

Jornadas de Automática

Desarrollo de DAECs por GIT-ERM y sistema sensorial para torpedos cilíndricos

del Horno, L.^{a,*}, Somolinos, J.A.^a, Herrera, R.^b, Segura, E.^b

^a Grupo de Investigación Tecnológico en Energías Renovables Marinas (GIT-ERM), Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Memoria 4, 28040 Madrid, Spain

^b Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Ciudad Real, Universidad de Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, Spain

To cite this article: del Horno, L., Somolinos, J.A., Herrera, R., Segura, E. 2024. Development of TECs by GIT-ERM and sensory system for cylindrical torpedoes. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10846>

Resumen

Para poder transitar hacia una nueva economía baja en carbono en la que se pueda satisfacer la demanda energética a la vez que se reducen los niveles de CO₂ emitidos, y con ello poder mitigar los efectos del cambio climático, es razonable impulsar las energías renovables. La energía explotable de las corrientes marinas se encuentra, principalmente, a grandes profundidades. Para poder aprovechar esta energía, GIT-ERM ha desarrollado diferentes dispositivos, fondeados al lecho marino y capaces de variar de modo automático su profundidad y/u orientación mediante un sistema de control de agua de lastre, lo que permite abaratar costes y facilitar su explotación. Este trabajo presenta un breve resumen de los dispositivos desarrollados junto sus accionamientos hidrostáticos que resultan cilíndricos. Además, se presenta el sistema sensorial desarrollado. Este sistema es capaz de medir la cantidad de agua contenida en los tanques cilíndricos ante cualquier orientación. También se presentan una serie de resultados obtenidos del prototipo de laboratorio construido para su validación.

Palabras clave: Energía Renovable Marina, Dispositivos para el Aprovechamiento de la Energía de las Corrientes, Sistema de Control de lastre, Sistema Sensorial basado en Metodología, Medida de Volumen.

Development of TECs by GIT-ERM and sensory system for cylindrical torpedoes

Abstract

Promoting the implementation of renewable energies is a logical approach to shifting towards a new economy that has lower carbon emissions. This transition would meet the energy requirements while simultaneously decreasing CO₂ emissions, thereby helping to alleviate the impacts of climate change. The main source of usable energy for marine currents is located at significant depths. In order to utilise this energy, GIT-ERM has developed devices that attach to the seafloor and can automatically control their depth and/or position using a ballast water control system. This reduces costs and facilitates the process of exploiting energy. This paper offers a summary of the developed devices and their hydrostatic drives, which are cylindrical. Further, the developed sensory system is presented, which is capable of quantifying the volume of water in cylindrical tanks, regardless of their orientation. A series of results obtained from the laboratory prototype built for validation are also presented.

Keywords: Marine Renewable Energy, Tidal Energy Converters, Control Ballast System, Methodology-based Sensorial System, Volume Measurement.

1. Introducción

El cambio climático es una realidad. La temperatura de la superficie global ha aumentado 1.1°C por encima de la temperatura con relación al período 1850-1900 (IPCC 2023). Principalmente se debe a las actividades humanas, en especial

a la combustión de carbón y petróleo, aumentando significativamente la concentración de gases de efecto invernadero. El problema de esta situación climática demanda soluciones coordinadas y la cooperación internacional para avanzar hacia una economía con bajas emisiones de carbono y así mitigar los cambios climáticos mediante tecnologías de

descarbonización y métodos que reducen las emisiones de CO₂ como: (i) la captura y almacenamiento de carbono (Lund and Mathiesen 2012), (ii) cambio a combustibles con bajas emisiones de carbono (gas natural o combustibles renovables) (Mathy et al. 2018; ANCRE 2015), (iii) aumento de la eficiencia (Bustreo et al. 2019) o (iv) uso de energía renovable. La principal diferencia entre esta última y los combustibles fósiles está en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte, pero sobre todo en que, resulta en energía libre de emisiones o contaminantes.

La energía renovable, en términos de producción de energía, en 2023, representó aproximadamente el 30.2% de la producción mundial de electricidad (IEA 2023), y el consumo de electricidad procedente de fuentes renovables a nivel mundial casi se ha triplicado en la pasada década (REN21 2023).

A pesar de que más del 70 % de su superficie terrestre está cubierta por el agua de los océanos y que tiene un gran potencial energético (en forma de calor, mareas, olas y corrientes, pero sin contar el viento), siendo el mayor recolector, acumulador y transformador de energía, la Energía Renovable Marina (ERM) únicamente representaban el 0.4% de la producción eléctrica mundial en el 2020, es decir, menos del 0.1% del mix energético (Østergaard et al. 2020).

Esto se debe principalmente a las limitaciones actuales derivadas del coste y los desafíos tecnológicos relacionados con las severas condiciones intrínsecas al medio marino. La principal ventaja de las ERM en comparación con otras fuentes renovables es su previsibilidad (Cruz 2008) y que resulta suficiente para satisfacer con creces la demanda mundial total de energía (IRENA 2023). La energía de las corrientes, además de ser altamente predecible, en gran medida anticipan ser insensibles a las influencias climáticas (Charlier and Finkl 2009). Las corrientes marinas son, junto con las olas, una de las fuentes más prometedoras de las ERM (Vazquez and Iglesias 2016). La cuantificación de la energía que se podría extraer de las olas y corrientes marinas se estima en más de 48 TW/año (Somolinos et al. 2017; Bahaj and Myers 2003).

Hay factores, como la corrosión o el biofouling (Titah-Benbouzid and Benbouzid 2015), entre otros, que no facilitan el despliegue de los dispositivos que aprovechan la energía de las corrientes (DAECs), en el océano, al influir en su vida útil. El costo asociado al emplazamiento de estos en alta mar puede resultar prohibitivo, no solo por las causas ya mencionadas, sino por la dificultad relacionada con la profundidad o la necesidad de ventanas climáticas y de buques específicos para sus fases de instalación y/o mantenimiento. Estos buques especiales resultan muy costosos, y se puede prescindir de ellos, con la automatización de las maniobras de inmersión/emersión de los DAECs durante dichas fases mediante un Sistema de Control de Lastre (SCL).

Este trabajo se estructura en 5 Secciones. En la Sección 2 se resumen los DAECs desarrollados por GIT-ERM. En la Sección 3 se expone el sistema sensorial desarrollado y que es capaz de determinar de forma precisa la cantidad de agua contenida en los tanques. Los resultados experimentales obtenidos de un prototipo de laboratorio se muestran en la Sección 5. Finalmente, las conclusiones del trabajo se exponen en la Sección 6.

2. Breve resumen de los DAECs de GIT-ERM

Ya existen operando DAECs apoyados en el fondo marino, denominados de 1ª generación (Brito and Villate 2014). Los denominados de 2ª generación (Myers et al. 2011) disponen de sistemas de fondeo, con una base o ancla fija en el fondo y una serie de cables que lo sujetan al lecho marino. Se estima que el 80% de la energía explotable de las corrientes se localiza en zonas con más de 40 m de profundidad (Khan and Bhuyan 2009), la cual es considerada la profundidad límite para los dispositivos de 1ª generación (Lynn 2013). Por este motivo, existe un gran interés en los dispositivos de 2ª generación, ya que permiten la extracción de energía en aguas profundas.

Los buques necesarios para instalar estos dispositivos son costosos, ya que deben disponer de una amplia superficie de cubierta (transporte de las góndolas), una grúa de carga pesada (aproximadamente 250 toneladas de elevación) y de herramientas específicas para la instalación de dichos dispositivos, además de posicionamiento dinámico para garantizar seguridad y confiabilidad durante la instalación (del Horno et al. 2020). Estas características no son las de un buque típico, por lo tanto, no son fáciles de encontrar en el mercado para su alquiler. Esta situación condiciona el precio de venta de la energía obtenida pudiendo ser demasiado elevado para resultar tecnologías competitivas. Por ello, el grupo GIT-ERM lleva trabajando en el desarrollo de dispositivos dotados de SCL con el objetivo de automatizar las maniobras de inmersión/emersión mediante el control de profundidad y/u orientación (del Horno et al. 2021; La Portilla et al. 2018). Cada dispositivo ofrece equilibrio hidrostático inestable con el centro de gravedad por debajo del centro de empuje. La distribución de pesos y empujes se puede modificar mediante el SCL diseñado y localizado en los flotadores, permitiendo de esta forma provocar fuerzas y/o pares sobre el dispositivo para controlar profundidades y/u orientaciones. Este sistema permite prescindir de herramientas especiales y/o buques grúa. Además, es posible realizar las fases de mantenimiento in situ en caso de ser necesario, abaratando con ello los costes asociados a dicha fase (Segura et al. 2019). A continuación, se resumen dos de estos dispositivos

2.1. Gesmey

El GESMEY (Figura 1) (López Piñeiro et al. 2012) es un dispositivo diseñado para el aprovechamiento de las corrientes marinas y que opera en torno a 30 metros de profundidad.

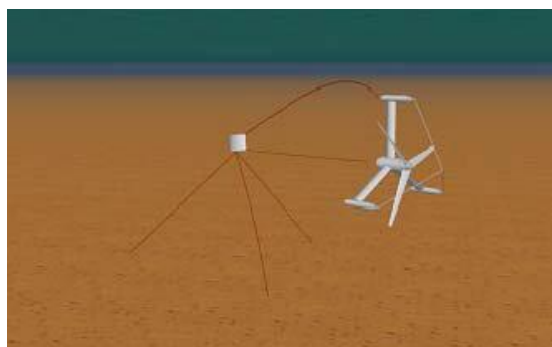


Figura 1: Perspectiva del generador GESMEY para corrientes inerciales junto a la boya BOSCEM (López Piñeiro 2012)

Está formado un rotor con tres palas, que acciona un generador eléctrico situado en un domo central (POD), y del cual, salen de forma radial (estructura en λ), tres brazos situados en un plano perpendicular al eje del rotor. Al final de cada brazo hay un flotador cuyo eje se encuentra paralelo al del domo, lo que facilita su orientación durante en operación.

2.2. Hive-TEC

Los dispositivos fondeados han evolucionado de generadores con un unico gran rotor a generadores multi-rotor como el del dispositivo Hive-TEC (López Piñeiro et al. 2018). En la Figura 2 puede apreciarse cómo se alternan los flotadores y las unidades generadoras de energía que se encuentran unidas entre sí por una estructura en celosía. En el torpedo central se ubican los elementos electrónicos de potencia y eléctricos principales para la gestión y exportación de la energía eléctrica extraída de las corrientes.

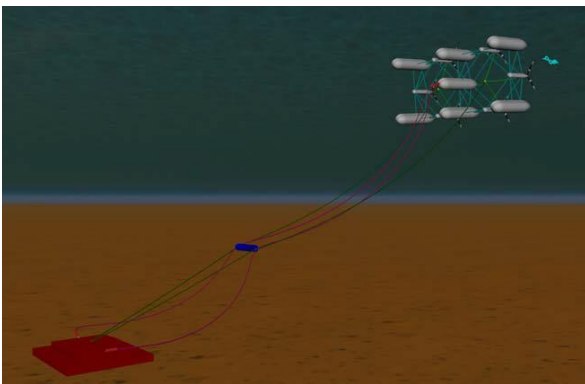


Figura 2: Perspectiva del generador Hive-TEC.

3. Sistema Sensorial

El SCL desarrollado por GIT-ERM, se encuentra en los flotadores y está compuesto por tanques cilíndricos de lastre y una cámara de máquinas, donde se encuentran ubicados los equipos encargados de tomar o expulsar el agua del mar a los tanques.

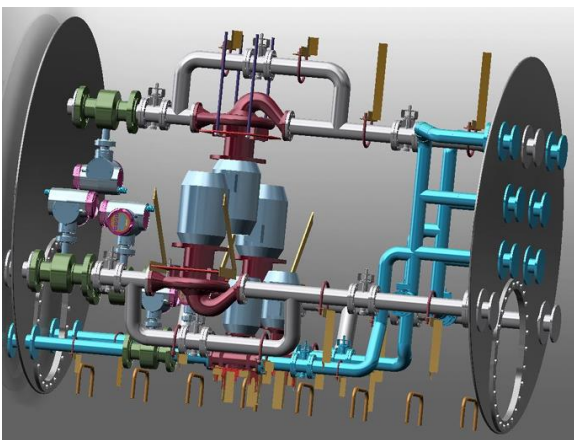


Figura 3: Representación completa del Equipamiento y sistemas de tuberías del Sistema de Lastre.

Se tienen dos tipos de bombas, centrífugas para mover grandes caudales de agua, bombas volumétricas para el control de precisión y compresores para la gestión de aire

comprimido (Perez et al. 2018). Los sistemas de tuberías aire/agua son independientes entre sí. En la Figura 3 se puede ver a detalle la cámara de máquinas con la disposición de las bombas junto con el tendido de las tuberías del sistema del agua en color azul y el del aire en gris) y elementos auxiliares (soportes de tuberías, válvulas, etc).

A pesar de los caudalímetros de las bombas, existen incertidumbres en la cantidad de agua contenida en los tanques y como se requiere conocer con exactitud este volumen con el fin de controlar de forma precisa las maniobras de inmersión/emersión se ha desarrollado un sistema sensorial basado en metodología y/o fusión sensorial (del Horno et al. 2023). La distribución del agua contenida (Figura 4) cambia ya que cuando el dispositivo varía su orientación el tanque también sufren los mismos cambios, debido a que forma parte inherente de la estructura de dichos dispositivos. Estos cambios dificultan el cálculo/medida del volumen de agua contenida en el interior de los tanques.

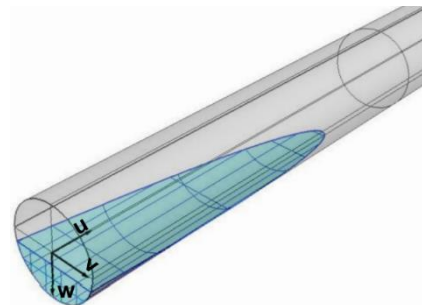


Figura 4: Vista 3D del tanque cilíndrico medio lleno.

La metodología del sistema sensorial se basa en el estudio de las posibles distribuciones que puede tomar un líquido en el interior de un cilindro, según su cantidad y orientación. Estas distribuciones, en función de la superficie mojada de las caras planas paralelas del cilindro (Figura 5), son las siguientes: (i) caso singular, se encuentra horizontal, (ii) 1 cara parcialmente mojada y la otra seca, (iii) 2 cara planas parcialmente mojadas, (iv) 1 cara totalmente mojada y la otra seca, (v) 1 cara totalmente mojada y la otra parcialmente.

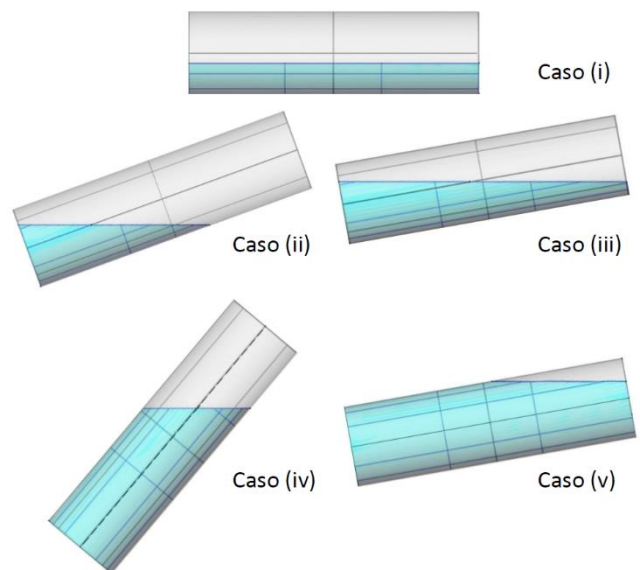


Figura 5: Casos de la distribución del agua.

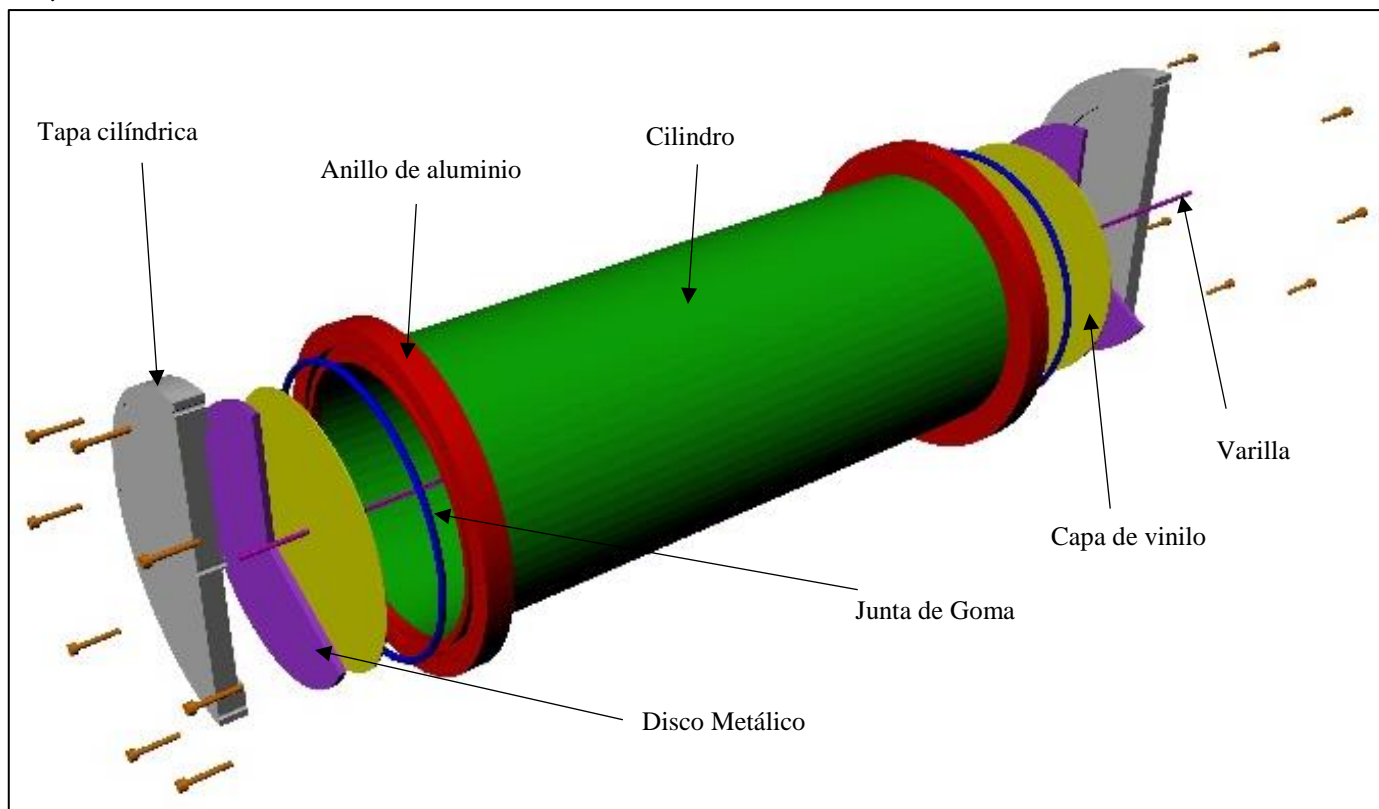


Figura 6: Vista explosionada en 3D del sistema sensorial capacitivo.

El sistema sensorial (Figura 6) consta de tres sensores capacitivos. Dos de estos sensores consisten en una placa metálica cubierta con una lámina de dieléctrico, y ubicados en cada una de las caras planas del cilindro. El mismo agua contenida, realiza la función de segunda placa capacitiva a tensión eléctrica de referencia cero. El tercer sensor consiste en una varilla delgada de metal y cubierta con una funda de material dieléctrico. Su funcionamiento es similar al de los sensores planos. Esta se sitúa a lo largo el eje longitudinal del cilindro y atravesando las caras planas de los dos primeros sensores. Mediante el sistema sensorial propuesto se obtienen las aturas mojadas en cada sensor capacitivo y mediante la metodología propuesta en el trabajo (del Horno et al. 2023) se obtiene el volumen de agua contenida.

Para poder realizar el cálculo del agua contenida, es necesario conocer el ángulo con respecto del plano horizontal (los otros dos ángulos no afectan a la distribución del agua). Por este motivo el sistema capacitivo usa el inclinómetro del propio DAEC.

Se ha concebido, diseñado, fabricado y puesto en funcionamiento un prototipo del sistema sensorial para laboratorio (Figura 7). El prototipo se encuentra ubicado en una estructura que permite girar al tanque de metacrilato desde cualquier ángulo de inclinación dentro del rango de estudio. El objetivo principal del prototipo fue establecer un entorno estable y regulado para la cuantificación del volumen de agua y la validación del método propuesto.



Figura 7: Prototipo experimental con gran ángulo (caso iv).

4. Ensayos Experimentales

En esta sección se presenta un conjunto resumido de resultados que muestran las correspondientes medidas de la altura mojada, para cada uno de los sensores capacitivos, y la medida de líquido resultante obtenido durante las pruebas experimentales, aplicando la metodología propuesta. Las figuras presentadas muestran las medidas obtenidas. El volumen de agua dentro del prototipo durante los ensayos que se muestran era de 3.25l.

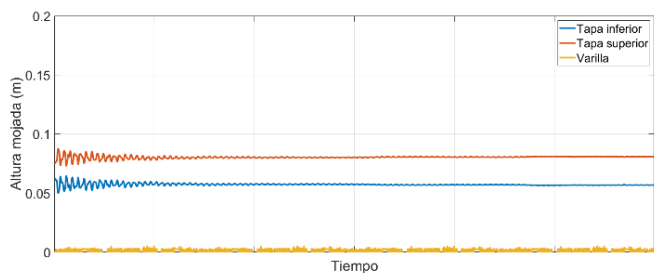


Figura 8: Medida de las alturas mojadas.

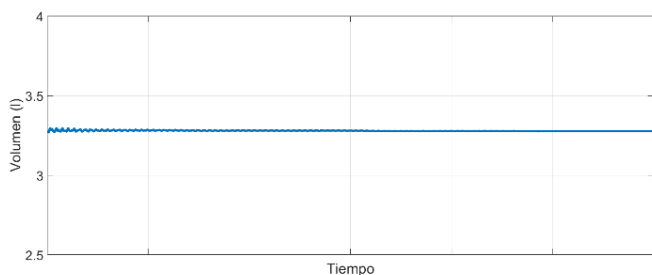


Figura 9: Volumen calculado.

En el primer juego de figuras se presentan las medidas de la altura mojada y del volumen cuando hay una pequeña oscilación del agua contenida en el cilindro, pero este se mantiene con un ángulo con respecto a la horizontal de 2.5°. En la Figura 8 se aprecia que la varilla no está en contacto con el agua. La distribución del agua se corresponde con el caso (i). También se puede apreciar las oscilaciones en el resultado obtenido en la altura mojada de cada una de las tapas. En la Figura 9 se muestra el volumen de agua medido, donde se puede apreciar que, a pesar de las oscilaciones, la medida obtenida del sistema resulta precisa exacta y razonablemente constante.

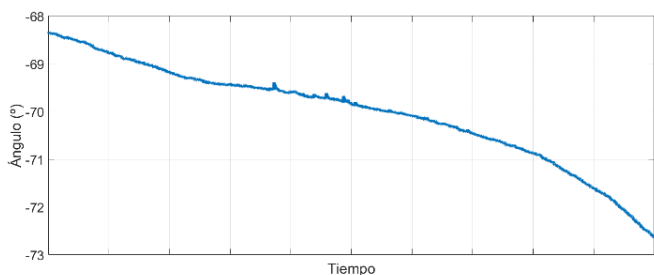


Figura 10: Medida del ángulo en función del tiempo.

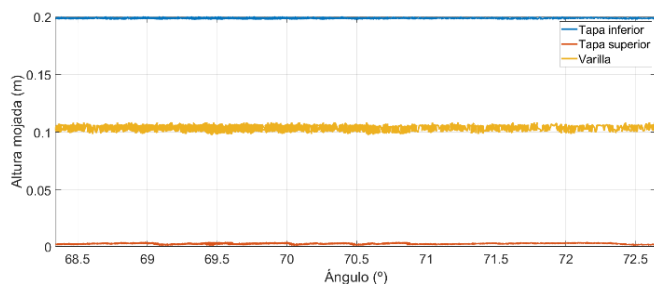


Figura 11: Medida de las alturas mojadas.

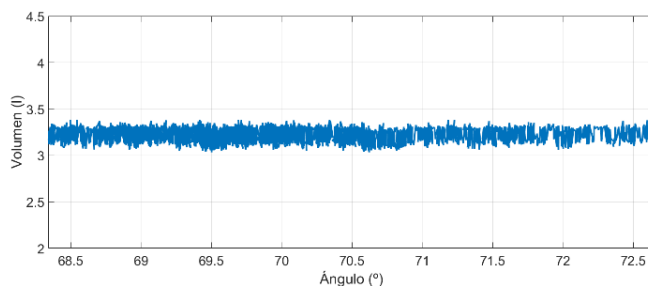


Figura 12: Volumen calculado.

En el último juego de figuras se muestran algunos de los resultados obtenidos cuando el ángulo de inclinación del tanque con respecto a la horizontal varía lentamente. En la Figura 10 se muestra dicha variación del ángulo. La distribución del agua corresponde al caso (iv), lo cual puede apreciarse en la Figura 11, una de las tapas se encuentra totalmente seca y la otra totalmente mojada. La medida de la altura mojada en la varilla tiene niveles de ruido más altos. La presencia de este fenómeno se puede atribuir al desempeño, no deseado de esta como antena, lo que resulta en interferencias con las mediciones de volumen como se muestra en la Figura 12.

5. Conclusiones

En este artículo se han presentado dos de los diferentes prototipos desarrollados por el grupo GIT-ERM, comprobando que el SCL propuesto para cada uno de ellos son similares entre sí, ya que los modelos desarrollados son fácilmente generalizables a otros dispositivos sumergidos.

Los accionamientos hidrostáticos mediante los cuales se pueden generar las fuerzas y/o pares necesarios para el control de la profundidad y/u orientación y la maquinaria necesaria para gestionar el agua de lastre son iguales y se encuentran ubicados en los flotadores.

Para garantizar el control de los dispositivos es necesario conocer de forma precisa la cantidad de agua en el interior de cada tanque cilíndrico para cualquier de orientación. Para ello, se ha desarrollado un sistema sensorial, que ha sido verificado mediante un prototipo de laboratorio, el cual es capaz de determinar con precisión el volumen de lastre en el interior de un tanque.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con financiación parcial del M° de Ciencia e Innovación, a través de los Proyectos de Investigación TED2021-132419B-I00 y PID2022-141978NB-I00.

Referencias

- ANCRE. 2015. "Decarbonization Wedges."
- Bahaj, A. S., and L. E. Myers. 2003. "Fundamentals Applicable to the Utilisation of Marine Current Turbines for Energy Production." *Renewable Energy* 28 (14). [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00103-4).

- Brito, A., and J.L. Villate. 2014. "Implementing Agreement on Ocean Energy Systems." <https://doi.org/10.1115/OMAE2007-29722>.
- Bustreo, C., U. Giuliani, D. Maggio, and G. Zollino. 2019. "How Fusion Power Can Contribute to a Fully Decarbonized European Power Mix after 2050." *Fusion Engineering and Design* 146 (October 2018): 2189–93. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.150>.
- Charlier, R.H., and C.W. Finkl. 2009. "Ocean Energy: Tide and Tidal Power." In *Ocean Energy: Tide and Tidal Power*, 1–262. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77932-2>.
- Cruz, J., ed. 2008. *Ocean Wave Energy "Current Status and Future Perspectives"*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-74895-3>.
- del Horno, L., E. Segura, R. Morales, and J. A. Somolinos. 2020. "Exhaustive Closed Loop Behavior of an One Degree of Freedom First-Generation Device for Harnessing Energy from Marine Currents." *Applied Energy* 276 (October): 115457. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115457>.
- del Horno, L., J. A. Somolinos, E. Segura, and R. Morales. 2021. "Estudio Comparativo de Algoritmos de Control Para Maniobras de DAECs* de Primera Generación y Dos Grados de Libertad." *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18 (4): 407–18. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2021.14974>.
- del Horno, L., E. Segura, J.A. Somolinos, and R. Morales. 2023. "A New Methodology-Based Sensorial System with Which to Determine the Volume of Liquid Contained in a Cylindrical Tank Subjected to Full Variations in Its Orientation." *Journal of Marine Science and Engineering* 11 (12). <https://doi.org/10.3390/jmse11122316>.
- IEA. 2023. "Renewables 2023. Analysis and Forecast to 2028."
- IPCC. 2023. "Summary for Policymakers: Synthesis Report." *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IRENA. 2023. "Renewable Energy Statistic 2023." [file:///C:/Users/Muhyeddin/Downloads/Statistical Review of World Energy.pdf](file:///C:/Users/Muhyeddin/Downloads/Statistical%20Review%20of%20World%20Energy.pdf).
- Khan, J., and G.S. Bhuyan. 2009. "Global Technology Development Status."
- La Portilla, M., A. López Piñero, J.A. Somolinos, and R. Morales. 2018. "Modelado Dinámico y Control de Un Dispositivo Sumergido Provisto de Actuadores Hidrostáticos." *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 15 (1): 12–23. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2017.8824>.
- López Piñero, A. 2012. Boya de fondeo mono-punto giratoria y sumergible, para dispositivos sumergidos, con conexiones eléctricas y ópticas. ES 2 367 616 B2, issued 2012.
- López Piñero, A., J.A. Somolinos, and R. Morales. 2018. "Control de Un Nuevo Dispositivo de Aprovechamiento de Corrientes Mareales de Segunda Generación." In *XXXIX Jornadas de Automática*, 422–29. Badajoz, España. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565.0422>.
- López Piñero, A., J.A. Somolinos, L.R. Núñez, E.M. Novoa, and A.M. Carneros. 2012. "Dispositivo Para Aprovechar La Energía de Corrientes Marinas. El Proyecto GESMEY, Un Caso de Éxito." *Economía Industrial*, no. 386: 135–44. <http://oa.upm.es/38548/>.
- Lund, H., and B. Vad Mathiesen. 2012. "The Role of Carbon Capture and Storage in a Future Sustainable Energy System." *Energy* 44 (1): 469–76. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.06.002>.
- Lynn, P.A. 2013. *Electricity from Wave and Tide: An Introduction to Marine Energy*. <https://doi.org/10.1002/9781118701669>.
- Mathy, S., P. Menanteau, and P. Criqui. 2018. "After the Paris Agreement: Measuring the Global Decarbonization Wedges From National Energy Scenarios." *Ecological Economics* 150 (March 2017): 273–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.012>.
- Myers, L.E., A.S. Bahaj, C. Retzler, D. Pizer, F. Gardner, C. Bittencourt, and J. Flinn. 2011. "Equitable Testing and Evaluation of Marine Energy Extraction Deliverable D5.2 Device Classification Template."
- Østergaard, P.A., N. Duic, Y. Noorollahi, H. Mikulcic, and S. Kalogirou. 2020. "Sustainable Development Using Renewable Energy Technology." *Renewable Energy* 146: 2430–37. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>.
- Perez, R., A. Lopez Piñero, J.A. Somolinos, and L.R. Núñez. 2018. "Detail Design of a Ballast Control Room for an Underwater Tidal Energy Converter." *Brodogradnja* 69 (1): 39–52. <https://doi.org/10.21278/brod69103>.
- REN21, 2023. "Renewables 2023 Global Status Report Collection, Renewables in Energy Demand."
- Segura, E., R. Morales, and J.A. Somolinos. 2019. "Increasing the Competitiveness of Tidal Systems by Means of the Improvement of Installation and Maintenance Maneuvers in First Generation Tidal Energy Converters-An Economic Argumentation." *Energies*, June. <https://doi.org/10.3390/en12132464>.
- Somolinos, J. A., A. López Piñero, L. R. Núñez, and R. Morales. 2017. "Dynamic Model and Experimental Validation for the Control of Emergence Manoeuvres of Devices for Marine Currents Harnessing." *Renewable Energy* 103 (April): 333–45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.076>.
- Titah-Benbouzid, H., and M. Benbouzid. 2015. "Marine Renewable Energy Converters and Biofouling: A Review on Impacts and Prevention." *A Review on Impacts and Prevention. EWTEC*.
- Vazquez, A., and G. Iglesias. 2016. "Grid Parity in Tidal Stream Energy Projects: An Assessment of Financial, Technological and Economic LCOE Input Parameters." *Technological Forecasting and Social Change* 104 (March): 89–101. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2015.12.007>.