

Integración de la energía de las corrientes mareales en entornos urbanos costeros: Caso de la desembocadura del río Tinto.

Fomento de la Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación en Ciudades Inteligentes

Álvaro de la Cruz Álamo, María Reyes Sánchez Herrera, Juan Pérez Torreglosa, Juan Antonio Morales, Jesús Clavijo Camacho, José Antonio Hernández Díaz.

Departamento Ingeniería Eléctrica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) Universidad de Huelva (UHU)

Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 21007 Huelva

alvaro.delacruz@didp.uhu.es, reyes.sanchez@dfaie.uhu.es, juan.perez@die.uhu.es, jmorales@uhu.es, jesus.clavijo@die.uhu.es, joseantonio.hernandez@dimme.uhu.es

Resumen- Este artículo analiza las oportunidades de integración de la energía de las corrientes mareales en el mix energético de las poblaciones costeras y, en concreto, su integración en las infraestructuras urbanas existentes para cubrir pequeñas demandas energéticas de forma sostenible. Para ello, se presenta el proyecto “Experiencia piloto de aprovechamiento de corrientes mareales en las costas de Huelva (TidUtil)” el cual consiste en la instalación de una turbina mareomotriz de baja potencia bajo el Puente del Tinto, en la desembocadura del río Tinto, Huelva. Se pretende utilizar la turbina Triton MK II, diseñada para operar en entornos de bajo flujo, con el fin de evaluar su viabilidad en la generación distribuida de energía, utilizando recursos naturales disponibles en áreas urbanas sin necesidad de nuevas grandes infraestructuras. Además, se abordan los retos vinculados a la sedimentación, la acidez del agua y la variabilidad de los flujos, junto con las estrategias de mejora en el diseño y mantenimiento para aumentar la eficiencia y extender la vida útil de las instalaciones.

Palabras Clave- Corrientes mareales, Integración de Energías renovables en infraestructuras urbanas.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los siglos XVII y XVIII, la provincia de Huelva y otras regiones del sur de la península como Cádiz y el Algarve portugués, aprovecharon de manera efectiva la energía de las mareas mediante la construcción de molinos mareales. Estas infraestructuras, ubicadas estratégicamente en estuarios y marismas, como el Molino del Pintado en Ayamonte [1], jugaron un papel crucial en la economía local, permitiendo moler grano mediante el flujo natural de las mareas.

Los molinos mareales, diseñados para almacenar agua durante la pleamar y liberarla durante la bajamar, aprovechaban las diferencias de nivel del agua para generar energía mecánica. En el caso del Molino del Pintado, con sus seis muelas, producía harina que abastecía tanto a la población local como a los barcos que realizaban travesías transatlánticas [2]. Estos molinos se integraban de forma natural en el entorno y la economía, ya que estaban contruidos para maximizar el uso de recursos locales y naturales, siendo fundamentales para la subsistencia de las poblaciones cercanas. Esta tecnología entró en declive tras la revolución industrial. En concreto, el Molino del Pintado funcionó hasta 1946.

El proyecto actual sigue esta misma lógica histórica aprovechando este recurso natural para disminuir el consumo eléctrico de las poblaciones costeras. La turbina Triton Hales MK II aprovechará el flujo de las corrientes de la ría de Huelva para generar energía, empleando una infraestructura existente como es el puente del Tinto; al igual que los molinos mareales aprovechaban el entorno y las condiciones naturales de los estuarios.

La energía oceánica tiene un potencial significativo, aunque difícil de cuantificar. Los estudios más optimistas sugieren que se podrían generar hasta 32 TW de electricidad al año [3]. Estudios más conservadores estiman un potencial total de 337 GW y 885 TWh al año [4].

Las turbinas mareales extraen energía cinética de las corrientes generadas por las mareas, similar a las turbinas eólicas, pero con diferencias clave. Los flujos de las corrientes mareales están confinados entre el lecho marino y la superficie del mar, y pueden concentrarse en un canal, a diferencia de la energía eólica. Las turbinas mareales, con la misma capacidad de potencia nominal que los aerogeneradores, pueden producir cuatro veces más energía por año/m² [5]. Aunque las turbinas mareales operan con velocidades de flujo más bajas, el agua tiene una densidad de 1025 kg/m³ comparada con 1.25 kg/m³ del aire, compensando así las velocidades menores y produciendo la misma potencia [6].

Este efecto se puede apreciar en la Ec. 1. que modela la potencia producida por una turbina.

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v(t)^2 \quad (1)$$

- P(t) es la potencia hidráulica por unidad de superficie, medida en [W].
- C_p es el coeficiente de potencia, que varía dependiendo de la microturbina considerada.
- A es el área barrida del rotor de la microturbina o el área frontal de la microturbina, medida en [m²].
- v(t) es la velocidad del flujo, medida en [m/s].

El proyecto “Experiencia piloto de aprovechamiento de corrientes mareales en las costas de Huelva (TidUtil)” aprovechará el flujo de las corrientes de la ría de Huelva para generar energía, empleando una infraestructura existente

como es el puente del Tinto; al igual que los molinos mareales aprovechaban el entorno y las condiciones naturales de los estuarios.

En este artículo se presentan los trabajos realizados para establecer la ubicación de la turbina Triton MKII y los primeros análisis de la distribución del flujo en el emplazamiento elegido.

II. DESARROLLO DEL PROYECTO

A. Selección del emplazamiento.

Tras una prospección en las posibles ubicaciones (Desembocadura del Río Tinto y en la Zona 9 del puerto de Huelva) para la turbina en torno a la desembocadura de los ríos Tinto y Odiel en la ría de Huelva, se determina que el lugar con mayor potencial energético para la instalación de la turbina es la desembocadura del río Tinto, en lo que se conoce como Punta del Cebo. La turbina irá instalada debajo del puente del Tinto, el cual une la autovía H-30 con la carretera nacional N-442, en el arco número 14 contando desde la Punta del Cebo (37°12'35"N 6°56'08"W), Fig. 1.

La colocación de la turbina debajo del puente supone una ventaja, ya que no será necesario instalar grandes extensiones de cable submarino, además de poder usar el puente como estructura para colocar el generador fuera del agua abaratando más los costes de instalación.

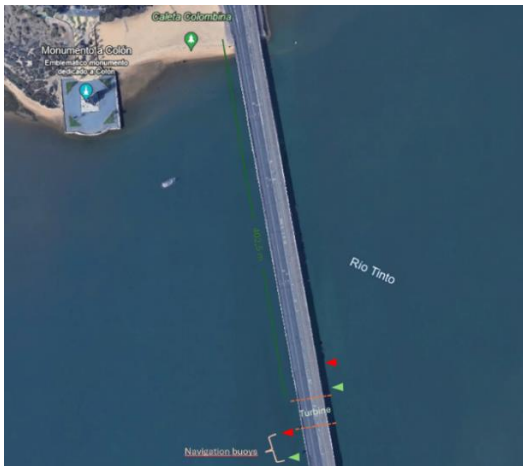


Fig. 1. Localización de la instalación.

B. Análisis del recurso energético (estudios sobre el flujo).

Los datos de flujo se obtuvieron mediante una campaña de medidas con un dispositivo denominado ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) de la marca Teledyne RD Instruments, modelo WorkHorse Centinela. La campaña se inició el día 27 de febrero de 2024 y terminó el 13 de marzo del mismo año. El dispositivo de medida en cuestión se instaló en el mismo lugar en el que se tiene planeado situar la turbina.

Los datos que se han obtenido de la campaña de medidas incluyen datos a distintas profundidades, la primera medida se encuentra a 1.05 metros del fondo y después tenemos 33 medidas más separadas 0.5 metros entre cada una. Por tanto, estamos registrando valores de dirección y magnitud de la corriente a distintas distancias del fondo.

Las velocidades horizontales a lo largo de la capa de agua han mostrado una tendencia en la que la magnitud de la velocidad se incrementa a medida que nos acercamos a la superficie y nos alejamos del fondo, Fig. 2.

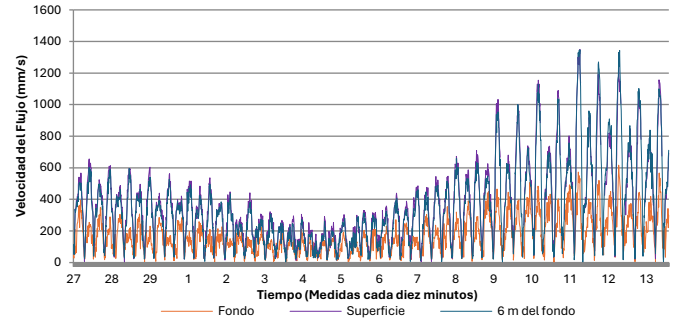


Fig. 2. Magnitud de las velocidades horizontales a distintas profundidades.

Se aprecia que las mayores velocidades se dan cercanas a la superficie, pero las de mayor calidad en cuanto a dirección y a dispersión del flujo se encuentra a 5.55 m del fondo, Fig. 3.

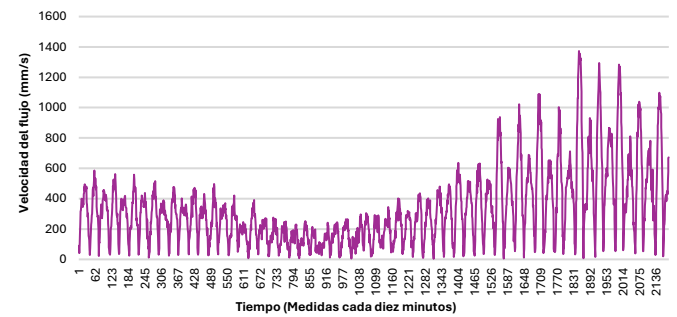


Fig. 3. Velocidades de flujo a 5.55 m del fondo.

C. La turbina seleccionada.

La turbina Triton Hales MK II es una turbina mareomotriz diseñada para operar en condiciones de baja velocidad de flujo, como las que se presentan en la ría de Huelva. Con un diámetro de 1 x 1 metros, su diseño está optimizado para funcionar en corrientes con velocidades de flujo a partir de 0.5 m/s, alcanzando su máxima eficiencia a partir de 1.5 m/s. A pesar de su tamaño compacto, es capaz de generar entre 2 kW y 6 kW de potencia, dependiendo de las condiciones del flujo, Fig. 4. Esta capacidad para operar en flujos de baja velocidad la hace adecuada para entornos donde otras turbinas no serían viables.

Un aspecto clave de la Triton Hales MK II es su instalación sobre una plataforma tipo catamarán, que facilita tanto su posicionamiento en la corriente como su mantenimiento. Este sistema permite sumergir o extraer la turbina del agua con facilidad, lo que simplifica considerablemente las tareas de inspección y reparación. Al no depender de estructuras fijas en el lecho marino, el catamarán proporciona acceso directo a la turbina, reduciendo los tiempos de intervención y los costos asociados a operaciones submarinas, Fig. 5.

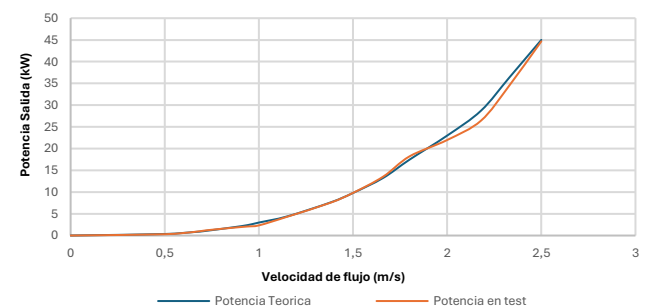


Fig. 4. Curva característica de potencia de la Triton MKII.

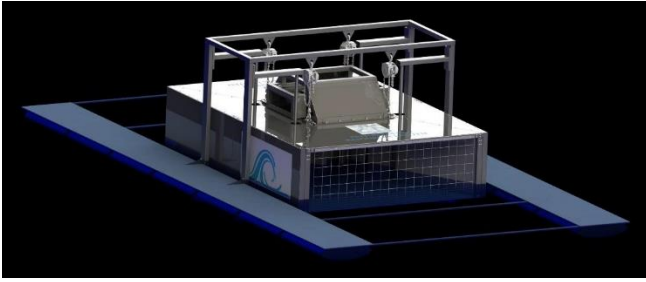


Fig. 5. Estructura del sistema de catamarán.

D. Energía prevista generada por la Triton MKII en el emplazamiento.

La energía prevista que puede producir la turbina instalada bajo el Puente de Colón ha sido evaluada utilizando los datos recogidos de velocidad de flujo mediante el ADCP a lo largo de un periodo de tiempo con un intervalo de medida de diez minutos. En la Fig. 6, se observa la potencia teórica de salida de la turbina, ubicada a una distancia de 5,55 metros del fondo. Durante la mayor parte del tiempo, la potencia generada se mantiene por debajo de 1 kW, con picos que alcanzan los 7 kW en momentos de mayor velocidad de las corrientes. Estos picos se corresponden con fases específicas de la marea, donde las condiciones óptimas permiten que la turbina extraiga una mayor cantidad de energía del flujo mareal.

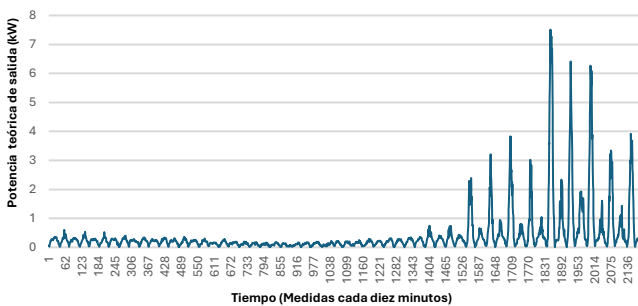


Fig. 6. Potencia hipotética generada por la turbina a 5,55 m del fondo.

En la Fig. 7, se representa la energía generada por la turbina a diferentes distancias del fondo: 5,55 m, 6,05 m y 6,55 m. En este caso, la energía acumulada se mide en kilovatios-hora (kWh) por día, mostrando cómo la producción energética varía según las condiciones mareales a lo largo de los días. A partir del 8 de marzo, se aprecia un aumento significativo en la energía generada, alcanzando picos de hasta 35 kWh/día el día 11 de marzo a una distancia de 6,55 m del fondo. Esta producción máxima de energía coincide con las mareas de mayor intensidad.

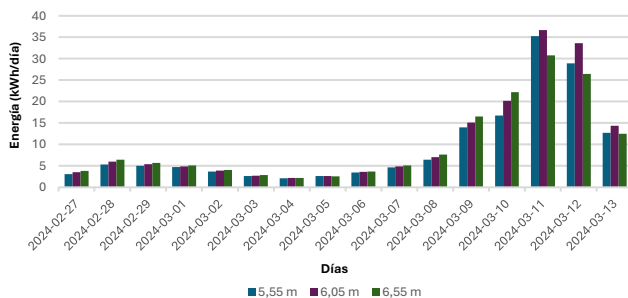


Fig. 7. Energía diaria obtenida a distintas profundidades.

En general, la turbina muestra una tendencia a generar más energía cuando se encuentra instalada a mayores distancias del fondo, como 6,55 metros, lo que indica que, a mayor distancia del fondo, las condiciones del flujo mareal parecen más estables y con mayor potencial para la producción de energía. Sin embargo, incluso a distancias más cercanas al fondo, como los 5,55 metros, se observa una producción energética considerable, aunque con variaciones más pronunciadas. Este análisis inicial demuestra que la turbina puede ofrecer una producción continua de energía con variaciones según las condiciones del flujo de la marea, optimizándose en momentos específicos del ciclo mareal.

III. APLICACIONES FUTURAS Y VIABILIDAD.

En el contexto de las aplicaciones futuras y viabilidad de la energía mareomotriz en entornos urbanos costeros, uno de los aspectos clave es su replicabilidad para satisfacer demandas energéticas específicas. Este proyecto, en la desembocadura del río Tinto, ofrece un enfoque que puede ser aplicado en otras ciudades costeras con características similares.

Un ejemplo parecido, que refuerza esta idea es el estudio realizado en el río Nalón, en el norte de España, descrito en el artículo científico "Obtaining Energy from Tidal Microturbines: A Practical Example in the Nalón River" [7]. En dicho estudio, se implementa una red inteligente (smart grid) basada en un conjunto de microturbinas mareomotrices, cuya energía se utiliza para alimentar un sistema de iluminación inteligente a lo largo de un paseo en la desembocadura del río. Este proyecto, que se limita a su estudio en simulación, destaca por la integración eficiente de la energía mareal en una aplicación práctica y urbana, minimizando el impacto ambiental y los costos de inversión gracias al uso de microturbinas en ubicaciones cercanas a los puntos de consumo.

En ambos casos, tanto en el proyecto de la ría de Huelva como en el del Nalón, se demuestra la viabilidad de utilizar la energía generada a partir de corrientes mareales para abastecer demandas específicas en entornos urbanos, como la iluminación de espacios públicos o la alimentación de pequeños servicios eléctricos. Estos proyectos son escalables y adaptables a diferentes localizaciones costeras, con la ventaja adicional de que se pueden instalar en infraestructuras existentes o en nuevas zonas de desarrollo urbano.

Esta adaptabilidad a las características locales y la integración en redes inteligentes hacen de este tipo de instalaciones una solución prometedora para el abastecimiento energético en ciudades costeras donde otro tipo de recursos no se encuentran presentes como pudieran ser las lluvias que abastecen las presas hidráulicas.

IV. CONCLUSIONES.

El desarrollo de proyectos como el de la turbina Triton Hales MK II bajo el Puente de Colón demuestra que la energía mareomotriz tiene un gran potencial para su uso en entornos urbanos costeros. A través de la integración en infraestructuras ya existentes, como puentes o muelles, es posible generar energía de manera eficiente incluso en condiciones de corrientes de baja velocidad. Este enfoque no solo maximiza el uso de los recursos naturales disponibles, sino que también minimiza la necesidad de nuevas construcciones y reduce el impacto ambiental de la instalación.

La capacidad de este tipo de tecnología para operar de forma eficiente en condiciones de baja velocidad de flujo es clave para su aplicación en otras áreas urbanas costeras. La implementación de turbinas compactas, como la Triton Hales MK II, que pueden instalarse en plataformas flotantes y ser mantenidas de manera sencilla, permite que esta tecnología sea altamente adaptable a distintos escenarios, desde puertos hasta desembocaduras de ríos en otras ciudades costeras.

Por otro lado, la replicabilidad de este tipo de proyectos en otras ciudades, como lo muestra el caso del río Nalón, es un indicador sólido de su viabilidad técnica y económica. La generación de energía para aplicaciones urbanas específicas, como la iluminación pública o el abastecimiento de pequeñas redes, constituye una vía prometedora para reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales en áreas costeras, donde el recurso mareal es accesible y planificable.

En conclusión, los proyectos de energía mareomotriz en entornos urbanos no solo son factibles desde el punto de vista técnico, sino que ofrecen una opción rentable y adaptable para satisfacer las demandas energéticas específicas de las ciudades costeras. El éxito de estos proyectos dependerá de su integración en infraestructuras existentes, la optimización del diseño de las turbinas para las condiciones locales y su abaratamiento, y el enfoque en aplicaciones energéticas de pequeña a mediana escala.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto del Plan Complementario de Ciencias Marinas. Código de expediente PCM_00024, cofinanciado por la Junta de Andalucía y por la Unión Europea a través de los fondos NextGenerationEU del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.



REFERENCIAS

- [1] «Visite el Ecomuseo mareal molino “El Pintado”», Web de Turismo de Ayamonte. Accedido: 19 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ayamonte.info/ecomuseo-molino-del-pintado/>
- [2] D. G. Martín, J. L. Rivera, P. N. Santana, J. R. Fito, y P. S. Aguiló, «EL MOLINO MAREAL DE “EL PINTADO” (AYAMONTE):».
- [3] A. Wahyudie, M. A. Jama, T. B. Susilo, O. Saeed, C. S. A. Nandar, y K. Harib, «Simple bottom-up hierarchical control strategy for heaving wave energy converters», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 87, pp. 211-221, may 2017, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.10.010.
- [4] A. De Andres, A. MacGillivray, O. Roberts, R. Guanche, y H. Jeffrey, «Beyond LCOE: A study of ocean energy technology development and deployment attractiveness», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 19, pp. 1-16, feb. 2017, doi: 10.1016/j.seta.2016.11.001.
- [5] A. Hussain, S. M. Arif, y M. Aslam, «Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 12-28, may 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.033.

- [6] A. S. Bahaj, A. F. Molland, J. R. Chaplin, y W. M. J. Batten, «Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank», *Renewable Energy*, vol. 32, n.º 3, pp. 407-426, mar. 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.01.012.
- [7] E. A. Alvarez, M. Rico-Secades, D. F. Suárez, A. J. Gutiérrez-Trashorras, y J. Fernández-Francos, «Obtaining energy from tidal microturbines: A practical example in the Nalón River», *Applied Energy*, vol. 183, pp. 100-112, dic. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.173.