



Universidad de Oviedo

**ESCUELA SUPERIOR DE LA MARINA CIVIL DE GIJÓN**

*Trabajo Fin de Máster*

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA  
UNDIMOTRIZ EN LA COSTA ASTURIANA

Para acceder al Título de Máster Universitario en

**TECNOLOGÍAS MARINAS Y MANTENIMIENTO**

Autor: Pelayo Pire Cortés

Tutor: Jesús Suárez González

Julio – 2018

## Índice.

1. Introducción.....	1
1.1. Historia.....	2
2. Energía undimotriz a nivel europeo.....	4
3. Energía undimotriz a nivel nacional.....	5
4. Principios físicos de la energía undimotriz.....	7
4.1. Estado típico del mar.....	10
4.2. Variaciones en la potencia undimotriz en una ubicación determinada.....	11
4.3. Patrón y dirección de ola.....	13
4.4. Lo que sucede debajo de la superficie del mar.....	14
4.5. Movimiento en aguas poco profundas.....	15
4.6. Refracción.....	16
5. Recursos nacionales de energía undimotriz.....	17
6. Tecnología para el aprovechamiento de la energía undimotriz.....	18
6.1. Estudio de casos preliminares.....	26
6.1.1. TAPCHAN.....	26
6.1.2. Las columnas de agua oscilantes de la costa litoral de Islay.....	28
6.2. Métodos de obtención de la energía eléctrica.....	30
6.2.1. Tipos de generadores rotativos.....	30
6.2.2. Transferencia de turbina.....	31
6.2.3. Hidráulica.....	31
6.2.4. Generación eléctrica directa.....	33
6.3. Dispositivos fijos.....	34
6.3.1. Dispositivos basados en la columna de agua oscilante (OWC).....	37
6.3.2. Sistemas de puertos y rompeolas.....	37
6.3.3. El OWC multirresonante (MOWC).....	38
6.3.4. Dispositivos fijos que no son de OWC.....	38
6.4. Dispositivos amarrados.....	40
6.4.1. PowerBuoys.....	41
6.4.2. Convertidor de energía undimotriz de bomba de manguera.....	42
6.4.3. Convertidor Interproject Service.....	42
6.5. Dispositivos flotantes.....	43
6.5.1. Dispositivos Terminator.....	43
6.5.2. Dispositivos de absorción puntual.....	48
6.5.4. Dispositivos atenuadores.....	50
7. Evaluación económica.....	54

8. Impacto medioambiental .....	59
9. Integración.....	60
9.1. Energía undimotriz para comunidades aisladas .....	62
9.2. Energía de las olas para grandes redes eléctricas.....	63
10. Evaluación de energía undimotriz en Asturias y selección de los dispositivos adecuados para su aprovechamiento.....	64
10.1. Energía undimotriz offshore (en alta mar) .....	66
10.2. Energía undimotriz onshore (en la orilla) .....	70
10.3. Tecnología adecuada para el aprovechamiento de la energía undimotriz .....	75
10.3.1. Dispositivos montados en la orilla.....	77
10.3.2. Dispositivos en alta mar .....	77
11. Resumen y conclusiones.....	80
12. Anexos.....	82
12.1. Anexo 1: proporción de olas según periodo y altura en las distintas ubicaciones .....	82
12.2. Anexo 2: rendimiento de cada convertidor en las distintas ubicaciones.....	86
12.2.1. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Tapia de Casariego: .....	86
12.2.2. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Navia:.....	87
12.2.3. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Valdés: .....	87
12.2.4. Tablas correspondientes al punto SIMAR de la zona oeste de Cudillero: .....	88
12.2.5. Tablas correspondientes a la boya de oleaje de la zona este de Cudillero: .....	89
12.2.6. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Castrillón: .....	89
12.2.7. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Gozón:.....	90
12.2.8. Tablas correspondientes a la boya de oleaje de Gijón: .....	91
12.2.9. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Villaviciosa: .....	91
12.2.10. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Colunga: .....	92
12.2.11. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Ribadesella: .....	93
12.2.12. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Llanes: .....	93
12.2.13. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Ribadeva: .....	94
13. Bibliografía.....	95

## **1. Introducción**

La energía undimotriz es aquella producida por el movimiento ondulatorio de la superficie del agua del mar. Las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar. El calentamiento de la superficie terrestre genera viento, este a su vez olas, por lo cual el oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire contra la superficie del mar. La energía del oleaje se concentra en la costa y tiene la propiedad característica de desplazarse grandes distancias sin apenas perder energía.

La intensidad del oleaje depende de la fuerza del viento, de su duración y de la longitud sobre la cual se transmite la ola. Se trata de una energía constante y predecible con un impacto en el entorno menor que el de otro tipo de instalaciones de producción energética.

A nivel mundial, la mayor parte de la energía undimotriz se concentra en los océanos Atlántico y Pacífico, entre las latitudes 40°-65°N y 30°-60°S, donde los vientos regulares permiten disponer de mayores potenciales energéticos, en particular el oleaje proveniente del oeste, con un potencial de entre 50-100 kW por metro de frente de ola.

La posibilidad de extraer energía de las olas del mar ha intrigado a la humanidad cientos de años. Sin embargo, aunque hay conceptos de más de 200 años de antigüedad, fue solo en la segunda mitad del siglo XX cuando los sistemas viables empezaron a aparecer.

La primera patente de energía undimotriz se realizó en Francia en 1799, pero no fue hasta principios de los años 70 del siglo XX cuando surgieron proyectos financiados por empresas y gobiernos como los de Japón y Reino Unido. Sin embargo, el lento desarrollo de la tecnología y los enormes costes fueron paralizando unos proyectos que han resurgido en los últimos diez años siguiendo el protocolo de Kioto en cuanto a reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Actualmente, entre los mercados en desarrollo, Australia e Inglaterra reúnen todas las condiciones para un crecimiento inminente, beneficiándose de primera mano del desarrollo y la convergencia tecnológica esperada. Países como Estados Unidos, India, China o Japón están desarrollando diversos sistemas y plantas de producción energética [21].

En general, los sistemas modernos de conversión de energía de undimotriz tienen pocos inconvenientes, y hay perspectivas prometedoras de que algunos de ellos puedan contribuir en la generación de energía de forma importante. De hecho, en lugares del mundo donde el oleaje es intenso y las fuentes de energía convencional son caras, como por ejemplo en las islas aisladas, algunos de estos sistemas son ya competitivos. Para 2020-2030 se espera que haya en operación alrededor del mundo una cierta cantidad de sistemas comerciales, y a medida que se gane experiencia consecuentemente los costes irán disminuyendo.

A pesar de que el potencial energético del mar es enorme, el aprovechamiento de las energías del mar está en una etapa relativamente temprana de desarrollo tecnológico, en comparación con otras fuentes renovables, lo que unido a las características intrínsecas del mar, hacen que para el aprovechamiento de esta fuente de energía no se haya impuesto una tecnología concreta, y que exista una amplia y diversa variedad de dispositivos en diversos grados de desarrollo que deberán confirmar su viabilidad en los próximos años.

La cantidad total de recursos de energía undimotriz varía ampliamente debido a que los océanos no han sido monitorizados por completo durante un periodo lo suficientemente largo de tiempo para establecer un valor razonable. Además, incluso si se pudiera determinar este valor, hay cuestiones difíciles acerca de cuanta de esa energía es económicamente viable dadas las limitaciones de la localización de la tecnología.

Actualmente hay una cierta cantidad de prototipos montados en la costa (onshore), cerca de la costa (nearshore) y en alta mar (offshore) ya planeados o en operación. El refinamiento de los diseños de estos prototipos podría abrir la posibilidad de cosechar grandes cantidades de energía de los océanos, particularmente de las estaciones de oleaje en alta mar, consistentes en decenas o cientos de dispositivos.

## **1.1. Historia**

Después de la crisis energética de 1973, en Reino Unido se inventaron un gran número de conceptos de dispositivos, modelados matemáticamente y probados experimentalmente, con el apoyo de patrocinadores comerciales y del antiguo Departamento de Energía de Reino Unido. Desafortunadamente se asignó insuficiente tiempo y dinero para llevar las diferentes ideas y tecnología asociada a la madurez, y en 1982, el Departamento de Energía redujo el programa de energía undimotriz de Reino Unido.

Algunos de los equipos de investigación involucrados fueron capaces de mantener un esfuerzo mínimo en los proyectos de energía undimotriz. En 1989 se instaló en Islay (Escocia) un prototipo de convertidor de energía undimotriz de columna de agua oscilante de 75 kW, financiado completamente por el Departamento de Energía, siguiendo esta la recomendación de que se debería investigar sobre los dispositivos a pequeña escala como una fuente de energía para las islas aisladas, donde el diésel normalmente proporcionaba la principal fuente de energía.

Mientras tanto, durante este periodo de financiación reducida en el Reino Unido, cierto número de países, principalmente Noruega y Japón, aumentaron sus programas de investigación y desarrollo de energía undimotriz. Con sistemas hidroeléctricos suministrando prácticamente toda su electricidad, Noruega tenía pocas necesidades domésticas inmediatas de energía undimotriz, pero estaba dispuesta a desarrollar un mercado de

exportación para tecnología de energía undimotriz. En contraste, Japón requería más fuentes de energía, pero su clima de olas era muy modesto.

Japón ha dirigido un sustancioso programa de investigación de energía undimotriz, con muchos equipos trabajando en una variedad de proyectos. El posterior pionero Yoshio Masuda, quien es generalmente considerado el inventor de la columna de agua oscilante (OWC, Oscillating Water Column), y a menudo descrito como el padre de la energía undimotriz fue la inspiración detrás del Kaimei, la primera gran estación flotante de energía undimotriz.

En los años 90 hubo un renacimiento de la conciencia acerca del potencial de la energía undimotriz entre políticos y otros en una cierta cantidad de países. En particular, se lanzó una iniciativa de la Unión Europea la cual proporcionaba fondos para un pequeño número de proyectos, y condujo a la formación de la Red Temática de Energía Undimotriz Europea. Entre 1992 y 2002 Thorpe llevo a cabo varios estudios para el Departamento de Comercio e Industria de Reino Unido, y estudiando los principales tipos de dispositivos estimó que la generación de electricidad costaría alrededor de 0,05€ por kWh, basándose en un recurso anual práctico de ola de 30 TWh [1].

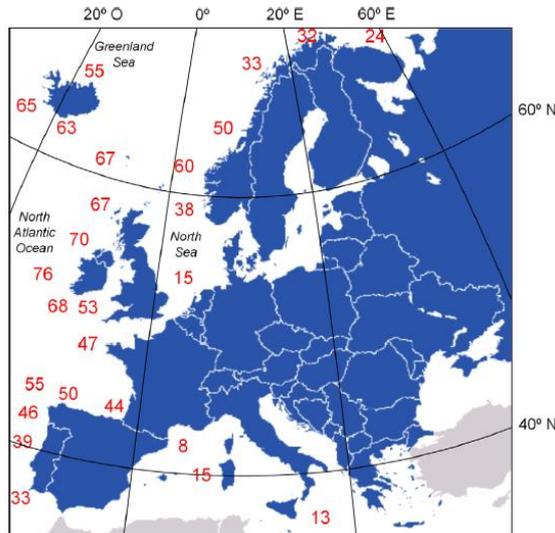
Entre los años 2001 y 2011 hubo una inversión sustancial en el Reino Unido en tecnología de energía undimotriz, tanto de inversores comerciales como del gobierno. Se establecieron dos centros de energía marina, uno en Escocia y otro en Cornualles, los cuales ofrecen instalaciones para que los desarrolladores prueben sus proyectos piloto. Desde entonces ha habido un considerable crecimiento en el interés por la energía undimotriz, especialmente en Escocia e Irlanda, donde yacen los recursos más significativos de energía undimotriz de las islas británicas.

En la última década, la combinación de la necesidad de encontrar una gran fuente de energía limpia y los nuevos conocimientos en ingeniería naval ha provocado un renovado interés en las energías del mar, lo que ha llevado a un resurgimiento de la actividad de innovación y la aparición de diseños de múltiples prototipos. Estos proyectos han sido llevados a cabo inicialmente por la mediana y pequeña empresa en consorcios con las universidades, aunque las grandes empresas privadas y los programas público-privados están cada vez más implicados a gran escala.

El interés internacional y la actividad de desarrollo ha crecido rápidamente en los últimos años, y actualmente más de una docena de países tienen políticas de apoyo específico para el sector de las energías del mar. Además, varios centros de pruebas a escala real ya se han establecido en el Reino Unido, España y Europa continental, y nuevos centros de pruebas están en fase de construcción en los EE. UU. y Canadá. Además, este interés internacional y su crecimiento han conducido a la elaboración de normas internacionales específicamente diseñadas para las energías del mar.

## 2. Energía undimotriz a nivel europeo

España, Portugal, Reino Unido y Noruega son los principales países en los que se está desarrollando tecnología para el aprovechamiento de la energía del oleaje.



*Ilustración 1 Distribución europea media anual de la energía undimotriz en mar abierto (kW/m) [5]*

Un aspecto importante de la evolución de la conversión de energía undimotriz y su industria de apoyo en Europa radica en la estrecha cooperación entre los Estados miembros de la Unión Europea. Tras el éxito y la experiencia anteriores esta cooperación acelerará el desarrollo tecnológico y evitará la superposición de trabajo en Europa.

El papel de la Comisión Europea en este progreso es sustancial. Aunque las tecnologías de energía undimotriz todavía están en mayor o menor medida lejos de la madurez, el potencial de mejora de los indicadores tecnoeconómicos de las tecnologías de conversión de energía de olas es muy grande, mientras que la capacidad de supervivencia y la fiabilidad de muchos dispositivos, en particular para la operación en alta mar, aún no se ha demostrado.

El enfoque de la viabilidad tecnológica, económica, y el mantenimiento de una posición vital para la industria europea en este sector presupone una estrategia coherente y global para la energía de las olas a nivel nacional y de la Unión Europea. [12]

Tanto la costa de Portugal como las islas Azores se encuentran entre las zonas del mundo con mayor potencial de energía undimotriz. Debido a esto, Portugal está siendo uno de los países más centrados en el aprovechamiento energético del oleaje. Entre los proyectos cabe citar el proyecto de Açtuadora, con tres dispositivos Pelamis que cuentan con una potencia instalada total de 2,25 MW, a los que hubo que llevar a cabo mejoras estructurales y de diseño una vez estuvieron instalados. Portugal también cuenta con una planta experimental que utiliza la columna de agua oscilante en la isla de Pico, Azores.

### **3. Energía undimotriz a nivel nacional**

España tiene un gran potencial energético marino, del cual por las características de la costa parece que solo la energía undimotriz dispone de recurso viable de calidad para explotar, aunque también la energía de las corrientes marinas en el sur de la península presenta un gran potencial teórico su viabilidad está muy limitada por las fuertes restricciones impuestas por el tráfico marítimo de la zona.

En cuanto a energía undimotriz, diversos prototipos han comenzado ya a probarse, con el objetivo de que en unos años la fuerza del oleaje pueda convertirse en una fuente de energía renovable más. A continuación, indicamos los principales proyectos en desarrollo en España: [21]

En la costa de Gerona, la empresa ABENCIS SEAPOWER está desarrollando un sistema de generación undimotriz.

En el País Vasco, en julio de 2011 se puso en marcha la primera planta de estas características del mundo con la construcción de un dique en Mutriku (Guipuzcoa), que utiliza tecnología de columna de agua oscilante con 16 turbinas, y cuenta con una potencia instalada total de 300 kW.

En Cantabria, Iberdrola ha desarrollado un prototipo de boya de 40 kW de Ocean Power Technologies, ubicado a 3 km de la costa de Santona. En Cantabria también se está desarrollando el proyecto WAVEPORT, en el que participan varios agentes de distintas nacionalidades y que se va a desarrollar en España dentro del 7º Programa Marco. Se instalará un convertidor de energía undimotriz (absorbedor puntual) a gran escala (PowerBuoy 150), una subestación transformadora submarina para ofrecer la posibilidad de validación de futuros convertidores y un novedoso sistema de medición en tiempo real (Wave-by-wave).

En Canarias se están desarrollando varios proyectos [21]:

- Proyecto WELCOME (Wave Energy Lift Converter España): prototipo a escala 1:5 que transforma la energía de las olas en energía eléctrica, denominado APC-PISYS.
- Proyecto INNPACTO WAVE ENERGY. Dirigido a la mejora de la tecnología APC-PISYS, y a la búsqueda de nuevas aplicaciones.
- Proyecto UNDIGEN: Wedge Global ha llevado a cabo el desarrollo de un innovador Power Take-Off (PTO) eléctrico, basado en un generador lineal de reluctancia conmutada (ausencia de imanes permanentes), que se está aplicando a escala completa con una salida de potencia de 200 kW.

En Galicia, se está desarrollando un proyecto con tecnología Pelamis, una planta en dique con tecnología de columna de agua oscilante, y un proyecto de desarrollo tecnológico nacional PIPO SYSTEM basado en un cuerpo flotante unido a un depósito sumergido, el cual dispone de un volumen de aire encerrado.

En Asturias, existe un proyecto en desarrollo con tecnología nacional HIDROFLOT. El proyecto Calma es un Proyecto singular innovador para el desarrollo de un parque de generación eléctrica de 50 MW mediante el uso de energía undimotriz, compuesto por un conjunto de plataformas, que genera energía eléctrica al crear una diferencia de potencial entre el cuerpo sumergido inmóvil y el cuerpo deslizante del flotador accionado por las olas.

En 2013, la empresa de energías del mar Gijón S.L, inició la solicitud del permiso para situar en aguas de Gijón, unos 1.000 metros al noroeste del dique Torres, una planta generadora de energía undimotriz. La planta estaba compuesta por cuatro barcas, con dos generadores de 1.200 kW cada una, alimentados por un juego de seis boyas alternativas. Cada barcaza podía generar por lo tanto 2,4 MW, y entre las cuatro un total de 9,6 MW lo cual podría permitir alimentar de energía eléctrica limpia a más de 4.000 hogares en Gijón. En el País Vasco se espera obtener de esta forma de energía un 10% de la total consumida, unos 20.000 GW·h/año, precisamente de las olas que les llegan a sus 150 km de costa (un tercio de la asturiana y con olas de menor potencial energético). El comienzo de la instalación de esta planta dependerá de las tarifas eléctricas para las energías renovables [22].

El desarrollo de tecnología nacional para diferentes prototipos, así como la ejecución de varios centros de pruebas, permite pensar en un importante desarrollo industrial en el futuro.

También, existe una apuesta importante del sector empresarial, que cuenta con el apoyo de las distintas administraciones, para promover el desarrollo de las tecnologías adecuadas para el aprovechamiento de la energía de las olas.

OCEANLIDER, es un proyecto CENIT-E de cooperación público-privada en I+D, en el que participan 20 empresas, y 25 centros de investigación y universidades. El proyecto tiene un presupuesto de 30 millones de euros y la subvención aprobada es de más de 14 millones de euros. Su objetivo principal es el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento óptimo de la energía de las olas.

Hoy en día, el camino hacia la competitividad de la industria energética marina se ve marcado por la disparidad de tecnologías, sin que hasta la fecha se pueda saber cuál se desarrollará favorablemente en términos energéticos, económicos y medioambientales.

## **4. Principios físicos de la energía undimotriz**

Las olas del mar se generan por la acción del viento al pasar por largos tramos de agua conocidos como "fetch". Los mecanismos exactos involucrados en la interacción entre el viento y la superficie del mar son complejos y aún no entendidos por completo, pero aparentemente unidos a tres procesos principales:

- a) Inicialmente, el aire que fluye sobre la superficie del mar ejerce un esfuerzo tangencial en la superficie del agua, dando como resultado la formación y el crecimiento de olas.
- b) El flujo de aire turbulento cercano a la superficie del mar crea rápidamente tensiones de cizallamiento variables, y fluctuaciones de presión. Donde estas oscilaciones están en fase con las olas existentes suceden otros desarrollos de ola.
- c) Finalmente, cuando las olas han alcanzado cierto tamaño, el viento puede ejercer una fuerza mayor a barlovento de la ola, causando crecimiento de ola adicional.

Debido a que el viento está originalmente derivado de la energía solar podríamos considerar que la energía de las olas es una forma de moderadamente alta densidad de energía solar. Los niveles de energía solar, los cuales son típicamente del orden de  $100 \text{ W/m}^2$ , pueden ser finalmente transformados en olas con niveles de potencia de más de 100 kW por metro de longitud de cresta. La naturaleza de las olas hace que sea imposible referirse a la potencia por unidad de área: tenemos que considerar que la acción de la ola tiene lugar en toda la profundidad del agua, y entonces consideramos la potencia que pasa a través de toda una rebanada de agua de un metro de ancho. Por lo tanto, no podemos comparar directamente densidades de potencia solar y de ola, pero podemos indicar que la secuencia de energía solar-viento-ola concentra gradualmente la densidad de potencia.

Las olas de mayor altura contienen más energía por metro de longitud de cresta que las olas pequeñas. Generalmente se cuantifica el poder de las olas más bien que su contenido de energía. Una ola regular simple puede ser caracterizada por su longitud de onda,  $\lambda$ ; altura, H; y periodo, T.

- Características y energía de las olas:

La forma de una ola típica se describe como sinusoidal. La diferencia de altura entre picos y valles se conoce como altura, H, y la distancia entre picos o valles sucesivos se conoce como longitud de onda,  $\lambda$ .

Supongamos que los picos y los valles de la ola se mueven a través de la superficie del mar con una velocidad, v. El tiempo en segundos que tardan los sucesivos picos (o valles) en pasar un punto fijo determinado se conoce como el período, T. La

frecuencia,  $f$ , de la ola describe el número de oscilaciones de pico a pico (o de depresión a depresión) de la superficie de la onda por segundo, como lo ve un observador fijo, y es la inversa del período. Es decir,  $f=1/t$ .

Si una ola viaja a una velocidad,  $v$ , más allá de un punto fijo determinado, recorrerá una distancia igual a su longitud de onda en un tiempo igual al período de ola  $T$ . Por lo tanto, la velocidad será igual a la longitud de onda  $\lambda$  dividida por el período, es decir:  $v=\lambda/T$

La potencia,  $P$ , de una ola oceánica idealizada es aproximadamente igual al cuadrado de la altura,  $H$  (metros), multiplicada por el período de ola,  $T$  (segundos):

$$P = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32 \cdot \pi} W \cdot m^{-1} \text{ o (aproximadamente) en } kW \cdot m^{-1}, P \approx H^2 \cdot T \text{ kW} \cdot m^{-1} [1]$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua y  $g$  es la aceleración debida a la gravedad.

- Olas de aguas profundas:

En términos de propagación de olas, el agua se considera "profunda" cuando la profundidad del agua es mayor que aproximadamente la mitad de la longitud de onda,  $\lambda$ . Se puede demostrar que la velocidad de una ola oceánica en aguas profundas es proporcional al período de la siguiente manera:  $v = g \cdot T / 2 \cdot \pi$  [1]

Esto lleva a la aproximación útil de que la velocidad en metros por segundo es aproximadamente 1,5 veces el período de onda en segundos.

Una consecuencia interesante de este resultado es que en las profundidades del océano las olas de longitud de onda larga viajan más rápido que las más cortas. Esto, que se conoce como "dispersión", es una característica única de las olas de aguas profundas que puede conducir a combinaciones de crestas de olas peligrosas y difíciles de predecir. Las ondas largas pueden alcanzar las ondas más cortas anteriores, creando grandes ondas combinadas donde se encuentran.

Si ambas relaciones anteriores se mantienen, podemos encontrar la longitud de onda del agua profunda,  $\lambda$ , para cualquier período de onda dado:  $v = g \cdot T^2 / 2 \cdot \pi$  [1]

- Olas de profundidad intermedia:

A medida que el agua se vuelve menos profunda, las propiedades de las olas se ven cada vez más dominadas por la profundidad del agua. Cuando las olas alcanzan aguas poco profundas, sus propiedades están totalmente reguladas por la profundidad del agua, pero en profundidades intermedias (es decir, entre  $d=\lambda/2$  y  $d=\lambda/4$ ) las propiedades de las olas se verán influenciadas tanto por la profundidad del agua  $d$  como por el período de onda  $T$ .

- Olas de aguas poco profundas:

A medida que las olas se aproximan a la orilla, el lecho marino comienza a tener un efecto sobre su velocidad, y se puede demostrar que, si la profundidad del agua  $d$  es inferior a un cuarto de la longitud de onda, la velocidad viene dada por:  $v = \sqrt{g(d)}$

En otras palabras, la velocidad bajo estas condiciones es igual a aproximadamente tres veces la raíz cuadrada de la profundidad del agua  $d$ , ya no depende del período de la ola.

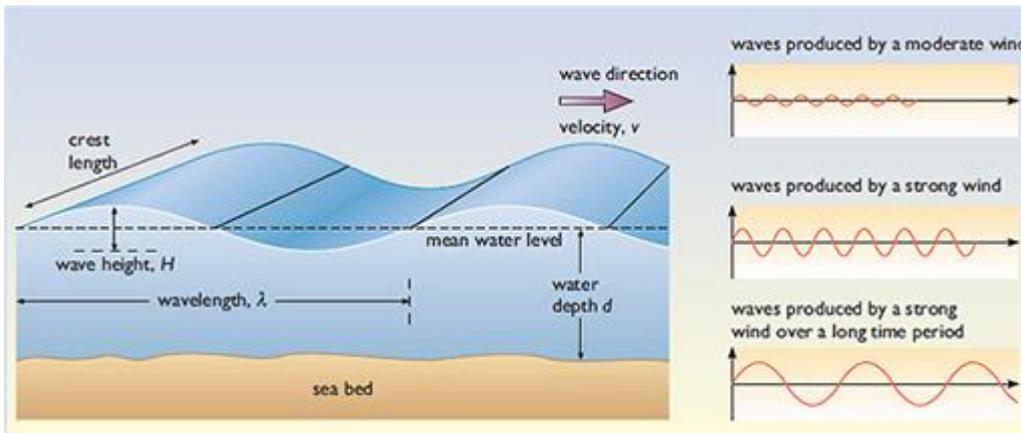


Ilustración 2 Características de una ola idealizada [28]

Las olas ubicadas dentro o cerca de las áreas donde se generan se suelen denominar "mar de viento". Cuando la fuerza y dirección de los vientos cambia, los patrones de ola resultantes pueden volverse bastante complejos. Las olas pueden viajar fuera de estas áreas con una pérdida mínima de energía para producir "olas de oleaje" a grandes distancias de su área de origen. A medida que las olas viajan, existe una tendencia sistemática a que los períodos y las longitudes de onda aumenten, y por lo tanto los mares de oleaje se componen típicamente de olas con período relativamente largo. La altura y la pendiente de las olas generadas por cualquier campo de viento depende de tres factores: la velocidad del viento; su duración; y el fetch, es decir, la distancia a través de la cual la energía eólica se transfiere al océano para formar olas. Cuando hay un viento constante durante un periodo suficiente de tiempo sobre un fetch de distancia lo suficientemente larga se dice que las olas constituyen un mar completamente desarrollado.

## 4.1. Estado típico del mar

Un estado típico del mar está compuesto de muchos componentes individuales, cada uno de los cuales es como la ola idealizada descrita anteriormente. Cada ola tiene sus propias características, es decir, su propio período, altura y dirección. Es la combinación de estas olas la que observamos cuando vemos la superficie del mar, y la potencia total en cada metro de frente de ola de este mar irregular es, por supuesto, la suma de las potencias de cada uno de los componentes individuales. Obviamente, es imposible medir todas las alturas y períodos de forma independiente, por lo que se utiliza un proceso de promedio para estimar la potencia total, de la siguiente manera [1]:

1. Al desplegar una boya de oleaje piloto, es posible registrar la variación en el nivel de la superficie durante el período de tiempo dado. (Los satélites también se usan para detectar alturas de ola).
2. La altura promedio del agua siempre será cero, ya que el valor promedio también define el valor cero, pero podemos obtener una cifra significativa calculando la altura de ola significativa,  $H_s$ . Esta se define como cuatro veces la raíz cuadrada de la elevación media del agua, es decir, las elevaciones instantáneas son los primeros cuadrados, haciendo que todos los valores sean positivos, entonces se calcula la media sobre un número de olas, luego la altura de ola se calcula como cuatro veces la raíz cuadrada de la media. La altura significativa de la ola es aproximadamente igual al promedio del tercio más alto de las olas (lo que generalmente corresponde a la estimación de la altura hecha a ojo, ya que las olas más pequeñas tienden a no notarse).
3. El período de cruce por cero  $T_Z$  se define como el tiempo promedio, contado a lo largo de diez o más cruces para obtener un promedio razonable, entre los movimientos ascendentes de la superficie a través del nivel medio.  
El período de energía,  $T_e$ , es más útil para nosotros, ya que caracteriza la energía en las olas, mientras que  $T_Z$  representa todo el contenido de las olas, incluidos componentes muy pequeños que tienen energía despreciable. El período de energía es ligeramente más largo que el período de cruce por cero:  $T_e \approx 1,12 \cdot T_Z$ .
4. Para un mar típico e irregular, se puede demostrar que la potencia total promedio en un metro de cresta de ola puede ser aproximadamente  $P = 0,5 \cdot H_s^2 T_e$  donde las unidades de P están en kW por metro de longitud de cresta de ola. La aproximación  $P = 0,5 \cdot H_s^2 T_e$  se usa comúnmente.

La ilustración 3 muestra un registro de oleaje típico, dando la altura de ola significativa y el período de cruce por cero. En este ejemplo, la altura de ola significativa  $H_s = 3m$  (de -1,5m a

+1,5m). Los movimientos ascendentes sucesivos de la superficie están indicados con pequeños círculos. En este caso, hay 15 cruces en 150 segundos, por lo que  $T_z = 10$  segundos. Entonces  $T_e = 11,2$  segundos. A partir de esto,  $P = 0,5 \cdot (3^2 \times 11,2) kW \cdot m^{-1} = 50,4 kW \cdot m^{-1}$

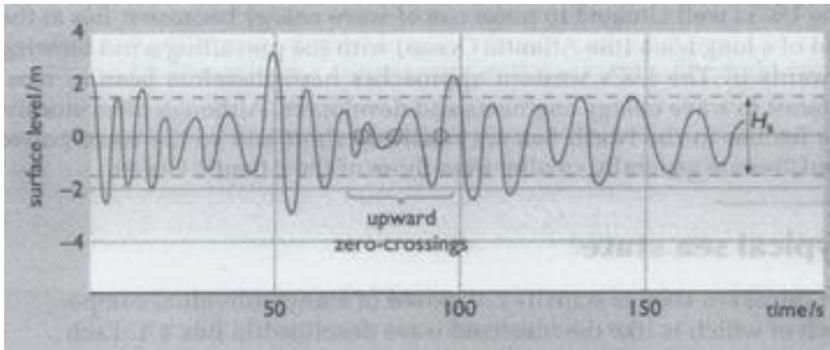


Ilustración 3 Registro de oleaje típico [1]

#### **4.2. Variaciones en la potencia undimotriz en una ubicación determinada**

Los registros del nivel del mar realizados en diferentes momentos o fechas diferirán, dando lugar a diferentes valores de  $H_s$  y  $T_e$ . Supongamos que cada registro representa un período de tiempo de una milésima de año (8,76 horas): si registramos los estados del mar en nuestra ubicación elegida durante un año completo, caracterizando cada uno de ellos por sus valores de  $H_s$  y  $T_e$ , podemos construir una imagen estadística de la distribución de las condiciones de las olas en nuestra ubicación elegida. Esta imagen, o diagrama de dispersión, da las ocurrencias relativas en partes por 1.000 de las contribuciones de  $H_s$  y  $T_e$ . El ejemplo de un diagrama de dispersión que se muestra en la ilustración 4 es para el Atlántico norte, y muestra que las olas en esta ubicación tienen una densidad de potencia media alta. Los números en el gráfico indican el número promedio de ocurrencias de cada combinación de  $H_s$  y  $T_e$  en cada conjunto de mil mediciones de 8,76 horas hechas en un año. Las ocurrencias más frecuentes son  $H_s \approx 2m$ ,  $T_e \approx 9s$ . En aguas de 100 m de profundidad en South Uist (Hebrides, Escocia), por ejemplo, el promedio anual podría ser típicamente alrededor de  $70 kW \cdot m^{-1}$  (o  $613.000 kW \cdot m^{-1}$  por año), mientras que cerca de la costa, donde la profundidad es de 40 m, la cifra correspondiente podría ser de alrededor de  $50 kW \cdot m^{-1}$  (o  $438.000 kW \cdot m^{-1}$  por año).

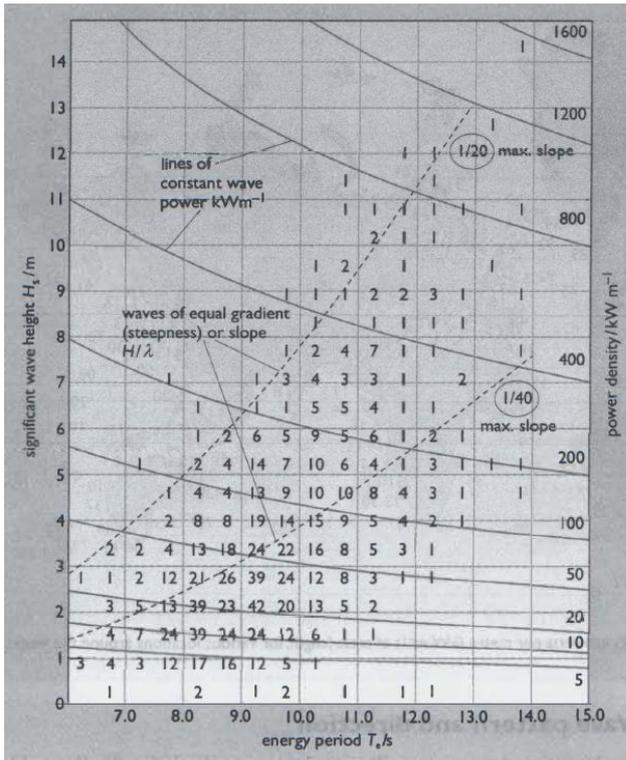


Ilustración 4 Diagrama de dispersión de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) contra el período de energía ( $T_e$ ) para  $58^\circ\text{N}$   $19^\circ\text{W}$  en el medio del Atlántico norte [1]

La ilustración 5 muestra las estimaciones de la densidad de potencia media de las olas en varios lugares del mundo. Las áreas del mundo con mayores recursos de energía undimotriz son aquellas que están sujetas a flujos de viento regulares. Los vientos del sudoeste son comunes en el Océano Atlántico, y con frecuencia recorren grandes distancias, transfiriendo energía al agua para formar las grandes olas que llegan fuera de la costa europea.

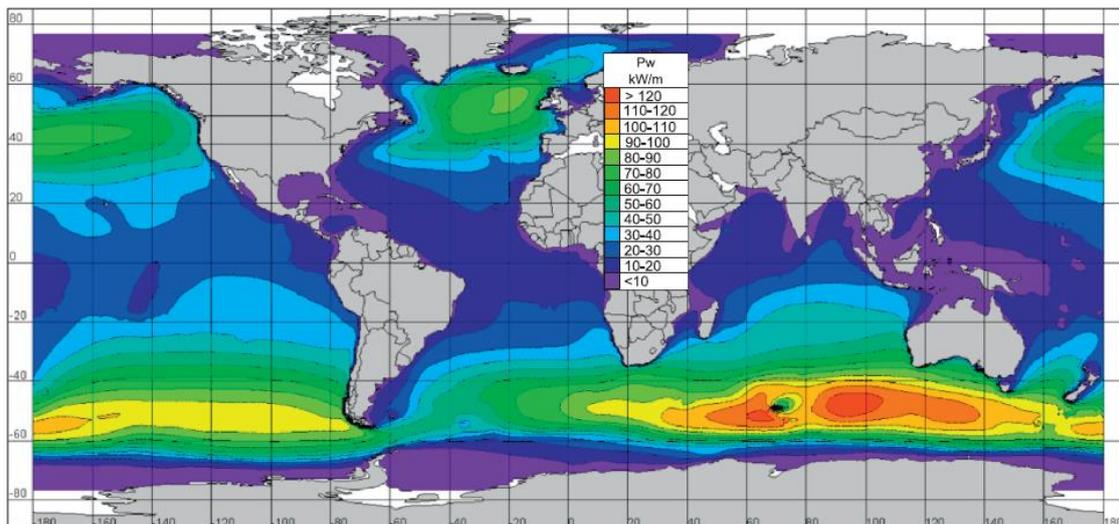
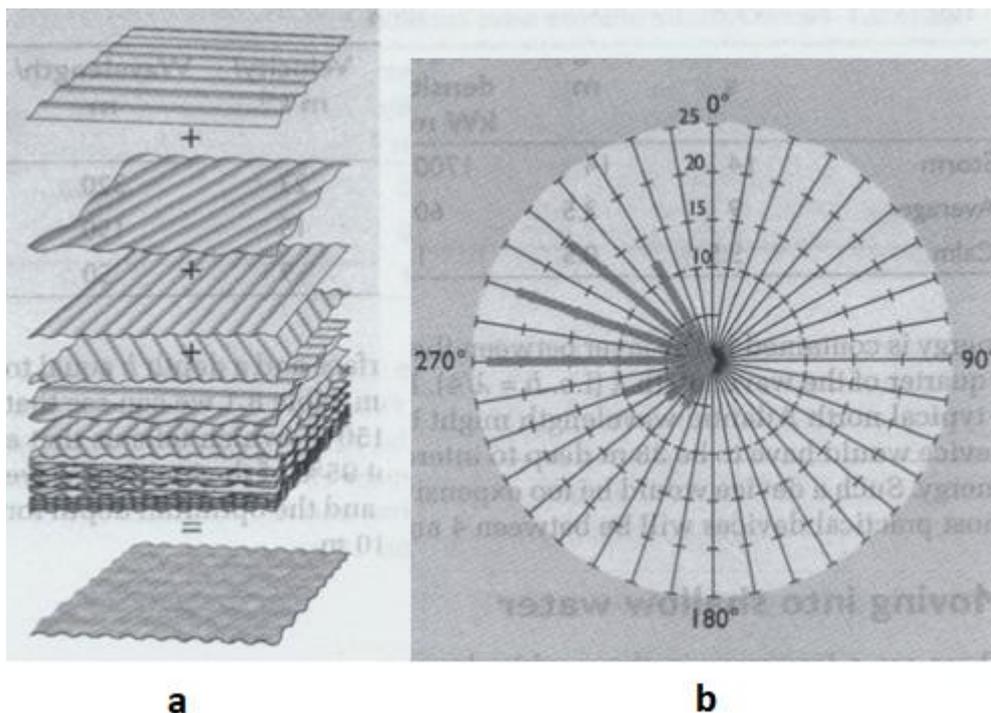


Ilustración 5 Potencia undimotriz media anual en kilovatios por metro ( $\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$ ) de longitud de cresta, para varias ubicaciones en todo el mundo abarcando un periodo de 10 años [5]

### 4.3. Patrón y dirección de ola

La dirección de las olas que viajan en aguas profundas está obviamente dictada por la dirección del viento que las genera. Las olas pueden viajar grandes distancias a través de aguas abiertas sin mucha pérdida de energía. En cualquier ubicación dada, podemos esperar observar olas que llegan de diferentes fuentes y, por lo tanto, direcciones diferentes. Por ejemplo, podríamos ver olas que se acercasen desde el sudoeste producidas por los vientos en el Atlántico medio, pero al mismo tiempo descubrir que algunas olas se habían generado por condiciones de tormenta al sur y al este de nuestra posición. Es fácil imaginar que el patrón de onda resultante será complejo, y de hecho tales patrones se observan comúnmente (ilustración 6a).

Una representación de la potencia media anual en función de la dirección en un lugar determinado puede estar dada por una "rosa direccional" (ilustración 6b). En esta figura la longitud de la línea en cada sector representa la potencia anual promedio en ese sector. En este caso, la mayoría de las olas provienen del oeste



*Ilustración 6 (a) El desarrollo de un complejo mar de olas producido por diferentes condiciones climáticas en diferentes áreas geográficas distantes llega y se combina en el área local (b) Una rosa direccional para las olas [1]*

#### 4.4. Lo que sucede debajo de la superficie del mar

El perfil de la superficie del océano es la evidencia obvia de la existencia de las olas, pero también es necesario comprender la naturaleza subsuperficial de las olas si queremos diseñar sistemas para capturar su energía (ilustración 7).

Las olas están compuestas de partículas de agua orbitando. Cerca de la superficie, estas órbitas son del mismo tamaño que la altura de la ola, pero las órbitas disminuyen de tamaño a medida que avanzamos a más profundidad debajo de la superficie. El tamaño de las órbitas disminuye exponencialmente con la profundidad.

Para capturar la mayor parte de la energía de una ola podríamos tratar de construir un dispositivo lo suficientemente profundo como para interceptar todas las partes en órbita de esa ola. Pero esto sería poco práctico y antieconómico, ya que las órbitas más bajas en realidad contienen muy poca energía. Al decidir lo profunda que debe ser la estructura para extraer la energía de las olas es útil saber que el 95% de la energía de la ola está contenida en la capa entre la superficie y una profundidad  $h$  igual a un cuarto de la longitud de onda;  $\lambda$  (es decir,  $h = \lambda/4$ ). En la Tabla 1 podemos ver que una longitud de onda típica del Atlántico norte puede ser de 150 m, lo que nos dice que un dispositivo tendría que tener 38 m de profundidad para interceptar el 95% de la energía de la onda incidente. El dispositivo sería demasiado caro, y la profundidad óptima más práctica para la mayoría de los dispositivos estará entre 4 y 10 m.

	Periodo/s	Altura/m	Densidad de potencia/ $kW \cdot m^{-1}$	Velocidad/ $m \cdot s^{-1}$	Longitud de onda/m
<b>Tormenta</b>	14	14	1700	23	320
<b>Media</b>	9	3,5	60	15	150
<b>Calma</b>	5,5	0,5	1	9	50

Tabla 1 Condiciones de olas en alta mar en el Atlántico Norte [1]

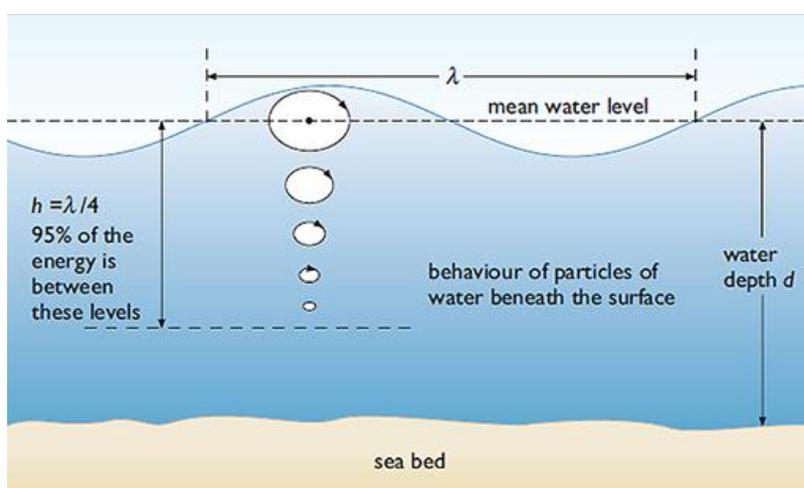


Ilustración 7 Comportamiento de partículas de agua debajo de la superficie [28]

#### **4.5. Movimiento en aguas poco profundas**

Hay algunas áreas del mundo donde la costa está formada por un acantilado que cae en aguas bastante profundas. Estas son las áreas más adecuadas para los convertidores de energía undimotriz montados en tierra, ya que las olas incidentes tienen una alta densidad de potencia. Sin embargo, en la mayoría de las costas del mundo, el agua cercana a la costa es poco profunda. Debido al acoplamiento por fricción entre las partículas de agua en las mayores profundidades con el lecho marino las olas de aguas profundas ceden gradualmente su energía a medida que se mueven hacia aguas menos profundas y eventualmente se desplazan hacia la playa. El efecto de fricción se vuelve significativo cuando la profundidad del agua es inferior a un cuarto de una longitud de onda, y la pérdida de potencia puede ser de decenas de vatios por metro de longitud de cresta por cada metro que la ola recorre sobre la orilla.

Esta pérdida de energía es muy importante, ya que obviamente reduce el recurso total de energía undimotriz. Normalmente, las olas con una densidad de potencia de  $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$  en aguas profundas pueden contener  $20 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$  o menos cuando están más cerca de la costa en aguas poco profundas (dependiendo de la distancia recorrida en aguas poco profundas y la rugosidad del lecho marino). Sin embargo, las olas formadas por tormentas también se atenúan de la misma manera, y es menos probable que destruyan los dispositivos costeros.

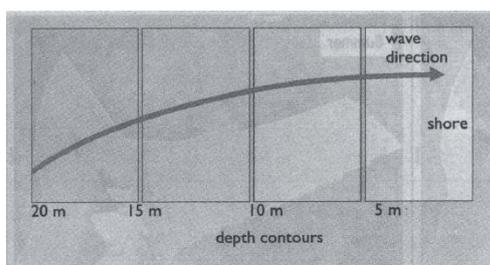
Un mecanismo adicional para la pérdida de energía a medida que las olas recorren la playa es la formación de las olas rompientes, que son turbulentas y disipadoras de energía. Aunque tales olas “rompedoras” son actividades de ocio potencialmente deseables pueden ser muy perjudiciales para estructuras como los convertidores de energía undimotriz, por lo que deben evitarse al elegir ubicaciones adecuadas.

## 4.6. Refracción

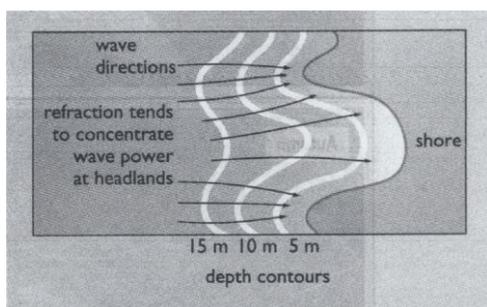
A medida que las olas se aproximan a la orilla, generalmente entran en aguas menos profundas y, como vimos anteriormente, la velocidad de las olas se ve controlada por la profundidad del agua. Aguas menos profundas significan una velocidad de ola más baja. Esto a su vez conduce a la refracción (cambio de la dirección de la onda debido al cambio de la velocidad de la onda).

Por ejemplo, nos podemos imaginar que una cresta de ola se acerca a aguas poco profundas formando un ángulo, de modo que un extremo de la cresta alcanza primero las aguas poco profundas. Esta parte se mueve más lentamente que el resto, cambiando su dirección. El resto de la cresta adopta progresivamente esta nueva dirección ya que su velocidad también se reduce al entrar en aguas poco profundas. El efecto de la refracción, causado por la reducción de la profundidad y, por lo tanto, de la velocidad, cambia gradualmente la dirección de la cresta hasta que sea más o menos paralela a la orilla (ilustración 8).

El conocimiento de los contornos de profundidad alrededor de la costa permite identificar áreas donde se concentran las olas, siendo por lo tanto los desarrollos de energía de ola larga más rentables. Si por ejemplo consideramos una costa con promontorios (ilustración 9) podemos observar cómo la variación de la profundidad del agua, según la muestran los contornos), provoca que se produzca la refracción. Esto concentra las ondas en los promontorios y deja otras áreas con una densidad de oleaje reducida.



*Ilustración 8 A medida que las olas viajan desde aguas profundas a aguas poco profundas, su velocidad se reduce y la refracción resultante generalmente hace que las olas se acerquen a la playa en ángulo recto con respecto a la orilla [1]*



*Ilustración 9 Efectos de concentración de la refracción alrededor de una costa con promontorios [1]*

## **5. Recursos nacionales de energía undimotriz**

Los mares y océanos constituyen el mayor colector solar, y el sistema de almacenamiento de energía más grande del mundo, lo que supone un enorme potencial energético que, mediante diferentes tecnologías, puede ser transformado en electricidad, y de este modo, contribuir a satisfacer las necesidades energéticas actuales.

El recurso energético existente en el mar se manifiesta de distintas formas: oleaje, corrientes marinas, mareas, gradientes térmicos, y diferencias de salinidad, lo que da lugar a las diferentes tecnologías claramente diferenciadas para el aprovechamiento de la energía del mar: energía de las mareas o mareomotriz, energía de las corrientes, energía maremotérmica, energía de las olas o undimotriz, y energía azul o potencia osmótica.

El potencial mundial estimado de producción anual de energía eléctrica procedente de las energías del mar es de unos 120.000 TWh/año [21], una cantidad semejante al consumo actual de energía eléctrica a nivel mundial. De todos modos, esta cifra es pequeña comparada con el potencial eólico a nivel mundial, y este a su vez es pequeño comparado con el potencial de la energía solar a nivel mundial.

También el hecho de que la energía de las olas sea más persistente que la energía eólica estimula la motivación y la esperanza de desarrollar tecnología para aprovechar energía undimotriz, aún no desarrollada, para alcanzar un nivel maduro y próspero en el futuro.

España posee un importante potencial energético marino, del que, por las características de nuestra costa, la energía undimotriz dispone de recurso de gran calidad para su viabilidad y desarrollo. En cuanto al potencial: [21]

- Galicia presenta los valores de potencial de energía más elevados, con potencias medias en profundidades indefinidas entre 40-45 kW/m.
- El Mar Cantábrico es la siguiente zona del litoral en cuanto a recurso (alrededor de 30 kW/m disminuyendo de oeste a este).
- En tercer lugar, la fachada norte de las Islas Canarias (con 20 kW/m).
- La fachada sur de las Islas Canarias, junto con el Mediterráneo español y el Golfo de Cádiz presentan valores medios anuales menores a 10 kW/m.

Los resultados obtenidos en profundidades indefinidas van disminuyendo progresivamente a medida que el calado disminuye, aunque en algunas áreas se producen concentraciones locales motivadas por la configuración de la costa y de la batimetría.

Existe una fuerte estacionalidad en la potencia media, pudiendo presentarse en invierno potencias medias de 75 kW/m (Galicia), 50 kW/m (mar Cantábrico) y 35 kW/m (Norte de Canarias).

## **6. Tecnología para el aprovechamiento de la energía undimotriz**

La conversión primaria de la energía undimotriz se puede describir de la siguiente manera: como resultado de la interferencia destructiva de la ola, la energía se transfiere desde el mar hacia el sistema oscilante, donde se puede encontrar como energía cinética y/o potencial.

La tecnología para el aprovechamiento de la energía de las olas se encuentra todavía en un estado incipiente, que necesita un mayor desarrollo para ser más competitiva, en comparación con otras energías renovables. Este estado tecnológico pre-comercial está marcado por grandes oportunidades de futuro, pero también por numerosas barreras técnicas.

Las diferentes propuestas y principios para la conversión de energía de olas se pueden clasificar de varias maneras. Esto es útil para ver las diferencias y similitudes entre convertidores de energía de olas (Wave Energy Converter, WEC). Se pueden clasificar, por ejemplo, según su ubicación (en alta mar, cerca de la costa o en la orilla, flotante, sumergido o de pie), según el tipo de maquinaria de conversión de energía (mecánica, hidráulica, neumática o directamente eléctrica), y según el tipo de energía para uso final (electricidad, bombeo de agua, desalación de agua de mar, refrigeración, calentamiento de agua, propulsión).

Los WEC también se pueden clasificar según su extensión horizontal y orientación. Si la extensión es muy pequeña en comparación con la longitud de onda típica, el WEC se denomina absorbedor puntual. Por el contrario, si la extensión es comparable o mayor que una longitud de onda típica, el WEC se denomina absorbedor de línea, pero los términos atenuador y terminador se usan con mayor frecuencia. Un absorbedor de línea se denomina atenuador o terminador si está alineado en paralelo o perpendicular a la dirección predominante de propagación de la onda, respectivamente. Un primer ejemplo de un terminador fue propuesto por Salter, mediante un convertidor de energía de oleaje formado por varias aletas cabeceando con respecto a un cilindro horizontal común, la llamada espina dorsal (Salter's Duck). Se consideró necesario dividir el largo cilindro en secciones cilíndricas más cortas, articuladas entre sí. Este desarrollo ha evolucionado hacia el sistema Pelamis, que es de tipo atenuador. Un dispositivo típico del tipo absorbedor puntual es un cuerpo simétrico oscilante, un volumen pulsante sumergido, como el dispositivo AWS, o un dispositivo de columna de agua oscilante (OWC) situado en mar abierto. La mayoría de los dispositivos OWC propuestos tienen una toma de fuerza neumática.

Actualmente son muchos los dispositivos que se están desarrollando, tanto a pequeña como a escala real, contabilizándose más de un millar de patentes de convertidores de energía undimotriz en Japón, América del Norte y Europa, cuyo reto es tanto lograr una tecnología

capaz de extraer energía del oleaje, como demostrar la funcionalidad de los dispositivos en el mar a corto plazo y la fiabilidad de estos a medio plazo.

Para capturar la energía de las olas del mar es necesario interceptar las olas con una estructura que reaccione de manera apropiada a las fuerzas que le aplican las olas. En el caso de un dispositivo montado en la orilla, como por ejemplo el TAPCHAN y la mayoría de los dispositivos de columna de agua oscilante, la estructura está firmemente fijada al lecho marino, y las olas hacen que el agua se mueva de manera útil. En otro tipo de dispositivos, una parte de la estructura puede ser fija, tal vez anclada al lecho marino, pero otra parte puede ser un flotador que se mueve en respuesta al oleaje tirando de un ancla. En este segundo caso, el movimiento relativo entre el ancla y el flotador brinda la oportunidad de extraer energía. También se pueden emplear estructuras flotantes muy flojamente amarradas, pero se debe establecer un marco de referencia estable para que la parte "activa" del dispositivo se mueva con respecto a la estructura principal. Esto se puede lograr aprovechando la inercia, o haciendo que la estructura principal sea tan grande que abarque varias crestas de ola y, por lo tanto, se mantenga razonablemente estable en la mayoría de los estados del mar.

Según su comportamiento dinámico, los convertidores se pueden clasificar en:

**Activos:** los elementos de la estructura se mueven como respuesta a la ola y se extrae la energía utilizando el movimiento relativo que se origina entre las partes fijas y móviles.

**Pasivos:** la estructura se fija al fondo del mar o en la costa y se extrae la energía directamente del movimiento de las partículas de agua.

Según el principio de captación de energía del dispositivo, se pueden clasificar por:

**Diferencias de presión en un fluido:** son dispositivos basados en el aprovechamiento de la diferencia de presión en un fluido creada por el oleaje, normalmente aire, que opera como medio de transferencia. En la actualidad se pueden destacar dos tipos principales: columna de agua oscilante (Oscillating Water Column, OWC), y de efecto Arquímedes (AWS).

**Cuerpos flotantes:** son dispositivos constituidos por un cuerpo flotante que es movido por las olas. El movimiento oscilatorio aprovechado puede ser vertical, horizontal, en torno a un eje (cabeceo) o una combinación de los anteriores. Por otra parte, este movimiento puede ser absoluto entre el cuerpo flotante y una referencia fija externa (anclaje al fondo o lastre) o bien movimiento relativo entre dos o más cuerpos, siendo los primeros los más abundantes. En estos casos, los esfuerzos a los que son sometidos los amarres son importantes; además, estos dispositivos son sensibles a las mareas, y su instalación y mantenimiento resultan complejos. De todos los dispositivos existentes, el que está en una fase más avanzada de desarrollo es el Pelamis, de la compañía escocesa Pelamis Wave Power.

**Sistemas de rebosamiento y/o impacto:** son dispositivos en los cuales las olas inciden sobre una estructura, lo que consigue aumentar su energía potencial, su energía cinética o ambas. Los sistemas de rebosamiento fuerzan a que el agua pase por encima de la estructura mientras que en los de impacto las olas inciden en su estructura articulada o flexible que actúa de medio de transferencia. Se conocen sistemas de rebosamiento *onshore* y *offshore*. Los primeros no son muy frecuentes ya que requieren la conjunción de una serie de características naturales en el emplazamiento y el coste de la obra civil es elevado. Un sistema de rebosamiento puede incluir o no un depósito que almacene agua. Los dispositivos que almacenan agua en un depósito a cierta altura utilizan algún tipo de concentrador (canal en cuña o parábola) para incrementar la altura de las olas. Un sistema *offshore* representativo es Wave Dragon, desarrollado en Dinamarca por la empresa del mismo nombre. Por su parte, los sistemas de impacto suelen utilizar una pala articulada o una bolsa flexible como medio de transferencia. Existen dispositivos tanto *nearshore* como *offshore*. Un sistema *nearshore* representativo de tipo aleta es el Oyster, desarrollado por la compañía escocesa Aquamarine Power.

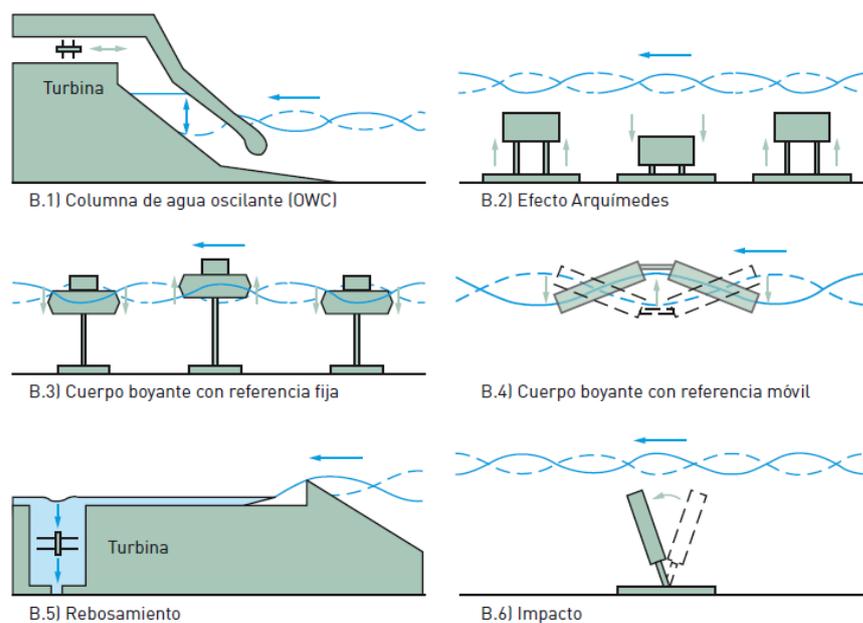
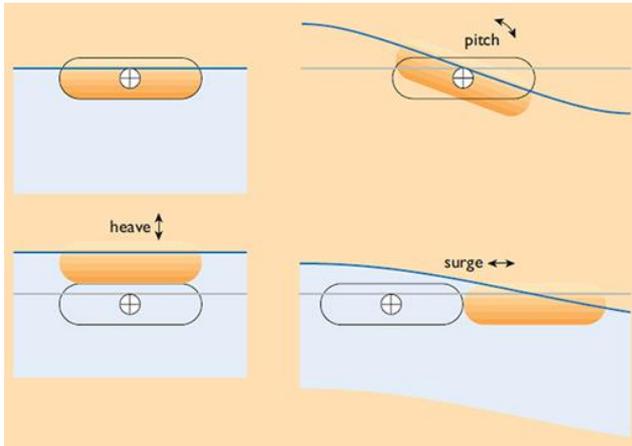


Ilustración 10 Clasificación de los convertidores de energías del mar según su principio de captación [21]

Como decíamos antes, un cuerpo en el mar sujeto al oleaje puede responder a través de seis tipos de movimiento. Estos son deriva, balanceo y guiñada, que generalmente no están incorporados en la tecnología de conversión de energía undimotriz, y oscilación vertical, oscilación longitudinal y cabeceo (ilustración 11), los cuales se aprovechan en diversos grados en la mayoría de los convertidores de energía undimotriz. Estos tres modos de movimiento se pueden definir de la siguiente manera:

- **Cabeceo:** las olas hacen que el dispositivo, o parte de este gire alrededor de su eje.

- **Oscilación vertical:** las olas hacen que el dispositivo suba y baje verticalmente. Se aprovecha el movimiento alternativo vertical de las olas con estructuras flotantes.
- **Oscilación longitudinal:** las olas hacen que el dispositivo se mueva horizontalmente hacia adelante y hacia atrás. Se aprovecha la velocidad horizontal del agua mediante un obstáculo.



*Ilustración 11 Respuestas de cabeceo, oscilación vertical y oscilación longitudinal de un objeto flotante a las olas incidentes [28]*

Es fácil imaginar un dispositivo que se eleva, subiendo y bajando con las olas, pero tales dispositivos tienen una frecuencia natural demasiado alta para ser particularmente efectivos. Los dispositivos de oscilación longitudinal tienden a tener una frecuencia natural baja y, por lo tanto, pueden responder a un amplio rango de frecuencias de ola. En teoría, las oscilaciones longitudinales son dos veces más enérgicas que las verticales, lo que hace que sea preferible utilizar el componente de oscilación longitudinal de olas.

Los criterios económicos exigen que los dispositivos sobrevivan en el mar durante al menos cinco años. Durante ese tiempo, algunos de sus componentes deberán ejecutar entre 15 y 30 millones de ciclos, lo que impone severas restricciones en cuanto selección de materiales y niveles de tensión. Una estructura diseñada para operar con una densidad de potencia undimotriz de diseño particular también tendrá que soportar tormentas con densidades de potencia de diez a treinta veces más altas que la del valor de diseño.

El tamaño físico de la estructura de un convertidor de energía undimotriz es un factor crítico para determinar su rendimiento. El tamaño apropiado puede estimarse considerando el volumen de agua involucrado en las órbitas superiores de las partículas en una ola. En la mayoría de los casos, un convertidor de energía undimotriz tendrá que tener un volumen barrido que sea similar a este volumen de agua para capturar toda la energía contenida en la ola. A continuación, discutiremos sobre una variedad de conceptos de energía undimotriz. El tamaño físico y la forma precisos de cada dispositivo se regirán por su modo de operación, pero como guía aproximada, el volumen barrido debe ser del orden de varias

decenas de metros cúbicos por cada metro del ancho del dispositivo. Un dispositivo con un volumen barrido más pequeño que este tendría una limitación en la energía total que podría capturar de cada ciclo de ola típico: aunque todavía podría ser capaz de capturar la mayor parte de la energía de las olas pequeñas, estaría restringido en su respuesta a olas más grandes, lo que reduce su eficiencia general.

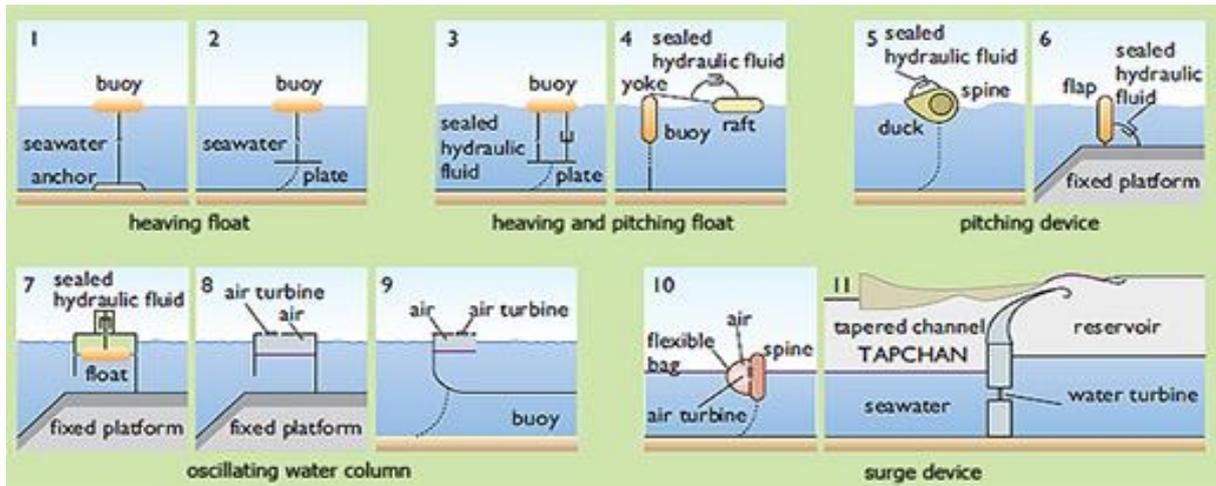


Ilustración 12 Representación esquemática de varios tipos de convertidor de energía undimotriz [28]

Hay muchas configuraciones diferentes de convertidores de energía undimotriz, y se han propuesto varias formas de clasificarlas. Un enfoque es clasificar por modo de operación (ilustración 12).

Otro enfoque es considerar la ubicación del dispositivo (ilustración 13); aquí las tres clasificaciones generales son:

**-Dispositivos montados en la orilla (onshore):** son dispositivos apoyados en la costa en acantilados rocosos, integrados en estructuras fijas como diques rompeolas o sobre el fondo en aguas poco profundas (por ejemplo, el TAPCHAN). Tienen la ventaja de estar cerca de la red de servicios públicos, ser fáciles de mantener y, debido a que las olas se atenúan al viajar a través de aguas poco profundas, tienen una probabilidad reducida de sufrir daños en condiciones extremas. De esto se deduce una de las desventajas de los dispositivos montados en la orilla: que el agua poco profunda conduce una menor energía de oleaje. El rango de mareas también puede ser un problema. Además, debido a la naturaleza de su ubicación, existen requisitos específicos del sitio que incluyen la geometría de la costa, la geología y la preservación del paisaje costero, por lo que los dispositivos no pueden diseñarse para su producción en masa.

**-Dispositivos cercanos a la costa (nearshore):** son dispositivos ubicados en aguas poco profundas (podría ser una profundidad de menos de un cuarto de longitud de onda, 10-40m) y distanciados de la costa unos cientos de metros. Estas profundidades moderadas son

apropiadas para dispositivos de gran tamaño apoyados por gravedad sobre el fondo o flotantes (por ejemplo, Oyster). Los dispositivos en esta ubicación a menudo se unen al lecho marino, lo que proporciona una base estacionaria adecuada contra la cual puede funcionar un cuerpo oscilante. Al igual que los dispositivos onshore, una desventaja es que las aguas poco profundas producen olas con una potencia reducida, lo que limita el potencial de aprovechamiento.

**-Dispositivos en alta mar (offshore):** son dispositivos flotantes o sumergidos ubicados en aguas profundas (40-100m). Son el tipo de convertidores más prometedor, debido a que explotan el mayor potencial energético existente, el cual se encuentra en alta mar (por ejemplo, el sistema Wave Dragon). La ventaja de ubicar un convertidor de energía undimotriz en aguas profundas es que puede cosechar mayores cantidades de energía debido al mayor contenido de energía en las olas de aguas profundas. Sin embargo, los dispositivos en alta mar son más difíciles de construir y mantener, y debido a la mayor altura de las olas y su gran energía, deben diseñarse para sobrevivir en condiciones extremas, lo que agrega costes a la construcción. A pesar de esto, se argumenta que, con olas más potentes, los dispositivos flotantes en aguas profundas ofrecen una mayor economía estructural. Señalemos en este punto que resulta útil darse cuenta de que la energía de las olas se produce con los movimientos de agua cerca de la superficie del mar. Por lo tanto, hasta el 95% de la energía en una ola se encuentra entre la superficie del agua y un cuarto de una longitud de onda debajo de ella.

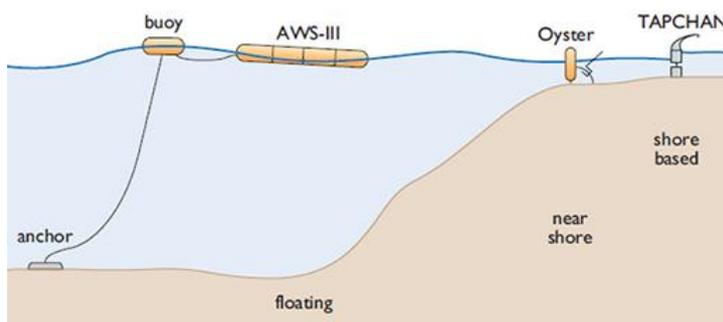


Ilustración 13 Clasificación de los convertidores de energía undimotriz conforme a su localización [28]

Alternativamente, se puede usar la geometría y la orientación del convertidor de energía undimotriz (ilustración 14). Aquí las opciones son:

**-Absorbedores puntuales:** son estructuras pequeñas en comparación con el tamaño de la ola incidente, suelen ser cilíndricas (simetría axial), y son capaces de captar no solo la energía de la porción de la ola directamente incidente, sino también la de un entorno más o menos amplio. Por lo general, al ser sensibles a las olas desde todas las direcciones, no necesitan libertad para orientarse a las olas entrantes, por lo que generalmente pueden

amarrarse firmemente. Generalmente se colocan varios absorbedores puntuales agrupados formando una línea. Como ejemplos tenemos los de tipo boya, como el sistema AquaBuoy de la compañía irlandesa Finavera Renewables, o PowerBuoy de la empresa estadounidense Ocean Power Technologies.

La teoría del absorbedor puntual sugiere que, si se supone que el cuerpo es pequeño con respecto a la longitud de onda, la potencia que puede absorber está relacionada con la longitud de onda, y no con el tamaño del cuerpo. Por lo tanto, en teoría, el absorbedor puntual ofrece al diseñador del convertidor la oportunidad de crear un pequeño dispositivo capaz de absorber grandes cantidades de energía desde fuera de sus límites físicos. Teóricamente, la potencia máxima,  $P_{max}$ , absorbida por un absorbedor puntual perfecto está determinada por el modo (oscilación vertical u horizontal) en el que oscila, y está dada por:

$$P_{max} = \xi \cdot \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right) \cdot P_i [1]$$

Donde  $P_i$  es la potencia de la ola incidente por metro de longitud de cresta, y  $\xi$  es 1 para un dispositivo de oscilación vertical y 2 para un dispositivo de oscilación longitudinal. Es importante tener en cuenta que, a partir de esta ecuación, un cuerpo que oscila longitudinalmente es teóricamente capaz de absorber el doble de potencia que un cuerpo que oscila verticalmente, y que para ambos podría ser varias veces la potencia incidente en el ancho del dispositivo.

En teoría, un absorbedor puntual de energía undimotriz perfecto que responda a un movimiento oscilante vertical podría capturar la energía de un frente de onda con una longitud igual a  $\lambda/2\pi$  metros. Por ejemplo, una ola con un período de 6 segundos tendría una longitud de onda de entre 56 m y 72 m, dependiendo de si el agua es profunda o poco profunda, por lo que un absorbedor puntual perfecto (de 1 m de ancho) absorbería la energía de un ancho de entre aproximadamente 9 m y 12 m. Sin embargo, en la realidad, el ancho de captura es mucho menor debido a las limitaciones de la amplitud vertical del movimiento del absorbedor.

Estos dispositivos tienen una relación de ancho de captura, es decir, la relación entre el diámetro aparente y el diámetro físico es mayor de 1.

El concepto de enclavamiento, o de mantener el flotador bajo el agua por un segundo más o menos antes de permitir que siga la ola, se ha desarrollado para maximizar la captura de energía al permitir una gran amplitud de movimiento del flotador, lo cual es necesario para el rendimiento óptimo.

**-Totalizadores o terminadores:** son dispositivos alargados situados perpendicularmente a la dirección de avance de la ola. Tienen su eje principal paralelo (o casi paralelo, ya que un ligero ángulo ayuda a aumentar la estabilidad de todo el cuerpo) al frente de la ola incidente,

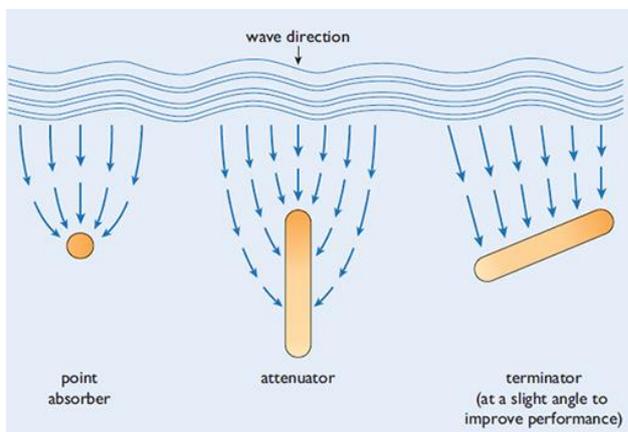
e interceptan físicamente las olas, captando esta de una sola vez. Ejemplos: Rectificador Russell, Salter Duck's...

Dependiendo de la profundidad, un dispositivo de 300 m de longitud, por ejemplo, en un clima de olas de 60 kW por metro intercepta así hasta  $300 \times 60 \text{ kW} = 18.000 \text{ kW}$ . Normalmente, 1/3 de esto se puede convertir en electricidad (es decir, 6.000 kW). El terminador podría estar amarrado a una boya y un ancla principales, lo que permite que el terminador pivote a medida que cambia la dirección de la ola.

**-Atenuadores:** también se denominan absorbedores lineales. Consisten en estructuras alargadas, colocadas en paralelo a la dirección de avance de las olas, de forma que van extrayendo energía de modo progresivo y direccional. Ejemplo: Pelamis.

Los atenuadores tienen su eje principal perpendicular al frente de ola, de modo que la energía de las olas se extrae gradualmente hacia el dispositivo a medida que las olas se mueven a lo largo de él. Una boya y un anclaje principales permiten que el dispositivo gire y se oriente a la dirección principal de la ola.

Una serie de terminadores o atenuadores requerirá un espacio suficiente entre los dispositivos individuales para permitirles balancearse sobre sus amarres sin abordar a sus vecinos.



*Ilustración 14 Clasificación de los convertidores de energía undimotriz según tamaño y orientación [28]*

Debido a que los dispositivos a escala completa son generalmente muy grandes, como resultado de la necesidad de estar en una escala similar a las longitudes de onda que capturan, la mayoría de los desarrollos de tecnología de energía undimotriz implican la prueba de modelos a escala, lo cual es una desventaja a la hora de construir prototipos.

## **6.1. Estudio de casos preliminares**

El dispositivo TAPCHAN es particularmente valioso porque incorpora un elemento de almacenamiento, y el concepto de columna de agua oscilante (OWC) es importante porque ya ha sido desplegado en una serie de países, representando así la forma más común de convertir energía undimotriz desarrollado hasta la fecha, probablemente debido a la simplicidad y robustez de su diseño.

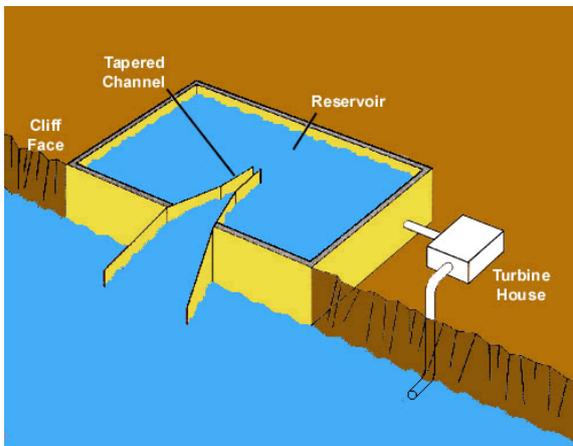
Los prototipos de litoral son generalmente del tipo de columna de agua oscilante. Normalmente se consideran más fáciles de construir y mantener que los dispositivos offshore, pero en la práctica cada dispositivo montado en la orilla tendría que ser construido específicamente para encajar exactamente en ubicaciones determinadas, mientras que los dispositivos offshore pueden potencialmente construirse en grandes cantidades en instalaciones de producción. Esto debería finalmente conducir a estructuras ensambladas de gran volumen, calidad y bajo coste, que podrían ser remolcadas hasta su despliegue en estaciones de oleaje bajo condiciones de mar en calma. Mediante el uso como estación de oleaje de un área de océano en alta mar de unos pocos kilómetros debería ser posible desplegar una gran formación de convertidores de energía undimotriz, capturando así una gran cantidad de energía, la cual podría ser transmitida de vuelta a la costa a través de cables submarinos. Los dispositivos offshore pueden cosechar grandes cantidades de energía, ya que las olas en aguas profundas tienen una mayor densidad de potencia que en aguas poco profundas cercanas a tierra.

### **6.1.1. TAPCHAN.**

En 1985 un prototipo de 350 kW de convertidor de energía undimotriz denominado TAPCHAN, construido por la compañía Norwave, comenzó a operar en una pequeña isla noruega unos 40 km al noroeste de Bergen.

El nombre TAPCHAN viene del diseño “Tapered Channel” (Canal Inclinado) del sistema (ilustración 15). El primer, y hasta el momento único, ejemplo tenía un canal con un colector de forma convergente de 40 metros de ancho. Las olas entraban al colector alimentado en el extremo ancho del canal cónico, inclinado hacia arriba, donde las olas se propagan hacia el extremo estrecho con aumento de la altura de ola. Las paredes del canal en el prototipo medían 10 m de altura (desde 7 m por debajo del nivel del mar hasta 3 m por encima) y 170 m de largo. Debido a que las olas eran forzadas a pasar por un canal cada vez más estrecho su altura se amplificaba hasta que las crestas se derramaban sobre las paredes en el depósito a 3 metros sobre el nivel medio del mar. De esta forma se convertía la energía cinética de las olas en energía potencial, y posteriormente en electricidad, dejando al agua

del depósito volver al mar a través de un sistema de turbina Kaplan de baja altura. Este sistema accionaba un generador que entregaba potencia a la red noruega [1].



*Ilustración 15 El dispositivo de conversión de energía undimotriz de canal cónico TAPCHAN [23]*

El concepto del TAPCHAN es sencillo. Al tener pocas partes móviles su coste de mantenimiento es bajo y su fiabilidad elevada. El depósito de almacenamiento también ayuda a suavizar la salida eléctrica.

Las olas del océano tienen una naturaleza aleatoria, por lo tanto, la mayor parte de los convertidores de energía undimotriz producen una potencia de salida fluctuante. En contraposición, un dispositivo TAPCHAN recolecta olas en un depósito, y de este modo la salida de la turbina Kaplan depende de la diferencia relativamente constante entre los niveles de agua entre el depósito y el nivel del mar. Por lo tanto, un dispositivo TAPCHAN tiene una capacidad integral de almacenamiento la cual generalmente no se encuentra en otros convertidores de energía undimotriz.

En los años 90, Norwave examinó diferentes métodos para reducir el coste de construcción de los sistemas TAPCHAN. Entre esos métodos se encontraba un sistema de predicción de oleaje, que permitía a la turbina Kaplan funcionar con una salida de potencia mayor durante un corto periodo de tiempo, antes de la llegada de un gran número de olas grandes. De esta forma se reducía el nivel de agua en el depósito y se hacía espacio para las olas grandes. Esta técnica podría permitir a los diseñadores construir sistemas con depósitos más pequeños y de este modo reducir los costes de construcción. Un segundo método de reducción de costes que ha sido propuesto es fabricar un canal más corto. Este método se probó en el prototipo que había en Bergen mediante la reducción de la longitud del canal existente. Desafortunadamente hubo algunas dificultades técnicas dinamitando el hormigón del canal, y los consiguientes problemas comerciales dieron como resultado que este prototipo ya no esté en funcionamiento.

### 6.1.2. Las columnas de agua oscilantes de la costa litoral de Islay

A mediados de la década de 1980, la Universidad de Queen, Belfast, trabajó en el desarrollo de un dispositivo de columna de agua oscilante (OWC, Oscillating Water Column). Después de estudiar varias islas escocesas se escogió la de Islay para el primer sistema de columna de agua oscilante, el cual se instaló en un barranco natural en 1989. Este sistema suministró electricidad a la red local de forma intermitente procedente de un generador de 75 kW desde 1991 hasta que se puso fuera de servicio en 1999.

El enfoque consistía en desarrollar un dispositivo el cual podría construirse a bajo precio en las islas usando la tecnología y la planta localmente disponible. La parte principal de la columna de agua oscilante consistía en una cámara cerrada en forma de cuña, hecha de componentes modulares de hormigón prefabricados, la cual se situaba encima de un barranco natural. Esta cámara estaba inclinada hacia abajo por debajo de la superficie del mar, y el movimiento de la ola movía la columna de agua que quedaba atrapada dentro de la parte inferior de la cámara hacia arriba y abajo como un pistón. Un tubo cilíndrico conectado a la atmósfera permitía al aire ser expulsado y admitido en la cámara. De esta manera (hacia y desde la atmósfera), el aire accionaba una turbina Wells, la cual estaba directamente acoplada a un generador eléctrico.

Con la experiencia adquirida del proyecto de barranco natural, el equipo de la Universidad de Queen colaboró con la empresa de Inverness Wavegen para desarrollar lo que ellos denominaban columna de agua oscilante de “barranco de diseño”, para superar algunas de las limitaciones del primer proyecto de Islay. Las modificaciones principales que se aplicaron a la segunda columna de agua oscilante de Islay, llamada LIMPET (Land Installed Marine Powered Energy Transformer, Transformador de Energía de Acionamiento Marino Instalado en Tierra), eran en el método de construcción y la forma de la columna oscilante.

El barranco de diseño se excavaba detrás de una pared de roca natural, la cual solo se quitaba al final de la instalación. En cuanto a la columna de agua, la cámara en el primer oscilador de columna de agua tenía un suelo horizontal y ángulos rectos a la pared posterior, causando turbulencia y la consiguiente pérdida de energía dentro de la misma cámara. Para mejorar el flujo de agua, dentro y fuera de la cámara oscilante, la parte principal de la cámara de la columna de agua oscilante del barranco de diseño se construía en pendiente con el fin de cambiar de manera eficiente el movimiento del agua de horizontal a vertical y viceversa (ilustración 16).

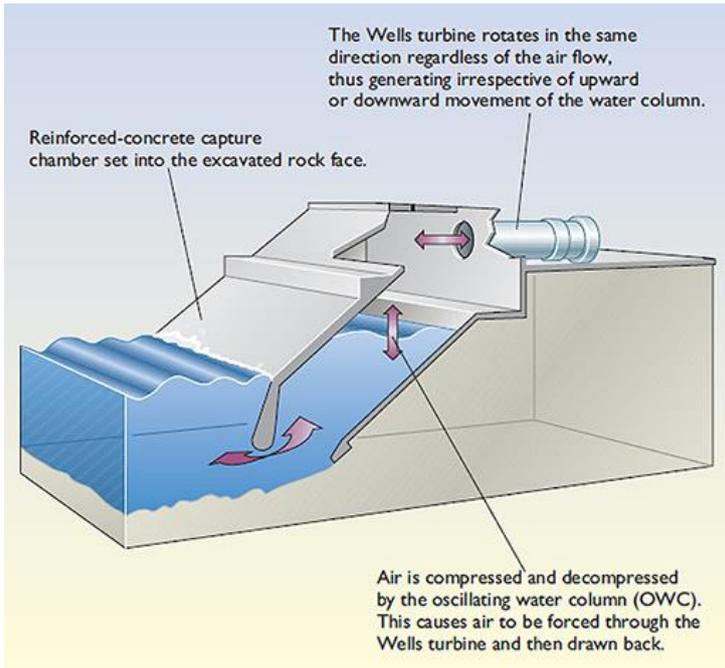
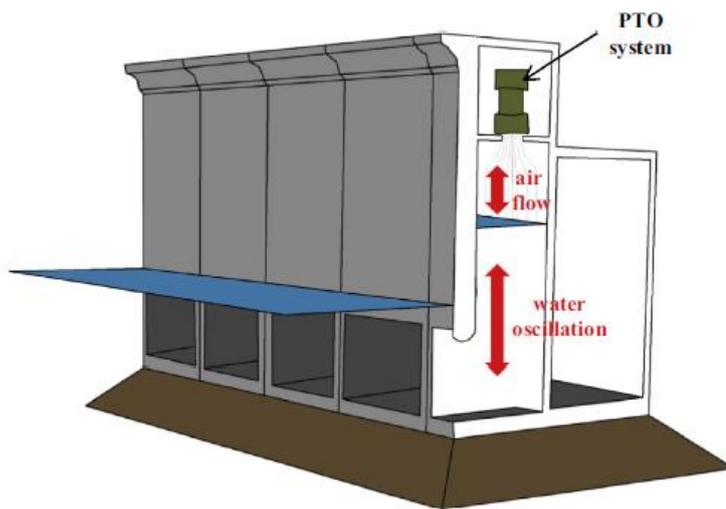


Ilustración 16 Descripción del dispositivo LIMPET en Islay [28]

Esquema y matriz de potencia de un convertidor de energía undimotriz de columna de agua oscilante (OWC), en la que se da el rendimiento del convertidor, expresado en tanto por ciento, para cada uno de los valores de altura y período de ola que le entra al aparato:

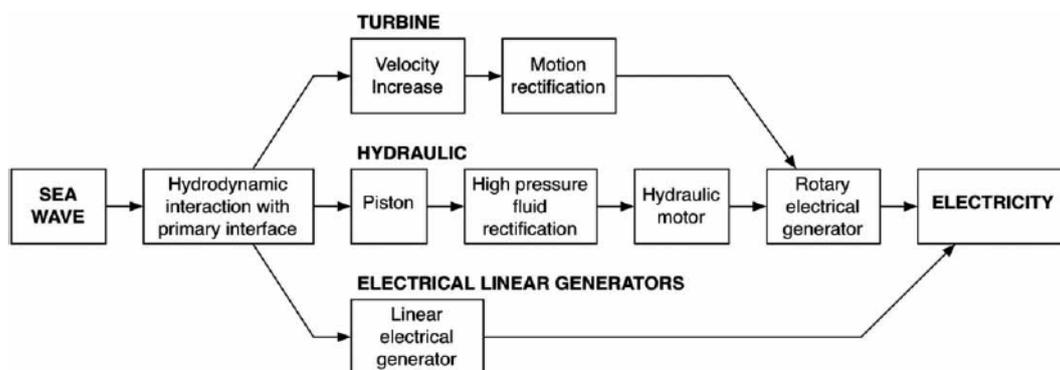


		$T_e$ [s]											
		5	6.2	7.3	8.4	9.5	10.6	11.8	12.9	14	15.1	16.2	17.4
$H_{mo}$ [m]	0.5	83.2	74.3	66.6	60.0	54.4	49.6	45.5	42.0	38.9	36.2	33.9	31.9
	1.5	-	74.3	66.6	60.0	54.4	49.6	45.5	42.0	38.9	36.2	33.9	31.9
	2.5	-	-	66.6	60.0	54.4	49.6	45.5	42.0	38.9	36.2	33.9	-
	3.5	-	-	-	-	54.4	49.6	45.5	42.0	38.9	36.2	33.9	-
	4.5	-	-	-	-	-	49.6	45.5	42.0	38.9	36.2	33.9	-
	5.5	-	-	-	-	-	-	-	42.0	38.9	36.2	-	-

Ilustración 17 Esquema de OWC y matriz de eficiencia (valores en%) [17]

## 6.2. Métodos de obtención de la energía eléctrica

El método de capturar energía varía de un dispositivo a otro, con la excepción de la generación eléctrica directa, el método general para producir energía eléctrica es a través de generadores eléctricos rotatorios de alta velocidad convencionales [14]. Uno de los mayores desafíos de los convertidores de energía de olas es el de cómo manejar estos generadores. Vamos a describir brevemente los diferentes tipos de generadores rotativos, siguiendo con una descripción general de los diferentes métodos de transferencia de energía. Comenzamos con la transferencia de turbina, pasando a métodos de conversión hidráulica, y luego discutiendo sobre los generadores eléctricos directos, que podrían considerarse una tecnología competitiva. Estos diferentes mecanismos de obtención de energía eléctrica se muestran en la ilustración 18.



*Ilustración 18 Mecanismos de obtención de energía [14]*

### 6.2.1. Tipos de generadores rotativos

Se identifican cuatro tipos de generadores: generadores de inducción doblemente alimentados, generadores de inducción de jaula de ardilla, generadores síncronos de imán permanente, y generadores síncronos de campo.

Los generadores en los dispositivos OWC normalmente funcionan a velocidad variable. Hay similitudes en esta aplicación con tecnologías maduras utilizadas en turbinas eólicas.

Los generadores predilectos utilizados en las turbinas eólicas (generadores de inducción doblemente alimentados accionados a través de una caja de engranajes, y el generador síncrono de baja velocidad con electrónica de potencia dedicada) son posibles candidatos para su uso en el sistema de columna de agua oscilante. El estudio de O'Sullivan y Lewis [14] concluye que este último, el generador síncrono de accionamiento directo es la opción preferida debido a su mejor rendimiento energético, peso y controlabilidad, a pesar de la necesidad de disponer de un convertidor de frecuencia completo entre el generador y la red.

La desventaja significativa del generador de inducción doblemente alimentado es su requisito de mantenimiento.

### 6.2.2. Transferencia de turbina

Este es el término utilizado para representar el método empleado en dispositivos donde el flujo (ya sea agua de mar o aire) impulsa una turbina, que está directamente acoplada a un generador. Los tipos de dispositivos que usan transferencia directa incluyen OWC y dispositivos de desbordamiento.

La ventaja significativa del uso de turbinas de agua marina es que las fugas de fluido no causan problemas ambientales. La desventaja es que el agua de mar es un fluido complejo con varios componentes impredecibles. Además, en dispositivos cercanos a la costa, las partículas abrasivas podrían dañar sellos y válvulas. La cavitación también podría ser un problema, a menos que la turbina esté en aguas profundas para mantener una presión positiva. En situaciones de baja presión, con experiencia en dispositivos de sobrealimentación, a menudo se utilizan turbinas de hélice, como en el diseño de Kaplan.

El uso de aire como fluido de trabajo tiene la ventaja de aumentar las velocidades lentas de las olas a un alto índice de flujo de aire. El diseño de turbina de aire más popular es la turbina Wells, debido a su capacidad para girar en la misma dirección, independientemente de la dirección del flujo de aire. Las desventajas inherentes incluyen la baja eficiencia (alrededor del 60-65%), arranque deficiente, alto ruido y alto empuje axial en comparación con las turbinas tradicionales. El control del paso de las palas de la turbina puede aumentar la eficiencia.

### 6.2.3. Hidráulica

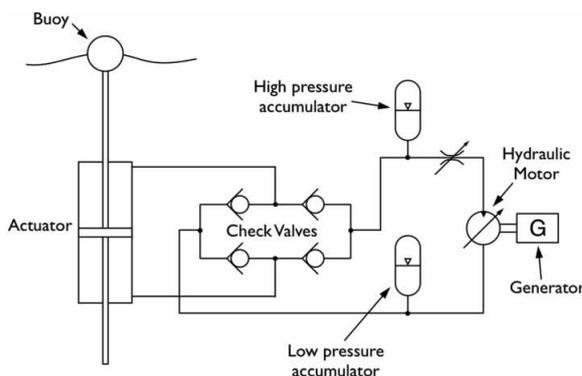
Las olas aplican grandes fuerzas a bajas velocidades y por lo tanto los sistemas hidráulicos son muy adecuados para absorber energía en estas situaciones. El uso de sistemas hidráulicos que operan a una presión de 400 bar es una clara ventaja de algunos tipos de conversión de energía de oleaje, donde el tamaño y el peso son un problema, y la fuerza creada por estas presiones es mayor que las de las máquinas eléctricas.

La ilustración 19 es un diagrama de circuito para un sistema de PTO (toma de fuerza) hidráulico básico para un WEC (convertidor de energía undimotriz). La varilla del cilindro hidráulico es empujada hacia arriba y abajo por una boya flotante, que impulsa el fluido a través de las válvulas de retención, rectificando el flujo, hacia un motor hidráulico. En este caso, el generador podría ser un dispositivo de velocidad constante, y el motor hidráulico tendría una capacidad variable para accionar el generador a una velocidad casi constante a pesar del caudal variable. El control de la capacidad del motor podría basarse en los

estados del mar medidos o predichos alrededor del convertidor, o las mediciones de flujos dentro del sistema. Además, también podría usarse una válvula de estrangulación para controlar el flujo hacia el motor. Los acumuladores están incluidos en el circuito para proporcionar almacenamiento de energía y para mantener un flujo constante hacia el motor hidráulico. Además, el acumulador de baja presión proporciona una pequeña presión de sobrealimentación para reducir el riesgo de cavitación en el lado de baja presión.

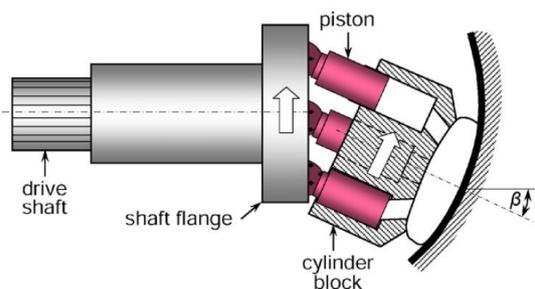
El circuito hidráulico empleado en el convertidor de tipo Pelamis sigue esencialmente el diseño mostrado en la ilustración 19. Los acumuladores proporcionan un desacoplamiento entre los cilindros hidráulicos y los motores, proporcionando suficiente almacenamiento de energía para proporcionar a las bombas un suministro de energía relativamente constante. Las válvulas activas se emplean para rectificar el flujo, y también se usan para variar el par de reacción. Las pérdidas en la transmisión primaria pueden mantenerse por debajo del 20 por ciento en una amplia gama de condiciones de funcionamiento.

Hay una serie de desafíos asociados con los sistemas de conversión hidráulica en convertidores de energía undimotriz como son: la contaminación del fluido hidráulico, el sellado, la eficiencia, el mantenimiento, la parada final, y el almacenamiento de energía.



*Ilustración 19 Circuito hidráulico típico de un convertidor de energía undimotriz [14]*

A continuación, representamos la esquemática de un motor hidráulico de desplazamiento variable del tipo de eje doblado de pistón axial, que muestra el bloque de cilindros con los pistones y la brida del eje de transmisión. El desplazamiento del pistón se puede variar cambiando el ángulo de ajuste  $\beta$  entre el eje del pistón y el eje del bloque de cilindros:



*Ilustración 20 Motor hidráulico de un dispositivo de conversión de energía undimotriz [6]*

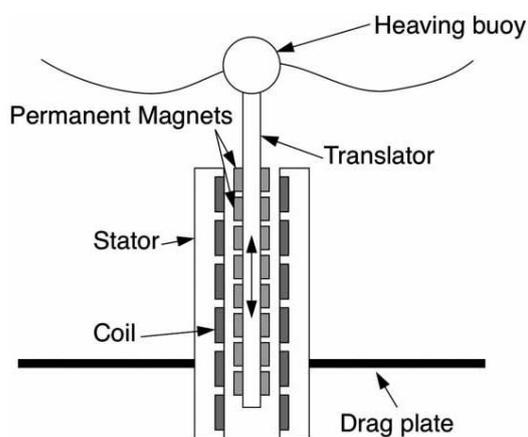
#### 6.2.4. Generación eléctrica directa

Un generador síncrono directo ofrece la posibilidad de convertir directamente la energía mecánica en energía eléctrica. La alternativa del accionamiento eléctrico directo, como se muestra previamente en la ilustración 21, es mucho más simple que los sistemas hidráulicos, sin pasos intermedios entre la interfaz primaria y la máquina eléctrica.

Las máquinas eléctricas convencionales están diseñadas para ser impulsadas con movimiento giratorio de alta velocidad. La velocidad del aire en el entrehierro en estas máquinas puede ser alta (más de 60 m/s) lo que permite una fácil conversión en un cambio rápido de flujo [14].

Estos generadores de accionamiento directo tienen una velocidad de aire de 5-6 m/s. El desarrollo de generadores eléctricos directos requiere una investigación continua en máquinas eléctricas de baja velocidad.

El concepto básico de este generador es tener un traductor (lo que sería el rotor en una máquina rotativa) en el que los imanes se montasen con polaridad alterna directamente acoplado a una boya de empuje, con el estator que contiene los devanados montado en una estructura relativamente estacionaria (conectado a un plato de arrastre con gran inercia, o fijo al lecho marino). A medida que la boya de empuje oscila, se inducirá una corriente eléctrica en el estator. El esquema de este dispositivo se muestra en la ilustración 21.



*Ilustración 21 Esquema de un generador eléctrico lineal basado en un generador de imanes permanentes [14]*

Hay tres topologías principales de generadores eléctricos directos:

- generadores de imanes permanentes de flujo longitudinal;
- generadores de imán permanente de reluctancia variable (con generadores de imán permanente de flujo transversal como un subconjunto de estos);
- generadores de imanes permanentes con núcleo de aire tubular.

### **6.3. Dispositivos fijos**

Los dispositivos fijos montados en el fondo marino y en la costa son generalmente terminadores, los cuales han sido el tipo más común de convertidor de energía undimotriz probado como prototipo en el mar. Al tener una estructura de referencia fija, estar más cerca de la red eléctrica y contar con un buen acceso para fines de mantenimiento, tienen ventajas obvias sobre otros tipos de dispositivos flotantes. Además, el lecho marino atenúa las olas de tormenta, que, de lo contrario, podrían destruir tanto el dispositivo como las turbinas. Sin embargo, tales dispositivos tienen la desventaja de que generalmente operan en aguas poco profundas y, por lo tanto, a niveles de potencia de ola más bajos. Otra desventaja de los dispositivos montados sobre la orilla es la ubicación geográfica, solo un número limitado de sitios son aptos para su despliegue. Para optimizar la producción, deben ubicarse en un área de marea pequeña, de lo contrario su rendimiento puede verse afectado adversamente. También vale la pena señalar que es poco probable que las técnicas de producción en masa puedan llegar a ser totalmente aplicables a los sistemas montados en tierra, ya que los requisitos específicos del sitio exigirán un diseño a medida para cada dispositivo, lo que aumenta los costes de producción.

La mayoría de los dispositivos probados y planificados son del tipo de columna de agua oscilante (OWC). En estos dispositivos, una cámara de aire perfora la superficie del agua y el aire contenido se ve forzado a salir, y luego a ir a una cámara por las crestas y valles de ola que se le aproximan. En su paso desde y hacia la cámara, el aire pasa a través de una turbina de aire (generalmente del tipo Wells) que acciona un generador y produce electricidad. La turbina Wells (ilustración 22) es un dispositivo de flujo axial que gira en la misma dirección independientemente de la dirección del flujo de aire, y tiene características aerodinámicas particularmente adecuadas para aplicaciones de oleaje. Una característica muy atractiva de los sistemas OWC es que el área de la sección transversal de la turbina de aire puede ser mucho más pequeña que el área de la superficie del agua en movimiento. Esta reducción en el área disponible para el flujo de aire actúa como engranaje para aumentar la velocidad del aire a través de la turbina de modo que puede operar a alta velocidad.

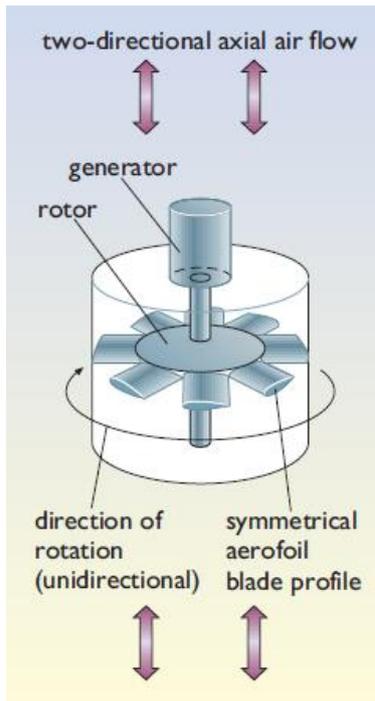


Ilustración 22 La turbina de Wells [28]

La turbina de aire Wells es autorrectificante, es decir, puede aceptar el flujo de aire en cualquier dirección axial. Para conseguirlo, el álabe de perfil aerodinámico debe ser simétrico respecto al plano de rotación, sin torsión y con paso cero, es decir, la cuerda debe estar en línea con el plano de rotación. Los diagramas del vector en la ilustración 23 muestran cómo ocurre esto. A medida que el álabe se mueve hacia adelante, el ángulo de ataque, que es el ángulo entre la velocidad del flujo de aire relativo y la velocidad del álabe, es pequeño y produce una gran fuerza de elevación ( $L$ ). La componente delantera de  $L$  proporciona el empuje que impulsa el álabe hacia adelante.

La turbina de Wells funciona de la misma manera que lo haría un aerogenerador de eje horizontal con palas simétricas, sin torsión y con paso cero. Consideramos la pala más cercana con flujo de aire hacia arriba (ilustración 23(a)). Si trabajamos ahora en el marco de referencia de la pala, hacemos esto haciendo que la pala de acero parezca estacionaria para nosotros (incluso si está moviéndose) considerando que el vector de la velocidad de la pala está en la dirección opuesta a la de la dirección real del movimiento (ilustración 23(b)). Nótese que debido a que la cuerda del álabe está en línea con el plano de rotación el ángulo de ataque es el mismo que el ángulo de viento relativo.

Si ahora resolvemos estos vectores obtenemos la ilustración 23(c). De este diagrama podemos ver que habrá una fuerza neta hacia adelante en la pala que actúa en el plano de rotación si  $(L \cdot \sin \alpha) - (D \cdot \cos \alpha)$  es mayor que cero. Los componentes de reacción son de poco interés, pero los cojinetes del rotor deben ser capaces de soportar estas fuerzas con mínimas pérdidas debidas a fricción. Si el movimiento hacia adelante es mayor que cero

entonces la pala será impulsada hacia adelante y extraerá energía del flujo de aire. La forma de la pala es extremadamente importante porque afectará a los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre  $C_L$  y  $C_D$  y, por lo tanto, la magnitud del impulso hacia adelante [1].

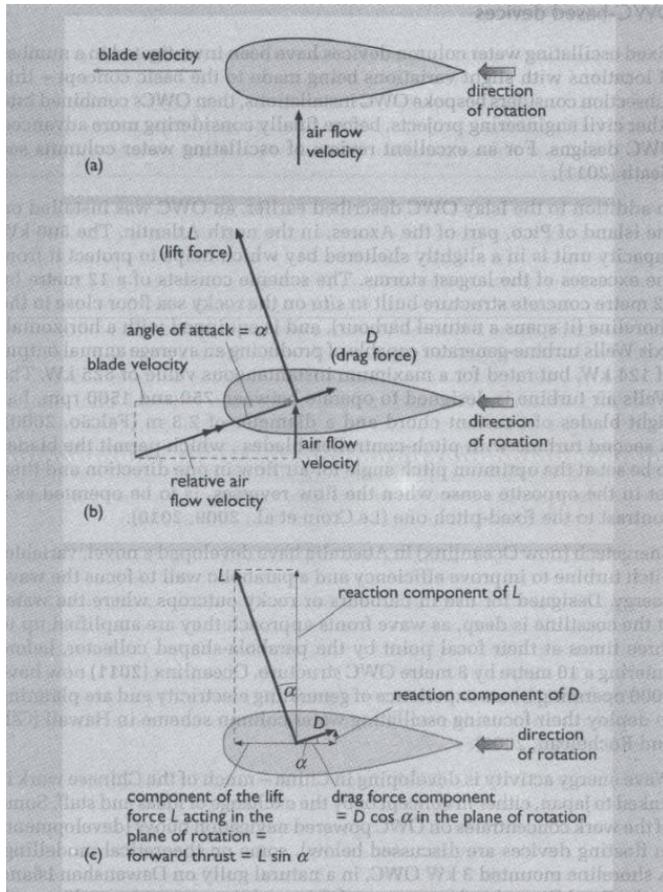


Ilustración 23 La turbina de Wells (a) flujo de aire y velocidad de la pala; (b) velocidad relativa del aire y fuerzas de sustentación y arrastre; (c) fuerzas en el plano de rotación [1]

Hay una relación lineal entre el flujo de aire y la caída de presión de la turbina Wells girando a una velocidad constante. Esto significa que la turbina de Wells tiene una impedancia constante al flujo de aire. Una elección cuidadosa de los parámetros de diseño asegura que esta impedancia coincida con los requisitos del clima de olas en la localización elegida. Si esto sucede se maximiza la transferencia de energía de la ola al generador. La turbina de Wells encaja idealmente con las aplicaciones de energía undimotriz debido a su impedancia constante, mientras que la impedancia de una turbina de aire convencional varía con el flujo de aire. Una turbina de aire convencional podría tener un pico de eficiencia superior, pero una turbina Wells trabajará bien sobre un rango de flujos de aire dándole una mejor eficiencia al ciclo de ola. Una característica beneficiosa de la turbina Wells es que, para los tamaños empleados típicamente, puede girar a velocidad alta (1.500-3.000 rpm) de modo que el generador eléctrico podría estar directamente acoplado al eje de la turbina, obviando la necesidad de una caja de engranajes para alcanzar la velocidad del generador.

### 6.3.1. Dispositivos basados en la columna de agua oscilante (OWC)

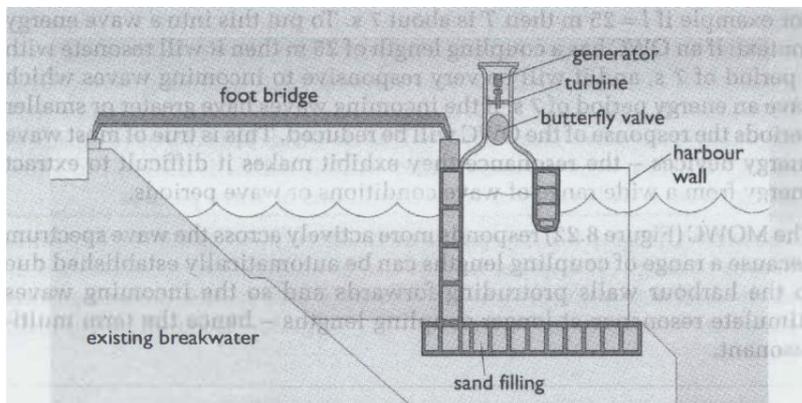
Se han investigado dispositivos fijos de columna de agua oscilante en diversas ubicaciones, con ligeras variaciones en el concepto básico; en este punto consideraremos instalaciones de OWC a medida, luego combinadas en otros proyectos de ingeniería civil, y finalmente diseños de OWC más avanzados.

Además del OWC de Islay descrito en el apartado 6.1.2, se instaló un OWC en el Atlántico norte en la isla de Pico (Azores). Esta unidad, de 500 kW de capacidad, se encuentra en una bahía ligeramente protegida que ayuda a protegerla de los excesos de las tormentas más grandes. El sistema consiste en una estructura de hormigón de 12 por 12 metros construida in situ en el fondo rocoso del mar cerca de la costa (abarca un puerto natural), y equipada con un turbogenerador Wells de eje horizontal capaz de producir una salida anual promedio de 124 kW, pero con un valor instantáneo máximo de 525 kW. La turbina de aire Wells está diseñada para operar a una velocidad comprendida entre 750 y 1.500 rpm, tiene ocho palas de cuerda constante y un diámetro de 2,3 m. Una segunda turbina con palas de paso controlado, que permite ajustar las palas con el ángulo de cabeceo óptimo para el flujo de aire en una dirección y luego en el sentido opuesto cuando el flujo se invierte, se debe operar en contraste con la de paso fijo.

Oceanlinx ha desarrollado en Australia una novedosa turbina de inclinación variable para mejorar la eficiencia, y una pared parabólica para enfocar la energía de las olas.

### 6.3.2. Sistemas de puertos y rompeolas

Cuando los OWC se incorporan a los rompeolas (ilustración 24), los beneficios dobles del rompeolas (el abastecimiento de un puerto y la generación de electricidad) significan que la función de producción eléctrica no tiene que justificar el coste total de capital, por lo que el coste de la electricidad generada puede ser más atractivo económicamente.



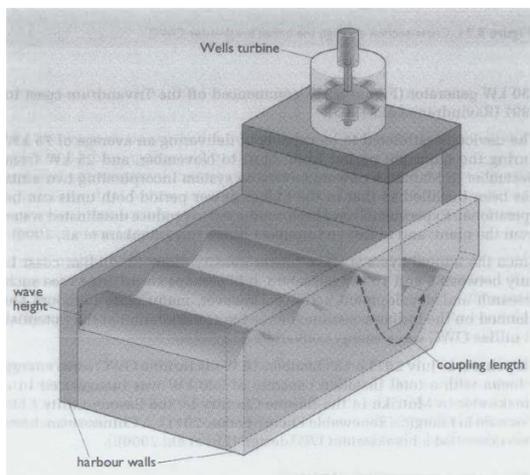
*Ilustración 24 Sección transversal a través del rompeolas indio OWC [1]*

### 6.3.3. El OWC multirresonante (MOWC)

La mayoría de los dispositivos de energía undimotriz son sistemas resonantes, es decir, tienen un período de resonancia natural o un tiempo en el cual repiten su movimiento. En el caso de los OWC, el período natural se rige por la longitud del agua desde su superficie o la superficie exterior de la ola hasta la superficie del agua dentro del dispositivo. Esto se puede denominar la longitud de acoplamiento ( $l$ ) y la disposición se comporta como un tubo en "U" que contiene agua. El período de oscilación ( $T$ ) viene dado por:  $T = \pi \sqrt{\frac{2l}{g}}$  [1]

Por ejemplo, si  $l = 25$  m, entonces  $T$  es aproximadamente 7 s. Pongamos esto en un contexto de energía de olas: si un OWC tiene una longitud de acoplamiento de 25 m, resonará con un período de 7 s, y será muy sensible a las olas entrantes que tengan un período de 7 s. Si las ondas entrantes tienen periodos mayores o menores, se reducirá la respuesta del OWC. Esto es cierto para la mayoría de los dispositivos de energía undimotriz: la resonancia que exhiben hace que sea difícil extraer energía de una amplia gama de condiciones o períodos de olas.

El MOWC (ilustración 25) responde más activamente a través del espectro de onda porque se puede establecer automáticamente un rango de longitudes de acoplamiento debido a que las paredes del puerto sobresalen hacia delante y así las ondas entrantes estimulan la resonancia en longitudes de acoplamiento más largas; de ahí el término multirresonante.

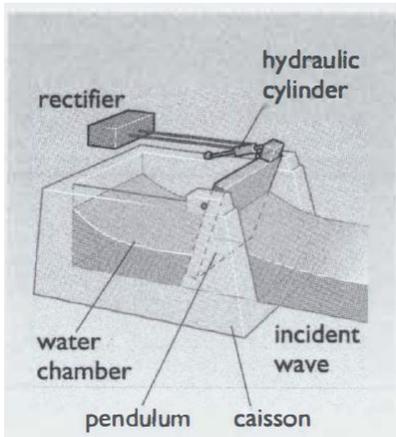


*Ilustración 25 Una columna de agua oscilante multirresonante [1]*

### 6.3.4. Dispositivos fijos que no son de OWC

Otros prototipos de dispositivos fijos que no son del tipo OWC también se han probado en Japón y Escocia. Varios han utilizado un enlace mecánico entre la componente móvil, como un flap articulado, y la parte fija del dispositivo. Un ejemplo de este enfoque es el Pendular (ilustración 26). El Pendular consiste en una pala, con bisagras en la parte superior, que se

ajusta a un cuarto de una longitud de onda desde la pared posterior de un cajón. Este es el primer antinodo (es decir, el punto de máxima amplitud de una serie de ondas) que hace que la pala se someta al máximo movimiento de onda posible. En las regiones de Japón donde se han probado los dispositivos Pendular, los mares generalmente tienen longitudes de ola cercanas a la longitud de onda de diseño durante gran parte del año.



*Ilustración 26 El dispositivo pendular japonés [1]*

Un sistema hidráulico push-pull convierte la energía mecánica del movimiento de la pala del Pendular en energía eléctrica. Dos prototipos con potencias nominales de 5 kW han estado operativos en Hokkaido, Japón, desde principios de los años ochenta.

En Escocia, se está probando un prototipo funcional del sistema articulado Oyster. El primer dispositivo de potencia undimotriz, el Oyster 1, a escala completa, se instaló en el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) en Orkney, Escocia, en verano de 2009 y se conectó a la red nacional en noviembre de 2009. Actualmente Oyster 1 está siendo sometido a pruebas en el mar para recopilar datos para finalizar el diseño de los dispositivos de la próxima generación, que están diseñados para constar de tres dispositivos de energía undimotriz vinculados con una capacidad instalada de 2,3 MW.

Oyster (ilustración 27) es un dispositivo de tipo aleta de perforación superficial, diseñado por Aquamarine Power Limited, para recolectar energía del océano montado sobre la orilla. Este dispositivo está diseñado para responder a fuerzas de sobretensión.

Según una clasificación de convertidores basada en la tecnología moderna, Oyster pertenece a la categoría de convertidores oscilación horizontal (OWSC). Los OWSC son osciladores de fondo que esencialmente se mueven como péndulos invertidos, siguiendo el movimiento brusco de las partículas de agua en la orilla. Los sistemas de toma de fuerza apropiados (PTO) vinculados al dispositivo permiten la extracción de energía útil. Para Oyster, un conjunto de pistones se activa por el movimiento oscilante de la aleta. Los pistones bombean agua a alta presión para impulsar una turbina hidroeléctrica en tierra, a partir de la cual se genera electricidad de manera convencional [16].

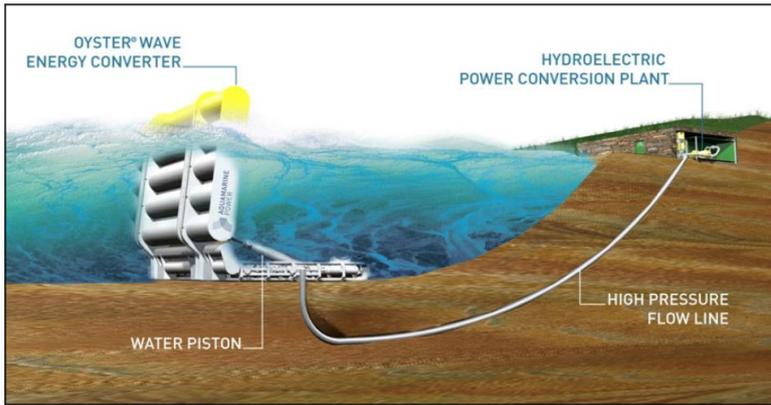


Ilustración 27 Sistema Oyster [16]

Su matriz de potencia, en la que se ilustra la salida de potencia (en kW) según la altura de ola y periodo, sería así:

Oyster		$T_p$ [s]								
		5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0
$H_{\text{máx}}$ [m]	0.5	0	0	0	0	0	0	1	3	3
	1	20	30	38	42	44	44	45	47	45
	1.5	80	85	92	97	102	103	104	100	104
	2	140	147	152	158	155	155	160	161	156
	2.5	192	197	208	202	203	209	211	201	204
	3	241	237	237	241	243	230	236	231	235
	3.5	-	271	272	269	268	267	270	260	260
	4	-	291	290	290	280	287	276	278	277
	4.5	-	291	290	290	280	287	276	278	277
	5	-	-	290	290	280	287	276	278	277
	5.5	-	-	290	290	280	287	276	278	277
6	-	-	290	290	280	287	276	278	277	

Ilustración 28 Matriz de potencia del sistema Oyster [20]

#### 6.4. Dispositivos amarrados

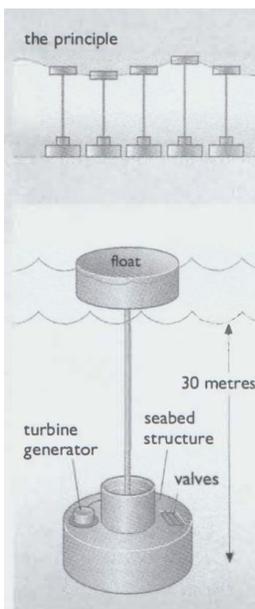
Los sistemas de flotación con el cuerpo principal de la estructura flotando sobre la superficie, pero amarrados al lecho marino mediante una bomba, han atraído la atención a lo largo de los años y son objeto de actividad en algunos proyectos actuales. Estos pueden actuar como absorbedores puntuales que obtienen energía de un ancho de mar mayor que su propio diámetro físico.

El Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) ayuda a resolver los problemas que han afectado a la construcción de los prototipos de generadores de energía en el pasado. Por ejemplo, amarres a prueba de tormentas y cables blindados facilitan la instalación y pruebas simples y baratas de nuevos dispositivos. Además, EMEG puede acomodar hasta cuatro máquinas a la vez, por lo que los diseñadores pueden comparar dispositivos directamente en condiciones idénticas, dándoles la oportunidad de detectar pequeñas modificaciones de diseño que mejorarán la eficiencia de la generación de energía.

Otra instalación que proporciona una infraestructura para la demostración y proporcionamiento de formaciones de dispositivos de generación de energía undimotriz en un período sostenido de tiempo es el Wave Hub, una instalación en alta mar conectada a la red a 16 kilómetros del norte costa de Cornualles. Tiene un contrato de arrendamiento de 25 años en 8 kilómetros cuadrados de fondos marinos, y puede albergar cuatro sistemas de energía undimotriz, cada uno con una capacidad de 4-5 MW.

#### 6.4.1. PowerBuoys

El convertidor de energía undimotriz de tipo absorbedor puntual “PowerBuoy”, desarrollado por Ocean Power Technology, consiste en un sistema modular basado en una boya que impulsa generadores utilizando la fuerza mecánica desarrollada por el movimiento vertical del dispositivo (ilustración 29). Cada módulo es relativamente pequeño, lo que permite un mantenimiento regular de bajo coste, lo que lleva a vidas de funcionamiento de al menos 30 años.



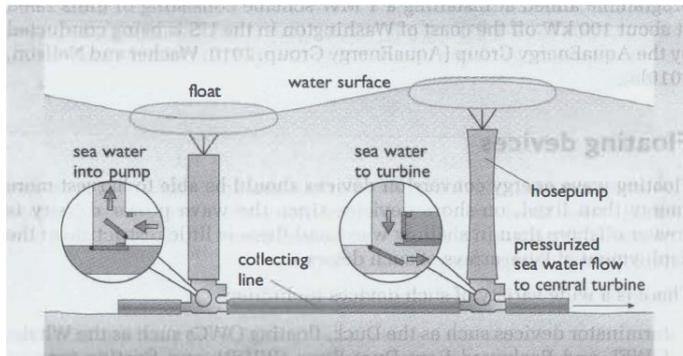
*Ilustración 29 Convertidor de energía undimotriz de boya amarrada [1]*



*Ilustración 30 El prototipo de PowerBuoy desplegado en Santoña, España, en 2008 [6]*

#### 6.4.2. Convertidor de energía undimotriz de bomba de manguera

El convertidor de energía undimotriz de bomba de manguera fue desarrollado por Technocean en Suecia, y estaba destinado a bombear agua de mar desde una serie de bombas de manguera fijadas al lecho marino (ilustración 31). La bomba de manguera consiste en un cilindro de caucho reforzado, anclado al lecho marino y unido a un flotador en la superficie (por lo tanto, actúa como mecanismo de sujeción y de bombeo).



*Ilustración 31 Convertidor de energía de onda de bomba de manguera sueco [1]*

Los cables de refuerzo en la manguera están dispuestos en un ángulo cuidadosamente elegido con respecto al eje principal de la manguera. A medida que la boya se eleva con las olas, la manguera se estira y el ángulo del cordón cambia de tal manera que provoca que el volumen de la manguera se reduzca. Esto aumenta la presión del agua de mar contenida en la manguera. El agua de mar es bombeada fuera del tubo hasta un depósito de almacenamiento en tierra. Una turbina Pelton extrae energía del agua a medida que se libera desde el depósito hacia el mar. El tubo se rellena con agua a través de una válvula antirretorno. Este concepto aún no ha sido explotado como prototipo en el mar.

#### 6.4.3. Convertidor Interproject Service

El convertidor Interproject Service (IPS) fue desarrollado por Interproject Service AB, Suecia, a principios de la década de 1980 y probado a escala 1:10 en un lago, y como prototipo a escala real en el mar. Consiste en una boya grande con un tubo abierto en ambos extremos, unido debajo. Un pistón dentro del tubo está conectado a la boya y la energía se extrae por la interacción de la boya y el agua en el tubo. Una nueva configuración desarrollada en la Universidad de Edimburgo, la del IPS inclinado, incorpora una serie de características atractivas, particularmente la captura de energía adicional producida al operar en ángulo con respecto a la vertical. Al emplear un acumulador hidráulico, el dispositivo puede proporcionar un rendimiento razonablemente uniforme y, por lo tanto, ofrece la posibilidad de una fuente de energía fiable para pequeñas redes eléctricas aisladas o islas pequeñas.

El sistema AquaBuoy es un desarrollo basado tanto en el IPS como en el convertidor de energía undimotriz de bomba de manguera. Su matriz de potencia, en la que se ilustra la salida de potencia (en kW) en función de la altura de ola y periodo, sería así:

		Tp (s)									
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	17
Hs (m)	1	0	8	11	12	11	10	8	7	0	0
	1.5	13	17	25	27	26	23	19	15	12	7
	2	24	30	44	49	47	41	34	28	23	12
	2.5	37	47	69	77	73	64	54	43	36	19
	3	54	68	99	111	106	92	77	63	51	27
	3.5	0	93	135	152	144	126	105	86	70	38
	4	0	122	176	198	188	164	137	112	91	49
	4.5	0	0	223	250	239	208	173	142	115	62
	5	0	0	250	250	250	250	214	175	142	77
	5.5	0	0	250	250	250	250	250	211	172	92

Ilustración 32 Matriz de potencia del sistema AquaBuoy (kW) [18]

## 6.5. Dispositivos flotantes

Los dispositivos de conversión de energía undimotriz flotantes son capaces de capturar más energía que los dispositivos fijos montados en la orilla, ya que la densidad de potencia de las olas es mayor en alta mar que en aguas poco profundas, y existe poca restricción para el despliegue de grandes conjuntos de dichos dispositivos.

Existe una amplia variedad de tales dispositivos que incluyen dispositivos terminadores tales como el Duck, OWC flotantes como el Whale, OWEL y Backward Bent Duct Buoy (BBDB), y canales cónicos flotantes (descritos como Floating Wave Power Vessels, FWPV), absorbedores puntuales como el AWS, y dispositivos atenuadores como el Pelamis.

### 6.5.1. Dispositivos Terminator

#### 6.5.1.1. Dispositivos basados en OWC

Se han desarrollado varios dispositivos flotantes basados en OWC: el Kaimei, una barcaza convertida equipada con varios dispositivos flotantes OWC, y la primera turbina Wells en alta mar, se probó por primera vez en Japón en 1977.

Ocean Energy Ltd ha desarrollado aún más la Boya de Conducto Doblado hacia Atrás y un dispositivo a escala un cuarto ha logrado alcanzar más de 20.000 horas de operación en pruebas en condiciones reales en Spiddal (Galway, Irlanda). Allí se sometió a una amplia gama de condiciones de oleaje, incluida una tormenta severa donde las velocidades del viento alcanzaron 30-35 metros por segundo y se registró una altura de ola de 8,2 m.

Durante las pruebas, los flujos de aire y la potencia de salida de las pruebas aumentaron de forma predecible y el comportamiento del casco también fue consistente y fiable.

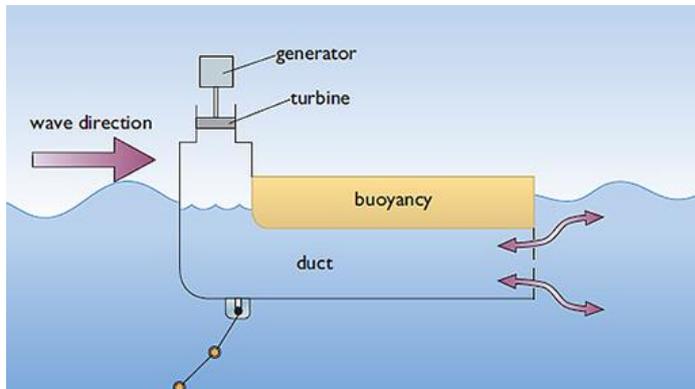


Ilustración 33 La boya del conducto doblado hacia atrás (BBDB) [28]

Otras variaciones en este tema incluyen el Swan DK3, que se basa en la boya de conducto doblado hacia atrás en forma de L, y el Whale, un dispositivo flotante orientado hacia OWC. El consorcio liderado por OWEL (Offshore Wave Energy Limited) e IT Power está desarrollando una versión multicelular del BBDB, el OWEL, que debería tener una versión piloto de 45 m de largo con calificación de 500 kW probado en el Wave Hub en Cornualles. Oceanlinx ha desarrollado un diseño alternativo de OWC flotante. Su implementación más reciente de OWC involucró su dispositivo flotante Mk3.

#### 6.5.1.2. Recipiente de energía undimotriz flotante (FWPV)

En 1992, Sea Power International instaló un recipiente de potencia undimotriz flotante (FWPV) que estuvo realizando pruebas en la costa oeste de Suecia. Este recipiente de acero se asemeja a un TAPCHAN flotante en el que las olas corren por una rampa inclinada y se recogen en un recipiente interno elevado. El agua fluye desde el recipiente de regreso al mar a través de turbinas de baja altura. Este dispositivo no es sensible al rango de mareas, y al variar su balasto el dispositivo puede ajustarse a diferentes alturas de ola capturando el agua de las olas que se desplazan por su cara frontal inclinada. El agua capturada se devuelve al mar a través de una turbina hidroeléctrica Kaplan estándar. En muchos aspectos, este dispositivo se puede comparar con la versión flotante de TAPCHAN. Una versión danesa de este concepto flotante de TAPCHAN es el Wave Dragon, en el cual, vez más, las olas suben por un canal cónico y una cantidad de agua se acumula en un depósito. El agua vuelve al mar a través de un conjunto de turbinas hidroeléctricas Kaplan. Una versión a escala real fue lanzada cerca de la Universidad de Aalborg en marzo de 2003, y entregó su primera producción de energía a la red en junio de 2003. Se instalaron más turbinas en el mar en septiembre de 2003, demostrando que el mantenimiento en el mar es posible. En 2011 se diseñó un sistema de prueba de 7 MW a gran escala en el sur de Gales.

Wave Dragon es un convertidor de energía undimotriz de alta mar del tipo de desbordamiento, en el que cada unidad tendrá una potencia nominal de 4-10 MW, dependiendo de cuán energético sea el clima de olas en el sitio de despliegue [15].

El sistema Wave Dragon, que es el convertidor de energía undimotriz más desarrollado hasta la fecha, y consta de tres elementos principales (ilustración 34):

-Dos reflectores de onda. Unidos a la plataforma central actúan enfocando las olas entrantes. Los reflectores de ola tienen el efecto verificado de aumentar sustancialmente la altura significativa de la ola y, por lo tanto, aumentar la captura de energía en un 70% en condiciones de oleaje típicas.

- La plataforma principal. Esta es un depósito flotante con una rampa curvada doble frente a las olas entrantes. Las olas sobrepasan la rampa que tiene un francobordo de cresta variable de 1-4 m. Debajo de la plataforma, las cámaras abiertas funcionan como un colchón de aire que mantiene el nivel del depósito. La ventilación del aire dentro y fuera de estas cámaras permite que se optimice el nivel del depósito, y el paso y balanceo de la plataforma.

-Hidro turbinas. Un conjunto de turbinas Kaplan de cabeza baja convierte el cabezal hidráulico en el depósito. Estas turbinas están conectadas al PMG (generador síncrono de imán permanente) permitiendo una operación a velocidad variable. La electricidad producida se convierte utilizando convertidores electrónicos de potencia CA/CC/CA a la frecuencia de la red.

El Wave Dragon flota sobre cámaras de aire abiertas para ajustar el nivel de flotación

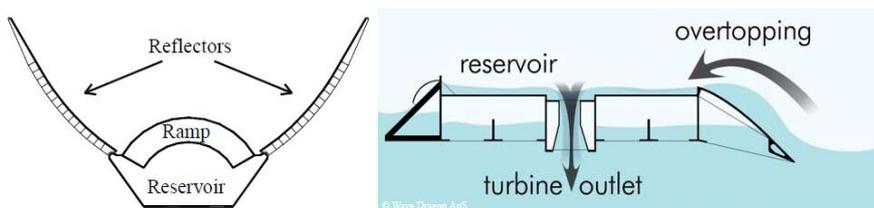


Ilustración 34 Izquierda: componentes principales del Wave Dragon. Derecha: El principio básico del Wave Dragon: (1) olas que sobrepasan una rampa, (2) agua almacenada en un depósito sobre el nivel del mar y (3) agua descargada a través de turbinas hidráulicas [15]

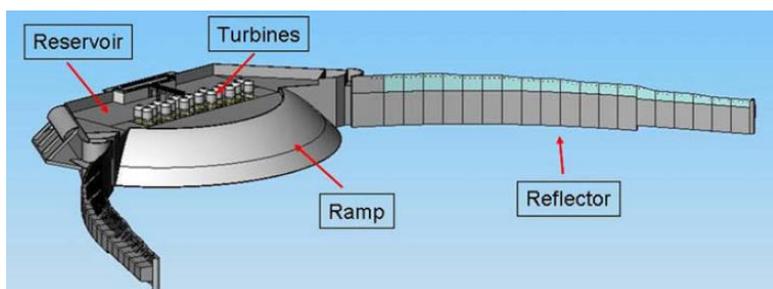


Ilustración 35 Diseño del dispositivo Wave Dragon [15]

Cuando las olas han sido enfocadas por los reflectores, sobrepasan la rampa y llenan el depósito, que está situado a un nivel más alto que el mar circundante. Esta cabeza hidráulica se utiliza para la producción de energía a través de las turbinas hidráulicas.

El Wave Dragon es único entre los convertidores de energía de undimotriz, ya que utiliza la energía del agua directamente a través de turbinas de agua, es decir, es un sistema de conversión de una sola etapa, que ofrece una construcción muy simple y solo tiene un tipo de piezas móviles: las turbinas. Esto es esencial para cualquier dispositivo que opere en alta mar donde el mantenimiento es difícil de realizar y donde las fuerzas extremas, las incrustaciones, etc. afecten seriamente cualquier parte móvil. Sin embargo, el Wave Dragon representa un diseño muy complejo, donde los esfuerzos intensivos de las universidades y la industria se han dedicado al diseño, modelado y prueba con el fin de [15]:

- Optimizar el desbordamiento.
- Refinar la respuesta hidráulica: anti-cabeceo y anti-rodadura, flotabilidad, etc.
- Reducir el efecto de las fuerzas sobre los reflectores de olas, el sistema de amarre...
- Desarrollar turbinas eficientes para una altura extremadamente baja y variable.
- Desarrollar una estrategia de turbina para optimizar la producción de energía.
- Reducir los costes de construcción, mantenimiento y funcionamiento.

Todo esto se ha hecho con un objetivo: producir la mayor cantidad de electricidad posible al menor coste posible, de forma respetuosa con el medio ambiente, y de un modo fiable.

A continuación, representamos la matriz de potencia de este sistema de generación de energía. Como explicaremos más adelante, este dispositivo es el más adecuado para el aprovechamiento de la energía undimotriz en toda la costa asturiana, ya que los periodos de ola y la altura de estas a lo largo de toda la costa, de aproximadamente 11 segundos y 2 metros respectivamente, le confieren al dispositivo un rendimiento aproximado del 30% a lo largo de toda la costa, el mayor para los dispositivos que se pudiesen instalar en alta mar en Asturias.

		Wave Period - Te (s)																				
		4.0	4.5	5	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0
Significant Wave Height - Hm0(m)	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	203	276	348	432	516	608	699	798	896	925	953	958	962	941	919	870	820	742	663	555	446
	1.5	412	448	485	617	750	899	1049	1212	1375	1433	1491	1509	1527	1502	1477	1404	1332	1209	1086	912	737
	2	621	621	621	802	983	1191	1398	1626	1853	1941	2029	2061	2092	2063	2034	1939	1844	1677	1509	1269	1028
	2.5	1123	1123	1123	1213	1304	1609	1914	2258	2602	2752	2903	2972	3041	3017	2993	2868	2743	2504	2266	1910	1555
	3	1624	1624	1624	1624	1624	2027	2430	2890	3350	3563	3776	3883	3989	3970	3951	3796	3641	3332	3022	2552	2082
	3.5	2581	2581	2581	2581	2581	2783	2984	3588	4191	4494	4796	4870	4945	4935	4926	4845	4765	4374	3983	3372	2761
	4	3538	3538	3538	3538	3538	3538	3538	4285	5032	5424	5816	5858	5900	5900	5900	5895	5889	5416	4943	4191	3439
	4.5	4719	4719	4719	4719	4719	4719	4719	5093	5466	5662	5858	5879	5900	5900	5900	5897	5895	5658	5422	4822	4222
5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	
5.5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	
6	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	
6.5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	
7	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	
7.5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	
8	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	

Ilustración 36 Matriz de potencia para el dispositivo Wave Dragon (potencia de salida en kW) [19]

Otro dispositivo danés que también utiliza agua para dirigir directamente las turbinas es el Waveplane, un dispositivo en forma de cuña que dirige las olas entrantes de frecuencia variable a un canal en una configuración en espiral, creando un vórtice que se utiliza para impulsar una turbina.

### 6.5.1.3. Duck

El concepto Edinburgo Duck (ilustración 37), desarrollado en los años 70, originalmente se concibió como una agrupación de cuerpos en forma de cámara unidos en una columna flotante larga y flexible, que abarcaría varios kilómetros de mar. La columna estaría orientada casi en paralelo al frente de onda principal, lo que haría que el Duck fuera en gran medida un terminador. Este sistema fue diseñado para extraer energía por cabeceo, para que así coincidiese con el movimiento orbital de las partículas de agua. Para generar energía, cada cuerpo en forma de leva (o Duck) se mueve con relación a la columna, produciendo alta presión en un sistema hidráulico o impulsando un conjunto de giroscopios montados en las narices de los "ducks". Este emparejamiento puede ser casi perfecto a una determinada frecuencia de ola, y la eficiencia en ondas largas (a mayor longitud de ola mayor periodo y por lo tanto menor frecuencia) se puede mejorar mediante el control de la flexión de la columna a través de sus articulaciones. Este concepto es teóricamente uno de los más eficientes de todos los sistemas de aprovechamiento energía undimotriz, pero es posible que se tarde algunos años desarrollar completamente la ingeniería necesaria para su control óptimo.

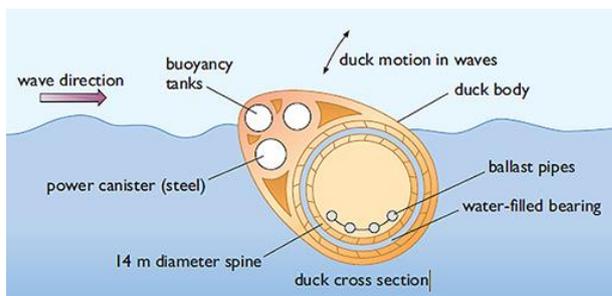


Ilustración 37 El convertidor de energía undimotriz Edinburgo Duck [28]



Ilustración 38 La versión del Duck de 1979 equipada con giroscopios [6]

## 6.5.2. Dispositivos de absorción puntual

### 6.5.2.1. AWS

El AWS (ilustración 40) es un convertidor de energía undimotriz de tipo absorbedor puntual, totalmente sumergido a unos 43 m de profundidad bajo el agua, es decir, de tamaño despreciable en comparación con la longitud de onda. Sus dos partes principales son el silo (una cámara cilíndrica llena de aire fija en el fondo) y el flotador (un cilindro superior móvil). Debido a los cambios en la presión de la ola, el flotador se mueve. Cuando el AWS está debajo de la parte superior de la ola, el flotador se mueve hacia abajo comprimiendo el aire dentro del AWS. Cuando el AWS está debajo, la presión disminuye y, en consecuencia, el aire se expande y el flotador se mueve hacia arriba. Dentro del espacio lleno de aire formado por el silo y el flotador, hay varios componentes necesarios para el funcionamiento del AWS, entre los que se encuentra un generador eléctrico directo para convertir el movimiento del flotador en electricidad. La energía eléctrica producida por generador se transfiere a la costa a través de un cable submarino de unos 6 km de longitud; luego pasa a través de un transformador, y después se suministra a la red eléctrica. El AWS también tiene amortiguadores de agua que se accionan cuando el flotador se acerca a los topes mecánicos finales, para reducir su velocidad y evitar una fuerte colisión con ellos; también actúan junto con el generador cuando este último no es capaz de suministrar la fuerza requerida para controlar adecuadamente el movimiento del AWS. Estos amortiguadores de agua son inactivos por lo demás, a fin de no obstaculizar la extracción de energía undimotriz.

Es la fuerza ejercida por estos dos componentes, el generador y los amortiguadores de agua, la que podemos controlar. En realidad, también es posible cambiar el valor medio de la presión de aire dentro del AWS, por medio de bombas que agregan o eliminan agua de mar (cambiando así el volumen disponible para el aire); pero este es un proceso lento que lleva varios minutos, por lo que se usa para hacer frente a las variaciones del nivel del mar causadas por las mareas (que son aún más lentas). Para controlar el manejo de AWS con diferentes olas y estados del mar tenemos que trabajar con el generador y los amortiguadores de agua.

AWS-III consiste en doce cámaras de aire interconectadas, o celdas, dispuestas alrededor de la circunferencia de un toroide con turbinas Wells en cada celda. A escala real, este tendría 60 metros o más de diámetro, y se desplegaría en aguas profundas (40-100 m). Cada celda está sellada contra el mar por un diafragma de goma flexible reforzado. Las olas causan el movimiento de aire entre las celdas. El aire, empujado desde una celda por la ola incidente, pasa a través de al menos una de las doce turbinas Wells en su camino para llenar otras celdas. A medida que se sella el sistema de aire, el flujo de aire se invertirá a medida que cambien las posiciones de la cresta de la ola y del valle.

Los puntos importantes acerca de AWS-III son su absorción de energía omnidireccional y los diafragmas altamente sensibles que aceptan energía del movimiento de sobrecarga de las olas. Como se señaló anteriormente, el componente de oscilación longitudinal de las olas puede ser dos veces más enérgico que la oscilación vertical.

		T <sub>e</sub> (s)																			
		5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5
H <sub>s</sub> (m)	1	2	7	13	19	26	34	41	48	58	68	81	93	105	118	131	144	153	163	183	203
	1.5	4	15	28	41	56	72	85	99	121	143	173	203	226	248	266	285	309	334	357	380
	2	8	26	49	73	10	127	150	172	210	247	292	337	366	395	418	442	482	523	543	563
	2.5	15	43	78	11	15	205	234	263	320	376	438	499	531	563	603	643	675	708	741	774
	3	25	61	11	16	22	293	339	386	453	521	600	680	722	765	827	888	897	906	945	984
	3.5	35	92	15	21	30	391	454	517	605	694	772	851	913	975	103	109	111	114	116	118
	4	55	11	19	27	38	486	572	659	776	894	961	102	110	117	122	127	131	135	136	137
	4.5	0	0	23	33	47	626	722	819	957	109	116	124	132	140	144	149	154	159	159	158
	5	0	0	28	40	59	784	899	101	114	127	138	148	156	165	169	173	178	183	180	177
	5.5	0	0	32	43	64	849	103	121	133	144	156	169	177	186	191	197	197	198	199	200
	6	0	0	0	0	68	944	115	136	149	162	175	189	193	207	213	220	220	220	222	224
	6.5	0	0	0	0	72	112	133	154	167	180	193	211	220	228	233	238	242	247	245	243

Ilustración 39 Matriz de potencia del convertidor de energía de la onda AWS (kW) [18]

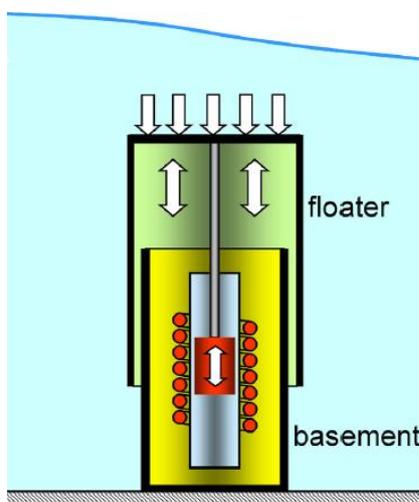


Ilustración 40 Representación esquemática del Archimedes Wave Swing [6]

Esta sería la matriz de potencia del sistema AWS, que como más adelante calcularemos se trata del tercer sistema de aprovechamiento de energía undimotriz offshore más adecuado para su empleo en la costa asturiana.

#### 6.5.4. Dispositivos atenuadores

##### 6.5.4.1. Pelamis

El Pelamis es un convertidor de energía undimotriz flotante, que consiste en un conjunto de cilindros semi sumergidos unidos por juntas articuladas. Las olas oceánicas realizan trabajo sobre el Pelamis moviendo secciones cilíndricas adyacentes entre sí a través de juntas con dos grados de libertad. Los dos ejes que componen cada articulación están inclinados respecto a la horizontal para así permitir que una respuesta neta sea inducida por la toma de fuerza, que resiste y reacciona contra el movimiento angular relativo de las articulaciones. La respuesta de potencia ofrece una rigidez hidrostática efectiva reducida a partir de una respuesta vertical, lo que resulta en una frecuencia natural dependiente de la pendiente. Por lo tanto, la máquina se puede diseñar con una respuesta resonante adaptada a la frecuencia dominante del clima de olas en el que se instalará, lo que minimiza los requisitos de potencia reactiva de la toma de fuerza.

El nivel de excitación transmitido a la respuesta resonante se puede controlar a través de la toma de fuerza.

La toma de fuerza del Pelamis consiste en conjuntos de cilindros hidráulicos que bombean fluido, a través de colectores de control, a acumuladores de alta presión para el almacenamiento de energía a corto plazo. Los motores hidráulicos utilizan el suministro uniforme de fluido a alta presión de los acumuladores para impulsar generadores eléctricos conectados a la red.

La toma de fuerza del Pelamis (ilustración 41) se puede examinar y desarrollar en dos partes separadas, que llamaremos la transmisión primaria y secundaria. La transmisión primaria, que consiste en los cilindros hidráulicos y sus controles, convierte el trabajo realizado por las olas en la estructura en energía almacenada. La transmisión secundaria, que consiste en motores hidráulicos acoplados a generadores eléctricos, convierte la energía almacenada en los acumuladores hidráulicos en electricidad transmitida a la costa. Esta separación, proporcionada por los acumuladores de alta presión, permite una absorción eficiente en un amplio rango de potencia incidente.

El momento de obstrucción de la articulación proporcionado por los cilindros debe variarse a lo largo de cada ciclo de onda de manera que las ondas hagan la máxima cantidad de trabajo en la máquina como un todo. El control en tiempo real del momento de unión se logra con el uso de conjuntos de válvulas controladas electrónicamente, que controlan el

flujo entre los cilindros hidráulicos, el acumulador y el depósito. Las válvulas están controladas para permitir diferentes combinaciones de cámaras para contribuir al momento de la junta aplicada.

Las transmisiones hidrostáticas convencionales, que usan bombas de desplazamiento variable acopladas para suministrar presión y flujo continuamente variables, típicamente tienen una eficacia máxima de alrededor del 60%. La eficiencia cae lejos del punto de operación ideal. Además, un sistema convencional calificado para absorber toda la gama de potencia incidente sería antieconómico e irremediablemente ineficiente en regímenes de baja potencia.

En la toma de fuerza del Pelamis, siempre que una cámara está presurizada, se intercambia fluido directamente con acumuladores de almacenamiento; las únicas ineficiencias están asociadas con la compresibilidad, la fricción del cojinete y del sello de los cilindros hidráulicos, y las pérdidas de flujo a través de válvulas y tuberías. Un diseño cuidadoso puede establecer estas pérdidas combinadas muy por debajo del 20% en una amplia gama de condiciones de operación. La transmisión primaria del Pelamis puede absorber cómodamente potencias de incidencia diez veces más altas que la potencia incidente promedio a la que el equipo de generación debe corresponder económicamente. Se mantiene una alta eficiencia a bajas potencias incidentes, que representan gran parte de la energía undimotriz disponible a lo largo del año [11].

La capacidad de soportar altas densidades de potencia de ola ha sido un objetivo clave de los diseñadores; el Pelamis es capaz de despojarse de la carga inherente, lo que significa que la columna vertebral no está sujeta a las cargas estructurales totales que de otro modo se le impondrían durante una tormenta. Como atenuador, se sienta sobre las olas en lugar de atravesarlas y se desajusta con grandes olas de tormenta, donde las longitudes de onda de las olas son mucho más largas que el dispositivo.

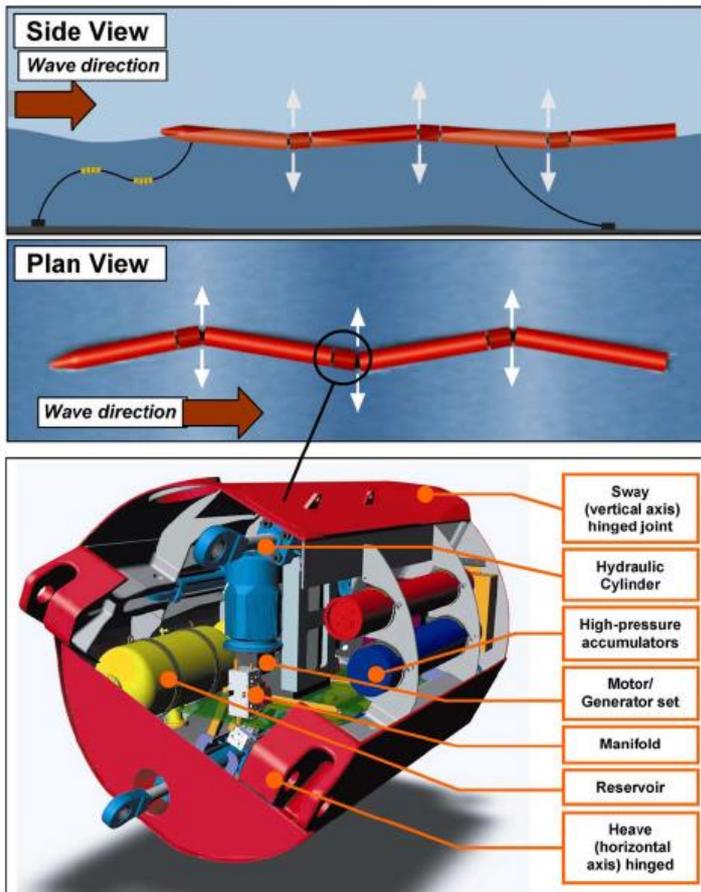


Ilustración 41 Diagramas que muestran la respuesta del Pelamis y el diseño físico de la toma de fuerza [11]

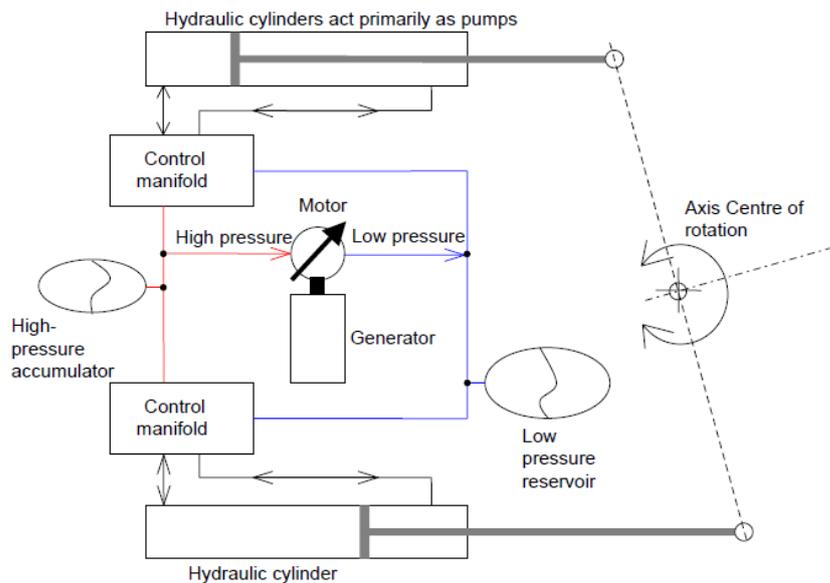


Ilustración 42 Esquema simplificado del sistema de toma de fuerza del Pelamis [11]

A continuación, mostramos la matriz de potencia del Pelamis, que como calculamos más adelante tiene una baja eficiencia para su empleo en la costa asturiana.

		Te (s)																
		5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
Hs (m)	1	0	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	0	0	0
	1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33
	2	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59
	2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92
	3	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132
	3.5	0	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180
	4	0	0	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213
	4.5	0	0	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266
	5	0	0	0	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328
	5.5	0	0	0	750	750	750	750	750	717	667	638	586	530	496	446	395	355
	6	0	0	0	0	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415	
	6.5	0	0	0	0	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481		
	7	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525	
	7.5	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Ilustración 43 Matriz de potencia del convertidor de energía de las olas Pelamis (kW) [18]

### 6.5.4.2. La bomba de oleaje McCabe

Este dispositivo consiste en tres pontones de acero rectangulares estrechos, que se articulan juntos a través de su viga, la cual apunta hacia las olas entrantes. Los pontones se mueven entre sí y la energía se extrae de este movimiento mediante arietes hidráulicos lineales montados entre los pontones cerca de las bisagras. La salida está destinada a un uso lejano en aplicaciones tales como la desalinización, así como la generación eléctrica.

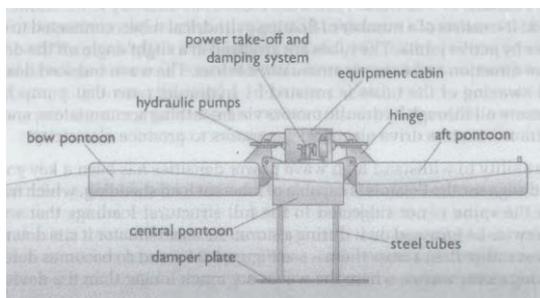


Ilustración 44 La bomba de ondas McCabe: esquema que muestra la operación [1]

### 6.5.4.3. The Pitching and Surging FROG

El Pitching and Surging FROG es un convertidor de energía undimotriz de reacción que logra un comportamiento absorbente de energía mediante el movimiento de la masa inercial interna. Es una estructura compacta que no requiere una columna vertebral de base.

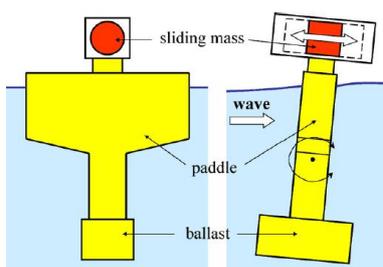


Ilustración 45 Vistas frontal y lateral del PS Frog Mk 5 [6]

## **7. Evaluación económica**

Una estación de energía undimotriz, además del artefacto que sustenta los generadores, precisa de tendido de cables y subestaciones eléctricas; embarcaciones auxiliares para el montaje y mantenimiento; puertos en el litoral, que como base logística para la construcción de los parques, permita la estiba de material, la carga y descarga de equipos, y el atraque y servicios para las embarcaciones de apoyo (en Asturias, con el Musel y el puerto de Avilés, se podría hacer un buen trabajo una vez que se hayan definido el tipo de artefacto y de embarcaciones de apoyo); los astilleros del litoral para la construcción de plataformas y embarcaciones auxiliares; y la industria naval experimentada en anclaje al fondo marino mediante plataformas o sistemas de fondeo.

Respecto al empleo se estima que el aprovechamiento de esta energía genera aproximadamente 15.000 empleos por gigavatio producido [22].

Actualmente, con los dispositivos existentes, los costes de producción reales de energía undimotriz son altos, encontrándose fuera del rango comercial. Tampoco son del todo fiables debido a la inmadurez que presenta la tecnología. Los puntos críticos que influyen directamente en los costes de esta tecnología son, entre otros:

- Los sistemas o prototipos se enfrentan al reto de probar su eficiencia en el mar con resultados contrastables en el tiempo.
- El coste de inversión final es mayor de lo previsto en muchos casos.
- Las horas de funcionamiento reales no se cumplen por problemas de mantenimiento.
- Muchos de los dispositivos no sobreviven en el mar en condiciones reales.

El camino para reducir los costes actuales reside en lograr una tasa de aprendizaje que permita su estimación al margen de los diseños, así como un sistema de apoyo adecuado que acelere el proceso. Los costes teóricos actuales de una planta de olas se encontrarían entre 3,9 y 6,7 millones de euros por megavatio [21].

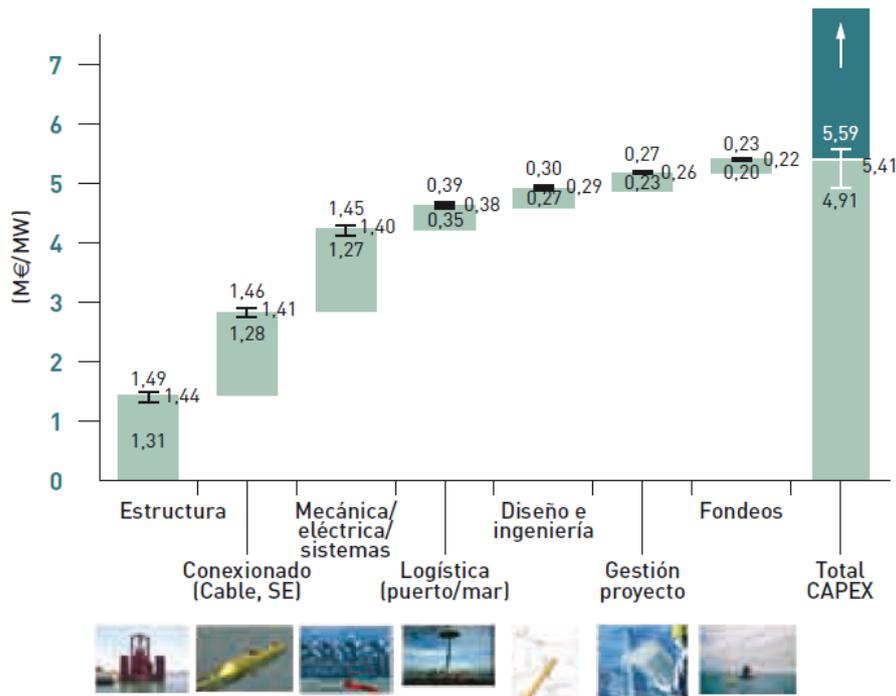


Ilustración 46 Distribución del capex de un sistema de olas [21]

En cuanto a las horas teóricas de funcionamiento, podrían oscilar entre 2.200 y 3.100 horas anuales. Los costes de inversión y operación son muy dependientes del dimensionado, capacidad, ubicación y en definitiva de la tecnología de aprovechamiento. El coste de operación oscilaría entre 30 y 52 millones de euros por megavatio y año, de los cuales aproximadamente el 75% sería para reparaciones y mantenimiento [21].

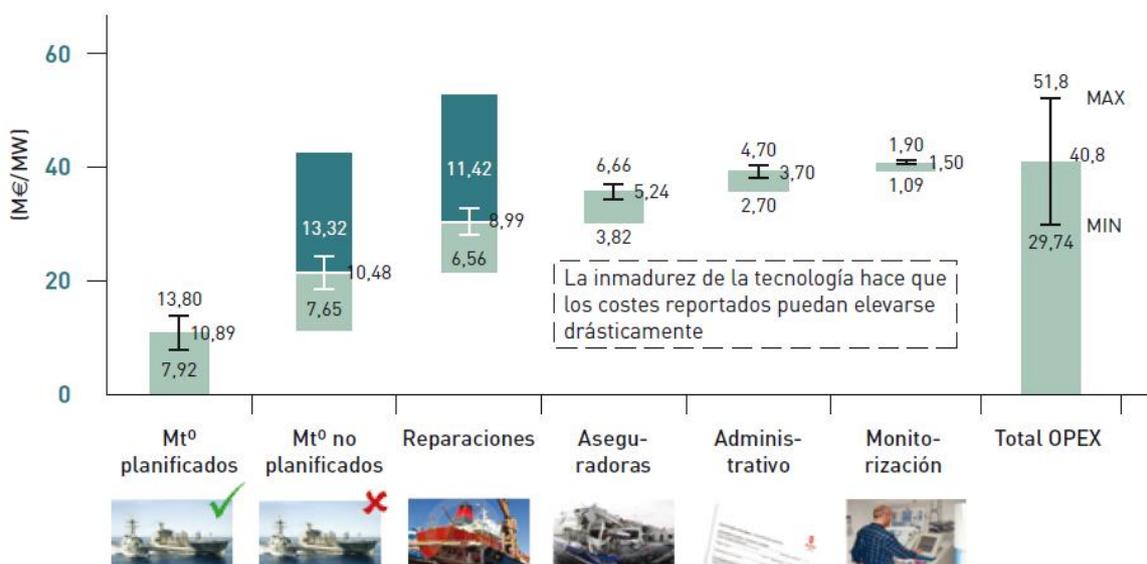


Ilustración 47 Desglose del OPEX de un sistema marino [21]

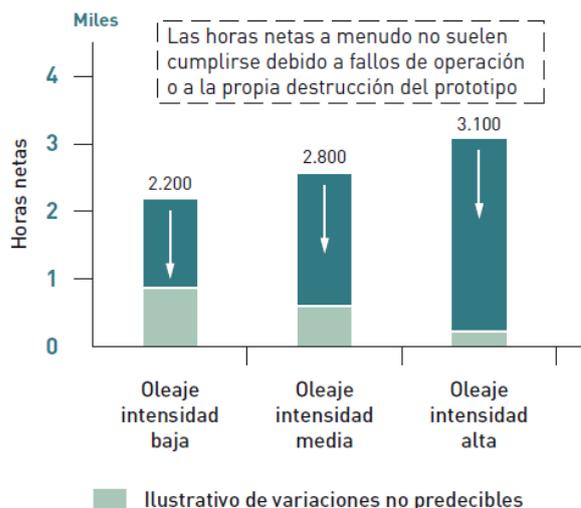


Ilustración 48 Rango de horas de funcionamiento de un sistema marino [21]

La mayoría de los costes de operación y mantenimiento proceden del mantenimiento ordinario, los imprevistos y las reparaciones. El desglose correspondiente a costes de operación y mantenimiento sería el siguiente: 29% de mantenimiento predictivo, 28% de mantenimiento correctivo, 24% de modernización y el restante a seguros (14%), licencias (1%) y monitorización (4%).

La reducción de costes es viable tanto por la I+D a corto plazo (diseño y optimización), como por la experiencia y exploración a más largo plazo. La reducción de los costes se alcanzará en la madurez, convirtiendo en competitiva a la energía undimotriz con unos costes estabilizados en torno a 0,05 €/kW·h que serán realidad entre 2025 y 2030 [21].

En la actualidad, no se espera la disponibilidad de plantas marinas comerciales a corto-medio plazo debido a los problemas existentes entre los modelos y el comportamiento real de las instalaciones en el medio marino. En cambio, si es factible la disponibilidad de plantas a pequeña escala que aporten su energía a red en casos muy puntuales para determinadas tecnologías más avanzadas, debido a que estas cuentan con fuertes apoyos de financiación. La reducción de costes en la energía undimotriz es viable por varias vías de desarrollo a corto plazo mediante la mejora del diseño conceptual y la optimización de la ingeniería de detalle. A largo plazo, haciendo uso de economías de escala en la producción, construcción, instalación, operación y gestión o con base en el aprendizaje.

Para conseguir el despegue comercial de esta tecnología se deberán impulsar como acciones estratégicas:

- Un programa intensivo de I+D enfocado a nuevos diseños y componentes que reduzcan el coste y mejoren la supervivencia de los equipos.
- Un programa de demostración dedicado al desarrollo y prueba de prototipos a escala.

- Una red de infraestructuras experimentales que permitan validar los convertidores e instalaciones en todo su ciclo de vida.
- Una acción transversal de la Unión Europea para la mejora de la fiabilidad mediante nuevas y mejoradas técnicas de instalación.

En este sentido, el avance de la tecnología se considera pasará por las siguientes fases o periodos:

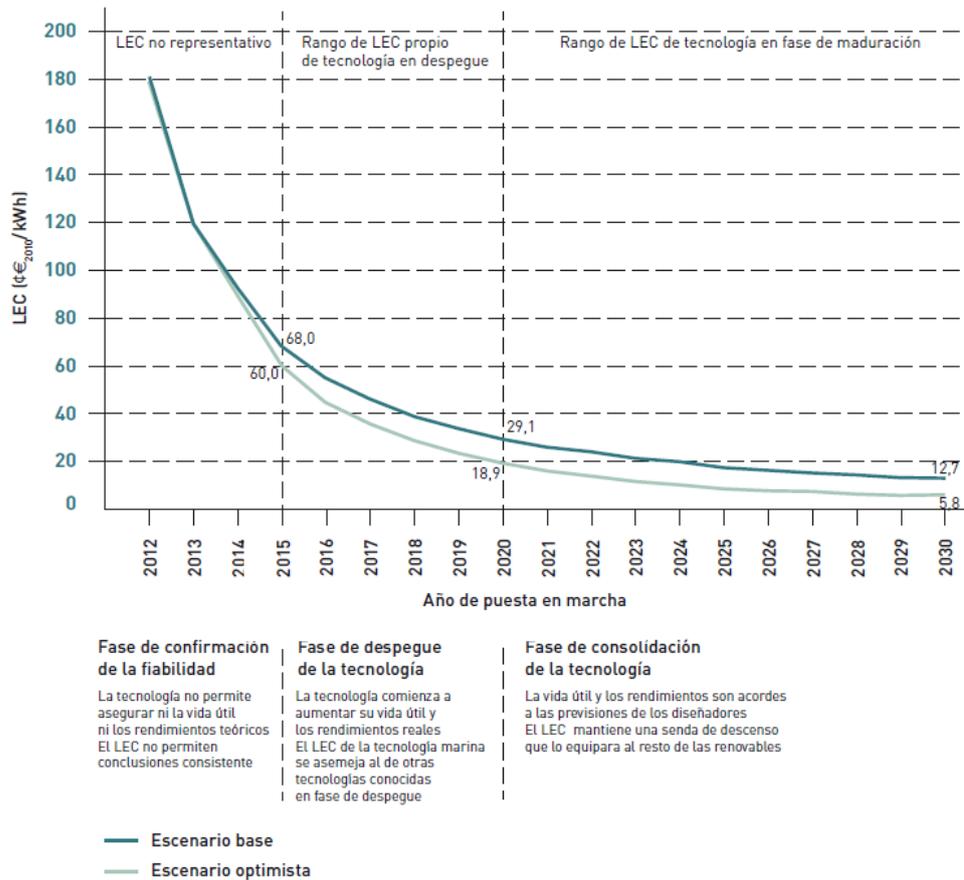


Ilustración 49 Periodos de la energía undimotriz [21]

Una vez que los sistemas entren en la fase de consolidación de la tecnología, la principal palanca para disminuir los costes será la reducción de los costes de inversión (67% del impacto total) y, en menor medida, la reducción de los costes de operación de las plantas, que contribuirán a reducir en otro 33% el coste de generación.

El coste de inversión podría alcanzar los 2-3 millones de euros por MW en 2020 y 0,75-2 millones de euros por MW en 2030, frente a los más de 5 millones de euros por MW en la actualidad. Se espera una reducción de los costes de inversión por curva de experiencia en el entorno de 5-10% cada vez que se dobla la capacidad instalada, similar a la curva de experiencia de la energía eólica (4-6%) [21].

Entre las mejoras tecnológicas para la reducción del coste de inversión se incluyen el desarrollo de plantas más fiables, la mejora en los modelos de simulación, el uso de nuevos

materiales compuestos, la mejor interacción de la estructura con los otros materiales, la mejora de los sistemas de fricción que alargaran la vida útil de las plantas, mejoras en cables tipo HVDC (corriente continua de alta tensión), el desarrollo de clúster de plantas marinas que abaratan el coste total, y el desarrollo de técnicas de fondeo e instalación de plantas.

Los costes de operación y mantenimiento permanecerán como un valor elevado en todo el periodo ante la dificultad de trabajar en el medio marino. Se espera una reducción total del 25% del coste de operación y mantenimiento en función del desarrollo de componentes especializados, las potenciales sinergias con la eólica *offshore*, el desarrollo de sistemas de seguimiento y monitorización, el incremento de la fiabilidad de las plantas, y ahorros derivados del menor coste de los seguros que se habrán reducido al reducirse la inversión.

Para alcanzar la evolución de costes propuesta, se requiere el cumplimiento de las dos siguientes hipótesis de trabajo: inversión en I+D por parte de empresas y entidades públicas, y despliegue de nueva capacidad de generación marina que impulse la experiencia.

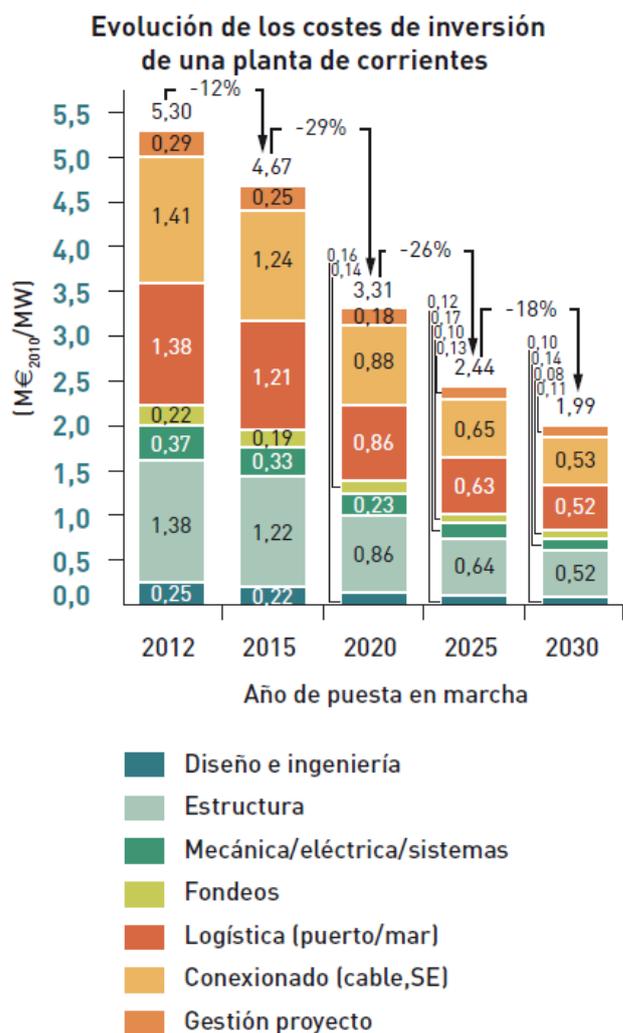


Ilustración 50 Evolución del coste de inversión en una planta de energía de las corrientes [21]

## **8. Impacto medioambiental**

Los convertidores de energía undimotriz pueden estar entre las tecnologías de energía más benignas desde el punto de vista medioambiental por las siguientes razones.

- Tienen poco potencial para la contaminación química. A lo sumo, pueden contener un poco de aceite lubricante o hidráulico, que estará cuidadosamente sellado del ambiente.
- Tienen poco impacto visual, excepto cuando están montados en la orilla.
- Es probable que la generación de ruido sea baja, generalmente más baja que el ruido de las olas (pueden producirse efectos debido al ruido de baja frecuencia en los cetáceos, pero esto aún no se ha confirmado).
- Podrían presentar cierto riesgo para la navegación.
- No deberían presentar dificultades en cuanto a la migración de peces.
- Los sistemas flotantes, dado que son incapaces de extraer más que una pequeña fracción de la energía producida con tormentas, no influirán significativamente en el medio ambiente costero. Por supuesto, un sistema como un rompeolas que incorpore un dispositivo de energía undimotriz proporcionará protección costera y puede dar como resultado cambios en la línea de medición. Las estructuras de hormigón deberán eliminarse al final de su vida útil.
- Los sistemas de energía undimotriz en la costa liberarán (de, por ejemplo, transporte de materiales y de construcción) aproximadamente 11 g de CO<sub>2</sub>, 0.03 g de SO<sub>2</sub> y 0.05 g de NO<sub>x</sub> por cada kWh de electricidad generada [1], lo que los hace muy atractivo en comparación con la mezcla de generación eléctrica convencional de carbón, gas y plantas nucleares. Por lo tanto, la energía undimotriz puede hacer una contribución significativa para cumplir los objetivos de cambio climático y lluvia ácida.

## **9. Integración**

El aprovechamiento de la energía undimotriz y su integración en red conllevan una serie de barreras, tanto de tipo tecnológico y de mercado, como de aspectos administrativos y sociales.

Siendo la energía undimotriz un área emergente de la ingeniería es preciso identificar y evaluar concienzudamente las posibles barreras al desarrollo del sector, para ser capaces de definir consecuentemente los retos que pueden retrasar o dinamizar el progreso de los sistemas como paso primero y esencial para mitigar las limitaciones al desarrollo.

Las lecciones aprendidas de tecnologías con mayor grado de madurez, como lo es la industria eólica, pueden aportar luz en el camino a seguir para la evolución del desarrollo de la energía undimotriz, como son la necesidad de una red de evacuación robusta, carencia de protocolos y estándares de diseño, la divergencia tecnológica, las condiciones severas del mar, el coste de la instalación y de mantenimiento, las severas condiciones de operación, y las irregularidades en amplitud, fase y dirección de las olas [21].

Como barreras de mercado podríamos señalar los elevados costes de inversión y generación, la insuficiencia de programas de apoyo público a la I+D, retornos insuficientes, la falta de datos históricos para previsión de riesgos, dificultades financieras para proyectos de demostración de desarrollos tecnológicos innovadores, mercados de la electricidad convencionales (profusión de plantas centralizadas de producción), y la manipulación de la libre competencia por compañías eléctricas.

Como barreras administrativas, medioambientales y sociales podríamos señalar los marcos administrativos poco adecuados a las energías renovables, dilatación y complejidad en la tramitación y gestión de proyectos, la compatibilidad con diversos usos del mar, la limitación para su implantación por temas medioambientales, la falta de aceptación o compromiso público por una divulgación insuficiente, la inmadurez de procesos respecto a otras fuentes ya competitivas, y la falta de personal cualificado.

La energía undimotriz presenta excelentes perspectivas de desarrollo, aunque su desarrollo futuro se verá condicionado por la evolución tecnológica y la superación de las barreras mencionadas en el apartado anterior. En contraposición, sus principales fortalezas son el tratarse de una energía limpia, renovable y autóctona de alto potencial, con leve impacto ambiental y visual, capacidad de predicción, y buena correlación entre recurso y demanda.

Las principales propuestas para superar las barreras mencionadas en el apartado anterior y alcanzar los objetivos establecidos para el año 2020 son económicas, normativas, y de formación y divulgación [21].

#### Propuestas normativas:

- Desarrollo de un marco regulatorio específico para el desarrollo de proyectos de energías del mar y creación de un grupo propio específico para proyectos de energías del mar en Régimen Especial.
- Simplificación de los trámites administrativos de las instalaciones renovables eléctricas.
- Reducción de barreras administrativas a los proyectos de I+D+i.
- Simplificación de los procedimientos administrativos.

#### Propuestas de subvención:

- Programa de subvenciones a la investigación y desarrollo tecnológico.
- Programa de ayudas públicas a proyectos de innovación y demostración para aplicaciones térmicas, eléctricas y combustibles renovables.
- Programa de IDAE de apoyo a la inversión para proyectos demostración tecnológica con generación eléctrica. Este programa está dirigido a aquellos proyectos de innovación tecnológica, en fase de demostración tecnológica o pre-comercial en España como son los proyectos de generación eléctrica mediante energías que requieren ayudas directas a la inversión, complementarias al apoyo económico a la producción vía Régimen Especial.

#### Propuestas de financiación:

- Programa de financiación para investigación y desarrollo tecnológicos de nuevos prototipos e innovación: actividades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación de tecnologías de aprovechamiento de energías del mar e instalaciones de conexión a red, desarrollo en paralelo de la infraestructura y capacidades para dar soporte auxiliar a la tecnología undimotriz, y se precisa un importante esfuerzo en I+D en todas las áreas de actividad que comprende la energía de las olas, para lograr a través del desarrollo tecnológico hacer realidad su despegue definitivo.
- Programa de financiación para proyectos de demostración de desarrollos tecnológicos innovadores con energías renovables. Este programa englobaría aquellas actuaciones financieras dirigidas a la financiación de proyectos en fase de demostración o comercial muy incipiente (pre-comerciales), promovidos por entidades públicas y privadas de carácter nacional, con posibilidad de participación de centros tecnológicos y de investigación.
- Programa de financiación para proyectos en fase comercial. Los objetivos que conseguir con estas actuaciones en el sector de las energías del mar son, entre otros: incentivar el mercado apoyando la innovación para la reducción del riesgo

inversor en manos del tecnólogo, promover alianzas más equitativas entre proyectos de investigación y demostradores industriales, valorar otras tecnologías para establecer sinergias y posibilidades de desarrollo de sistemas híbridos, y conseguir instrumentos de financiación acordes con los términos del mercado para lograr el salto de la escala prototipo demostración a las plantas comerciales.

Propuestas de primas/tarifas a producción renovable: establecimiento de un marco tarifario específico para el sector de las energías del mar, con la creación de un grupo propio dentro del Régimen Especial y un esquema de apoyo adecuado, que pudiera ser complementado en las fases iniciales por subvenciones a la inversión, que permita establecer un incentivo atractivo y competitivo que active el mercado y desarrolle el sector.

Propuestas de información/formación: campañas de divulgación, imagen e información para la opinión pública que fomenten los beneficios medioambientales y socioeconómicos que conllevaría el aprovechamiento energético de las energías del mar, y formación y especialización de todos los agentes de la cadena de valor.

Propuestas de planificación de infraestructuras de evacuación de energía eléctrica: es preciso un adecuado desarrollo de las redes eléctricas en las regiones marítimas periféricas para asegurar la exportación de la energía del oleaje en los mercados.

Propuestas de promoción: fomento de la implantación comercial de tecnologías innovadoras, en particular de las diferentes tecnologías de aprovechamiento de energías del mar. La salida eléctrica de un sistema de energía undimotriz se puede usar directamente, pero es mucho más eficiente si la electricidad se suministre a la red. Los problemas eléctricos asociados con estos sistemas incluyen la variabilidad del suministro de electricidad debido a la naturaleza de las olas, el ajuste de fase, la corrección del factor de potencia y las pérdidas de transmisión.

### **9.1. Energía undimotriz para comunidades aisladas**

En este caso se debe tener mucho cuidado al integrar la salida eléctrica de un sistema de energía undimotriz: la salida de un sistema de energía undimotriz variará con el tiempo (excepto en el caso de unidades como el TAPCHAN) y puede causar fluctuaciones de voltaje o frecuencia.

La incorporación de una salida eléctrica variable de un sistema de energía undimotriz a la red puede ser parcialmente acomodada mediante el uso de cargas de descarga localizadas en casas, escuelas, fábricas, etc., para estabilizar la red.

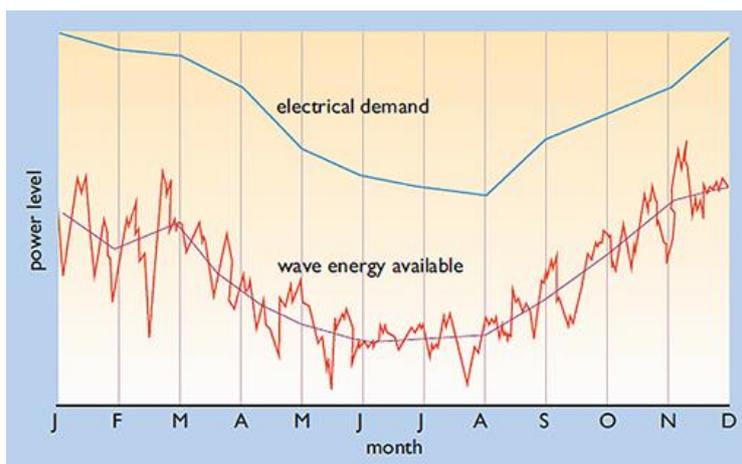
Mediante un diseño general cuidadoso de un sistema integrado, una comunidad remota podría disfrutar de ganancias significativas en el suministro de electricidad a partir de un

sistema de energía undimotriz. Si esto produce la mayor parte de la energía, la reducción en el consumo de gasóleo sería sustancial, y dado que es costoso transportar gasóleo hasta las ubicaciones remotas el ahorro de costes podría ser grande. Idealmente, el generador diésel se mantendría en reserva y solo se utilizaría cuando la actividad de las olas fuera demasiado baja para satisfacer la demanda. Un sistema de almacenamiento de energía como las baterías sería muy útil para suavizar el suministro y minimizar el acudir al generador diésel.

## **9.2. Energía de las olas para grandes redes eléctricas**

Cuando las salidas de potencia eléctrica de varias unidades de energía undimotriz se suman la producción total será generalmente más suave que para una sola unidad. Si ampliamos esto a una formación de varios cientos de dispositivos flotantes, la salida sumada será más suave aún. Además, cualquier fluctuación en el producto será menos importante si la electricidad se va a entregar a grandes sistemas nacionales, donde en la mayoría de los lugares la red es lo suficientemente fuerte como para absorber estas fluctuaciones.

Finalmente, aunque nos hemos centrado en las fluctuaciones de segundos o minutos a corto plazo, el recurso de oleaje también varía día a día y por estación. Para los países del Atlántico nororiental como el Reino Unido, Irlanda, España y Noruega, la variación estacional que se muestra en la ilustración 51 demuestra que la producción de energía de las olas alcanza un máximo en el mal tiempo del invierno cuando la demanda eléctrica es mayor.



*Ilustración 51 Disponibilidad estacional de energía undimotriz y demanda eléctrica del Reino Unido [28]*

## **10. Evaluación de energía undimotriz en Asturias y selección de los dispositivos adecuados para su aprovechamiento**

En Asturias hay una infraestructura liderada por la Universidad de Oviedo que pretende la creación de una Instalación Científica Técnica Singular emplazada en la costa asturiana para la experimentación, demostración y explotación de sistemas de captación de energías de origen marino, almacenamiento y transporte de energía eléctrica, investigación medioambiental, acuicultura marina, estudios de biodiversidad y análisis del cambio climático [21].

En esta parte del trabajo, vamos a llevar a cabo una evaluación detallada de los recursos de energía de oleaje de Asturias, lo cual es crucial dada la gran variabilidad espacial y temporal de la energía undimotriz. De las evaluaciones y atlas de energía de las olas globales existentes deducimos que muchas regiones en Europa Occidental poseen un recurso sustancial, el gran fetch del Atlántico combinado con los vientos del oeste, lo cual produce un clima de olas energético.

La presente sección del trabajo trata del recurso de energía del oleaje en Asturias, cuya costa se extiende a lo largo de aproximadamente 250 km entre la Ría de Ribadeo (límite con Galicia) y la Ría de la Tina Mayor (límite con Cantabria). La costa de Asturias está azotada por potentes olas generadas en el Atlántico y, en menor medida, en el Golfo de Vizcaya. Con el fin de evaluar el recurso de la energía undimotriz offshore en esta área se utilizan dos fuentes principales de datos de oleaje: datos de oleaje de boyas e hindcast obtenidos de modelos numéricos. El primero se obtiene de una evaluación de los recursos en términos de la potencia media de las olas y la energía de las olas anuales por metro de cresta de ola; el segundo se obtiene caracterizando el recurso en términos de los estados del mar que proporcionan la energía, o para ser más precisos, de sus parámetros de onda. Esta caracterización es relevante con miras a decidir cuál es el convertidor de energía undimotriz (WEC) más apropiado para el área, y quizás incluso para diseñar dispositivos ad hoc.

Debido a que el coste de construcción de una planta de energía undimotriz aumenta con la distancia a la costa y la profundidad del agua, las estaciones de oleaje generalmente se planifican para aguas someras o, a lo sumo, aguas intermedias (de ahí la elección de boyas de oleaje que haremos más adelante). Como expusimos al principio del trabajo, las propiedades de las olas, y por lo tanto su potencia, experimentan cambios significativos a medida que las olas se propagan desde aguas profundas hacia la costa, bajo la acción de la refracción, el agrupamiento y, en algunos casos, la difracción; cambios que afectan la mayoría de las propiedades de onda, incluida la dirección, la altura y la potencia. Los datos de olas analizados se corresponden principalmente a lugares de aguas profundas, se complementan con una investigación de la altura de las olas, la dirección, y los patrones de

potencia desde alta mar hasta la costa. El modelo de oleaje costero SWAN (Simulating WAves Nearshore), una vez validado con datos de boyas de oleaje, se usa para este propósito. Se consideran tres casos de estudio representativos: una situación extremadamente energética (el pico de una tormenta), y las condiciones típicas de invierno y verano. De esta manera se determinan las áreas costeras donde se concentra la energía undimotriz. Estas son, por supuesto, las ubicaciones para las futuras plantas marinas.

Buoy	Coordinates	Depth (m)	$(H_{m0})_{\text{mean}} \pm \text{std. dev. (m)}$	$(H_{m0})_{\text{max}} \text{ (m)}$	$J_{\text{mean}} \text{ (kW/m)}$	$J_{\text{ans}} \text{ (kW/m)}$	$(E)_{\text{annual}} \text{ (MWh/m)}$
Deepwater buoy (Cape Peñas)	43.74°N, 6.17°W	450	1.97 ± 1.08	12.20	25.49	1097.5	223.31
Coastal buoy (Gijón)	43.61°N, 5.67°W	54	1.61 ± 0.94	9.00	18.89	711.6	165.45

Tabla 2 Boyas de oleaje: ubicación, profundidad del agua y principales estadísticas de la ola ( $H_{m0}$ , altura significativa de la ola;  $J$ , energía de la onda;  $(E)_{\text{annual}}$  energía de ola total anual) [2]

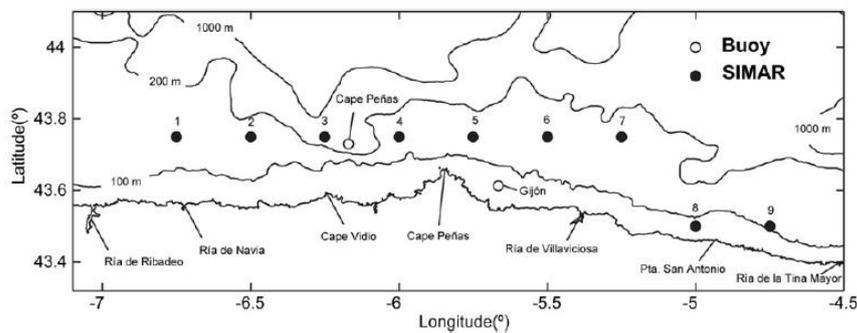


Ilustración 52 Litoral asturiano y batimetría con la ubicación de los sitios de estudio (puntos SIMAR-44 y boyas de olas) [2]

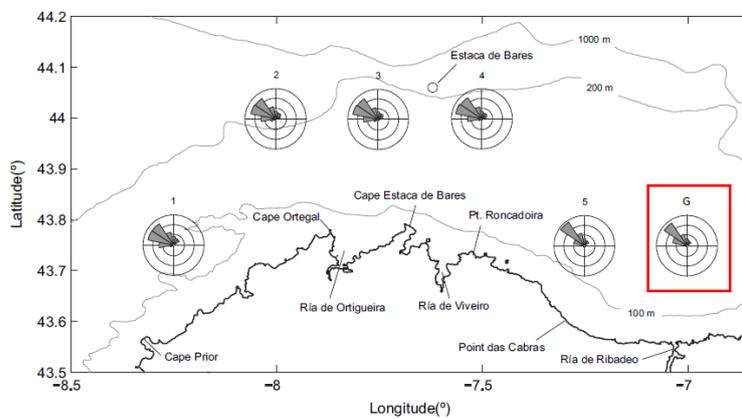


Ilustración 53 Litoral gallego y batimetría con la ubicación del sitio de estudio (punto SIMAR-G) [3]

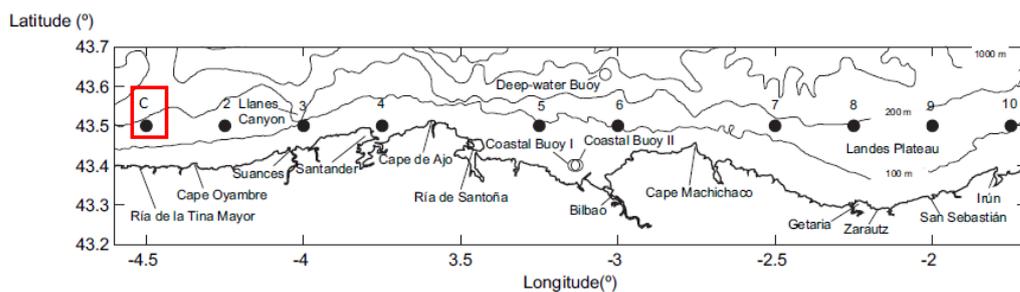


Ilustración 54 Litoral cántabro y batimetría con la ubicación del sitio de estudio (punto SIMAR-C) [4]

## **10.1. Energía undimotriz offshore (en alta mar)**

Para realizar este trabajo hemos utilizado dos tipos de datos de oleaje: datos de boyas de oleaje e hindcast obtenidos de modelos numéricos. Los primeros se obtuvieron con dos boyas operadas por Puertos del Estado, una en alta mar (la boya Cabo Peñas) y la otra costera (la boya Gijón). Estas boyas han estado en operación desde 1997 (Cabo Peñas) y 2001 (Gijón), esta última con una brecha entre 2002 y 2003. Sus coordenadas y la profundidad del agua se representan en la Tabla 2.

La segunda fuente de datos de oleaje utilizada es la nueva base de datos SIMAR-44, un conjunto de datos oceanográficos hindcast (incluidos los datos del viento, periodos, el nivel del mar y las olas) que abarca 44 años (del 01/01/1958 al 31/12/2001) con una frecuencia de tres horas. Este conjunto de datos es el resultado de un gran esfuerzo de investigación que comenzó con el reanálisis atmosférico global que integra datos instrumentales y satelitales llevados a cabo por el Centro Nacional de Predicción Ambiental de los Estados Unidos (NCEP). Sus resultados, que abarcan el período de 44 años antes mencionado, se utilizaron para forzar el modelo atmosférico regional REMO (REGioanl MOdel) en el contexto del Proyecto Europeo HIPOCAS (“Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe”).

Finalmente, los campos de viento así obtenidos constituyeron la entrada para el ciclo WAM (WAve Model) 4 del modelo de oleaje de tercera generación, ejecutado en una red que cubre el Atlántico Norte con una resolución de 30' (lat.)  $\times$  30' (Long.), mejorado cerca de la costa a 15'  $\times$  15'. Los datos correspondientes a 11 puntos de cuadrícula cerca de la costa asturiana fueron utilizados en este trabajo.

Los parámetros fundamentales de la energía de las olas para las zonas de estudio son la altura media significativa de la ola y su desviación estándar, la altura máxima significativa de las olas, la potencia media y máxima de las olas, y la energía promedio anual, presentados en la tabla 2 (boyas de olas) y la tabla 3 (puntos SIMAR).

La potencia media de ola está muy por encima de  $20 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ , con excepción de las dos zonas con profundidades de agua menor de 100 m (punto SIMAR 8 y la boya de olas de Gijón) y por encima de  $30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ , en los puntos SIMAR 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, y G. Con respecto a la energía de onda anual, excede  $200 \text{ MWhm}^{-1}$  en los puntos SIMAR 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, G, C, y la Boya de Cabo Peñas, y de  $250 \text{ MWhm}^{-1}$  en los puntos SIMAR 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y G [2].

El punto SIMAR 8 y la boya de olas de Gijón (y, en menor medida, los puntos SIMAR 9 y C) son menos energéticos de acuerdo con sus profundidades de agua más pequeñas, y su mayor distancia a la costa gallega, añadiendo además el efecto de abrigo de Cabo Peñas. Los puntos SIMAR 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y G, todos a la misma latitud, tienen profundidades de

agua entre 100 m y 200 m, excepto el punto 3, que está en aguas más profundas debido a una curva en la isolínea de profundidad 200 m; estos puntos son representativos del clima de olas en alta mar. Incidentalmente, la boya de olas de Cabo Peñas, aunque en proximidad al punto SIMAR 3, presenta valores algo menores de energía de oleaje (tabla 3); esto es probablemente debido a sus períodos de inactividad, que ocurren principalmente en invierno (la temporada con las olas más enérgicas, como explicaremos más adelante).

En general, la energía de las olas y los valores de energía en las zonas de estudio son evidencia del muy sustancial recurso de energía de las olas en Asturias, solo ligeramente inferior al de su vecina Galicia.

Los valores anuales de energía y la potencia media de las olas proporcionan una evaluación general del recurso energético, pero no revelan las características de las olas subyacentes. La caracterización del recurso en términos de parámetros de onda es un requisito previo para seleccionar, diseñar y optimizar el diseño de los convertidores de energía undimotriz que se utilizarán en el área. Los diagramas combinados de dispersión y energía proporcionan un método conveniente para visualizar los resultados de esta caracterización, los cuales se presentan en la ilustración 55 para los puntos SIMAR 1, 3, 5, 7, 9, G, y C. En estos diagramas, la abscisa es el período de energía y la ordenada es la altura de ola significativa. El período de energía se define como [2]

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

donde  $m_n$  representa el momento espectral de orden n, [2]

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^n S(f, \theta) df d\theta$$

Para comprender mejor el significado físico del período de energía, es útil considerarlo como el período de una onda sinusoidal con la misma energía del estado del mar. En cuanto a la altura de ola significativa, está dada por [2]

$$H_s = 4(m_0)^{\frac{1}{2}}$$

Los diagramas combinados de dispersión y energía indican la ocurrencia de los diferentes estados de mar de la siguiente manera. El área del diagrama está dividida por una cuadrícula virtual con una resolución de 1 s ( $\Delta T_e$ )  $\times$  1m ( $\Delta H_{m0}$ ), el número en cada celda de la cuadrícula indica la ocurrencia de los estados de mar correspondientes en número de horas en el año promedio (definido como el promedio de los 44 años abarcados por el conjunto de datos SIMAR-44). Las isolíneas de poder de ola también se representan, basándose en la siguiente aproximación en aguas profundas: [2]

$$J = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_{m0}^2$$

Finalmente, se usa un código de color para indicar la contribución de los diferentes estados del mar a la energía del oleaje anual total en el punto en cuestión (las contribuciones más grandes se resaltan en tonos rojizos). En los diagramas se observa fácilmente que la mayor parte de la energía es proporcionada por olas con períodos de energía relativamente grandes (entre 11 y 13 segundos), indicativos de su procedencia oceánica, y con alturas significativas de entre 2 y 5 metros. Aunque las olas más altas tienen mayores valores de potencia, esto se compensa en términos de contribución a la energía anual total por su menor ocurrencia. Por otro lado, la alta incidencia de olas con alturas de ola significativas por debajo de 2 m es insuficiente para compensar sus bajos valores de potencia.

Finalmente, la forma triangular del área coloreada en cada diagrama, con su vértice inclinado hacia la derecha, revela la correlación entre las alturas significativas de las olas y los períodos de energía.

En las rosas de oleaje anuales para los puntos SIMAR 1, 3, 5, 7, 9, G y C (ilustración 56), se puede apreciar que la mayor parte de la energía proviene de olas del cuarto cuadrante (noroeste) generadas a lo largo del gran fetch del Atlántico por vientos predominantes del oeste, con olas de noroeste predominando. Hay una contribución muy pequeña del primer cuadrante, correspondiente a las olas generadas sobre el Golfo de Vizcaya (menos frecuentes) por vientos con un componente este y ninguno en los cuadrantes 2 y 3 debido a la orientación de la costa. Esta composición direccional del recurso de energía undimotriz se confirma con las rosas de oleaje estacionales basadas en los datos de la boya de Cabo Peñas (ilustración 57). (Las temporadas para calcular estas rosas de oleaje se definieron tomando meses enteros, por ejemplo, "primavera" se refiere al período comprendido entre el 1 de abril y el 30 de junio). El rasgo más aparente en las rosas de oleaje de temporada es la prevalencia de las olas del noroeste a lo largo del año. Las olas de nor-noroeste y de oeste-noroeste están a la par en invierno, primavera y verano, pero las olas de nor-noroeste tienen ventaja en otoño. La estacionalidad está más marcada, sin embargo, en la altura de la ola, el invierno tiene las olas más grandes seguidas por el otoño, la primavera y el verano.

Point	Coordinates	Depth (m)	$(H_{m0})_{\text{mean}} \pm \text{std. dev. (m)}$	$(H_{m0})_{\text{max}} \text{ (m)}$	$J_{\text{mean}} \text{ (kW/m)}$	$J_{\text{max}} \text{ (kW/m)}$	$(E)_{\text{annual}} \text{ (MWh/m)}$
1	6.75°W, 43.75°N	126	2.01 ± 1.15	12.4	31.05	1235.6	272.09
2	6.5°W, 43.75°N	149	2.00 ± 1.13	12.1	30.37	1170.1	266.10
3	6.25°W, 43.75°N	475	2.00 ± 1.14	12.4	30.37	1228.8	266.14
4	6°W, 43.75°N	136	2.01 ± 1.15	12.7	30.82	1296.1	270.03
5	5.75°W, 43.75°N	137	2.02 ± 1.17	13.1	31.35	1279.1	274.75
6	5.5°W, 43.75°N	161	2.03 ± 1.18	13.4	31.50	1413.7	276.03
7	5.25°W, 43.75°N	175	2.04 ± 1.21	13.9	32.11	1522.0	281.43
8	5°W, 43.5°N	60	1.58 ± 0.93	10.8	18.89	932.2	165.56
9	4.75°W, 43.5°N	104	1.74 ± 1.15	13.1	23.86	1379.1	209.10
C	4.5°W, 43.5°N	171	1.76 ± 1.07	12.9	24.27	1329.9	212.80
G	43.75°N, -7°W	130	2.01 ± 1.15	12.4	31.09	1235.6	272.43

Tabla 3 Puntos SIMAR-44: ubicación, profundidad del agua y estadísticas principales de la ola ( $H_{m0}$ , altura significativa de la ola;  $J$ , energía de la onda;  $(E)_{\text{annual}}$  energía de las olas anual) [2] [3] [4]

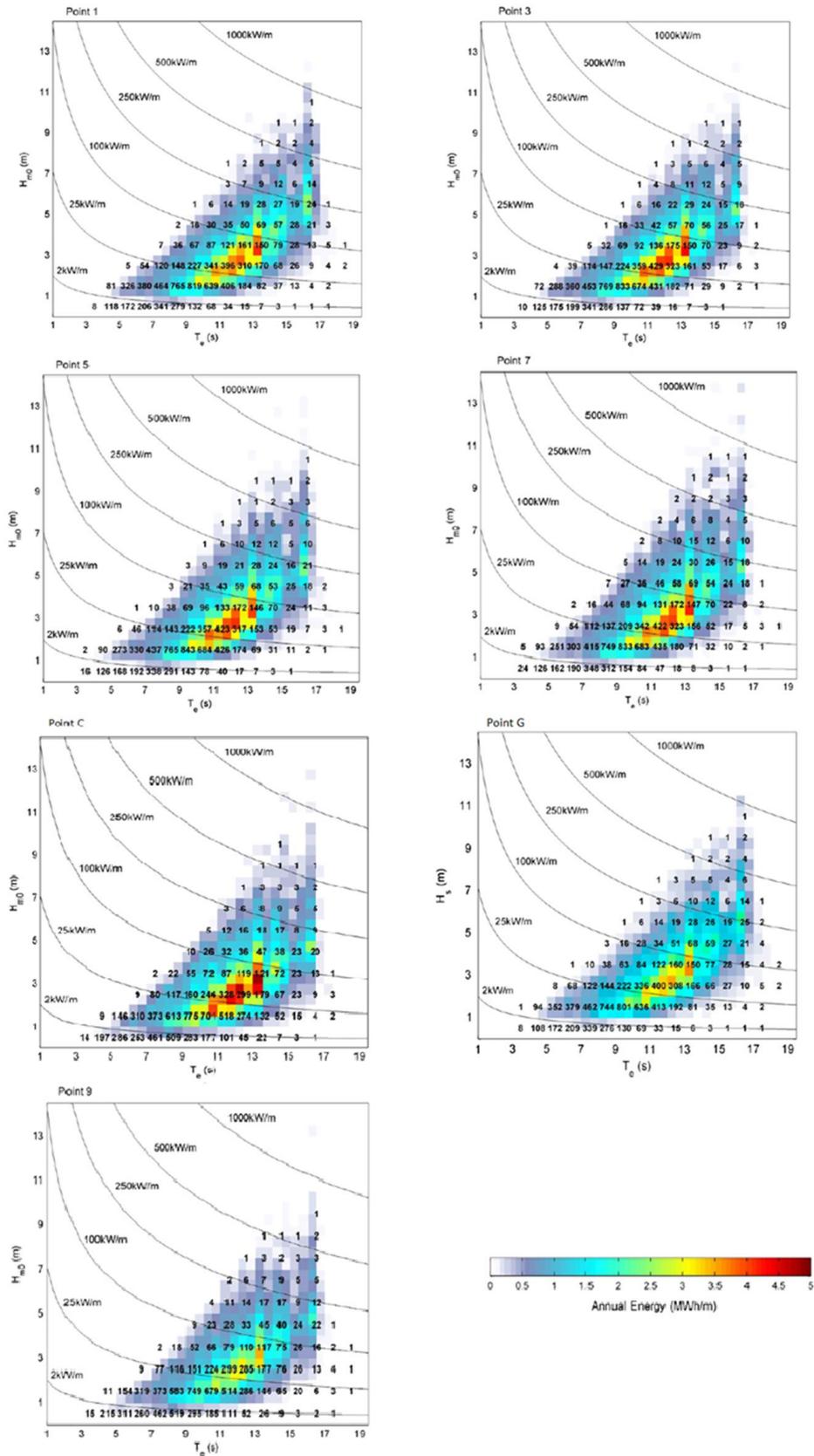


Ilustración 55 Diagramas combinados de dispersión y energía en términos de altura de ola significativa ( $H_{m0}$ ) y período de energía ( $T_e$ ) en los puntos SIMAR 1, 3, 5, 7, 9, G y C. La escala de colores representa la energía de las olas anuales, y los números la ocurrencia de los diferentes estados del mar en horas por año [2] [3] [4]

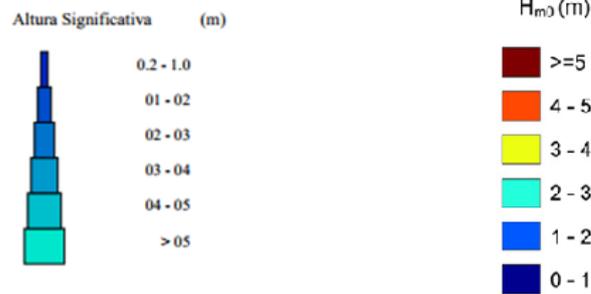
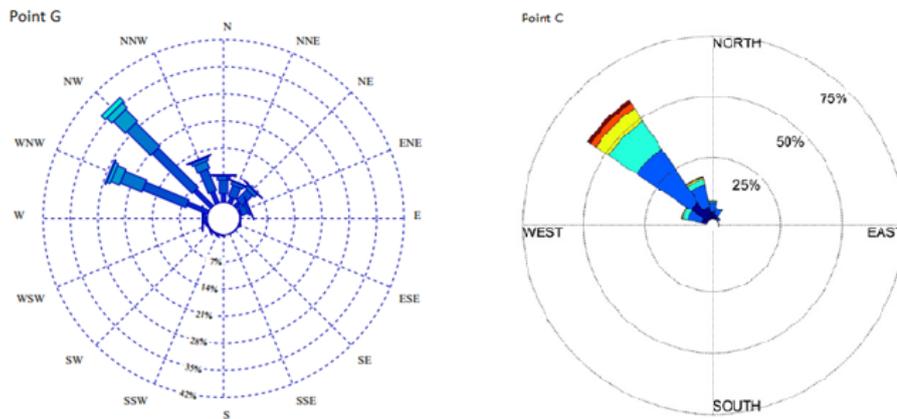
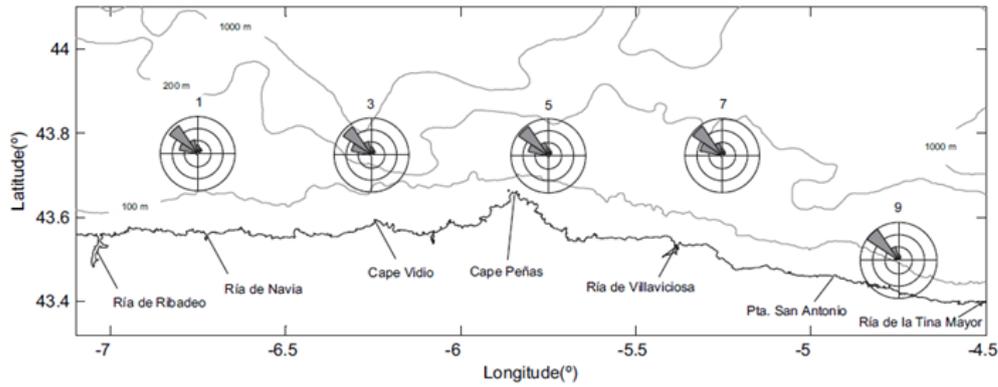


Ilustración 56 Rosas de oleaje anuales basadas en datos de los puntos SIMAR 1, 3, 5, 7, 9, G y C. (Los centros de las rosas se encuentran en los puntos correspondientes) [2] [4] [24]

## 10.2. Energía undimotriz onshore (en la orilla)

Aunque algunos de los sitios de estudio anteriores, en particular los puntos SIMAR 8, 9 y C, y la boya de olas de Gijón, están cerca de la costa, la sección anterior se refería principalmente al recurso de energía de las olas en alta mar (offshore). Esta sección trata de los patrones de olas costeras, que se determinan por medio del modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore). El modelo SWAN es un modelo avanzado de oleaje costero basado en la conservación de la ecuación de la acción de las olas. Los componentes de potencia de onda en las direcciones de coordenadas se calculan a partir de [2]

$$J_x = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) c_g(f, h) \cos \theta df d\theta$$

$$J_y = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) c_g(f, h) \sin \theta df d\theta$$

donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas geográficas,  $\rho$  es la densidad del agua,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $c_g$  es la velocidad del grupo, y  $S(f, \theta)$  es la densidad espectral direccional, que especifica cómo se distribuye la energía en las frecuencias ( $f$ ) y direcciones ( $\theta$ ). La magnitud de la potencia de onda por unidad de longitud del frente de onda (con unidades de  $W \cdot m^{-1}$  en el SI) se obtiene a partir de [2]

$$J = (J_x^2 + J_y^2)^{1/2}$$

Para este estudio, el modelo se implementó en una cuadrícula cartesiana que contiene toda la costa asturiana (ilustración 58). La cuadrícula tenía 69520 células con un tamaño constante a lo largo de la dirección  $x$  ( $\Delta_x = 350$  m) y un tamaño variable a lo largo de la dirección  $y$  ( $\Delta_y$  entre 200 m y 820 m). La batimetría se interpoló a partir de los nodos de la cuadrícula de las cartas náuticas 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937 y 938 del Instituto Hidrográfico Español de la Marina. Antes de su aplicación, el modelo se ejecutó para la validación forzada en los límites oceánicos con los espectros de onda registrados por la boya de oleaje de aguas profundas Cabo Peñas en el período del 01/01/2009 al 24/01/2009. Los resultados del modelo (altura de onda significativa y potencia de las olas) en la ubicación de la boya costera de Gijón se comparan con las mediciones de boya en la ilustración 59. Se puede ver que hay muy buena concordancia entre ambas series de datos, incluso durante el paso de tormenta que culmina a las 3:00 UTC del 24/01/2009 (los patrones de onda en el pico de la tormenta se determinan más adelante). La boya de olas Cabo Peñas dejó de funcionar 5 horas después del pico de la tormenta, en este punto, la ejecución de validación finaliza por falta de datos forzados; por esta razón, los datos del modelo SWAN son discontinuos en ese momento en la ilustración 59 [2].

Tras la validación, el modelo SWAN se aplica a tres casos de estudio definidos sobre la base de estados marinos reales registrados por la boya de aguas profundas de Cabo Peñas, es decir, el modelo se ejecuta forzado con los espectros de ondas registrados por la boya. La posición de los casos de estudio en los registros de la boya de Cabo Peñas se señala con flechas en la ilustración 60. El primer caso de estudio corresponde a las condiciones de oleaje del 04/01/2009 a las 7:00 UTC (ilustración 60): altura de ola significativa, 2,5 m; período de energía, 12,0s; dirección de onda media espectral, 332°. Este caso es representativo de las condiciones típicas de otoño-invierno, con un promedio significativo de altura de la ola medida por la boya en el período de octubre a marzo de 2,43 m. La altura de

ola resultante, la dirección y los patrones de potencia se muestran en la ilustración 61. La refracción de onda hace que las olas se desvíen al norte antes de llegar a la línea de costa, e incluso al nor-noreste donde esta última tiene orientación de noroeste-sureste, como en el lado este del Cabo Peñas. Un segundo efecto de la refracción de las olas, tal vez más importante con vistas a seleccionar los sitios prospectivos de las estaciones de oleaje, es la concentración de energía de olas en ciertas áreas costeras como resultado de la batimetría irregular. Los más destacados se encuentran en el lado occidental del Cabo Peñas y al oeste del cabo Vidio [2]

Otras áreas de concentración de olas ocurren cerca de la Ría de Navia, y al este de la Punta San Antonio (Candás), siendo esta última la porción más energética de la (relativamente suave) mitad oriental de la costa cercana a Asturias, la cual es ligeramente menos energética al este de Cabo Peñas debido al efecto protector del cabo. Este efecto es naturalmente más pronunciado en el flanco oriental del Cabo Peñas.

El segundo caso de estudio, representativo de una situación extremadamente energética, se basa en las condiciones de la ola del 24/01/2009 a las 3:00 UTC, el pico de una fuerte tormenta (ilustración 60). Los parámetros del estado del mar registrados por la boya de Cabo Peñas fueron 10,2 m (altura de ola significativa), 12,9 s (período de energía) y 297° (dirección de ola media). La altura de la ola, la dirección y los patrones de potencia calculados por el modelo se muestran en la ilustración 62. Los puntos comentados en el caso anterior aún se mantienen en general, naturalmente con una altura de ola y magnitudes de potencia considerablemente mayores. La refracción de onda es ligeramente más fuerte debido al período de ola ligeramente más alto y, especialmente, a la dirección más oblicua de las olas de aguas profundas, lo que también da como resultado una mejora del efecto de protección del Cabo Peñas.

Las áreas de concentración de la energía de olas cercanas a la costa son muy similares en cuanto a ubicación y extensión, solo que tal vez son algo más marcadas.

Finalmente, el tercer caso de estudio casi puede considerarse como la situación opuesta en términos de energía de las olas. Las condiciones de oleaje en aguas profundas son las registradas por la boya Cabo Peñas el 13/04/2009 a las 3:00 UTC (ilustración 60): altura significativa de las olas, 1,5 m; período de energía, 10,0 s; dirección media de la onda, 315°. Son representativos de una situación típica de primavera-verano: la altura media significativa de las olas para el período de abril a septiembre es de 1,55 m. Los patrones de onda (ilustración 63) reflejan las alturas de olas pequeñas en alta mar e incluso las más pequeñas cerca de la costa. Los valores de potencia de las olas son, por consiguiente, bajos, aproximadamente un tercio los del primer caso de estudio. La concentración de energía se produce en casi las mismas áreas cercanas a la costa que en los casos anteriores, y también se mantiene el carácter menos energético de la costa al este de Cabo Peñas [2].

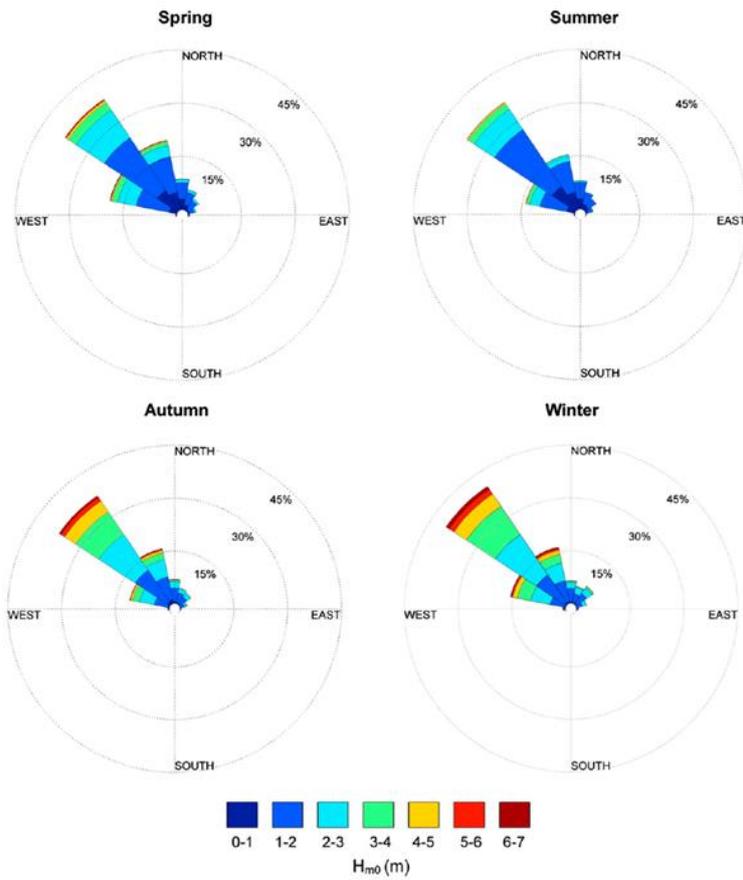


Ilustración 57 Rosas de oleaje estacional basadas en datos de la boya de oleaje de aguas profundas Cabo Peñas [2]

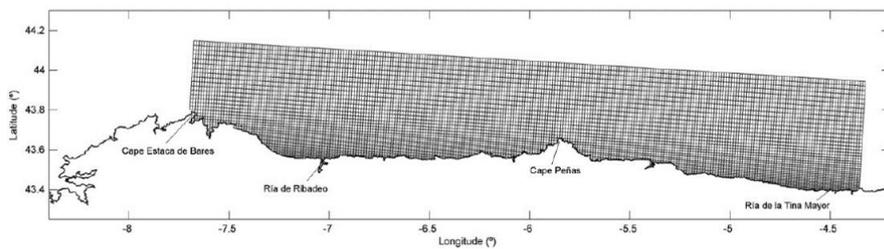


Ilustración 58 Cuadrícula computacional para el modelo SWAN. (Para mayor claridad, solo se muestra una de tres líneas de coordenadas) [2]

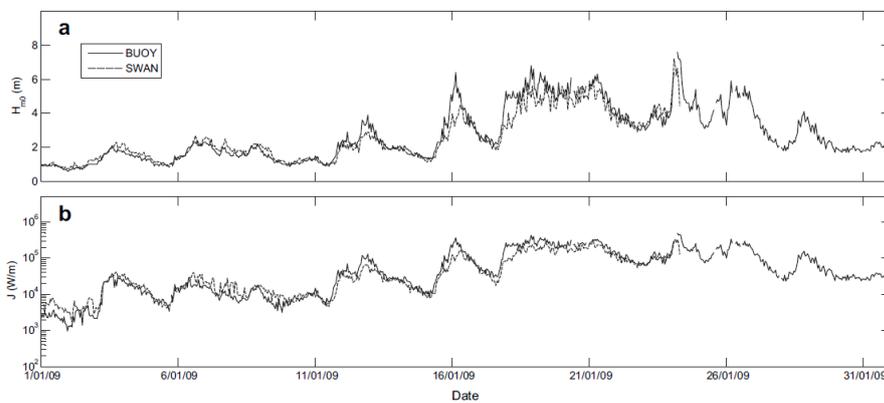


Ilustración 59 Altura significativa de la ola (a) y potencia de la ola (b) registrada por la boya costera de Gijón y calculada por el modelo SWAN para la ubicación de la boya [2]

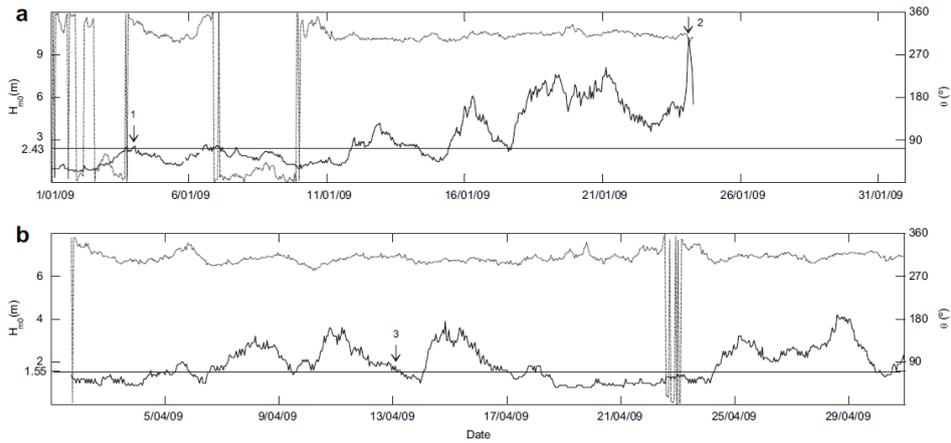


Ilustración 60 Posición de los casos de estudios en los registros de boya en aguas profundas de Cabo Peñas de altura significativa de ola ( $H_{m0}$  —) y dirección de ola media ( $\theta$ , ...) de enero (a) y abril (b) 2009. (Los valores promedio de altura de ola significativa en otoño-invierno (a) y primavera-verano (b) se representan con líneas horizontales) [2]

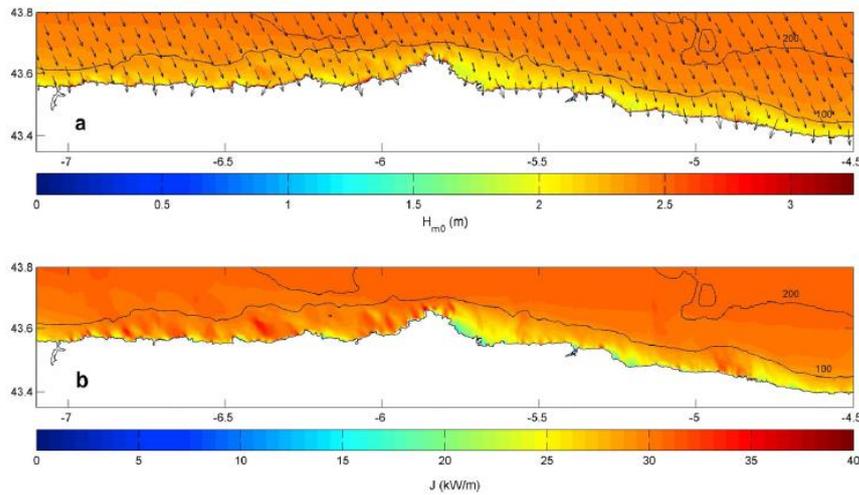


Ilustración 61 Patrones de onda en el primer caso de estudio (otoño-invierno): altura y dirección de ola significativas (a) y potencia de onda (b) [2]

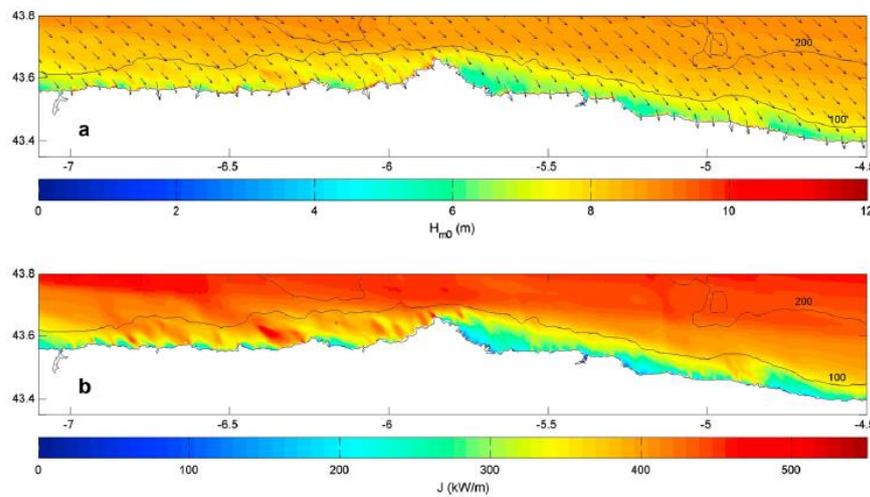


Ilustración 62 Patrones de onda en el segundo caso de estudio (pico de tormenta): altura y dirección de ola significativas (a) y potencia de onda (b) [2]

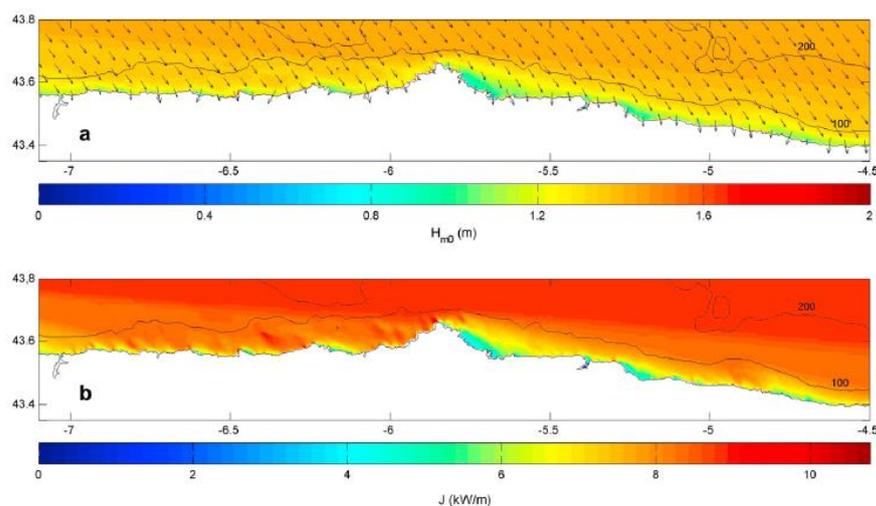


Ilustración 63 Patrones de onda en el tercer caso de estudio (primavera-verano): altura y dirección de ola significativas (a) y potencia de onda (b) [2]

### **10.3. Tecnología adecuada para el aprovechamiento de la energía undimotriz**

Para finalizar, después de haber caracterizado el recurso y la tecnología disponible, vamos a calcular cual es la mejor opción para aprovechar la energía undimotriz a lo largo de la costa asturiana en cada uno de los puntos objeto de estudio.

En las tablas 2 y 3 se da el potencial de la energía undimotriz y la altura media de las olas de la costa asturiana en los puntos definidos en las ilustraciones 52, 53 y 54, mientras de las tablas del anexo 1 vamos a sacar el rango de periodos y de altura de ola para cada localización. De este modo vamos a obtener los datos necesarios para así entrar en las matrices de potencia de cada convertidor de energía undimotriz descrito en el apartado 6, y comprobar qué sistema sería más adecuado para obtener una eficiencia óptima en el aprovechamiento de la energía del oleaje. Describiremos cuál es el conversor adecuado para cada punto de la costa asturiana desplazándonos de oeste a este en la tabla 4.

En primer lugar, describiremos cual es la potencia máxima de cada dispositivo para así caracterizar cada zona de estudio en función del rendimiento que se saque del convertidor de energía undimotriz.

- La potencia máxima del sistema Oyster (sistema onshore) es de 291 kW. En este sistema la potencia de salida aumenta con la altura de ola, dando sus mayores valores de potencia a partir de 3,5 metros para todos los periodos de ola posibles.
- La potencia máxima que da el sistema Aqua Buoy (sistema offshore) es de 250 kW. Da mayores salidas de potencia conforme aumenta la altura de ola, y el periodo de aprovechamiento óptimo está comprendido entre 8 y 12 segundos.
- La matriz de potencia del sistema de columna de agua oscilante (sistema onshore) da valores directamente en porcentaje, cuyos máximos corresponden con periodos

cortos, manteniéndose la potencia constante según aumenta la altura, y volviéndose nula en rangos de periodos cortos y altos según aumenta la altura de la ola.

- El sistema Wave Dragon (sistema offshore) tiene una potencia máxima de salida de 5.900 kW. Esta aumenta con la altura de ola manteniéndose constante para todos los periodos de ola, aunque para alturas de ola cortas la potencia de salida disminuye conforme aumenta el periodo de ola. Como podemos apreciar, este sistema tiene una potencia máxima mucho más grande que los demás.
- El sistema AWS (sistema offshore) da mayor potencia conforme aumentan el periodo y la altura de la ola grandes. Su máxima potencia de salida es de 2.470 kW.
- El Pelamis (sistema offshore) tiene una salida de potencia máxima de 750 kW. En este dispositivo la salida de potencia aumenta conforme lo hace la altura de la ola, pero se vuelve nula para periodos cortos y alturas elevadas.

Pasamos a señalar el rendimiento, expresado en porcentaje, que tendría cada sistema en las distintas ubicaciones. Estos cálculos se detallan en profundidad en el anexo 2, y han sido obtenidos de la combinación de cada una de las tablas que relacionan periodos y alturas de ola con las matrices de potencia de cada convertidor de energía undimotriz.

<b>Convertidor</b>	<b>Oyster</b>	<b>AquaBuoy</b>	<b>OWC</b>	<b>Wave Dragon</b>	<b>AWS</b>	<b>Pelamis</b>
<b>Ubicación</b>						
<b>Tapia de Casariego</b>	45,03	15,46	23,89	29,84	15,19	12,60
<b>Navia</b>	44,98	15,59	23,82	29,94	15,30	12,59
<b>Valdés</b>	45,49	15,74	23,90	30,32	17,70	12,70
<b>Cudillero oeste</b>	45,44	15,74	23,88	30,31	15,78	12,65
<b>Cudillero este</b>	49,20	18,96	24,79	34,97	16,26	15,37
<b>Castrillón</b>	45,21	15,67	23,88	30,17	15,74	12,57
<b>Gozón</b>	44,88	15,51	23,83	29,94	15,61	12,43
<b>Gijón</b>	27,37	7,73	21,87	17,02	8,17	6,31
<b>Villaviciosa</b>	44,66	15,43	23,80	29,78	15,61	12,33
<b>Colunga</b>	44,32	15,34	23,80	29,57	15,56	12,20
<b>Ribadesella</b>	42,65	14,50	23,76	28,36	14,93	11,49
<b>Llanes</b>	42,60	14,58	23,71	28,41	15,01	11,50
<b>Ribadeva</b>	39,11	12,97	23,35	26,02	13,69	10,17

*Tabla 4 Rendimientos de los distintos tipos de convertidores de energía undimotriz para los distintos puntos de la costa asturiana*

### 10.3.1. Dispositivos montados en la orilla

En este trabajo no disponemos de datos de oleaje onshore (en la orilla). Podríamos usar la boya de Gijón, y los puntos SIMAR de Ribadesella, Llanes y Ribadeva, que son las ubicaciones más cercanas a la costa, pero esto no sería fiable ya que a medida que nos acercamos a la costa la energía undimotriz disminuye, por lo que no podemos garantizar que el sistema Oyster sea una buena opción para colocar en la orilla en esas ubicaciones.

El modelo SWAN de oleaje descrito en el apartado 11.2 nos dice que las áreas de concentración de energía undimotriz cerca de la costa asturiana se encuentran en el lado occidental de Cabo Peñas, al oeste del Cabo Vidio, cerca de la ría de Navia, y al este de la Punta San Antonio (Candás), por lo que estas serían las ubicaciones adecuadas para la colocación de los dispositivos onshore, aunque al no tener datos de la energía del oleaje no podemos entrar en las matrices de potencia para saber si el sistema de columna de agua oscilante (OWC) es más eficiente que el Oyster para esas zonas.

### 10.3.2. Dispositivos en alta mar

Como podemos observar en la tabla 4, el convertidor offshore más eficiente para toda la costa asturiana, con un rendimiento promedio del 30%, es el Wave Dragon. Recordemos aquí que la costa asturiana en alta mar tiene un clima de oleaje promedio de 30 kW/m.

El despliegue de sistemas de conversión de energía undimotriz en alta mar es más adecuado que el empleo de dispositivos montados en la orilla. Esto se debe a que no podemos calcular los rendimientos que tendrían los convertidores onshore colocados en las ubicaciones descritas en el apartado 11.3.1 porque Puertos del Estado no nos proporciona los puntos SIMAR exactos para esas ubicaciones de concentración de olas, sino que nos da otros puntos más alejados de la costa, en los cuales no podemos garantizar que el oleaje sea similar.

El dispositivo Wave Dragon que hemos estudiado en este trabajo tiene un coste de fabricación de 23 millones de euros, ya que para dar tanta potencia (una producción anual de unos 20 GW·h con cada dispositivo) tiene unas dimensiones muy elevadas (tabla 5).

Aquí podemos reseñar que para cubrir el 20% de la demanda energética de Asturias (2.000 GW·h/año) necesitaríamos desplegar unos 100 dispositivos Wave Dragon en alta mar a lo largo de la costa asturiana. Esto requeriría una inversión inicial de 2.300 millones de euros, pero si se compara con el coste de las centrales térmicas, por ejemplo, una central nuclear en la que el coste para cada gigavatio de potencia instalada es de 5.000 millones de euros, resulta que la inversión en la instalación de energía undimotriz sería aproximadamente un 33% inferior. Aunque podamos pensar que la duración de los aparatos de energía undimotriz sea inferior a la de las centrales nucleares por la hostilidad del medio marino no

cabe duda de lo rentable que resultaría montar la instalación marina en comparación a la nuclear, a lo que habría que añadir el coste cero de las olas.

Wave climate:	0.04 kW/m	12 kW/m	24 kW/m	36 kW/m	48 kW/m
Weight	237 tons	6,500 tons	22,000 tons	33,000 tons	54,000 tons
Width	58 m	152 m	230 m	270 m	320 m
Length	33 m	96 m	150 m	170 m	220 m
Wave reflector length	28 m	84 m	126 m	145 m	190 m
Height	3.6 m	12 m	16 m	16.8 m	18.1 m
Number of turbines	7	8	16	16-20	16-24
Generator type	Permanent magnet synchronous generators				
Generator rating	7 x 3 kW	8 x 185 kW	16 x 250 kW	16-20x350kW	16-24x500kW
Device rated power	0.02 MW	1.5 MW	4 MW	7 MW	12 MW
Water depth	6 m	>15 m	>20 m	>25 m	>30 m
Annual output	0.06 GWh	4 GWh	12 GWh	20 GWh	35 GWh
Mooring type	Single point	Single Point Mooring with 5 - 8 legs			

Tabla 5 Diseño del sistema Wave Dragon para diferentes condiciones de mar [27]

Describimos a continuación el coste de cada componente del dispositivo Wave Dragon de 7 MW. La estructura valdría 8,7 millones de euros, las turbinas y los generadores síncronos de imán permanente 3,4 millones, la instalación de bajo voltaje 816.000 euros, la instalación de alto voltaje 850.000, los sistemas de apoyo 520.000, los sistemas de servicio 170.000, los sistemas de protección 160.000, los sistemas de navegación 45.000, el control y la instrumentación 190.000, la barcaza flotante 3,2 millones, y el amarradero 2,6 millones. A todo, esto habría que añadirle un valor de contingencia del 15% del total, sumando un total de unos 23 millones de euros por cada aparato individual [27].

Debido a la inflación, a la evolución de las técnicas de construcción, y a otros motivos anteriormente mencionadas en este trabajo, estos precios irán descendiendo, sobre todo si llegan a construirse decenas de estos aparatos. Pero como se puede ver en la tabla 6 el coste por kW·h (solo se tiene en cuenta inversión inicial, operación y mantenimiento debido a que las olas tienen coste cero) sería más bajo que el de las actuales centrales térmicas de combustible fósil, por lo que la gran inversión inicial merecería la pena y terminaría amortizándose en el transcurso de unos 25 años o menos.

Wave climate	Device capacity	First device	After deployment of 100's
24 kW/m	4 MW	0.11 €/kWh	0.054 €/kWh
36 kW/m	7 MW	0.083 €/kWh	0.040 €/kWh
48 kW/m	12 MW	0.061 €/kWh	0.030 €/kWh

Tabla 6 Coste de la producción eléctrica del Wave Dragon en kW·h [27]

Wave climate	Device capacity	First device	After deployment of 100's
24 kW/m	4 MW	4,000 €/kW	2,300 €/kW
36 kW/m	7 MW	3,200 €/kW	1,875 €/kW
48 kW/m	12 MW	2,700 €/kW	1,575 €/kW

Tabla 7 Inversión necesaria para construir dispositivos Wave Dragon según su potencia [27]

Una opción interesante a la hora de montar futuras estaciones de oleaje, con potencias instaladas bajas para la satisfacción de determinados requisitos, en alta mar en Asturias sería la fabricación de dispositivos Wave Dragon pequeños, los cuales seguirían teniendo rendimientos del 30%, o la combinación de estos con absorbedores puntuales amarrados del tipo AquaBuoy para así completar el total de megavatios que deba tener la estación de oleaje diseñada. Completar la estación con sistemas AquaBuoy que tengan tan poco rendimiento (15%) no sería tan perjudicial económicamente (0,28 euros por kW·h de electricidad producida) como hacerlo con dispositivos AWS, ya que aun dando el mismo rendimiento estos últimos tienen un tamaño mucho mayor y por lo tanto la pérdida monetaria sería superior. Lo ideal sería aproximarse lo máximo posible al total de megavatios de la planta marina con sistemas Wave Dragon de mayor o menor potencia, y completar los últimos kilovatios con estas boyas de 3 metros de diámetro, bajo rendimiento, y coste de fabricación reducido.

La Universidad de Santiago de Compostela está desarrollando un convertidor de energía undimotriz similar en rendimiento y operación al Wave Dragon, el WaveCat. Hasta el momento se ha diseñado un prototipo de 90 metros de longitud, el cual al operar semisumergido y sin superestructura no tiene ningún impacto visual. Por lo que podemos decir que en España disponemos de la tecnología y el conocimiento necesario para el aprovechamiento de la energía undimotriz, e invirtiendo lo suficiente no tendremos que recurrir a la empresa danesa diseñadora del sistema Wave Dragon, fomentando así tanto el crecimiento de las universidades como el de las empresas nacionales.

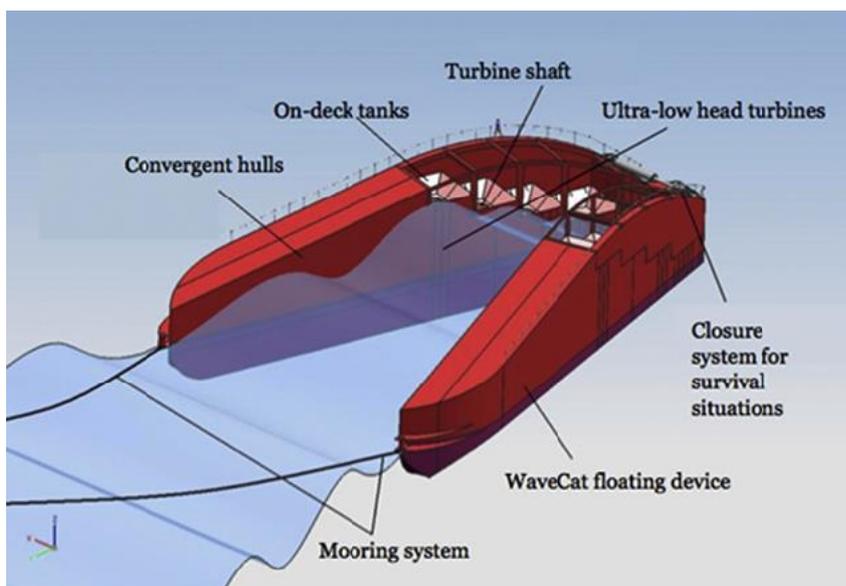


Ilustración 64 Diseño del sistema WaveCat [26]

## **11. Resumen y conclusiones**

El concepto de extraer energía de las olas ha intrigado a la humanidad durante siglos. La comprensión detallada del oleaje y de la energía que contiene es compleja, como lo es la descripción de un estado de mar típico que está compuesto de muchas olas, con diferentes frecuencias que se mueven en diferentes direcciones a diferentes velocidades. Sin embargo, al desarrollar la teoría de las olas, incluso de una forma simple, podemos construir un conocimiento de trabajo que sea adecuado para el diseño de convertidores de energía undimotriz.

La reducción de los costes de operación y mantenimiento es la clave para la implementación económica exitosa de las estaciones de energía undimotriz. Naturalmente, los costes de la energía de las olas son cero, dejando los de operación y mantenimiento como el factor determinante. Los sistemas tendrán que convertir la energía de manera fiable, y ser suficientemente robustos para sobrevivir el clima marino durante muchos años. Esto significa que los sistemas se diseñarán para vidas de larga duración y tendrán un pequeño número de partes móviles (para minimizar fallos).

Actualmente en España se están desarrollando los primeros proyectos de aprovechamiento de energía de oleaje, con diferentes prototipos.

Es indudable que existen fundadas esperanzas de que la energía undimotriz pueda representar a largo plazo una de nuestras fuentes más importantes de energía, que unida a la eólica marina offshore podría llegar a proporcionar toda la energía que consumimos en Asturias, unos 10.000 GWh/año, de una forma limpia y sostenible.

A nivel mundial existe una gran coincidencia internacional, antes nunca conocida, de reducir el crecimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, habiéndose hablado en la cumbre del clima de París de 2015 de cifras económicas muy importantes para potenciar las energías renovables. Esta tendencia se combina con el rechazo de las ciudades a tener plantas generadoras de energía en sus proximidades. El resultado es ponerlas en la mar, donde menos molestarán y habrá vientos, olas y mareas suficientes para obtener la energía cuya demanda irá en aumento por la demografía y el crecimiento económico. Tras esta cumbre del clima se espera lograr que se doble el presupuesto actual en investigación y desarrollo de energías renovables a nivel mundial.

En este trabajo hemos investigado el potencial de energía undimotriz offshore en Asturias, utilizando datos de olas y modelos numéricos. Primero se estudió el clima de olas mar adentro usando observaciones de boyas de olas junto con los datos de predicciones posteriores del conjunto de datos SIMAR-44 (Puertos del Estado), que abarca 44 años (1958-2001). La potencia media de las olas y sus valores de energía anuales superaron los 30 kWm<sup>-1</sup> y 250 MWhm<sup>-1</sup>, respectivamente, en 8 de las 13 zonas de estudio analizadas

(dos boyas de olas y 11 puntos SIMAR). Este extenso recurso proviene de la exposición de la costa asturiana al gran fetch del Atlántico y a los vientos del oeste que prevalecen en estas latitudes medias, por lo que el cuarto cuadrante ocupa un lugar destacado en la rosa de olas, siendo el noroeste la dirección predominante de las olas durante todo el año. Las olas del primer cuadrante, generados sobre el Golfo de Vizcaya por vientos con un componente este, también están presentes, aunque en una medida mucho más pequeña. Las olas más energéticas ocurren en invierno, seguidas por el otoño, la primavera y el verano. Para caracterizar el recurso en términos de parámetros del estado del mar se usan diagramas combinados de dispersión y energía. Se ha descubierto que la mayor parte de la energía proviene de olas con alturas significativas de entre 2 y 5 metros, y períodos de energía de entre 11 y 13 segundos. Esta caracterización es importante con respecto a la selección, el diseño o la adaptación, según sea el caso, de los convertidores de energía undimotriz para esta área.

Posteriormente se trata el recurso costero y, en particular, de su distribución espacial no homogénea provocada por la batimetría irregular. Este se investigó por medio del modelo SWAN de oleaje costero de última generación. La refracción de las olas sobre la batimetría irregular de la costa asturiana produce concentraciones costeras de energía undimotriz. Las concentraciones de energía más grandes se encuentran al lado oeste del Cabo Peñas, al oeste de Cabo Vidio. En general, la mitad oriental es menos energética debido al efecto de abrigo del Cabo Peñas.

En conjunto, el uso de datos de boyas de oleaje y de datos hindcast, junto con la modelización numérica permitió cuantificar el gran recurso de energía undimotriz en Asturias, caracterizarlo en términos de parámetros de estado del mar, y determinar las áreas de concentración de energía undimotriz costeras, que son interés como posibles sitios para estaciones de oleaje.

Para finalizar, utilizando las tablas que nos facilita Puertos del Estado [24] en las que se indica la proporción de olas de cada periodo y altura en tanto por ciento para las 13 ubicaciones elegidas, entramos en las matrices de potencia de seis convertidores de energía undimotriz diferentes para así obtener sus eficiencias bajo esas condiciones de oleaje. Haciendo los cálculos pertinentes, mostrados en el anexo 2, llegamos a la conclusión de que a lo largo de toda la costa asturiana el sistema en alta mar que aprovecha el potencial de la energía del oleaje de forma más eficiente es el Wave Dragon, con un rendimiento promedio del 30%, mucho más alto que el de los demás tipos de convertidores (hasta un 15%). Además, este dispositivo puede operar en condiciones climáticas extremas debido a que la simplicidad de su construcción le confiere una gran resistencia estructural.

## 12. Anexos

### 12.1. Anexo 1: proporción de olas según periodo y altura en las distintas ubicaciones

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,037	0,503	0,837	0,743	0,327	0,081	0,019	0,009	0,002	-	2,556
1.0	-	0,203	3,104	5,324	6,44	2,764	0,843	0,121	0,031	0,005	-	18,836
1.5	-	0,017	3,354	4,506	8,882	6,013	2,111	0,292	0,053	0,007	0,001	25,236
2.0	-	-	1,403	2,917	5,219	6,826	3,186	0,438	0,078	0,008	-	20,076
2.5	-	-	0,123	1,724	2,226	4,505	3,164	0,601	0,091	0,012	0,001	12,448
3.0	-	-	0,012	0,602	1,08	2,755	2,644	0,669	0,095	0,009	-	7,866
3.5	-	-	0,005	0,144	0,553	1,498	2,067	0,548	0,091	0,009	-	4,917
4.0	-	-	0,001	0,027	0,259	0,809	1,466	0,476	0,094	0,008	-	3,141
4.5	-	-	-	0,004	0,08	0,392	0,962	0,388	0,081	0,008	-	1,915
5.0	-	-	-	-	0,033	0,189	0,561	0,302	0,051	0,016	-	1,154
> 5.0	-	-	-	-	0,006	0,179	0,771	0,652	0,202	0,044	0,002	1,856
<b>Total</b>	-	0,257	8,506	16,085	25,52	26,257	17,857	4,507	0,876	0,128	0,006	100

Tabla 8 Tapia de Casariego (punto SIMAR G) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,039	0,502	0,861	0,73	0,338	0,085	0,019	0,011	0,002	-	2,588
1.0	-	0,205	3,133	5,283	6,492	2,762	0,803	0,127	0,035	0,005	-	18,845
1.5	-	0,011	3,283	4,416	8,979	5,993	2,006	0,3	0,066	0,007	0,001	25,061
2.0	-	-	1,321	2,811	5,279	6,886	3,093	0,457	0,084	0,01	-	19,943
2.5	-	-	0,112	1,604	2,253	4,548	3,097	0,587	0,091	0,01	0,001	12,302
3.0	-	-	0,01	0,567	1,071	2,811	2,62	0,698	0,098	0,009	-	7,885
3.5	-	-	0,001	0,121	0,549	1,559	2,059	0,578	0,097	0,008	-	4,973
4.0	-	-	-	0,028	0,248	0,823	1,519	0,464	0,106	0,006	-	3,195
4.5	-	-	-	0,004	0,076	0,414	0,988	0,421	0,074	0,009	-	1,986
5.0	-	-	-	0,001	0,032	0,203	0,579	0,324	0,069	0,012	-	1,22
> 5.0	-	-	-	-	0,006	0,192	0,824	0,713	0,223	0,041	0,001	2,002
<b>Total</b>	-	0,255	8,363	15,696	25,715	26,529	17,672	4,688	0,955	0,12	0,006	100

Tabla 9 Navia (punto SIMAR 1) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,056	0,508	0,88	0,755	0,358	0,091	0,019	0,009	-	-	2,676
1.0	-	0,198	3,18	5,268	6,543	2,779	0,835	0,131	0,031	0,002	-	18,966
1.5	-	0,01	3,211	4,281	9,011	6,09	2,039	0,287	0,046	0,006	-	24,984
2.0	-	-	1,196	2,7	5,229	6,96	3,134	0,423	0,067	0,007	-	19,716
2.5	-	-	0,102	1,496	2,255	4,615	3,236	0,557	0,067	0,006	-	12,333
3.0	-	-	0,005	0,523	1,052	2,872	2,749	0,65	0,058	0,005	-	7,915
3.5	-	-	0,001	0,121	0,551	1,605	2,15	0,551	0,068	0,005	-	5,053
4.0	-	-	-	0,028	0,249	0,844	1,606	0,44	0,076	0,005	-	3,248
4.5	-	-	-	0,006	0,079	0,431	1,062	0,368	0,051	0,007	-	2,005
5.0	-	-	-	-	0,031	0,228	0,605	0,274	0,058	0,01	-	1,205
> 5.0	-	-	-	-	0,008	0,206	0,873	0,629	0,158	0,023	-	1,898
<b>Total</b>	-	0,263	8,203	15,305	25,763	26,988	18,38	4,329	0,689	0,077	-	100

Tabla 10 Valdés (punto SIMAR 2) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,069	0,516	0,91	0,807	0,395	0,099	0,018	0,008	-	-	2,823
1.0	-	0,201	3,19	5,26	6,643	2,875	0,872	0,128	0,025	0,001	-	19,196
1.5	-	0,009	3,185	4,211	9,008	6,14	2,071	0,26	0,041	0,004	-	24,93
2.0	-	-	1,15	2,606	5,196	7,008	3,148	0,414	0,06	0,005	-	19,586
2.5	-	-	0,099	1,399	2,222	4,624	3,234	0,518	0,06	0,005	-	12,162
3.0	-	-	0,002	0,488	1,033	2,876	2,769	0,61	0,055	0,004	-	7,836
3.5	-	-	-	0,115	0,53	1,603	2,176	0,507	0,069	0,002	-	5,002
4.0	-	-	-	0,023	0,253	0,856	1,588	0,442	0,064	0,005	-	3,23
4.5	-	-	-	0,002	0,076	0,441	1,088	0,383	0,055	0,008	-	2,053
5.0	-	-	-	0,001	0,033	0,227	0,596	0,285	0,055	0,008	-	1,206
> 5.0	-	-	-	-	0,007	0,224	0,931	0,643	0,154	0,019	-	1,977
<b>Total</b>	-	0,279	8,143	15,014	25,807	27,267	18,572	4,208	0,646	0,061	-	100

Tabla 11 Zona oeste de Cudillero (punto SIMAR 3) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,025	0,18	0,381	0,325	0,023	0,006	0,002	-	-	-	0,941
1.0	-	0,306	3,126	4,78	6,474	1,361	0,358	0,112	0,008	0,008	-	16,534
1.5	-	0,072	3,409	5,24	10,765	4,145	0,894	0,277	0,029	0,008	-	24,839
2.0	-	-	1,214	3,711	7,221	5,471	1,44	0,399	0,043	0,01	-	19,51
2.5	-	-	0,223	2,358	3,821	5,122	1,884	0,414	0,031	0,012	-	13,865
3.0	-	-	0,035	0,892	2,062	3,289	1,738	0,441	0,039	0,004	-	8,5
3.5	-	-	-	0,316	1,113	2,304	1,628	0,482	0,05	0,006	-	5,899
4.0	-	-	-	0,087	0,612	1,365	1,28	0,389	0,035	0,019	-	3,787
4.5	-	-	-	0,023	0,271	0,823	0,916	0,323	0,041	0,014	0,002	2,414
5.0	-	-	-	0,004	0,11	0,36	0,602	0,288	0,037	0,023	-	1,423
> 5.0	-	-	-	0,004	0,077	0,401	0,918	0,67	0,155	0,062	-	2,288
<b>Total</b>	-	0,403	8,187	17,795	32,85	24,665	11,664	3,796	0,47	0,168	0,002	100

Tabla 12 Zona este de Cudillero (boya de aguas profundas de Cabo Peñas) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,069	0,536	0,945	0,861	0,423	0,11	0,018	0,009	0,001	-	2,972
1.0	-	0,234	3,182	5,244	6,705	2,958	0,89	0,127	0,03	-	-	19,37
1.5	-	0,013	3,169	4,09	9,027	6,209	2,078	0,256	0,045	0,005	-	24,892
2.0	-	-	1,158	2,501	5,131	6,993	3,119	0,405	0,061	0,006	0,001	19,376
2.5	-	-	0,11	1,33	2,2	4,63	3,249	0,5	0,069	0,006	-	12,095
3.0	-	-	0,002	0,475	0,996	2,833	2,744	0,61	0,064	0,005	-	7,731
3.5	-	-	-	0,121	0,536	1,58	2,187	0,511	0,071	0,004	-	5,011
4.0	-	-	-	0,019	0,241	0,838	1,579	0,438	0,073	0,004	-	3,193
4.5	-	-	-	0,002	0,093	0,452	1,08	0,373	0,066	0,008	-	2,074
5.0	-	-	-	-	0,029	0,231	0,611	0,298	0,054	0,01	-	1,234
> 5.0	-	-	-	-	0,006	0,229	0,944	0,681	0,169	0,024	-	2,053
<b>Total</b>	-	0,316	8,156	14,728	25,824	27,376	18,593	4,218	0,712	0,073	0,003	100

Tabla 13 Castrillón (punto SIMAR 4) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,08	0,545	0,988	0,897	0,461	0,116	0,026	0,009	0,002	-	3,124
1.0	-	0,281	3,171	5,236	6,867	3,054	0,893	0,126	0,036	0,002	-	19,664
1.5	-	0,019	3,162	3,999	9,041	6,307	2,087	0,263	0,047	0,006	-	24,932
2.0	-	-	1,176	2,375	5,07	7,016	3,1	0,411	0,071	0,008	0,001	19,228
2.5	-	-	0,13	1,28	2,147	4,606	3,219	0,497	0,079	0,007	-	11,966
3.0	-	-	0,003	0,456	0,996	2,838	2,703	0,613	0,068	0,006	-	7,684
3.5	-	-	-	0,128	0,511	1,574	2,157	0,511	0,077	0,007	-	4,966
4.0	-	-	-	0,016	0,234	0,831	1,559	0,437	0,08	0,002	-	3,161
4.5	-	-	-	0,003	0,106	0,453	1,049	0,377	0,066	0,01	-	2,064
5.0	-	-	-	-	0,028	0,224	0,58	0,283	0,056	0,012	-	1,183
> 5.0	-	-	-	-	0,006	0,237	0,918	0,658	0,183	0,027	-	2,029
<b>Total</b>	-	0,381	8,189	14,482	25,903	27,6	18,382	4,201	0,771	0,088	0,003	100

Tabla 14 Gozón (punto SIMAR 5) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,223	1,992	1,835	2,028	1,165	0,385	0,117	0,028	0,013	-	7,786
1.0	-	0,259	7,28	7,197	7,735	7,24	3,725	0,94	0,228	0,04	0,004	34,649
1.5	-	0,004	1,886	5,73	4,669	6,953	5,065	1,68	0,313	0,038	0,004	26,342
2.0	-	-	0,117	2,371	1,98	3,296	4,284	1,965	0,321	0,026	0,004	14,363
2.5	-	-	0,009	0,512	0,887	1,459	2,675	1,897	0,298	0,021	0,002	7,759
3.0	-	-	-	0,094	0,351	0,597	1,597	1,427	0,247	0,004	-	4,316
3.5	-	-	-	0,009	0,136	0,255	0,706	0,87	0,223	0,011	0,002	2,211
4.0	-	-	-	-	0,034	0,087	0,372	0,621	0,24	0,006	-	1,361
4.5	-	-	-	-	0,004	0,034	0,134	0,338	0,151	0,013	0,002	0,676
5.0	-	-	-	-	-	0,006	0,053	0,136	0,081	0,015	0,002	0,293
> 5.0	-	-	-	-	-	0,002	0,023	0,085	0,119	0,013	-	0,242
<b>Total</b>	-	0,487	11,284	17,748	17,824	21,095	19,019	10,074	2,247	0,2	0,021	100

Tabla 15 Gijón (boya costera de Gijón) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,084	0,574	1,016	0,954	0,491	0,134	0,029	0,009	0,002	-	3,293
1.0	-	0,326	3,205	5,212	7,009	3,101	0,915	0,132	0,036	-	-	19,937
1.5	-	0,034	3,12	3,911	8,981	6,419	2,137	0,276	0,052	0,005	0,001	24,937
2.0	-	-	1,142	2,295	4,993	6,991	3,131	0,422	0,066	0,009	-	19,049
2.5	-	-	0,115	1,215	2,08	4,56	3,255	0,488	0,074	0,006	-	11,792
3.0	-	-	0,002	0,426	0,98	2,788	2,732	0,615	0,062	0,004	-	7,61
3.5	-	-	0,001	0,117	0,493	1,558	2,159	0,527	0,069	0,005	-	4,93
4.0	-	-	-	0,017	0,234	0,8	1,573	0,443	0,073	0,003	-	3,144
4.5	-	-	-	0,005	0,112	0,453	1,064	0,372	0,06	0,007	-	2,072
5.0	-	-	-	-	0,026	0,228	0,592	0,292	0,056	0,007	-	1,201
> 5.0	-	-	-	-	0,005	0,234	0,949	0,663	0,162	0,021	-	2,035
<b>Total</b>	-	0,445	8,16	14,214	25,868	27,623	18,64	4,259	0,719	0,069	0,003	100

Tabla 16 Villaviciosa (punto SIMAR 6) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,084	0,607	1,071	1,024	0,52	0,146	0,031	0,012	0,002	-	3,497
1.0	-	0,403	3,156	5,164	7,111	3,181	0,927	0,143	0,038	0,001	-	20,123
1.5	-	0,058	3,086	3,828	9,004	6,491	2,177	0,292	0,051	0,004	0,001	24,992
2.0	-	-	1,056	2,202	4,9	6,96	3,157	0,441	0,069	0,009	-	18,794
2.5	-	-	0,111	1,126	2,044	4,5	3,256	0,503	0,079	0,006	-	11,626
3.0	-	-	0,002	0,409	0,96	2,726	2,732	0,625	0,067	0,003	-	7,525
3.5	-	-	-	0,113	0,488	1,517	2,165	0,537	0,071	0,005	-	4,895
4.0	-	-	-	0,017	0,239	0,798	1,577	0,448	0,073	0,003	-	3,156
4.5	-	-	-	0,002	0,116	0,446	1,053	0,373	0,061	0,008	-	2,059
5.0	-	-	-	-	0,024	0,246	0,594	0,312	0,058	0,007	-	1,241
> 5.0	-	-	-	-	0,005	0,237	0,966	0,692	0,171	0,021	-	2,092
<b>Total</b>	-	0,545	8,019	13,933	25,913	27,62	18,751	4,396	0,75	0,069	0,003	100

Tabla 17 Colunga (punto SIMAR 7) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,105	0,742	1,268	1,276	0,686	0,212	0,036	0,014	0,002	-	4,341
1.0	-	0,405	3,466	5,356	7,672	3,633	1,162	0,187	0,039	0,002	-	21,922
1.5	-	0,059	2,752	3,784	8,972	6,882	2,441	0,317	0,055	0,006	0,001	25,271
2.0	-	-	0,683	2,121	4,587	6,717	3,315	0,476	0,069	0,004	-	17,973
2.5	-	-	0,061	0,916	1,917	4,286	3,2	0,578	0,073	0,005	-	11,036
3.0	-	-	0,004	0,329	0,879	2,58	2,684	0,601	0,068	0,006	-	7,15
3.5	-	-	0,001	0,091	0,407	1,407	2,119	0,521	0,069	0,005	-	4,621
4.0	-	-	-	0,016	0,213	0,709	1,483	0,43	0,067	0,003	-	2,921
4.5	-	-	-	0,002	0,077	0,407	0,965	0,354	0,061	0,008	-	1,874
5.0	-	-	-	-	0,014	0,223	0,524	0,285	0,04	0,007	-	1,094
> 5.0	-	-	-	-	0,004	0,194	0,851	0,595	0,138	0,014	-	1,798
<b>Total</b>	-	0,569	7,709	13,884	26,021	27,722	18,956	4,38	0,694	0,061	0,002	100

Tabla 18 Ribadesella (punto SIMAR 8) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	>20.0	
≤ 0.5	-	0,111	0,754	1,3	1,31	0,72	0,221	0,036	0,015	0,002	-	4,468
1.0	-	0,409	3,465	5,334	7,779	3,672	1,19	0,181	0,04	0,002	-	22,072
1.5	-	0,056	2,641	3,691	8,952	6,902	2,437	0,325	0,05	0,006	-	25,061
2.0	-	-	0,592	2,071	4,534	6,721	3,266	0,472	0,071	0,005	-	17,733
2.5	-	-	0,054	0,887	1,9	4,267	3,237	0,569	0,073	0,006	-	10,995
3.0	-	-	0,004	0,336	0,867	2,566	2,65	0,609	0,068	0,005	-	7,105
3.5	-	-	0,002	0,086	0,427	1,408	2,125	0,52	0,068	0,004	-	4,639
4.0	-	-	-	0,016	0,212	0,732	1,507	0,439	0,071	0,003	-	2,98
4.5	-	-	-	0,002	0,088	0,415	1,005	0,357	0,059	0,008	-	1,933
5.0	-	-	-	-	0,02	0,23	0,535	0,291	0,043	0,008	-	1,127
> 5.0	-	-	-	-	0,004	0,214	0,879	0,631	0,142	0,015	-	1,885
<b>Total</b>	-	0,576	7,512	13,724	26,092	27,847	19,051	4,431	0,701	0,064	0,002	100

Tabla 19 Llanes (punto SIMAR 9) [24]

Hs (m)	Tp(s)											Total
	≤ 2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	> 20.0	
≤ 0.5	-	0,147	1,175	1,751	1,983	1,118	0,433	0,071	0,025	0,003	-	6,707
1.0	-	0,158	4,041	5,73	9,137	4,815	1,716	0,261	0,046	0,002	-	25,906
1.5	-	0,011	1,664	3,617	8,431	7,349	2,972	0,435	0,061	0,007	0,001	24,547
2.0	-	0,001	0,198	1,774	3,936	6,133	3,406	0,544	0,086	0,007	0,001	16,085
2.5	-	-	0,017	0,66	1,601	3,807	3,045	0,65	0,087	0,006	-	9,872
3.0	-	-	0,002	0,21	0,716	2,308	2,554	0,55	0,078	0,005	-	6,423
3.5	-	-	-	0,046	0,354	1,176	1,898	0,48	0,087	0,003	-	4,043
4.0	-	-	-	0,005	0,16	0,601	1,302	0,394	0,065	0,012	-	2,537
4.5	-	-	-	0,001	0,066	0,351	0,769	0,323	0,048	0,007	-	1,565
5.0	-	-	-	-	0,013	0,172	0,457	0,227	0,039	0,006	-	0,915
> 5.0	-	-	-	-	0,002	0,151	0,663	0,472	0,099	0,011	-	1,399
<b>Total</b>	-	0,317	7,097	13,795	26,399	27,981	19,214	4,405	0,721	0,069	0,003	100

Tabla 20 Ribadeva (punto SIMAR C) [24]

## 12.2. Anexo 2: rendimiento de cada convertidor en las distintas ubicaciones

Para obtener estas tablas hemos combinado las matrices de potencia de los distintos tipos de convertidores de energía undimotriz (apartado 6) con las tablas que nos dan la proporción de olas según periodo y altura para cada ubicación de la costa asturiana (anexo 1). De este modo sacamos la potencia en kW que produce cada dispositivo para las diferentes alturas y periodos de ola, y una vez obtenida la potencia total (sumando todos estos valores) obtendremos los rendimientos ya que sabemos cuál es la potencia de salida máxima de cada convertidor.

### 12.2.1. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Tapia de Casariego:

Punto SIMAR de Tapia de Casariego con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,01	0,00	0,01
1,00	0,04	0,93	2,24	2,83	1,30	0,38	7,72
1,50	0,01	2,85	4,37	9,15	6,01	2,20	24,59
2,00		2,06	4,61	8,09	10,99	4,97	30,72
2,50		0,24	3,48	4,65	9,06	6,45	23,89
3,00		0,03	1,45	2,48	6,36	6,21	16,54
3,50		0,01	0,39	1,48	3,89	5,37	11,15
4,00		0,00	0,08	0,74	2,25	4,06	7,13
4,50			0,01	0,23	1,09	2,66	4,00
5,00				0,09	0,53	1,55	2,17
5,50				0,02	0,50	2,14	2,65
Suma	0,05	6,13	16,63	29,77	41,99	36,00	130,57
Rendimiento (%)							45,03

Punto SIMAR de Tapia de Casariego con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,59	0,71	0,22	-	-	1,52
1,50	0,00	1,13	2,31	1,14	0,25	0,02	4,85
2,00		1,28	2,45	2,32	0,73	0,05	6,84
2,50		1,19	1,62	2,43	1,14	0,11	6,50
3,00		0,60	1,14	2,12	1,35	0,18	5,39
3,50		0,19	0,80	1,57	1,45	0,21	4,22
4,00		0,05	0,49	1,11	1,33	0,23	3,21
4,50		0,01	0,19	0,68	1,11	0,24	2,23
5,00			0,08	0,40	0,80	0,23	1,52
5,50			0,02	0,45	1,33	0,60	2,39
Suma	0,00	5,03	9,81	12,45	9,48	1,88	38,66
Rendimiento (%)							15,46

Punto SIMAR de Tapia de Casariego con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,03	0,37	0,50	0,40	0,15	0,03	0,01	0,00	1,50
1,50		2,49	2,70	4,83	2,74	0,82	0,10	0,02	13,70
2,50			1,03	1,21	2,05	1,23	0,20		5,73
3,50				0,30	0,68	0,80	0,19		1,97
4,50					0,18	0,37	0,13		0,68
5,50						0,30			0,30
Suma	0,03	2,87	4,24	6,75	5,79	3,56	0,63	0,02	23,89
Rendimiento (%)									23,89

Punto SIMAR de Tapia de Casariego con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,41	16,02	47,70	61,95	22,66	3,76	152,51
1,50	0,07	25,16	61,96	135,63	80,09	15,56	318,46
2,00		13,79	54,05	109,18	125,87	32,75	335,65
2,50		1,60	44,86	67,69	123,57	49,20	286,93
3,00		0,19	20,17	43,08	100,31	55,05	218,80
3,50		0,13	6,04	27,35	71,38	57,07	161,96
4,00		0,04	1,36	15,28	47,64	50,42	114,73
4,50			0,22	4,72	23,11	40,62	68,66
5,00				1,95	11,15	33,10	46,20
5,50				0,35	10,56	45,49	56,40
Suma	0,48	56,93	236,35	467,18	616,35	383,01	1.760,30
Rendimiento (%)							29,84

Punto SIMAR de Tapia de Casariego con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,00	0,40	2,18	5,22	3,62	1,54	12,97
1,50	0,00	0,94	3,83	15,37	15,99	7,54	43,67
2,00		0,69	4,38	15,24	28,33	17,30	66,14
2,50		0,10	4,03	9,75	27,17	23,45	64,49
3,00		0,01	2,04	6,48	22,78	24,99	56,30
3,50		0,01	0,65	4,27	15,52	24,04	44,49
4,00		0,00	0,15	2,49	9,93	20,01	32,58
4,50			0,03	0,93	5,68	15,30	21,94
5,00				0,46	3,20	10,14	13,79
5,50				0,09	3,44	15,37	18,90
Suma	0,00	2,15	17,30	60,29	135,85	159,67	375,27
Rendimiento (%)							15,19

Punto SIMAR de Tapia de Casariego con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,90	2,02	1,87	-	-	4,79
1,50	0,01	2,18	3,88	5,77	2,53	0,70	15,06
2,00		1,61	4,43	6,05	5,05	1,88	19,03
2,50		0,22	4,10	4,03	5,23	2,91	16,49
3,00		0,03	2,00	2,59	4,60	3,49	12,71
3,50		0,02	0,61	1,80	3,22	3,72	9,37
4,00		0,00	0,14	0,99	2,16	3,12	6,42
4,50			0,03	0,38	1,32	2,56	4,29
5,00				0,18	0,70	1,84	2,72
5,50				0,04	0,80	2,74	3,57
Suma	0,01	4,97	17,21	23,72	25,60	22,96	94,46
Rendimiento (%)							12,60

12.2.2. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Navia:

Punto SIMAR de Navia con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,01	0,00	0,01
1,00	0,04	0,94	2,22	2,86	1,30	0,36	7,72
1,50	0,01	2,79	4,28	9,25	5,99	2,09	24,41
2,00		1,94	4,44	8,18	11,09	4,83	30,48
2,50		0,22	3,24	4,71	9,14	6,32	23,63
3,00		0,02	1,37	2,46	6,49	6,16	16,50
3,50		0,00	0,33	1,47	4,05	5,35	11,20
4,00			0,08	0,71	2,29	4,21	7,29
4,50			0,01	0,22	1,15	2,74	4,12
5,00			0,00	0,09	0,56	1,60	2,26
5,50				0,02	0,53	2,28	2,83
Suma	0,05	5,92	15,97	29,96	42,61	35,93	130,45
Rendimiento (%)							44,98

Punto SIMAR de Navia con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,58	0,71	0,22	-	-	1,52
1,50	0,00	1,10	2,33	1,14	0,24	0,02	4,84
2,00		1,24	2,48	2,34	0,71	0,05	6,83
2,50		1,11	1,64	2,46	1,11	0,11	6,43
3,00		0,56	1,14	2,16	1,34	0,19	5,39
3,50		0,16	0,79	1,64	1,44	0,22	4,25
4,00		0,05	0,47	1,13	1,38	0,23	3,25
4,50		0,01	0,18	0,72	1,14	0,26	2,30
5,00		0,00	0,08	0,43	0,82	0,25	1,59
5,50			0,02	0,48	1,42	0,66	2,57
Suma	0,00	4,81	9,84	12,72	9,60	1,99	38,97
Rendimiento (%)							15,59

Punto SIMAR de Navia con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,03	0,37	0,52	0,40	0,15	0,03	0,01	0,00	1,52
1,50		2,44	2,65	4,88	2,73	0,78	0,10	0,02	13,60
2,50			0,96	1,23	2,07	1,20	0,20		5,66
3,50				0,30	0,71	0,80	0,20		2,00
4,50					0,19	0,38	0,14		0,72
5,50						0,32			0,32
Suma	0,03	2,81	4,13	6,81	5,85	3,52	0,65	0,02	23,82
Rendimiento (%)									23,82

Punto SIMAR de Navia con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,42	16,17	47,34	62,45	22,65	3,58	152,60
1,50	0,05	24,62	60,72	137,11	79,83	14,78	317,11
2,00		12,99	52,09	110,44	126,98	31,80	334,28
2,50		1,46	41,74	68,51	124,75	48,16	284,62
3,00		0,16	18,99	42,72	102,35	54,55	218,78
3,50		0,03	5,07	27,15	74,29	56,85	163,38
4,00			1,41	14,63	48,47	52,24	116,75
4,50			0,22	4,48	24,41	41,71	70,82
5,00			0,06	1,89	11,98	34,16	48,09
5,50				0,35	11,33	48,62	60,30
Suma	0,46	55,42	227,63	469,74	627,02	386,45	1.766,72
Rendimiento (%)							29,94

Punto SIMAR de Navia con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,00	0,41	2,17	5,26	3,62	1,47	12,92
1,50	0,00	0,92	3,75	15,53	15,94	7,16	43,31
2,00		0,65	4,22	15,41	28,78	16,79	65,86
2,50		0,09	3,75	9,87	27,42	22,95	64,08
3,00		0,01	1,92	6,43	23,25	24,76	56,37
3,50		0,00	0,55	4,24	16,15	23,95	44,89
4,00			0,16	2,38	10,10	20,73	33,38
4,50			0,03	0,89	6,00	15,71	22,62
5,00			0,01	0,44	3,43	10,46	14,35
5,50				0,09	3,68	16,43	20,21
Suma	0,00	2,07	16,56	60,55	138,38	160,42	377,98
Rendimiento (%)							15,30

Punto SIMAR de Navia con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,91	2,01	1,88	-	-	4,80
1,50	0,00	2,13	3,80	5,84	2,52	0,66	14,95
2,00		1,52	4,27	6,12	5,10	1,82	18,84
2,50		0,20	3,82	4,08	5,28	2,85	16,22
3,00		0,03	1,88	2,57	4,69	3,46	12,63
3,50		0,00	0,51	1,79	3,35	3,71	9,36
4,00			0,15	0,95	2,20	3,24	6,53
4,50			0,03	0,36	1,40	2,63	4,41
5,00			0,01	0,18	0,75	1,90	2,83
5,50				0,04	0,86	2,93	3,82
Suma	0,00	4,79	16,47	23,81	26,14	23,19	94,40
Rendimiento (%)							12,59

12.2.3. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Valdés:

Punto SIMAR de Valdés con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,01	0,00	0,01
1,00	0,04	0,95	2,21	2,88	1,31	0,38	7,77
1,50	0,01	2,73	4,15	9,28	6,09	2,12	24,38
2,00		1,76	4,27	8,10	11,21	4,89	30,22
2,50		0,20	3,02	4,71	9,28	6,60	23,81
3,00		0,01	1,26	2,42	6,63	6,46	16,79
3,50		0,00	0,33	1,47	4,17	5,59	11,56
4,00			0,08	0,71	2,35	4,45	7,59
4,50			0,02	0,23	1,20	2,94	4,38
5,00				0,09	0,63	1,68	2,40
5,50				0,02	0,57	2,42	3,01
Suma	0,05	5,66	15,34	29,92	43,45	37,52	131,94
Rendimiento (%)							45,49

Punto SIMAR de Valdés con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,58	0,72	0,22	-	-	1,52
1,50	0,00	1,07	2,34	1,16	0,24	0,02	4,84
2,00		1,19	2,46	2,37	0,72	0,05	6,78
2,50		1,03	1,65	2,49	1,16	0,11	6,44
3,00		0,52	1,12	2,21	1,40	0,18	5,42
3,50		0,16	0,79	1,69	1,51	0,21	4,36
4,00		0,05	0,47	1,16	1,46	0,22	3,35
4,50		0,01	0,19	0,75	1,22	0,23	2,40
5,00			0,08	0,49	0,86	0,21	1,64
5,50			0,02	0,52	1,50	0,58	2,62
Suma	0,00	4,61	9,83	13,04	10,08	1,79	39,36
Rendimiento (%)							15,74

Punto SIMAR de Valdés con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,05	0,38	0,53	0,41	0,16	0,04	0,01	0,00	1,57
1,50		2,39	2,57	4,30	2,77	0,79	0,10	0,01	13,53
2,50			0,90	1,23	2,10	1,26	0,19		5,67
3,50				0,30	0,73	0,84	0,19		2,05
4,50					0,20	0,41	0,12		0,73
5,50						0,34			0,34
Suma	0,05	2,76	3,99	6,84	5,96	3,68	0,60	0,02	23,90
Rendimiento (%)									23,90

Punto SIMAR de Valdés con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,40	16,41	47,20	62,94	22,79	3,72	153,47
1,50	0,04	24,08	58,86	137,60	81,12	15,03	316,73
2,00		11,76	50,03	109,39	128,34	32,22	331,74
2,50		1,33	38,93	68,57	126,59	50,32	285,74
3,00		0,08	17,52	41,96	104,57	57,23	221,37
3,50		0,03	5,07	27,25	76,48	59,36	168,18
4,00			1,41	14,69	49,70	55,23	121,03
4,50			0,33	4,66	25,41	44,84	75,23
5,00				1,83	13,45	35,70	50,98
5,50				0,47	12,15	51,51	64,13
Suma	0,44	53,69	219,35	469,37	640,60	405,15	1.788,61
Rendimiento (%)							30,32

Punto SIMAR de Valdés con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,00	0,41	2,16	5,30	3,64	1,53	13,05
1,50	0,00	0,90	3,64	15,59	16,20	7,28	43,61
2,00		0,59	4,05	15,27	29,09	17,02	66,02
2,50		0,08	3,50	9,88	27,83	23,98	65,26
3,00		0,01	1,77	6,31	23,75	25,98	57,82
3,50		0,00	0,55	4,25	16,63	25,00	46,44
4,00			0,16	2,39	10,36	21,92	34,83
4,50			0,04	0,92	6,25	16,89	24,10
5,00				0,43	3,86	10,93	15,22
5,50				0,13	3,95	17,41	21,49
Suma	0,00	1,99	15,88	60,47	141,55	167,93	387,82
Rendimiento (%)							15,70

Punto SIMAR de Valdés con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,92	2,00	1,90	-	-	4,82
1,50	0,00	2,09	3,68	5,86	2,56	0,67	14,86
2,00		1,38	4,10	6,07	5,15	1,85	18,54
2,50		0,18	3,56	4,08	5,35	2,98	16,16
3,00		0,01	1,74	2,52	4,80	3,63	12,70
3,50		0,00	0,51	1,80	3,45	3,87	9,63
4,00			0,15	0,96	2,25	3,42	6,78
4,50			0,04	0,37	1,46	2,82	4,69
5,00				0,17	0,84	1,98	3,00
5,50				0,05	0,92	3,10	4,07
Suma	0,00	4,58	15,78	23,78	26,78	24,33	95,26
Rendimiento (%)							12,70

12.2.4. Tablas correspondientes al punto SIMAR de la zona oeste de Cudillero:

Punto SIMAR de la zona oeste de Cudillero con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,01	0,00	0,01
1,00	0,04	0,96	2,21	2,92	1,35	0,39	7,87
1,50	0,01	2,71	4,08	9,28	6,14	2,15	24,37
2,00		1,69	4,12	8,05	11,28	4,91	30,06
2,50		0,20	2,83	4,64	9,29	6,60	23,56
3,00		0,00	1,18	2,38	6,64	6,51	16,71
3,50			0,31	1,42	4,17	5,66	11,55
4,00			0,07	0,73	2,38	4,40	7,57
4,50			0,01	0,22	1,23	3,01	4,46
5,00			0,00	0,09	0,63	1,65	2,38
5,50				0,02	0,62	2,58	3,22
Suma	0,05	5,55	14,80	29,75	43,75	37,86	131,76
Rendimiento (%)							45,44

Punto SIMAR de la zona oeste de Cudillero con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,58	0,73	0,23	-	-	1,54
1,50	0,00	1,05	2,34	1,17	0,25	0,02	4,83
2,00		1,15	2,44	2,38	0,72	0,05	6,75
2,50		0,97	1,62	2,50	1,16	0,10	6,35
3,00		0,48	1,09	2,21	1,41	0,16	5,37
3,50		0,16	0,76	1,68	1,52	0,19	4,32
4,00		0,04	0,48	1,17	1,45	0,22	3,35
4,50		0,00	0,18	0,76	1,25	0,24	2,44
5,00		0,00	0,08	0,49	0,85	0,22	1,64
5,50			0,02	0,56	1,60	0,59	2,77
Suma	0,00	4,43	9,75	13,16	10,22	1,79	39,34
Rendimiento (%)							15,74

Punto SIMAR de la zona oeste de Cudillero con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,06	0,38	0,55	0,44	0,18	0,04	0,01	0,00	1,65
1,50		2,37	2,53	4,90	2,79	0,81	0,09	0,01	13,49
2,50			0,84	1,21	2,10	1,26	0,18		5,59
3,50				0,29	0,73	0,85	0,17		2,04
4,50					0,20	0,42	0,13		0,75
5,50						0,36			0,36
Suma	0,06	2,75	3,91	6,84	6,01	3,73	0,57	0,02	23,88
Rendimiento (%)									23,88

Punto SIMAR de la zona oeste de Cudillero con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,41	16,46	47,13	63,91	23,58	3,89	155,37
1,50	0,04	23,89	57,90	137,55	81,78	15,26	316,43
2,00		11,30	48,29	108,70	129,23	32,36	329,88
2,50		1,29	36,40	67,57	126,84	50,29	282,39
3,00		0,03	16,35	41,21	104,72	57,65	219,95
3,50			4,82	26,21	76,38	60,08	167,49
4,00			1,16	14,93	50,41	54,61	121,11
4,50			0,11	4,48	26,00	45,94	76,53
5,00			0,06	1,95	13,39	35,16	50,56
5,50				0,41	13,22	54,93	68,56
Suma	0,45	52,98	212,22	466,92	645,54	410,17	1.788,26
Rendimiento (%)							30,31

Punto SIMAR de la zona oeste de Cudillero con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,00	0,41	2,16	5,38	3,77	1,60	13,32
1,50	0,00	0,89	3,58	15,58	16,33	7,39	43,78
2,00		0,56	3,91	15,17	29,29	17,09	66,03
2,50		0,08	3,27	9,73	27,88	23,96	64,93
3,00		0,00	1,65	6,20	23,78	26,17	57,81
3,50			0,52	4,09	16,61	25,31	46,53
4,00			0,13	2,43	10,50	21,68	34,74
4,50			0,01	0,89	6,39	17,30	24,59
5,00			0,01	0,46	3,84	10,77	15,07
5,50				0,11	4,30	18,56	22,97
Suma	0,00	1,95	15,25	60,04	142,70	169,83	389,77
Rendimiento (%)							15,78

Punto SIMAR de la zona oeste de Cudillero con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,93	2,00	1,93	-	-	4,85
1,50	0,00	2,07	3,62	5,86	2,58	0,68	14,81
2,00		1,32	3,96	6,03	5,19	1,86	18,35
2,50		0,18	3,33	4,02	5,36	2,98	15,87
3,00		0,01	1,62	2,48	4,80	3,66	12,56
3,50			0,49	1,73	3,45	3,92	9,58
4,00			0,12	0,97	2,29	3,38	6,76
4,50			0,01	0,36	1,49	2,89	4,76
5,00			0,01	0,18	0,84	1,95	2,98
5,50				0,05	1,00	3,31	4,35
Suma	0,00	4,50	15,16	23,60	26,99	24,62	94,88
Rendimiento (%)							12,65

12.2.5. Tablas correspondientes a la boya de oleaje de la zona este de Cudillero:

Boya de la zona este de Cudillero con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00
1,00	0,06	0,94	2,01	2,85	0,64	0,16	6,66
1,50	0,06	2,90	5,08	11,09	4,15	0,93	24,20
2,00		1,78	5,86	11,19	8,81	2,25	29,90
2,50		0,44	4,76	7,99	10,30	3,84	27,33
3,00		0,08	2,15	4,74	7,60	4,08	18,66
3,50			0,85	2,97	5,99	4,23	14,04
4,00			0,25	1,76	3,79	3,55	9,35
4,50			0,07	0,78	2,29	2,54	5,67
5,00			0,01	0,32	1,00	1,67	3,00
5,50			0,01	0,22	1,11	2,54	3,89
Suma	0,12	6,14	21,06	43,90	45,68	25,79	142,69
Rendimiento (%)							49,20

Boya de la zona este de Cudillero con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,53	0,71	0,11	-	-	1,35
1,50	0,01	1,31	2,80	0,79	0,11	0,02	5,03
2,00		1,63	3,39	1,86	0,33	0,05	7,27
2,50		1,63	2,79	2,77	0,68	0,08	7,94
3,00		0,88	2,19	2,53	0,89	0,12	6,61
3,50		0,43	1,60	2,42	1,14	0,18	5,77
4,00		0,15	1,15	1,87	1,16	0,19	4,53
4,50		0,05	0,65	1,42	1,05	0,20	3,38
5,00		0,01	0,28	0,77	0,85	0,22	2,13
5,50		0,01	0,19	1,00	1,58	0,62	3,40
Suma	0,01	6,63	15,75	15,54	7,79	1,68	47,40
Rendimiento (%)							18,96

Boya de la zona este de Cudillero con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,02	0,13	0,23	0,18	0,01	0,00	0,00		0,57
1,50		2,53	3,14	5,86	1,89	0,35	0,09	0,01	13,87
2,50			1,41	2,08	2,33	0,73	0,14		6,70
3,50				0,61	1,05	0,63	0,16		2,45
4,50					0,37	0,36	0,11		0,84
5,50						0,36			0,36
Suma	0,02	2,67	4,79	8,72	5,65	2,43	0,51	0,01	24,79
Rendimiento (%)									24,79

Boya de la zona este de Cudillero con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,62	16,13	42,83	62,28	11,16	1,60	134,62
1,50	0,30	25,57	72,05	164,38	55,21	6,59	324,10
2,00		11,93	68,76	151,06	100,89	14,80	347,45
2,50		2,91	61,36	116,20	140,50	29,30	350,25
3,00		0,57	29,88	82,25	119,75	36,19	268,64
3,50			13,24	55,04	109,79	44,95	223,02
4,00			4,38	36,11	80,38	44,02	164,89
4,50			1,26	15,99	48,52	38,67	104,44
5,00			0,24	6,49	21,24	35,52	63,48
5,50			0,24	4,54	23,66	54,16	82,60
Suma	0,92	57,11	294,23	694,34	711,09	305,79	2.063,48
Rendimiento (%)							34,97

Boya de la zona este de Cudillero con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,01	0,41	1,96	5,24	1,78	0,66	10,05
1,50	0,00	0,95	4,45	18,62	11,03	3,19	38,25
2,00		0,59	5,57	21,09	22,87	7,82	57,93
2,50		0,17	5,52	16,74	30,89	13,96	67,27
3,00		0,04	3,02	12,37	27,20	16,42	59,06
3,50			1,43	8,59	23,87	18,93	52,83
4,00			0,50	5,88	16,75	17,47	40,60
4,50			0,17	3,17	11,93	14,56	29,82
5,00			0,04	1,52	6,09	10,88	18,52
5,50			0,04	1,21	7,70	18,30	27,25
Suma	0,01	2,17	22,70	94,43	160,09	122,20	401,59
Rendimiento (%)							16,26

Boya de la zona este de Cudillero con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,91	1,82	1,88	-	-	4,60
1,50	0,02	2,22	4,51	7,00	1,74	0,30	15,78
2,00		1,40	5,64	8,38	4,05	0,85	20,31
2,50		0,40	5,61	6,92	5,94	1,73	20,60
3,00		0,09	2,96	4,95	5,49	2,29	15,79
3,50			1,34	3,63	4,95	2,93	12,85
4,00			0,46	2,35	3,64	2,73	9,18
4,50			0,14	1,28	2,78	2,44	6,64
5,00			0,03	0,61	1,33	1,97	3,94
5,50			0,03	0,51	1,79	3,26	5,58
Suma	0,02	5,01	22,54	37,50	31,72	18,50	115,29
Rendimiento (%)							15,37

12.2.6. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Castrillón:

Punto SIMAR de Castrillón con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,01	0,00	0,02
1,00	0,05	0,95	2,20	2,95	1,39	0,40	7,94
1,50	0,01	2,69	3,97	9,30	6,21	2,16	24,34
2,00		1,70	3,95	7,95	11,26	4,87	29,73
2,50		0,22	2,69	4,60	9,31	6,63	23,44
3,00		0,00	1,14	2,29	6,54	6,45	16,43
3,50			0,33	1,43	4,11	5,69	11,55
4,00			0,06	0,69	2,33	4,37	7,45
4,50			0,01	0,27	1,26	2,99	4,52
5,00				0,08	0,64	1,69	2,42
5,50				0,02	0,64	2,61	3,27
Suma	0,06	5,57	14,34	29,58	43,69	37,87	131,11
Rendimiento (%)							45,21

Punto SIMAR de Castrillón con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,58	0,74	0,24	-	-	1,55
1,50	0,00	1,02	2,35	1,18	0,25	0,02	4,82
2,00		1,10	2,41	2,38	0,72	0,05	6,66
2,50		0,92	1,61	2,50	1,17	0,10	6,29
3,00		0,47	1,06	2,18	1,40	0,16	5,27
3,50		0,16	0,77	1,66	1,53	0,19	4,32
4,00		0,03	0,45	1,15	1,44	0,21	3,29
4,50		0,00	0,22	0,78	1,24	0,23	2,48
5,00			0,07	0,49	0,87	0,23	1,66
5,50			0,02	0,57	1,62	0,63	2,84
Suma	0,00	4,29	9,69	13,13	10,24	1,82	39,17
Rendimiento (%)							15,67

Punto SIMAR de Castrillón con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,06	0,40	0,57	0,47	0,19	0,04	0,01	0,00	1,74
1,50		2,35	2,45	4,91	2,83	0,81	0,09	0,01	13,45
2,50			0,80	1,20	2,11	1,26	0,17		5,53
3,50				0,29	0,72	0,85	0,17		2,03
4,50					0,21	0,42	0,13		0,75
5,50						0,37			0,37
Suma	0,06	2,75	3,82	6,87	6,05	3,75	0,56	0,02	23,88
Rendimiento (%)									23,88

Punto SIMAR de Castrillón con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,48	16,42	46,99	64,50	24,26	3,97	156,61
1,50	0,05	23,77	56,24	137,84	82,70	15,31	315,92
2,00		11,38	46,34	107,34	128,95	32,06	326,08
2,50		1,43	34,61	66,90	127,00	50,52	280,47
3,00		0,03	15,91	39,73	103,15	57,13	215,96
3,50			5,07	26,51	75,29	60,38	167,25
4,00			0,96	14,22	49,35	54,30	118,83
4,50			0,11	5,49	26,65	45,60	77,84
5,00				1,71	13,63	36,05	51,39
5,50				0,35	13,51	55,70	69,56
Suma	0,53	53,04	206,22	464,59	644,48	411,03	1.779,89
Rendimiento (%)							30,17

Punto SIMAR de Castrillón con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,00	0,41	2,15	5,43	3,87	1,63	13,50
1,50	0,00	0,89	3,48	15,62	16,52	7,42	43,92
2,00		0,57	3,75	14,98	29,23	16,94	65,47
2,50		0,09	3,11	9,64	27,92	24,08	64,83
3,00		0,00	1,61	5,98	23,43	25,93	56,95
3,50			0,55	4,14	16,37	25,43	46,49
4,00			0,11	2,32	10,28	21,55	34,26
4,50			0,01	1,09	6,55	17,17	24,82
5,00				0,40	3,91	11,04	15,35
5,50				0,09	4,39	18,82	23,31
Suma	0,01	1,96	14,77	59,68	142,47	170,01	388,90
Rendimiento (%)							15,74

Punto SIMAR de Castrillón con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,92	1,99	1,94	-	-	4,86
1,50	0,00	2,06	3,52	5,87	2,61	0,69	14,74
2,00		1,33	3,80	5,95	5,17	1,84	18,10
2,50		0,20	3,17	3,98	5,37	2,99	15,71
3,00		0,01	1,58	2,39	4,73	3,62	12,33
3,50			0,51	1,75	3,40	3,94	9,59
4,00			0,10	0,93	2,24	3,36	6,63
4,50			0,01	0,44	1,53	2,87	4,85
5,00				0,16	0,85	2,00	3,02
5,50				0,04	1,02	3,35	4,41
Suma	0,00	4,52	14,68	23,45	26,92	24,67	94,24
Rendimiento (%)							12,57

12.2.7. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Gozón:

Punto SIMAR de Gozón con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,01	0,00	0,02
1,00	0,06	0,95	2,20	3,02	1,44	0,40	8,07
1,50	0,02	2,69	3,88	9,31	6,31	2,17	24,37
2,00		1,73	3,75	7,86	11,30	4,84	29,47
2,50		0,26	2,59	4,49	9,26	6,57	23,15
3,00		0,01	1,10	2,29	6,56	6,35	16,30
3,50			0,34	1,36	4,09	5,61	11,41
4,00			0,05	0,67	2,31	4,32	7,35
4,50			0,01	0,30	1,26	2,91	4,48
5,00				0,08	0,62	1,61	2,31
5,50				0,02	0,66	2,54	3,22
Suma	0,07	5,63	13,91	29,41	43,81	37,31	130,15
Rendimiento (%)							44,88

Punto SIMAR de Gozón con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,58	0,76	0,24	-	-	1,58
1,50	0,00	1,00	2,35	1,20	0,25	0,02	4,82
2,00		1,05	2,38	2,39	0,71	0,05	6,58
2,50		0,88	1,57	2,49	1,16	0,09	6,19
3,00		0,45	1,06	2,19	1,38	0,17	5,24
3,50		0,17	0,74	1,65	1,51	0,19	4,27
4,00		0,03	0,44	1,14	1,42	0,21	3,24
4,50		0,01	0,25	0,78	1,21	0,23	2,48
5,00			0,07	0,48	0,82	0,22	1,59
5,50			0,02	0,59	1,58	0,61	2,79
Suma	0,00	4,16	9,63	13,15	10,04	1,79	38,77
Rendimiento (%)							15,51

Punto SIMAR de Gozón con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,07	0,40	0,59	0,49	0,21	0,05	0,01	0,00	1,82
1,50		2,35	2,40	4,92	2,87	0,81	0,09	0,01	13,45
2,50			0,77	1,17	2,10	1,25	0,17		5,45
3,50				0,28	0,72	0,84	0,17		2,01
4,50					0,21	0,41	0,13		0,74
5,50						0,36			0,36
Suma	0,07	2,75	3,76	6,85	6,10	3,71	0,57	0,02	23,83
Rendimiento (%)									23,83

Punto SIMAR de Gozón con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,57	16,36	46,91	66,06	25,04	3,98	158,93
1,50	0,08	23,72	54,99	138,06	84,01	15,38	316,23
2,00		11,56	44,01	106,06	129,38	31,87	322,88
2,50		1,70	33,31	65,29	126,34	50,06	276,69
3,00		0,05	15,28	39,73	103,33	56,28	214,66
3,50			5,36	25,27	75,00	59,55	165,19
4,00			0,81	13,81	48,94	53,61	117,16
4,50			0,16	6,25	26,70	44,29	77,41
5,00				1,65	13,22	34,22	49,09
5,50				0,35	13,98	54,16	68,50
Suma	0,65	53,38	200,82	462,54	645,94	403,40	1.766,74
Rendimiento (%)							29,94

Punto SIMAR de Gozón con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,01	0,41	2,15	5,56	4,00	1,63	13,76
1,50	0,00	0,89	3,40	15,64	16,78	7,45	44,15
2,00		0,58	3,56	14,80	29,33	16,83	65,10
2,50		0,10	3,00	9,40	27,77	23,85	64,13
3,00		0,00	1,55	5,98	23,47	25,54	56,54
3,50			0,58	3,94	16,31	25,09	45,92
4,00			0,09	2,25	10,20	21,28	33,82
4,50			0,02	1,24	6,56	16,68	24,50
5,00				0,39	3,79	10,48	14,65
5,50				0,09	4,55	18,30	22,95
Suma	0,01	1,98	14,34	59,30	142,75	167,14	385,52
Rendimiento (%)							15,61

Punto SIMAR de Gozón con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,92	1,99	1,99	-	-	4,90
1,50	0,01	2,06	3,44	5,88	2,65	0,69	14,71
2,00		1,35	3,61	5,88	5,19	1,83	17,86
2,50		0,23	3,05	3,89	5,34	2,96	15,47
3,00		0,01	1,51	2,39	4,74	3,57	12,22
3,50			0,54	1,67	3,38	3,88	9,48
4,00			0,08	0,90	2,22	3,32	6,52
4,50			0,02	0,50	1,53	2,79	4,84
5,00				0,16	0,83	1,90	2,88
5,50				0,04	1,06	3,26	4,36
Suma	0,01	4,57	14,25	23,29	26,94	24,20	93,25
Rendimiento (%)							12,43

12.2.8. Tablas correspondientes la la boya de oleaje de Gijón:

Boya de Gijón con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,03	0,01	0,05
1,00	0,05	2,18	3,02	3,40	3,40	1,68	13,74
1,50	0,00	1,60	5,56	4,81	6,95	5,27	24,19
2,00		0,17	3,75	3,07	5,31	6,68	18,98
2,50		0,02	1,03	1,85	2,93	5,46	11,30
3,00			0,23	0,81	1,38	3,75	6,17
3,50			0,02	0,36	0,66	1,84	2,89
4,00				0,10	0,24	1,03	1,37
4,50				0,01	0,09	0,37	0,48
5,00					0,02	0,15	0,16
5,50					0,01	0,06	0,07
Suma	0,06	3,98	13,61	14,41	21,03	26,30	79,39
Rendimiento (%)							27,37

Boya de Gijón con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,79	0,85	0,58	-	-	2,22
1,50	0,00	1,43	1,21	1,32	0,61	0,12	4,69
2,00		1,04	0,93	1,12	0,99	0,24	4,32
2,50		0,35	0,65	0,79	0,96	0,36	3,11
3,00		0,09	0,37	0,46	0,81	0,39	2,12
3,50		0,01	0,20	0,27	0,49	0,33	1,30
4,00			0,06	0,12	0,34	0,30	0,83
4,50			0,01	0,06	0,15	0,21	0,43
5,00				0,01	0,08	0,10	0,19
5,50				0,01	0,04	0,08	0,12
Suma	0,00	3,73	4,28	4,73	4,47	2,13	19,34
Rendimiento (%)							7,74

Boya de Gijón con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,19	1,48	1,10	1,10	0,53	0,15	0,04	0,01	4,60
1,50		1,40	3,44	2,54	3,16	1,97	0,57	0,10	13,18
2,50			0,31	0,48	0,66	1,04	0,64		3,14
3,50				0,07	0,12	0,27	0,29		0,76
4,50					0,02	0,05	0,11		0,18
5,50						0,01			0,01
Suma	0,19	2,88	4,85	4,20	4,49	3,50	1,66	0,11	21,87
Rendimiento (%)									21,87

Boya de Gijón con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,53	37,56	64,49	74,41	59,37	16,61	252,97
1,50	0,02	14,15	78,79	71,30	92,61	37,33	294,19
2,00		1,15	43,93	41,42	60,78	44,04	191,32
2,50		0,12	13,32	26,97	40,02	41,60	122,03
3,00			3,15	14,00	21,74	33,25	72,14
3,50			0,38	6,73	12,15	19,49	38,75
4,00				2,01	5,12	12,79	19,92
4,50				0,24	2,00	5,66	7,90
5,00					0,35	3,13	3,48
5,50					0,12	1,36	1,48
Suma	0,54	52,98	204,06	237,07	294,27	215,26	1.004,17
Rendimiento (%)							17,02

Boya de Gijón con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,01	0,95	2,95	6,27	9,48	6,82	26,47
1,50	0,00	0,53	4,87	8,08	18,49	18,08	50,05
2,00		0,06	3,56	5,78	13,78	23,26	46,43
2,50		0,01	1,20	3,89	8,80	19,82	33,71
3,00			0,32	2,11	4,94	15,09	22,45
3,50			0,04	1,05	2,64	8,21	11,94
4,00				0,33	1,07	5,08	6,47
4,50				0,05	0,49	2,13	2,67
5,00					0,10	0,96	1,06
5,50					0,04	0,46	0,50
Suma	0,01	1,54	12,94	27,54	59,83	99,91	201,76
Rendimiento (%)							8,17

Boya de Gijón con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	2,11	2,73	2,24	-	-	7,09
1,50	0,00	1,23	4,93	3,03	2,92	1,67	13,78
2,00		0,13	3,60	2,30	2,44	2,53	11,00
2,50		0,02	1,22	1,61	1,69	2,46	6,99
3,00			0,31	0,84	1,00	2,11	4,26
3,50			0,04	0,44	0,55	1,27	2,30
4,00				0,13	0,23	0,79	1,16
4,50				0,02	0,11	0,36	0,49
5,00					0,02	0,17	0,20
5,50					0,01	0,08	0,09
Suma	0,00	3,49	12,84	10,62	8,98	11,44	47,36
Rendimiento (%)							6,31

12.2.9. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Villaviciosa:

Punto SIMAR de Villaviciosa con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,01	0,00	0,02
1,00	0,07	0,96	2,19	3,08	1,46	0,41	8,17
1,50	0,03	2,65	3,79	9,25	6,42	2,22	24,36
2,00		1,68	3,63	7,74	11,26	4,88	29,18
2,50		0,23	2,45	4,35	9,17	6,64	22,83
3,00		0,00	1,03	2,25	6,44	6,42	16,15
3,50		0,00	0,31	1,32	4,05	5,61	11,30
4,00			0,05	0,67	2,22	4,36	7,30
4,50			0,01	0,32	1,26	2,95	4,54
5,00				0,07	0,63	1,64	2,35
5,50				0,01	0,65	2,63	3,29
Suma	0,09	5,53	13,47	29,07	43,57	37,77	129,50
Rendimiento (%)							44,66

Punto SIMAR de Villaviciosa con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,57	0,77	0,25	-	-	1,59
1,50	0,00	0,98	2,34	1,22	0,26	0,02	4,81
2,00		1,01	2,35	2,38	0,72	0,05	6,50
2,50		0,84	1,52	2,46	1,17	0,09	6,08
3,00		0,42	1,04	2,15	1,39	0,17	5,17
3,50		0,16	0,71	1,64	1,51	0,20	4,22
4,00		0,03	0,44	1,10	1,43	0,22	3,21
4,50		0,01	0,27	0,78	1,22	0,23	2,52
5,00			0,07	0,49	0,84	0,22	1,62
5,50			0,01	0,59	1,63	0,61	2,84
Suma	0,00	4,02	9,50	13,04	10,18	1,81	38,56
Rendimiento (%)							15,43

Punto SIMAR de Villaviciosa con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,07	0,43	0,61	0,52	0,22	0,05	0,01	0,00	1,91
1,50		2,32	2,35	4,89	2,92	0,83	0,09	0,02	13,41
2,50			0,73	1,13	2,07	1,27	0,17		5,37
3,50				0,27	0,71	0,84	0,18		2,00
4,50					0,21	0,41	0,13		0,75
5,50						0,37			0,37
Suma	0,07	2,74	3,69	6,80	6,13	3,77	0,57	0,02	23,80
Rendimiento (%)									23,80

Punto SIMAR de Villaviciosa con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,66	16,54	46,70	67,43	25,43	4,08	160,83
1,50	0,14	23,40	53,78	137,14	85,50	15,75	315,71
2,00		11,23	42,53	104,45	128,91	32,19	319,31
2,50		1,50	31,61	63,25	125,08	50,62	272,06
3,00		0,03	14,27	39,09	101,51	56,88	211,79
3,50		0,03	4,90	24,38	74,24	59,61	163,16
4,00			0,86	13,81	47,11	54,10	115,87
4,50			0,27	6,61	26,70	44,92	78,51
5,00				1,53	13,45	34,93	49,91
5,50				0,30	13,81	55,99	70,09
Suma	0,80	52,72	194,92	457,99	641,75	409,06	1.757,24
Rendimiento (%)							29,78

Punto SIMAR de Villaviciosa con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,01	0,42	2,14	5,68	4,06	1,67	13,97
1,50	0,00	0,87	3,32	15,54	17,07	7,63	44,44
2,00		0,56	3,44	14,58	28,22	17,00	64,81
2,50		0,09	2,84	9,11	27,50	24,12	63,66
3,00		0,00	1,44	5,88	23,06	25,82	56,20
3,50		0,00	0,53	3,81	16,14	25,11	45,59
4,00			0,10	2,25	9,82	21,47	33,63
4,50			0,04	1,31	6,56	16,92	24,83
5,00				0,36	3,86	10,70	14,91
5,50				0,08	4,49	18,92	23,49
Suma	0,01	1,94	13,86	58,58	141,78	169,36	385,53
Rendimiento (%)							15,61

Punto SIMAR de Villaviciosa con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,93	1,98	2,03	-	-	4,94
1,50	0,01	2,03	3,36	5,84	2,70	0,71	14,64
2,00		1,31	3,49	5,79	5,17	1,85	17,61
2,50		0,21	2,89	3,76	5,29	2,99	15,15
3,00		0,01	1,41	2,35	4,66	3,61	12,03
3,50		0,00	0,50	1,61	3,35	3,89	9,34
4,00			0,09	0,90	2,14	3,35	6,48
4,50			0,03	0,53	1,53	2,83	4,92
5,00				0,14	0,84	1,94	2,93
5,50				0,03	1,04	3,37	4,45
Suma	0,01	4,49	13,76	22,99	26,72	24,53	92,49
Rendimiento (%)							12,33

12.2.10. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Colunga:

Punto SIMAR de Colunga con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,02	0,00	0,02
1,00	0,08	0,95	2,17	3,13	1,50	0,42	8,24
1,50	0,05	2,62	3,71	9,27	6,49	2,26	24,41
2,00		1,55	3,48	7,60	11,21	4,92	28,76
2,50		0,22	2,27	4,27	9,05	6,64	22,45
3,00		0,00	0,99	2,21	6,30	6,42	15,92
3,50			0,30	1,30	3,94	5,63	11,18
4,00			0,05	0,69	2,22	4,37	7,32
4,50			0,01	0,33	1,24	2,92	4,50
5,00				0,07	0,68	1,65	2,40
5,50				0,01	0,66	2,68	3,35
Suma	0,13	5,35	12,98	28,88	43,29	37,91	128,54
Rendimiento (%)							44,32

Punto SIMAR de Colunga con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,57	0,78	0,25	-	-	1,60
1,50	0,01	0,96	2,34	1,23	0,26	0,02	4,82
2,00		0,97	2,30	2,37	0,73	0,05	6,42
2,50		0,78	1,49	2,43	1,17	0,10	5,97
3,00		0,40	1,02	2,10	1,39	0,17	5,08
3,50		0,15	0,70	1,59	1,52	0,20	4,17
4,00		0,03	0,45	1,09	1,44	0,22	3,23
4,50		0,00	0,28	0,77	1,21	0,23	2,50
5,00			0,06	0,53	0,84	0,24	1,67
5,50			0,01	0,59	1,66	0,64	2,90
Suma	0,01	3,86	9,44	12,96	10,22	1,87	38,36
Rendimiento (%)							15,34

Punto SIMAR de Colunga con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,07	0,45	0,64	0,56	0,24	0,06	0,01	0,00	2,03
1,50		2,29	2,30	4,90	2,95	0,85	0,10	0,02	13,40
2,50			0,68	1,11	2,05	1,27	0,17		5,27
3,50				0,27	0,69	0,84	0,18		1,98
4,50					0,20	0,41	0,13		0,74
5,50						0,38			0,38
Suma	0,07	2,74	3,62	6,83	6,13	3,80	0,59	0,02	23,80
Rendimiento (%)									23,80

Punto SIMAR de Colunga con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,82	16,28	46,27	68,41	26,08	4,13	162,00
1,50	0,24	23,15	52,64	137,49	86,46	16,04	316,01
2,00		10,38	40,80	102,51	128,34	32,45	314,49
2,50		1,45	29,30	62,16	123,44	50,63	266,97
3,00		0,03	13,70	38,29	99,25	56,88	208,16
3,50			4,74	24,13	72,29	59,78	160,93
4,00			0,86	14,10	46,99	54,23	116,18
4,50			0,11	6,84	26,29	44,46	77,70
5,00				1,42	14,51	35,05	50,98
5,50				0,30	13,98	56,99	71,27
Suma	1,06	51,29	188,41	455,65	637,64	410,65	1.744,70
Rendimiento (%)							29,57

Punto SIMAR de Colunga con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,01	0,41	2,12	5,76	4,17	1,70	14,16
1,50	0,00	0,86	3,25	15,58	17,27	7,77	44,74
2,00		0,52	3,30	14,31	29,09	17,14	64,36
2,50		0,09	2,63	8,95	27,14	24,13	62,94
3,00		0,00	1,39	5,76	22,54	25,82	55,51
3,50			0,51	3,77	15,72	25,18	45,18
4,00			0,10	2,30	9,79	21,53	33,71
4,50			0,01	1,35	6,46	16,74	24,57
5,00				0,33	4,16	10,73	15,22
5,50				0,08	4,55	19,26	23,89
Suma	0,01	1,88	13,32	58,19	140,88	170,00	384,28
Rendimiento (%)							15,56

Punto SIMAR de Colunga con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,92	1,96	2,06	-	-	4,94
1,50	0,02	2,01	3,29	5,85	2,73	0,72	14,61
2,00		1,21	3,35	5,68	5,15	1,86	17,26
2,50		0,20	2,68	3,70	5,22	3,00	14,79
3,00		0,01	1,36	2,30	4,55	3,61	11,83
3,50			0,48	1,59	3,26	3,90	9,23
4,00			0,09	0,92	2,13	3,36	6,50
4,50			0,01	0,55	1,51	2,80	4,87
5,00				0,13	0,91	1,95	2,99
5,50				0,03	1,06	3,43	4,52
Suma	0,02	4,34	13,22	22,83	26,51	24,62	91,54
Rendimiento (%)							12,20

12.2.11. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Ribadesella:

Punto SIMAR de Ribadesella con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,02	0,01	0,03
1,00	0,08	1,04	2,25	3,38	1,71	0,52	8,98
1,50	0,05	2,34	3,67	9,24	6,88	2,54	24,72
2,00		1,00	3,35	7,11	10,81	5,17	27,45
2,50		0,12	1,85	4,01	8,61	6,53	21,12
3,00		0,01	0,79	2,02	5,96	6,31	15,09
3,50		0,00	0,24	1,09	3,66	5,51	10,50
4,00			0,05	0,61	1,97	4,11	6,74
4,50			0,01	0,22	1,13	2,67	4,03
5,00				0,04	0,62	1,45	2,11
5,50				0,01	0,54	2,36	2,91
Suma	0,13	4,52	12,21	27,73	41,92	37,17	123,67
Rendimiento (%)							42,65

Punto SIMAR de Ribadesella con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,59	0,84	0,29	-	-	1,72
1,50	0,01	0,95	2,33	1,31	0,29	0,02	4,91
2,00		0,93	2,16	2,28	0,76	0,06	6,19
2,50		0,63	1,40	2,31	1,15	0,11	5,61
3,00		0,33	0,93	1,99	1,37	0,16	4,78
3,50		0,12	0,59	1,48	1,48	0,20	3,87
4,00		0,03	0,40	0,97	1,35	0,21	2,96
4,50		0,00	0,18	0,70	1,11	0,22	2,22
5,00			0,04	0,48	0,74	0,22	1,48
5,50			0,01	0,49	1,46	0,55	2,51
Suma	0,01	3,58	8,88	12,30	9,73	1,75	36,24
Rendimiento (%)							14,50

Punto SIMAR de Ribadesella con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,09	0,55	0,76	0,69	0,31	0,08	0,01	0,00	2,50
1,50		2,04	2,27	4,88	3,13	0,95	0,11	0,02	13,40
2,50			0,55	1,04	1,95	1,24	0,20		4,98
3,50				0,22	0,64	0,82	0,18		1,86
4,50					0,19	0,38	0,12		0,68
5,50						0,33			0,33
Suma	0,09	2,60	3,58	6,84	6,22	3,81	0,61	0,02	23,76
Rendimiento (%)									23,76

Punto SIMAR de Ribadesella con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,82	17,88	47,99	73,80	29,79	5,18	175,47
1,50	0,24	20,64	52,03	137,00	91,67	17,99	319,57
2,00		6,71	39,30	95,96	123,86	34,08	299,92
2,50		0,80	23,83	58,30	117,56	49,76	250,25
3,00		0,06	11,02	35,06	93,94	55,88	195,97
3,50		0,03	3,81	20,13	67,04	58,51	149,51
4,00			0,81	12,57	41,75	51,00	106,13
4,50			0,11	4,54	23,99	40,74	69,39
5,00				0,83	13,16	30,92	44,90
5,50				0,24	11,45	50,21	61,89
Suma	1,07	46,12	178,91	438,42	614,22	394,27	1.673,00
Rendimiento (%)							28,36

Punto SIMAR de Ribadesella con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,01	0,45	2,20	6,21	4,76	2,13	15,75
1,50	0,00	0,77	3,22	15,52	18,31	8,71	46,53
2,00		0,33	3,18	13,39	28,08	18,00	62,99
2,50		0,05	2,14	8,40	25,84	23,71	60,14
3,00		0,00	1,12	5,27	21,34	25,36	53,09
3,50		0,00	0,41	3,14	14,58	24,64	42,78
4,00			0,09	2,05	8,70	20,24	31,08
4,50			0,01	0,90	5,90	15,34	22,15
5,00				0,19	3,77	9,47	13,43
5,50				0,06	3,72	16,97	20,75
Suma	0,01	1,61	12,37	55,14	134,99	164,59	368,71
Rendimiento (%)							14,93

Punto SIMAR de Ribadesella con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	1,01	2,04	2,22	-	-	5,27
1,50	0,02	1,79	3,25	5,83	2,89	0,81	14,59
2,00		0,79	3,22	5,32	4,97	1,96	16,26
2,50		0,11	2,18	3,47	4,97	2,94	13,68
3,00		0,01	1,09	2,11	4,31	3,54	11,06
3,50		0,00	0,39	1,33	3,03	3,81	8,56
4,00			0,08	0,82	1,89	3,16	5,95
4,50			0,01	0,36	1,38	2,57	4,32
5,00				0,08	0,82	1,72	2,62
5,50				0,03	0,87	3,02	3,91
Suma	0,02	3,70	12,27	21,57	25,12	23,53	86,21
Rendimiento (%)							11,49

12.2.12. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Llanes:

Boya de Llanes con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,02	0,01	0,03
1,00	0,08	1,04	2,24	3,42	1,73	0,54	9,05
1,50	0,04	2,24	3,58	9,22	6,90	2,53	24,53
2,00		0,87	3,27	7,03	10,82	5,09	27,09
2,50		0,11	1,79	3,97	8,58	6,60	21,05
3,00		0,01	0,81	1,99	5,93	6,23	14,97
3,50		0,01	0,23	1,14	3,66	5,53	10,56
4,00			0,05	0,61	2,03	4,17	6,86
4,50			0,01	0,25	1,15	2,78	4,20
5,00				0,06	0,64	1,48	2,18
5,50				0,01	0,59	2,43	3,04
Suma	0,13	4,28	11,98	27,71	42,06	37,40	123,55
Rendimiento (%)							42,60

Punto SIMAR de Llanes con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,59	0,86	0,29	-	-	1,74
1,50	0,01	0,92	2,33	1,31	0,29	0,02	4,88
2,00		0,91	2,13	2,29	0,75	0,06	6,14
2,50		0,61	1,39	2,30	1,17	0,11	5,58
3,00		0,33	0,92	1,98	1,35	0,16	4,74
3,50		0,12	0,61	1,48	1,49	0,20	3,89
4,00		0,03	0,40	1,00	1,37	0,22	3,02
4,50		0,00	0,21	0,72	1,16	0,22	2,31
5,00			0,05	0,49	0,76	0,22	1,53
5,50			0,01	0,54	1,51	0,58	2,64
Suma	0,01	3,51	8,90	12,40	9,85	1,79	36,46
Rendimiento (%)							14,58

Punto SIMAR de Llanes con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,09	0,56	0,78	0,71	0,33	0,09	0,01	0,00	2,58
1,50		1,96	2,21	4,87	3,14	0,95	0,11	0,02	13,26
2,50			0,53	1,03	1,94	1,26	0,19		4,96
3,50				0,23	0,64	0,83	0,18		1,88
4,50					0,19	0,39	0,12		0,70
5,50						0,34			0,34
Suma	0,09	2,52	3,53	6,85	6,24	3,85	0,61	0,02	23,71
Rendimiento (%)									23,71

Punto SIMAR de Llanes con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,83	17,88	47,79	74,83	30,11	5,31	176,75
1,50	0,23	19,81	50,75	136,70	91,93	17,96	317,38
2,00		5,82	38,38	94,85	123,94	33,57	296,56
2,50		0,70	23,08	57,78	117,04	50,34	248,94
3,00		0,06	11,26	34,58	93,43	55,17	194,51
3,50		0,05	3,60	21,12	67,09	58,67	150,53
4,00			0,81	12,51	43,11	51,83	108,25
4,50			0,11	5,19	24,46	42,43	72,20
5,00				1,18	13,57	31,57	46,32
5,50				0,24	12,63	51,86	64,72
Suma	1,06	44,33	175,77	438,98	617,31	398,71	1.676,16
Rendimiento (%)							28,41

Punto SIMAR de Llanes con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,01	0,45	2,19	6,30	4,81	2,18	15,93
1,50	0,00	0,74	3,14	15,49	18,36	8,70	46,43
2,00		0,29	3,11	13,24	28,09	17,73	62,46
2,50		0,04	2,08	8,32	25,73	23,99	60,16
3,00		0,00	1,14	5,20	21,22	25,04	52,61
3,50		0,00	0,39	3,30	14,59	24,71	42,99
4,00			0,09	2,04	8,98	20,57	31,68
4,50			0,01	1,03	6,01	15,98	23,04
5,00				0,28	3,89	9,67	13,83
5,50				0,06	4,11	17,53	21,70
Suma	0,01	1,53	12,14	55,25	135,79	166,10	370,82
Rendimiento (%)							15,01

Punto SIMAR de Llanes con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	1,00	2,03	2,26	-	-	5,29
1,50	0,02	1,72	3,17	5,82	2,90	0,80	14,43
2,00		0,68	3,15	5,26	4,97	1,93	15,99
2,50		0,10	2,11	3,44	4,95	2,98	13,58
3,00		0,01	1,12	2,08	4,29	3,50	10,99
3,50		0,01	0,36	1,39	3,03	3,83	8,62
4,00			0,08	0,81	1,95	3,21	6,06
4,50			0,01	0,42	1,40	2,67	4,50
5,00				0,11	0,85	1,75	2,71
5,50				0,03	0,95	3,12	4,10
Suma	0,02	3,52	12,04	21,61	25,29	23,79	86,27
Rendimiento (%)							11,50

12.2.13. Tablas correspondientes al punto SIMAR de Ribadeva:

Punto SIMAR de Ribadeva con el convertidor Oyster							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	0,03	0,01	0,05
1,00	0,03	1,21	2,41	4,02	2,26	0,77	10,71
1,50	0,01	1,41	3,51	8,68	7,35	3,09	24,06
2,00		0,29	2,80	6,10	9,87	5,31	24,38
2,50		0,03	1,33	3,35	7,65	6,21	18,58
3,00		0,00	0,51	1,65	5,33	6,00	13,49
3,50			0,12	0,95	3,06	4,93	9,06
4,00			0,01	0,46	1,67	3,61	5,75
4,50			0,00	0,19	0,98	2,13	3,30
5,00				0,04	0,48	1,27	1,78
5,50				0,01	0,42	1,84	2,26
Suma	0,04	2,96	10,70	25,43	39,11	35,18	113,41
Rendimiento (%)							39,11

Punto SIMAR de Ribadeva con el convertidor AquaBuoy							
T (s)	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	18,00	Suma
H (m)							
1,00	-	0,63	1,01	0,39	-	-	2,02
1,50	0,00	0,90	2,19	1,40	0,36	0,03	4,88
2,00	0,00	0,78	1,85	2,09	0,78	0,07	5,56
2,50		0,46	1,17	2,06	1,10	0,12	4,90
3,00		0,21	0,76	1,78	1,30	0,15	4,20
3,50		0,06	0,51	1,23	1,33	0,18	3,32
4,00		0,01	0,30	0,82	1,18	0,19	2,51
4,50		0,00	0,16	0,61	0,88	0,20	1,85
5,00			0,03	0,37	0,65	0,17	1,22
5,50			0,01	0,38	1,14	0,43	1,96
Suma	0,00	3,05	7,98	11,11	8,73	1,55	32,42
Rendimiento (%)							12,97

Punto SIMAR de Ribadeva con el convertidor OWC									
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	Suma
H (m)									
0,50	0,12	0,87	1,05	1,08	0,51	0,17	0,02	0,01	3,83
1,50		1,24	2,17	4,59	3,34	1,16	0,15	0,02	12,66
2,50			0,40	0,87	1,73	1,18	0,22		4,40
3,50				0,19	0,54	0,74	0,16		1,63
4,50					0,16	0,30	0,11		0,57
5,50						0,26			0,26
Suma	0,12	2,11	3,62	6,73	6,28	3,80	0,66	0,03	23,35
Rendimiento (%)									23,35

Punto SIMAR de Ribadeva con el convertidor Wave Dragon							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
0,50	-	-	-	-	-	-	-
1,00	0,32	20,85	51,34	87,90	39,48	7,65	207,55
1,50	0,05	12,48	49,73	128,74	97,89	21,90	310,79
2,00	0,01	1,95	32,87	82,34	113,09	35,01	265,27
2,50		0,22	17,17	48,69	104,43	47,35	217,86
3,00		0,03	7,04	28,56	84,03	53,17	172,84
3,50			1,93	17,51	56,04	52,40	127,87
4,00			0,25	9,44	35,39	44,78	89,86
4,50			0,05	3,89	20,69	32,47	57,11
5,00				0,77	10,15	26,96	37,88
5,50				0,12	8,91	39,12	48,14
Suma	0,37	35,53	160,39	407,95	570,10	360,82	1.535,17
Rendimiento (%)							26,02

Punto SIMAR de Ribadeva con el convertidor AWS							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	0,00	0,53	2,35	7,40	6,31	3,14	19,73
1,50	0,00	0,47	3,07	14,59	19,55	10,61	48,28
2,00	0,00	0,10	2,66	11,49	25,64	18,49	58,38
2,50		0,01	1,54	7,01	22,96	22,56	54,09
3,00		0,00	0,71	4,30	19,09	24,14	48,23
3,50			0,21	2,73	12,18	22,07	37,20
4,00			0,03	1,54	7,37	17,77	26,71
4,50			0,01	0,77	5,09	12,23	18,09
5,00				0,18	2,91	8,26	11,35
5,50				0,03	2,90	13,22	16,15
Suma	0,00	1,10	10,59	50,04	123,99	152,50	338,21
Rendimiento (%)							13,69

Punto SIMAR de Ribadeva con el convertidor Pelamis							
T (s)	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	Suma
H (m)							
1,00	-	1,17	2,18	2,65	-	-	6,00
1,50	0,00	1,08	3,11	5,48	3,09	0,98	13,74
2,00	0,00	0,23	2,70	4,57	4,54	2,01	14,04
2,50		0,03	1,57	2,90	4,42	2,80	11,72
3,00		0,01	0,70	1,72	3,85	3,37	9,65
3,50			0,20	1,15	2,53	3,42	7,29
4,00			0,03	0,61	1,60	2,77	5,02
4,50			0,01	0,31	1,19	2,05	3,55
5,00				0,07	0,63	1,50	2,21
5,50				0,01	0,67	2,35	3,04
Suma	0,00	2,52	10,48	19,48	22,52	21,25	76,25
Rendimiento (%)							10,17

### **13. Bibliografía**

- [1] Godfrey Boyle. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. Tercera edición
- [2] G. Iglesias, R. Carballo. Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (N Spain). Energy 35 (2010) 1964–1972
- [3] G. Iglesias, R. Carballo. Wave energy resource in the Estaca de Bares area (Spain). Renewable Energy 35 (2010) 1574–1584
- [4] G. Iglesias, R. Carballo. Wave energy and nearshore hot spots: The case of the SE Bay of Biscay. Renewable Energy 35 (2010) 2490-2500
- [5] Iraide López, Jon Andreu, Salvador Ceballos, Iñigo Martínez de Alegría, Iñigo Kortabarria. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. Renewable and Sustainable Energy Reviews 27(2013) 413–434
- [6] António F. de O. Falcão. Wave energy utilization: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 899–918
- [7] G. Iglesias, M. López a, R. Carballo, A. Castro, J.A. Fragueta, P. Frigaard. Wave energy potential in Galicia (NW Spain). Renewable Energy 34 (2009) 2323–2333
- [8] Guillermo Iglesias, Pablo del Río, Jesús Ángel Dopico. Policy analysis of authorisation procedures for wind energy deployment in Spain. Energy Policy 39 (2011) 4067–4076
- [9] Johannes Falnes. A review of wave-energy extraction. Marine Structures 20 (2007) 185–201
- [10] Jens Peter Kofoed, Peter Frigaard, Erik Friis-Madsen, Hans Chr. Sørensen  
Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. Renewable Energy 31 (2006) 181–189

- [11] Ross Henderson. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. *Renewable Energy* 31 (2006) 271–283
- [12] Alain Clément, Pat McCullen, António Falcão, Antonio Fiorentino, Fred Gardner, Karin Hammarlund, George Lemonis, Tony Lewis, Kim Nielsen, Simona Petroncini, M.-Teresa Pontes, Phillippe Schild, Bengt-Olov Sjöström, Hans Christian Sørensen, Tom Thorpe. Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (2002) 405–431
- [13] Duarte Valério, Pedro Beirão, José Sá da Costa. Optimisation of wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing. *Ocean Engineering* 34 (2007) 2330–2344
- [14] BDrew, A R Plummer, MN Sahinkaya. A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* Vol. 223 Part A: J. Power and Energy
- [15] James Tedd, Jens Peter Kofoed. Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon, wave energy converter. *Renewable Energy* 34 (2009) 711–717
- [16] E. Renzi, K. Doherty, A. Henry, F. Dias. How does Oyster work? The simple interpretation of Oyster mathematics. *European Journal of Mechanics B/Fluids* 47 (2014) 124–131
- [17] M. Veigas, M. López, P. Romillo, R. Carballo, A. Castro, G. Iglesias. A proposed wave farm on the Galician coast. *Energy Conversion and Management* 99 (2015) 102–111
- [18] Silvia Bozzi, Giovanni Besio, Giuseppe Passoni. Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis. *Coastal Engineering* 136 (2018) 130–146
- [19] M. Veigas, G. Iglesias. Potentials of a hybrid offshore farm for the island of Fuerteventura. *Energy Conversion and Management* 86 (2014) 300–308

- [20] R. Carballo, M. S\_anchez, V. Ramos, J.A. Fragueta, G. Iglesias. The intra-annual variability in the performance of wave energy converters: A comparative study in N Galicia (Spain). Energy 82 (2015) 138 - 146
- [21] Plan de Energías Renovables 2011-2020 191-226
- [22] <https://www.ingenierosnavales.com/content/jornada-%E2%80%9Cenerg%C3%ADa-undimotriz-repercusi%C3%B3n-en-el-principado-de-asturias%E2%80%9D-v%C3%ADdeo> (Consultado en septiembre de 2017)
- [23] <https://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas> (Consultado en noviembre de 2017)
- [24] <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx> (Consultado en junio de 2018)
- [25] [http://vbn.aau.dk/files/57370067/Wave\\_Dragon\\_wave\\_power\\_plant\\_using\\_low\\_head\\_turbines\\_Presentation.pdf](http://vbn.aau.dk/files/57370067/Wave_Dragon_wave_power_plant_using_low_head_turbines_Presentation.pdf) (Consultado en junio de 2018)
- [26] H. Fernandez, G. Iglesias, R. Carballo, A. Castro, J.A. Fragueta, F. Taveira-Pinto, M. Sanchez. The new wave energy converter WaveCat: Concept and laboratory tests. Marine Structures 29 (2012) 58–70
- [27] Hans Chr. Sørensen & Erik Friis-Madsen. Wave Dragon 1.5 MW North Sea Demonstrator Phase 1
- [28] <http://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=73764> (Consultado en junio de 2018)