Mapa de flujos de energía en el Estrecho de Gibraltar para su aprovechamiento como fuente de energía renovable

1.- INTRODUCCIÓN

Dentro del emergente campo de las energías renovables, nuestro país es pionero en la generación de energía eólica y se encuentra relativamente bien ubicado en el ranking de energía solar (en sus dos facetas, fotovoltaica y termosolar). Otra fuente potencial de energía renovable que está prácticamente ignorada en nuestro país es el océano (mareas, oleaje) y también la extraíble a partir de las corrientes marinas. El proyecto que se presenta está relacionado con estas últimas.

Para que la extracción de energía a partir de ellas sea rentable y técnicamente realizable a coste razonable es deseable que las corrientes sean unidireccionales y de cierta intensidad. A título de ejemplo, el flujo de energía de una corriente estable y permanente de 1 ms⁻¹ (cifra de referencia a la hora de pensar en rentabilidad) es de unos 500 Wm⁻², de modo que una turbina de palas tipo molino eólico, cuya eficiencia alcanza valores por encima de 0.4 para turbinas de tres palas (Burton et al., 2001), que son más eficientes que las de eje vertical tipo Darrieus (Gorban et al., 2001), puede extraer unos 60 kW de potencia en continuo, equivalente a 0.52 GWh al año. La turbina de tres palas está considerada hoy día la más rentable para generar electricidad y es el generador y sistema utilizado en las granjas eólicas. Cuando una turbina de este tipo se diseña para trabajar inmersa en el mar, por razones técnicas y de coste, es deseable que mantenga una orientación fija, lo que la sitúa en desventaja con sus homólogas eólicas que son orientadas para encarar el viento y no precisan por ello de vientos constantes en dirección. Una central eléctrica basada en la energía de las corrientes marinas tendría tanta más rentabilidad, vida media y menor coste de mantenimiento cuanto más unidireccionales fuesen las corrientes.

No es fácil encontrar en el océano lugares que reúnan estos dos requisitos, unidireccionalidad e intensidad de corriente relativamente alta. Algunos ejemplos son las grandes corrientes de contorno occidental de las cuencas oceánicas (Gulf Stream, Kuroshio, Aghullas). La distancia desde costa hasta el lugar donde ubicar la central, que debiera instalarse en el lugar cercano al núcleo de la corriente, el cual suele fluir hacia el exterior de la plataforma continental, es generalmente de decenas de km, lo que conllevaría importantes pérdidas y elevados costes de transporte para incorporar la energía generada a la red eléctrica. En nuestras costas, ciertas áreas del Estrecho de Gibraltar reúnen condiciones favorables para la instalación de centrales eléctricas de este tipo y se localizan relativamente cerca de costa. El Estrecho es un lugar donde se ha desarrollado y continúa desarrollándose una intensa actividad de investigación oceanográfica y su dinámica está bastante bien comprendida. Sin embargo, los lugares en los que la teoría de la dinámica del intercambio de aguas predice la existencia de intensas corrientes unidireccionales no están totalmente descritos y faltan detalles que son importantes a la hora de llevar adelante un proyecto de ingeniería encaminado a extraer este tipo de energía del océano. Sobre la idoneidad de estos lugares y su potencialidad como fuente rentable de energía renovable se centra este estudio.

2.- DINÁMICA DEL INTERCAMBIO A TRAVÉS DEL ESTRECHO. UNA BREVE SINOPSIS.

2.1 El intercambio medio

La evaporación media que sufre el Mediterráneo (en torno a unos 0.7 m/año, Josey et al., 1998; Josey, 2003) y los procesos de formación de agua profunda que tienen lugar en su interior conduce al establecimiento de un doble intercambio a través del Estrecho de Gibraltar en el cual aguas de origen Atlántico, relativamente dulces (salinidad ~ 36.5) y cálidas entran por superficie y las aguas modificadas en el interior del Mediterráneo (agua Mediterránea, formada en cuencas bien identificadas dentro de este mar, Hopkins, 1999) escapan como contracorriente profunda, más salina (salinidad ~ 38.5) y fría. El volumen de agua transportado por cada una de estas corrientes es del orden de 10⁶ m³s⁻¹ (Lacombe y Richez, 1982; Bryden y Kinder, 1992; García Lafuente et al, 2000, 2002a; Candela, 2001) con una corriente entrante que excede a la saliente en un 5% aproximadamente (unos 50.000 m³s⁻¹) para reponer las pérdidas evaporativas y mantener el balance hídrico. Estas cifras están determinadas por la propia evaporación y por las importantes restricciones topográficas que impone la geometría del Estrecho a los flujos intercambiados (Armi y Farmer, 1988; Bryden y Kinder, 1992; García Lafuente y Criado Aldeanueva, 2001)



Figura 2.1.- Mapa del Estrecho de Gibraltar mostrando la batimetría y las características topográficas más importantes. Se han señalado las tres secciones notables, a saber, la sección del Umbral de Espartel (1), la del de Camarinal (2) y el Estrechamiento de Tarifa (3). También se indican las dos zonas en las que existen corrientes preferentemente unidireccionales, hacia el océano Atlántico en la capa profunda (Mediterránea) en la zona 2 y hacia el mar Mediterráneo en la capa superficial en la zona 1.

2.2 Influencia de la topografía

Morfológicamente, el Estrecho tiene dos mitades bien definidas (figura 2.1), la parte oriental, angosta y bastante profunda, y la occidental más ancha y sensiblemente menos profunda. Ambas mitades quedan separadas por la sección del umbral principal de Camarinal que representa el "cuello de botella" del Estrecho (mínima sección transversal).

La parte más estrecha (sección (3) en la figura 2.1) controla el volumen de agua Atlántica entrante en sentido hidráulico, es decir, estableciendo una sección de control (Armi y Farmer, 1985, 1988; Bryden y Kinder, 1991; García-Lafuente y Criado Aldeanueva, 2001; Delgado et al, 2001). Al este de esta sección de control el flujo entrante acelera hasta alcanzar su máxima velocidad, con valores de pico por encima de 1.5 ms⁻¹ (García-Lafuente et al., 2000). El flujo saliente a través de esta sección se mueve con mucha menor velocidad debido a la gran profundidad y área transversal de salida por la que fluye. En el umbral de Camarinal se establece una segunda sección de control que, en este caso, afecta principalmente al flujo saliente, el cual acelera hacia el oeste mientras que el flujo entrante progresa lentamente hacia el este pues ahora es él quien encuentra incrementada su área transversal. La cuenca de Tánger al oeste del umbral de Camarinal actúa como un reservorio de agua Mediterránea que se deja notar haciendo que el flujo saliente disminuya su velocidad. Más al oeste el flujo acelera de nuevo al disminuir la profundidad y reducirse la sección de salida por la presencia del Banco Majuan de modo que el agua Mediterránea alcanza de nuevo velocidades críticas en el umbral de Espartel (picos cercanos a los 2 ms⁻¹, Sánchez Román et al, 2009), donde se sitúa la última puerta que el agua Mediterránea encuentra en su camino hacia el océano abierto. La figura 2.2 esquematiza el doble intercambio.



Figura 2.2.- Velocidades medias a lo largo de la sección indicada por la línea roja en el mapa insertado en la esquina inferior izquierda. Los colores azules indican velocidades hacia el Atlántico los rojos hacia el Mediterráneo y la línea gruesa blanca la interfase de velocidad cero (que no coincide con la interfase de salinidad que separa las aguas Atlánticas de las Mediterráneas, línea roja de trazos). Las líneas negras muestran esos perfiles medios de velocidad referidos a la escala que aparece en la parte superior de cada una de las tres gráficas. Al superponer las intensas corrientes de marea al flujo medio, solamente la capa inferior en las inmediaciones del umbral de Espartel (E) y la capa superior en la parte este del Estrecho (este) mantienen la dirección de la corriente que tienen en el estado "medio". En el resto de los lugares, las corrientes de marea tienen intensidad suficiente como para invertir la dirección de la corriente total instantánea. El mapa ha sido confeccionado con la salida del modelo numérico CEPOM desarrollado por el ENEA (Sannino et al., 2002, 2004), que ha sido parcialmente utilizado en este informe.

2.3 Mareas

Las corrientes de marea son intensas en el Estrecho de Gibraltar (Candela et al., 1990; García-Lafuente et al., 2000; Bruno et al, 2002, Sánchez Román et al., 2009). No tienen la

misma intensidad en todos los lugares y/o profundidades pero, aún así, la dinámica instantánea en el Estrecho está claramente determinada por ellas. Para hacerse una idea de su importancia baste mencionar que el volumen de agua transportado en una y otra dirección durante cada ciclo de marea (hacia el Atlántico mientras la marea sube, hacia el Mediterráneo, mientras la marea baja) excede los flujos asociados al intercambio "medio" en un factor de 3, llegando a ser hasta 5 veces mayores en periodos de mareas vivas (García Lafuente et al, 2000). Por esta razón, la norma general esperada es que las corrientes totales inviertan en cada lugar y profundidad durante el ciclo de marea y, salvo contadas excepciones, así ocurre. En particular, eso ocurre en el umbral de Camarinal causando pérdidas del control hidráulico con la periodicidad de la marea, lo que se traduce en la liberación de un solitón interno que se desintegra en trenes de ondas internas de gran amplitud ha medida que se desplaza hacia el interior del Mediterráneo (Armi y Farmer, 1988; Bruno et al, 2002, Sánchez Garrido et al, 2008, 2010). Tras la liberación del solitón, la corriente Mediterránea saliente invierte durante un cierto tiempo (alrededor del 30% del ciclo de marea) y se mueve hacia el mar Mediterráneo. Si embargo los controles hidráulicos del umbral de Espartel y del estrechamiento de Tarifa no llegan a desbordarse (o lo hacen muy raramente), lo que lleva a que la corriente entrante en el Mediterráneo al este del control hidráulico de Tarifa y la saliente al oeste del umbral de Espartel mantengan un alto grado de unidireccionalidad independientemente del forzamiento de marea. Esas dos zonas han sido señaladas como lugares adecuados para granjas de molinos movidos por corrientes marinas en la figura 2.1.



Figura 2.3.- Estructura de velocidades "medias" en la sección transversal al Estrecho indicada en el mapa insertado en la esquina inferior izquierda (sección de Camarinal). Los colores azules indican flujo hacia el Atlántico, los rojos hacia el Mediterráneo y la línea gruesa blanca la superficie de velocidad nula. Ese patrón representa una situación "media". En presencia de mareas la pendiente transversal puede cambiar notablemente, incluso invertir signo, quedando más levantada por la parte sur. Es consecuencia de la inversión de corrientes que ocasiona el forzamiento mareal. El mapa ha sido confeccionado con la salida del modelo numérico CEPOM desarrollado por el ENEA (Sannino et al., 2002, 2004)

2.4 Rotación terrestre

La rotación terrestre establece una pendiente transversal tanto de la superficie libre como de la interfase que separa aguas entrantes Atlánticas y salientes Mediterráneas y que responde al forzamiento externo a distintas escalas temporales (Garrett et al., 1989;

García Lafuente et al, 1990; Candela et al, 1990). Para una situación de intercambio "medio", la capa entrante es más delgada en la parte norte del Estrecho y más gruesa en la sur (figura 2.3). La velocidad tiende a ser mayor en la región donde la capa es más delgada lo que unido a la estructura que tiene el flujo a lo largo del Estrecho (figura 2.2), hace que los lugares donde se esperan altas velocidades sean la parte nororiental para el flujo entrante (zona 1 en figura 2.1). El razonamiento puede extenderse a la capa inferior en la que la rotación tiende a acelerar espacialmente el flujo en la mitad sur. Esto junto con la mencionada estructura longitudinal del flujo saliente hace que sea la parte suroccidental del Estrecho el lugar que reúne las mejores condiciones para encontrar las corrientes profundas más intensas (zona 2, figura 2.1). En ambas regiones existe una fuerte tendencia a mantener la unidireccionalidad de las corrientes incluso en presencia de la marea, tal y como se ha esbozado en el epígrafe anterior.

2.5 Otras causas de variabilidad temporal

Añadida a la fuerte variabilidad temporal asociada a la marea, existen otros mecanismos que ocasionan fluctuaciones de cierta importancia vinculados a agentes meteorológicos: viento y presión atmosférica (Candela et al., 1989; García Lafuente et al., 2002b, 2002c). La segunda es la mayor fuente de variabilidad debido al efecto barométrico que produce sobre el nivel del mar a escala de cuenca Mediterránea, forzándolo hacia abajo cuando la presión está por encima de la media (y obligando a evacuar agua a través del Estrecho para permitir ese descenso de nivel) y al contrario cuando la presión disminuye por debajo de esa media. Los vientos locales, que pueden llegar a ser intensos en esta zona, tienden a covariar positivamente con el forzamiento de presión: una alta presión sobre la cuenca occidental Mediterránea es acompañada usualmente por vientos de Levante en el Estrecho y ambos agentes tienden a desplazar agua hacia el Atlántico por efecto barométrico y por tensión superficial, respectivamente (García Lafuente et al., 2002c). Lo contrario ocurre cuando se instala una baja presión en la cuenca occidental Mediterránea. Estos forzamientos, en circunstancias extremas, tienen una influencia notable en el campo de velocidades y por tanto en el de flujos de energía asociados.

A escala estacional también hay una leve fluctuación de los flujos intercambiados (Bormans et al., 1986; Garrett et al., 1989; Candela, 2001;, García Lafuente et al., 2002a, 2004, 2007) que sigue el ciclo anual de calentamiento-enfriamiento de las aguas y que conlleva cambios ligeros en las corrientes. La amplitud de esta fluctuación es poco importante (menor del 10% del intercambio neto).

2.6 Oscilaciones de la interfase

En la interfase que separa los flujos de entrada y salida la velocidad es pequeña (nula por definición, si se habla del intercambio medio), es decir, la posición que ocupa debe ser evitada en cualquier iniciativa encaminada a extraer energía del campo de corrientes. La marea produce importantes desplazamientos verticales de esta interfase (Armi y Famer, 1988; Bryden et al., 1994; Bray et al., 1995; García Lafuente et al., 2000) reduciendo y/o aumentando los espesores de las capas Atlántica y Mediterránea según el momento del ciclo de marea. En la mitad oriental del Estrecho solamente los 60 u 80 metros superiores de la columna de agua están relativamente fuera del alcance de las oscilaciones de la interfase. En la mitad más occidental es la parte más profunda de la capa Mediterránea la que está relativamente de la influencia de las oscilaciones de la interfase.

3.- OBJETIVOS

La finalidad de este trabajo es la de dibujar flujos de energía asociados a corrientes marinas en la zona del Estrecho de Gibraltar. Como se ha expuesto con anterioridad existen dos zonas del Estrecho que reúnen condiciones muy favorables para el aprovechamiento energético de corrientes, en la parte occidental la zona del umbral de Espartel (zona 2, ver figura 2.1), y en la oriental la zona cercana a la sección de mínima anchura (Zona 1, figura 2.1). A pesar del potencial de la zona de Espartel, resulta en práctica poco viable la extracción de energía en este lugar debido a su elevada profundidad. Las corrientes más intensas se sitúan cerca del fondo, de unos 360 m de profundidad. Además de ello esta zona queda relativamente lejos de la costa española, lo que añade dificultad a la labor de extracción de energía en este punto. Estas dificultades no se encuentran sin embargo en la zona del estrechamiento, donde se pueden encontrar intensas corrientes entrantes al Mediterráneo en la capa superficial muy cerca de costa (a apenas 1 milla). Por esta razón nuestro estudio se centra en la parte oriental del Estrecho, y más concretamente por motivos político-diplomáticos cerca del litoral español, entre la localidad de Tarifa y Punta Carnero (ver figura 2.1).

4.- METODOLOGÍA

El estudio se va a realizar considerando dos enfoques, mediante un modelo numérico y unos datos experimentales provenientes de la instalación de tres fondeos y sólo se van a usar para demostrar que los datos numéricos proporcionan valores razonables, es decir, que son fiables.

<u>4.1.- Modelo y observaciones</u>

El modelo hidrodinámico utilizado para la elaboración de mapas de energía es el modelo de circulación general MITgcm, desarrollado en el Massachusetts Institute Technology (Marshall et al. 1997). El modelo posee una altísima resolución entre las secciones de Espartel y Punta Europa. La resolución espacial en la dirección a lo largo del eje del Estrecho es de dx=50 m, en la dirección transversal dy=200 m, mientras que en profundidad dz=7.5 m en los primeros 300m de la columna de agua, incrementándose gradualmente hasta 105 m hacia el fondo. Igualmente los datos de batimetría son de gran resolución, provenientes de la digitalización de la carta náutica publicada por Sanz et al. 2001.

El modelo reproduce satisfactoriamente el intercambio medio y la dinámica de mareas en el Estrecho (ver Sánchez-Garrido 2009), y proporciona salidas de los campos de velocidad, salinidad y temperatura cada 20 minutos durante una simulación que cubre un período de un mes tropical. De este modo se reproduce el ciclo quincenal mareas vivas-mareas muertas.

Las características de los tres fondeos vienen descritas en la siguiente tabla:

Lugar	Aparato	Localización	Fondo	Frecuencia muestreo (minutos)	Duración registro
Tarifa Fondeo1 Tarifa Fondeo 2	ADCP	35°59.59' N 05°35.73' W 36°00.76' N 05°31.53' W	100 m 100 m	2	26/05/09
					(10:18:00)
					01/07/09
					(09:12:00)
	CT ADCP				26/05/09
					(10:22:00)
					19/06/09
					(13:56:00)
					(12:20:00)
					(13.30.00)
					(07:40:00)
	СТ			5	01/07/09
					(13:30:00)
					09/10/09
					(07:45:00)
Tarifa Fondeo 3	ADCP	36º01.64' N 05º28.00' W	100 m	2.5	09/10/09
					(14:17:30)
					`07/01/10 [´]
					(10:17:30)
	СТ			2	09/10/09
					(14:16:00)
					11/12/09
					(14:02:00)

4.2.- Observaciones

En esta ocasión, fundamentalmente, se ha hecho un estudio comparativo entre el modelo y las medidas de los fondeos con la finalidad de ver cómo se adapta el primero a los resultados de los valores medidos, sin llegar a profundizar en el comportamiento de las corrientes. Queda pendiente esta parte para un futuro trabajo, pues consideramos que si lo incluyéramos en este primer informe resultaría muy extenso y complicaría su comprensión.

5.- RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO

5.1.- Descripción del cálculo.

La expresión para los flujos de energía que hemos utilizado para esta primera parte del estudio es la siguiente:

$$E = \frac{1}{2} \rho \left(u^2 + v^2 \right)^{\frac{3}{2}}$$
(1)

Las velocidades, según el modelo CEPOM desarrollado por el ENEA (Sannino et. al 2002, 2004) consisten en matrices tridimensionales cuyos elementos se corresponden con un valor de velocidad para cada punto de los pertenecientes a la malla, por tanto, la media del flujo de energía se obtuvo a partir de la expresión (1) calculada para cada instante de tiempo, sumando todas estas contribuciones y dividiendo el resultado final por el número total de datos. Matemáticamente, lo anterior se escribe de la siguiente manera

$$\overline{E} = \frac{\overline{1}}{2} \rho \left(u^2 + v^2 \right)^{\frac{3}{2}}$$
(2)

donde " ρ " indica densidad, "u" la componente de velocidad a lo largo del Estrecho, y "v" la transversal al Estrecho. (Comentar también que "v" suele ser despreciable frente a "u").

A partir de la expresión anterior no se obtiene información sobre el sentido de los flujos de energía y es interesante estudiar el comportamiento del flujo según si éste va en sentido positivo o si va en sentido negativo. Para obtener promedios de flujos de energía unidireccionales (o en un solo sentido) se ha hecho considerando el signo de "u" en la fórmula (2), separando flujos de energía positivos y negativos. Se ha considerado "u" porque esta componente es totalmente dominante frente a "v".

$$\overline{E_p} = \overline{\frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2)^{\frac{3}{2}}} \qquad \text{cuando "u" positiva} \quad (3)$$
$$\overline{E_n} = \overline{\frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2)^{\frac{3}{2}}} \qquad \text{cuando "u" negativa} \quad (4)$$

siendo E_p y E_n el flujo de energía positivo y negativo, respectivamente.

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, es muy importante que el flujo, además de tener cierta intensidad, mantenga la misma dirección. Para averiguar esto, se ha considerado, en primer lugar, el sentido de avance del flujo de energía, de la forma que acabamos de señalar; con este criterio, se crea un vector complejo en cada uno de los puntos de la malla con las componentes *u* y *v* para cada instante de tiempo y se calcula la media del ángulo que forman

$$u_{pos/neg} = \begin{cases} u > 0 \\ u < 0 \end{cases} \qquad v_{pos/neg} = \begin{cases} u > 0 \\ u < 0 \end{cases}$$

$$Velocidad_{pos/neg} = u_{pos/neg} + iv_{pos/neg} \qquad (5)$$

$$\overline{\varphi_{pos/neg}} = \overline{arctg} \frac{\operatorname{Im}(Velocidad_{pos/neg})}{\operatorname{Re}(Velocidad_{pos/neg})} \qquad (6)$$

Las dos matrices así obtenidas, una para cada sentido, nos da la media del ángulo que forma la dirección de la velocidad con la componente tangencial del grid. Esto nos indica,

a su vez, la media de la dirección del flujo en todos los puntos de la malla. De esta forma se ha podido calcular un porcentaje de las ocasiones en que el flujo mantiene su dirección media $\pm 20^{\circ}$ mediante la comparación del ángulo en cada punto de la malla, en cada instante de tiempo con el ángulo medio en dicho punto.

Por otro lado, se ha calculado el promedio, en valor absoluto, del perfil de la componente *u* de la velocidad con respecto a la profundidad, es decir,

$$\frac{\overline{\partial u}}{\partial z} = \left| \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \right| \tag{7}$$

5.2.- Resultados

Se ha trabajado fundamentalmente con una sección longitudinal a la que denominamos con S1 próxima a la costa española, tres secciones transversales S2, S3 y S4, más o menos equiespaciadas, haciendo, a partir de éstas, una ampliación en la parte de la costa española y mapas horizontales para un espesor de profundidad determinado. Para una mejor visualización de la zona de trabajo, podemos observar la figura 5.1 que viene a continuación.



Figura 5.1.- Mapa del Estrecho de Gibraltar con la batimetría; al norte la costa española y al sur una parte del continente africano. Se ha representado la sección longitudinal, S1, en rojo, y las tres transversales S2, S3 y S4, en azul.

5.2.1.- Secciones transversales.

Primeramente vamos a estudiar las secciones transversales S2, S3 y S4, por ese orden, recordemos que son las representadas en azul en la figura 5.1. Calculamos la media de los flujos de energía de corrientes haciendo un zoom en la zona que se encuentra en el ángulo superior derecha, es decir, la costa española.







Como ya se mencionó anteriormente, es importante que los flujos sean unidireccionales, por tanto, vamos a calcular promedios de flujos de energía en un solo sentido. Recordemos que esta distinción la hacíamos a partir del signo de la componente "u" en la fórmula (2), separando flujos de energía positivos y negativos (ecuaciones (3) y (4)). Una vez separado el flujo de acuerdo al sentido de las corrientes, calculamos la media para cada uno de ellos y en las figuras siguientes se pueden ver los resultados.



este, es decir desde el Atlántico al Mediterráneo.

oeste, es decir desde el Mediterráneo al Atlántico.





regiones en las que no se invierte el sentido del flujo.



También podemos ver el comportamiento de estas corrientes de energía para cada sección transversal cuando nos encontramos con mareas vivas y mareas muertas.

derecha la costa española. Se puede comprobar como el máximo del flujo de energía en la parte de mareas vivas es muy superior al de mareas muertas.

derecha la costa española. Se puede comprobar como el máximo del flujo de energía en la parte de mareas vivas es muy superior al de mareas muertas.





5.2.2 Secciones longitudinales

A continuación, vamos a trabajar con la sección longitudinal y se va a proceder de modo semejante a sus análogas transversales.

La sección longitudinal, la describíamos como S1 y está situada cerca de la costa española.



Se ha querido mostrar, para las secciones longitudinales, el comportamiento de los flujos en sentido positivo y negativo con el mismo criterio que en las transversales, por tanto, se



ha aprovechado el cálculo realizado entonces con el que se obtuvo $\overline{E_p}$ y $\overline{E_n}$ para pintar las figuras 5.12.1 y 5.12.2.

En esta sección hemos incluido dos secciones longitudinales siguiendo el fondo de 100 y 200 m aproximadamente pues, como se ha mencionado al principio de este informe, son profundidades en las que pueden operar diferentes tipos de molinos hidráulicos. Estas isóbatas son las que se encuentran al norte del Estrecho de Gibraltar, cerca de la costa española.



enfrente de Tarifa, que es la más estrecha.	enfrente de Tarifa, que es la más estrecha.

5.2.3 Secciones horizontales

Describimos las secciones horizontales como aquellas secciones que comprende el Estrecho de Gibraltar visto desde arriba considerando un espesor dado. Dicho espesor lo hemos tomado entre las profundidades de 26.250 y 71.250 m; la elección del límite inferior, numéricamente, ha sido conforme a considerar una profundidad suficiente para permitir el paso del tráfico marítimo, en cuanto al límite superior, se trata de evitar interfases con velocidades próximas a cero y porque a mayores profundidades, las corrientes marinas son más débiles.

También en este caso, calculamos la media del flujo de energía del espesor que hemos considerado, para una situación normal y para mareas vivas y mareas muertas, haciendo un zoom de cada figura para abarcar mejor la zona de los tres fondeos.



Siguiendo con el procedimiento de las secciones transversales y longitudinales, de nuevo volvemos a representar $\overline{E_p}$ y $\overline{E_n}$ ya calculadas, promediando verticalmente entre los límites de 26.250 y 71.250 m. De esta forma, representamos la media de los flujos de energía positivos y negativos para las secciones horizontales entre el espesor considerado.



en una sección horizontal comprendido entre las profundidades de 26.250 y 71.250 m. Al norte la costa española y al sur la costa marroquí. Se han señalado con unos asteriscos en color rojo los tres puntos donde se encuentran situados los tres fondeos. Con signo positivo se hace referencia a que el flujo va dirigido de oeste a este, es decir, desde el Atlántico al Mediterráneo. En la figura 5.16.1, situada a la derecha de ésta, se realiza un zoom en la zona donde se encuentran los tres fondeos.

Figura 5.16.1.- Media vertical del flujo de energía en sentido positivo en una sección horizontal de espesor comprendido entre las profundidades de 26.250 y 71.250 m. Al norte la costa española y al sur la costa marroquí. Con signo positivo se hace referencia a que el flujo va dirigido de oeste a este, es decir, desde el Atlántico al Mediterráneo. Ampliación de la figura 5.16 a la zona de los tres fondeos marcados en rojo.



Figura 5.17.- Media vertical del flujo de energía en sentido negativo Figura 5.17.1.- Media vertical del flujo de energía en en una sección horizontal comprendido entre las profundidades de sentido negativo en una sección horizontal de espesor comprendido entre las profundidades de 26.250 y 26.250 y 71.250 m. Al norte la costa española y al sur la costa marroquí. Se han señalado con unos asteriscos de color rojo los tres 71.250 m. Al norte la costa española y al sur la costa puntos donde se encuentran situados los tres fondeos. Con sentido marroquí. Con signo negativo se hace referencia a que negativo se hace referencia a que el flujo va dirigido de este a oeste, el flujo va dirigido de este a oeste, es decir, desde el es decir, desde el Mediterráneo al Atlántico. En la figura 5.17.1, Atlántico al Mediterráneo. Ampliación de la figura 5.17 a situada a la derecha de ésta, se realiza un zoom de la zona donde se la zona de los tres fondeos marcados en rojo. encuentran los tres fondeos.



la cual es debido a la rotación de la Tierra, como ya se ha dicho en un apartado anterior. En la figura 5.18.1, situada a la derecha de ésta se realiza un zoom en la zona donde se encuentran los tres fondeos.



ha dicho en un apartado anterior. En la figura 5.19.1, situada a la	
derecha de ésta hacemos un zoom en la zona donde se encuentran	
los tres fondeos.	

6.- INDICADORES

Con la simple representación de los flujos de energía en las diferentes secciones se pueden hacer algunas valoraciones a priori, pero también se han desarrollado determinados aspectos para su profundización. De esta forma, observando la media de los flujos de energía en las secciones transversales, se ha estudiado el porcentaje de las ocasiones en que los flujos de energía están por encima de cierto valor umbral. Dado que el flujo positivo es más interesante en las proximidades del litoral español, región en la que nos estamos centrando, se ha calculado el porcentaje de las ocasiones en que el flujo es positivo. Por último, siguiendo un procedimiento análogo a los casos anteriores, se ha calculado el porcentaje de las ocasiones en que la dirección de la velocidad y, por tanto, del flujo de energía, mantiene la dirección media con una variación de $\pm 20^{\circ}$. Por otro lado, se ha representado el perfil vertical de la velocidad, es decir, cómo varía la velocidad o, lo que es lo mismo, el flujo de energía, con la profundidad.

6.1 Porcentaje del flujo de energía umbral.

Con las tres figuras de las secciones transversales que mostramos a continuación, queremos conocer el porcentaje de las ocasiones en que cada punto de la sección el flujo de energía se encuentra siempre por encima de los 400 w/m². Se ha tomado este valor umbral por ser una cantidad representativa a partir de la cual es interesante la instalación de algún aparato que aproveche estas corrientes.







6.2 Porcentaje temporalidad del sentido del flujo de energía.

Las figuras que aparecen a continuación muestran el porcentaje de las ocasiones en que el flujo se mantiene positivo y viceversa. El procedimiento se ha conseguido contabilizando el número de veces en el tiempo que la componente u de la velocidad se mantiene con signo positivo o negativo. Se ha realizado para las secciones transversales y para la sección horizontal de espesor comprendido entre los 26.250 a 71.250 m.



energía se mantiene en sentido positivo para la sección transversal S2, la más occidental de las tres transversales; en la parte izquierda se encuentra la costa marroquí y en la derecha la costa española. Con signo positivo se hace referencia a que el flujo va dirigido de oeste a este, es decir, desde el Atlántico al Mediterráneo. Figura 6.4.2.- Porcentaje de las ocasiones en que el flujo de energía se mantiene en sentido negativo para la sección transversal S2, la más occidental de las tres transversales; en la parte izquierda se encuentra la costa marroquí y en la derecha la costa española. Con signo negativo se hace referencia a que el flujo va dirigido de este a oeste, es decir, desde el Mediterráneo al Atlántico.









6.3 Porcentaje de la dirección media de los flujos de energía.

Finalmente, para tener más claro cómo de uniforme es la dirección de las corrientes marinas, en las figuras que aparecen a continuación se puede observar, para cada sentido, el porcentaje de las ocasiones en que la velocidad o el flujo de energía mantiene su dirección media $\pm 20^{\circ}$.



o el flujo de energía positivo en cada punto mantiene su dirección media $\pm 20^{\circ}$ en la sección transversal S2, la más occidental de las tres transversales; a la izquierda se encuentra la costa marroquí y a la derecha la costa española. Con sentido positivo se hace referencia a que el flujo va dirigido de oeste a este, es decir, desde el Atlántico al Mediterráneo.

Figura 6.8.2.- Porcentaje de las ocasiones en que la velocidad o el flujo de energía negativo en cada punto mantiene su dirección media $\pm 20^{\circ}$ en la sección transversal S2, la más occidental de las tres transversales; a la izquierda se encuentra la costa marroquí y a la derecha la costa española. Con sentido negativo se hace referencia a que el flujo va dirigido de este a oeste, es decir, desde el Mediterráneo al Atlántico.



costa española. Con sentido positivo se hace referencia a que	costa española. Con sentido positivo se hace referencia a que
el flujo va dirigido de oeste a este, es decir, desde el Atlántico	el flujo va dirigido de este a oeste, es decir, desde el
al Mediterráneo.	Mediterráneo al Atlántico.



Con sentido positivo se hace referencia a que el flujo va dirigido de oeste a este, es decir, desde el Atlántico al Mediterráneo.

Con sentido negativo se hace referencia a que el flujo va dirigido de este a oeste, es decir, desde el Mediterráneo al Atlántico.



velocidad o el flujo de energía positivo en cada punto mantiene su dirección media ± 20º en la sección horizontal de profundidad comprendida entre los 26.250 a 71.250 m. Al norte la costa española y al sur la marroquí. Se han señalado con unos asteriscos de color rojo los tres puntos donde se encuentran situados los tres fondeos. Con sentido positivo se velocidad o el flujo de energía positivo en cada punto mantiene su dirección media ± 20º en la sección horizontal de profundidad comprendida entre los 26.250 a 71.250 m. Al norte la costa española y al sur la marroquí. Se han señalado con unos asteriscos de color rojo los tres puntos donde se encuentran situados los tres fondeos. Con sentido negativo se

hace referencia a que el flujo va dirigido de oeste a este, es	hace referencia a que el flujo va dirigido de este a oeste, es	
decir, desde el Atlántico al Mediterráneo.	decir, desde el Mediterráneo al Atlántico.	

Para tener una mejor visualización de la dirección de la velocidad en el Estrecho, hemos incluido la siguiente figura con la sección horizontal de espesor comprendido entre las profundidades de 26.250 a 71.250 m; en ella aparecen la media del flujo de energía en sentido positivo integrado verticalmente y, con flechas negras, la dirección de la velocidad en sentido positivo, también promediada verticalmente. Dado que la malla del modelo es muy tupida y una flecha en cada punto que indique la velocidad haría la figura muy enrevesada e incomprensible, sólo se ha dibujado un número reducido de ellas, pero el suficiente para tener una idea de la dirección de los flujos de energía. Mencionar que los datos de las componentes de velocidad que nos proporciona el modelo se dan referenciadas al grid y, para la elaboración de esta figura, la media vertical de la velocidad a unos ejes que podrían ser el de *longitud* para la componente *u* y de *latitud* para la componente *v*.



6.4 Perfil de velocidad.











7.- COMPROBACIÓN DEL MODELO CON LAS OBSERVACIONES

Como ya se adelantó anteriormente, en este informe sólo nos interesa comparar el modelo con las medidas in situ, dejando para un futuro un análisis interpretativo de los resultados. Las medidas experimentales se han obtenido mediante unos fondeos realizados por nosotros en unas campañas FLEGER. Estos últimos los identificamos enumerándolos del 1 al 3, siendo el 1 el que se encuentra más al oeste, el 2 el que le sigue según nos adentramos hacia el Mediterráneo y el 3 el situado en la parte más oriental, como se puede ver en las figuras de las secciones horizontales. El procedimiento seguido para el cálculo del flujo de energía en cada instante de tiempo ha sido el mismo para ambos casos, teniendo en cuenta los intervalos de tiempo correspondientes: para el modelo recordamos que eran 20 minutos y para los fondeos 1, 2 y 3 son de 2, 3 y 2.5 minutos, respectivamente. En la adaptación de estos métodos, en el modelo se han tomado los datos concretando con las coordenadas de cada uno de los fondeos y en éstos se ha trabajado durante el periodo de un mes pues, como ya se ha dicho, el modelo



proporciona un mes trópical. En primer lugar se muestran las figuras y se comentan a continuación.





8.- CONCLUSIONES

La primera conclusión y la más importante de todas es que el modelo proporciona unos resultados satisfactorios como para poder continuar el estudio de las corrientes marinas por este camino. La comparativa entre éste y los fondeos demuestra que el modelo proporciona unos datos sobreestimados, llegando a ser hasta tres veces mayores que los experimentales. También observamos, y coincide para ambos enfoques, que se obtienen mejores resultados en la zona donde se encuentra el fondeo 1, el situado en el extremo más occidental y menos profundo de la zona que abarca nuestro estudio. Sería interesante ampliar la zona de estudio a una más cercana a la punta de Camarinal. También sería importante realizar algún fondeo cerca de esta zona para su comparación. Dado que estamos trabajando en las cercanías de la costa española, a la vista de los resultados, parece más apropiado considerar los flujos cuando estos avanzan en sentido positivo. Para hacer una valoración del comportamiento de los flujos de la zona de interés de nuestro estudio, encontramos que se dan, al menos de forma suficiente, condiciones de direccionalidad y de potencia de los flujos de energía.