



Agencia Andaluza de la Energía
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, INNOVACIÓN Y CIENCIA

ENERGÍAS MARINAS

Recursos Energéticos de Andalucía (Fase II)

Departamento de Energías Renovables

Agencia Andaluza de la Energía



Índice

1. Introducción

- i. Fase I
- ii. Fase II

2. Recurso Energético

- i. Datos de partida
- ii. Corrientes en el Estrecho
- iii. Oleaje en el Estrecho
- iv. Oleaje en la Costa de Almería
- v. Oleaje en la Costa Atlántica

3. Energía de las Corrientes

- i. Condicionantes técnicos
- ii. Condicionantes no técnicos
- iii. Zonas de mayor interés
- iv. Tecnologías maduras
- v. Tecnologías emergentes

4. Energía de las Olas

- i. Condicionantes técnicos
- ii. Condicionantes no técnicos
- iii. Zonas de mayor interés
- iv. Tecnologías de aprovechamiento

5. Viabilidad

- i. Caso I. Corrientes del Estrecho
- ii. Caso II. Oleaje y Eólica Marina combinadas

6. Potencial de desarrollo económico-industrial

7. Referencias

8. Conclusiones

9. Bibliografía



Introducción

Andalucía es la comunidad autónoma española que posee la mayor longitud costera y la única con costa mediterránea y atlántica. Además, cuenta con la presencia del Estrecho de Gibraltar, con condiciones únicas en el mundo.

Para caracterizar este recurso se estudió, en una primera fase, las posibilidades de aprovechamiento que ofrecen los mares y océanos para obtener energía eléctrica de forma limpia en la Comunidad Autónoma Andaluza. Para posteriormente, en la Fase II, centrar el análisis en las zonas más interesantes para cada tecnología.



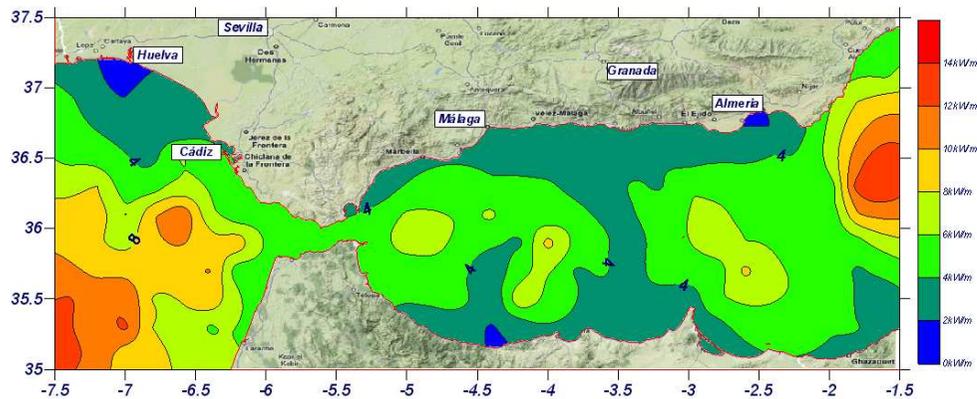
Introducción. Fase I: Potencial de las Energías Marinas

El resultado de la evaluación del potencial de Energías Marinas realizado en la Fase I queda recogido de forma resumida en la siguiente tabla y gráficas:

Tipo de Potencial	Potencial Bruto (MW)
Gradiente Térmico	350
Gradiente Salino	~1.000
Mareas	50
Olas	2.000
Corrientes Marinas	7.000
TOTAL	10.400

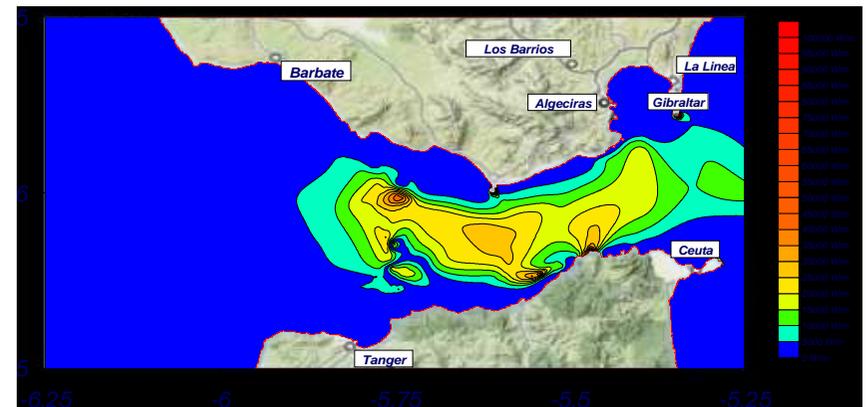


Introducción. Fase I: Potencial de las Energías Marinas



Mapa de densidad energética del oleaje

[Pinchar aquí para ver mapa en pantalla completa](#)



Mapa de densidad energética de las corrientes

[Pinchar aquí para ver mapa en pantalla completa](#)

Introducción. Fase II: Alcance

La primera fase determinó las zonas y tecnologías con un mayor potencial energético aprovechable en el litoral andaluz. Estas fueron:

- Energía de las corrientes en la zona del Estrecho de Gibraltar.
- Energía de la olas en la costa oriental de Almería, el Estrecho de Gibraltar y la costa atlántica (Golfo de Huelva y Cádiz).

Tras la primera fase se planteó como alcance de la Fase II:

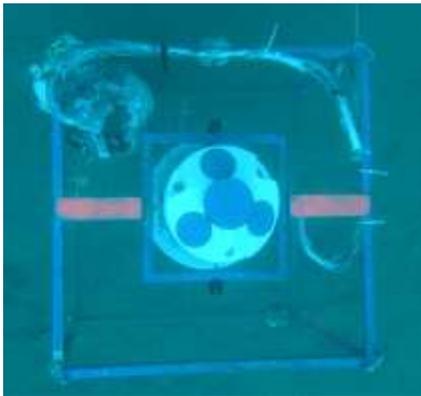
- estudiar, con mayor detalle, recurso energético asociado a las corrientes marinas y al oleaje en las zonas de mayor interés
- evaluar las tecnologías de explotación más adecuadas
- analizar el posible beneficio socio-económico que puede llevar asociado el desarrollo de estas tecnologías en Andalucía.



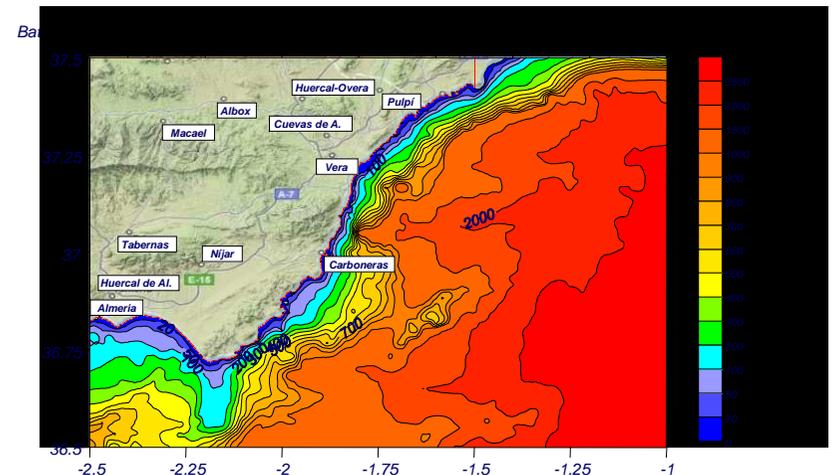
Recurso energético: Datos de partida para la simulación

La elaboración de los mapas se pudo realizarse partiendo de:

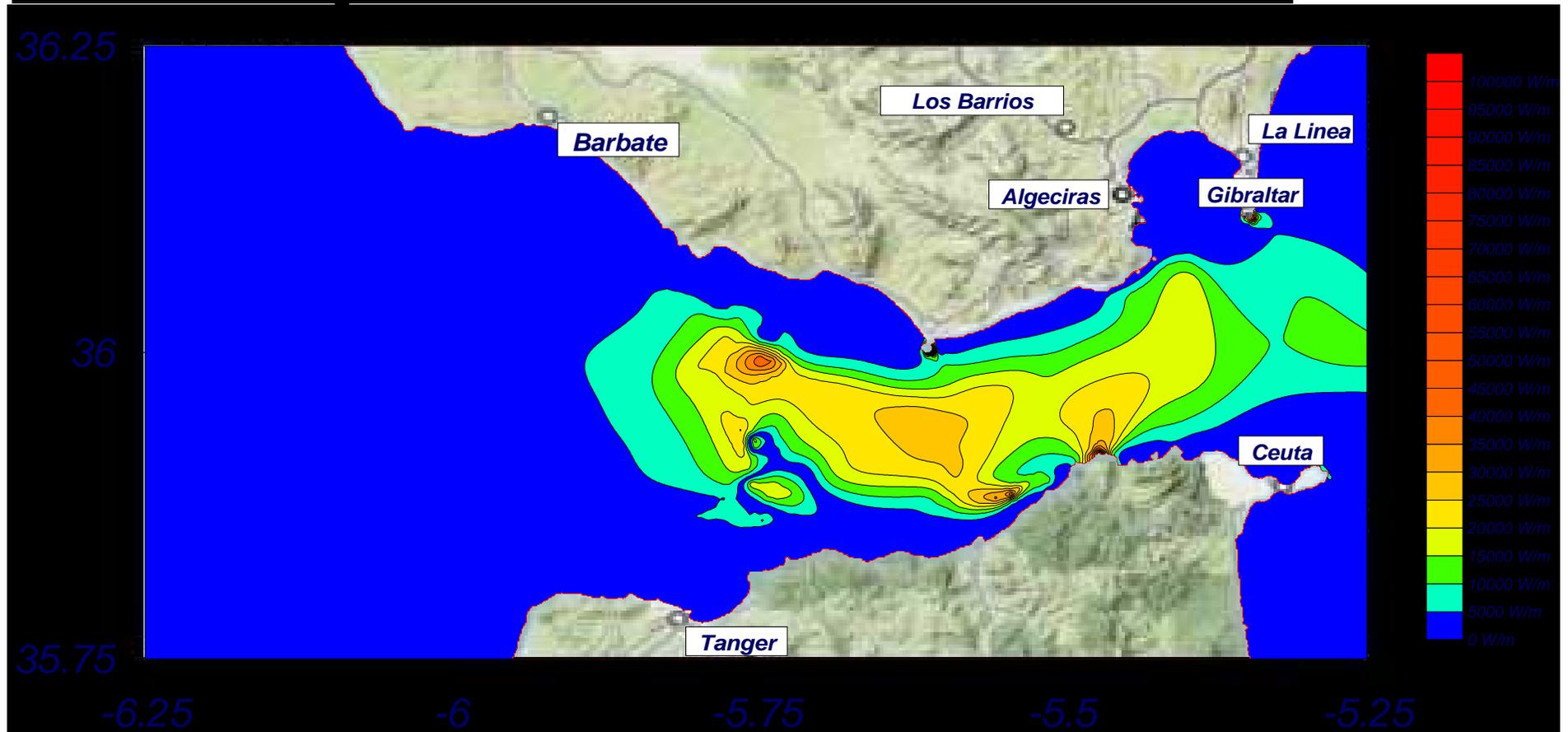
- Batimetrías y datos cartográficos
- Instituto Hidrográfico de la Marina: Resolución <1 milla marina
- Universidad de Cádiz (G.O.F.)
- Datos del oleaje provenientes de Puertos del Estado
- Datos oleaje aportadas del proyecto WAVEPORT



ADCP instalado en la Costa oriental de Almería



Recurso energético: Corrientes Marinas en el Estrecho



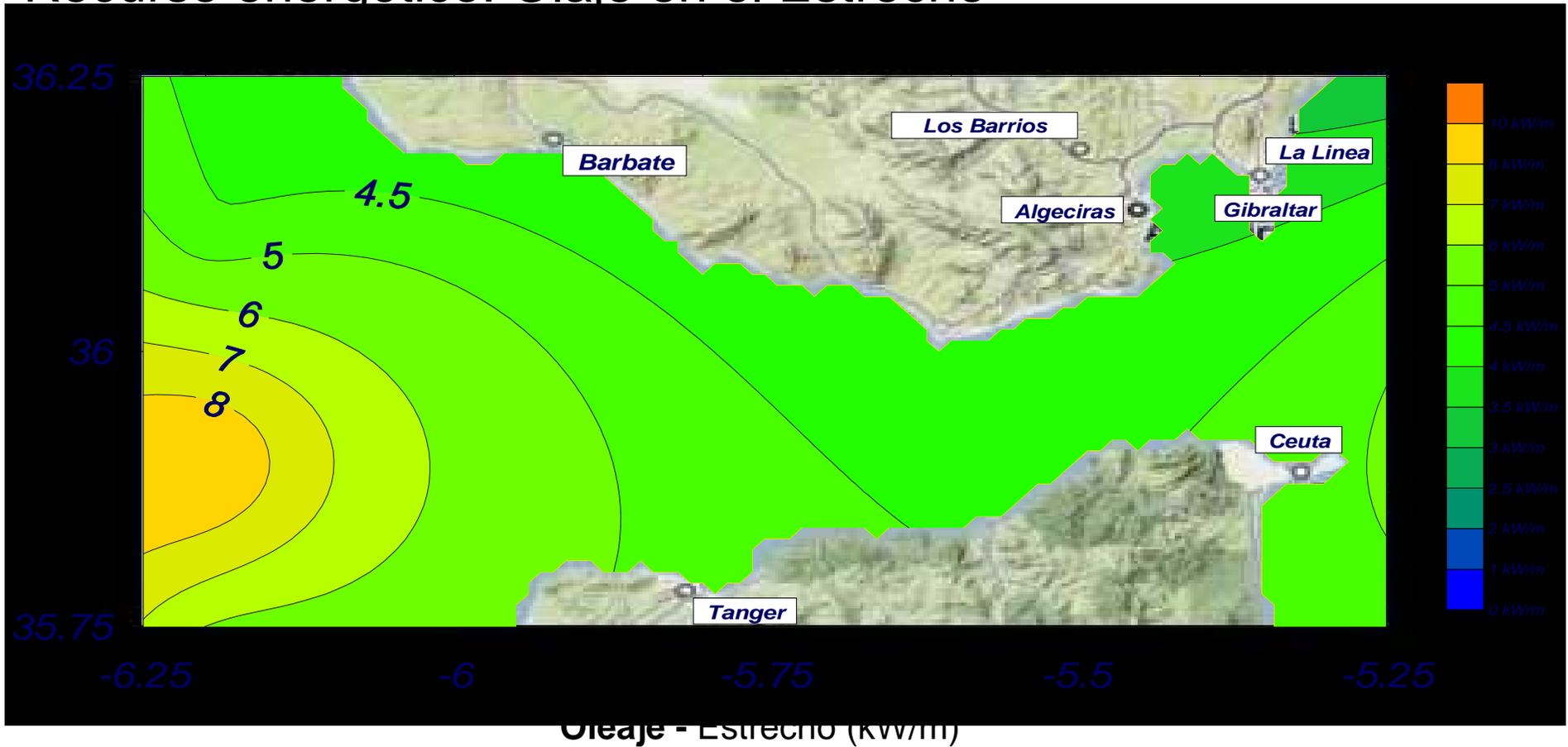
Corrientes - Estrecho (kW/m)

[Pinchar aquí para ver mapa en pantalla completa](#)

[índice](#)



Recurso energético: Olaje en el Estrecho

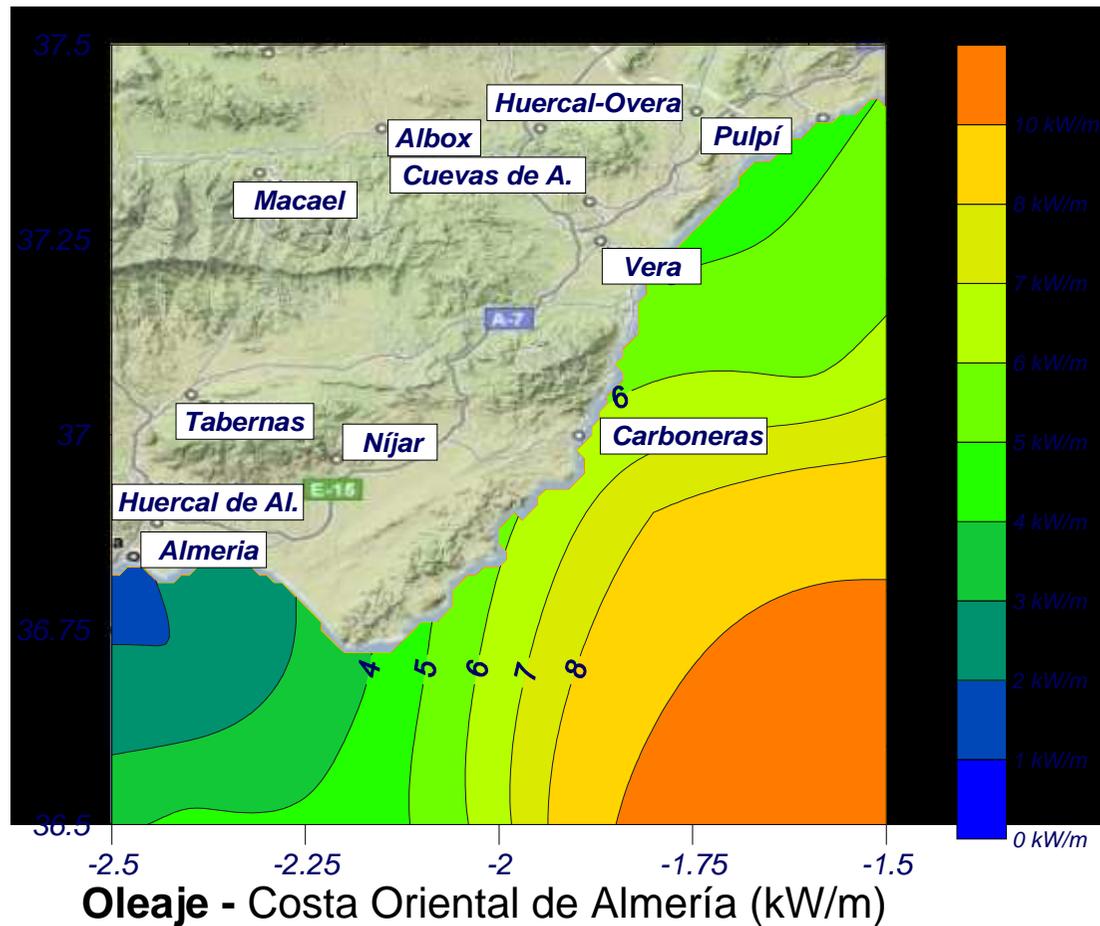


[Pinchar aquí para ver mapa en pantalla completa](#)

[índice](#)



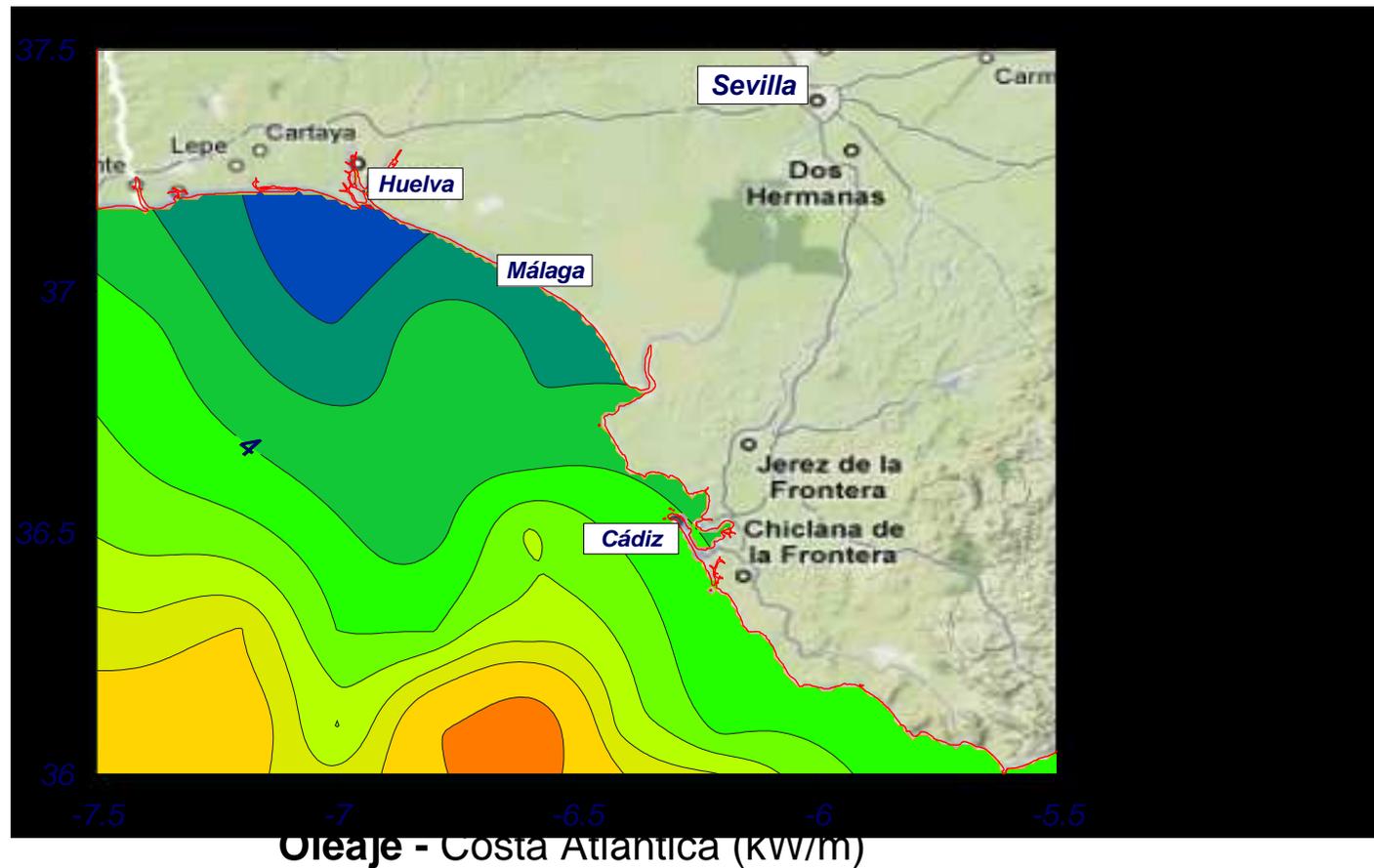
Recurso energético: Oleaje en la Costa Oriental de Almería



[Pinchar aquí para ver mapa en pantalla completa](#)



Recurso energético: Olaje en la Costa Atlántica de Andalucía



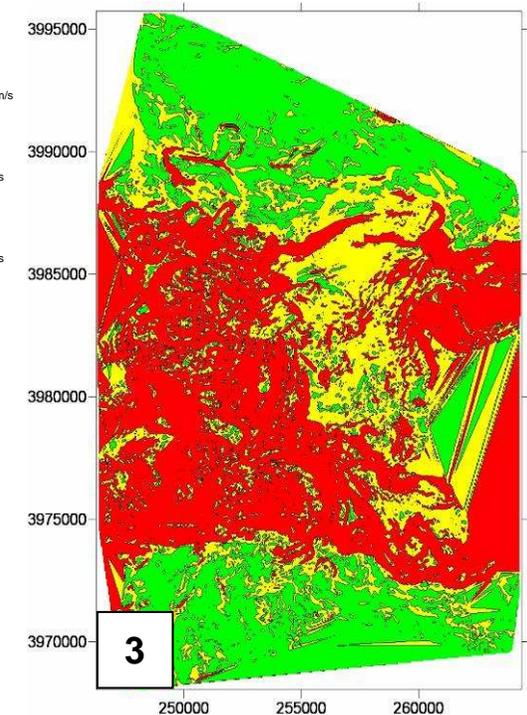
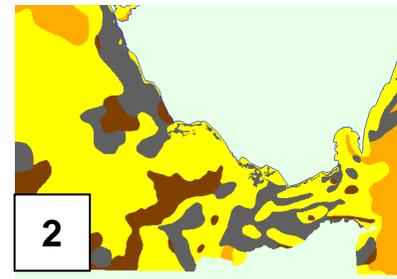
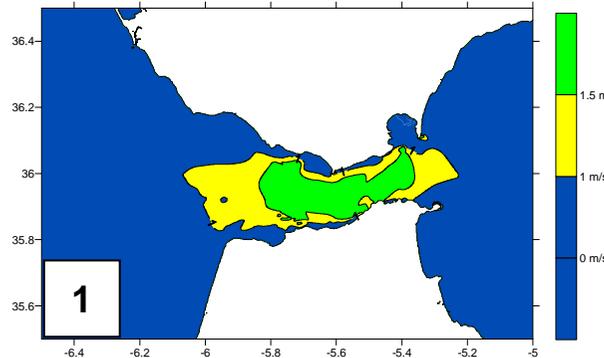
[Pinchar aquí para ver mapa en pantalla completa](#)

Energía de las Corrientes: Condicionantes Técnicos

El aprovechamiento factible del recurso energético de las corrientes depende de las condiciones locales de cada explotación:

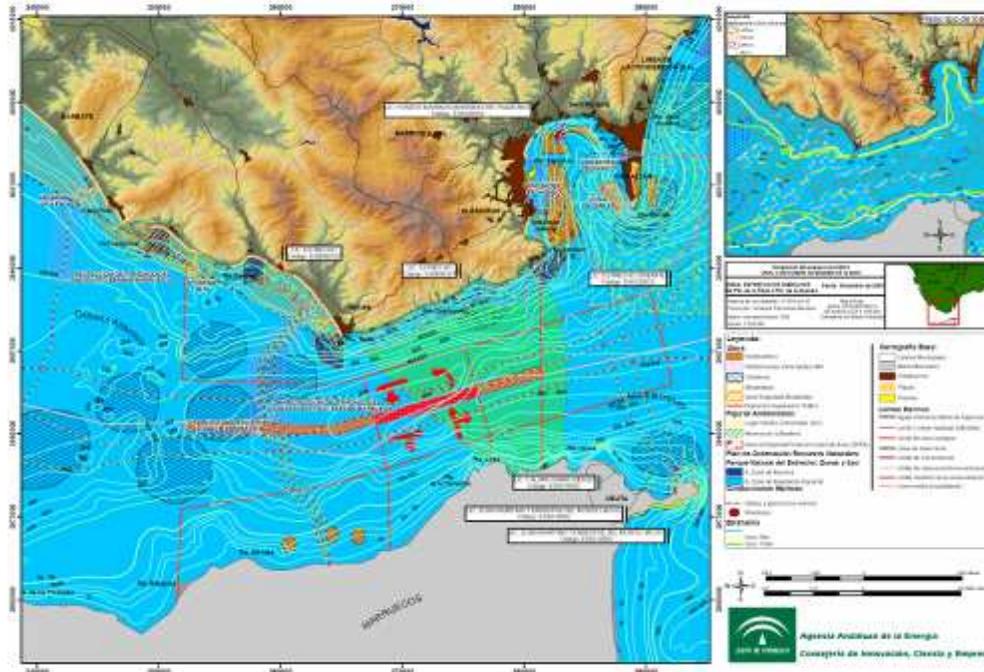
- Velocidad máxima¹.
- Rango de profundidades.
- Rango de mareas.
- Tipos de fondo².
- Pendiente del fondo³.

Serán los valores concretos de estos parámetros los que determinen la viabilidad técnico-económica de una posible instalación para cada emplazamiento.



Energía de las Corrientes: Condicionantes no técnicos

Los condicionantes no técnico son los asociados a requisitos Medioambientales y Socioeconómicos. Estos obligan a localizar y verificar mecanismos de compatibilidad entre los condicionantes socioeconómicos y medioambientales y la explotación de este recurso.

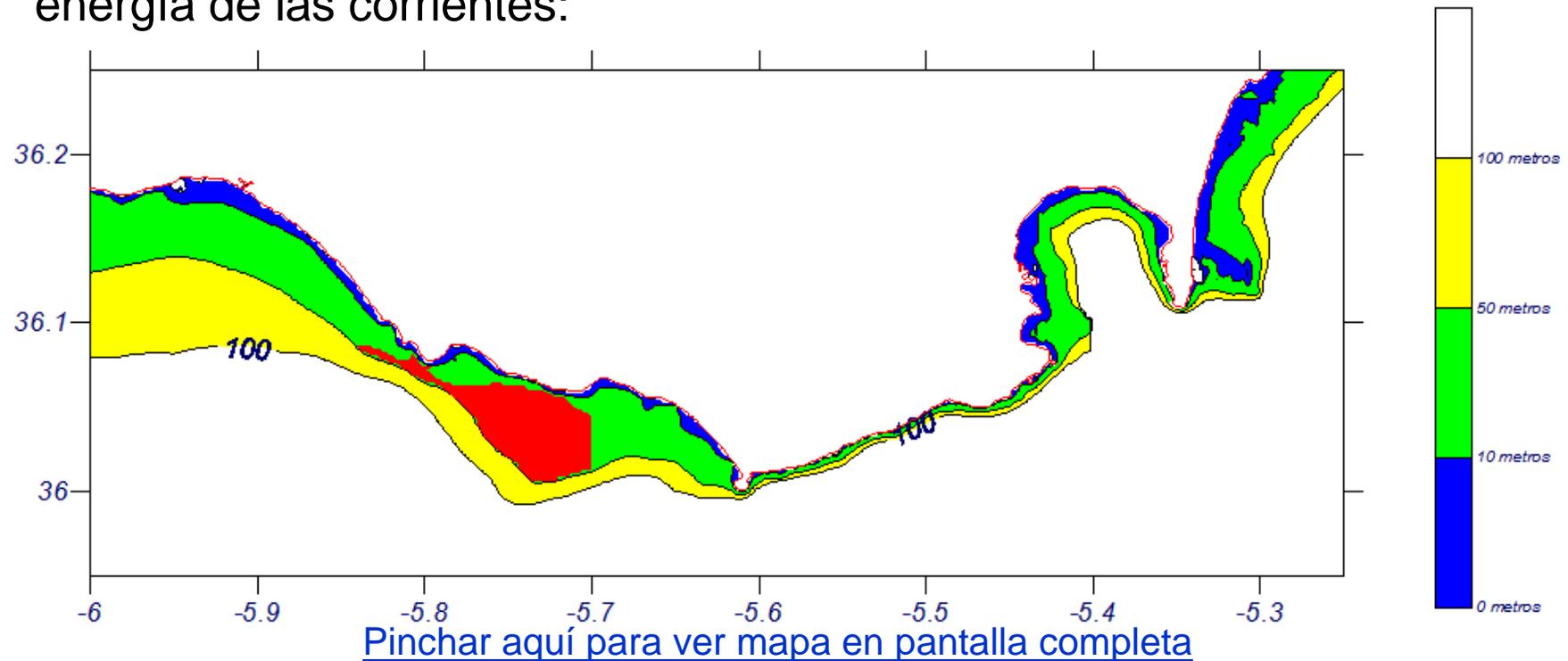


[Pinchar aquí para ver mapa en pantalla completa](#)



Energía de las Corrientes: Zonas de mayor interés

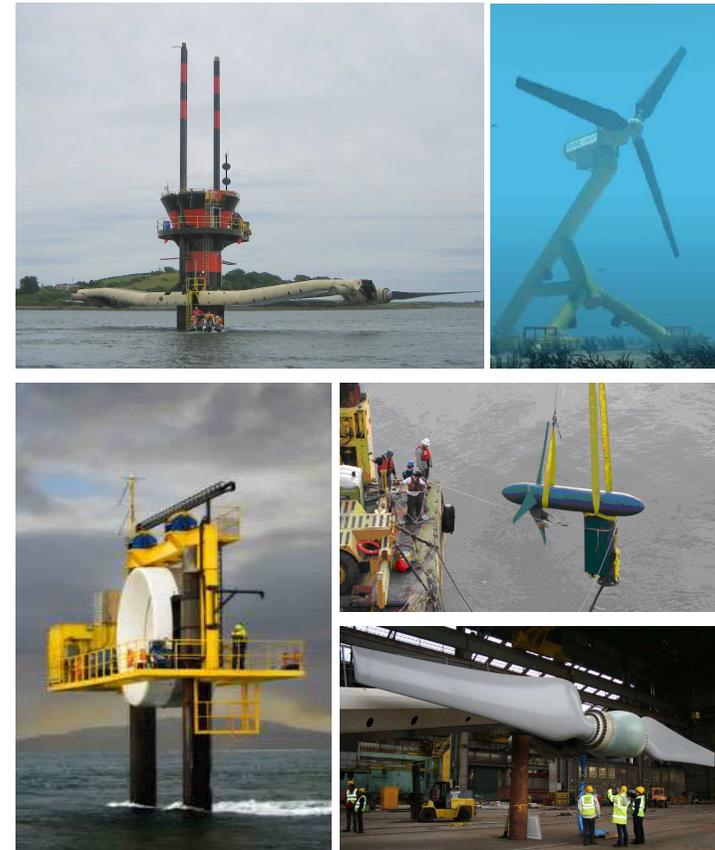
Tras analizar todos los condicionantes a los que esta sujeto la implantación de esta tecnología en las costas de Andalucía, se ha delimitado (en rojo) la zona del Estrecho de Gibraltar de mayor interés para la instalación de las actuales tecnologías de aprovechamiento de la energía de las corrientes:



Energía de las Corrientes: Tecnologías maduras

La mayoría de las tecnologías actuales usan turbinas submarinas similares, superficialmente, a las turbinas eólicas. La mayoría son de eje horizontal con un diámetro de rotor de 10 a 20 m; aunque existen turbinas de eje vertical experimentales con largo período de servicio como la turbina de Kobold, instalación piloto en el estrecho de Mesina desde 2001.

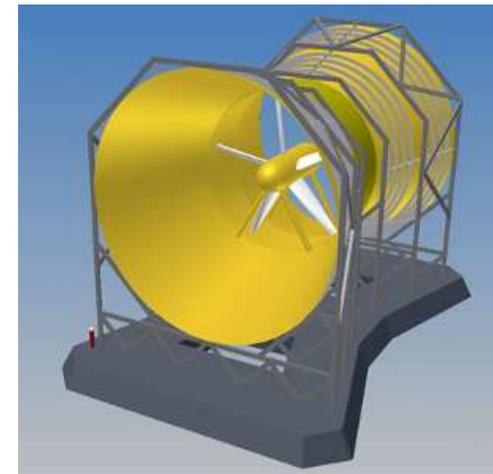
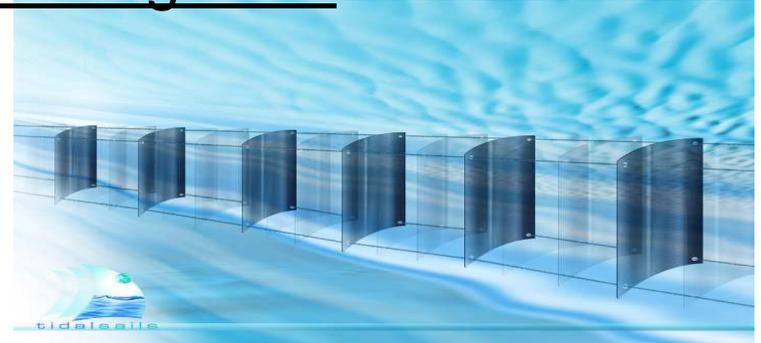
Algunos diseños utilizan dispositivos mecánicos para dirigir o concentrar el flujo en las turbinas y aumentar la velocidad del agua.



Turbinas de corrientes marinas en fase de Demostración: **MCT** (Inglaterra), **Verdant** (EE.UU.), **Hammerfest** (Noruega/Escocia) y **OpenHydro** (Irlanda).

Energía de las Corrientes: Tecnologías emergentes

Entre los sistemas aprovechamiento de las corrientes emergentes y con potencial de utilización, en los condiciones del Estrecho (velocidad moderada pero flujo muy alto) encontramos sistemas como: Turbinas encapsuladas (Clean Current, Canada; Lunar RTT (Escocia y otros), Tidal Sails (Noruega), Minesto (Suecia) y otros – con potencial de comercialización en 2 - 4 años. Además de, otros que incluyen nuevos conceptos y cuya comercialización se prevé en 5 - 10 años como es el caso de la Turbina “Columbus”.

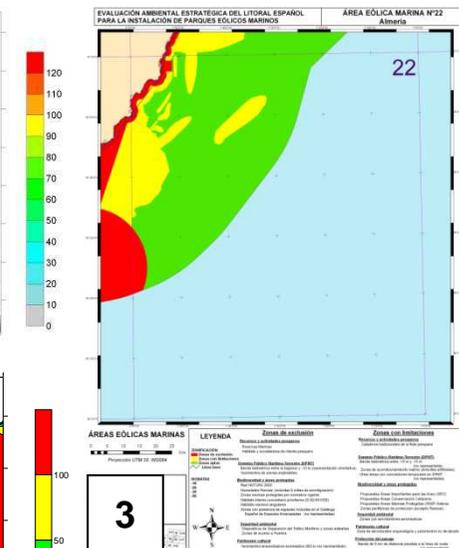
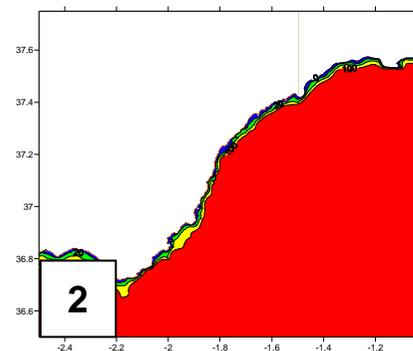
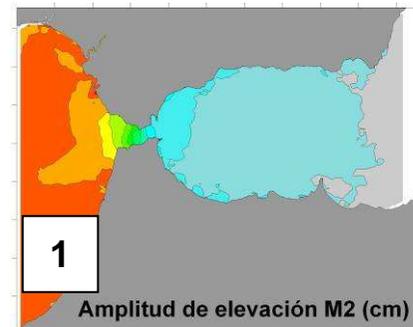


Energía de las Olas: Condicionantes Técnicos

El aprovechamiento factible del recurso energético de las corrientes depende de las condiciones locales de cada explotación:

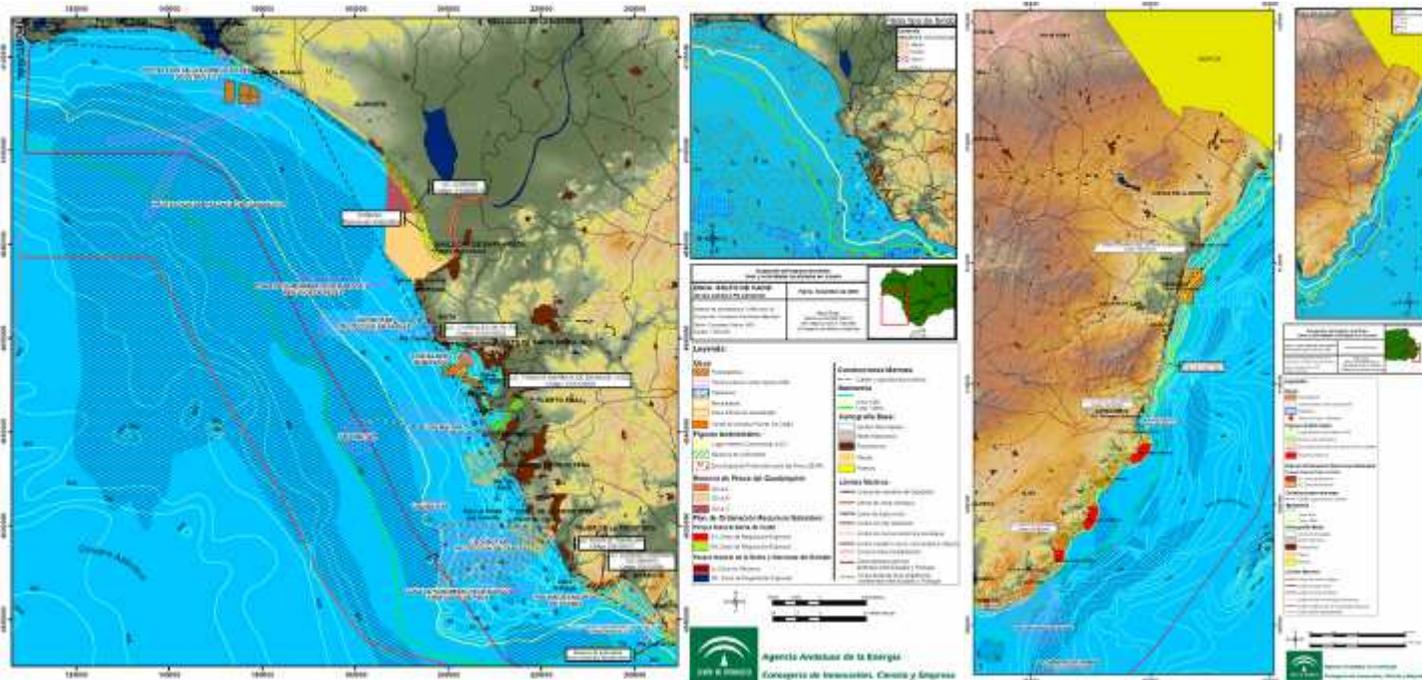
- Rango de profundidades¹.
- Rango de mareas².
- Pendiente del fondo.
- Tipos de fondo.
- Sinergia con la Eólica Marina³.

Serán los valores concretos de estos parámetros los que determinen la viabilidad técnico-económica de una posible instalación para cada emplazamiento.



Energía de las Olas: Condicionantes no técnicos

Los condicionantes no técnico son los asociados a requisitos Medioambientales y Socioeconómicos. Estos obligan a localizar y verificar mecanismos de compatibilidad entre los condicionantes socioeconómicos y medioambientales y la explotación de este recurso.

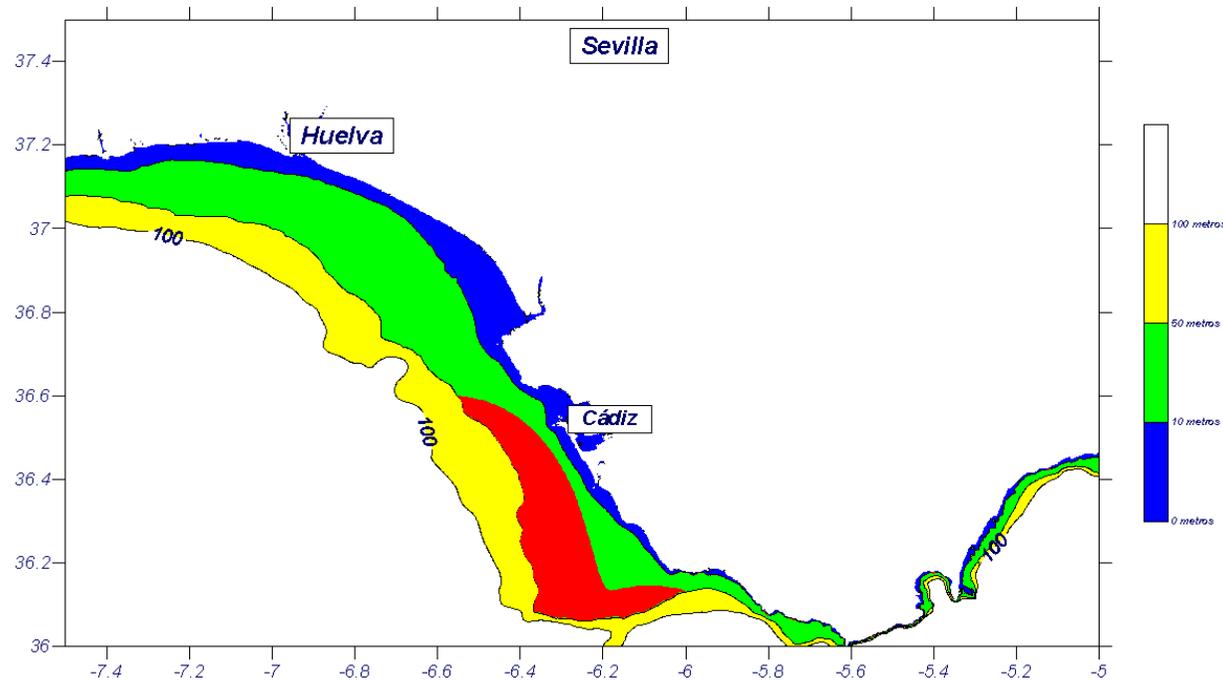


[Pinchar aquí para ver mapa en pantalla completa](#)



Energía de las Olas: Zonas de mayor interés

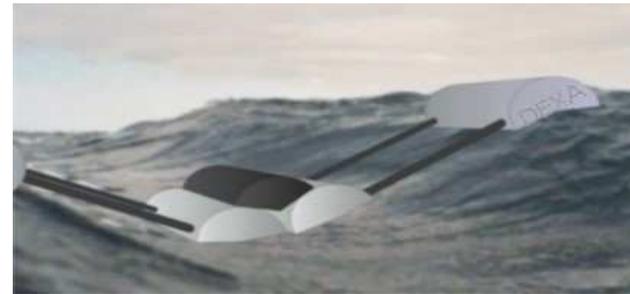
Tras analizar todos los condicionantes a los que esta sujeto la implantación de esta tecnología en las costas de Andalucía, se ha delimitado (rojo) la zona de mayor interés para la instalación de las actuales tecnologías de aprovechamiento de la energía de las olas:



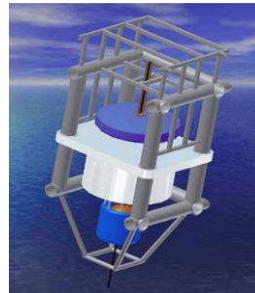
[Pinchar aquí para ver mapa en pantalla completa](#)

Energía de las Olas: Tecnologías de aprovechamiento (I)

Sistemas tipo Atenuador: consistente en una estructura flotante articulada alineada con la dirección de las olas.



Sistemas tipo Absorbedor puntual (Point absorber): consistente en elementos flotantes móviles en vertical respecto a una estructura.



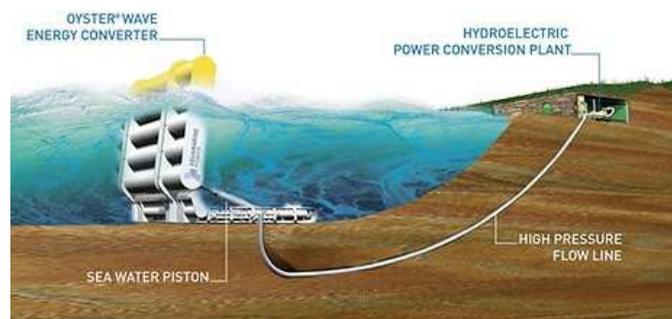
Energía de las Olas: Tecnologías de aprovechamiento (II)

Sistema sumergido de presión diferencial

Aprovecha la diferencia de presión sobre estructura sumergida presurizada.



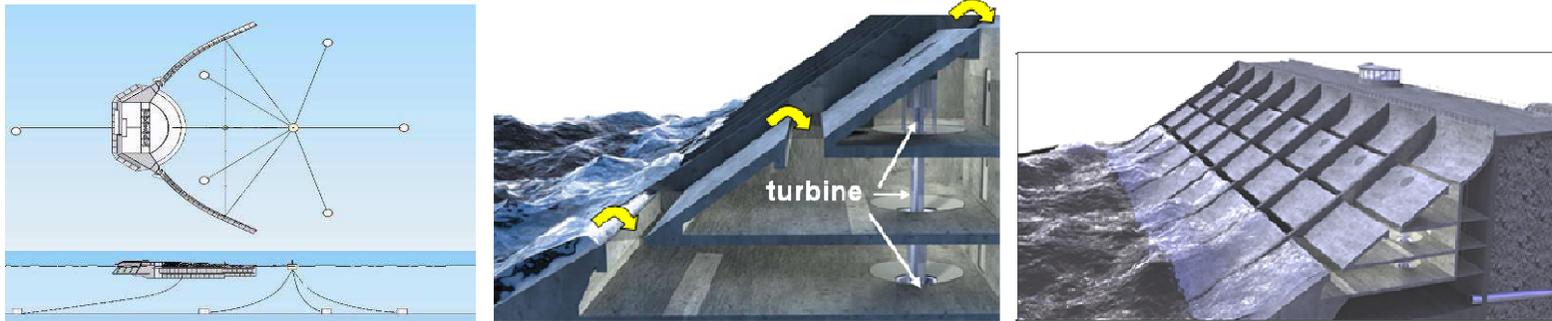
Sistema oscilatorio: consistente en un mecanismo sumergido que usa el movimiento horizontal de las olas.



Energía de las Olas: Tecnologías de aprovechamiento (III)

Sistema de rebosamiento (Overtopping):

Usa energía potencial del agua al rebosar sobre una estructura.



Sistema Columna Oscilante (Oscillating Water Column,OWC): Las olas, comprimen o hacen vacío el aire sobre el agua, que pasa por turbina.



Viabilidad. Parámetros técnicos y económicos

La viabilidad técnico-económica de estas instalaciones se determina mediante la valoración de criterios similares a los considerados para cualquier otra explotación energética como son:

- Inversión
- Costes de operación y mantenimiento
- Madurez de la tecnología y simplicidad del diseño
- Potencia de la instalación
- Impacto Ambiental asociado

Aunque, también se deben valorar criterios intrínsecos a la tecnología:

- Capacidad de supervivencia en condiciones extremas.
- Combinabilidad con otras tecnologías de generación eléctrica: como la eólica off-shore.



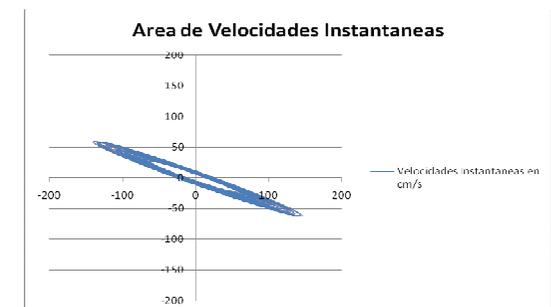
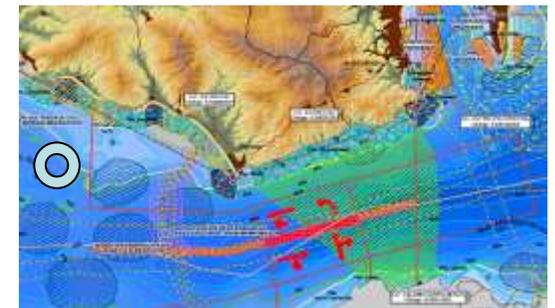
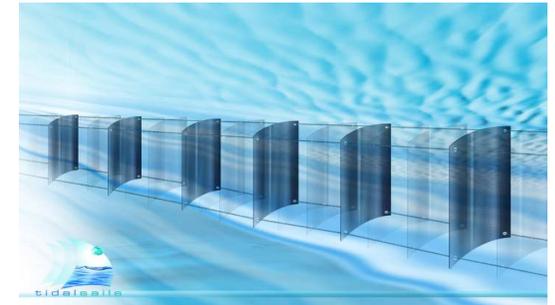
Viabilidad. Caso I: Corrientes en Estrecho (I)

De las tecnologías aplicables se ha seleccionado, para este estudio teórico, el sistema de velas sumergidas. Con ventajas como:

- Funcionamiento a bajas velocidades.
- Carencia de piezas que se muevan a alta velocidad.

La instalación se localizaría en la zona del Estrecho; fuera de Parques Naturales, almadrabas o rutas de tráfico marítimo; siempre que contara con:

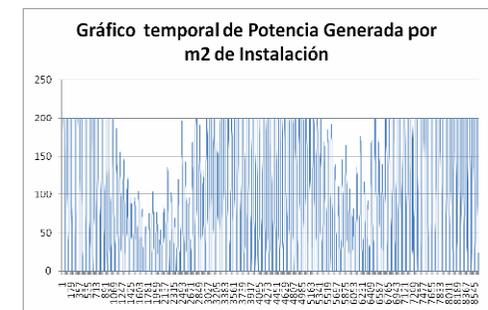
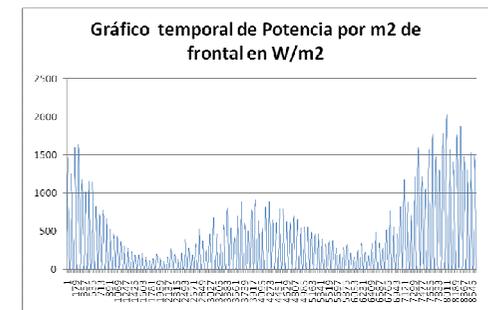
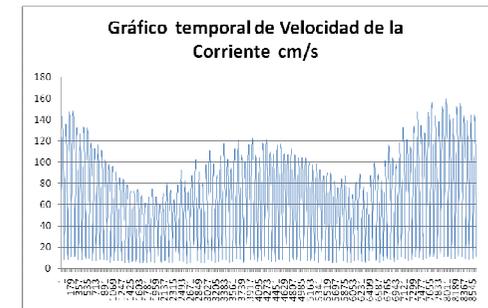
- Fondo rocoso y relativamente plano.
- Buena velocidad de corriente máxima y media.
- Buena direccionalidad.



Viabilidad. Caso I: Corrientes en Estrecho (II)

Mediante los modelos generados se realizó el análisis temporal de corrientes, el cálculo de potencia instalable, el dimensionamiento de la instalación objeto de estudio y el cálculo de la energía extraíble de forma económica. El resultado fue una instalación de 5 MWp (2,34 MW de potencia media), cuya viabilidad económica depende directamente de la tarifa de venta de electricidad:

- 13,4 c€/kWh, mercado + prima especial, sin apoyos a la inversión \Rightarrow TIR = 10,7%
- 10 c€/kWh (mercado + prima) con subvención del 40% de la inversión. \Rightarrow TIR = 9,9%



Viabilidad. Caso II: Oleaje y Eólica Marina Combinadas (I)

En base a criterios técnico-económicos se ha seleccionado una tecnología basada en el principio de rebosamiento y flotante como la que presenta mayor sinergia con la Eólica Marina para la realización de una instalación conjunta.

WEC technology	Applicability Criteria		Cost Criteria		Reliability Criteria		Performance Criteria		TOTAL
	SURVIVABILITY	COMBINABILITY	INVESTMENT	O&M COST	SIMPLICITY OF DESIGN	MATURITY OF COMPONENTS	POWER GENERATION CAPACITY	ENVIRONMENTAL IMPACT	
Shoreline OWC	ok	0							NA
Floating OWC	ok	1	1	1	0	1	0	1	5
Single Buoyant Point Absorbers	ok	2	1	1	1	1	0	1	7
Multiple Point Absorbers	ok	2	1	2	2	1	1	1	10
Submerged Differential Pressure	ok	1	0	1	0	0	1	0	3
Shoreline Overtopping devices	ok	0							
Floating Overtopping devices	ok	2	1	2	2	2	1	2	12
Floating Attenuators	ok	1	0	0	1	1	0	1	5
Surge Devices, bottom mounted	ok	1	1	1	1	1	0	1	6
Surge Devices, not bottom mounted	ok	1	1	2	1	1	1	1	8

Matriz de selección



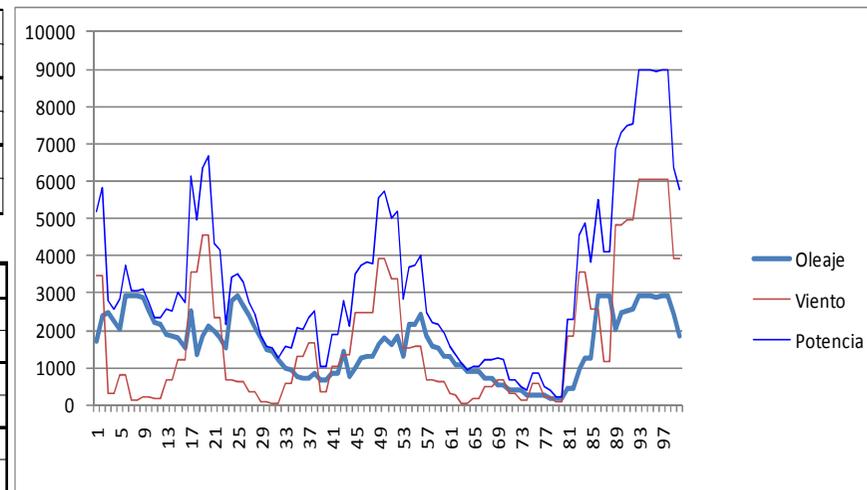
Viabilidad. Caso II: Oleaje y Eólica Marina Combinadas (II)

La instalación se localizaría en la zona del Trafalgar, zona de varios proyectos de eólica marina.

Mediante los modelos generados se realizó el análisis de los datos de oleaje y viento, el cálculo de potencia instalable, el dimensionamiento de la instalación objeto de estudio, el cálculo de la energía extraíble de forma económica y de la capacidad de combinar ambas energías.

Parametros Oleaje	Oleaje	Viento	Parametros eólica
Energía Media Gross (kW/m)	5.8	0.21	Energía Media Gross (kW/m2)
Factor Potencia Oleaje	3.0	3.67	Factor Potencia Eolica
Max kW/m	17.42	0.77	Max kW/m2
Eficiencia Equipos	45%	50%	Eficiencia Equipos
Energía Media Net (kW/m)	1.91	0.09	Energía Media Net (kW/m2)
Eficiencia Captura	33%	44%	Eficiencia Captura

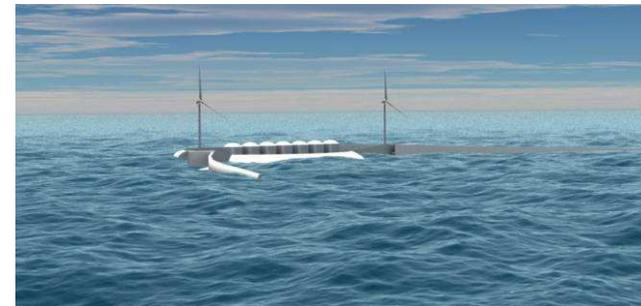
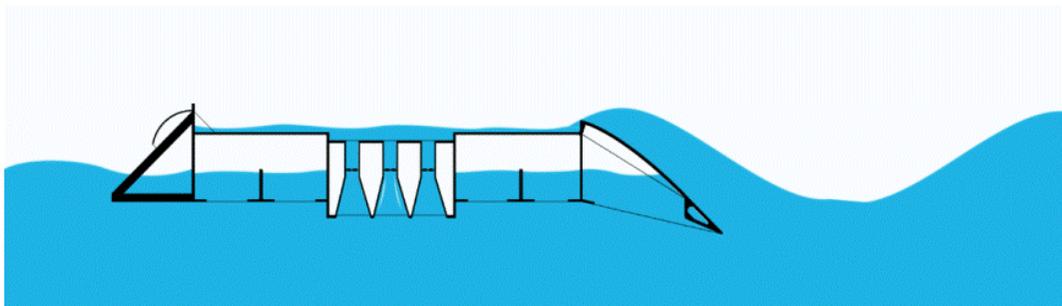
Dimensionado	WaveDragon	Turbinas eólicas	Dimensionado
Anchura en Diametros Turbina	3.75	2.00	Unid de aerogeneradores
Anchura Frontal WD (m)	375	100	metros de Diametro
Potencia Instalada (kW)	2939	6032	Potencia Instalada (kW)
Energía Producida kWh	6274268	12533794	Energía Producida kWh
Factor Utilización	24.4%	23.7%	Factor Utilización
Horas equiv.	2135	2078	Horas equiv.



Viabilidad. Caso II: Oleaje y Eólica Marina Combinadas (III)

La viabilidad económica del proyecto depende directamente de la tarifa de venta de electricidad:

- 28 c€/kWh, mercado + prima especial, sin apoyos a la inversión  TIR = 8,8%
(similar a apoyo actual a FV o CSP)
- 18,5 c€/kWh (mercado + prima) con  TIR = 9,92%
50% de apoyo a la inversión



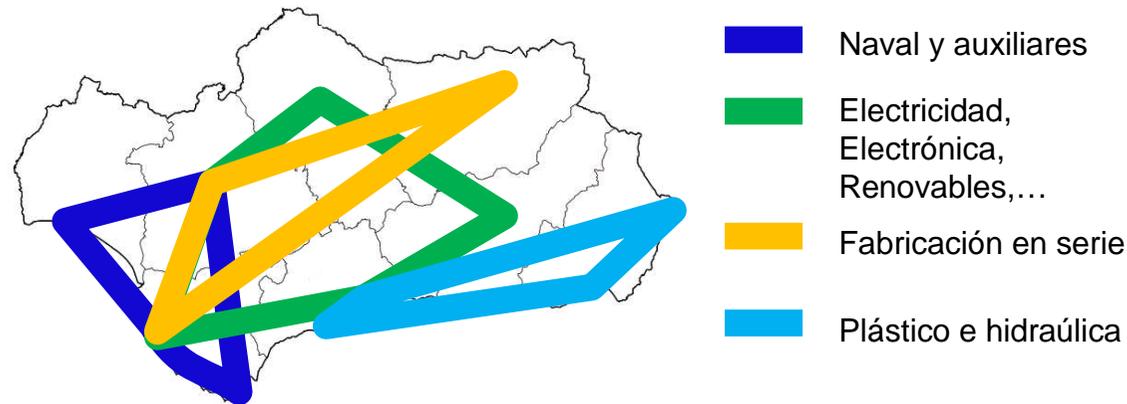
Potencial de desarrollo económico-industrial (I)

Existe un importante número de industrias que pueden diversificarse para formar parte de la cadena de suministro para el uso de las energías marinas :

- Industria Naval de Huelva, Cádiz, Algeciras y Puerto de Sevilla: realizando funciones de fabricación y ensamblaje de conjuntos, implicando también a la industria de elementos off-shore.
- Sub-sector eléctrico de Córdoba, Sevilla, Málaga, Bahía de Cádiz: suministrando transformadores, cables, armarios, ...
- Sub-sector electrónico de Sevilla y Málaga: surgido al amparo de las energías fotovoltaica y eólica han adquirido experiencia en electrónica de potencia, monitorización, sensorización, robótica y automatización.
- Empresas de renovables con interés de diversificación e industrias que trabajan con materiales ligeros y resistentes a la corrosión (composites, aluminio) (sector aeronáutico del eje Cádiz-Sevilla).



Potencial de desarrollo económico-industrial (II)



Este desarrollo industrial pasa por:

1. Verificar el recurso energético local mediante mediciones puntuales.
2. Favorecer proyectos que apliquen tecnologías sinérgicas con la eólica marina.
3. Desarrollar, en Andalucía, tecnologías adaptadas a las condiciones particulares del Estrecho para el aprovechamiento de la energía de las corrientes en este emplazamiento.



Referencias

Europeos Generales.

FP7: MARINA

FP7: ORECCA

FP7: CORES

FP7: EQUIMAR

IEE2 WAVEPLAM

FP7: TIDALSENSE

Europeos específicos.

FP7 DEM: PULSE TIDAL

FP7 DEM: WAVE ROLLER

FP7 DEM: OPT

FP7 DEM: WAVEBOB

EuroStars: Q-SAIL.

FP6 NEREIDAS (Mutriku)

Nacionales y regionales.

CENIT: OCEAN LIDER

PSE-MAR

PSE-EMERGE

PLOCAN

GESMEY

WAVEPORT

WAVECAT



Conclusiones I

1. La explotabilidad de la energía de las corrientes marinas en Andalucía, en función del recurso existente, los condicionantes técnicos, medioambientales y socioeconómicos y la viabilidad técnico-económica, queda estimada en una potencia media de 600 MW, sobre un total de 7.000 MW para todo el Estrecho de Gibraltar. Esta potencia media de 600 MW equivale a un conjunto de instalaciones de unos 1.200 MWp (en función del aprovechamiento de la tecnología a instalar).
2. Bajo los mismos parámetros se concluye que la explotabilidad de la energía de las olas en Andalucía cuenta con una potencia media de 200 MW , sobre un total de 2.000 MW, que se reparte entre la Costa Atlántica de Andalucía, el Estrecho y la Costa Occidental de Almería. Esta potencia media de 200 MW equivale a un conjunto de instalaciones de unos 800 MWp (en función del aprovechamiento de la tecnología a instalar).



Conclusiones II

3. Los posibles emplazamiento para la instalación de parques de aprovechamiento de corrientes marinas presentan unas características de concentración local e interés geográfico delimitado que sugieren que sean priorizados ante otros usos, con las compensaciones adecuadas, y la mitigación/eliminación de impacto. Se trata por tanto de verificar y localizar los mecanismos de compatibilidad entre los condicionantes socioeconómicos y medioambientales y la explotación de este recurso.
4. En 15 años la energías marinas pueden pasar a la situación actual de la eólica terrestre, pero hay que acelerar el desarrollo mediante pedidos concretos, que permitan industrializar los procesos y pasar del taller a la fábrica.
5. Debe buscarse la sinergia entre la eólica marina y otras renovables marinas, mediante una planificación conjunta del espacio marino, la conexión e integración en la red eléctrica de forma combinada y la combinación de estructuras fijas y flotantes de diversas tecnologías.



Conclusiones III

6. Andalucía presenta una serie de características que pueden ser claves para el desarrollo de una cadena de suministro completa de la futura industria de energías marinas renovables:
- Elevado recurso para corrientes y moderado para oleaje.
 - Buena infraestructura eléctrica cercana a la costa.
 - Condiciones climáticas suaves (temperatura ambiente y del agua, escaso número de días de tormentas,...), que la convierten en un lugar privilegiado para el testeo y puesta a punto de tecnologías.
 - Alto potencial de desarrollo de la energía eólica off-shore que puede ejercer de efecto de impulso sobre el resto de tecnologías.
 - Fuerte tejido, y tradición industrial, ligado a la industria naval y marítima que puede ser renovado y aplicado al desarrollo de estas tecnologías.





Bibliografía

Olas

- J. Falnes, “Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including wave energy extraction” Cambridge University Press, 2005.
- J. Cruz y al., “Ocean wave energy. Current status and future perspectives” Springer, 2008.
- M. E. McCormick, “Ocean wave energy conversion” Dover Publications, 2007.
- M. Previsic, R. Bedard and G. Hagerman, “Assessment of Offshore Wave Energy Conversion Devices”, EPRI Report WP-004- US – Rev 1, Electric Power Research Institute, SF CA, June 16, 2004

Corrientes

- R. Bedard et al, “Survey and characterisation of tidal in-stream energy conversion (TISEC) devices”, EPRI Report EPRI-TP-004 NA, Final Electric Power Research Institute, SF CA, Nov. 9 2005.
- P. Fraenkel: “Marine current turbines tap tidal power”, Marine Technology Reporter, Oct. 2006, pp. 25-29
- P. Fraenkel: “Operational performance of SeaGen”, presentation at Ocean Power Conference, Lisbon, Portugal 2-3 Nov 2009.
- A. Børjesen, J. E. Hanssen: “Innovative new solutions for ocean energy, presentation at Ocean Power Conference, Lisbon, Portugal 2-3 Nov 2009.



www.agenciaandaluzadelaenergia.es



Agencia Andaluza de la Energía
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, INNOVACIÓN Y CIENCIA