

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 $10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (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 $50.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) 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.

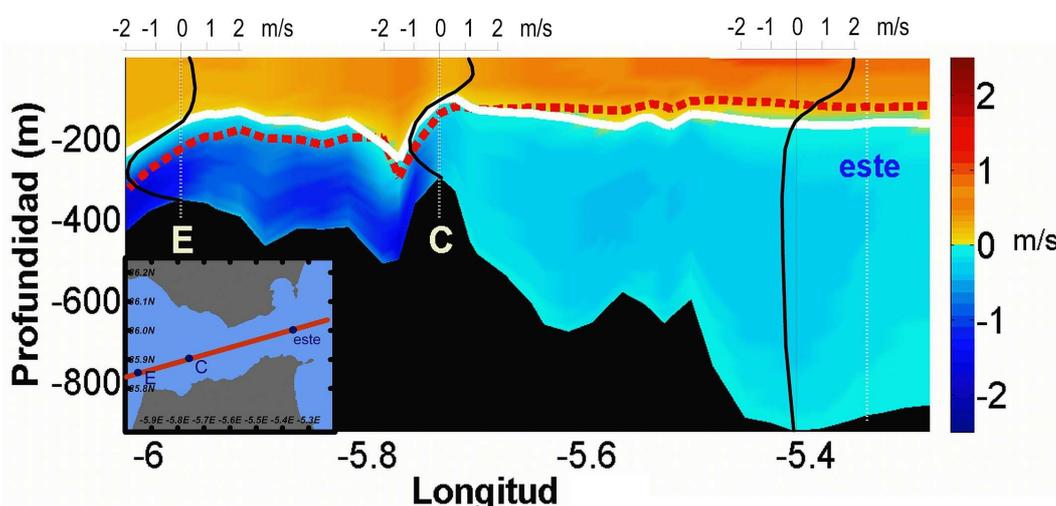


Figura 2.2- Velocidades medias a lo largo de la sección indicada por la línea roja en el mapa insertado en la esquina inferior izquierda. Los colores azules indican velocidades hacia el Atlántico los rojos hacia el Mediterráneo y la línea gruesa blanca la interfase de velocidad cero (que no coincide 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.

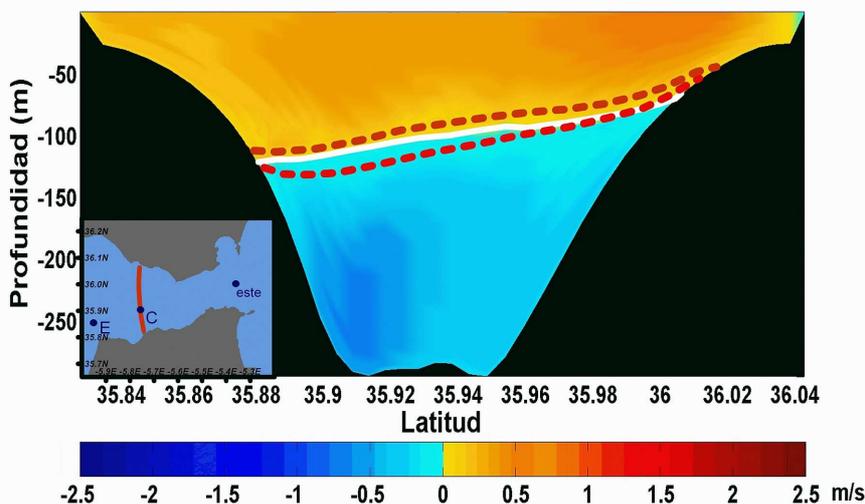


Figura 2.3. Estructura de velocidades “medias” en la sección transversal al Estrecho indicada en el mapa insertado en la esquina inferior izquierda (sección de Camarinal). Los colores azules indican flujo hacia el Atlántico, los rojos hacia el Mediterráneo y la línea gruesa blanca la superficie de velocidad 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.

