

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE ENERGÍA HIDROKINÉTICA EN LA DESEMBOCADURA DE LA RÍA DE RIBADESELLA

Moisés Ferreras Moreno^[*], Antonio José Gutiérrez Trashorras^[], Eduardo Álvarez Álvarez^[*] Alumno; ^[**] Tutor(es)**
UO218664@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

La preocupación por el agotamiento de las fuentes convencionales de combustibles es un hecho. El avance de las llamadas, energías limpias, se incrementa cada año, las fuentes renovables presentan campos de actuación muy diversificados y aunque algunas de ellas están llegando a su punto de máximo aprovechamiento, existen otras cuyo progreso aún es reducido y pueden ofrecer resultados convincentes.

Las energías marinas presentan un potencial energético muy elevado. Las instalaciones que aprovechan esta energía precisan, normalmente, de elevadas inversiones lo que sumado a los altos costes de funcionamiento y su flagrante impacto ambiental han supuesto un impedimento para su desarrollo.

En este trabajo se propone evaluar el potencial energético que es posible aprovechar en la desembocadura del río Sella, debido a las corrientes provocadas por la interacción marina, utilizando para ello instalaciones de microgeneración. La viabilidad de este tipo de instalaciones puede encontrarse en localizaciones cercanas a la costa, que minimizan la inversión necesaria y el coste de operación y mantenimiento así como el impacto ambiental.

Para ello, se ha trabajado con el programa gratuito IBER. IBER es un programa de modelización bidimensional de flujo en lámina libre para aguas poco profundas. Para trabajar en IBER se ha importado un modelo de terreno en

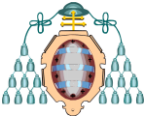
formato ráster, que ha sido tratado y obtenido mediante programas de tratamiento de información geográfica, como ArcGis y derivados. Los resultados demuestran la existencia de una zona con un potencial energético viable de utilizar desde un punto de vista técnico.

ABSTRACT

The concern about the depletion of the sources of conventional fuels is a fact. The progress of the called clean energies increases each year renewable sources show a much diversified area of application, although some of them are getting to their highest exploitation point, there are others whose progress is still small and they can provide convincing results.

Marine energy has a very huge potential. The facilities that harness this energy need normally of high investments coupled to the high operating costs and its obvious environmental impact have involved an obstacle for its development.

This aim of this work is to evaluate the energetic potential that it is possible to use in the mouth of the river Sella, due to currents caused by marine interaction, using microgeneration facilities. The viability of the facilities can be found in places near to coast, which minimizes the required investment as well as the cost of operation maintenance and its environmental impact.



For this reason has been used the free software IBER. IBER is two-dimensional modelling software of flow in a free water sheet for not deep waters. To work in IBER has been updated a raster terrain model which has been obtained by softwares of geographic data processing, such as ArcGis and derivative ones. The results prove the existence of an area with an energetic potential which would be useful from a technical point of view.

INTRODUCCIÓN

La demanda energética mundial se situó en 21431 TWh en el año 2012, llegando a crecer un 2% en el 2013 e incrementándose un débil 0,9% en 2014 [1], debido a la situación de crisis económica. Se estima que el potencial energético de la energía mareomotriz a nivel mundial es considerada de 800 TWh/año, 105 TWh/año en Europa [2], aunque a nivel práctico todas las energías marinas juntas aportaron 0,555 TWh, cuyo porcentaje frente a la demanda mundial es casi inexistente.

Pese a ello, la energía mareomotriz presenta algunas ventajas, ya que es un recurso continuo y predecible, y parte de la tecnología que usa ya es conocida y muchos de los desafíos tecnológicos han sido superados. El aprovechamiento de este tipo de energía basado en instalaciones específicas aún se encuentra en estado incipiente encontrando importantes barreras a su desarrollo. Estas son fundamentalmente sus elevados costes de inversión, operación, mantenimiento, el elevado impacto ambiental y una posible incertidumbre sobre su rentabilidad futura.

Las instalaciones que aprovechan la energía proveniente de las mareas o mareomotriz puede ser de dos tipos: centrales de almacenamiento, que actúan como una presa, utilizando la energía potencial provocada por la diferencia de nivel de agua entre las mareas altas y bajas en presas específicamente diseñadas; o turbinas marinas que utilizan la energía cinética de las corrientes marinas durante los movimientos de agua producidos en las mareas.

La generación eléctrica de este tipo de presas se realiza mediante los mismos principios de la generación hidroeléctrica con la diferencia de que

puede construirse una central de ciclo doble, en la cual las corrientes de la marea se pueden utilizar en las dos direcciones. 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 Canadá, Kislava Guba de 400kW en Rusia y Jangxia Creek de 500 kW en China [3].

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 inviabilizado los proyectos respecto los puntos de vista técnico, económico y medioambiental [3].

Algunos estudios han determinado que la desembocadura de los ríos son puntos ideales para aprovechamiento de las mareas, debido a la confluencia de las mareas con el río y al posible perfil estrecho de la desembocadura (puntos donde las velocidades de la corriente superiores a 2 m/s). Por tanto, 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.

El aprovechamiento de estas ubicaciones permite el desarrollo y diseño de los sistemas de microgeneración minimizando el impacto medioambiental y con costes asequibles [4].

Para realizar estos estudios se han utilizado tanto herramientas software específicas como medidas en campo.

MÉTODO TRABAJO

Se expondrán detalladamente todos los pasos seguidos desde la creación del modelo hasta la obtención de los resultados finales. Se puede ver resumido en la Figura 1.

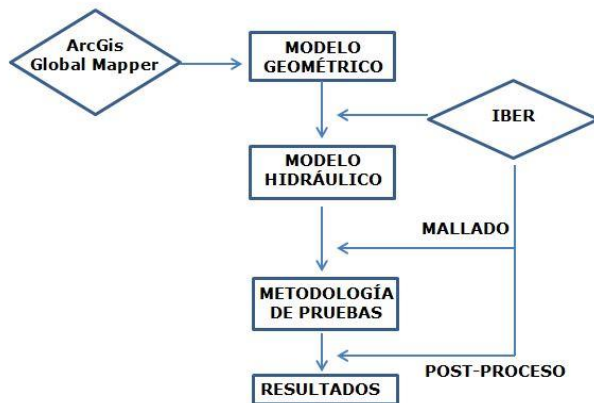


Figura 1: Esquema del método de trabajo

a) Creación del modelo geométrico

Para el desarrollo del modelo se la elegido la desembocadura del río Sella, situada en la localidad de Ribadesella. El río Sella es uno de los cauces más importantes de Asturias, con lo que los caudales de avenida que fluyen por la ría pueden llegar a ser considerables.

A través del registro en el CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica) se pueden descargar los mapas de todo el territorio nacional, divididos en cuadrículas con diversas escalas, escogiéndose para este caso la escala 1:25000.

De los diferentes tipos de archivos a descargar se escogió una ortofoto del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) de la cuadrícula 0-0031, en formato ECW, los archivos PNOA son ortofotografías aéreas de alta resolución (ver Figura 2).



Figura 2: Mapa de la cuadrícula 0-0031. Fuente: CNIG

Debido a que el archivo es demasiado pesado y puede suponer un problema en los softwares de tratamiento de información geográfica, se ha procedido a la división del mapa en sectores, utilizando la herramienta Global Mapper v15.2, un software más básico que ArcGis pero práctico para tareas sencillas (ver Figura 3).

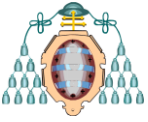


Figura 3: Sección de interés obtenida con Global Mapper

Una vez obtenida la sección de interés, todo en formato ECW, se procederá a convertirla en formato ASCII, ya que será necesario para los pasos posteriores [5].

Como herramienta de conversión de datos se empleará ArcGis 10.1, que permitirá la transformación de cualquier formato ráster (ECW por ejemplo) en formato ASCII, que aparecerá representado como un bloc de texto que lleva escrito una matriz de filas y columnas.

Posteriormente para crear un modelo que permita obtener resultados fiables se creará en IBER una geometría RTIN (Red Irregular de Triángulos Rectángulos).



Se selecciona el archivo ASCII del Modelo Digital Terrestre (MDT), y se crea un archivo "rtin.dxf" dentro de la carpeta del proyecto IBER. Al crearlo se debe indicar la longitud mínima y máxima de lado de los triángulos que se formarán, así como una tolerancia (máxima distancia en vertical entre el MDT y la geometría creada) que debe de ser del orden de la precisión altimétrica del MDT.

Para la realización del modelo se tomaron: Un lado máximo de triángulo de 100, un lado mínimo de triángulo de 20 y una tolerancia de 0,1 (ver Figura 4).

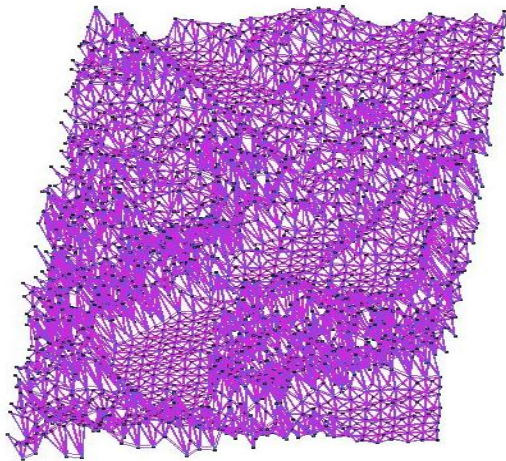


Figura 4: Modelo RTIN del rio Sella

Tras realizar un análisis exhaustivo del lecho fluvial, se llegó a la conclusión que las mayores velocidades se producirían en aquellas zonas donde el terreno mostrase estrechamientos, la zona más estrecha se sitúa en la desembocadura, donde confluyen las aguas saladas y dulces, cercana a la playa. Se consideró reducir la zona de estudio a un sector más reducido para facilitar los cálculos (ver Figura 5).

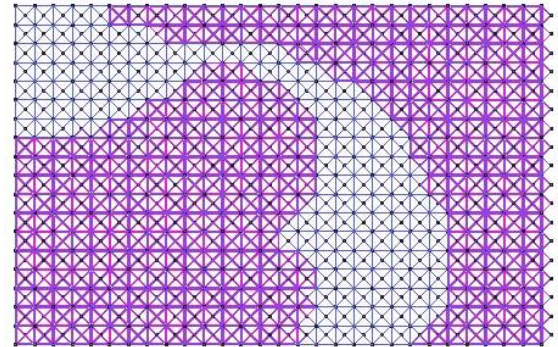


Figura 5: Zona de desembocadura del modelo RTIN, visto con vista de pájaro (en azul se representa el cauce del río)

Teniendo el modelo ya importado se procedió a realizar cambios dentro del mismo. La creación del modelo no fue perfecta y algunas zonas del modelo presentaban defectos (por ejemplo, puntos del cauce que se encontraban con cotas 50 metros por debajo de los demás) que hacían inviable la simulación. Se eliminó el cauce del río y se reconstruyó, mediante la ayuda de Google Earth, que permite dar alturas de terreno reales respecto al nivel del mar y diversos mapas topográficos, visualizados en AutoCAD, se pudo crear un nuevo cauce que permitiese mantenerse las irregularidades propias del terreno pero con cotas admisibles y todo lo similar posible a la realidad (ver Figura 6).

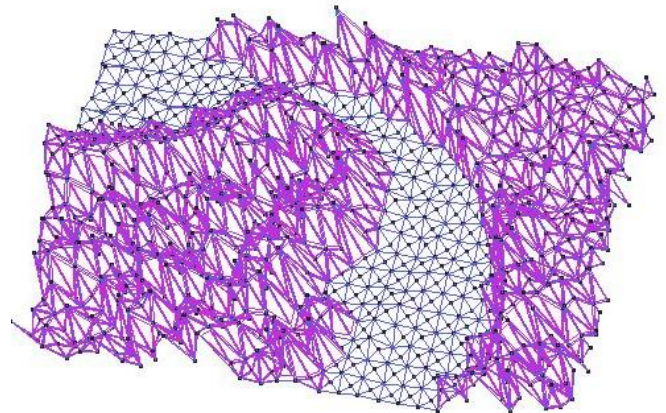
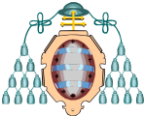


Figura 6: Zona de desembocadura del modelo RTIN con cauce reconstruido, visto con rotación libre (en azul se representa el cauce del río)



b) Modelo hidráulico

El modelo IBER consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Sólo será de interés el primero de los módulos, ya que se trabajará sin un modelo de turbulencia y sin un módulo de transporte de sedimentos.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE). Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad [7].

La hipótesis de presión hidrostática se cumple de manera razonable en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo.

El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento en las 2 direcciones horizontales (ver Figura 7):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h r_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h r_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h r_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h r_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

Figura 7: Ecuaciones de conservación de masa y momento. Fuente: Manual de referencia de IBER

Siendo,
h, el calado
Ux y Uy, las velocidades horizontales promediadas en profundidad

g, es la aceleración de la gravedad
Zs, es la elevación de lámina libre
Ts es la fricción debido al viento
Tb, es la fricción debido al fondo
ρ, es la densidad
Ω, es la velocidad angular
λ, es la latitud
texx, texy, teyy, son tensiones tangenciales
Ms, Mx, My, son términos fuente/sumidero de masa y momento

También se debe tener en cuenta la fricción de fondo, el fondo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el fluido que es equivalente al rozamiento con una pared, con la particularidad de que, en general, en ingeniería hidráulica la rugosidad del fondo es elevada, como ocurre en ríos y estuarios.

La fricción del fondo tiene un doble efecto en las ecuaciones de flujo. Por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por otro lado, produce turbulencia.

La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de Manning (n) como parámetro. La fórmula de Manning utiliza el siguiente coeficiente de rugosidad [7] (ver Figura 8):

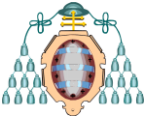
$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}}$$

Figura 8: Coeficiente de Manning. Fuente: Manual de referencia de IBER

Siendo,
h, el calado
g, es la aceleración de la gravedad
n, es el coeficiente de Manning

Cuanto más alto es el coeficiente implica que la superficie de contacto de la corriente de agua presenta una rugosidad mayor. En el presente trabajo se construyó una distribución del coeficiente de Manning dividido en 4 zonas (ver Figura 9):

1. Zona residencial (magenta): Correspondiente a la ciudad de Ribadesella y a zonas habitables,



cuyo peso dentro de la simulación es prácticamente nulo. Su valor es de 0,15.

2. Zonas de monte (azul): Se corresponde con las zonas sin edificar y vegetación densa, tienen influencia en parte de la ribera del río. Su valor es de 0,18.

3. Cauce del río (verde): Se compone del lecho del río y la vegetación fluvial. Su valor es de 0,025.

4. Playa (amarillo): Se aplica sobre la arena de la playa y la convergencia del río y el agua de mar. Su valor es de 0,023.

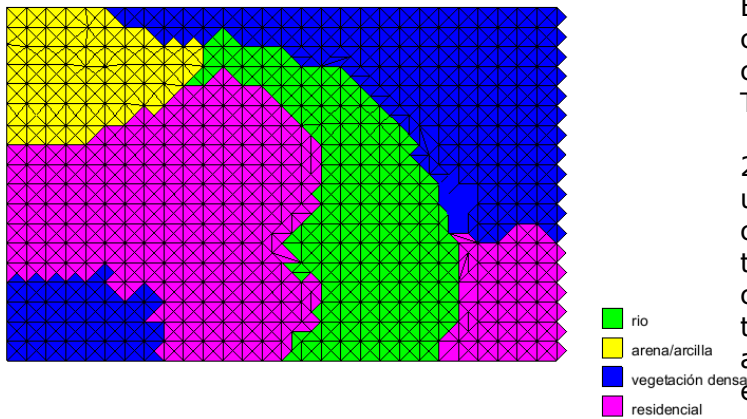


Figura 9: Distribución del coeficiente de Manning

En cuanto a las condiciones de contorno hidrodinámicas, se debe tener en cuenta que: En un problema bidimensional es necesario distinguir entre dos tipos de contornos: abiertos y cerrados. Los contornos cerrados, también llamados contornos de tipo pared, son impermeables, no permitiendo el paso del fluido a través de ellos.

Solo se ha trabajado con contornos abiertos, prescindiendo de los cerrados. En los contornos abiertos se pueden imponer diferentes tipos de condiciones de contorno. Para que las ecuaciones de aguas someras bidimensionales estén bien planteadas desde el punto de vista matemático, el número de condiciones a imponer en los contornos abiertos depende de si se trata de un contorno de entrada o de salida de flujo, así como del tipo de régimen en el contorno (rápido/lento) [7].

En un contorno de entrada es necesario imponer 3 condiciones de contorno si el régimen es supercrítico (una para cada una de las tres

ecuaciones de 2D-SWE), mientras que si se produce régimen subcrítico/crítico es suficiente con imponer 2 condiciones. En un contorno de salida es suficiente con imponer una única condición si el régimen es subcrítico, mientras que no es necesario imponer ninguna condición si el régimen es supercrítico.

En el presente trabajo se han planteado 2 condiciones de entrada en régimen subcrítico/crítico (ver Figura 10):

1. Entrada sur: Correspondería a la entrada de caudal total, cuyas 2 condiciones son el caudal, medido en m^3/s y el tiempo, medido en segundos. En cada simulación se utilizará el caudal correspondiente a cada mes y se mantendrá constante durante todo el proceso (datos en la Tabla 1).

2. Entrada norte: Correspondería a la entrada con una cota de agua (es decir, las mareas), sus 2 condiciones son la cota, medida en metros, y el tiempo, medido en segundos. Las alturas se corresponderán con los valores de las mareas, el tiempo a utilizar serán 83000 segundos, aproximadamente el equivalente a un día (datos en Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4 del ANEXO).

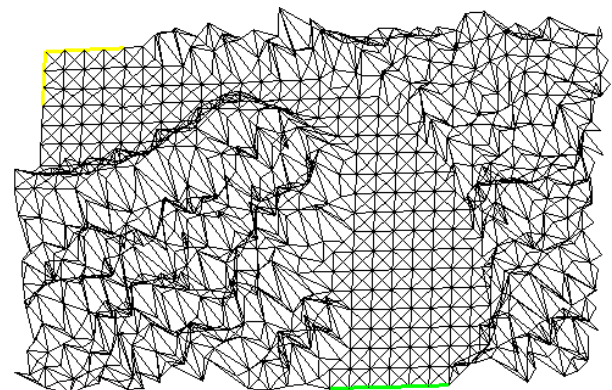
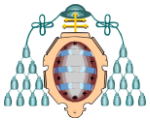


Figura 10: Condiciones de entrada. Entrada norte (Amarillo), entrada sur (verde).

Se ha considerado la no inclusión de una condición de salida, ya que una condición de salida colocada en la desembocadura del río provoca que las aguas no se mezclen y por tanto se ofrecen resultados irreales.



Una vez establecidas todas las condiciones se procederá al mallado, que es indispensable para poder ejecutar la simulación. Se ha optado por una malla estructurada de superficie (ver Figura 11), debido al pequeño tamaño de las superficies triangulares RTIN creadas, el número de divisiones de cada lado de la superficie-triángulo es de 2, ya que si se aumentan las divisiones se puede provocar el colapso del programa y además los resultados son casi idénticos [8].

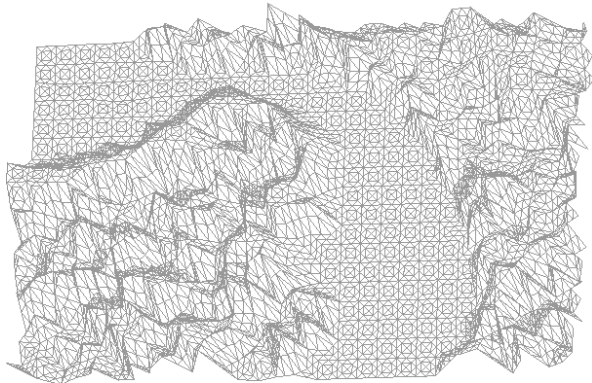


Figura 11: Mallado del modelo

c) Metodología de pruebas

Para realizar la simulación son necesarios 2 datos esenciales: caudales y el nivel de las mareas.

Para conseguir el primero, se entró en contacto con la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC). CHC envió los datos relativos a los caudales medidos en todas las estaciones de medida situadas a lo largo del río, de entre todas se escogió la estación de Arriondas, ya que es la última estación de medida y la más cercana a la desembocadura, por tanto la que aporta el valor del caudal total.

Los datos aportados fueron de valores de caudal diarios desde el año 2011, se procedió a calcular el valor de caudal medio mensual para poder trabajar posteriormente. Los caudales aparecen representados en la Tabla 1.

Tabla 1: Caudales medios distribuidos por meses

	2011	2012	2013	2014	Caudal medio (m/s)
ENERO	36,123	32,000	118,923	66,168	63,303
FEBRERO	36,288	116,165	138,299	54,279	86,258
MARZO	36,630	14,711	94,389	88,308	58,509
ABRIL	36,949	108,132	76,862	48,559	67,626
MAYO	37,461	22,773	85,846	23,610	42,422
JUNIO	37,385	8,834	51,904	16,074	28,549
JULIO	38,108	5,778	18,445	7,576	17,477
AGOSTO	28,812	3,296	7,608	5,296	11,253
SEPTIEMBRE	21,184	2,378	5,180	3,349	8,023
OCTUBRE	-	24,316	5,239	6,359	11,972
NOVIEMBRE	21,903	37,670	57,262	22,064	34,725
DICIEMBRE	36,530	35,920	25,456	92,078	47,496

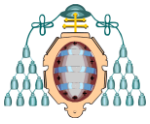
Cabe destacar que en Octubre del 2011 no se calculó la media, ya que los datos aportados estaban incompletos y sólo se conocían caudales hasta el día 8.

Los datos sobre las mareas se obtuvieron a través del Ministerio de Fomento. Los datos fueron recibidos en forma de bloc de texto, donde se desglosaban los niveles de las mareas distribuidos por días y de cada día se conocía la altura de las mareas cada 5 minutos, todos los niveles están referidos al año 2013, ya que los datos del 2014 aparecían incompletos o dañados, y obtenidos del mareógrafo Gijón2 (ver Figura 12).



Figura 12: Esquema de los datos del mareógrafo Gijón2.
Fuente: Puertos del estado

Estos niveles están referidos a la cota a la que se encuentra el mareógrafo, el cual se sitúa 2,36m por encima del Cerro Geográfico, con lo que los



datos de niveles del mar deben reducirse ese valor para que concuerden con las elevaciones del modelo el terreno [6].

Para una correcta simulación de las mareas, se deben establecer unas condiciones de calado. El calado estaría conformado por la diferencia de cotas entre el mar y la desembocadura (10 metros) más el nivel mínimo del mar que se alcanza en la desembocadura (4 metros), por tanto se tendrá un calado de 14 metros. Sobre los 14 metros se restarán los 2,36 metros y se aplicarán las subidas y bajadas de las mareas.

Se calculó la altura media de las mareas para un día tipo (desde la 1 a 24 horas) de cada mes. Los datos se encuentran adjuntos en el ANEXO, aparecen representados en: Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4.

Una vez completado el mallado se procede a definir los parámetros de tiempo: se indican cuando empieza la simulación, la duración, cada cuanto se muestran resultados y el incremento de tiempo máximo (equivalente al número de Courant). La duración es de 83000 segundos y se ofrecen resultados cada 100, empezando a simular desde el instante 0, el número de Courant se establece un 1 [8].

Cada una de estas simulaciones, dura en torno a 20 minutos y una vez finalizadas se puede acceder al post-procesado. En el post-procesado se pueden dibujar las soluciones de maneras diversas para crear un resultado final más vistoso, también se ofrece la posibilidad de mostrar los resultados finales en forma de gráfico o tabla y poder exportar los mismos en formato ráster.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La toma de datos se ha realizado en la desembocadura del río, en la zona de mayor estrechamiento, donde se ha comprobado que se producen las mayores velocidades, tal y como se muestra en la Figura 13.



Figura 13: Zona de mayor estrechamiento del Sella, marcada en rojo

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

a) Velocidad

Para hallar la velocidad se han hecho simulaciones de cada una de horas por separado, dando el tiempo necesario para que el flujo se estabilizase, y después se ha simulado el día completo para comprobar las veracidad de las anteriores simulaciones.

En las siguientes imágenes (Figuras 14, 15, 16) se ofrecen los resultados de la velocidad obtenida en el cauce del río, en distintos momentos de la simulación, para el mes de Diciembre, en una escala de colores que oscila: azul para baja velocidad, rojo para alta velocidad.

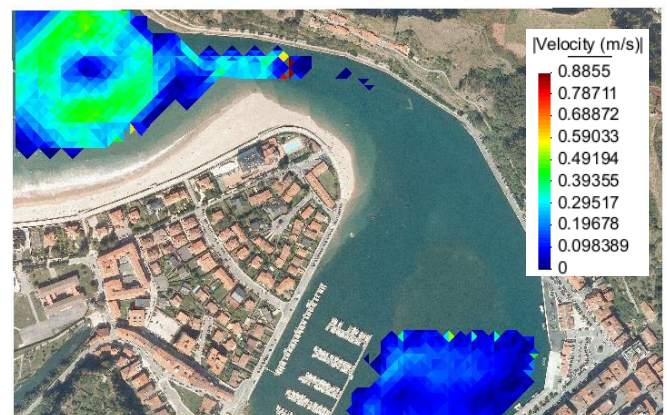


Figura 14: Simulación de día completo de la velocidad en el instante 1100 (entre las 0 y la 1 horas) en Diciembre

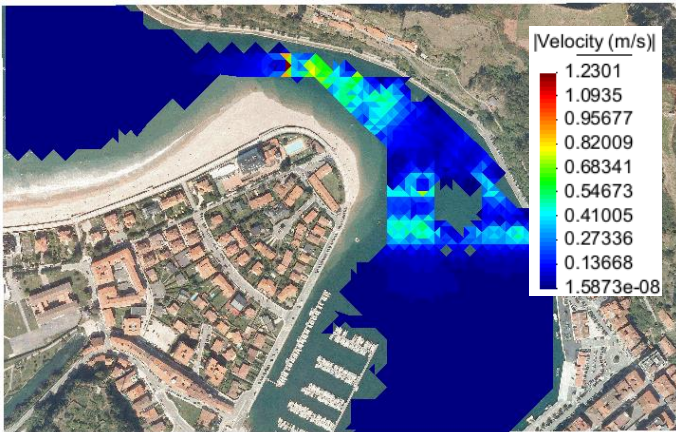


Figura 15: Simulación de día completo de la velocidad en el instante 4700 (entre la 1 y las 2 horas) en Diciembre

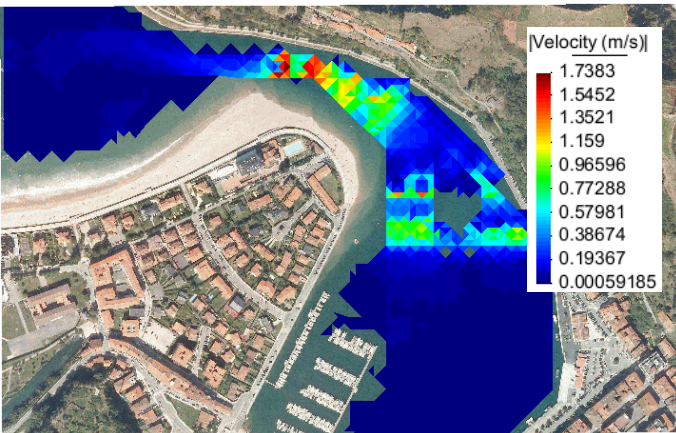


Figura 16: Simulación de día completo de la velocidad en el instante 30000 (entre las 8 y las 9 horas) en Diciembre

Las velocidades se han analizado en el post-procesado, tomando la zona de interés como zona de análisis, IBER permite obtener tablas de datos donde aparecen registrados todos los resultados. Con los datos se ha calculado la velocidad media para cada una de las horas del día, creando un día tipo de cada mes.

Para una fácil visualización, los datos de velocidades han sido colocados en el ANEXO (Tabla 5 y Tabla 6), aquí se muestran en una gráfica en bloques de 6 meses a modo de comparativa entre los diferentes meses (ver Figuras 17 y 18):

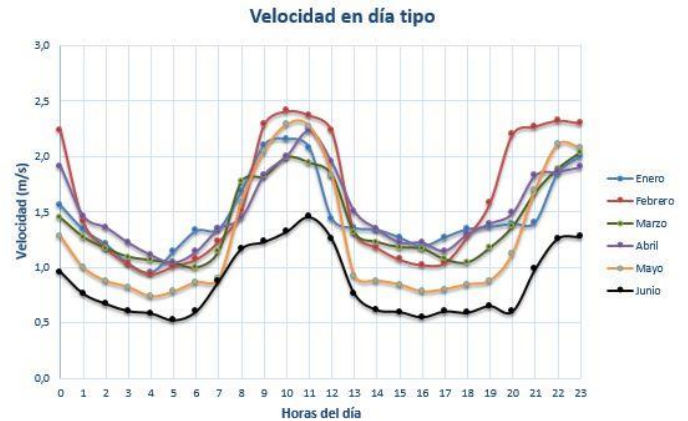


Figura 17: Velocidad en un día tipo de Enero a Junio



Figura 18: Velocidad en un día tipo de Julio a Diciembre

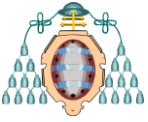
Cabe destacar, que el mes con datos de velocidades más propicios es Febrero, en el cual está registrado el máximo de velocidad, a las 10 horas, con un valor de 2,41 m/s.

b) Potencia aprovechable

En la sección de interés se ha calculado la potencia útil a obtener mediante una turbina de microgeneración por m² de cauce. Cabe señalar que para el caso propuesto se ha empleado una turbina de diseño Gorlov (ver Figura 19), una turbina de agua evolucionada de la clásica Darreius [9]. La potencia se calcula mediante la expresión:

$$P_i(t) = 0,5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v_i(t)^3$$

Siendo,
 C_p, el coeficiente de potencia. Depende del tipo de turbina a emplear y de la relación existente entre



velocidad del flujo y la velocidad de rotación con un valor constante de 0,35
 A, el área de la sección transversal opuesta al flujo de la microturbina (m²). Su valor es de 1 m²
 v_i, es la velocidad media de la corriente de agua en la hora i, medida en m/s
 ρ, es la densidad
 P_i, es la potencia media en la hora i, medida en kW



Figura 19: Turbina Gorlov. Fuente: gradcad.com

Los datos de potencia se mostrarán en el ANEXO (Tabla 7 y Tabla 8), ya que son derivados de la velocidad que se encuentran en el mismo apartado.

c) Energía aprovechable

Una vez obtenida la Potencia útil que es posible obtener en cada sección, se calcula la energía disponible en cada sección (ver Figura 20). Se calcula mediante el sumatorio de las potencias de un día tipo multiplicado por el número de días de ese mes.

$$E_j = \sum_{i=1}^{i=24} P_i \cdot n$$

Siendo,
 E_j, es la energía media producida en el mes j, medida en kWh
 n, es el número de días del mes
 P_i, es la potencia media en la hora i, medida en kW

Energía generada al año

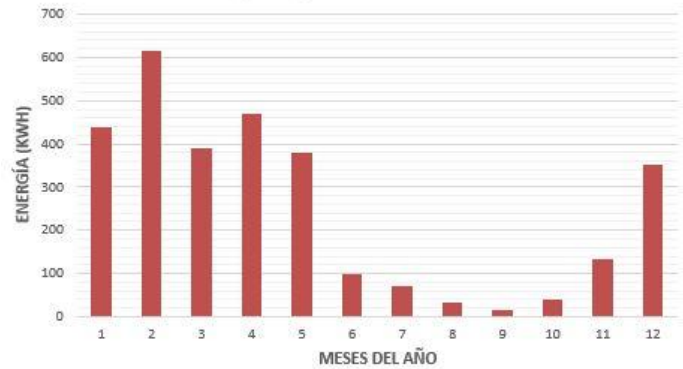


Figura 20: Comparativa de la energía aprovechable por meses

$$E_{anual} = \sum_{j=1}^{j=12} E_j$$

Siendo,
 E_{anual}, la energía media anual, medida en kWh

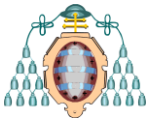
La energía total que se obtiene al final del año, calculada como el sumatorio de todas las energías, es de 3038,35 kWh/año medida por m².

CONCLUSIONES

Considerando las ventajas que ofrece la microgeneración se planteó el estudio de la desembocadura del río Sella, donde se producen altas velocidades en el estrechamiento. Se creó un modelo geométrico que se importó a IBER.

Mediante la introducción de datos reales, la creación de un modelo hidráulico, la simulación del mismo y su visualización en post-procesado, se obtuvieron datos de velocidades, que podían alcanzar los 2,5 m/s.

Además, se han evaluado la potencia y la energía útiles generadas, se pueden obtener valores horarios de hasta 2,5 kWh y la energía anual generada es de casi 3040 kWh/año. Los resultados son optimistas y se cree que lo producido podría servir para dar suministro a las instalaciones del puerto o vecindarios cercanos a la costa. A pesar de los buenos resultados aún queda por determinar toda la legislación que permita su uso e instalación.



[9] J. Anderson, B. Hughes, C. Johnson. Capstone Project Report: Design and Manufacture of a Cross-Flow Helical Tidal Turbine, 2011.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores del proyecto, Eduardo Álvarez Álvarez y Antonio José Gutiérrez Trashorras por la ayuda y el apoyo recibido.

También a los miembros y moderadores de Foro IBER por ayudarme a resolver todas las dudas respecto al programa.

REFERENCIAS

[1] BP Statistical Review of World Energy June 2015, Reino Unido, 2015

[2] J.E. Cavanagh, J.H. Clarke, R. Price, "Ocean energy systems. Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity", eds. T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reddy, and R.H. Williams, Washington, DC: Island Press (1993).

[3] D. Fernández Suarez, E. Álvarez Álvarez, A. Trashorras. Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en la desembocadura del río Nalón (Asturias, España). Trabajo Fin de Master. Universidad de Oviedo, 2014.

[4] J. Fernández-Franco, M. Ríos-Secades, E. Álvarez Álvarez, A. Trashorras. Design and feasibility study of a microgeneration system to obtain renewable energy from tidal currents. Journal of Renewable And Sustainable Energy. 2014.

[5] <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/>

[6] http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html

[7] Manual de referencia de IBER, capítulo 2.2: Ecuaciones hidrodinámicas, capítulo 2.3: Fricción de fondo, capítulo 2.6: Condiciones de contorno hidrodinámicas.

[8] Manual básico de usuario de IBER, capítulo 2.2.2: Menú "IBER_herramientas">RTIN.

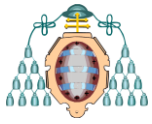
ANEXO

Tabla 2: Niveles del mar en los meses de Enero, Febrero, Marzo y Abril

Nivel del mar (m) por meses				
Horas	Enero	Febrero	Marzo	Abril
0	12,896	12,921	12,976	12,970
1	13,121	13,156	13,256	13,206
2	13,383	13,400	13,562	13,444
3	13,613	13,596	13,814	13,616
4	13,754	13,692	13,944	13,670
5	13,775	13,655	13,915	13,594
6	13,662	13,492	13,728	13,402
7	13,444	13,243	13,444	13,154
8	13,180	12,972	13,132	12,911
9	12,931	12,754	12,871	12,738
10	12,757	12,639	12,729	12,681
11	12,704	12,654	12,747	12,759
12	12,785	12,799	12,921	12,952
13	12,978	13,034	13,201	13,205
14	13,223	13,293	13,514	13,458
15	13,445	13,504	13,776	13,643
16	13,593	13,610	13,916	13,715
17	13,625	13,584	13,904	13,655
18	13,531	13,435	13,748	13,485
19	13,333	13,202	13,488	13,252
20	13,100	12,949	13,194	13,015
21	12,895	12,757	12,947	12,836
22	12,773	12,679	12,813	12,760
23	12,769	12,735	12,829	12,813

Tabla 3: Niveles del mar en los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto

Nivel del mar (m) por meses				
Horas	Mayo	Junio	Julio	Agosto
0	12,944	12,886	12,887	12,848
1	13,087	13,014	13,021	13,052
2	13,246	13,160	13,188	13,281
3	13,374	13,285	13,347	13,472
4	13,430	13,353	13,449	13,576



5	13,396	13,341	13,467	13,564
6	13,281	13,249	13,395	13,437
7	13,119	13,108	13,259	13,237
8	12,959	12,959	13,094	13,021
9	12,843	12,842	12,950	12,848
10	12,806	12,798	12,872	12,766
11	12,861	12,840	12,888	12,808
12	12,994	12,960	12,992	12,961
13	13,171	13,127	13,159	13,186
14	13,348	13,299	13,343	13,417
15	13,484	13,434	13,497	13,595
16	13,543	13,498	13,583	13,675
17	13,512	13,479	13,579	13,629
18	13,404	13,378	13,485	13,475
19	13,250	13,225	13,323	13,247
20	13,086	13,057	13,134	13,002
21	12,954	12,910	12,962	12,800
22	12,885	12,824	12,850	12,694
23	12,897	12,820	12,828	12,712

17	13,652	13,638	13,441	13,475
18	13,443	13,405	13,252	13,314
19	13,167	13,136	13,035	13,110
20	12,890	12,906	12,850	12,928
21	12,689	12,780	12,751	12,968
22	12,617	12,791	12,765	13,041
23	12,691	12,935	12,887	13,068

Tabla 4: Niveles del mar en los meses de Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre

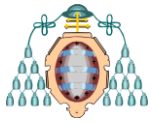
Nivel del mar (m) por meses				
Horas	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	12,879	13,173	13,094	13,115
1	13,149	13,438	13,326	13,329
2	13,423	13,669	13,533	13,521
3	13,627	13,812	13,658	13,643
4	13,707	13,825	13,672	13,669
5	13,647	13,709	13,579	13,592
6	13,463	13,497	13,400	13,430
7	13,208	13,250	13,185	13,227
8	12,955	13,033	12,987	13,035
9	12,769	12,904	12,861	12,900
10	12,704	12,897	12,836	12,851
11	12,779	13,011	12,914	12,901
12	12,978	13,220	13,075	13,035
13	13,242	13,464	13,274	13,218
14	13,502	13,676	13,451	13,398
15	13,684	13,790	13,553	13,519
16	13,739	13,776	13,549	13,547

Tabla 5: Velocidades de Enero a Junio

Velocidad por meses (m/s)						
Horas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
0	1,558	2,233	1,445	1,910	1,277	0,958
1	1,343	1,413	1,273	1,464	0,998	0,763
2	1,210	1,176	1,172	1,362	0,876	0,671
3	1,038	1,029	1,094	1,223	0,819	0,606
4	0,958	0,943	1,065	1,111	0,736	0,586
5	1,146	1,012	1,039	1,043	0,781	0,523
6	1,331	1,076	0,996	1,143	0,866	0,604
7	1,349	1,238	1,148	1,351	0,897	0,877
8	1,689	1,520	1,774	1,449	1,587	1,169
9	2,102	2,288	1,820	1,832	2,045	1,230
10	2,157	2,410	1,992	2,003	2,288	1,322
11	2,079	2,374	1,943	2,232	2,274	1,455
12	1,442	2,234	1,834	1,949	1,831	1,256
13	1,356	1,318	1,310	1,508	0,923	0,763
14	1,341	1,179	1,228	1,348	0,880	0,616
15	1,271	1,072	1,180	1,226	0,844	0,599
16	1,194	1,024	1,167	1,224	0,781	0,551
17	1,273	1,042	1,072	1,150	0,800	0,604
18	1,347	1,276	1,042	1,299	0,846	0,592
19	1,366	1,582	1,175	1,396	0,880	0,652
20	1,397	2,205	1,365	1,489	1,125	0,602
21	1,409	2,274	1,673	1,828	1,697	0,983
22	1,846	2,326	1,889	1,862	2,108	1,259
23	2,001	2,302	2,036	1,904	2,078	1,276

Tabla 6: Velocidades de Julio a Diciembre

Velocidad por meses (m/s)						
Horas	Julio	Agosto	Septiem.	Noviem.	Octubre	Diciem.
0	0,825	0,856	0,652	0,823	0,837	1,395
1	0,801	0,612	0,503	0,720	0,646	1,223



2	0,652	0,600	0,389	0,609	0,628	1,122
3	0,509	0,512	0,187	0,489	0,511	1,044
4	0,460	0,298	0,109	0,316	0,445	1,015
5	0,459	0,203	0,183	0,301	0,614	0,989
6	0,393	0,220	0,256	0,415	0,635	0,946
7	0,440	0,221	0,437	0,591	0,707	1,098
8	0,905	0,305	0,616	0,748	1,172	1,724
9	1,079	0,815	0,663	0,756	1,429	1,770
10	1,068	0,882	0,678	0,899	1,440	1,942
11	1,125	0,914	0,665	1,066	1,408	1,893
12	1,281	1,021	0,520	0,864	0,786	1,784
13	0,825	0,409	0,408	0,381	0,642	1,260
14	0,491	0,351	0,230	0,344	0,626	1,178
15	0,521	0,201	0,130	0,317	0,534	1,130
16	0,411	0,184	0,098	0,266	0,535	1,117
17	0,376	0,196	0,133	0,286	0,632	1,022
18	0,464	0,224	0,321	0,388	0,666	0,992
19	0,572	0,327	0,501	0,387	0,990	1,125
20	0,499	0,531	0,635	0,360	1,425	1,315
21	1,171	0,881	0,725	0,948	1,575	1,623
22	1,159	0,940	0,736	1,027	1,449	1,839
23	1,212	0,938	0,689	1,059	1,688	1,986

15	362,966	217,541	290,717	325,325	106,378	37,998
16	300,837	189,968	281,230	324,018	84,062	29,556
17	364,778	199,765	217,743	269,038	90,496	38,949
18	431,553	367,401	200,204	387,372	107,035	36,613
19	450,991	700,356	286,730	480,793	120,469	49,077
20	481,824	1893,79	449,905	583,504	251,441	38,524
21	493,962	2077,33	828,390	1079,38	864,244	167,70
22	1111,87	2224,20	1191,49	1140,86	1655,47	352,58
23	1416,12	2157,37	1492,35	1219,75	1585,68	366,98

Tabla 8: Potencia de Julio a Diciembre

Potencia por meses (W)						
Horas	Julio	Agosto	Septiem.	Noviem.	Octubre	Diciem.
0	99,248	110,861	48,989	98,528	103,642	479,824
1	90,836	40,515	22,494	65,972	47,656	323,325
2	48,989	38,178	10,404	39,922	43,880	249,429
3	23,327	23,723	1,155	20,667	23,562	201,123
4	17,236	4,677	0,226	5,577	15,570	184,621
5	17,053	1,479	1,080	4,820	40,969	170,981
6	10,711	1,882	2,965	12,603	45,314	149,792
7	15,058	1,902	14,750	36,491	62,545	234,134
8	131,152	5,017	41,385	73,971	284,806	906,135
9	221,730	95,551	51,511	76,370	515,516	979,332
10	215,534	121,415	54,991	128,422	528,181	1293,82
11	251,535	134,878	51,947	214,257	492,967	1198,97
12	371,268	187,847	24,852	113,999	85,828	1003,66
13	99,394	12,068	12,004	9,757	46,807	353,261
14	20,942	7,637	2,155	7,202	43,382	288,989
15	25,062	1,425	0,385	5,611	26,963	255,317
16	12,244	1,101	0,165	3,317	27,106	246,621
17	9,360	1,326	0,418	4,135	44,648	188,674
18	17,672	1,986	5,846	10,306	52,286	172,755
19	33,097	6,157	22,227	10,230	171,500	251,662
20	21,994	26,444	45,349	8,269	511,255	402,267
21	284,011	120,671	67,223	150,659	690,512	756,335
22	275,382	146,899	70,407	191,523	537,764	1099,37
23	314,718	146,072	57,895	209,872	849,819	1385,09

Tabla 7: Potencias de Enero a Junio

Potencia por meses (W)						
Horas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
0	668,878	1968,40	533,289	1231,62	368,043	155,40
1	428,121	498,639	364,623	554,869	175,472	78,511
2	313,166	287,812	284,294	446,184	118,890	53,493
3	197,679	192,518	231,426	323,197	97,068	39,361
4	155,402	148,025	213,282	242,514	70,429	35,567
5	266,019	182,939	198,247	200,727	84,062	25,350
6	416,938	220,111	174,812	264,088	114,918	38,947
7	434,193	335,099	267,590	435,420	127,721	119,06
8	850,924	620,712	987,269	537,683	705,862	282,19
9	1642,02	2118,1	1064,71	1085,93	1510,98	328,74
10	1772,79	2474,81	1396,37	1419,96	2117,63	408,49
11	1589,08	2365,52	1296,51	1966,02	2078,70	544,12
12	529,710	1971,58	1090,43	1309,30	1085,09	349,99
13	440,793	404,668	397,020	606,127	138,929	78,539
14	425,902	289,358	327,368	432,797	120,469	41,369