

# Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en la desembocadura del río Nalón (Asturias, España) mediante simulación de flujo unidimensional

## *Assessment of tidal stream energy potential in the mouth of the Nalón river (Asturias, Spain) by one-dimensional flow simulation*

Fernández-Suárez, D.<sup>a</sup>, Álvarez-Álvarez, E.<sup>b1</sup>, Gutiérrez-Trashorras, A.J.<sup>c</sup>, Fernández-Francos, J.<sup>b2</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Energía, Campus Universitario de Viesques, Carretera de Villaviciosa s/n, 33204-Gijón, Asturias (España).

<sup>b</sup> Área de Ingeniería Hidráulica, Departamento de Energía, Escuela Politécnica de Mieres. Universidad de Oviedo C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n. 33600-Mieres, Asturias (España). E-mail: <sup>b1</sup> edualvarez@uniovi.es, <sup>b2</sup> jfrancos@uniovi.es

<sup>c</sup> Área de Máquinas y Motores Térmicos, Departamento de Energía, Campus Universitario de Viesques, Carretera de Villaviciosa s/n, 33204-Gijón, Asturias (España). E-mail: gutierrezantonio@uniovi.es

Recibido: 10/09/2014

Aceptado: 12/03/2014

Publicado: 28/01/2014

---

## RESUMEN

Las energías marinas disponen de un importante potencial aún por desarrollar. Las elevadas inversiones requeridas, los altos costes de funcionamiento y el elevado impacto ambiental han sido las barreras que han impedido su desarrollo. En este trabajo se realiza una evaluación del potencial energético que es posible aprovechar en la desembocadura del río Nalón utilizando para ello instalaciones de microgeneración. Este tipo de instalaciones pueden ser viables en localizaciones cercanas a la costa al minimizar la inversión necesaria y el coste de operación mantenimiento así como el impacto ambiental. Para ello, se ha trabajado con el programa gratuito de simulación de flujo unidimensional HEC-RAS siendo necesario construir un modelo geométrico de la desembocadura utilizando datos geográficos de libre acceso e información náutica. Los resultados demuestran la existencia de una zona con un potencial energético viable de utilizar desde un punto de vista técnico.

**Palabras clave** | corrientes de marea; flujo unidimensional; desembocadura; microgeneración.

---

## ABSTRACT

*Marine energy has significant potential still to be developed. The required high investment, operating costs and environmental impact have been the barriers that have not permitted its development. This paper presents an evaluation of the potential energy which can be harnessed in the mouth of the river Nalón using microgeneration installations. Such facilities may be viable in locations near the coast, thereby minimizing the investment required as well as the operating cost and environmental impact. To achieve this objective HEC-RAS have been used to simulate one-dimensional flow free surface flow. However, it was necessary to construct a geometric model of the mouth using geographic data and nautical information. The results demonstrate the existence of an area with energy potential.*

**Key words** | tidal stream; one-dimensional flow; river mouth; microgeneration.

## INTRODUCCIÓN

En un contexto energético en el que la demanda energética mundial ha sido de 21431 TWh en el año 2012 (International Energy Agency, 2012), el potencial energético estimado de la energía mareomotriz a nivel mundial es considerada de 800 TWh/año y 105.4 TWh/año en Europa (Cavanagh *et al.*, 1993) (principalmente en el Reino Unido, Francia, Irlanda, Holanda, Alemania y España). Pese a ello, y que es un recurso continuo y predecible, el aprovechamiento tipo de energía basado en instalaciones específicas aún se encuentran en estado incipiente encontrando importantes barreras a su desarrollo, que son fundamentalmente sus elevados costes de inversión, operación y mantenimiento y elevado impacto ambiental.

Las instalaciones que aprovechan la energía proveniente de las mareas (o mareomotriz) pueden ser de dos tipos: presas marinas específicamente diseñadas que aprovechan la energía potencial provocada por la diferencia de nivel de agua entre las mareas altas y bajas en presas; y turbinas marinas que utilizan la energía cinética de las corrientes marinas durante los movimientos de agua producidos en las mareas.

Hasta la fecha la mayoría de la producción energética mareomotriz proviene de las presas marinas construidas entre los años 1960 y 1980. La generación eléctrica de este tipo de presas se realiza mediante los mismos principios que la generación hidroeléctrica con la diferencia de que se aprovechan los dos flujos de marea en direcciones opuestas. A pesar de que esta tecnología ya está bastante probada y puede ser considerada fiable, las instalaciones de este tipo provocan un elevado impacto ambiental e implican elevados costes de construcción. Únicamente existen cuatro presas de marea en funcionamiento en la actualidad: La Range de 240 MW en Francia, Annapolis de 20 MW en Canada, KislayaGuba de 400 kW en Rusia y Jangxia Creek de 500 kW en China (O'Rourke *et al.*, 2010).

En los últimos 10 años se ha realizado una intensa investigación en el diseño de equipos que aprovechen la energía de las corrientes de marea basadas en turbinas marinas, sin embargo, estas instalaciones aún están en fases de diseño o de pruebas y en pocos casos se encuentran conectadas a red. Esto ha sido debido a la solución adoptada, basada en generadores de elevadas potencias (más de 1 MW) que por sus dimensiones han sido instalados en localizaciones lejanas a la costa. Esta circunstancia ha hecho inviables los proyectos desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental (O'Rourke *et al.*, 2010).

Estudios recientes han determinado puntos en las desembocaduras de los ríos con alta energía cinética debido al movimiento de la marea (velocidades de la corriente superiores a 2 m/s) (Carballo *et al.*, 2009), por lo que se abre la oportunidad de que esta energía sea aprovechada en zonas próximas al territorio y en ocasiones cercanas a puntos de consumo de energía como ciudades o puertos. Estas localizaciones permiten el diseño y uso de la energía en sistemas de microgeneración con el mínimo impacto medioambiental como se propone en (Kim *et al.*, 2010) y que optimicen los costes de inversión y funcionamiento asociados. Para realizar estos estudios se han utilizado tanto herramientas software específicas como medidas en campo.

En este trabajo, se presenta una investigación donde se realiza una evaluación la energía cinética del agua según los movimientos de marea en el río Nalón (Asturias, España). Para ello se ha utilizado el software HEC-RAS. Se pretende así mismo definir una metodología de evaluación de zonas con potencial que no implique coste de herramientas software ni equipos de altas prestaciones computacionales.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Descripción del modelo hidráulico

El modelo hidráulico se basa en el *Hydrologic Engineering Center – River Analysis System* (HEC-RAS) versión 4.1.0. Es un modelo numérico unidimensional que permite realizar análisis hidráulicos del flujo de agua en lámina libre en régimen permanente y no permanente.

Para el cálculo del perfil de la lámina libre de agua en régimen no permanente el modelo resuelve las ecuaciones completas en una dimensión de Saint Venant para flujo no permanente, gradualmente variado, en canales abiertos:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + y \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2)$$

Siendo,

$v$ , velocidad media longitudinal (m/s).

$y$ , profundidad del flujo o calado (m).

$x$ , distancia longitudinal desde el origen del tramo (m).

$S_0$ , pendiente del cauce.

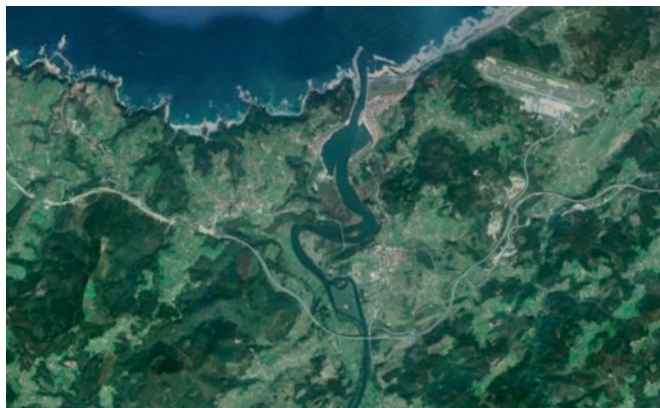
$S_f$ , pendiente de fricción o motriz

$g$ , aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

Estas ecuaciones se discretizan usando el método de diferencias finitas y se resuelven usando el esquema de Preissmann o de los cuatro puntos (Horritt y Bates, 2005; Bladé *et al.*, 2009).

## Desarrollo del modelo hidráulico

Para el desarrollo del modelo se ha elegido la desembocadura del río Nalón (Figura 1), situada en la localidad de Muros del Nalón. La ría de Nalón es el cauce más importante de Asturias, con lo que los caudales de avenida que fluyen por la ría pueden llegar a ser considerables.

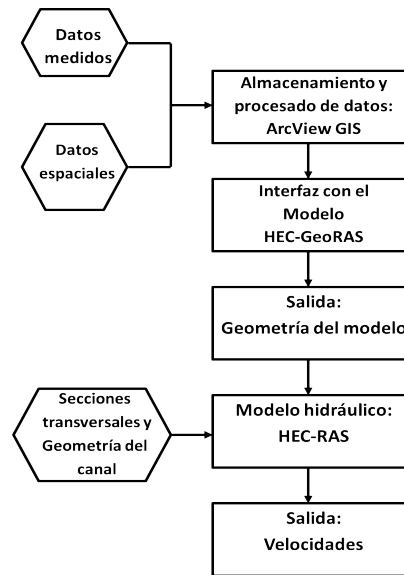


**Figura 1** | Desembocadura del río del Nalón.

Para la obtención del modelo hidráulico se han seguido las fases especificadas en la Figura 2.

La obtención del modelo geométrico se realiza mediante el programa ArcGIS, y su extensión HEC-GeoRAS. Dicha extensión está diseñada para procesar datos georeferenciados bajo el entorno de los sistemas de Información Geográfica (SIG).

En el modelo se crea un archivo para importar a HEC-RAS en el que se definen los datos geométricos del terreno, el cauce el río, secciones transversales, bancos y también adicionar parámetros y características preliminares como son: áreas inefectivas de flujo, elementos de obstrucción, coeficientes de Manning, etc.

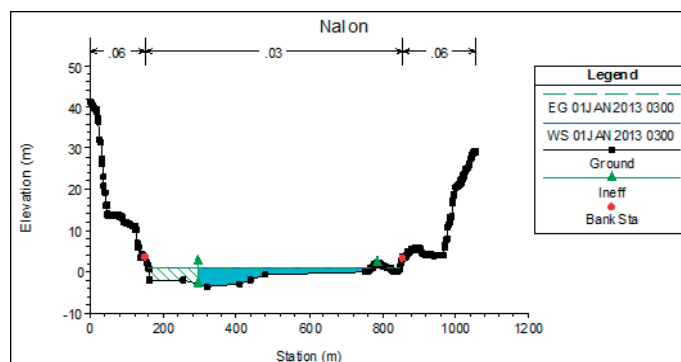


**Figura 2** | Esquema de desarrollo del modelo.

Para el desarrollo de la de geometría se ha partido de la información cartográfica disponible en el Instituto Geográfico Nacional, concretamente del Modelo Digital de Elevaciones Lidar 5×5 de la hoja 0013 de la distribución de hojas 1:5000 (o 1:25·10<sup>3</sup>). Esta información cartográfica ha sido tratada mediante ArcGIS, obteniendo un Modelo Digital del Terreno Triangular TIN.

Seguidamente, y ya trabajando en el módulo HEC-GeoRAS, se han definido el eje del canal principal, las líneas de flujo en llanuras de inundación, la posición de los límites del canal principal y finalmente las secciones transversales. La distancia entre secciones depende del tipo de flujo y de la geometría del cauce, pero como orden de magnitud sería entre 1 y 5 veces el ancho del río. En este caso, las secciones automatizadas se crearon a intervalos de 150 m y 600 m de distancia. Una vez finalizada generación de la geometría en HEC-GeoRAS, estas se importan a HEC-RAS donde se definirán con mayor precisión (Figura 3).

Debido a las características de la cartografía base de referencia, no conocemos con exactitud como es el fondo del río, que no queda bien definido, por lo que se procede a la revisión de la secciones tomando como referencia la carta náutica. Así pues, tomando como referencia las cotas de las sondas de las cartas náuticas se ha definido la geometría de los cauces.



**Figura 3** | Sección transversal HEC-RAS

Las cotas de las sondas indicadas en las cartas náuticas toman como referencia el Cero Hidrográfico. Dicho Cero Hidrográfico se encuentra por debajo del Cero Geográfico tomando como referencia el Nivel Medio del Mar en Alicante, a partir del cual se definen las cotas de los Modelos Digitales de Elevaciones en tierra. De este modo, para coordinar correctamente las dos fuentes altimétricas de información e implementarlas en la geometría del modelo hidráulico, las cotas de las sondas se han profundizado 2.11 m.

Actualizadas las geometrías de las secciones, seguidamente se ha procedido a terminar de ubicar correctamente la posición de los límites del canal principal, para terminar definiendo los coeficientes de rugosidad de Manning en cada una de las secciones tomando como referencia la vegetación y usos del suelo visualizados en la Ortofotografía PNOA de Máxima Actualidad (también disponible en el Instituto Geográfico Nacional).

Completada la definición de la geometría de base, se ha procedido a realizar la interpolación automática de secciones, en este caso cada 25 m. Abusar de la opción de interpolación entre secciones puede conducir a error. El programa puede considerar que el proceso iterativo ha convergido, por estar las secciones muy próximas, si la diferencia de energía entre ellas es inferior a la tolerancia de cálculo, acumulándose el error sección a sección y resultando una lámina de agua incorrecta.

Una vez interpoladas las secciones, se ha procedido a una segunda edición de las mismas, con el objeto de adaptar las interpolaciones automáticas a la realidad del desarrollo de las geometrías de los cauces.

Así mismo, también se han definido áreas inefectivas de flujo en todas aquellas ensenadas y zonas de amarre que por su posición, ubicación y condicionantes externos (como diques o zonas de humedales) no deben ser computados como áreas efectivas de flujo.

Finalmente, se han definido diques en aquellos puntos donde se ha previsto su necesidad para evitar que el programa calcule elevaciones de agua en depresiones exteriores al canal principal que no deben inundarse a no ser que se supere cierta cota de agua.

Con todos estos trabajos, el modelo hidráulico queda definido (Figura 4).

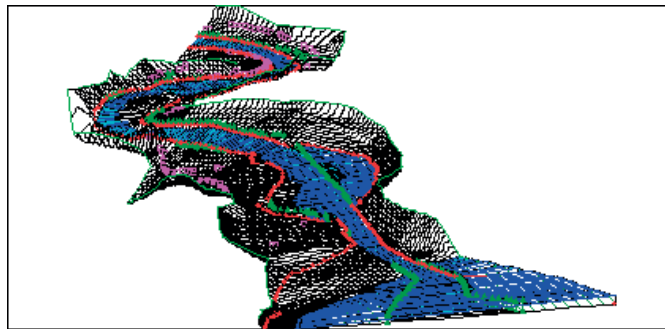


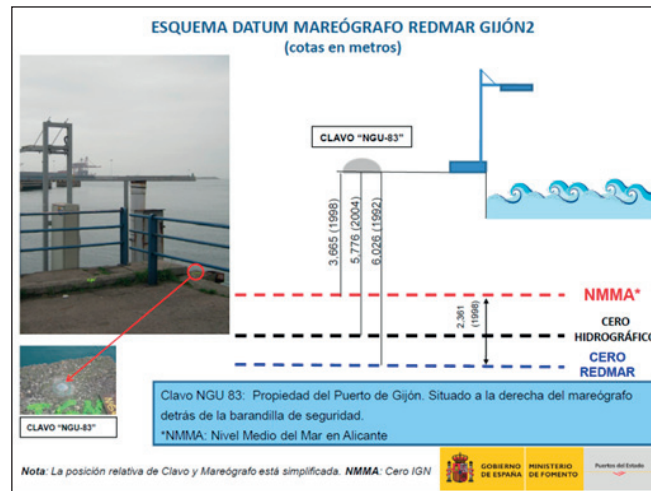
Figura 4 | Modelo 3D HEC-RAS.

## Metodología de pruebas

Para comprobar el buen funcionamiento del modelo se ha realizado una primera simulación en régimen no permanente teniendo sólo en cuenta la intervención de la marea.

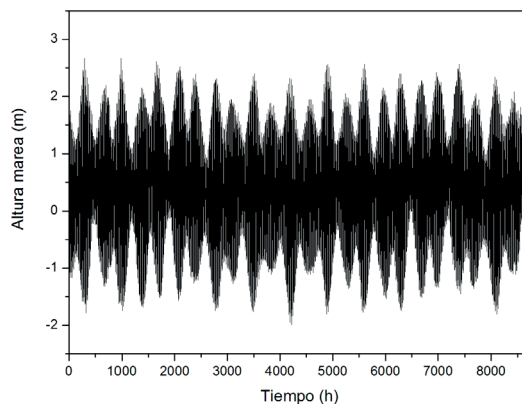
Por esta razón como condicionantes de flujo, se han definido dos condiciones de contorno:

- a) Aguas abajo del modelo, la condición de contorno es la marea del Mar Cantábrico. Para representarla adecuadamente, se han tomado como datos los registros horarios de niveles de mar del mareógrafo Gijón2 (Figura 5), tomando como intervalo de datos desde el 1 de Enero hasta el 31 de Diciembre de 2013. Estos datos se encuentran disponibles en la web de Puertos del Estado.



**Figura 5** | Esquema toma de datos mareógrafo REDMAR Gijón2.

De nuevo estos niveles están referidos a la cota a la que se encuentra el mareógrafo el cual se sitúa 2.36 m por debajo del Cero Geográfico, con lo que los datos de niveles del mar deben reducirse ese valor para que concuerden con las elevaciones del modelo el terreno, obteniendo las amplitudes de marea que se muestran en la Figura 6.



**Figura 6** | Amplitudes de marea en la desembocadura del río Nalón.

- b) Como condiciones de contorno aguas arriba, en primera aproximación se ha optado por definir un caudal constante de  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ , y una condición de flujo inicial con el mismo valor en régimen no permanente.

Una vez definido el modelo, se ha procedido a realizar los cálculos y visualizar de resultados (Figura 7), comprobando que el modelo es estable y representa verazmente la situación que puede darse en la realidad. Dando por válido el modelo, se ha procedido a definir los planes o simulaciones a realizar.

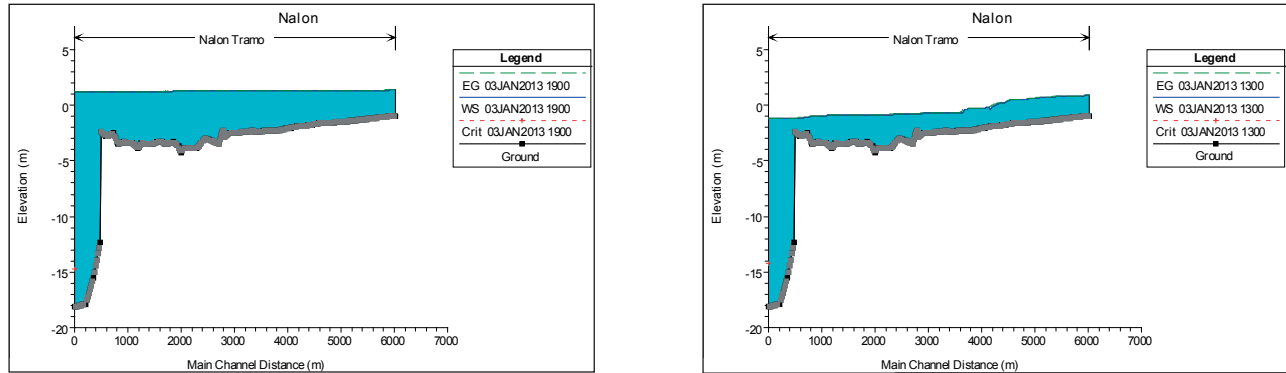


Figura 7 | Diferencias de lámina libre según altura de marea (capturas de pantalla de HEC-RAS).

Posteriormente, se ha definido un plan en el que como condición de contorno aguas abajo se define la serie de mareas mencionada anteriormente, y como condición de contorno aguas arriba y los caudales medios mensuales del río Nalón medidos en la estación de aforo 1346 de Grado (disponible en la web del Cedex) (Tabla 1).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	78419	66711	73379	65160	58104	38638	19461	14465	19356	30671	67973	91036

Tabla 1 | Caudales medios mensuales del río Nalón (estación de aforo 1346 de Grado).

Finalmente se ha procedido a la realización de las simulaciones correspondientes en flujo no permanente y régimen subcrítico.

El tiempo de simulación se inicia con los datos de mareas y caudales a las 0 h del 1 de Enero y se finaliza a las 20 h del 31 de Diciembre de 2013. Los resultados se obtienen en intervalos de 1 h.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se han agrupado según el análisis de la evolución de distintas variables en las secciones de la desembocadura: velocidades máximas, distribución de velocidades, potencia y energía aprovechable mediante microgeneración.

Como referencia de velocidad indicar que se ha considerado positiva en sentido del flujo desde el río hacia el mar.

### Velocidades máximas

Durante los meses de Junio a Octubre (época de menor caudal en el río Nalón) los valores máximos de velocidad se producen en la sección 4272 situada a una distancia de 4192.98 metros de la desembocadura (Figura 8), alcanzando valores cercanos a 2 m/s (Figura 9).

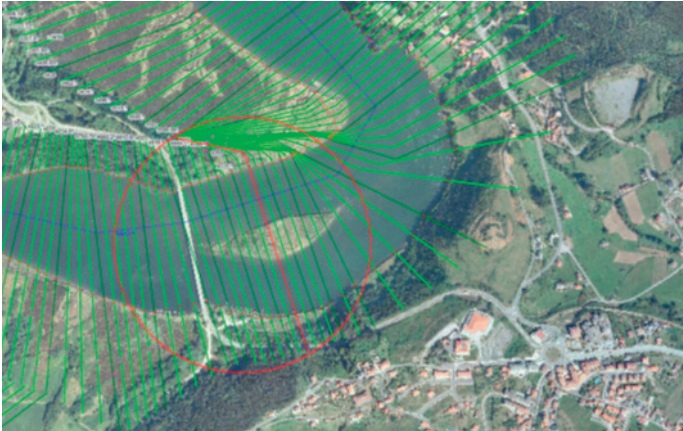


Figura 8 | Localización de la sección 4272.

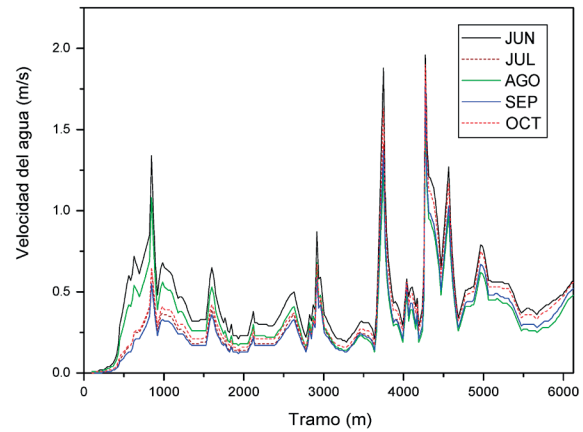


Figura 9 | Valores máximos de velocidad (meses de Junio a Octubre).

En el resto de meses la sección de máxima velocidad es la 3748 (Figura 10) situada a una distancia de 3648.96 metros de la desembocadura, obteniendo un máximo de 2.98 en diciembre (Figura 11).



Figura 10 | Localización de la sección 3748.

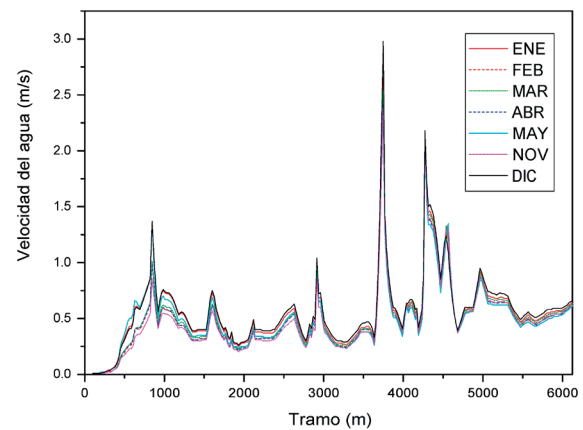
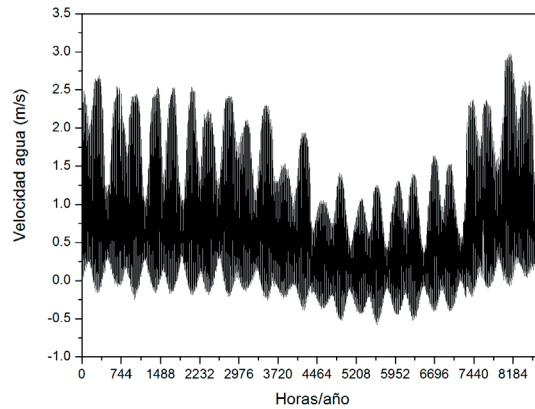


Figura 11 | Valores máximos de velocidad (meses de Enero a Mayo y de Noviembre a Diciembre).

## Distribución de velocidades

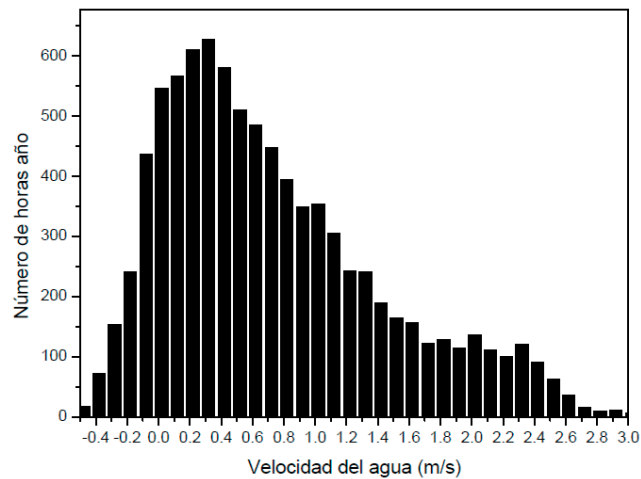
Se han obtenido los valores de evolución temporal de la velocidad en las diferentes secciones, comprobándose la variación de valor de dicho parámetro debido a la interacción entre las diferentes alturas de marea y caudales del río Nalón. En la Figura 12 se muestra la variación anual de la velocidad del flujo en la sección 3748.





**Figura 12** | Evolución anual de la velocidad en la sección 3748.

Se ha comprobado a que en todos los casos la distribución temporal de velocidad corresponde con una distribución asimétrica (Figura 13).



**Figura 13** | Distribución temporal de las velocidades en la sección 3748.

### Potencia aprovechable mediante microgeneración

En cada sección se ha calculado la potencia posible obtener mediante turbinas de microgeneración por m<sup>2</sup> de sección de cauce. Para ello se ha utilizado la expresión:

$$P(t) = C_p (1/2) \rho A v(t)^3 \quad (3)$$

Siendo,

$P(t)$ , potencia útil obtenida (kW).

$C_p$ , coeficiente de potencia. Depende del tipo de turbina a emplear y de la relación existente entre velocidad del flujo y la velocidad de rotación.

$A$ , el área de la sección transversal opuesta al flujo de la microturbina ( $m^2$ ). En este caso se ha tomado el valor  $A=1 m^2$ .  
 $v(t)$ , velocidad de la corriente de agua ( $m/s$ ).

En el caso evaluado se ha utilizado un diseño de turbina Gorlov (Figura 14) al ser el que ofrece el mayor coeficiente de potencia en equipamientos de microturbinas (Gorban *et al.*, 2001):

$$C_p = 0.35$$

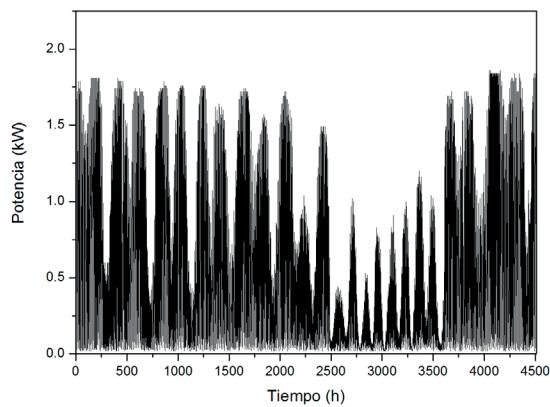
Siendo para esta turbina el mínimo de funcionamiento:

$$V_{min} > 0.5 m/s$$

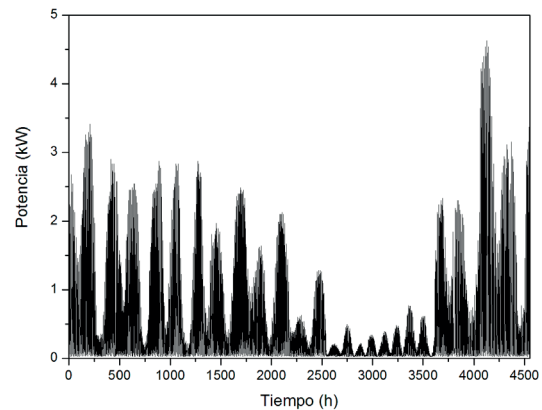


**Figura 14** | Turbina Gorlov.

En la Figura 15 y Figura 16 se muestran los valores de potencia obtenida en las secciones 4272 y 3748. Lógicamente en estas secciones donde se encuentran los valores máximos de velocidad también la potencia obtenida es máxima.



**Figura 15** | Evolución anual de la potencia en la sección 4272.



**Figura 16** | Evolución anual de la potencia en la sección 3748.

## Energía aprovechable mediante microgeneración

Una vez obtenida la potencia útil que es posible obtener en cada sección, se calcula la energía disponible en cada sección. Para ello al tratarse de potencias medias horarias se calculan (para cada sección) como:

$$E = \sum_{t=1}^{t=8769 h} P(t) \quad (4)$$

Siendo  $E$  (kWh) la energía total posible de aprovechar en cada sección mediante turbinas Gorlov.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 17.

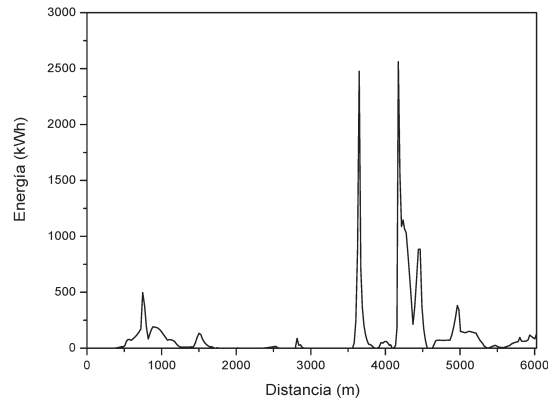


Figura 17 | Valores anuales de energía.

Los máximos de energía anual aparecen en las secciones: 3748 (distancia de 3648.96 m de la desembocadura) con un valor de 2475.94 kWh y 4272 (distancia de 4172.98 metros de la desembocadura) con un valor de 2561.54 kWh (Figura 18).



Figura 18 | Localización de la máxima energía por  $m^2$  de sección.

## CONCLUSIONES

Mediante simulaciones utilizando HEC-RAS (modelo hidráulico unidimensional) se han localizado en la desembocadura del río Nalón secciones donde las velocidades del flujo superan los 2 m/s. Dichas localizaciones están situadas de 3.5 a 4.5 km del mar. En la citada zona se ha evaluado la potencia que sería posible obtener mediante una turbina de microgeneración Gorlov alcanzando valores de hasta 4 kW/ $m^2$ . Así mismo también se ha evaluado la energía anual que podría ser aprovechada por ese tipo de turbinas por  $m^2$ . Los resultados son muy positivos desde el punto de vista científico a falta de una legislación que permita su instalación y puesta en servicio.

## REFERENCIAS

- Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Sánchez, H.P., Niñerola, D., Gómez, M. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC-RAS*. Edicions UPC: Barcelona.
- 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. doi:10.1016/j.renene.2008.10.028
- Cavanagh, J.E., Clarke, J.H., Price, R. (1993). *Ocean energy systems. Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity*. In: T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reddy, and R.H. Williams, eds. Island Press: Washington, DC.
- Cedex. (2014). Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. *Disponible en: <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos>*
- Gorban, A.N., Gorlov, A.M., Silantyev, V.M. (2001). Limits of the turbine efficiency for free fluid flow. *Journal of Energy Resources Technology*, 123(4): 311-317. doi:10.1115/1.1414137
- Horritt, M.S., Bates, P.D. (2005). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Environmental Management*, 75(4): 325-336.
- Instituto Geográfico Nacional. (2014). *Disponible en: <http://www.ign.es/PNOA>*
- International Energy Agency. (2012). *Key World Energy Statistics 2012*. International Energy Agency, Paris.
- Kim, K.P., Ahmed, M.R., Lee, Y.H. (2010). Conceptual Design of a 100kW Energy Integrated Type Bi-Directional Tidal Current Turbine. *AIP Conference Proceedings*, 21–23 October 2009, Kuala Lumpur: Malaysia. 1225, pp. 650. doi:10.1063/1.3464914
- O'Rourke, F., Boyle, F., Reynolds, A. (2010). Tidal energy update 2009. *Applied Energy*, 87(2): 398-409. doi:10.1016/j.apenergy.2009.08.014
- Puertos del Estado. (2014). *Disponible en: [http://www.puertos.es/oceanografia\\_y\\_meteorologia/redes\\_de\\_medida/index.html](http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html)*