



Aplicación del modelo de simulación IBER para determinar el potencial energético de ríos y estuarios: caso ría de avilés.

Maycol Francisco Mena Palacios [*]
Eduardo Blanco Marigorta [**]
Rodolfo Espina Valdés [**]

[*] **Alumno;** [**] **Tutores**
UO266947@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo

RESUMEN

El desarrollo de las energías renovables contribuye en forma significativa en disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, además, permitirían cubrir parte de la demanda energética mundial.

La energía mareomotriz cuenta con un gran potencial, lo que ha fijado el interés de sectores científicos e industriales para su explotación, creando nuevas líneas de investigación dirigidas al desarrollo de tecnologías para su aprovechamiento energético y la estimación precisa del recurso energético.

La estimación del recurso energético aplicado a modelos de simulación numérica ha brindado resultados satisfactorios, en este estudio se aplicó el modelo de simulación bidimensional en régimen no estacionario para aguas poco profundas IBER en la Ría de Avilés, diseñándose una geometría basada en datos geográficos de acceso libre (IGN), usando distintas herramientas informáticas para mejorar la precisión y contornos (ArGis, Globa Mapper, Civil 3D).

Los resultados del estudio muestran un moderado potencial energético en la Ría de Avilés, principalmente en la desembocadura, además se considera que es posible extraer hasta 0.55 KWh/m^2 día de energía de las corrientes marinas usando una microturbina que funcione a bajas velocidades.

ABSTRACT

The development of renewable energies contributes significantly to reducing greenhouse gas emissions, in addition, it can cover a part of the global energy demand.

The great potential of tidal energy has interested scientists and industries developing research and exploitation and encouraging the development of technologies and accurate models for the estimation of the energy resource.

The estimation of the energetic efficiency in numerical simulation models has given satisfactory results. In this study the model of two-dimension simulation was applied in a non-permanent regime for shallow waters IBER in the Ría de Avilés. A geometry was designed based on geographical free access data (IGN), and different computer tools were implemented to improve the accuracy and contours (ArGis, Globa Mapper, Civil 3D) of the geometry.

The results of the study show an interesting energy potential in the Ría de Avilés, mainly in the mouth. It seems viable to extract up to 0.55 KWh/m^2 day of energy from the marine currents using a microturbine that works at low speeds.

Palabras claves: Energía mareomotriz, energías renovables, modelos numéricos, IBER, Potencial energético



1. INTRODUCCIÓN

El consumo de la energía primaria a nivel mundial en el año 2016 fue de 59.45 PWh /año aproximadamente, aumentando un 2.2% en 2017, siendo el consumo de gas natural, el que tuvo un mayor crecimiento seguido de las energías renovables, sin embargo las emisiones de CO₂ aumentaron un 1.6% (Energy BP Statistical Review of World, 2018), lo cual evidencia la necesidad del estudio de fuentes alternativas para la obtención de energías limpias y así contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero.

Estudios muestran que el potencial de las energías oceánicas se encuentra en un intervalo de 40-90 PWh/año (World Energy Council, 2016), mientras que el potencial de la energía mareomotriz puede estar en 500 - 1000 TWh/año (Radfar, Panahi, Javaherchi, Filom, & Mazyaki, 2017) y 108 TWh/año en Europa, principalmente en países como el Reino Unido, Francia, Irlanda; Holanda, Alemania y España (González-Caballín et al., 2016). Lo anterior ha llevado a que la comunidad científica e industrial desarrolle nuevas tecnologías para la producción de energías limpias, siendo precisamente el sector de las energías oceánicas de gran relevancia por contar con un gran potencial y la característica de tener una alta probabilidad de predictibilidad.

En el océano se pueden aprovechar distintas fuentes de energías limpias tales como: las olas (energía undimotriz), las gradientes de temperatura marinas (energía mareomotérmica), mezcla de aguas dulces y salada (gradiente salino), las mareas (energía mareomotriz). Este trabajo se centrará en la energía mareomotriz.

La atracción gravitatoria del sol y la luna sobre la tierra son los principales responsables de la producción de oscilaciones en los océanos llamadas mareas (Javidsharifi, Niknam, Aghaei, & Mokryani, 2018), que impulsan las energías mareomotrices, las cuales tienen dos componentes: por una parte la energía potencial producidas por la diferencia de nivel en la marea y por otro, la energía cinética de las corrientes marinas.

La energía potencial de las mareas es aprovechada en instalaciones similares a una central hidráulica, con la diferencia que se puede construir una central de ciclo doble en la cuales se puede aprovechar las corrientes de subida y bajada de las mareas para la generación de energía eléctrica. Este

tipo de instalaciones han demostrado un alto grado de confiabilidad y han alcanzado un alto rendimiento, sin embargo, presentan un alto costo de inversión inicial e impactos ambientales significativos sobre el entorno. En la actualidad es la forma de energía mareomotriz más usada y cuenta con instalaciones como: La Range (240 MW) en Francia desde 1966, Annapolis (20 MW) en Canadá desde 1984, Kislaya Guba (400 kW) en Rusia, Creek Jangxia (500 kW) en China y Sihwa Lake estuvo en servicio desde noviembre del 2012 hasta marzo de 2013 por último (260 MW) en Corea del Sur desde 2011 (González-Caballín et al., 2016).

La energía cinética de las corrientes marinas es aprovechada usando turbinas hidrocinemáticas, las cuales presentan características similares a las usadas en la energía eólica, pero las ventajas de: ser predecible a diferencias de otras fuentes como la eólica y la solar (la incertidumbre de predictibilidad es baja), tiene un factor de carga elevado debido a las propiedades del fluido puesto que la densidad del agua es aproximadamente 1000 veces la del aire, disminución de los impactos ambientales en la extracción de energía, además, no se tienen velocidades extremas que pueden poner en riesgo las instalaciones (Carballo, Iglesias, & Castro, 2009). Sin embargo, es uno de los fuentes de aprovechamiento de energía con menor capacidad instalada, y en pocos casos se encuentran conectados a la red.

La potencia instalada las energías marinas en la Unión Europea es aproximadamente 1.25 GW (Carballo et al., 2009), principalmente en Reino Unido, Francia, Irlanda; Holanda, Alemania y España. Para los cuales se han desarrollado proyectos a gran escala tales como el proyecto Seagen, en Strangford Lough, Irlanda del Norte en 2008 con turbinas marinas.

Con el fin de disminuir el costo de la inversión y los impactos ambientales, se ha descrito un enfoque para el aprovechamiento de la energía cinética de las mareas costeras, bahías, canales y/o estuarios usando turbinas o microturbinas, las cuales se pueden organizar en matrices llegando a ofrecer seguridad en el suministro de energía eléctrica (González-Caballín et al., 2016).

Por las razones mencionadas anteriormente, para un aprovechamiento óptimo de la energía de las corrientes marinas se han de tenerse en cuenta dos aspectos (González-Caballín et al., 2016; Vennell, Funke, Draper, Stevens, & Divett, 2015): el primero es mejorar el diseño de turbinas de microturbinas para el



aprovechamiento de las corrientes marinas, y como segundo aspecto una precisa caracterización del recurso del potencial energético, para la viabilidad económica además del impacto ambiental y social.

Se han implementado distintos medios para la obtención de información que permiten evaluar el potencial de energía mareomotriz, el primer medio es tomando medidas de las mareas u obteniendo la elevación del mar a partir de datos satelitales, mientras que, los perfiles de velocidad de las corrientes marinas son obtenidos usando ADCP (Perfil Acústico de Corrientes Doppler) estos últimos con limitaciones espaciales.

El segundo método es la aplicación de modelos de simulación numérica, contando con la batimetría de terreno. Estos modelos pueden ser unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D), requiriendo datos de mareas y de ADCP, para su validación. En la actualidad los modelos más usados son 2D y 3D. En forma general los modelos de simulación 2D resuelve ecuaciones con la velocidad vertical promediada en profundidad, mientras que los modelos tridimensionales (3D) tiene en cuenta la variación de velocidad horizontal en la componente vertical en profundidad.

A continuación se muestran algunos modelos de simulación para la evaluación del recurso energético en distintas zonas del mundo, entre estos se encuentra: el modelo numérico 2D Mike 21 aplicado en Irlanda por RPS Kirk McClure Morton, con el cual se simuló la energía de las corrientes marinas y permitió delimitar lugares con mayores potenciales para la extracción de energía (O'Rourke, Boyle, & Reynolds, 2010) validando las medidas en el lugar, este modelo determina las velocidades de superficie del agua y perfiles de velocidades verticales en predefinidos. Otro modelo 2D aplicado es el modelo de océano costero de volumen finito (FVCOM) modo 2D, con el que se realizó estudio de las mareas de la costa en Nueva Jersey, Estados Unidos (Tang et al., 2014), este modelo usa la velocidad promediada en la vertical. El modelo CFD ANSYS FLUENT 2D, con el cual se evaluó el potencial de la Ría de Avilés -España, usando el modelo numérico para la evaluación del potencial energético de las mareas en Avilés encontrándose un gran similitud con datos medidos in situ (González-Caballín et al., 2016).

El objetivo de esta investigación es simular la Ría de Avilés usando el modelo de simulación bidimensional IBER en régimen no estacionario para estimar el potencial energético en costas, Rías y/o Estuarios teniendo como parámetro fundamental la velocidad promediada en profundidad.

2. METODOLOGÍA

Para el llevar a cabo esta investigación, se describiera el modelo numérico usado, se elaborará un modelo de geometría para la aplicación del modelo, se establecerá un modelo de pruebas y finalmente se analizarán los resultados de la velocidad media en la ría, la potencia en puntos de máxima velocidad y la energía extraíble.

2.1. MODELO NUMÉRICO

Para el desarrollo de este trabajo se usará el modelo hidrodinámico bidimensional (2D) IBER, el cual fue desarrollado por la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (*Universidade da Coruña*), del Grupo de Ingeniería Matemática (*Universidade de Santiago de Compostela*), del Instituto Flumen (*Universitat Politècnica de Catalunya* y Centre Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX ("Manual básico de usuario," 2010).

El modelo IBER fue desarrollado para la simulación de flujos en lámina libre en régimen no permanente y procesos medio ambientales en hidráulica fluvial, tales como ríos y estuarios. En su última versión IBER se compone de tres modelos principales, un modelo de hidrodinámico, un modelo de turbulencia y un modelo de transporte de sedimento en este trabajo se tendrán en cuenta los dos primeros modelos (Presentación & Modelo, n.d.). El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de agua somera "*Shallow Water Equation*" (SWE) o ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones, las cuales son obtenidas de las ecuaciones de Navier Stokes, considerando las hipótesis de, flujo incompresible, campo de presión hidrostática "la longitud en la vertical es de dimensiones menores que horizontal" y que la componente de velocidad en la vertical es homogénea.

Las ecuaciones de Saint Venant para la conservación de la masa ecuación 1 y el momento



ecuaciones 2 y 3 en las dos direcciones horizontal asumen una distribución uniforme en profundidad de la presión hidrostática y la velocidad ("Iber," 2012), las cuales se resuelven usando una discretización por volúmenes finitos.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} h U_x^2 + \frac{\partial}{\partial y} h U_x U_y = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2\Omega \sin(\lambda) U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} h U_y^2 + \frac{\partial}{\partial x} h U_x U_y = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} - \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2\Omega \sin(\lambda) U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad (3)$$

Donde, h es el calado o profundidad de lámina de agua, U_x y U_y son las velocidades horizontales en profundidad, g es la aceleración, Z_s es la elevación de la lámina libre, g constante universal gravitatoria, τ_s es la fricción de la superficie debido al rozamiento producido por el viento, τ_b es fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad de del agua, Ω es la velocidad angular de la rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, τ_{xx}^e , τ_{xy}^e , τ_{yy}^e son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, M_s , M_x , M_y son respectivamente los términos fuentes/sumidero de masa y de momento.

Las componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad se expresan como:

$$U_x = \frac{1}{h} \int_{Z_b}^{Z_1} \bar{u}_x dz \quad (4)$$

$$U_y = \frac{1}{h} \int_{Z_b}^{Z_1} \bar{u}_y dz \quad (5)$$

En el modelo hidrodinámico considera la fuerza de rozamiento sobre el fluido, que es equivalente al rozamiento de la pared, y está relacionada con la rugosidad del fondo causando fricción en fondo, ocasionando una fuerza opuesta a la velocidad media y produciendo turbulencias, bajo estos efectos se

expresan la tensión tangencial (ecuación 6) del fondo en función de la velocidad de fricción u_f .

$$\tau_b = \rho u_f^2 \quad (6)$$

La velocidad de la fricción está relacionada con la velocidad media promediada en profundidad mediante el coeficiente de Manning, ya que el modelo promediado en profundidad no calcula la velocidad de fricción debido a que no resuelve las ecuaciones en dirección vertical, expresándose la tangencial en el fondo como lo indica la ecuación siguiente (ecuación 7)

$$\tau_b = \rho C_f |U|^2 \quad (7)$$

donde C_f es el coeficiente de fricción del fondo.

La fricción en el fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, utilizando el coeficiente de Manning (n) como parámetro, la fórmula de Manning usa el coeficiente de rugosidad mostrado en la ecuación 8, cuando menor es el coeficiente de Manning, menor será la fricción de la superficie.

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}} \quad (8)$$

IBER incluye modelos de turbulencia tipo RANS, los cuales resuelven modelo de turbulencia, incluyendo el modelo $k - \varepsilon$ de Rastogi y Rodi, usado en flujos turbulentos poco profunda.

En el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ de Rastogi y Rodi se resuelve la ecuación para la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación de energía, (ecuaciones 9 – 10) (Bladé et al., 2014).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} v_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \quad (10)$$

Donde $c_\varepsilon = 1,08$ y $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

2.2. MODELO DE GEOMETRÍA

El modelo IBER se aplicará en la Ría de Avilés (ver figura 1) situada en el consejo de Avilés. La Ría de Avilés es un Estuario que desemboca al mar Cantábrico en el norte de España. Es un canal de 5 Km de longitud, 0.16 Km de ancho en promedio y cuenta con una profundidad promedio de 11.5 m, cumpliendo con las hipótesis para aplicación de las SWE.

Para el diseño de la geometría se requieren datos hidráulicos y geomorfológicos de la zona de estudio levantados en terreno, siendo inviable esto por los recursos que se cuenta y el tiempo de la investigación, pero, en su lugar la información fue obtenida de fuentes de información secundarias, los cuales suministrarán el contorno de la geometría con cuál se construirá la malla, y un modelo digital de elevación que describirá las cotas en distintos puntos.



Figura 1 Ría de Avilés. Fuente Google Earth

El Instituto de Geografía nacional (IGN) de España, cuenta con una amplia base de datos con mapas del territorio español, de alta resolución, disponibles en su centro de descarga en línea. Se eligieron los datos del modelo digital de elevación (MDE) del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de una resolución de 25 cm/píxel, a un malla de 5m. El sistema de referencia del conjunto

de datos topográficos está referido al HUSO 30 de la hoja 0013 (Ver figura 2)

El MDE fue construido usando la tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*), las ondas usadas no penetran la superficie del agua, por tanto, no se cuenta información del lecho marino (ver figura 3).

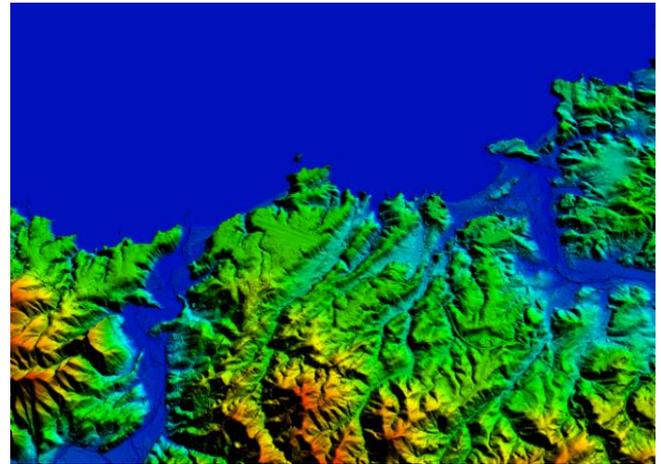


Figura 2. Zona de estudio, MDE 25- hoja 01-0030, fuente IGN-España.

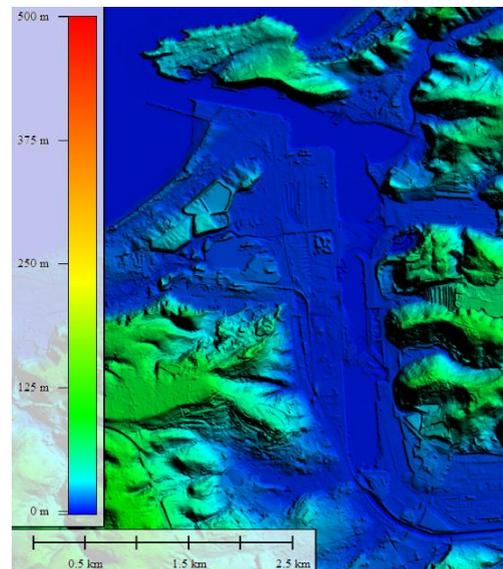


Figura 3 Zona de aplicación de modelo-Ría de Avilés. Datos IGN visualizados en Global Mapper

Se construyó el fondo de la Ría de Avilés partiendo de la carta náutica de la empresa Navionics disponible en su página web y estudios realizados en la Ría de Avilés por la autoridad portuaria. Se usó el programa AutoCAD CIVIL 3D, el cual permite crear una

superficie haciendo una triangulación de curvas de nivel, sobre la que se edita el fondo marino y posteriormente se exporta en formato dem. se ha tenido en cuenta el cero geográfico con respecto al nivel medio del mar de Alicante (NMMA) al cual viene referidos los datos suministrados por el IGN con respecto al puerto de Avilés.

El modelo numérico IBER usa ráster en formato ASCII para crear distintas geometrías, por ejemplo, RTIN o como MDE en la asignación de elevación automática de un mallado.

La elaboración del MDE en formato ASCII partiendo del archivo .dem requiere el uso de una herramienta de conversión, se eligió ArcGis 10.1 que permite la visualización y conversión de archivos geográficos e hidrológicos.

- 1) Se extraen las curvas de nivel del archivo .dem
- 2) Usando una triangulación de las curvas de nivel se crea un TIN (triángulos irregulares).
- 3) El TIN es convertido en ráster usando una interpolación lineal
- 4) Por último, se convirtió el ráster en MDE (Modelo Digital de Elevación) en formato ASCII el cual será usado en otros pasos.

Se delimitó el contorno de la Ría de Avilés en AutoCAD, mediante el cual es construida la malla en IBER, asignándoles posteriormente la elevación desde el MDE en formato ASCII (ver figura 4).

Para este trabajo se ha usado un mallado no estructurado, que permita adecuarse al terreno, por otra parte, el tamaño en las celdas del mallado por la desembocadura de la Ría fue de 20 m por ser la zona de mayor interés.

2.3. Modelo de prueba

Una vez creada la geometría y la malla se establecen las condiciones que permitirán llevar a cabo la simulación, para ello se consideran: las condiciones de

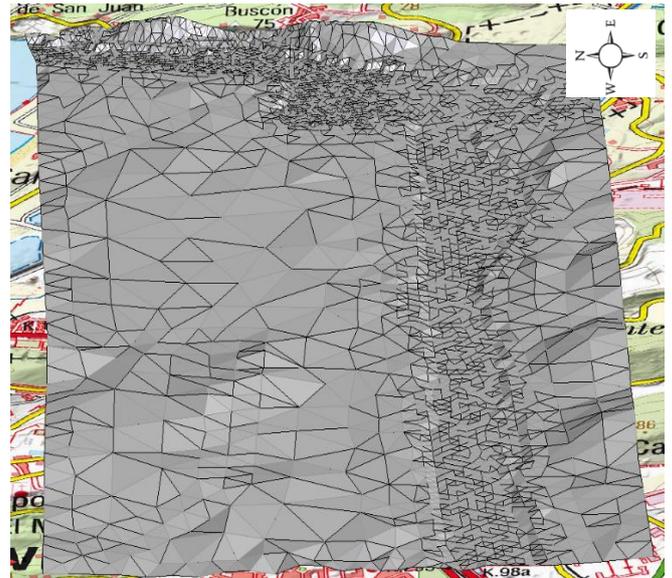


Figura 4 Geometría y mallado de la Ría de Avilés.

contornos, el uso del suelo y las condiciones iniciales.

En el modelo hidrodinámico bidimensional se definen las condiciones de contorno que permitan plantear adecuadamente las ecuaciones de Saint Venant matemáticamente (Sanchez, 2003). Se definieron dos condiciones de contornos, la primera aguas arriba como una entrada en régimen subcrítico/crítico, y la segunda la aguas abajo como salida, en régimen subcrítico.

La condición de contorno en la entrada aguas arriba, se ha considerado un caudal medio mensual de $7.8m^2/s$ aportados por los afluentes de la Ría (López Peláez & Flor, 2008). La decisión de tomar este caudal es debido a que no se encuentran estaciones de aforo en los distintos ríos que vierten sus aguas en la Ría de Avilés. Este caudal se plantea como una entrada en régimen subcrítico/crítica y un caudal total, el cual se mantendrá constante durante toda la simulación.

Con respecto a la condición de contorno aguas abajo (desembocadura de la Ría), se consideraron las cotas de agua o nivel promedio de las mareas cada cinco minutos y se eligió un régimen subcrítico, y un nivel de marea.

Los datos de mareas se obtuvieron del Ministerio de Fomento, a través de la página de Puertos de España. Se eligieron los datos del nivel del mar cada 5 minutos para los días 1 y 2 de septiembre del año 2017. Fue elegido el mareógrafo ubicado en el puerto de Gijón, siendo este el más cercano a la Ría de Avilés. Estos datos se encuentran referidos al cero del nivel medio del mar del puerto de Avilés los cuales deben

ser corregidos para que coincidan con el cero geográfico, que está referido al nivel medio del mar de Alicante (NMMA). Basta con restarle 2.26 m y sumarle 11.5 m que es la profundidad media de la Ría de Avilés a los niveles del mar.

Se realizó una revisión de los usos del suelo en la zona de estudio, y se han tomado seis zonas para asignar el uso del suelo, las cuales se ilustran en la figura 5, además se muestran los respectivos coeficientes de Manning correspondiente a cada superficie en la

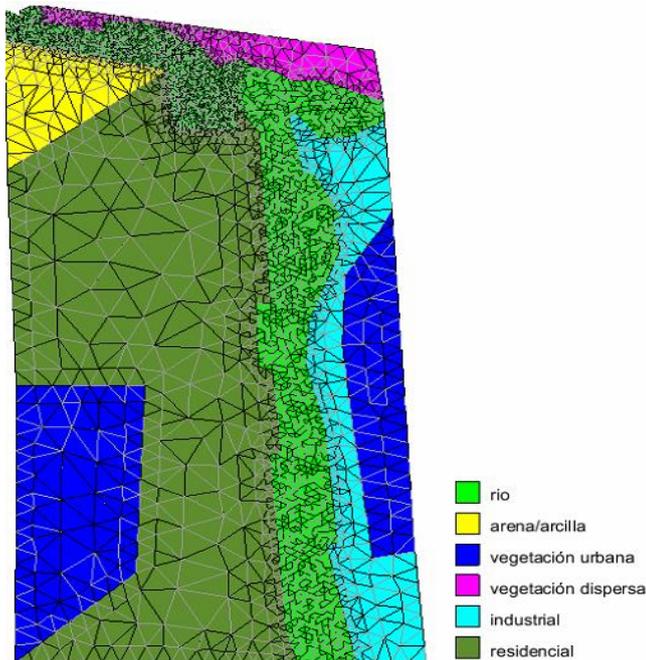


Figura 5 Uso del suelo en las distintas zonas de la geometría.

Tabla 1 Relación de los usos del suelo y coeficiente de Manning

Uso del suelo	Coficiente de Manning
Río	0.25
Arenilla/arcilla	0.023
Vegetación Urbana	0.032
Vegetación dispersa	0.08
Industria	0.1
Residencial	0.015

En las Condiciones iniciales, se eligió un calado igual a cerero, puesto que se considera toda la superficie seca al comenzar la simulación.

El tiempo de simulación es de 172,800 s, con un salto temporal de 300s, para dos días.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez finalizado las simulaciones, IBER permite visualizar los resultados en el post-proceso y extraer los resultados, tales como se muestran en la figura 6 que ilustra algunos paso temporales de la simulación para la velocidad, en la cual se observa que la zona con las mayores velocidades se encuentra en la desembocadura de la ría, además se evidencia los ciclos del reflujó (figura 6 izquierda) y ciclo de inundación de la marea (figura 6 derecha).

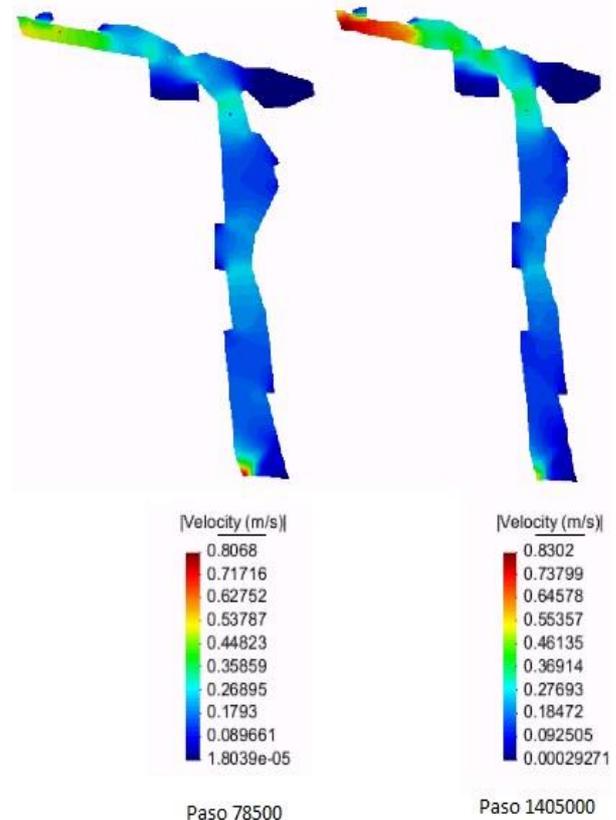


Figura 6: Distribución de la velocidad neta en para distintos pasos temporales.

Las velocidades se han estudiado en las distintas secciones de Ría, durante dos días el 1 y 2 de septiembre, se despreciaron los resultados del primer día, el cual se tenían previstos para calentar el programa, como muestra representativa se tomaron 5 puntos para el estudio de la velocidad. La evolución de la velocidad en la simulación se ilustra en la Figura 7, con una velocidad máxima de 0.75 m/s en el punto a 100 m de la desembocadura.

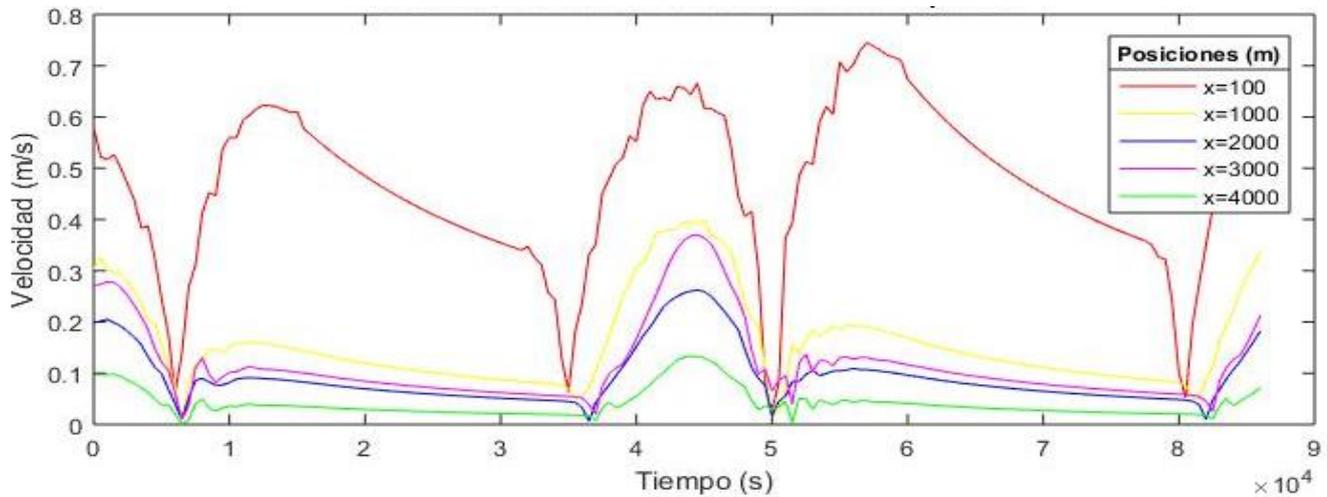


Figura 7 Evolución de la velocidad en distintos puntos de la Ría de Avilés.

La figura 8, muestra las velocidades medias y máximas en distintas secciones de la Ría de Avilés, para la cual se tiene velocidad promedio en la desembocadura es aproximadamente de 0.42 m/s.

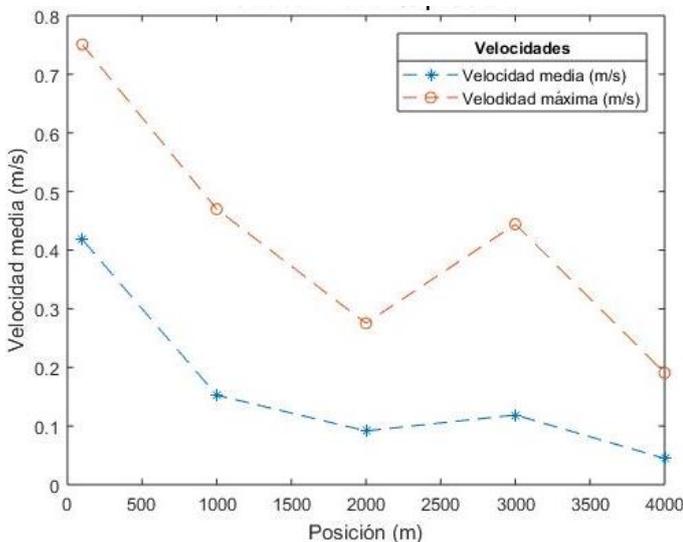


Figura 8 Velocidad promedio en las distintas posiciones de la Ría de Avilés.

3.1. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL.

Los ciclos de marea del océano están relacionados con la posición del sol y de la luna, en el cual se destaca las mayores mareas o mareas vivas cuando el sol, la luna y la tierra se encienden sobre la misma línea, mientras que las menores mareas o

marea muerta tiene lugar cuando las línea sol-tierra y tierra-luna forman ángulo de 90º,

La ría de Avilés es un cuerpo de agua semicerrado, por lo cual las corrientes marinas son ocasionadas principalmente por los ciclos de las mareas.

La potencia disponible de la energía de las corrientes del agua que pasa a través de una sección transversal en la vertical perpendicular al flujo por unidad de tiempo bien dada por:

$$P_{i_{ke}}(t) = \left(\frac{1}{2}\right) A \rho v_i^3(t) \quad (11)$$

Donde $P_{i_{ke}}(t)$ es la potencia cinética disponible en vatios (W) $v_i(t)$ es la velocidad promedio en la sección i ; $\rho = 1020 \text{Kg/m}^3$ es la densidad del agua del mar (Rourke & Reynolds, 2010), y A es área de la sección transversal del fluido. Si se divide la ecuación 11 en el área se obtiene la densidad de potencia cinética disponibles por el fluido (ver ecuación 12).

$$P_i(t) = \left(\frac{1}{2}\right) \rho v_i^3(t) \quad (13) \quad (12)$$

La figura 9 muestra los valores de la densidad de potencia para las corrientes marinas en distintas secciones para un día del mes de septiembre. Obteniendo valores de densidad de potencia máximos en la desembocadura de la ría con valores de hasta 0.225KW/m^2 .

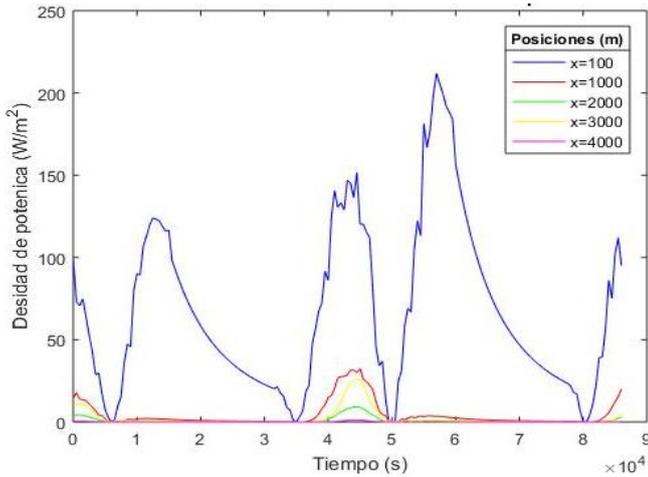


Figura 9 Distribución de la densidad de potencia disponible en distintos puntos en la Ría de Avilés.

3.2. EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA EXTRAÍBLE

La energía disponible por las corrientes de mareas, que puede ser extraída para cada punto señalado, es la integración numérica de la potencia con respecto al tiempo de simulación, ecuación (14).

$$E_{dis} = \int_0^t p_i(t) dt \quad (14)$$

Tabla 2. Energía disponible en distintas posiciones de la Ría de Avilés para los días de la simulación

Posición (m)	Energía (KWh/m ²)
100	1.59
1000	0.0995
2000	0.0332
3000	0.0545
4000	0.0024

Tabla 2 se muestra la densidad de energía que puede ser aportada por las corrientes de marea en la Ría de Avilés, teniendo un máximo en la desembocadura de hasta 1.59 KWh/m². Al considerar una turbina Gorlov de eje vertical, con un Cp = 0,35, la máxima energía extraíble para un día tipo es de 0.55 KWh/m², y para el mes 16.5 KWh/m².

4. CONCLUSIONES

La implementación de las energías renovables está teniendo su mayor crecimiento, lo cual viene acompañado de nuevas líneas de investigación crecimiento de algunos sectores industriales.

Las energías de las mareas presentan un gran potencial, sin embargo, se encuentra en proceso de desarrollo, lo cual ha permitido que se creen nuevas líneas de investigación, de lo cual hace parte la aplicación de modelos de simulación numérica, que permitan una correcta estimación del potencial disponible en determinadas zonas.

Se aplicó el modelo de simulación numérica IBER, para determinar el potencial energético de las corrientes marinas en la Ría de Avilés, para el cual se diseñó una geometría usando datos de acceso libre, y distintos softwares que permitieron mejorar la precisión del modelo.

Los resultados muestran que las mayores velocidades se presentan en la desembocadura de la Ría de Avilés, y que es posible extraer una energía de hasta 0.55 KWh/m² día, y 16.5 KWh/m² mensual.

Los resultados obtenidos presentan similitud con estudios anteriores, lo cual muestra que el modelo puede ser aplicado para la estimación del potencial energético en otras zonas.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por esta fabulosa etapa en mi vida, a mis tutores D. Eduardo Blanco y D. Rodolfo Espina por dirigir este trabajo y sus orientaciones para sacarlo adelante. De igual forma a los profesores del máster en ingeniería energética de la universidad de Oviedo.

Toda mi gratitud, a la Universidad Tecnología del Chocó (UTCH) y al Grupo de investigación en Energías Renovables y Meteorología (GIERMET) de la UTCH, dirigido por del D. William L. y sus integrantes por su apoyo que me permitió adelantar el máster en Europa.

Andona Amézqueta, muchas gracias por tu ayuda con IBER, me diste muchas luces para hacer las simulaciones.

Agradezco a mis familiares, mi novia (Martha) y amigos por apoyo incondicional y acompañamiento esta linda experiencia en mi vida.



6. REFERENCIAS

10.PDF

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Carballo, R., Iglesias, G., & Castro, A. (2009). Numerical model evaluation of tidal stream energy resources in the Ría de Muros (NW Spain). *Renewable Energy*, 34(6), 1517–1524. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.028>
- Energy BP Statistical Review of World (Ed.). (2018). BP Statistical Review of World Energy 2018 (p. 2). London. Retrieved from <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>
- González-Caballín, J. M., Álvarez, E., Gutiérrez-Trashorras, A. J., Navarro-Manso, A., Fernández, J., & Blanco, E. (2016). Tidal current energy potential assessment by a two dimensional computational fluid dynamics model: The case of Avilés port (Spain). *Energy Conversion and Management*, 119, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.060>
- Iber. (2012). Retrieved from <http://www.iberaula.es/web/index.php>
- Javidsharifi, M., Niknam, T., Aghaei, J., & Mokryani, G. (2018). Multi-objective short-term scheduling of a renewable-based microgrid in the presence of tidal resources and storage devices. *Applied Energy*, 216, 367–381. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.119>
- López Peláez, J., & Flor, G. (2008). Evolución ambiental del estuario de Avilés (1833-2006), 135, 119–135. Retrieved from <http://geol.uniovi.es/TDG/Volumen28/TG28-10.PDF>
- Manual básico de usuario. (2010).
- O'Rourke, F., Boyle, F., & Reynolds, A. (2010). Tidal current energy resource assessment in Ireland: Current status and future update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3206–3212. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.039>
- Presentación, T., & Modelo, D. E. L. (n.d.). Tema 1. PRESENTACIÓN DEL MODELO IBER, 1–46.
- Radfar, S., Panahi, R., Javaherchi, T., Filom, S., & Mazyki, A. R. (2017). A comprehensive insight into tidal stream energy farms in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 323–338. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.037>
- Rourke, F. O., & Reynolds, A. (2010). Tidal Current Energy Resource Assessment in Ireland : Current Status and Future Update Future Update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3206–3212. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.039>
- Sanchez, J. (2003). Manual De Referencia, 1–17. Retrieved from <http://www.jorgesanchez.net/web/css1.pdf>
- Tang, H. S., Qu, K., Chen, G. Q., Kraatz, S., Aboobaker, N., & Jiang, C. B. (2014). Potential sites for tidal power generation: A thorough search at coast of New Jersey, USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 412–425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.051>
- Vennell, R., Funke, S. W., Draper, S., Stevens, C., & Divett, T. (2015). Designing large arrays of tidal turbines: A synthesis and review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 454–472. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.022>
- World Energy Council. (2016). World Energy Resources: Marine Energy 2016, 79. https://doi.org/http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf