g} + f_{1e}, f_2 = f_{2g} + f_{2e}, f_c = f_{cg} + f_{ce} = 0 \quad (1)$$

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 denota la profundidad del CC del dispositivo, y θ el ángulo con respecto al plano horizontal, 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 $V_0 \rho_w = m$ cuando el dispositivo está completamente sumergido y los tanques de lastre estén parcialmente llenos de agua, teniendo así la posibilidad de conseguir flotabilidad negativa o positiva, lastrando o deslastando agua.

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 el presente 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 SCL se denotan por $\Delta V_{u,i}(t)$, sólo para $i = 1,2$.

Finalmente 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.

$$\mathbf{P}_{C_Loc} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{P}_{1_Loc} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{pmatrix} \quad \mathbf{P}_{2_Loc} = \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ 0 \\ -L \end{pmatrix} \quad (3)$$

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 $s\theta \equiv \sin \theta$.

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

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:

$$\Gamma = \mathbf{P}_{1c} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_1 \end{pmatrix} + \mathbf{P}_{2c} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_2 \end{pmatrix} = \quad (6)$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ -Ls\theta \cdot f_1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ Ls\theta - \epsilon_x c\theta \\ 0 \end{pmatrix} \cdot f_2$$

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 $[\Delta V_{u,1} \quad \Delta V_{u,2}]^T$ y las fuerzas generalizadas, $\mathbf{F}_q = [f_z \quad \Gamma_Y]^T$:

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

A partir de las ecuaciones anteriores se obtiene el modelo dinámico completo del dispositivo provisto de dos grados de libertad $\mathbf{q}(t) = [z(t) \quad \theta(t)]^T$. 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 constantes.

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

Un modelo dinámico similar pero mucho más detallado, para un cuerpo sumergido y semi-sumergido, de un único grado de libertad, puede verse en (Somolinos et al. 2016).

La Figura 11 muestra el diagrama de bloques del modelo dinámico propuesto. Puede observarse que se han incorporado los efectos de las fuerzas y pares que provocan los cables de fondeo y las fuerzas hidrodinámicas que provocan las corrientes sobre el dispositivo, consideradas como perturbaciones externas aditivas de dimensión 2 en la entrada del modelo, denotadas por F_{EXT} .

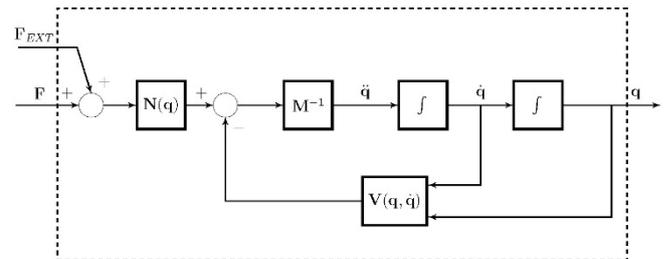


Figura 11: Modelo dinámico propuesto para el diseño del controlador

4.2. Sistema de control

La Figura 12 muestra el esquema de control propuesto. Bajo una trayectoria de referencia $\mathbf{q}^* = [z^*(t) \quad \theta^*(t)]^T$ 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:

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

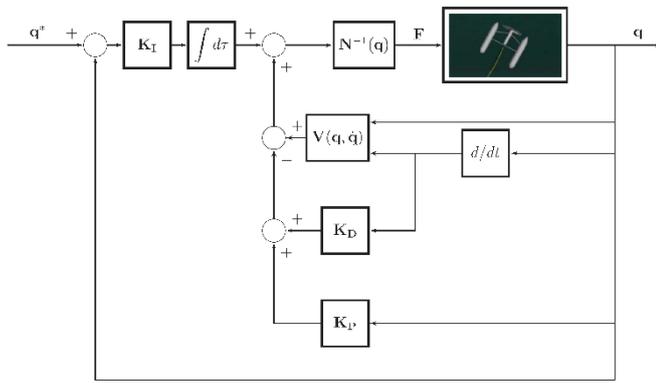


Figura 12. Sistema de control multivariable no lineal.

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

$$Mq^{(3)} + K_D\ddot{q} + K_P\dot{q} + K_Iq = K_Iq^* \tag{10}$$

Obteniéndose un sistema realimentado que ofrece errores nulos en régimen permanente, y siendo las matrices de ganancias K_I , K_P y 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:

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

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 $i = 1, 2$.

5. 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 (Orcina 2016). Además dispone de amplias posibilidades de introducción de parámetros hidrodinámicos y de presentación de resultados, numéricos y gráficos de realidad virtual.

5.1. Procedimiento de modelado dinámico en OrcaFlex

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.

Teniendo en cuenta las propias formas geométricas de los elementos que componen el TEC simplificado 2D (ver Figura 9), para el modelado en OrcaFlex, se ha hecho uso de boyas cilíndricas. Tal y como se puede apreciar en la Figura 13, los flotadores se han dividido en una serie de cilindros de diámetro decreciente, modelándose de forma directa la posición del centro de gravedad del agua y el momento de inercia del SCL, en función de su volumen de llenado y de su inclinación.

En el modelo del comportamiento del TEC se incluyen las restantes fuerzas hidrostáticas: empuje producido por el volumen de carena y peso en rosca, fuerzas exteriores dependientes de la velocidad de la corriente, entre las que destacan la resistencia y sustentación hidrodinámica de la carena, fuerzas producidas por los rotores y elementos de unión, así como fuerzas originadas por el sistema de fondeo.

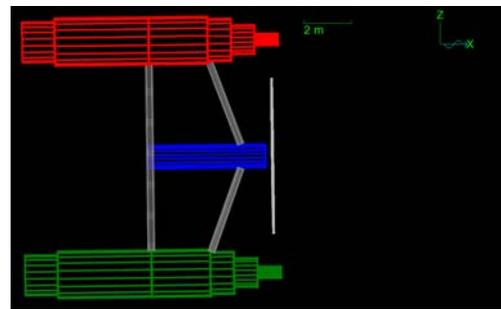


Figura 13. Modelado del dispositivo 2D en OrcaFlex

El sistema de fondeo consiste en un cable de acero que une la unidad generadora con el fondo marino. En la Figura 14 se puede ver el dispositivo fondeado, donde se aprecia también un segundo cable, el cable umbilical, que es el responsable de la conexión eléctrica y de las comunicaciones con el sistema de monitorización y control. Con el objetivo de que la línea de fondeo no roce con el fondo marino y de evitar la interacción entre el dispositivo y los cables, se ha dotado a éstos de flotabilidad positiva no uniforme, consiguiendo así, que éste pueda adoptar forma de onda aún en los momentos donde la corriente es prácticamente nula.

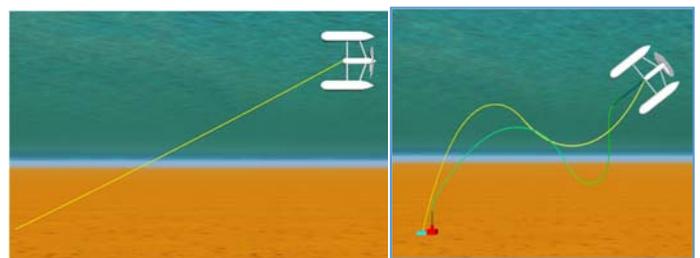


Figura 14. Aspecto final del dispositivo fondeado, modelado en OrcaFlex

5.2. 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 4.

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 15 se muestra el esquema de integración utilizado.

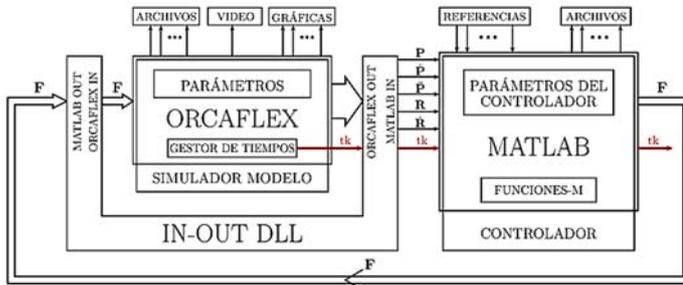


Figura 15. Sistema de Integración Matlab-OrcaFlex

La Figura anterior muestra también el flujo de datos del sistema integrado. OrcaFlex simula el comportamiento dinámico del dispositivo haciendo uso de los parámetros introducidos por el usuario, referentes a las fuerzas ambientales y de los parámetros que le comunica Matlab, referentes a las fuerzas generadas por el sistema de control. Estas últimas son computadas en el RunTime de Matlab de acuerdo al algoritmo de control propuesto en (9) y la Figura 12.

El gestor de tiempos de OrcaFlex es el responsable de generar el sincronismo y los periodos de muestreo para la simulación completa. En este caso, se han tomado intervalos de muestreo de $T_s = 10$ ms. Tanto las fuerzas computadas por el controlador (de Matlab a OrcaFlex) como las variables de posición y orientación del dispositivo (de OrcaFlex a Matlab) son comunicadas mediante la DLL indicada.

OrcaFlex permite la obtención de las respuestas temporales del dispositivo, produciendo archivos de las simulaciones, vídeos de éstas y gráficas temporales de las variables para su posterior análisis y tratamiento. La herramienta diseñada permite obtener de OrcaFlex gran multitud de variables de la simulación, como las coordenadas de centros de gravedad, velocidades, aceleraciones, matriz de rotación, etc, incluso en modo "online". Por su parte, Matlab toma los parámetros del controlador y las referencias temporales de archivos, ejecuta el controlador, generando el mencionado vector de fuerzas producido por la dinámica del SCL modelado y aplicado al modelo de OrcaFlex, y además permite el almacenamiento de las diversas variables y su posterior tratamiento gráfico y numérico.

6. 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 de un TEC de dos grados de libertad provistos 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^* , definidas por sus referencias temporales, con sólo fuerzas pasivas obtenidas a partir del SCL propuesto.

Los valores utilizados para el diseño del controlador fueron: $m_1 = m_2 = 28118$ kg, $m_c = 5700$ kg, $I_{yy} = 193863$ kg · m², $L = 5$ m, $\rho_w = 1025$ kg/m³, $g = 9.81$ m/s² y $\epsilon_x = 0.5$ m. Los valores de m_{Add} , I_{yy_Add} , V_z y V_θ fueron obtenidos a partir de los valores bien conocidos para las formas cilíndricas de los torpedos del dispositivo y los valores bajos del número de Reynolds, inferiores a 10^5 (White 2011). Las dimensiones principales del TEC mostrado en las Figuras 9 y 13 son: Longitud y diámetro máximo de los torpedos, 10.9 m y 2.0 m. Longitud y diámetro máximo de la góndola: 5.0 m y 1.05 m. Diámetro del rotor 6.6 m, y longitudes nominales de los cables de fondeo y umbilical: 75 m y 73 m, respectivamente. Todas las matrices de ganancias se han ajustado de acuerdo con (9) y (10) para obtener una respuesta dinámica del sistema realimentado con un polinomio característico según (11) y diversos valores del parámetro de diseño, a .

6.1. Validación del desacoplamiento del sistema

Tal como se presentó en (7) y (8), la matriz $\mathbf{N}(\mathbf{q})$ representa el acoplamiento entre las señales de mando reales de los SCL $\mathbf{F} = \rho_w g [\Delta V_{u,1} \ \Delta V_{u,2}]^T$ y el vector de fuerzas generalizadas $\mathbf{F}_q = [f_z \ \Gamma_y]^T$. En estas primeras simulaciones se evalúa, en condición de corrientes marinas de pequeño valor, 0.2m/s, 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 a y entradas en escalón.

Las simulaciones mostradas en la Figura 16.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.

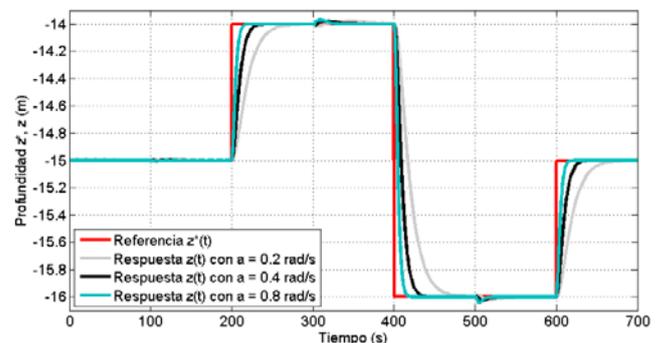


Figura 16.a. Respuestas temporales de la profundidad $z(t)$

Por su parte, la Figura 16.b muestra la señal de referencia de 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 variable $\theta(t)$, para los mismos valores de $a = 0.2, 0.4$ y 0.8 rad/s. Se ha partido de un punto de

funcionamiento inicial $\mathbf{q}_0 = [-15 \text{ m } -135^\circ]^T$ y se han tomado incrementos de $+1$ ó -2 m y $+30^\circ$ ó -60° en profundidad y orientación, respectivamente.

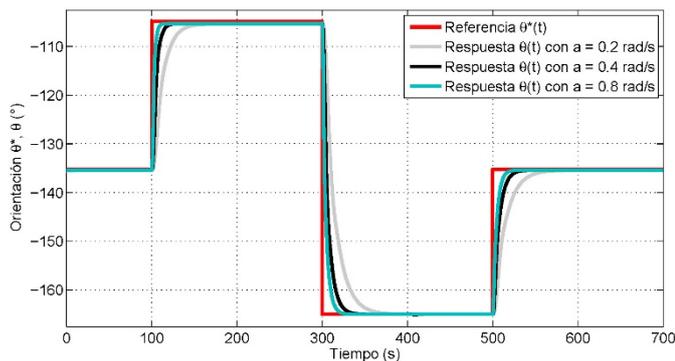


Figura 16.b. Respuestas temporales de la orientación $\theta(t)$

La Figura 17 muestra la zona ampliada de las respuestas temporales de $z(t)$ en el intervalo de tiempo $[195 - 405] \text{ s}$. En ella se pueden apreciar los efectos no modelados de dinámicas oscilantes debidos a las fuerzas y pares generados por los cables de fondeo, así como un desacoplamiento no perfecto en los alrededores de $t = 300 \text{ s}$, cuando tiene lugar la mayor transición en la consigna de la orientación $\theta^*(t)$ entre -105° y -165° . De forma similar, la Figura 18 muestra la zona ampliada de las diversas respuestas temporales de orientación $\theta(t)$ en el intervalo de tiempo $[295 - 505] \text{ s}$ en que tiene lugar la transición máxima en escalón de la consigna de profundidad $z^*(t)$, entre -14 m y -16 m .

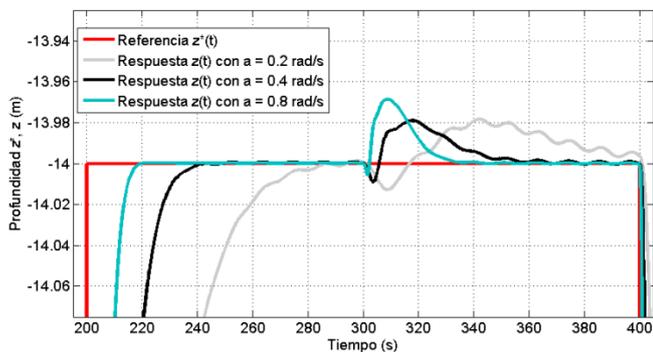


Figura 17. Respuestas temporales ampliadas de la profundidad $z(t)$

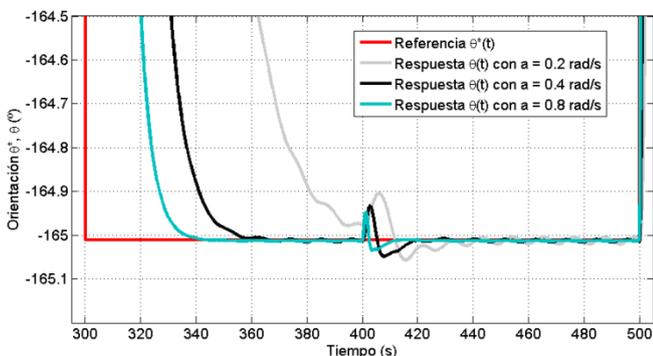


Figura 18. Respuestas temporales ampliadas de la orientación $\theta(t)$

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.

6.2. Maniobra de cambio de orientación y mantenimiento de la profundidad

Maximizar el aprovechamiento de la energía de las corrientes mareales, con cambios de orientación periódicos, 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 6 horas, considerándose 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 $[-0.5, 0.5] \text{ m/s}$ resulta de 2700 s , tiempo 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 $[-2.5, -0.5] \text{ m/s}$ y $[0.5, 2.5] \text{ m/s}$ 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, teniendo en cuenta que mientras se está produciendo energía, no se requiere cambio de orientación del dispositivo. 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 $\mathbf{q}_1^*(\Delta t_1 = 300 \text{ s}) = [-15 \text{ m } (\text{de } -176.6^\circ \text{ a } -90.0^\circ)]^T$; en la segunda etapa se mantienen tanto la profundidad como la orientación en $\mathbf{q}_2^*(\Delta t_2 = 2100 \text{ s}) = [-15 \text{ m } -90^\circ]^T$, manteniéndose el dispositivo en su orientación de máxima estabilidad, y una última etapa $\mathbf{q}_3^*(\Delta t_3 = 300 \text{ s}) = [-15 \text{ m } (\text{de } -90.0^\circ \text{ a } -3.4^\circ)]^T$, siendo \mathbf{q}_1^* y \mathbf{q}_3^* las etapas en las que se requiere 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 (Saravana y Jawahar 2012).

En cuanto a la selección de las ganancias del regulador multivariable se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Saturaciones en el máximo volumen de lastre de los tanques. El valor máximo de empuje por cada uno de los tres tanques ubicados en cada torpedo es de $\pm 200 \text{ kN}$.
- Saturaciones en los caudales de las bombas. Las prestaciones de cada una de las bombas permiten unos valores máximos de caudal equivalentes a una variación de empuje de $\pm 70 \text{ N/s}$.
- Las limitaciones impuestas por la existencia de ruido de las medidas. Al tratarse de una dinámica muy lenta del dispositivo, es posible filtrar las señales con simples filtros paso bajo, o a partir de filtros basados en estimadores algebraicos (Morales et al. 2016) de reciente aparición.

La Figura 19 visualiza la referencia de mantenimiento de la profundidad en $z^*(t) = -15$ 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.

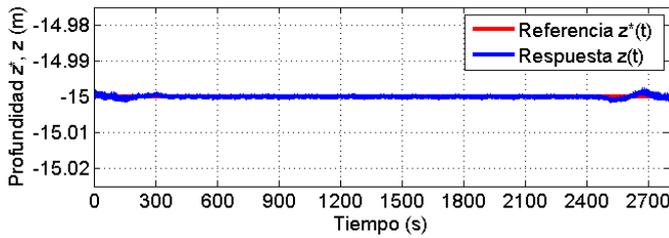


Figura 19. Respuesta temporal de la profundidad, durante la realización de la maniobra de cambio de orientación.

En la Figura 20 (superior) se muestra la trayectoria de cambio de orientación en las tres etapas $\{q_1^*(\Delta t_1), q_2^*(\Delta t_2), q_3^*(\Delta t_3)\}$ 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 $Error_\theta(t) = \theta^*(t) - \theta(t)$.

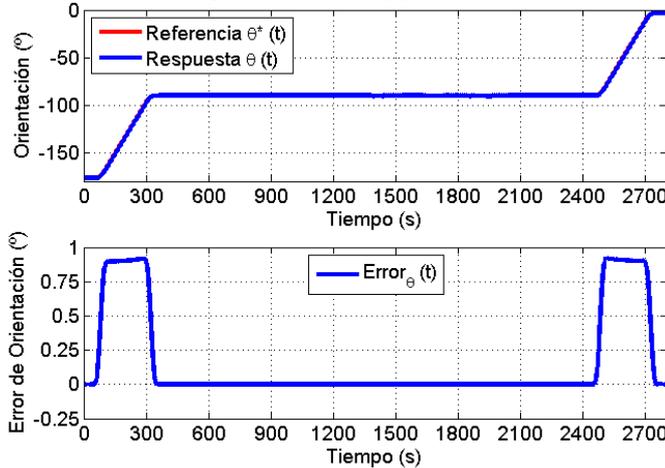


Figura 20. Respuesta temporal del ángulo, durante la realización de la maniobra de cambio de orientación y su error.

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.

Las Figuras 21 y 22 muestran, respectivamente, el empuje al que está sometido cada flotador superior e inferior, así como la variación requerida de este empuje. Puede comprobarse la verificación de las restricciones indicadas anteriormente, con una bomba de respeto.

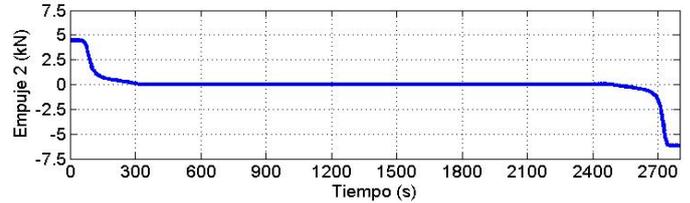
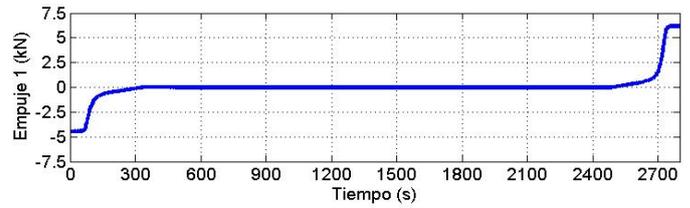


Figura 21. Empuje aplicado a los flotadores durante la realización de la maniobra de cambio de orientación

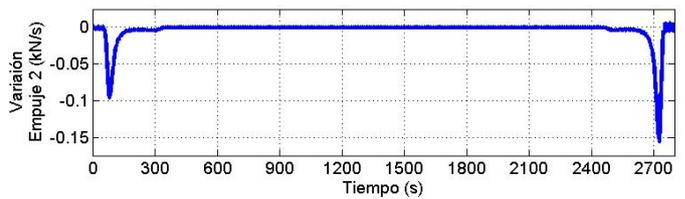
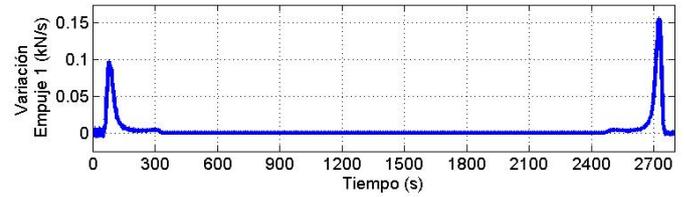


Figura 22. Variación del empuje requerida durante la realización de la maniobra de cambio de orientación

Por último, en la Figura 23 se muestra una secuencia gráfica de la realización, en simulación, de la anterior maniobra completa de cambio de orientación del dispositivo y mantenimiento simultáneo de la profundidad, cuando se produce el cambio de semiciclo en la marea. Se muestran distintos instantes de tiempo representativos, comenzando en el instante $t = 50$ s, momento en el que comienza a variar la referencia de giro, hasta el instante $t = 2750$ s, momento en el que se da por terminada la maniobra completa de cambio de orientación.

Puede observarse cómo las fuerzas horizontales del cambio de la marea modifican la posición x del generador. Esta secuencia obtenida durante la simulación de la maniobra completa, permite comprobar de una forma más visual, de nuevo, la efectividad del sistema de control propuesto.

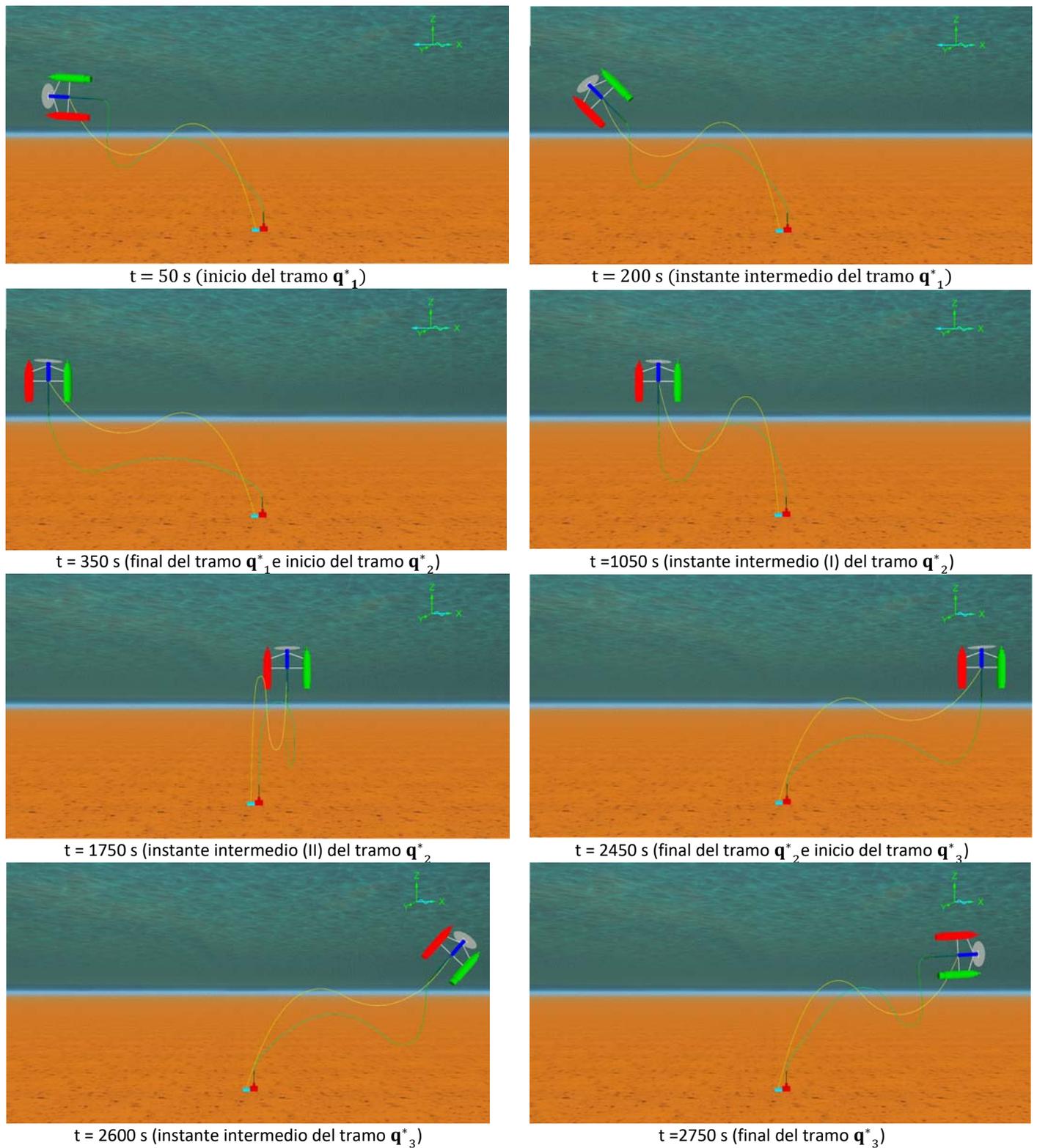


Figura 23. Aspecto del generador en la realización de la maniobra de cambio de orientación

7. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un método de selección cualitativa del sistema de control de lastres, siguiendo el procedimiento formal AHP, para un generador de energía a partir de las corrientes marinas, dotándole de la capacidad de

cambio de orientación y profundidad. El resultado de este análisis fue la selección de tanques con superficie libre. Una vez escogido el sistema de accionamientos, se propone un sencillo modelo dinámico, de dos grados de libertad: profundidad y orientación, de un dispositivo diseñado para el aprovechamiento de la energía de las corrientes mareales. Este

modelo se ha obtenido a partir de tres masas puntuales ubicadas en un plano normal al vector velocidad de la corriente. Por otro lado, se ha desarrollado una ley de control multivariable, basada en una matriz de desacoplamiento no lineal y en la compensación de los términos de fricción y compresibilidad, con el fin de asegurar un comportamiento adecuado del dispositivo cuando éste lleva a cabo maniobras utilizando el sistema de control de lastres propuesto. Por último, se han realizado varias simulaciones en un entorno computacional integrado basado en OrcaFlex-Matlab. Los resultados obtenidos en la validación del sistema de control en simulación, muestran que el sistema realiza las maniobras de forma extremadamente precisa, con un adecuado tiempo de establecimiento, sin presentar sobreoscilaciones apreciables y sin signos apreciables de acoplamiento. A partir de los desarrollos obtenidos se extraen las siguientes conclusiones:

- (i) El sistema de actuadores escogido permite la realización de la maniobra deseada de cambio de orientación, sin producirse saturaciones en los accionamientos y ejecutándola en un tiempo de establecimiento adecuado.
- (ii) El modelo dinámico desarrollado es suficientemente sencillo para ser usado en el diseño de la ley de control no lineal.
- (iii) La ley de control no lineal propuesta es computacionalmente sencilla y eficiente para ser fácilmente instalada en un sistema basado en microprocesador - microcontrolador.
- (iv) Se ha integrado el software conjunto OrcaFlex-Matlab que permite la validación de algoritmos de control basados en modelos dinámicos sencillos, ejecutados en Matlab, con los modelos de simulación de alta complejidad y gran realismo que ofrece OrcaFlex.
- (v) Con el sistema de control propuesto, el TEC es capaz de cambiar de forma controlada su orientación, alineándose con la corriente y manteniendo su profundidad.

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 CoDMAEC.

Referencias

- Bahaj, A.S., 2011. Generating electricity from the oceans. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 15, pp. 3399-3416.
- Brito A., y Villate J.L., 2014. Implementing Agreement on Ocean Energy Systems. (OES-IEA).
- Clément, A. y otros, 2002. Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 6, pp 405-431.
- De la Cruz, J. M. y otros, 2012. Automática marina: una revisión desde el punto de vista del control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)*, vol 9, n^o3, pp 205-218.
- FORCE, 2016 web page. Disponible online: <http://fundyforce.ca/renewable-and-predictable/> (accedido el 22 de noviembre de 2016).
- García, E. y otros, 2016. Recursos y sistemas energéticos renovables del entorno marino y sus requerimientos de control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)*, vol. 13, n^o2, pp 141-161.
- Guedes, C. y otros, 2012. Review and classification of wave energy converters. *Maritime Engineering and Technology*. Taylor & Francis Group: USA, 2012, pp. 585-594
- Hardisty J., 2009. *The Analysis of Tidal Stream Power*. Wiley.

- Khan J. y Bhuyan, G., 2009. *Ocean Energy Global Technology, Development Status*, Final Technical Report, IEA-OES.
- 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.
- López, A., 2007. Sistema sumergible para el aprovechamiento energético de las corrientes marinas. Concesión ES2341311-B2. Julio 2008.
- López, A. y otros, 2011. Dynamic behaviour of a second generation hydrokinetic converter. *Proceedings IEEE International Conference on Oceanic Engineering (OCEANS'11)*, Santander, España.
- López, A., y otros, 2013a. Inertial Behavior of Offshore Devices. *Proceedings 5th International Workshop on Marine Technology (MARTECH'13)*, Girona, España.
- López A. y otros, 2013b. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 27, pp 413-434.
- López A., y otros, 2014. Modelado Energético de Convertidores Primarios para el Aprovechamiento de las Energías Renovables Marinas. *RIAI- Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. vol.11, n^o2, pp. 224-235.
- López, A. y otros, 2015a. Methodology and results of the sea trials for a second generation tidal converter. *Proc. of 2nd International Conference on Maritime Technology and Engineering (MARTECH'14)*, pp 1213-1221 Lisbon, Portugal.
- López, A. y otros, 2015b. Dispositivo para el aprovechamiento de las corrientes marinas multi-rotor con estructura poligonal. Concesión ES2461440. PCT/ES2015/070071. Marzo 2015
- Lynn, P.A., 2014. *Electricity from Wave & Tide*. Wiley.
- Mathworks, 2016 web page: <https://es.mathworks.com/products/matlab/>
- Möller, B. y otros, 2012. Evaluation of offshore wind resources by scale of development. *Energy*. vol 45, n^o1, pp 314-322.
- Morales R. y otros, 2016. Online signal filtering based on the algebraic method and its experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*. pp 374-387.
- Myers, L.E. y otros, 2010. Equimar Deliverable D5.2: Device classification template. Equitable testing and evaluation of marine energy extraction devices in terms of performance, cost and environmental impact.
- Núñez, L.R. y otros, 2011. The GESMEY Project. Design & Development of a Second Generation TEC. *Proceedings 9th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC'11)*, Southampton, United Kingdom.
- Núñez, L.R. y otros, 2013. New steps in the development of the second generation TEC GESMEY. *Proceedings 10th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC'13)*. Aalborg, Denmark.
- Núñez, L.R. y otros, 2015. Comparative Analysis of Life Cycle Costs between the 2nd Generation TEC GESMEY and a 1st Generation TEC. *Proceeding 11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC'15)*. Nantes, France.
- Onstad, A.E. y otros, 2016. Site assessment of the floating wind turbine Hywind Demo. *Energy Procedia*. 94, pp 409-416.
- Orcina, 2016 web page: <https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/>
- Owen, A. y Trevor, M.L., 2008. Tidal current energy: origins and challenges. *Future Energy*, Oxford. Elsevier. pp111-128.
- Rourke, F.O. y otros, 2010. Marine current energy devices: current status and possible future applications in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14, pp 1026-1036.
- Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, vol. 1, n^o1. pp 83-98.
- Saravana, S. y Jawahar, N., 2013. Automated trajectory planner of industrial robot for pick-and-place task. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 10, pp.100.
- Sclavounos, P., 2008. Floating Offshore Wind Turbines. *Marine Technology Society Journal*. vol. 42, n^o2, pp 39-43.
- Somolinos, J.A., 2015. Control de operaciones de dispositivos marinos de aprovechamiento de la energía hidrocinética. Proyecto RETOS de la Sociedad DPI2014m bn-53499-R.
- Somolinos, J. A y otros, 2017. Dynamic model and experimental validation for the control of emersion manoeuvres of devices for marine currents harnessing. *Ren. Energy*, vol 103, pp 333-345.
- Sun, X. y otros, 2012. The current state of offshore wind energy technology development. *Energy*. vol 41, n^o 1, pp 298-312.
- Villate J.L. y Brito A., 2015 A. *Annual Report Ocean Energy Systems 2015*. www.iea-oceans.org.
- White, Frank M., 2011. *Fluid Mechanics*. 7^a Edición. McGraw-Hill. New York, NY, USA.