

05-026

**STUDY OF OPTIMAL LOCATION FOR USING THE ENERGY FROM THE SEA  
CURRENTS IN THE STRAIT OF GIBRALTAR, THROUGH AHP-TOPSIS  
METHODOLOGY.**

de la Casa González, Katia; García-Cascales, M. Socorro; Sánchez-  
Lozano, J. Miguel Universidad Politécnica de Cartagena

In recent years, there has been increasing awareness of the great potential for electrical energy generation by turbines settled on the bottom of the sea, in order to make use of the tidal currents which exist in the oceans. The Strait of Gibraltar is a privileged region at world scale for this type of exploitation and is the only geographical location in all the Spanish littoral zone where this energy source has significant potential. In the present work, a study has been made on the energy potential of the area, as well as a process of decision-making employing the combined methodology through the Analytic Hierarchy Process (AHP) to obtain the criteria, as well as the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), to assess the best locations of the Strait of Gibraltar to set up a tidal current energy park. Additionally, an analysis is made of the different technologies existing on the market today to harness the energy from currents and for the various locations, and finally the real extractable power for each studied technology is presented.

**Keywords:** *Renewable Energies (EERR); AHP-TOPSIS; Strait of Gibraltar; Decision-making; Sea currents*

**ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN ÓPTIMA PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO  
DE LAS CORRIENTES MARINAS EN EL ESTRECHO DE GIBRALTAR MEDIANTE  
METODOLOGÍA AHP-TOPSIS**

En estos últimos años se está reconociendo el amplio potencial de la generación de energía eléctrica mediante rotores instalados en el fondo marino para aprovechar las corrientes marinas existentes en los océanos. El Estrecho de Gibraltar, es una región privilegiada a escala global para este tipo de aprovechamiento y representa la única localización geográfica en todo el litoral español donde esta fuente energética tiene un potencial significativo. En el presente trabajo se ha realizado un estudio del potencial energético de la zona así como un proceso de toma de decisiones aplicando la metodología combinada mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la obtención de los criterios y la Técnica para la Similitud de Preferencias con la Solución Ideal (TOPSIS) para evaluar las mejores localizaciones del Estrecho de Gibraltar, donde instalar un parque de corrientes marinas. Asimismo, se analizan las distintas tecnologías para el aprovechamiento energético de corrientes, actualmente existentes en el mercado, para las diversas localizaciones y finalmente se presenta para cada tecnología estudiada, la potencia extraíble en cada caso.

**Palabras clave:** *Energías Renovables (EERR); AHP-TOPSIS; Estrecho de Gibraltar; Toma de decisiones; Corrientes marinas*

Correspondencia: Katia de la Casa González [katia\\_cg\\_90@hotmail.com](mailto:katia_cg_90@hotmail.com)

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado con fondos FEDER por la DGICYT mediante el proyecto (TIN2011-27696-C02-01, TIN2014-55024-P) y por La Junta de Andalucía (P11-TIC-8001), respectivamente.

## 1. Introducción

En estos últimos años se está reconociendo el amplio potencial de la generación de energía eléctrica mediante rotores instalados en el fondo marino para aprovechar las corrientes marinas existentes en los océanos. Ya que, son uno de los principales motores termodinámicos terrestres. Esto, puede dar una idea de la cantidad de energía “constante” que almacenan las corrientes. Numerosas empresas del sector energético renovable están haciendo grandes inversiones para la investigación del aprovechamiento de estas corrientes marinas.

Una corriente de agua marina que discurre a una velocidad de 2 m/s posee por cada  $m^2$  de área perpendicular a su flujo, la misma energía que una corriente eólica de 18 m/s. Y 3 m/s se corresponderían con 27 m/s. Esto es debido a que el agua tiene una densidad 850 veces mayor que la del aire, con lo cual la energía de las corrientes marinas tiene una densidad energética mayor que la energía eólica.

Ya en un estudio de 1996 de la Comisión Europea (Comisión Europea, 1996), se identifican 106 localizaciones potenciales en Europa de las que se podría extraer 48 TWh por año, que es equivalente a 12.5 GW de capacidad instalada.

El Estrecho de Gibraltar representa la única localización geográfica en todo el litoral español, donde la fuente energética de las corrientes marinas tiene un potencial significativo. De hecho, es una región privilegiada a escala global para este tipo de aprovechamiento (Grupo de Oceanografía Física [GOFIMA]).

El objetivo de este estudio consiste en obtener, la localización o ubicación óptima de futuros parques de corrientes marinas en el Estrecho de Gibraltar. Concretamente, para parques de dispositivos “SeaGen S” y “Verdant Power”.

## 2. Metodología

Mediante mecanismos de toma de decisión multicriterio basados en metodología combinada AHP-TOPSIS, se obtiene la localización óptima de un parque offshore en el Estrecho de Gibraltar. Se examinan los elementos que influyen en la decisión de ubicación: criterios y alternativas.

### 2.1 Selección de criterios

Se definen aquellos criterios que describan todos los aspectos a tener en cuenta a la hora de valorar cada alternativa. Según la teoría de la toma de decisión multicriterio, los criterios de decisión corresponden a aspectos tales como atributos, objetivos o parámetros que constituyen los ejes fundamentales a partir de los cuales el decisor justifica, transforma y argumenta sus preferencias. Realizar una adecuada selección de los mismos resulta fundamental en cualquier proceso de toma de decisiones, ya que un planteamiento inadecuado puede dar lugar a resultados poco satisfactorios o incluso invalidar el proceso.

En función tanto a la bibliografía y documentación estudiada, como al experto en la materia consultado, los criterios seleccionados son: 1.Profundidad del lecho marino, 2.Distance a conexión eléctrica, 3.Distance a un puerto, 4.Velocidad de la corriente.

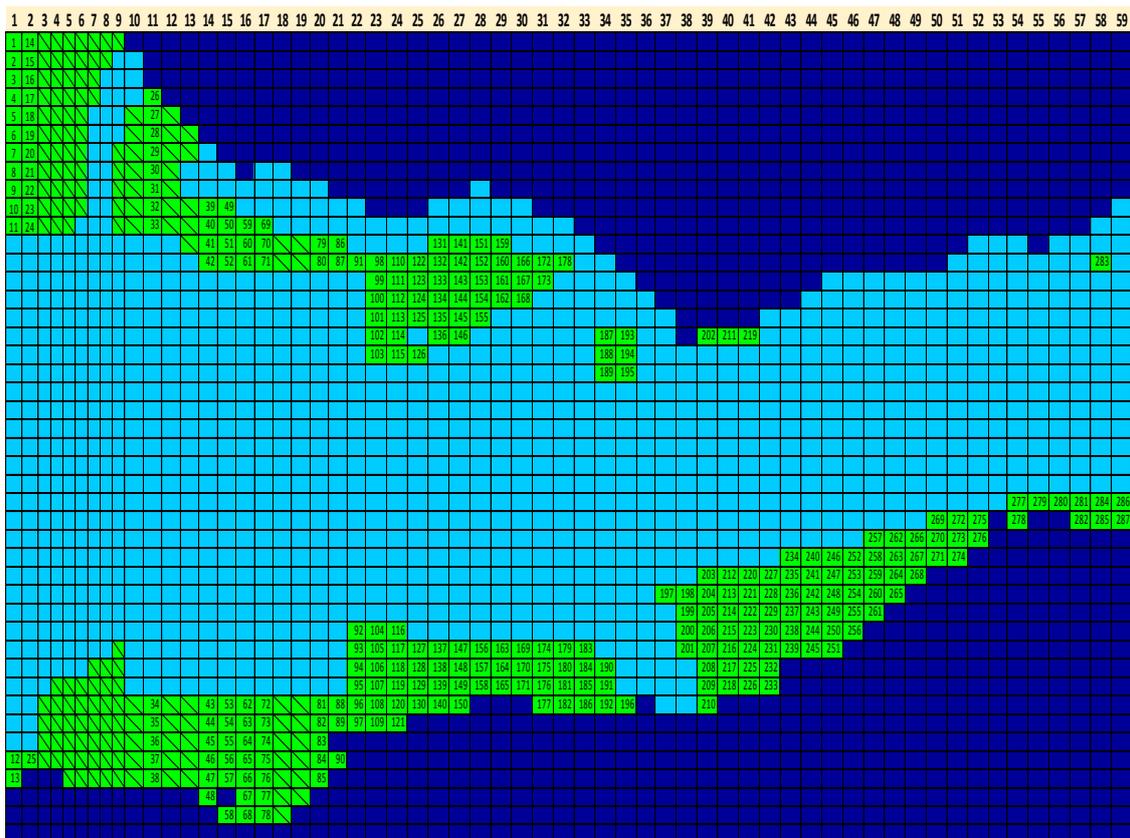
### 2.2 Selección de alternativas

La selección de las alternativas es la parte del método que se basa en la detección de la cantidad de opciones que tiene el decisor para efectuar la toma de decisión multicriterio.

Se define el conjunto de alternativas como el grupo finito de soluciones, estratégicas, acciones, decisiones, etc. posibles que hay que analizar durante el proceso de resolución del problema de decisión que se considere. Constituye el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora realiza una decisión.

Dado que este estudio trata de la decisión sobre la ubicación de parques de corrientes marinas en el Estrecho de Gibraltar, se parte de una malla (Juanes, 2007) de esta zona en la que previamente, han sido eliminadas las zonas que no son susceptibles de instalación (Ver Figura 1).

**Figura 1: Alternativas resultantes numeradas. (Fuente: Elaboración propia)**



### 2.3 Análisis de toma de decisiones. Metodología combinada AHP-TOPSIS

Una vez definidos criterios y alternativas se modeliza el problema de toma de decisión mediante una combinación de métodos de decisión multicriterio: AHP para la obtención del peso de los criterios y TOPSIS para la evaluación de las alternativas (Caballero y García, 2013).

La importancia relativa de cada criterio respecto a los demás se mide a través de los resultados de una encuesta de valoración diseñada y difundida a un experto en la materia a evaluar. La formulación de esta encuesta se realizó de manera acotada al problema basándose en la metodología AHP (Saaty, 1980), modelo de decisión que interpreta la información directamente mediante la realización de juicios y medidas en una escala de razón dentro de una estructura jerárquica establecida, resolviendo una matriz de

comparación entre los distintos criterios. A continuación, se explica todo el procedimiento, paso a paso.

### 2.3.1 Método AHP

En primer término se evalúa el peso de los criterios planteados mediante el método AHP a partir de las respuestas de la encuesta. El objetivo es construir un vector de pesos que indique la importancia relativa de cada criterio.

1. *Cálculo del vector de pesos AHP.* Para determinar los pesos se hace uso de la escala fundamental de comparación pareada (Saaty, 1980), que representa la proporción en la que uno de los criterios considerados en la comparación pareada domina al otro respecto a una propiedad que tienen en común, tal y como vemos en la Figura 2.

**Figura 2: Escala fundamental de comparación pareada. (Fuente: Saaty, 1980)**

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo
3	Importancia moderada de un elemento sobre otro	La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre otro
5	Importancia fuerte de un elemento sobre otro	Un elemento es fuertemente favorecido
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro	Un elemento es muy dominante
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro	Un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Se usan como compromiso entre dos juicios
Incrementos 0,1	Valores intermedios en incrementos	Utilización para graduación más fina de juicios

Una vez recibida la encuesta se debe completar la matriz  $R$  (1),

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

de tal modo que el término  $r_{ij}$  representa la prioridad relativa entre el criterio  $C_i$  y el criterio  $C_j$  respecto a la meta del problema, que será mayor, igual o inferior a uno dependiendo qué criterio sea más importante.

La matriz  $R$  cumple que  $r_{ij} \cdot r_{ji} = 1$ , es decir, es una matriz recíproca y se cumple que el autovalor máximo  $\lambda_{max}$  es un número real positivo y que existe un vector propio  $Z$ , cuyas componentes son positivas, asociado a este autovalor. Se normaliza este autovector para que la suma sea la unidad. La matriz  $R$  se concibe como una perturbación de la matriz  $W$  y se considera que el vector propio  $Z$  es una aproximación al vector de pesos  $w$ . Por tanto, para determinar los pesos  $w_j$  bastará calcular el autovector asociado al autovalor máximo de la matriz  $R$ .

2. *Determinación de la consistencia.* Para que la aplicación del método muestre resultados válidos, durante el proceso de comparación el experto no debe ser incoherente con las valoraciones, ya que se obtendría un resultado poco representativo. Para evaluar si la solución es coherente se calcula el ratio de consistencia (2) de la matriz, que en este caso será: 0 (para ambos casos de estudio). Con este ratio (que debe ser siempre menor a 0,1 para garantizar una buena consistencia) se considera que la matriz tiene buena consistencia.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

Donde, IC es el índice de consistencia (3)

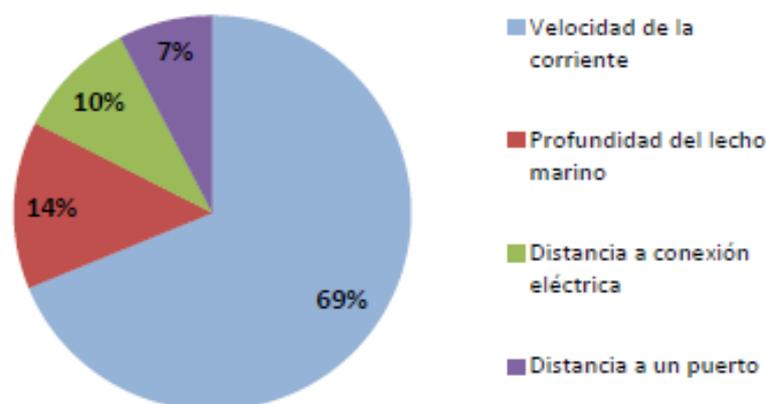
$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)} \quad (3)$$

IR, es el índice aleatorio, cuyo valor aparece en Figura 3 y va en función de  $n$ , que es el tamaño de la matriz  $R$ .

Figura 3: Índice aleatorio. (Fuente: Saaty, 1980)

n	1-2	3	4	5	6	7	8	9
IR	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Figura 4: Distribución de pesos de criterios (Fuente: Elaboración propia)



Como se refleja en el gráfico de sectores (Figura 4), la velocidad de corriente es, con mucha diferencia sobre el resto, el criterio con más importancia a la hora de elegir emplazamiento para un parque de corrientes marinas.

### 2.3.2 Método TOPSIS

Una vez obtenidos los pesos de los criterios se puede continuar con el estudio mediante la metodología TOPSIS (Hwang & Yoon, 1981) para la evaluación de las distintas alternativas. Este método se basa en el concepto de que es deseable que una alternativa determinada se ubique a la distancia más corta respecto de una solución ideal positiva y a la mayor distancia respecto a una solución ideal negativa. Para proceder a la evaluación mediante este método, se ejecutan los siguientes pasos:

3. *Matriz de decisión* (Figura 5). En primer lugar se crea la matriz de decisión, en la cual se reflejan todas las alternativas a evaluar a través de los criterios seleccionados. En la matriz se desglosan todos los valores cuantitativos ( $x_{ij}$ ) de cada alternativa ( $A_i$ ) para cada criterio ( $C_j$ ), mostrando el vector de pesos ( $w_j$ ) asociado obtenido mediante el método AHP.

Figura 5: Matriz de decisión. (Fuente: Elaboración propia)

	$w_1$	$w_2$	...	$w_j$	...	$w_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1j}$	...	$x_{1n}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2j}$	...	$x_{2n}$
...	...	...	...	...	...	...
$A_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mj}$	...	$x_{mn}$

4. *Normalización de la matriz de decisión*: consiste en convertir las dimensiones de los valores de los distintos criterios en valores adimensionales, aplicando la fórmula (4).

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}, j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m \quad (4)$$

5. *Matriz ponderada*. Conociendo las valoraciones de las alternativas normalizadas y el vector de pesos de los criterios, se realiza la ponderación de la matriz. Esto consiste en ponderar cada valoración de cada alternativa en función del peso del criterio que se evalúa, aplicando la fórmula (5).

$$\bar{v}_{ij} = w_j \otimes \bar{n}_{ij}, j = 1, \dots, n, i = 1, \dots, m, \quad (5)$$

6. *Solución ideal positiva (PIS)* (6) y *Solución ideal negativa (NIS)* (7). Los conjuntos de valores ideal positivo  $A^+$  e ideal negativo  $A^-$  se determinan como:

$$\bar{A}^+ = \{\bar{v}_1^+, \dots, \bar{v}_n^+\} = \{(max \bar{v}_{ij}, j \in J)(min \bar{v}_{ij}, j \in J')\} i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\bar{A}^- = \{\bar{v}_1^-, \dots, \bar{v}_n^-\} = \{(min \bar{v}_{ij}, j \in J)(max \bar{v}_{ij}, j \in J')\} i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

Donde J está asociado con los criterios de beneficio y J' con los criterios de costes.

7. *Cálculo de las medidas de las distancias.* Una vez se conocen las soluciones ideales positiva y negativa (PIS y NIS) se pueden calcular las medidas de las distancias, que consiste en obtener la separación de cada alternativa a la solución ideal positiva (8) o negativa (9).

$$\bar{d}_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, i = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$\bar{d}_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, i = 1, \dots, m \quad (9)$$

8. *Ratio de proximidad relativa* (10). Por último se obtiene el ratio o proximidad relativa de cada alternativa a la solución ideal. Cuanto más próximo sea el valor del ratio R a 1, mayor será la prioridad de la alternativa y resultará más idónea como solución al problema propuesto.

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-}, i = 1, \dots, m \quad (10)$$

## 2.4 Evaluación de las alternativas para cada uno de los criterios

### 2.4.1 Profundidad del lecho marino

Uno de los principales problemas de la implantación de cualquier sistema en el mar es su fijación en el lecho marino. Además, los costes de instalación aumentan según el emplazamiento del parque se va alejando de la costa y, en consecuencia, aumenta la profundidad marina. Pero sobre todo, aumentan los costes de mantenimiento.

En el litoral español, debido a su orografía marina, se alcanzan grandes profundidades muy cerca de la costa. Y más en el Estrecho, que presenta grandes variaciones de profundidad. Esto supone que el criterio de la profundidad adquiera gran importancia a la hora de elegir ubicación.

En función de las profundidades del fondo marino, la cimentación de la tecnología tendrá que variar.

Para obtener datos exactos de profundidad para cada una de las alternativas es necesario disponer de una batimetría de todo el fondo marino objeto de estudio. Existen mapas batimétricos y cartas náuticas donde se reflejan las profundidades de cada zona mediante curvas de nivel. Conociendo las coordenadas geográficas de cada alternativa, la profundidad en cada zona se obtendrá mediante programas que disponen de los datos de profundidad del lecho marino para cada punto del litoral.

### 2.4.2 Distancia a conexión eléctrica

La integración de la energía generada en el parque offshore en la red eléctrica existente es una de las variables más importantes que hay que analizar en cualquier nueva instalación. Esto se debe a la mayor complejidad de todos los elementos que forman parte de la infraestructura eléctrica, ya que deben ser diseñados para funcionar en unas condiciones mucho más hostiles y por tanto tienen que tener una serie de características específicas para estos emplazamientos: resistencia al agua, resistencia a la humedad, resistencia a la corrosión, etc. Todo esto implica que, además de resultar tecnológicamente más compleja, la infraestructura eléctrica de un parque marino tenga unos costes mayores, derivados

fundamentalmente del incremento en el precio del cable de conexión submarino del parque marino hasta la costa.

El esquema de la conexión eléctrica de un parque marino será una línea de transporte de energía hasta la costa mediante una línea eléctrica submarina. Ya en la costa, la línea eléctrica, convertida en línea terrestre, continúa hasta la subestación de entronque, perteneciente a la red eléctrica de la zona.

Para evaluar este criterio, debemos considerar la distancia desde cada zona hasta el punto de entronque con la red existente. El coste de la línea aumenta a medida que la distancia se incrementa, por lo que conviene minimizarla.

En primer lugar se deben identificar las subestaciones que ejercerían de punto de entronque con la línea para cada una de las posibles alternativas de ubicación: Facinas, Puerto de la Cruz, Tarifa y Fardioua. Para obtener los valores, dado que se conocen las coordenadas geográficas exactas de cada alternativa y de cada uno de las SE, se calculan las distancias desde cada punto a la SE más cercana.

### **2.4.3 Distancia a un puerto**

Un criterio importante a la hora de implantar un parque marino es analizar la disponibilidad de puertos situados en las inmediaciones del parque con accesibilidad suficiente para alojar máquinas y medios constructivos de ensamblaje y transporte de todos los componentes de la instalación. Por tanto es necesario tener en cuenta los puertos de la zona, ya que estos serán la base logística para las diferentes fases existentes a lo largo de la vida útil de un parque offshore: Construcción; Operación y mantenimiento; Repotenciones y Desmantelamiento.

Debido a la necesidad de gran capacidad, solo se consideran puertos válidos aquellos que integran el Sistema Portuario español. Para este estudio se proponen como posibles puertos para implementar la base logística del futuro parque el Puerto de la Bahía de Algeciras y el Puerto de Ceuta.

El método de evaluación de este criterio para cada alternativa se basa en la distancia existente entre cada alternativa de ubicación y el puerto más cercano a ella. Será por tanto un criterio a minimizar, es decir, será mejor cuanto menor sea la distancia.

Para obtener los valores, dado que se conocen las coordenadas geográficas exactas de cada alternativa y las coordenadas de cada uno de los dos puertos, simplemente se trata de medir las distancias desde cada punto a cada uno de los dos puertos y se selecciona el puerto cuya distancia resulte menor.

### **2.4.4 Velocidad de la corriente**

La velocidad de la corriente es, el elemento más importante a la hora de elegir emplazamiento para un parque de corrientes marinas. Ya que establece qué tipo de dispositivo se puede utilizar y si es viable o no la central. Para las tecnologías seleccionadas en este estudio, es necesaria una **velocidad mínima de 1 m/s**.

En este estudio, la velocidad de corriente es un dato conocido por lo que no es necesario calcularlo.

## **3. Casos de estudio**

Se presentan dos casos de estudio distintos ya que se han utilizado dos tecnologías de corrientes marinas distintas: SeaGen y Verdant Power.

### 3.1 SeaGen – S

Este tipo de turbina está desarrollada por Marine Current Turbine (MCT) es una turbina de eje horizontal, con dos rotores por sistema sujetos a un pilote central. Empezó a desarrollarse en 1994. En Junio de 2008 se instaló por primera vez un diseño a escala real, conectado a la red en el Norte de Inglaterra. Y en Julio de 2008 generó energía por primera vez.

El SeaGen S está compuesto por dos rotores de eje horizontal con un diámetro de 16 m cada uno, cada rotor está acompañado de su caja de engranajes y su generador. La salida del generador va acompañada de un rectificador, a un convertidor y a un transformador final para así poder enlazar con la red de distribución. Cada rotor es independiente del otro para poder tener un amplio abanico de operatividad. Los rotores tienen un control total de las palas para ajustar su borde de ataque en función de la corriente y de la energía que queremos extraer, y así poder obtener energía tanto en la subida de la marea como en la bajada, al poseer el sistema de palas orientables total está desprovisto de un mecanismo que hace rotar el conjunto global del sistema para su orientación. El sistema al poseer el pilote central, puede elevarse el conjunto de las turbinas por encima del nivel del mar mediante un mecanismo de elevación y así poder ser reparado o efectuar las labores de mantenimiento (Ver Figura 6).

**Figura 6: SeaGen S para ser reparado o por tareas de mantenimiento (Fuente:**

<http://www.seageneration.co.uk/>)



Para las cuestiones que nos interesan en este estudio, como son las condiciones de operación de este aparato, la información que proporciona el fabricante es que trabaja en un rango de velocidades de corriente entre 1 y 2.5 m/s. En el caso de que la velocidad sea superior a 2.5 m/s, el propio dispositivo regula la potencia y la velocidad de rotación de las palas.

En cuanto a la profundidad a la que puede instalarse, en principio, el dispositivo está diseñado para profundidades de hasta 38 m pero pueden adaptar el diseño para profundidades mayores así como para diferentes tipos de suelo marino, ya que la estructura de soporte depende de ello. No obstante, cuanto menor sea la profundidad, mejor ya que todos los costes disminuirán.

### 3.2 Verdant Power's Kinetic Hydropower System (KHPS)

Este sistema utiliza una turbina de eje horizontal de 3 palas con diseño patentado, para obtener una alta eficiencia en un gran rango de velocidades. El rotor mueve una caja de cambios que está conectada a un generador de inducción trifásico. Tanto el generador como la caja de cambios, se encuentran en una góndola montada a un poste hidrodinámico. Esta torre posee unos rodamientos internos que le permiten girar la turbina con la dirección de la corriente, permitiendo aprovechar tanto flujos como reflujos. Los cables submarinos llevan la energía a la orilla donde se conectan a la red eléctrica mediante equipos de comunicación estándar de generación distribuida.

Las turbinas Verdant son personalizadas a una escala apropiada al sitio de instalación. A cada escala el sistema es optimizado económicamente mediante la integración de tecnología y componentes apropiados.

Para este estudio, se ha utilizado la turbina de fase 5, es decir la más actual y cuyos datos podemos encontrar en la web del fabricante. La velocidad mínima de corriente necesaria, que es 1 m/s. Y en cuanto a la profundidad, el dispositivo es escalable y adaptable pero siempre es mejor una profundidad baja para minimizar los costes (Ver Figura 7).

Figura 7: KHPS de 5ª generación (Fuente: <http://www.verdantpower.com/>)



## 4. Resultados

A partir los datos de ratio de proximidad relativa se realiza una clasificación numérica de los valores de los ratios ordenados de mayor a menor. Consecuentemente se clasifican las alternativas propuestas ordenadas de mayor a menor prioridad o idoneidad. El valor

numérico del ratio indica las alternativas más adecuadas para la ubicación del parque, pero se recurre a un criterio gráfico de valoración para mostrar las mejores y peores opciones sobre el mapa de alternativas. En función de la prioridad de la alternativa, ésta se mostrará de un color acorde con una mejor o peor posición en el ranking. Para ello se otorga un color a cada intervalo de valores de ratio, tal y como se muestra en la Figura 8, representando gráficamente la prioridad de cada una de las alternativas sobre un mapa del Estrecho de Gibraltar.

Figura 8: Valoración gráfica de las prioridades (Fuente: Elaboración Propia)

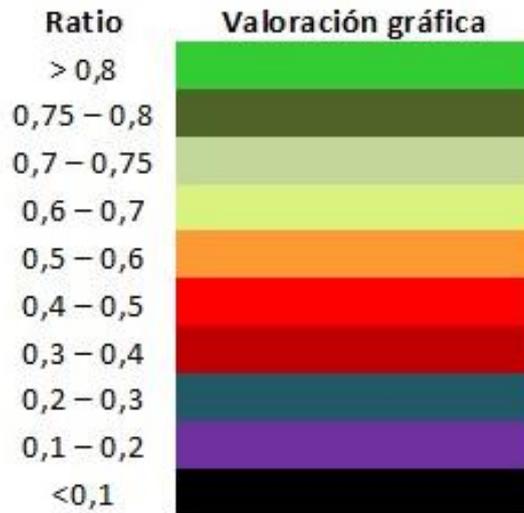


Figura 9: Resultados gráficos para Seagen (Fuente: Elaboración Propia)

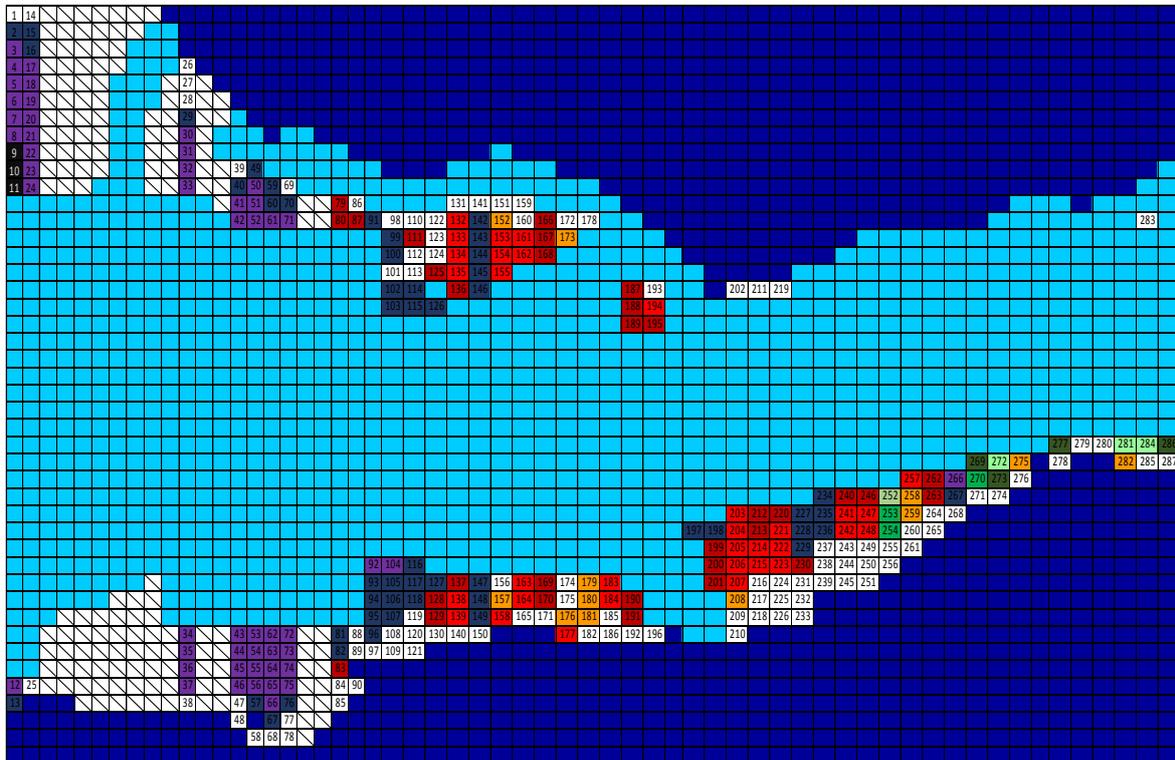
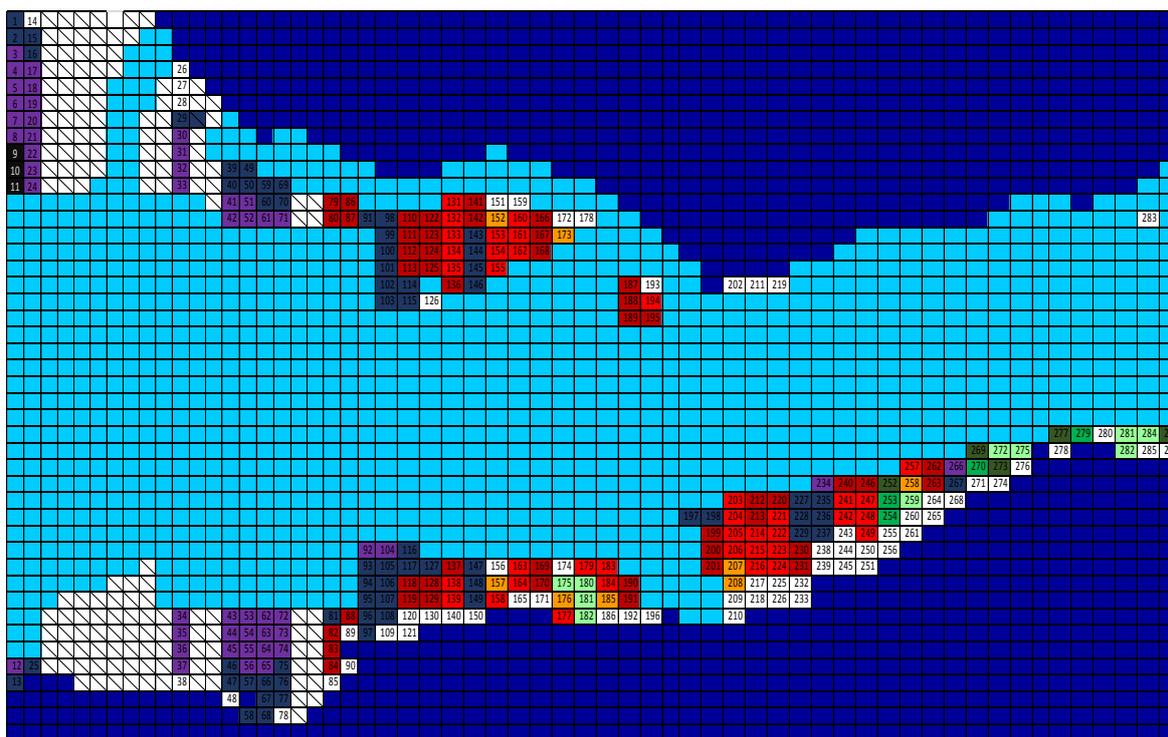


Figura 10: Resultados gráficos para Verdant Power (Fuente: Elaboración Propia)



Las zonas blancas representan en ambos mapas, las zonas que se han excluido a lo largo de este estudio. Las que están numeradas son las eliminadas por no cumplir con la profundidad mínima y las que están tachadas son las eliminadas por no cumplir con la velocidad mínima de 1 m/s (Ver figuras 9 y 10).

## 5. Conclusiones

- *Importancia de la velocidad de corriente:* El peso o relevancia de la velocidad de corriente es muy significativo respecto a los demás criterios.

Este atributo resulta ser, con mucha diferencia sobre el resto, el criterio con más importancia a la hora de elegir emplazamiento para un parque eólico marino.

Además de los criterios principales contemplados, existen otros aspectos que pueden influir en la posible localización, pero resultan casi insignificantes teniendo en cuenta que la velocidad de corriente representa el 69% en peso y por tanto anula cualquier otro aspecto de poca importancia.

- *Comparación entre tecnologías:* Si hacemos un cálculo de la potencia extraíble de un parque situado en la zona 270 (que es la más óptima en ambos casos) para cada una de las tecnologías, observamos que extraemos más potencia con Verdant Power pero harían falta unas 110 veces más de máquinas. Habría que valorar el coste de cada uno, teniendo en cuenta la instalación, el mantenimiento y el propio coste de la máquina.

- *Prioridad de la zona sur-este:* En los mapas de resultados gráficos podemos ver que para los dos análisis, las mejores alternativas son prácticamente las mismas y se encuentra en la zona Sur hacia el Este.

Simultáneamente a la realización del estudio se han detectado posibles mejoras del método propuesto que serían de utilidad para futuros trabajos o ampliaciones:

- Unir este estudio con el proyecto FLEGER de la Junta de Andalucía (GOFIMA), para así conseguir un informe completo, ya que cada trabajo tiene en cuenta una serie de criterios distintos.

- Mejorar el criterio de conexión a red eléctrica: Este criterio se podría subdividir en otros criterios para tener una información más fiable.

También podría estudiarse la opción de hacer las conexiones mediante el emisario eléctrico submarino que va de Marruecos a España, en vez de usar subestaciones próximas a la costa.

- Hacer un estudio de costes: Para el caso de parques eólicos offshore, existen estudios acerca de cómo realizar un cálculo aproximado de los costes totales de un parque eólico offshore en función a variables conocidas (potencia instalada, distancia a la costa, profundidad, etc). Podría aplicarse para parques de corrientes marinas y así incluir un criterio de costes en el análisis de toma de decisión.

- Análisis en profundidad de las múltiples soluciones propuestas.

- Aplicar este estudio a otras tecnologías.

## 6. Referencias

Comisión Europea (1996). *The exploitation of tidal and marine currents*. Luxemburgo.

Caballero, E., & García, M. S. (2013) Location study of an offshore wind farm in the Asturian coast through a multi-criteria analysis. Selecting Proceeding for the 16th International Congress on Project Engineering 189-200.

Empresa fabricante Seagen <http://www.seageneration.co.uk/>  
<http://www.marineturbines.com/>

Empresa fabricante Verdant Power <http://www.verdantpower.com/>

Grupo de Oceanografía Física [GOFIMA]. *Mapa de los flujos de energía en el Estrecho de Gibraltar para su aprovechamiento como fuente de energía renovable*.  
<http://oceano.uma.es/almacen/P26.pdf>

Hwang C. L., & Yoon K. (1981). *Multiple attribute decision methods and applications*, Berlin: Springer.

Juanes, J. M. (2007). *El potencial energético útil de las corrientes marinas en el estrecho de Gibraltar*. Tesis doctoral. E.T.S.I. Navales (UPM).

Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.

