



**Universidad Tecnológica Nacional  
Unidad Académica Mar del Plata**

**Energías Renovables Marinas.**

**Una alternativa sustentable para contribuir a la  
satisfacción de las futuras demandas energéticas.**

**Griselda Alejandra Carreras**

**Trabajo Final Integrador  
Especialización en Ingeniería Ambiental**

**Tutores: Mario Pelissero y Alejandro Haim**

Mar del Plata, 9 de diciembre de 2015

# **Energías Renovables Marinas. Una alternativa sustentable para contribuir a la satisfacción de las futuras demandas energéticas.**

*“Las energías renovables, inevitablemente dominarán el sistema de suministro de energía del mundo a la larga. La razón es a la vez muy simple y fundamental: No existe alternativa. La humanidad no puede basar su vida en el consumo de recursos energéticos finitos indefinidamente.”<sup>1</sup>*

*(European Renewable Energy Council, 2010,p.3)*

## **Resumen**

Los océanos constituyen una enorme fuente de energía, disponible en diversas formas: la diferencia de nivel entre pleamar y bajamar originada por las fuerzas gravitatorias de la Luna y del Sol; las corrientes generadas por mareas vientos, y diferencias de temperatura y salinidad; las olas, formadas por acción del viento; la diferencia de temperatura entre la superficie y las profundidades; la diferencia de potenciales químicos debidos a la diferencia de salinidad entre el agua de mar y el agua dulce de los ríos en las desembocaduras. Siendo todas estas, fuentes limpias, renovables, y con una gran densidad energética asociada a la densidad del agua, su aprovechamiento como reemplazo de fuentes fósiles y contaminantes significa un beneficio ambiental muy importante en términos de reducción de gases de efecto invernadero. La extracción de estas formas de energía marina está en desarrollo a nivel mundial en diferentes grados de maduración, a través de diversos proyectos piloto y de demostración, más algunos que han alcanzado el nivel operativo comercial. En el presente trabajo se describen los tipos de energías marinas renovables y las tecnologías desarrolladas para su aprovechamiento; se describen los sitios de interés, estudios y proyectos existentes en nuestro país y finalmente se exponen los principales aspectos ambientales a tener en cuenta en este tipo de proyectos.

**Palabras clave:** energías renovables, corrientes marinas, gradiente salino, mareomotriz, undimotriz, térmica oceánica.

---

<sup>1</sup> Traducción propia del texto original en inglés.

## Contenido

1. Introducción.....	5
2. Estado del conocimiento.....	8
2.1. Energía de las Mareas.....	9
2.1.1. El potencial energético de las mareas .....	9
2.1.2. Aprovechamiento de la energía mareomotriz.....	10
2.1.3. Los ciclos de funcionamiento de las centrales mareomotrices .....	11
2.1.4. Ventajas e inconvenientes.....	12
2.1.5. Realizaciones .....	13
2.2. Energía de las Corrientes Marinas.....	15
2.2.1. Aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas .....	16
2.2.2. Ventajas e inconvenientes.....	17
2.2.3. Realizaciones .....	18
2.3. Energía de las Olas.....	21
2.3.1. El potencial energético de las olas.....	22
2.3.2. Aprovechamiento de la energía de las olas .....	24
2.3.3. Principio de aprovechamiento de la energía de las olas .....	24
2.3.4. Técnicas de aprovechamiento de la energía de las olas.....	25
2.3.5. Clasificación de dispositivos convertidores de energía de las olas.....	26
2.3.6. Ventajas e inconvenientes.....	28
2.3.7. Realizaciones .....	28
2.4. Energía del Gradiente Térmico Oceánico .....	36
2.4.1. Principio de aprovechamiento.....	37
2.4.2. Ventajas e inconvenientes.....	40
2.4.3. Realizaciones .....	41
2.5. Energía del Gradiente Salino .....	45
2.5.1. El potencial energético del gradiente salino.....	46
2.5.2. Técnicas de aprovechamiento .....	49
2.5.3. Ventajas e inconvenientes.....	50
2.5.4. Realizaciones .....	51
3. Las energías marinas en Argentina. Sitios de interés, estudios y proyectos actuales..	54
3.1. Sitios de interés .....	55
3.2. Estudios y proyectos actuales.....	58

4. Aspectos Ambientales.....	63
4.1. Plantas mareomotrices.....	65
4.2. Dispositivos offshore (undimotriz y corrientes marinas) .....	66
4.3. Dispositivos onshore y nearshore (undimotriz) .....	69
4.4. Plantas OTEC.....	70
4.5. Plantas PRO y RED .....	72
5. Conclusiones .....	72
6. Referencias Bibliográficas .....	74

## **Glosario de Términos**

**EIA** – Evaluación de Impacto Ambiental. Environmental Impact Assessment.

**HDPE** – Polietileno de alta densidad. High-density polyethylene.

**GW** – Gigawatt ( $10^9$  Watts).

**kW** – Kilowatt ( $10^3$  Watts).

**MW** – Megawatt ( $10^6$  Watts).

**Nearshore** – Cerca de la costa.

**Offshore** – Mar adentro.

**Onshore** – En la costa.

**OTEC** – Conversión de Energía Térmica Oceánica. Ocean Thermal Energy Conversion.

**OWC** – Columna de Agua Oscilante. Oscillating Water Column.

**PRO** – Osmosis Retardada por Presión. Pressure Retarded Osmosis.

**RED** – Electrodiálisis Inversa. Reverse Electrodialysis.

**TW** - Terawatt ( $10^{12}$  Watts).

**TWh** – Terawatt-hora ( $10^{12}$  Watt-hora). Unidad de trabajo en términos de potencia x tiempo.

**TWh/a** – Terawatt-hora por año ( $10^{12}$  Watt-hora por año). Unidad de potencia en la que se expresa el trabajo en términos de potencia x tiempo. Un TWh por año o TWh/a es equivalente a 114.155.251 Watts (114 MW aproximadamente).

**W** – Watt. Unidad de potencia en el Sistema Internacional.

**WEC** – Convertidor de Energía de Olas. Wave Energy Converter.

## 1. Introducción

El consumo de energía, en grandes y crecientes cantidades, es lo que permitió alcanzar y sostener el estilo de vida moderno de una parte importante de la población mundial. Las sociedades desarrolladas, hacen un uso cada vez más intensivo de la energía y todo parece indicar que esta tendencia continuará dándose en el futuro de forma acelerada.

La transformación y el uso de la energía de origen fósil (principalmente carbón, petróleo y gas natural) son causa de una parte importante de los problemas ambientales que aquejan a la sociedad en la actualidad tanto a nivel local como regional y global (e.g. smog fotoquímico, lluvias ácidas, adelgazamiento de la capa de ozono, cambio climático, entre otros).

Actualmente, los combustibles fósiles siguen abasteciendo más del 80% de la demanda total de energía primaria. Más del 90% de las emisiones relacionadas con la energía consisten en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) proveniente de la utilización de combustibles fósiles. En el período 2000-2014, la contribución del carbón ha aumentado del 38% al 44% las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas con la energía. Asimismo, la participación del gas natural se mantuvo en 20% y la del petróleo disminuyó del 42% al 35%. Aunque de menor magnitud (y menos duraderos en la atmósfera, pero con mayor potencial de calentamiento global), el metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) son otros poderosos gases de efecto invernadero emitidos por el sector energético. El metano representa alrededor del 10% de las emisiones del sector de la energía y se libera principalmente en los procesos de extracción de petróleo y gas, la transformación y la distribución (International Energy Agency, 2015).

Los problemas de contaminación, ya sea por la importante emisión de gases de efecto invernadero o la imposibilidad de deshacerse de los residuos generados con otras tecnologías (e.g. nuclear), ha movilizó a gran parte de la humanidad a innovar en nuevas formas limpias y renovables de producir energía eléctrica. De esta forma, resurgen las energías renovables como respuesta a la demanda social para reducir las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes de acción directa.

En este contexto, en un planeta cubierto por un 75 por ciento de agua, los océanos constituyen una inmensa fuente de energía limpia, segura e inagotable, prácticamente sin explotar.

Los océanos albergan un enorme potencial energético que mediante diferentes tecnologías, puede ser transformado en electricidad y contribuir a satisfacer las necesidades energéticas actuales y futuras.

El potencial teórico mundial de energía oceánica renovable se ha estimado en más de 100.000 TWh por año (como referencia, el consumo de electricidad del mundo es de alrededor de 16.000 TWh por año). Se estima que el recurso mundial técnicamente explotable con la tecnología actual es: para la energía de las olas del orden de 45.000 TWh por año; para la energía de corriente de marea del orden de 2.200 TWh por año; para la energía del gradiente de salinidad del orden de 20.000 TWh por año y para la energía térmica oceánica del orden de 33.000 TWh por año (European Renewable Energy Council, 2010).

La energía procedente del mar está suscitando un renovado y gran interés en todo el mundo debido a diversos factores (políticos, económicos, sociales y estratégicos). Algunos gobiernos, investigadores, tecnólogos e inversores están convencidos del futuro de esta fuente de energía, ya que ofrece buenas perspectivas frente al agotamiento de las fuentes tradicionales, la necesidad imperiosa de reducir las emisiones de efecto invernadero y acrecentar la producción energética.

Es por ello que, actualmente la energía marina se ha convertido en un área estratégica para importantes compañías y organizaciones y están surgiendo en todo el mundo, multitud de desarrollos de distintas tecnologías para el aprovechamiento de este tipo de energías no convencionales; principalmente, de la energía de las olas y las corrientes.

Los países más implicados en el desarrollo de energías marinas son: el Reino Unido, Irlanda, Portugal, los países nórdicos y España, en Europa; India, China, Japón, Corea del Sur, Canadá y Estados Unidos en el resto del mundo. Todos estos países están desarrollando diversos sistemas, dispositivos y plantas de producción energética.

Este año (2015), la Comisión para el Medio Ambiente, Cambio Climático y Energía, del Comité de las Regiones (CoR) de la Unión Europea, aprobó por mayoría un proyecto de dictamen para desarrollar el potencial de la energía oceánica, el cual sería aprobado definitivamente en el plenario N° 114° en octubre del mismo año.

En el proyecto, la Comisión “subraya la importante contribución de la energía oceánica para satisfacer las futuras necesidades energéticas no solo de la Unión Europea, sino también a nivel mundial” (p.4). Asimismo estima que: de aquí a 2050, este tipo de energía podría satisfacer entre un 10 y un 15 % de la demanda energética de la UE (100 GW), alimentando así a 115 millones de hogares; podría aportar reducciones significativas en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes a 2,61 millones de toneladas de aquí a 2020 y a 136,3 millones de toneladas de aquí a 2050; se podrían crear en la UE, 26 000 empleos directos de aquí a 2020, y hasta medio millón de puestos de trabajo de aquí a 2050 (Unión Europea - Comité de las Regiones, 2015).

En la República Argentina, la matriz energética es altamente dependiente de los combustibles fósiles (87% en 2011), básicamente petróleo y gas, superando el 71% de la matriz regional y el 81% de la media mundial. A raíz de esta dependencia, nuestro país viene atravesando un período crítico desde el 2010 por haber perdido autonomía en materia de combustibles fósiles (las importaciones de esos combustibles superan a las exportaciones). La participación de los combustibles fósiles en la generación eléctrica también se ha ido incrementando en los últimos años, alcanzando el 66% del total, siendo el gas natural su principal componente. El sector eléctrico es clave para la incorporación de las nuevas fuentes de energías renovables, sin embargo, la participación de éstas apenas estaría cubriendo el 1,4% del total de la demanda eléctrica nacional (Villalonga, 2013).

Las proyecciones oficiales de demanda eléctrica muestran que hacia el año 2030 la potencia disponible del país deberá incrementarse en unos 1.500 MW anuales (Villalonga, 2013).

En cuanto a la incorporación de fuentes renovables a la matriz de generación el escenario gubernamental propone alcanzar un porcentaje acorde

a la Ley 26.190, un 8% al 2016, llegando sólo a un 9% de la generación hacia el 2030. "Tal objetivo (...) no es acorde a los abundantes recursos renovables disponibles ni a su conveniencia económica ni a la necesidad de sustituir combustibles escasos." (Villalonga, 2013, p.6).

Si se aprovecharan estos recursos en nuestro país, y en especial el potencial no explorado del extenso litoral marítimo, sería posible lograr el autoabastecimiento energético y además contribuir con el objetivo mundial de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

También debe considerarse el futuro potencial de nuestro país como exportador de energía.

El presente trabajo de investigación documental, tiene como objetivo presentar a las energías renovables marinas como una alternativa sustentable para contribuir en la satisfacción de las necesidades energéticas futuras de gran parte de la población mundial y de Argentina en particular.

Para el abordaje de dicho objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Relevar y describir los tipos de aprovechamiento de energías marinas renovables y el estado del conocimiento en cada uno de ellos.
2. Describir los sitios de interés, estudios y proyectos existentes para el aprovechamiento de las energías marinas renovables en nuestro país.
3. Exponer los principales aspectos ambientales que deben ser tenidos en cuenta para su análisis en los proyectos de aprovechamiento de las energías marinas renovables, en pos de prevenir y/o mitigar los potenciales impactos ambientales de las tecnologías a utilizar.

## **2. Estado del conocimiento**

El aprovechamiento de la energía del mar puede ser de cinco tipos: energía de las mareas (mareomotriz), energía de las corrientes marinas, energía de las olas (undimotriz), energía del gradiente térmico oceánico (mareomotérmica) y energía del gradiente salino (osmótica).

## 2.1. Energía de las Mareas

La energía de las mareas también se conoce como energía *mareomotriz* y para su conversión se aprovechan las fluctuaciones periódicas en el nivel de los océanos denominadas *mareas*.

Estas fluctuaciones son debidas a la interacción gravitatoria de la Tierra con la Luna principalmente y el Sol en menor medida (la Luna ejerce una atracción 2,2 veces la del Sol) y, al movimiento de rotación terrestre (aceleración de Coriolis) (Fernández Díez, s.f.a).

Las mareas constituyen las ondas más largas del océano, con longitudes de onda comparables con la longitud de la circunferencia terrestre en el Ecuador y períodos del orden de 12 a 24 horas. Las mayores mareas se producen cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados y se conocen como *mareas vivas* o *mareas de sicigias*; las mareas más reducidas o *mareas muertas* se producen cuando estos astros forman un ángulo de  $90^\circ$  (Fernández Díez, s.f.a).

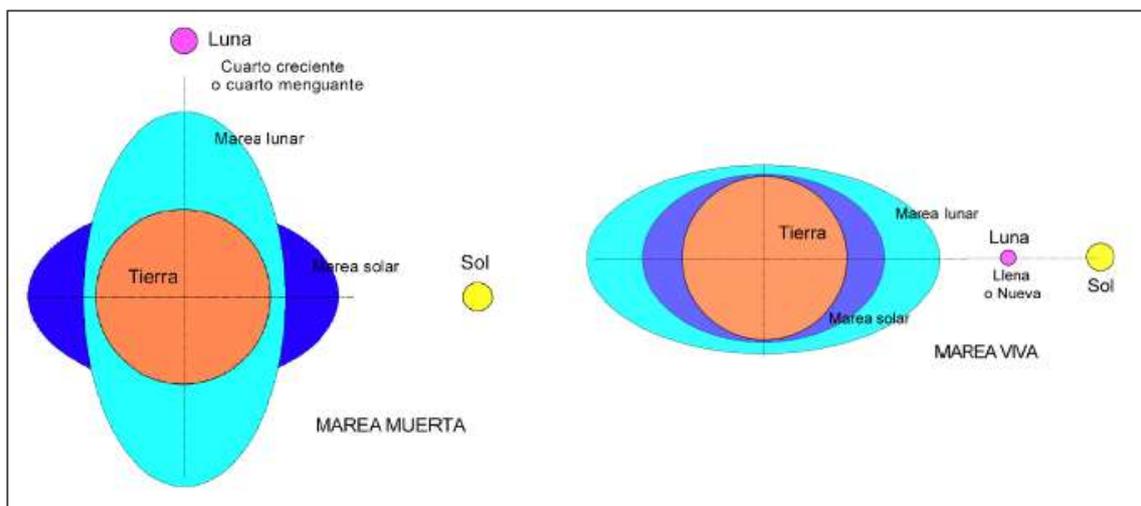


Figura 1. Mareas muertas y mareas vivas (Fernández Díez, s.f.a).

### 2.1.1. El potencial energético de las mareas

La diferencia entre el máximo nivel que alcanza el agua -denominado *pleamar*- y el mínimo nivel -denominado *bajamar*- constituye el potencial energético de la marea. Esta diferencia de nivel varía de un lugar a otro del

planeta y va desde unos pocos centímetros hasta varios metros (Nuñez Rivas, 2012).

El potencial global de energía mareomotriz se estima en alrededor de 3 TW, siendo no más de aproximadamente 1 TW la energía distribuida en zonas poco profundas y accesibles para las grandes obras de ingeniería civil en el mar (Centre for Renewable Energy Sources, 2006; Twidell & Weir, 2006; Charlier & Finkl, 2009).

### 2.1.2. Aprovechamiento de la energía mareomotriz

Para aprovechar la energía potencial de las mareas se requiere una amplitud de marea mínima de 5 metros, por lo que existe un número limitado de lugares en el mundo donde es posible su explotación. Además se necesita que exista una bahía, ría o estuario donde se pueda construir un dique que separe el estuario del mar. Este estuario debe ser lo suficientemente amplio para que la cantidad de agua a trasvasar durante las mareas sea grande (Fernández Díez, s.f.a).

En la Fig. 2 se indican algunas regiones con importantes amplitudes de mareas.

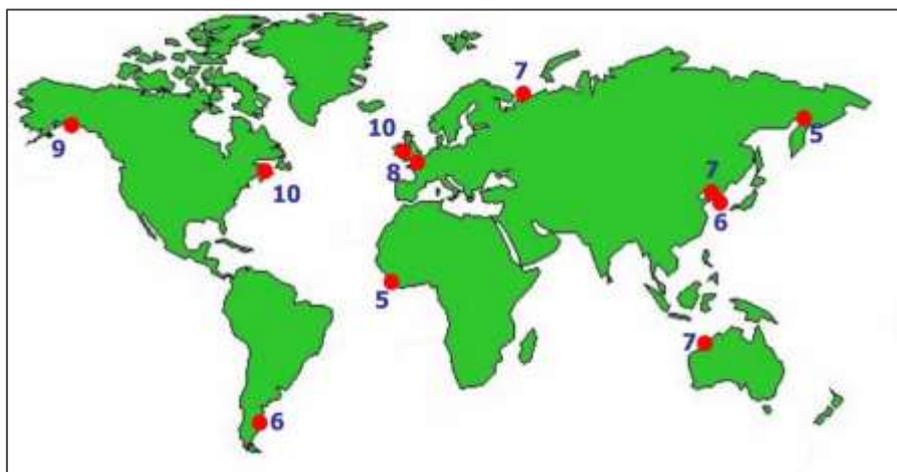


Figura 2. Media anual de la amplitud de marea en metros (Centre for Renewable Energy Sources, 2006)

La tecnología necesaria para convertir la energía potencial de las mareas en electricidad es similar a la tecnología utilizada en centrales hidroeléctricas

tradicionales. Se construye una presa o barrera a través de una bahía o estuario y se instalan compuertas y turbinas en ciertos puntos a lo largo de la presa. Cuando hay una diferencia adecuada en el nivel del agua en los diferentes lados de la presa, se abren las compuertas y la presión hidrostática que se crea, hace que el agua fluya a través de las turbinas, convirtiéndose en un generador eléctrico (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

La energía potencial de los emplazamientos de energía mareomotriz fue calculada por Mosonyi en 1963, Gibrat en 1964 y Bernshtein en 1965 conduciendo a la expresión matemática

$$E_p = K 10^6 A R^2$$

donde  $E_p$  es la energía potencial (en kW / h / año),  $A$  es el área del embalse (en  $\text{km}^2$ ),  $R$  es el rango promedio (en metros) de la marea equinoccial, y  $K$  es un coeficiente que varía entre 1,92 y 1,97. Se introduce un factor de utilización en base al sistema seleccionado: para una planta de simple o doble embalse y una sola marea es 0.224, marea doble 0.34 y 0.21 para un doble embalse; para un doble embalse, marea individual con reverso de bombeo es 0,277 y con bombas de 0.234 (Charlier & Finkl, 2009).

### 2.1.3. Los ciclos de funcionamiento de las centrales mareomotrices

A continuación se resumen los distintos ciclos posibles para el funcionamiento de las centrales mareomotrices, extraído de Fernández Díez (s.f.a).

**Ciclos con turbinas de simple efecto:** se dispone de un único embalse y dos posibles modos de operación: (a) *generación durante el refluo de la marea (bajamar)*, donde el llenado del embalse se realiza con las compuertas abiertas y el vaciado con turbinación (solo se genera energía durante dos períodos al día, resultando, entre 10 a 12 horas diarias de generación); (b) *generación durante el flujo (pleamar)*, donde el llenado del embalse se realiza con turbinación y el vaciado con las compuertas abiertas (tiene tiempos de generación menores, del orden de 4 a 5 horas, con tiempos de espera de 3 horas, resultando entre 8 y 10 horas diarias de generación). La generación de energía se realiza solo durante

la bajamar, vaciándose el embalse, o sólo durante la pleamar, llenándose el embalse.

**Ciclos con turbinas de doble efecto:** la generación de energía se realiza con ambas mareas. Para ello, se requieren turbinas capaces de operar en ambas direcciones del flujo de agua. Las diferencias de niveles entre el embalse y el mar son menores resultando la energía utilizable menor que en los ciclos de simple efecto. No obstante, el factor de utilización de la planta es mayor obteniéndose un 18% más de energía que en los casos de simple efecto. Los tiempos de funcionamiento por marea son del orden de 6 a 7 horas con tiempos de espera de entre 2 y 3 horas, lo que resulta en 12 a 14 horas diarias de generación de energía.

**Ciclos de acumulación por bombeo:** la generación de energía se produce durante ambas mareas y además disponen de almacenamiento por bombeo. Las turbinas deben ser capaces de funcionar también como bombas, de manera que cuando el nivel del mar sea cercano al del embalse, el llenado de este se puede acelerar e incrementar bombeando agua de mar. Este sistema permite que durante el reflujos las turbinas funcionen con más carga y durante más tiempo, pudiendo alcanzar hasta un 10% de aumento en la generación.

**Ciclos múltiples:** utilizarían varios embalses para generar energía con mayor continuidad a lo largo del día. Las centrales de este tipo requieren una obra civil muy costosa, lo que las ha hecho prácticamente inviables (ninguno de los proyectos fue materializado).

#### **2.1.4. Ventajas e inconvenientes**

Si bien esta fuente de energía tiene la ventaja de ser absolutamente predecible, tiene como desventajas el alto costo de instalación y mantenimiento, así como un alto impacto ambiental (Nuñez Rivas, 2012).

La operación de la planta es intermitente debido a que suele haber un período de receso, incluso de hasta 3 horas, hasta que verdaderamente se alcance una diferencia de cotas lo suficientemente amplia como para que sea justificada la turbinación. La generación diaria de energía eléctrica es de

alrededor de 10 o 12 horas, que además van variando cada día. Esto último es importante, ya que la generación de energía no se puede realizar necesariamente en aquellos momentos en los que la demanda de electricidad sea mayor, sino que según se produce se tiene que verter a la red.

### 2.1.5. Realizaciones

Muchos sitios han sido estudiados, muchas plantas se han proyectado y muchos proyectos fueron abandonados. Se han construido muchas plantas experimentales alrededor del mundo, pero muy pocos proyectos grandes se pudieron llevar a cabo. A continuación se describen brevemente las dos centrales maremotrices más grandes del mundo que fueron construidas y están actualmente operativas.

**Central del Rance en Francia:** fue la primera gran central mareomotriz construida para la producción comercial de energía eléctrica. Se construyó en el estuario de Rance, Francia, en 1967 (ver Fig. 3). La potencia instalada es de 240MW, un caudal de 20.000 m<sup>3</sup>/s, un salto de agua de 8 metros y una superficie de agua embalsada de 17 km<sup>2</sup> (Jara Tirapegui, 2006).

Funciona con un ciclo de doble efecto con acumulación por bombeo. Consta de 24 turbinas bulbo axiales (diseñadas para funcionar en los dos sentidos de marea) de 10 MW cada una. El dique tiene 700 m de largo, 24 m de ancho y 27 m de alto, consta de seis compuertas de 15 m de longitud y 10 m de altura. Una esclusa para barcos pequeños comunica el mar con el embalse. Los generadores eléctricos, turbinas, máquinas auxiliares, talleres de reparación y salas para el personal, están ubicados entre los muros del dique (ver Fig. 4) (Fernández Díez, s.f.a).



Figura 3. Central mareomotriz de Rance, Francia (Jara Tirapegui, 2006).

Encima de la presa se construyó una carretera de dos carriles. El costo aproximado de construcción de la central fue de cien millones de dólares

(Charlier & Finkl, 2009). Sus gastos de explotación anuales en 175 eran competitivos con los de las plantas hidroeléctricas convencionales. (Fernández Díez, s.f.a).

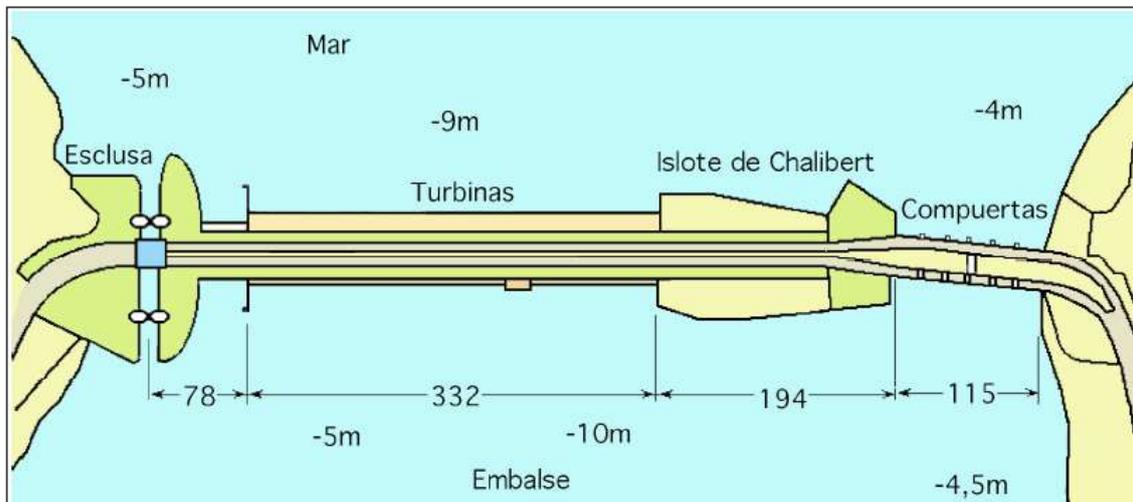


Figura 4. Dique de la central mareomotriz de Rance (Fernández Díez, s.f.a).

La energía neta generada anual es del orden de 550 GWh (deducida la energía consumida en el bombeo de 65 GWh), de los cuales 500 GWh son en turbinaje directo y 50 GWh en turbinaje inverso. Esta cantidad de energía equivale a 300.000 barriles de petróleo (Fernández Díez, s.f.a).

**Central del Lago Sihwa en Corea del Sur** (Korea Water Resources Corporation, 2015): con una capacidad de producción de 254MW, situada en el lago Sihwa, cerca del Puerto de Incheon en Corea del Sur, es la central mareomotriz más grande del mundo. La capacidad de generación anual de la instalación es 552.7 GWh.



Figura 5. Ubicación de la central de Rance (Fernández Díez, s.f.a).

El proyecto, propiedad de Korea Water Resources Corporation, costó aproximadamente 355 millones de dólares, fue construido entre 2003 y 2010 e inaugurado en agosto de 2011. Los objetivos del proyecto eran: la generación de energía limpia equivalente a 862.000 barriles de petróleo anuales reduciendo las

emisiones de CO<sub>2</sub> en 315.000 toneladas anuales; mejorar la calidad del agua del lago Sihwa mediante el intercambio de agua de mar.



Figura 6. Central Mareomotriz del Lago Sihwa en Corea del Sur (Korea Water Resources Corporation, 2015)

Se utilizó un dique de 12,5 km construido en 1994 para la mitigación de inundaciones y la agricultura. La generación es del tipo simple efecto durante los flujos de las mareas hacia el embalse de 30 km<sup>2</sup> con diez turbinas bulbo 25.4 MW sumergidas. Se utilizan ocho compuertas para la salida de agua desde el dique.

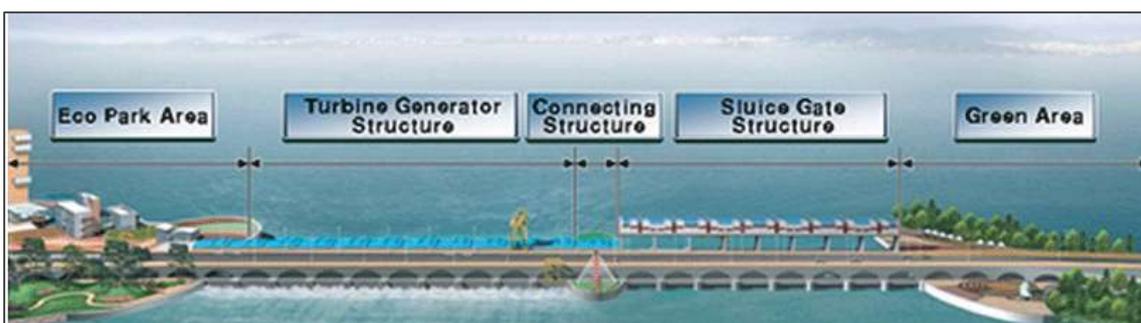


Figura 7. Diseño estructural de la central mareomotriz del Lago Sihwa en Corea del Sur<sup>1</sup> (Korea Water Resources Corporation, 2015).

## 2.2. Energía de las Corrientes Marinas

Las corrientes de marea son movimientos de agua más o menos horizontales asociados a la subida y bajada de las mareas. Por lo tanto, además

de la energía potencial de una marea, existe la energía de la corriente de marea que es la energía cinética de las partículas de agua en una marea. Las corrientes de marea tienen las mismas periodicidades que las oscilaciones verticales, siendo por lo tanto predecible, pero normalmente no implican un simple movimiento de ida y vuelta, sino que tienden a seguir una trayectoria elíptica. Las corrientes también son generadas por los vientos y las diferencias de temperatura y salinidad. (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

Cuando las corrientes marinas se canalizan a través de una topografía restringida, como estrechos entre islas, se pueden producir velocidades de agua muy altas (2 a 3 m/s o más) (Centre for Renewable Energy Sources, 2006). Estas corrientes poseen una alta capacidad energética, debido a que el agua de mar tiene una densidad promedio de  $1.015 \text{ Kg/m}^3$ , lo cual implica que una corriente marina a una velocidad de 2 m/s posee por cada  $\text{m}^2$  de área perpendicular a su flujo, la misma energía que una corriente eólica de 18 m/s. (Nuñez Rivas, 2012).

### 2.2.1. Aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas

El principio de captación se basa en convertidores de energía cinética similar a los generadores eólicos, pero en este caso, las instalaciones son submarinas. La potencia media por unidad de área es proporcional a  $\rho c^3$ , siendo  $\rho$  la densidad del agua y  $c$  la velocidad. (Fernández Díez, s.f.b).

Al igual que en el aprovechamiento de energía eólica, se utilizan dos tipos de rotores: **rotores axiales** (tipo hélice, de eje horizontal) y **rotores de flujo cruzado** (de eje vertical), ver Fig. 8.

Existen dos tendencias para la colocación de las turbinas: (a) sobre el lecho marino, se utiliza preferentemente en aguas poco profundas (20-30 m); (b) sobre un sistema flotante amarrado, se utiliza tanto en

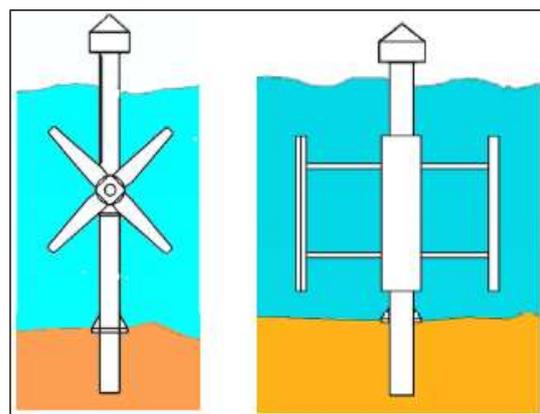


Figura 8. Rotores axial y de flujo cruzado (Fernández Díez, s.f.b).

aguas poco profundas como en profundidades de hasta 50 m. Ver Fig. 9. La energía extraíble es función del diámetro del rotor de la turbina y de la velocidad de las corrientes. (Fernández Díez, s.f.b).

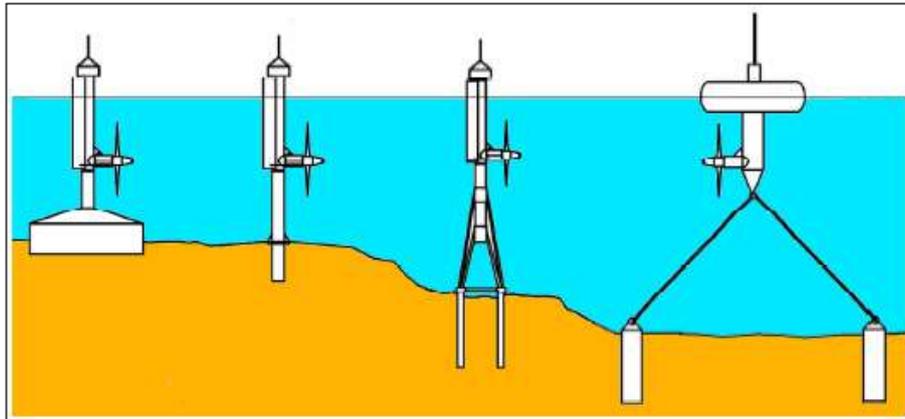


Fig. 9. Estructuras soporte para instalación de turbinas de corrientes marinas (Fernández Díez, s.f.b).

**Turbinas en conductos:** los conductos son estructuras fijas colocadas alrededor de la parte exterior de un rotor para aumentar su potencial. La compacidad de las turbinas marinas hace que sea fácil introducir este tipo de dispositivo. Estos conductos crean un efecto de embudo que aumenta la tasa de flujo a través del rotor. El arrastre ejercido por el fluido sobre el conducto resulta en una despresurización mientras el flujo sale, lo que conduce a un fenómeno de aspiración. (Multon, 2012).

Otras ventajas de las turbinas en conductos son: el conducto impide la incidencia de la luz solar sobre la turbina, reduciendo el crecimiento de algas; el conducto mejora la eficacia al eliminar las pérdidas en los extremos de las palas. (Fernández Díez, s.f.b).

**Sistemas oscilantes:** otros dispositivos propuestos, utilizan un movimiento oscilante (generalmente de un plano en forma de ala de avión, a través de la fuerza de sustentación hidrodinámica) en lugar de la rotación para capturar la energía del flujo de marea.

### 2.2.2. Ventajas e inconvenientes

Entre las ventajas del aprovechamiento de las corrientes marinas, Fernández Díez (s.f.b) menciona: la predictibilidad de su disponibilidad; factores

de capacidad del doble de otras fuentes renovables intermitentes (del orden del 40 al 60%); impacto ambiental reducido al no producir contaminación visual, ni polución o ruido ya que las turbinas son lo suficientemente lentas y no afectan la vida marina; inmunidad a las tormentas (al contrario que los sistemas onshore y los undimotrices) ya que las condiciones bajo el agua durante una tormenta son relativamente benignas.

En contraste con los flujos de aire atmosféricos, la disponibilidad de las corrientes marinas se puede predecir con mucha precisión, ya que su movimiento se sincronizará con las condiciones de marea locales. Otra ventaja es la densidad del agua, de unas 850 veces mayor que la del aire, lo que produce que la intensidad de la potencia en las corrientes de agua sea significativamente mayor que en los flujos de aire. En consecuencia, una turbina de corriente de agua se puede construir considerablemente más pequeña que una turbina de energía eólica equivalente (Centre for Renewable Energy Sources, 2006). Ver Fig. 10.

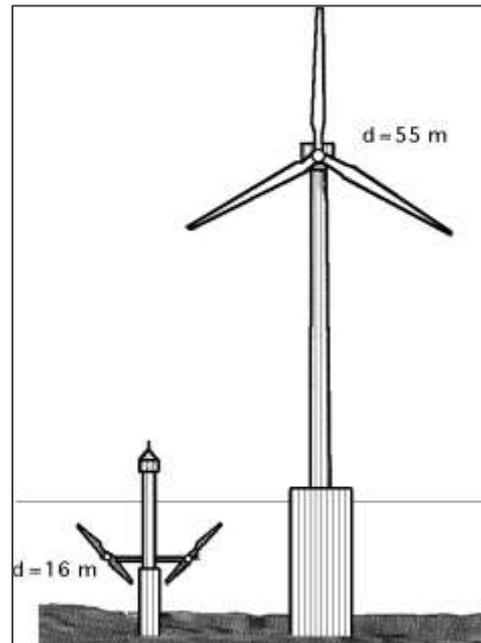


Figura 10. Comparación entre una turbina de corrientes marinas y un aerogenerador para obtener 1 MW. (Fernández Díez, s.f.b).

Como inconvenientes tenemos que los dispositivos totalmente sumergidos, están sujetos a los efectos corrosivos del agua de mar, lo que conlleva altos costos de materiales y construcción. Además, el mantenimiento es difícil, porque se necesitan buzos para acceder a la maquinaria sumergida (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

Un inconveniente importante es el impacto para la navegación, ya que las mejores corrientes se encuentran en zonas de gran tránsito marino, tales como estrechos o desembocaduras de ríos. (Fernández Díez, s.f.b).

### 2.2.3. Realizaciones

En la década del 80 se desarrollaron y probaron las primeras turbinas para el aprovechamiento de corrientes marinas y desde entonces se han propuesto y desarrollado gran cantidad de diseños. Describir todas las turbinas desarrolladas y todos los proyectos realizados y en desarrollo, escapa del alcance de este trabajo por ser estos muy numerosos. Un amplio panorama puede consultarse en Fernández Díez (s.f.b) o en el catálogo realizado en 2014 por el Grupo de Interés en Energías del Mar Argentino (GEMA).

A continuación se describen brevemente cuatro de los proyectos más importantes.

**Proyecto Seaflow (Devon, Reino Unido):** en el estuario del Severn, Lymouth, donde las corrientes marinas alcanzan una velocidad aproximada de 2,5 m/s, en 2003 se instaló una turbina de flujo axial bipala de 300 kW. La turbina de 11 m de diámetro fue montada en una torre anclada al fondo marino. El buje del rotor puede orientarse 360° alrededor de la torre en que está



Figura 11. Proyecto Seaflow en el Estuario de Severn, Lymouth (Devon-UK) (Fernández Díez, s.f.b).

sujeto para estar siempre frontal a la corriente y para las operaciones de mantenimiento es ascendido a la superficie (ver fig. 11). Se consiguieron eficiencias del 40%. (Fernández Díez, s.f.b).

**Proyecto Seagen S (Strangford Lough, Irlanda):** iniciado en 2006, es la segunda fase del proyecto Seaflow. En 2008 se instaló en Strangford, Irlanda, un generador de dos hélices bipala de 16 m de diámetro (ver Fig. 12). Al igual que su antecesor, para tareas de mantenimiento puede ser subido a la superficie. El sistema de 1,2 MW es capaz de entregar hasta 20MWh de energía eléctrica por día en Strangford (6.000 MWh por año). Esto es aproximadamente la tasa

de captación de energía de una turbina eólica de 2,4 MW. (Marine Current Turbines Ltd (MCT), s.f.).

**Proyecto Stingray (Islas Shetland, Escocia, Reino Unido):** en 2002, Engineering Bussines Ltd., instala el prototipo denominado Stingray (ver Fig. 13), de 150 kW con corrientes de 2 m/s, en Yell Sound cerca de las islas Shetland, Escocia.

El componente clave del Stingray es el hidropelano en forma de ala unido a un bastidor de soporte por un brazo móvil (ver Fig. 14). Cuando las corrientes marinas pasan por encima del hidropelano, las fuerzas de sustentación y arrastre,

hacen que el hidropelano se eleve. Cilindros accionados hidráulicamente se utilizan para alterar el ángulo del hidropelano tal que el ángulo aparente de ataque, en relación con la corriente en sentido contrario, se mantiene en su ángulo óptimo. Cuando la corriente eleva el hidropelano, hace que el brazo se levante, accionando los cilindros hidráulicos en la unión del brazo y el marco. El aceite a alta presión se convierte en un motor hidráulico que, a su vez, acciona un generador eléctrico. Cuando el hidropelano, y el brazo, alcanzan su límite superior, el ángulo de hidropelano se invierte de tal manera que el brazo es impulsado hacia abajo, y el ciclo se repite. (Business Engineering Ltd., 2005).

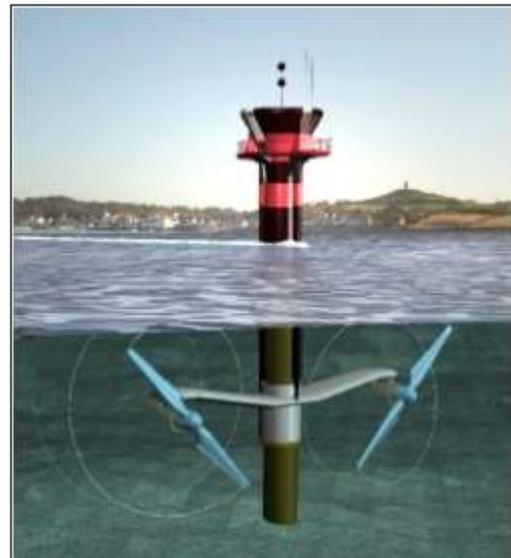


Figura 12. Proyecto Seagen S en Strangford Lough, Irlanda. (Fernández Díez, s.f.b).

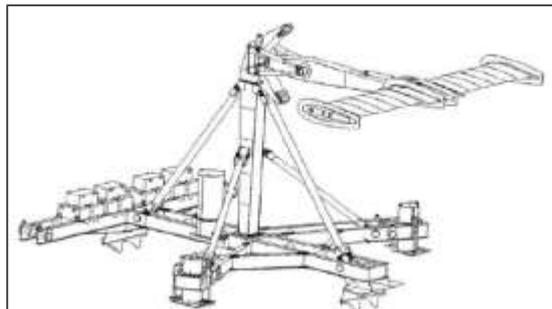


Figura 13. Primera generación de Stingray (Fernández Díez, s.f.b).



Figura 14. Stingray, Disposición General (Business Engineering Ltd., 2005).

A partir de los resultados obtenidos, la empresa emprendió el desarrollo una segunda generación de Stingray con tres hidroplanos capaz de proporcionar 500 kW.

**Granja de turbinas marinas (Paimpol-Brehat, Francia):** en la costa de Paimpol-Brehat, Bretaña del Norte, Francia, Electricite de France (EDF) está construyendo, desde el 2008, la primera granja de turbinas marinas del mundo. El costo del proyecto se estima en € 40.000.000 y la energía generada será capaz de servir a 4.000 hogares. La granja consiste de cuatro turbinas L'Arcouest desarrolladas por OpenHydro de 2 MW cada una (ver Fig. 15), las que se colocarán en el lecho marino a 35 m de profundidad. Cada turbina mide 22 m de altura, 22 m de diámetro y pesa 850 toneladas, incluyendo las unidades de cimentación. Las pruebas en el mar de la primera turbina se han completado y la construcción de las otras tres turbinas está en curso. (Power Technology, s.f.a).



Figura 15. Turbina L'Arcouest de OpenHydro (Power Tecnología, s.f.a).

### 2.3. Energía de las Olas

Las olas son producto de un conjunto de fuerzas perturbadoras de diversos orígenes (acción de los vientos, terremotos y tormentas, atracción gravitatoria del Sol, la Luna y la Tierra, fuerza de Coriolis, tensión superficial, etc).

Las olas debidas al viento son las que contienen más energía y su intensidad depende de la intensidad del viento, de su duración y de la longitud sobre la cual éste transmite energía a la ola. En el sitio donde sopla el viento se generan olas confusas, sin una dirección definida, aunque generalmente haya una predominante. Cuando las olas abandonan la zona donde sopla el viento se propagan a una velocidad, que es función de su longitud de onda (distancia entre dos olas consecutivas). Las olas se trasladan, pero no así las partículas de agua,

las cuales se mueven en trayectorias elípticas o circulares. (Fernández Díez, s.f.c).

Las olas debidas al viento pueden viajar miles de kilómetros con poca pérdida de energía, a menos que encuentren vientos en contra. Cerca de la costa la intensidad de energía de las olas disminuye debido a la interacción con el fondo marino. Esta disipación de energía puede ser compensada por fenómenos naturales como la refracción o la reflexión, produciendo concentración de energía (“puntos calientes”). (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

### 2.3.1. El potencial energético de las olas

Las olas incluyen dos formas de energía: la energía cinética de las partículas de agua, que en general siguen trayectorias circulares; y la energía potencial de la elevación de las partículas de agua. En promedio, la energía cinética de una ola lineal es igual a su energía potencial. (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

La mayor actividad de las olas se encuentra alrededor de las latitudes de  $\sim 30^\circ$  y  $\sim 60^\circ$  en ambos hemisferios, inducida por los vientos predominantes del oeste que soplan en estas regiones. Recursos particularmente altos se encuentran a lo largo de la costa de Europa occidental, frente a las costas de

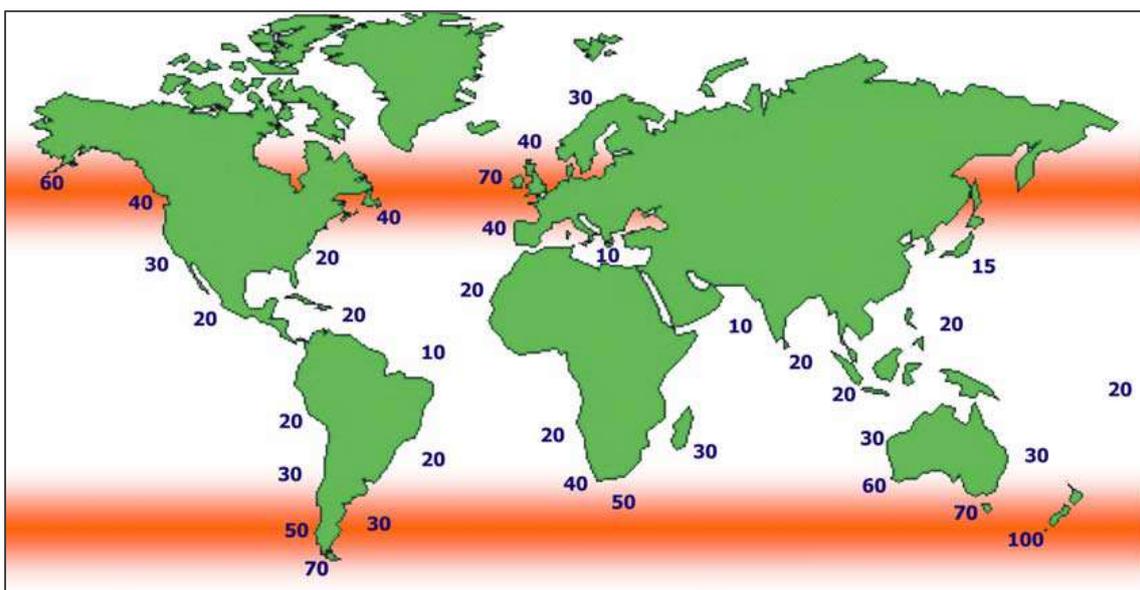


Figura 16. Distribución media anual mundial de la energía de las olas en mar abierto, en kW/m de frente de ola. (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

Canadá y los EE.UU. y las costas del sur de Australia y América del Sur (ver Fig. 16). (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

La energía total de una onda depende principalmente de dos factores: su altura (H) y su periodo (T). La potencia transportada por la onda es proporcional a  $H^2$  y T, y por lo general se da en watts por metro de frente de onda incidente (W/m). (Cruz, 2008).

La energía de las olas, expresada en watts por metro de frente de onda (W/m), es el flujo de energía que pasa a través de una superficie perpendicular a la dirección de propagación de las ondas por unidad de tiempo. Para determinar este flujo de energía,

es útil calcular la energía mecánica de una columna vertical de agua que tiene una base de área de superficie unitaria, y luego multiplicarla por la velocidad de la ola. La energía mecánica de una columna de agua es la suma de su energía

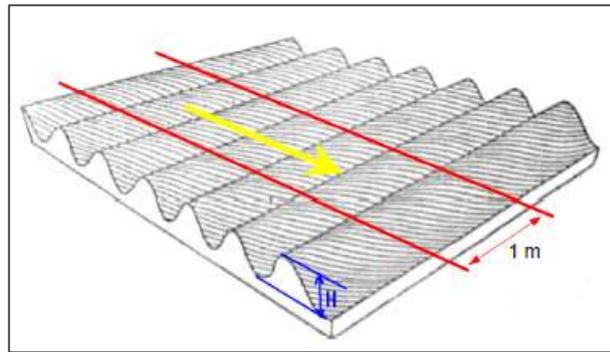


Figura 17. Dimensiones de una ola. (Benalia *et al.*, 2010).

potencial y cinética. Se ha demostrado que el valor promedio de estos dos tipos de energía son iguales, y para el caso de una onda sinusoidal es (Multon, 2012):

$$\langle E_k(t) \rangle = \langle E_p(t) \rangle = \frac{E_m}{2} = \frac{\rho_w g H^2}{16}$$

donde  $\rho_w$  es la densidad del agua de mar (depende de la salinidad,  $\approx 1,025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), g es la gravedad y H es la altura desde la cresta al valle de la deformación. Cuando la profundidad del agua es infinita, la velocidad de propagación de la ola puede expresarse como:

$$v_g(T) = \frac{gT}{4\pi}$$

donde T es el período de la onda sinusoidal.

La potencia por metro de frente de onda de una ola sinusoidal es por lo tanto igual a:

$$P_w = E_m v_g = \frac{\rho_w g^2}{32\pi} H^2 T \approx 980 H^2 T \text{ (W } m^{-1}\text{)}$$

### 2.3.2. Aprovechamiento de la energía de las olas

Aunque la primera patente data de 1799, la investigación de la energía undimotriz se intensificó durante la década de 1970, especialmente en el Reino Unido (Cruz, 2008). Actualmente, en todo el mundo existen más de 1.000 técnicas de conversión de energía de las olas patentadas.

Un trabajo pionero se llevó a cabo en Japón, en la década de 1960, cuando la armada japonesa construyó una boya de señalización, la cual utilizaba la energía de las olas para hacer funcionar su lámpara. (Cruz, 2008).

El punto de inflexión que estimuló la investigación en varios países fue en 1974 cuando un artículo escrito por el Prof. Stephen Salter, de la Universidad de Edimburgo, fue publicado en la ampliamente leída revista científica Nature. Fue visto como una respuesta directa a la crisis del petróleo de la década de 1970, y la atracción hacia la energía de las olas fue inmediata. El concepto, un cuerpo flotante en forma de leva conocido como el *pato Salter*, sigue siendo reconocido como uno de los más eficientes en la absorción de la energía de las olas. (Cruz, 2008).

### 2.3.3. Principio de aprovechamiento de la energía de las olas

La **conversión primaria** de energía de las olas se consigue mediante un sistema oscilante (un cuerpo flotante, un elemento sólido oscilante o agua oscilante dentro de una estructura), el cual es capaz de almacenar una cierta energía cinética y/o potencial. (Brooke, 2003).

El fenómeno de la conversión primaria de energía de las olas puede ser descrito como sigue. La fuerza del oleaje actúa sobre un elemento móvil de absorción, que reacciona contra un punto fijo (tierra o estructura fija en el lecho

marino), o en contra de otro elemento móvil, pero de estructura resistente. La fuerza del oleaje es convertida en movimiento oscilatorio del elemento de absorción. (Brooke, 2003).

Los *sistemas activos* son aquellos en los que los elementos del dispositivo, al ser movidos por el oleaje, generan energía aprovechando el movimiento relativo entre sus partes fijas y móviles. Los *sistemas pasivos* son aquellos en los que la estructura permanece inmóvil y la energía es generada a partir del movimiento de las partículas de agua. (Fernández Díez, s.f.d).

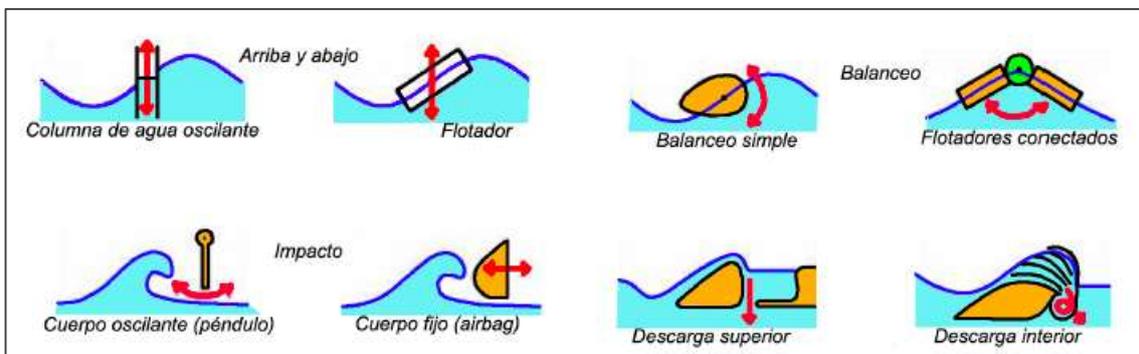


Figura 18. Tipos de movimientos provocados por las olas. (Fernández Díez, s.f.d).

La **conversión secundaria** consiste en la conversión de los movimientos mecánicos o neumáticos en energía útil (generalmente electricidad) mediante turbinas neumáticas e hidráulicas, dispositivos de transmisión mecánica, y de inducción magnética. (Fernández Díez, s.f.d).

#### 2.3.4. Técnicas de aprovechamiento de la energía de las olas

Las técnicas para captar la energía del oleaje aprovechan tres fenómenos básicos que se producen en las olas (Fernández Díez, s.f.d):

**Empuje de la ola.** Dado que en aguas poco profundas la velocidad horizontal no varía con la profundidad, la energía de las olas puede ser absorbida mediante un obstáculo que transmita la energía a un pistón, ver Fig. 19. Este es el sistema menos usado.

**Variación de la altura de la superficie de la ola.** Se colocan estructuras flotantes que se mueven con las olas, sintonizadas de manera que puedan captar su energía, ver Fig. 20.

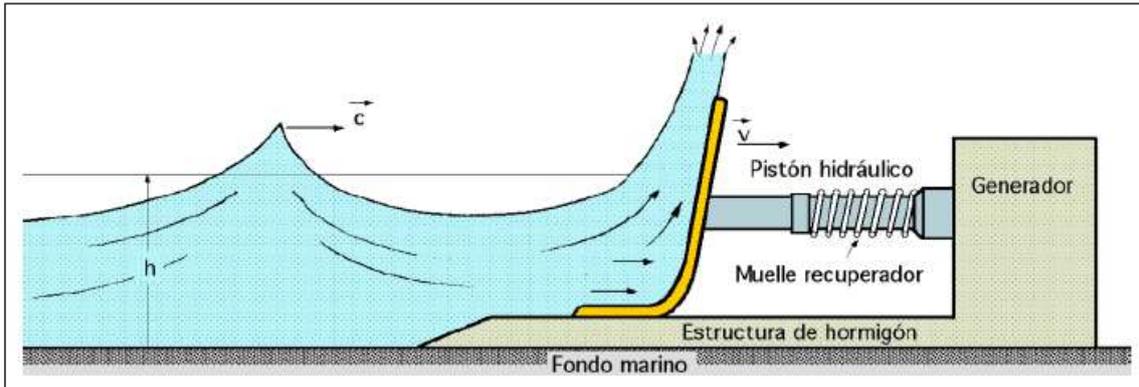


Figura 19. Aprovechamiento del empuje de la ola. (Fernández Díez, s.f.d).

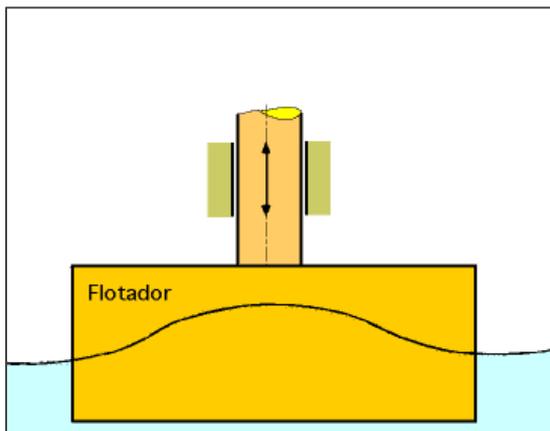


Figura 20. Aprovechamiento de la variación de la altura de la superficie de la ola. (Fernández Díez, s.f.d).

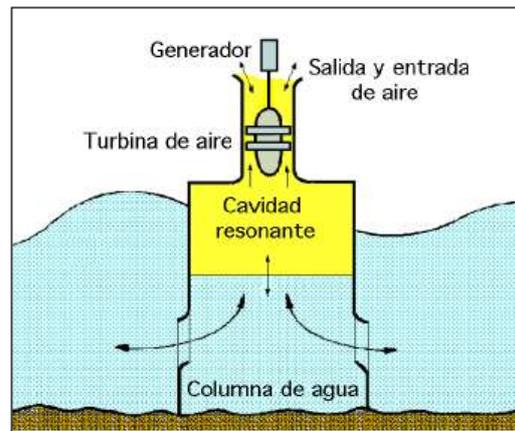


Figura 21. Columna de agua oscilante (OWC). (Fernández Díez, s.f.d).

**Variación de la presión bajo la superficie de la ola.** Son los sistemas de columna de agua oscilante (OWC<sup>2</sup>). Consisten en una cámara abierta al mar, que encierra un volumen de aire, el cual se comprime y expande por la oscilación del agua inducida por el oleaje. El aire circula a través de una turbina que puede ser bidireccional. Ver Fig. 21.

La tecnología OWC ha encontrado aplicación comercial en boyas de navegación y en numerosas plantas de demostración construidas en India, China, Noruega, Japón, Portugal y en el Reino Unido. (Heath, 2008).

### 2.3.5. Clasificación de dispositivos convertidores de energía de las olas

<sup>2</sup> Por sus siglas en inglés: Oscillating Water Column.

Los convertidores de energía de las olas (WEC<sup>3</sup>) pueden clasificarse de diversas maneras (Brooke, 2003):

**Según su tamaño.** Si el tamaño es muy pequeño comparado con la longitud de onda típica, el WEC se llama **absorbedor puntual**. Por el contrario, si la extensión es comparable o mayor que la longitud de onda típica, el WEC se denomina un **absorbedor lineal**.

**Según su orientación horizontal.** Se denomina **terminador** al WEC que está alineado a la dirección predominante de crestas de olas y **atenuador** al que está normal a la misma.

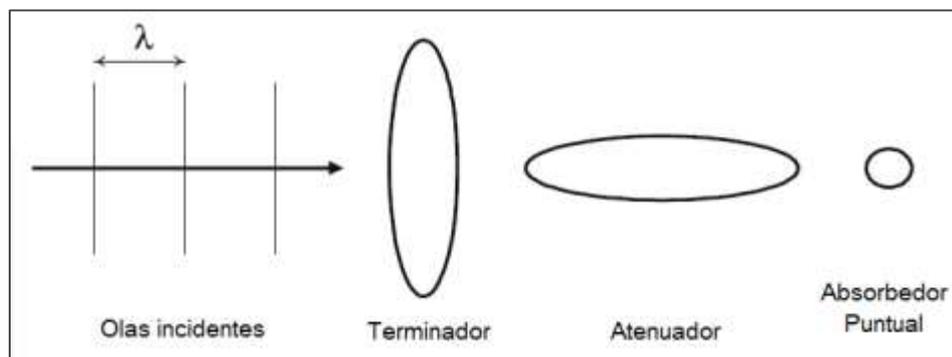


Figura 22. Escala y orientación de un terminador, un atenuador y un absorbedor puntual. (Thomas, 2008).

**Según su ubicación relativa a la costa.** Pueden estar situados en la costa (*onshore*), cerca de la costa (*nearshore*) o lejos de la costa en mar abierto (*offshore*).

**Según su ubicación relativa al agua.** Parcialmente sumergidos o completamente sumergidos; fijados sobre el lecho marino o amarrado al fondo en una posición flotante.

**Según el modo de movimiento oscilatorio para la absorción de energía.** Movimiento vertical; movimiento horizontal en la dirección de desplazamiento de onda; movimiento angular alrededor de un eje paralelo a las crestas de onda; movimiento angular alrededor de un eje vertical; o alguna combinación de estos modos.

<sup>3</sup> Por sus siglas en inglés: Wave Energy Converter.

**Según el tipo de absorbedor.** Los absorbedores pueden ser fabricados de material rígido o flexible, o puede ser la superficie libre del agua misma.

**Según el tipo de punto de reacción.** Los puntos de reacción pueden ser masas inerciales (placas suspendidas, boyas), anclas en el fondo marino (peso muerto) o estructuras fijas (plataformas de hormigón o tierra).

### **2.3.6. Ventajas e inconvenientes**

Una de las ventajas importantes de las tecnologías de aprovechamiento de la energía de las olas es su compatibilidad medioambiental ya que generalmente está libre de emisiones contaminantes. Además, el bajo impacto visual y acústico, en particular de los dispositivos offshore o sumergidos, es una gran ventaja sobre por ejemplo, la energía eólica o la fotovoltaica (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

Para Barstow *et al.* (2008) las ventajas principales radican en que se trata de una forma de energía de alta calidad -la energía mecánica de oscilación- y que las olas pueden viajar largas distancias con poca pérdida, por lo que las pequeñas producciones sobre un gran océano pueden acumularse y ser cosechadas en o cerca de la costa. Otra ventaja es el efecto antena, que permite, extraer energía de una fracción de una longitud de onda a cada lado del dispositivo; esto hace que los dispositivos puedan ser pequeños, con capacidades del orden de 1 MW, lo cual es relativamente atractivo.

Uno de los principales inconvenientes es que los WECs tienen que ser diseñados para soportar condiciones de tormentas donde las olas son extremas. (Fernández Díez, s.f.d).

### **2.3.7. Realizaciones**

A continuación se exponen solo seis de los proyectos más importantes pero pueden consultarse otros numerosos proyectos de importancia en Fernández Díez (s.f. d y e) o en el catálogo realizado por el GEMA (2014).

**Planta OWC LIMPET<sup>4</sup> (Isla de Islay, Escocia, Reino Unido):** la planta instalada en la isla de Islay, en la costa oeste de Escocia, entró en funcionamiento en el año 2000. La columna de agua oscilante alimenta un par de turbinas Wells cada una de las cuales acciona un generador de 250 kW, dando un valor nominal de 500kW. (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).



Figura 23. Planta LIMPET OWC en Islay, Escocia. (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

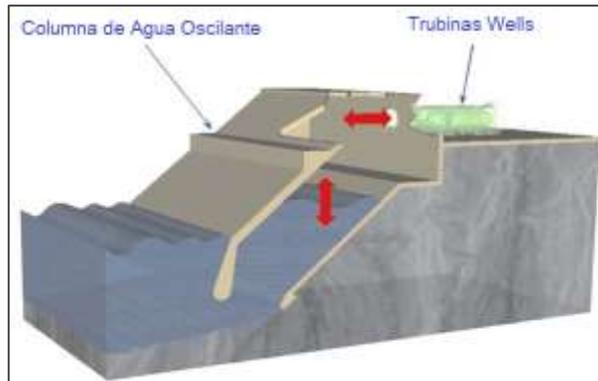


Figura 24. Esquema de la planta LIMPET OWC en Islay, Escocia. (Heath, 2008).

La columna de agua oscilante está formada por una cámara que se llena con aire por encima de la línea de agua, ver Fig. 24. El nivel de agua dentro de cámara sube y baja impulsado por la acción del oleaje, presurizando y despresurizando alternadamente el aire dentro de la cámara. A medida que el nivel de agua dentro de la cámara eleva, el aire presurizado escapa de la cámara pasando a través de la turbina Wells conectada a un generador de energía eléctrica. A medida que el nivel de agua en la cámara cae, ingresa nuevamente aire en la cámara a través de la turbina continuando la producción de energía. Las turbinas Wells son de flujo bidireccional de modo que la dirección de rotación de la turbina se mantiene constante durante todo el ciclo de potencia. (Heath, 2008).

El proyecto LIMPET fue coordinado por la Queens University de Belfast con el apoyo de la Unión Europea bajo el programa JOULE III. Actualmente WaveGen Ltd. es propietaria y operadora de la planta. (Heath, 2008).

<sup>4</sup> Land Installed Marine Power Energy Transmitter, Transmisor de Energía Marina instalado en Tierra

**Planta piloto OWC de Pico (isla de Pico, en Las Azores, Portugal):** es una planta de 400 kW nominal, equipada con una turbina Wells de 2,3 m de diámetro acoplada a un generador asíncrono. La turbina incluye dos estatores de álabes fijos, uno en cada lado del rotor. La energía eléctrica generada se rectifica y se modula con equipos electrónicos antes de ser introducida en la red eléctrica. (Sarmiento *et al.*, 2008).



Figura 25. Vista posterior de la planta OWC de la Isla de Pico, en Portugal. (Sarmiento *et al.*, 2008).

La planta fue construida entre 1995 y 1999, bajo la coordinación del Instituto Superior Técnico de Portugal, cofinanciado por la Comisión Europea. Problemas de inundaciones y mal funcionamiento afectaron la puesta en marcha de la planta y retrasaron el programa de pruebas. En 2003, el Centro de Energía de las Olas, una asociación portuguesa dedicada al desarrollo y promoción de energía de las olas, recibió una subvención para la renovación de la planta y reiniciar las pruebas. Las obras comenzaron en 2004 y las pruebas se iniciaron en septiembre de 2005. (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).



Figura 26. Interior de la planta piloto OWC de la Isla de Pico, en Portugal. (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

**Planta OWC de Mutriku (País Vasco, España)** (Power Technology, s.f.b): el puerto Mutriku, en el Golfo de Vizcaya, es regularmente azotado por fuertes tormentas que causan daño a los muelles. Para hacer frente a este problema, el Gobierno Vasco aprobó un proyecto para construir un espigón de escollera rompeolas de 440 m de longitud, pero además, decidió aprovechar la

construcción del espigón para la instalación de una planta que aprovechara la energía del oleaje para producir electricidad.

Se seleccionó la tecnología OWC de Voith Siemens Hydro (subsidiaria de WaveGen Ltd.) y la construcción de la planta comenzó en 2006. La columna de agua oscilante se construyó en una sección de 100 metros de la pared exterior del rompeolas. La estructura hueca en forma de trapecio tiene una abertura frontal de 3,2 m de alto y 4 metros de ancho, que se sumerge bajo el agua, y una abertura en la parte superior. La estructura hueca contiene 16 cámaras de aire que albergan 16 turbinas Wells, cada una, conectada a un generador de 18,5 kW.



Figura 27. Planta OWC en el rompeolas del puerto Mutriku en País Vasco, España. (Power Technology, s.f.b).

El agua del mar entra en las cámaras de aire de la instalación rompeolas a través de la abertura en la parte delantera, comprimiendo el aire y empujándolo fuera de la abertura en la parte superior. Este aire de alta presión mueve la turbina, la cual está conectada al generador, produciendo electricidad. Cuando el agua se retira, el aire se descomprime y a su vez mueve nuevamente la turbina. El agua de mar nunca entra en contacto con las turbinas, la electricidad se genera sólo con el movimiento del aire, lo cual mejora considerablemente la vida útil del equipo.

Con una inversión de € 6,4 millones, la planta genera una potencia de 296 kW que alcanza para alimentar 250 hogares, consiguiendo una reducción de emisiones de carbono equivalente a 600 toneladas al año.

**Archimedes Wave Swing (AWS)** (Prado, 2008): la planta piloto de 2 MW de la compañía holandesa Archimedes Wave Swing (AWS I) se sumergió con éxito a 5 km de la costa de Póvoa de Varzim (Norte de Portugal) en mayo de 2004 y fue retirado al finalizar las pruebas unos seis meses más tarde. A pesar

de estar en operación durante un corto tiempo, el AWS es uno de los primeros dispositivos con récord de funcionamiento en dimensiones significativas, habiéndose probado los componentes y la tecnología a gran escala.

El AWS consiste de una cámara de aire cilíndrica amarrada al fondo del mar, abierta en la parte superior (el silo) y cerrada por otro cilindro (el flotador). Entre los dos cilindros, se crea una exclusiva de aire y así el agua no puede inundar el silo, ver Fig. 29. El flotador puede moverse hacia arriba y hacia abajo, debido al aumento y disminución de presión vinculado a la cresta y valle de la ola encima del dispositivo. Esta oscilación es convertida en energía eléctrica mediante un generador lineal de imán permanente. Al sintonizar la frecuencia del sistema a la frecuencia media de onda, la carrera del movimiento lineal se puede hacer más grande que la altura de la ola (para olas largas, la amplificación puede ser hasta tres veces la elevación de las olas).

El hecho de estar completamente sumergido, hace que el sistema sea menos vulnerable a las tormentas. Además, al no ser visible, la aceptación pública de una granja de AWS no sería tan problemática como por ejemplo un parque eólico.



Figura 28. AWS en el puerto de Leixões en 2004. (Prado, 2008).

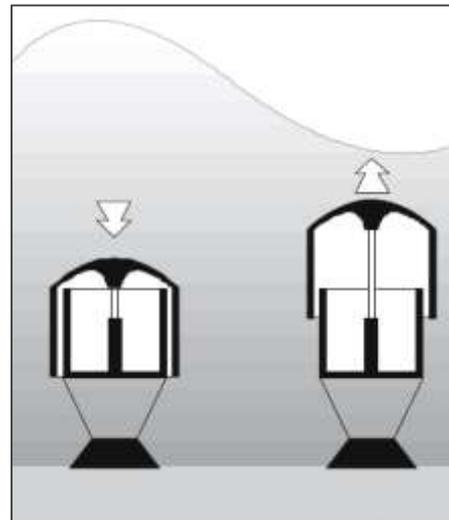


Figura 29. Esquema del concepto del AWS. (Prado, 2008).

**Wave Dragon, Nisum Bredning, Dinamarca** (Tedd *et al.*, 2008): el Wave Dragon es un dispositivo offshore flotante diseñado para ser instalado en zonas de profundidades superiores a 20 m por ser éstas áreas las de mayor energía

del oleaje. En 2003 fue instalado y conectado a la red eléctrica un prototipo en escala 1:4,5 (Fig. 30) en el norte de Dinamarca.

A diferencia de la mayoría de los dispositivos, Wave Dragon no oscila con las olas sino que colecta la energía de las olas de forma pasiva usando el principio de desbordamiento. La cara frontal del dispositivo es una rampa



Figura 30. Prototipo (1:4,5) del Wave Dragon en el norte de Dinamarca. (Fernández Díez, s.f.e).

curvada, sobre la cual se elevan las olas incidentes. Atrás de la cresta de esta rampa se encuentra un depósito que recoge el agua de desbordamiento de la rampa la cual tiene mayor energía potencial que el agua circundante. La energía se extrae cuando el agua dreña de nuevo hacia el mar a través de las turbinas hidroeléctricas dentro del depósito, ver Fig. 31.

El inventor, Erik Friis-Madsen, inició el desarrollo del Wave Dragón en 1986 y en 1994 presentó la solicitud de la patente. Uno de los aspectos más distintivos del Wave Dragón son las alas largas y delgadas montadas en las esquinas delanteras de la plataforma de depósito. Estas están diseñadas para reflejar las olas que se aproximan hacia la rampa. De esta forma se puede explotar una sección más amplia de la ola con sólo un aumento moderado en el costo.

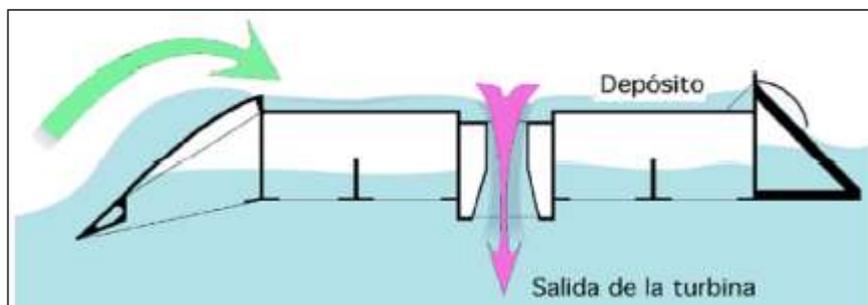


Figura 31. Esquema del Wave Dragon. (Fernández Díez, s.f.e).

Esta prevista la construcción de una unidad de demostración comercial a gran escala con una capacidad de 7 MW, 300 m de ancho, 170 m de longitud,

19 m de altura y un peso de 33.000 toneladas pero desde la crisis financiera del 2008 esto se encuentra demorado.

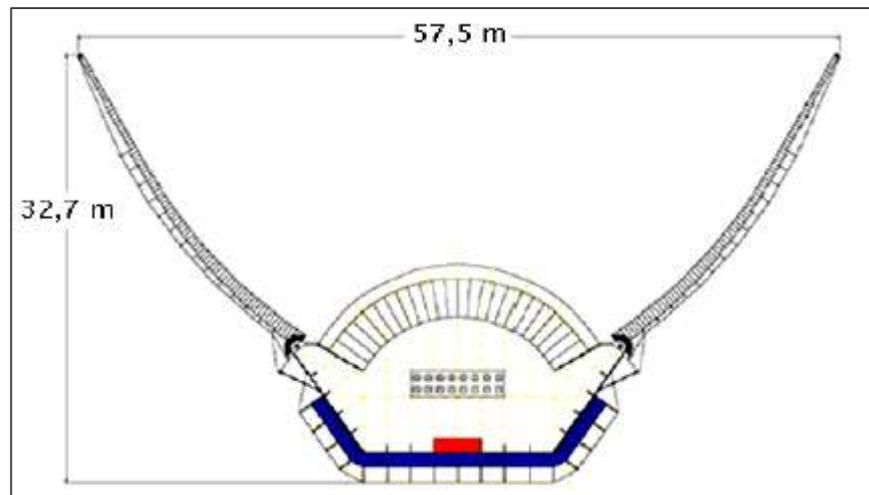


Figura 32. Dimensiones y vista desde arriba del prototipo (1:4,5) Wave Dragon. (Fernández Díez, s.f.e).

**Pelamis:** el Pelamis es un WEC semi-sumergido desarrollado por Ocean Power Delivery Ltd del Reino Unido. Está compuesto de secciones cilíndricas unidas por juntas articuladas y sujetado al fondo del mar mediante un sistema de amarres que permite que la máquina se alinee frontalmente a las ondas entrantes (Fig. 33). Cuando las olas pasan por debajo y a lo largo de la máquina, causan que la estructura se mueva en torno a sus articulaciones. El movimiento inducido de estas articulaciones se transmite a émbolos hidráulicos que bombean aceite a alta presión a través de una turbina hidráulica que se encuentra conectada a un generador eléctrico. (Yemm, 2008).

En el período 1998 - 2004 Pelamis ha sido probado en tanques de olas y en mar abierto en escalas que van desde 1/80 a 01/07. En 2004 un prototipo (Fig. 34) a escala comercial de 750 kW se instaló en el Centro Europeo de Energía Marina en las Islas Orcadas. El prototipo es de 120 m de largo, 3,5 m de diámetro y

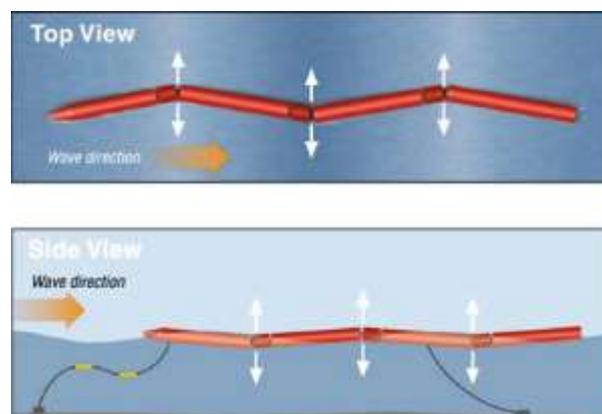


Figura 33. Esquemas del WEC Pelamis (vistas superior y lateral). (Yemm, 2008).

contiene tres módulos de 250 kW de potencia. (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).



Figura 34. Prototipo comercial Pelamis en las Islas Orcadas. (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

En septiembre de 2008, tras 10 años de diseño, refinamiento y pruebas, se instalaron 3 Pelamis a 5 kilómetros de la costa de Aguçadoura, Portugal, creando así la primera granja de energía undimotriz del mundo (ver Fig. 35). (Alcock, 2013).



Figura 35. Granja de 3 dispositivos Pelamis en Aguçadoura, Portugal. (Alcock, 2013).

Cada Pelamis de 120 m de largo está compuesto de cuatro secciones cilíndricas unidas entre sí por tres unidades de conversión de energía. Permanecen semi sumergidos en la superficie del agua, en una zona donde la profundidad es superior a 50 metros, y están conectados a la red eléctrica a través de cables a lo largo del fondo del mar. A un costo de aproximadamente

11,5 millones de dólares, las tres máquinas Pelamis tenían una capacidad máxima instalada de 2,25 MW, suficiente para abastecer a unos 1.600 hogares por año.

En noviembre de 2008, por problemas técnicos las máquinas fueron llevadas a la costa y aunque fueron resueltos todos los problemas técnicos, la crisis financiera había hundido a la compañía eléctrica portuguesa Enersis, lo que resultó en que el proyecto se cancelara antes de que se construyeran más de las 28 máquinas Pelamis previstas.

Tras esta decepción, Pelamis cambió su enfoque a un generador de energía de segunda generación, el P2. El P2 es más largo y más pesado pero permite una mayor captación de energía a menor costo por MW. El P2 también tiene una serie de mejoras en lo que respecta diseño, aumento de la eficiencia y fiabilidad.

Se proyecta resurgir la Granja Unidmotriz Agucadoura con un proyecto de 20 MW de capacidad instalada, con 26 nuevas máquinas Pelamis. Como el anterior, este proyecto depende de los resultados de la prueba del P2 en las Orcadas. Para Portugal el éxito de este proyecto es vital para sus ambiciosos planes de lograr que el 60% de la energía del país sea obtenida a partir de fuentes renovables para el año 2020.

## **2.4. Energía del Gradiente Térmico Oceánico**

El océano es el colector solar más grande del mundo. En los mares tropicales, pueden producirse diferencias de temperatura de alrededor de 20 a 25 grados centígrados entre el agua de la superficie que absorbe calor solar y el agua fría de la profundidad (500-1000 m) a temperaturas de 8 a 4 grados centígrados. La conversión de energía térmica oceánica (OTEC<sup>5</sup>) consiste en aprovechar esta diferencia de temperatura mediante máquinas térmicas que convierten parte de esta energía térmica en trabajo útil para la generación de electricidad. (Twidell & Weir, 2006).

---

<sup>5</sup> Por sus siglas en inglés: Ocean Thermal Energy Conversion.

Se reconoce al francés Jacques D'Arsoval como el pionero en proponer en 1881 la explotación de las diferencias de temperatura de los océanos para obtener electricidad (Jara Tirapegui, 2006). En 1926 el ingeniero francés Georges Claude presentó a la Academia de Ciencias de Paris un modelo a escala, demostrando la posibilidad práctica de aprovechar esta energía. (Fernández Díez, s.f.f).

Las zonas favorables para este tipo de aprovechamiento energético se encuentran en las latitudes cercanas al Ecuador donde se dan las mayores diferencias de temperatura, ver Fig. 36.

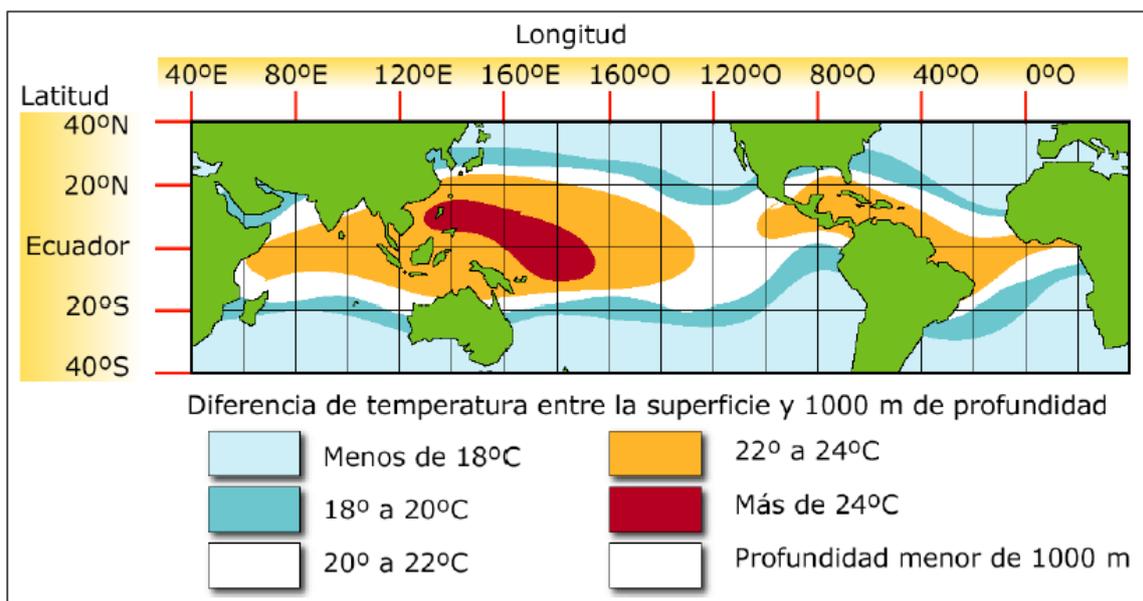


Figura 36. Zonas térmicamente favorables: regiones ecuatoriales y subtropicales (Fernández Díez, s.f.b)

#### 2.4.1. Principio de aprovechamiento

La Fig. 37 describe un **sistema OTEC de ciclo cerrado**. Consiste en un motor térmico con un *fluido de trabajo* de bajo punto de ebullición, por ejemplo amoniaco, que opera entre la temperatura fría  $T_c$  del agua bombeada desde la profundidad y la temperatura caliente,  $T_h = T_c + \Delta T$ , de las aguas superficiales. El fluido de trabajo circula en un ciclo cerrado, aceptando calor del agua caliente y descargándolo al agua fría a través de intercambiadores de calor. Cuando el líquido se expande, se mueve una turbina, que a su vez acciona un generador de electricidad. El fluido de trabajo es enfriado por el agua fría, y el ciclo continúa.

Existen sistemas alternativos de *ciclo abierto* que tienen al agua de mar como fluido de trabajo. Los principios termodinámicos del ciclo abierto son similares al ciclo cerrado. (Twidell & Weir, 2006).

En un sistema ideal con intercambiadores de calor perfectos, el volumen del flujo de agua caliente  $Q$  pasa en el sistema a temperatura  $T_h$  y sale a  $T_c$ . La potencia obtenida del agua caliente en un sistema ideal de este tipo es

$$P_o = \rho c Q \Delta T$$

La segunda ley de la termodinámica establece que la potencia máxima de energía  $E_1$  trabajo a obtener a partir de la entrada de calor  $E_0$  es

$$E_1 = \eta_{carnot} E_0$$

desestimando la dependencia del tiempo y los aspectos prácticos de los intercambiadores de calor, esto generalmente también se expresa como

$$P_1 = \eta_{carnot} P_o$$

donde

$$\eta_{carnot} = \Delta T / T_h$$

es la eficiencia de un motor Carnot ideal operando a una tasa infinitamente lenta entre  $T_h$  y  $T_c = T_h - \Delta T$ . La potencia de salida mecánica ideal es

$$P_1 = (\rho c Q / T_h) (\Delta T)^2$$

Para un  $\Delta T$  de aproximadamente  $20^\circ\text{C}$ , aún esta eficiencia ideal de Carnot es muy pequeña ( $\sim 7\%$ ). Dado que en la práctica no es posible esperar un tiempo infinito para procesos térmicos ideales, no existe un sistema práctico que alcance

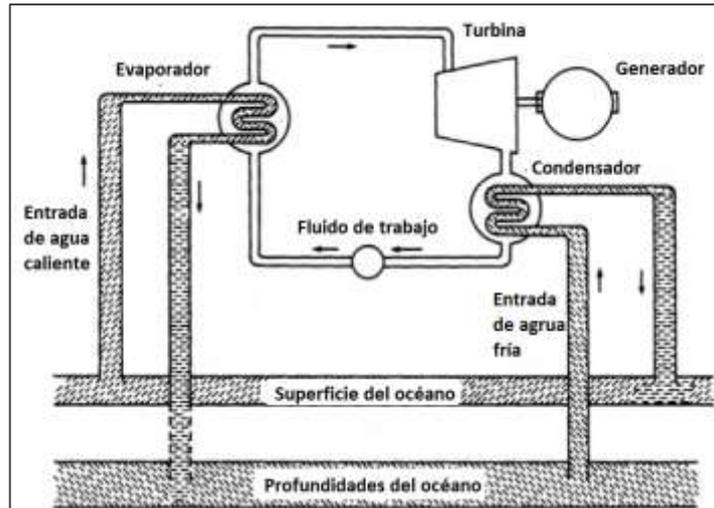


Figura 37. Diagrama esquemático de un sistema OTEC. Una máquina térmica funciona entre el agua caliente de la superficie del océano y el agua fría de las profundidades del océano (Twidell & Weir, 2006)

la eficiencia de Carnot o un intercambio de calor perfecto. La eficiencia de un sistema real será sustancialmente menor en alrededor de 2-3%. Dado que  $P_1$  depende cuadráticamente de  $\Delta T$ , la experiencia muestra que solamente sitios con un  $\Delta T \geq 20$  el aprovechamiento puede ser económicamente viable. (Twidell & Weir, 2006).

**Los sistemas de ciclo abierto** tipo *Rankine*, utilizan como fluido termodinámico el agua de mar. El agua caliente de la superficie entra a través de orificios en la parte superior y se vaporiza en una cámara de vacío o en un evaporador mediante un sistema *flash*, ver Fig. 38. En el evaporador se obtiene una mezcla compuesta de vapor y agua líquida a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del agua (0,0356 bar para una temperatura superficial del mar de 27°C). El vapor húmedo forma una corriente central, a la vez que una película de agua desciende lamiendo las paredes; en la sección inferior el vapor se separa del líquido, llegando a la turbina únicamente vapor saturado seco, el cual a continuación se dirige a un condensador, de contacto (mezcla) o de superficie (intercambiador de calor), en el que nuevamente se obtiene agua líquida saturada a aproximadamente 0,017 bares y 15°C. (Fernández Díez, s.f.f).

El ciclo abierto tiene las siguientes ventajas respecto del ciclo cerrado: producen agua dulce a la salida del condensador; el uso de agua de mar como fluido de trabajo permite emplear materiales más baratos que si se utiliza amoníaco u otros fluidos similares; utilizan menos cantidad de agua para producir la misma energía que el cerrado al no tener las pérdidas en el calentador de amoníaco; el intercambiador de calor del amoníaco en los ciclos cerrados es muy grande, debido a la necesidad de que circule mucha agua, lo cual encarece el sistema. (Fernández Díez, s.f.f). En caso de derrame del fluido de trabajo, el amoníaco es peligroso para la biota debido a su alta toxicidad.

Los inconvenientes del ciclo abierto frente al cerrado son: los efectos corrosivos del agua marina y la necesidad de desgasificarla antes de introducirla a la turbina; requieren una turbina de tamaño considerablemente mayor, ya que se usa un vapor a mayor presión y volumen específico que en sistema cerrado. (Fernández Díez, s.f.f).

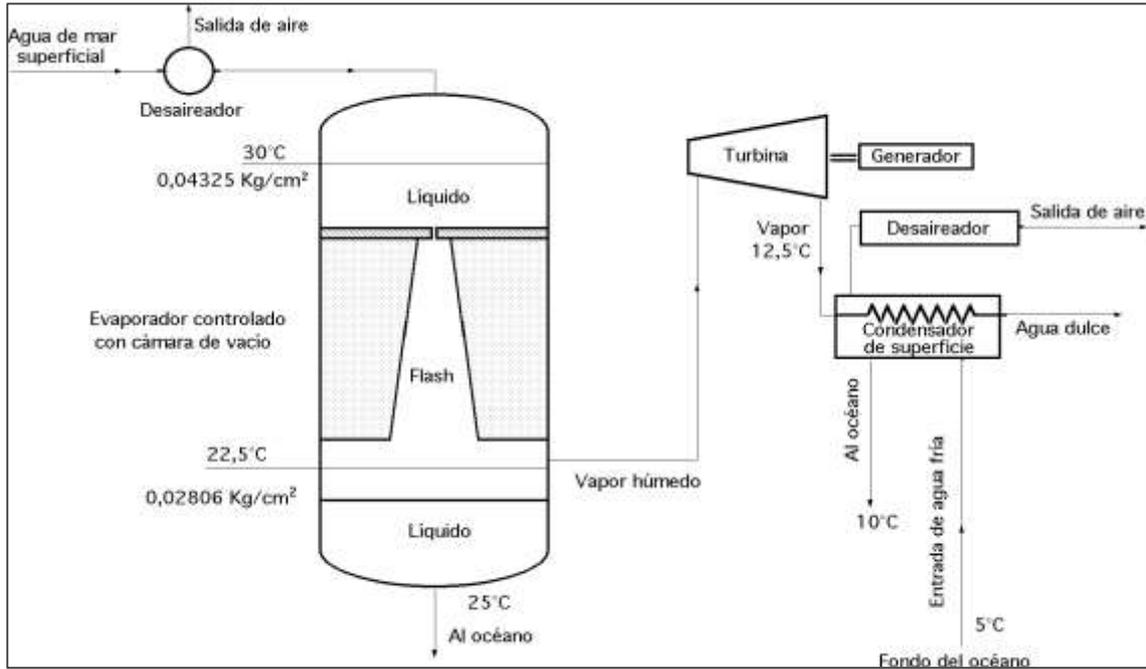


Figura 38. Ciclo abierto con evaporación controlada por contacto en cámara de vacío (evaporación "flash") (Fernández Díez, s.f.f).

**Los sistemas híbridos** combinan las características de los anteriores optimizando su funcionamiento, generando electricidad y agua dulce. El agua marina caliente entra en un evaporador flash donde es evaporada súbitamente y el calor del vapor obtenido se utiliza para vaporizar el fluido de trabajo (de bajo punto de ebullición) que circula en un ciclo cerrado. El fluido de trabajo vaporizado acciona la turbina del generador eléctrico y luego es condensado en el intercambiador de calor. (Fernández Díez, s.f.f).

#### 2.4.2. Ventajas e inconvenientes

La energía térmica oceánica tiene la ventaja de ser inagotable por su recurso tan abundante como es el agua de mar y se considera disponible los 365 días del año y las 24hs ya que no está relacionada con los grandes procesos climatológicos.

Los principales inconvenientes son: el rendimiento teórico máximo de Carnot es muy bajo (0,073 para agua caliente a 28°C y fría a 6°C; 0,086 para agua caliente a 30°C y fría a 4°C). (Fernández Díez, s.f.f); se requiere trabajo para mover grandes cantidades de agua caliente, agua fría y fluido de trabajo en

todo el sistema contra la fricción, el cual tendrá que ser suministrado desde la salida de potencia bruta del sistema, constituyendo otra pérdida de energía; el interior de las tuberías es vulnerable a la incrustación de organismos marinos, lo que aumenta la resistencia al flujo de calor y reduce el rendimiento; se necesita construir la tubería para el agua fría y una plataforma marítima flotante similar a las utilizados en la perforación de petróleo. (Twidell & Weir, 2006).

Las principales desventajas son el costo y la escala. Incluso si la potencia ideal fuera obtenible, los costos por unidad de producción serían grandes. Además, las resistencias a la circulación del calor y al movimiento del fluido reducen la salida útil considerablemente y por lo tanto aumentan los costos unitarios. Los factores que aumentan el costo de OTEC en instalaciones offshore son el mantenimiento en el mar y cableado submarino. Sin embargo, hay algunos sitios costeros especialmente favorables, como la isla de Nauru en el Pacífico Sur, donde el fondo del mar se inclina hacia abajo abruptamente por lo que toda la maquinaria se puede colocar en tierra firme. (Twidell & Weir, 2006).

### 2.4.3. Realizaciones

***Planta experimental de Ougréé (Bélgica):*** en 1928, el ingeniero químico Georges Claude, realizó un experimento en el río Meuse, en Ougréé, Bélgica. Construyó una planta de ciclo abierto que producía 60 kW de potencia bruta aprovechando la diferencia de temperatura de aproximadamente 20°C entre el agua del río y el desagüe de un molino cercano. (Multon, 2012).

***Planta en tierra en Matanzas (Cuba):*** Entre 1920 y 1930, Calude realizó pruebas sucesivas a lo largo de las costas cubanas, en la bahía de Matanzas con una central de ciclo abierto de 22 kW, la cual constaba de un tubo de aspiración para el agua fría de 1,6 m de diámetro y 2 km de longitud. La central funcionó durante 11 días antes de ser destruida por una tormenta. (Fernández Díez, s.f.f).

***Planta flotante Le Tunisie (Brasil):*** en 1934, Claude instaló en Brasil, una planta flotante a bordo del buque *Le Tunisie*, Fig. 39. El barco se encontraba fondeado a 100 km de la costa de Río de Janeiro. Con una potencia nominal

bruta de 1.8 MW sería capaz de producir 1000 toneladas de hielo por día usando un compresor de amoniaco. Consciente de los peligros planteados por una conexión rígida entre la tubería de agua fría y la planta que flota en alta mar, Claude diseñó un vínculo indirecto a través de un tubo desmontable flexible entre el buque y un flotador esférico de la cual se suspendería verticalmente la tubería de agua fría. El diseño futurista del proyecto -el cual requirió de una flota de siete barcos de asistencia y de un equipo de 80 efectivos- y otros factores - condiciones meteorológicas a menudo inclementes, insuficiente control de calidad de fabricación, falta de experiencia en ingeniería oceánica- condenaron el emprendimiento, sin embargo, Claude sembró las semillas para la explotación comercial de los recursos OTEC. (Multon, 2012).

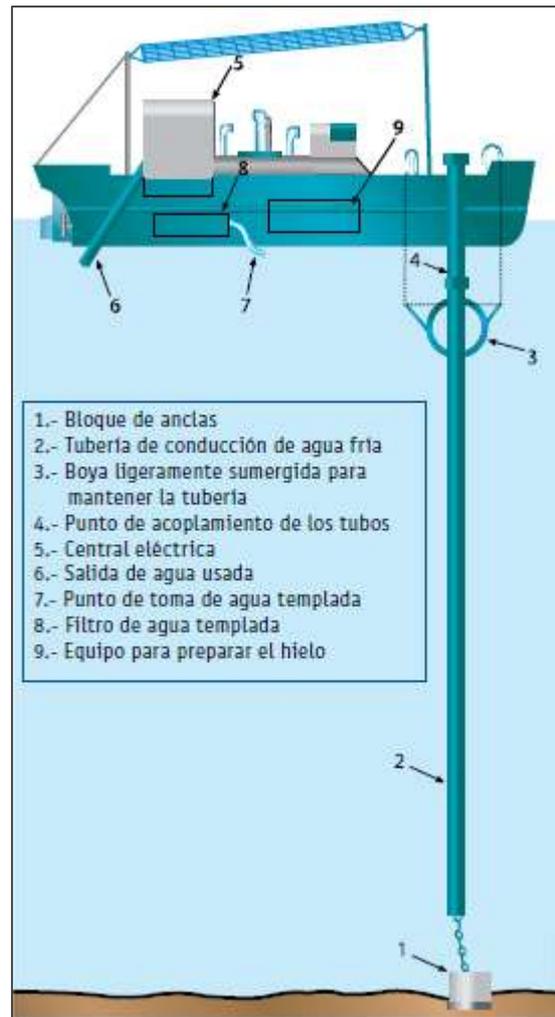


Figura 39. Esquema de la planta flotante mareomotérmica a bordo del buque Le Tunisie (Jara Tirapegui, 2006).

**Planta en tierra en Abidjan (Costa de Marfil):** en la década de 1950 el gobierno francés y la empresa Societé Energie des Mers financian el estudio para la instalación de una central en Abidjan, Costa de Marfil. La central se instalaría en tierra firme y produciría agua desalinizada alimentada por energía mareomotérmica, aprovechando un gradiente térmico de 20°C y extrayendo el agua fría mediante un tubo de 4 km de longitud. Constaba de dos módulos de 3,5 MW netos cada uno. A pesar de que las condiciones naturales para su construcción eran las apropiadas, el proyecto fue abandonado por cuestiones políticas. (Fernández Díez, s.f.f).

**Proyecto Mini-OTEC (Hawaii):** en 1977, un consorcio de empresas del sector privado, con el apoyo del gobierno del estado de Hawaii, puso en marcha un proyecto que consistía en la instalación de una planta flotante cerca de las islas Hawaii. La Armada de Estados Unidos prestó una barcaza de 32 m, rebautizada Mini-OTEC, para servir como plataforma. El sistema de ciclo cerrado utilizaba amoníaco como fluido de trabajo e intercambiadores de calor enchapados en titanio. La tubería de agua fría de 670 m de longitud y 0,6 m de diámetro, estaba suspendida de la plataforma. La elección de HDPE facilitó su instalación en el mar, ya que el tubo era suficientemente flexible. La tubería de agua fría no estaba conectada directamente a la plataforma, sino a una boya de superficie. De esta forma, el agua de mar profunda se bombeó bajo presión hacia el condensador a través de un tubo flexible (la misma elección que Claude había hecho para Le Tunisie). Las pruebas Mini-OTEC se llevaron a cabo durante un período de aproximadamente cuatro meses, durante 600 horas de funcionamiento y se logró producir una potencia neta de casi 20 kW. (Multon, 2012).

**Proyecto OTEC-1 (Hawaii):** en noviembre de 1980, se instaló una planta de 1 MW de potencia nominal, a 40 km de la costa noroeste de la isla de Hawaii, bajo el auspicio del Departamento de Energía de Estados Unidos. No tenía turbina, su propósito era probar los intercambiadores de calor y toda la infraestructura para el bombeo de agua de mar caliente y fría en una configuración offshore. La plataforma utilizada para esta prueba fue el petrolero *Chepachet* de la Armada de Estados Unidos, reacondicionado para el proyecto. En el centro de la nave se construyó una piscina para el bombeo de agua fría de las profundidades y se instalaron intercambiadores de calor, con paredes de acero y tubos de titanio, diseñado para 38 MW de potencia térmica (teóricamente capaces de producción neta de 1 MW de electricidad). El fluido de trabajo elegido fue amoníaco. Su amarre de un solo punto en el agua de aproximadamente 1.400 m de profundidad fue, en ese momento, un récord. Si bien el proyecto fue exitoso -permitió realizar mediciones de transferencia de calor; evaluar métodos de prevención de la contaminación biológica de los tubos del intercambiador; probar el rendimiento de la tubería de agua fría en el mar, así como de su articulación a la plataforma-, sólo duró unos meses, hasta marzo de 1981, en

lugar de los dos años inicialmente propuestos, debido a severos recortes presupuestarios. (Multon, 2012).

***Planta piloto en tierra (Nauru):*** en 1981, dos empresas japonesas, Tokyo Electric Company y Toshiba Corporation, realizaron la instalación y prueba de una planta piloto OTEC onshore, en el atolón de coral de la República de Nauru, una isla en el Pacífico Oeste. Se escogió una potencia bruta nominal de 100 kW, con el objetivo de conectar la planta a la red eléctrica de la isla para una producción neta del orden de 15 kW. Para extraer el agua fría a una profundidad de aproximadamente 650 m, se instaló en el lecho marino, una tubería de HDPE de 0,7 m de diámetro y 945 m de longitud. Estaba fondeada simplemente con anclas en forma de collar a intervalos regulares. El fluido de trabajo era Freón, el cual se consideraba más seguro que el Amoníaco a pesar de su menor performance. Los intercambiadores de calor de la planta eran alimentados por bombas centrífugas de etapa simple, con capacidad de 23,7 m<sup>3</sup> de agua fría y 27,9 m<sup>3</sup> de agua caliente por minuto. Para mejorar la transferencia de calor se aplicó un revestimiento de partículas finas de Cobre a los tubos de Titanio de los evaporadores. El condensador consistía de tubos de Titanio ranurados en espiral. Una turbina de 3000 rpm estaba conectada a un generador eléctrico síncrono trifásico enfriado por aire. La planta operó durante varios meses hasta que casi al final del experimento una tormenta dañó la tubería de agua fría. La producción bruta de energía alcanzó un máximo de 120 kW de los cuales 31,5 kW fueron entregados a la red eléctrica. (Multon, 2012).

***Planta piloto en tierra (Hawaii):*** en la década de 1980, el Departamento de Energía de Estados Unidos decidió construir una planta piloto OTEC de ciclo abierto en el sitio del Laboratorio de Energía Natural de la Autoridad de Hawaii (NELHA por sus siglas en inglés) situado en la costa occidental de la isla de Hawaii. El gobierno de Hawaii financió la instalación de los sistemas de extracción de agua de mar –completado en 1987-, una infraestructura que debía ser permanente y servir a las necesidades de futuros proyectos. La tubería para suministrar agua fría (6°C) desde una profundidad de 674 m consistía en un tubo HDPE de 1 m de diámetro y 1.916 m de largo. La capacidad total de bombeo del agua fría era de 0.84 m<sup>3</sup>/s y la de agua caliente (24-28°C), se bombeaba desde una profundidad de 21 m (163 m offshore) a través de una tubería de HDPE 0,7

m de diámetro, con una capacidad total de 0,61 m<sup>3</sup>/s. La turbina elegida era de vapor de baja presión con flujo radial y axial. La planta operó entre 1993 y 1998 obteniéndose una producción de energía record en potencia bruta (255 kW) y neta (103 kW). Además de la generación de electricidad, también se probó la desalinización del agua de mar. (Multon, 2012).

**Planta de Okinawa (Japón):** en 2013, OTEC Okinawa ([www.otecokinawa.com](http://www.otecokinawa.com)) instaló una central de 100 kW para estudios y demostración, en la isla Kumejima, Japón. Los principales objetivos de esta instalación son: medir la cantidad de energía generada y la influencia de los cambios en el clima y en las temperaturas del mar; realizar estudios empíricos sobre las técnicas para la obtención de una salida estable; realizar estudios avanzados sobre la utilización compuesta de las aguas superficiales y de aguas profundas en alta mar; estudiar la posibilidad de la creación de instalaciones OTEC de tipo offshore en Okinawa. (Okinawa Prefecture, s.f.).

**Planta de Hawaii:** en agosto de 2015 entró en funcionamiento en Hawaii la planta OTEC más grande del mundo realizada por Makai Ocean Eginering ([www.makai.com](http://www.makai.com)) en el sitio del NELHA. La planta generará 100 kW de electricidad, suficiente para abastecer a 120 hogares de Hawaii cada año. Es la primera planta OTEC de ciclo cerrado conectada a una red eléctrica de Estados Unidos. (OTEC foundation, 2015). El objetivo es utilizar no sólo el agua del océano para generar energía, sino también para utilizarlo de manera integrada para la acuicultura de camarones y algas y para el aire acondicionado en las fábricas de la planta.

## 2.5. Energía del Gradiente Salino

La energía del gradiente salino se produce cuando se mezclan dos soluciones con diferente salinidad. Puede obtenerse principalmente en la desembocadura de los ríos en el mar pero también a partir de las descargas industriales de salmuera.

Para extraer esta energía se pueden utilizar dos procesos: *osmosis retardada por presión* (PRO<sup>6</sup>) y *electrodiálisis inversa* (RED<sup>7</sup>). Ambos procesos utilizan membranas similares a las utilizadas para realizar osmosis inversa y electrodiálisis. La energía obtenida por PRO también es denominada *energía osmótica*. (Thorsen & Holt, 2009).

A pesar que el potencial de la energía del gradiente salino ya era conocido en la década del 1950, hasta hace unos años, la comercialización y uso industrial de ésta eran todavía limitados; sin embargo, se han realizado varias iniciativas para la construcción de plantas piloto y el progreso de ambas tecnologías. (Nijmeijer & Metz, 2010).

### 2.5.1. El potencial energético del gradiente salino

La cantidad de energía teóricamente disponible que puede obtenerse de la mezcla de dos soluciones depende fuertemente de la diferencia de concentración (o potencial químico) entre la solución salina concentrada y la diluida. Cuanta más alta es esta diferencia, mayor será la energía que puede obtenerse del sistema. (Nijmeijer & Metz, 2010).

La fuerza motriz para el transporte de un componente en la energía del gradiente salino es un gradiente en la energía de Gibbs o una diferencia de potencial entre dos soluciones salinas. La energía de Gibbs de un sistema es la parte de la energía del sistema que está disponible para realizar trabajo. La energía de Gibbs de una solución ideal es igual a

$$G = \sum u_i n_i$$

donde G es la energía de Gibbs del sistema (J/mol),  $u_i$  el potencial químico del componente i en la solución (J/mol), y  $n_i$  el número de moles del componente i en la solución. (Nijmeijer & Metz, 2010).

La cantidad total de energía disponible al mezclar 1 m<sup>3</sup> de una solución concentrada y 1 m<sup>3</sup> de una solución diluida (Fig. 40) puede ser determinada a

---

<sup>6</sup> Por sus siglas en inglés: Pressure Retarded Osmosis.

<sup>7</sup> Por sus siglas en inglés: Reverse ElectroDialysis.

partir de la diferencia de potencial químico del sistema luego del mezclado, sustraído el potencial químico del sistema antes del mezclado

$$\Delta G_{max} = G_b - (G_c + G_d)$$

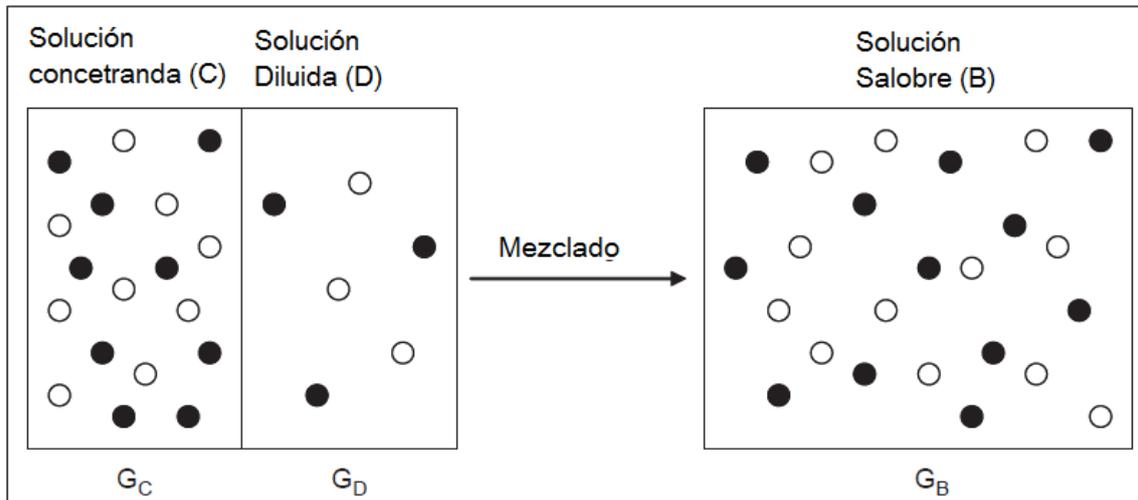


Figura 40. Mezcla de una solución concentrada y una diluida. (Nijmeijer & Metz, 2010).

Donde  $\Delta G_{max}$  es el cambio en la energía de Gibbs (J/mol) y  $G_b$ ,  $G_c$ , y  $G_d$  son las energías de Gibbs de la solución salobre, concentrada y diluida, respectivamente (J/mol). (Nijmeijer & Metz, 2010).

Stenzel y Wagner (2010) analizaron el potencial teórico a nivel mundial y regional teniendo en cuenta información sobre los sitios de interés (Fig. 41). El potencial teórico es independiente de la tecnología de conversión y para la energía del gradiente salino está dado por la energía de Gibbs libre de la mezcla. Se calcula asumiendo el mezclado ideal y completo del agua de río y de mar. Los parámetros usados para calcular el potencial teórico son: las descargas de los ríos, la temperatura y la salinidad del agua de río y de mar. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 1. Potencial teórico de la energía del gradiente salino calculado por Stenzel & Wagner (2010). (índice G: Energía de Gibbs).

Continente	Potencial teórico	
	[GW <sub>e</sub> ]	[TWh <sub>e</sub> /a]
Europa	241	2.109
África	307	2.690
Asia	1.015	8.890
América del Norte	479	4.195
América del Sur	969	8.492
Oceanía	147	1.291
<b>Mundo</b>	<b>3.158</b>	<b>27.667</b>



Figura 41. Regiones con las condiciones adecuadas para plantas de energía osmótica. (Stenzel & Wagner, 2010).

Tabla 2. Potencial técnico y ecológico para plantas PRO calculado por Stenzel & Wagner (2010).

Continentes	Potencial técnico		Potencial ecológico	
	[GW <sub>c</sub> ]	[TWh <sub>c</sub> /a]	[GW <sub>c</sub> ]	[TWh <sub>c</sub> /a]
Europa	49	395	5	39
África	63	503	6	50
Asia	208	1.664	21	166
América del Norte	98	785	10	79
América del Sur	199	1.589	20	159
Oceanía	30	242	3	24
<b>Mundo</b>	<b>647</b>	<b>5.177</b>	<b>65</b>	<b>518</b>

Adicionalmente, Stenzel y Wagner (2010) desarrollaron un enfoque para calcular el potencial técnico y el potencial ecológico utilizando una planta osmótica (PRO) conceptual. El potencial técnico toma en cuenta las restricciones del proceso de conversión de la planta osmótica conceptual definida. El potencial ecológico permite una evaluación más realista del potencial explotable para las plantas osmóticas ya que el cálculo se basa en la cantidad de agua usable, la

cual está limitada por restricciones ecológicas (e.g. estabilidad ecológica del río). En la tablas 2 se muestran los resultados obtenidos para el potencial técnico y ecológico. Los continentes con el potencial técnico más alto son Asia y América del Sur (aproximadamente un tercio del potencial global cada uno).

### **2.5.2. Técnicas de aprovechamiento**

En esta sección se expone un extracto de Nijmeijer y Metz (2010) sobre las dos técnicas principales que se encuentran en investigación y desarrollo para el aprovechamiento de la energía del gradiente salino, osmosis retardada por presión (PRO) y electrodiálisis inversa (RED).

#### ***Osmosis retardada por presión:***

En PRO, dos soluciones con diferente salinidad se ponen en contacto a través de una membrana semipermeable, la cual permite el transporte de agua pero impide el paso de sal. La diferencia de potencial químico entre ambas soluciones genera una fuerza motriz que hace que el agua se difunda desde la solución diluida hacia la solución concentrada, igualando la diferencia de potencial químico. Este transporte de agua causa un aumento en la presión de la solución concentrada que retarda en parte el flujo de agua a través de la membrana. Esta alta presión es aprovechada para generar electricidad con una turbina hidráulica.

Debido a la ineficacia de las membranas, las cuales son un componente clave para PRO, no se realizó mucho esfuerzo para establecer esta tecnología. No obstante, desde 1997, Statkraft, una compañía noruega comprometida en el desarrollo de PRO está apuntando a lograr una membrana con alto flujo de agua y baja permeabilidad salina. La performance de dicha membrana sería del orden de 5 W/m<sup>2</sup>.

Uno de los pioneros de esta tecnología, Sidney Loeb, también exploró la posibilidad de aplicar PRO en la mezcla de agua con alta salinidad como el agua del Mar Muerto con agua de mar.

#### ***Electrodiálisis inversa:***

En RED, dos soluciones con diferente salinidad son puestas en contacto a través de una serie alternada de membranas de intercambio aniónico (AEM<sup>8</sup>) y catiónico (CEM<sup>9</sup>) (Fig. 42). La AEM contiene cargas positivas fijas y solo permite el transporte selectivo de aniones hacia el ánodo, mientras que la CEM contiene cargas negativas fijas y solo permite el paso selectivo de cationes hacia el cátodo. La diferencia de potencial químico entre las dos soluciones salinas es la fuerza motriz y genera una

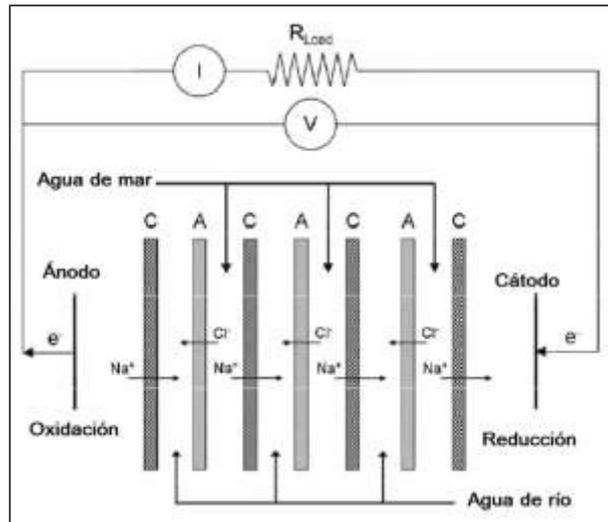


Figura 42. Principio de RED. A es una membrana de intercambio aniónico, C es una membrana de intercambio catiónico, V es la diferencia de potencial sobre la carga externa aplicada (V), I es la corriente eléctrica (A) y  $R_{LOAD}$  la resistencia de la carga externa ( $\Omega$ ). Una pareja redox es usada en los electrodos para mitigar la transferencia de electrones desde el ánodo al cátodo. (Nijmeijer & Metz, 2010).

diferencia de voltaje sobre cada par de membranas. Los electrones liberados en el ánodo son transportados -a través del circuito externo conectado a una carga externa- hacia el cátodo. En el circuito interno en la pila, la carga es transportada por iones, mientras que en el circuito externo, los electrones transportan la carga. La corriente iónica es convertida en corriente eléctrica por reacciones redox que ocurren en los electrodos en el lado exterior de la pila.

### 2.5.3. Ventajas e inconvenientes

La energía del gradiente salino es completamente renovable y menos periódica que otras fuentes renovables como la energía eólica y solar. Su producción, no tiene peligros operaciones significativos, es limpia y no genera emisiones atmosféricas de importancia como el CO<sub>2</sub>. Se trata de una de las fuentes potencialmente más grande de energía renovable del planeta. (Thorsen & Holt, 2009).

<sup>8</sup> Por sus siglas en inglés: Anion Exchange Membrane.

<sup>9</sup> Por sus siglas en inglés: Cation Exchange Membrane.

Otra característica importante es que los sitios donde los ríos desembocan en el océano, en general son sitios que además tienen poblaciones o industrias, o ambos. Esto tiene como ventaja que los consumidores de la energía producida estarán cerca de la planta. (Nijmeijer & Metz, 2010).

Actualmente el principal inconveniente de esta tecnología -tanto para PRO como para RED- es la membrana, la cual incide directamente en el costo y en la performance. Actualmente la densidad energética de las membranas es como máximo  $2,7 \text{ W/m}^2$ . Se han conseguido densidades energéticas del orden de los  $14 \text{ W/m}^2$  en experimentos de laboratorio. Las plantas comerciales requerirían grandes cantidades de membrana. Por ejemplo, una planta de 2 MW necesitaría por lo menos 2 millones de  $\text{m}^2$  de membrana, la cual deberá reemplazarse cada 5 años. TaX Flow, Porifera y Toray Industries, están activamente persiguiendo el desarrollo de membranas más eficientes y económicas. (Kempener & Neumann, 2014).

Otro inconveniente de importancia tanto en PRO como en RED es la contaminación biológica de la membrana debido a la materia orgánica presente en el agua. Aún no hay una solución satisfactoria y a bajo costo para este problema pero hay varios proyectos de investigación en curso. . (Kempener & Neumann, 2014).

#### **2.5.4. Realizaciones**

No se ha construido aún plantas comerciales pero sí se han construido plantas pilotos para investigación y desarrollo de ambas tecnologías.

***Planta prototipo de Statkraft (Tofte, Noruega):*** el 24 de noviembre de 2009 entró en operación la primera planta prototipo de energía osmótica del mundo, en el sudeste de Noruega (Fig. 43). Estaba ubicada dentro de las instalaciones de una fábrica de pulpa de papel en operación, Sodra Cell Tofte. La ubicación permitía buen acceso al agua de mar y el agua dulce era obtenida de un lago cercano. La planta modular consistía de 66 tubos de presión, una turbina hidráulica, un intercambiador de presión y unidades de pretratamiento para las corrientes de agua entrantes (ver Fig. 44). Las tuberías de presión tenían

aproximadamente 2.000 m<sup>2</sup> de membranas PRO enrolladas en el interior. (Power Technology, s.f.c).

La planta fue diseñada para operar a una capacidad de 10 kW (aunque se obtuvo un rendimiento mucho menor, del orden de los 4 o 5 kW) con una membrana inicial de 1 W/m<sup>2</sup> de densidad energética. No obstante, el punto de equilibrio económico para PRO requiere membranas de 5 W/m<sup>2</sup> y a un costo del mismo orden que las membranas estándar para osmosis inversa. Y es precisamente en referencia a la membrana que Statkraft tuvo sus mayores desafíos. Aunque muchas de las membranas en I+D son capaces de alcanzar hasta 10 W/m<sup>2</sup>, no se alcanza un alto rendimiento y no existe la posibilidad de comprar membranas PRO a granel. Ante la no existencia de expectativas de mejora de esta situación en el corto plazo, en diciembre de 2012 Statkraft anunció que discontinuaba la inversión en PRO. (Woode, 2014).



Figura 43. Planta prototipo PRO de Statkraft en Noruega. (Nijmeijer & Metz, 2010).

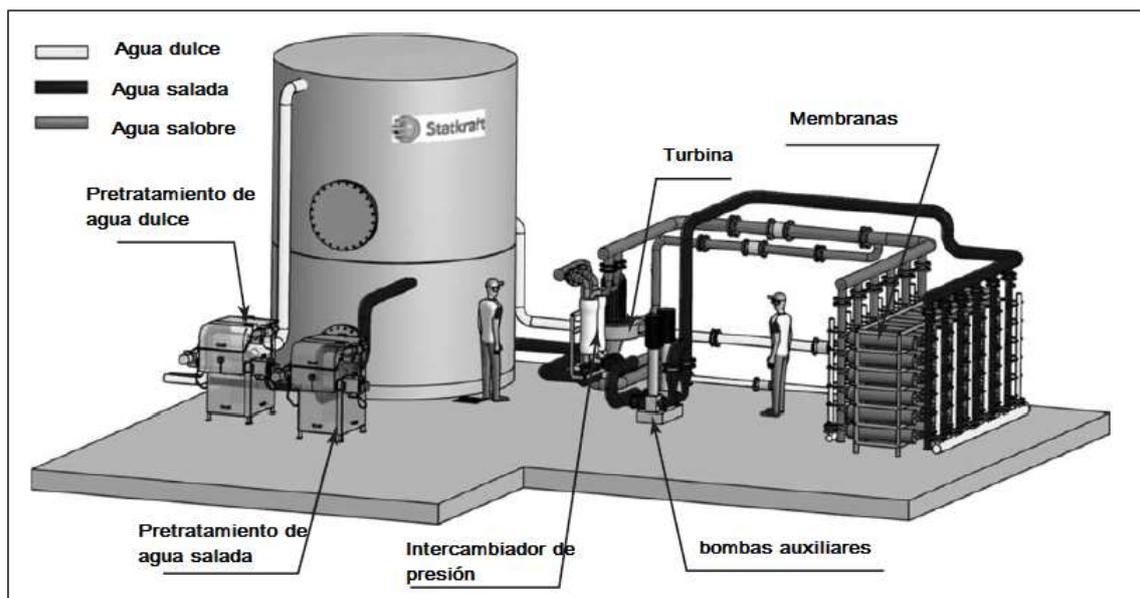


Figura 44. Ilustración de la planta prototipo de Statkraft en Noruega. (Nijmeijer & Metz, 2010).

**Planta piloto de REDStack (Afsluitdijk, Países Bajos):** En 2005, un proyecto piloto RED de 5 kW fue instalado por REDStack -una compañía holandesa fundada en el 2005 derivada del centro de investigación de la tecnología del agua, Wetsus- en Frisia, una compañía productora de sal, ver Fig. 45. Basados en este primer proyecto piloto, REDStack, Wetsus y Fujifilm (fabricante de membranas) comenzaron a



Figura 45. Proyecto piloto RED de REDStack instalado en una compañía productora de sal. (Kempener & Neumann, 2014).



Figura 46. Planta piloto de Afsluitdijk (Países Bajos), la primera planta RED del mundo. Fuente: <http://www.dutchwatersector.com/uploads/2014/11/dws-redstack-pilot-afsluitdijk-770px.jpg>

desarrollar un proyecto de planta piloto de 50 kW en Afsluitdijk -una calzada de 32 km que separa el agua dulce del lago IJssel del agua salada del Mar de Wadden-. La planta fue completada y puesta en funcionamiento en octubre de 2013. (Kempener & Neumann, 2014).

La nueva planta (Fig. 46), costó 7,33 millones de Euros. Contiene 400 m<sup>2</sup> de membranas RED y es capaz de procesar 220.000 litros de agua salada y 220.000 litros de agua dulce por hora. Si bien tanto el agua dulce como el agua salada estaban relativamente limpias, tuvieron algunos inconvenientes con la contaminación biológica y el bombeo que afectaron en alrededor de un 40% la potencia de salida total. Otro aspecto que afectó la performance es la temperatura relativamente baja del agua en Afsluitdijk. (Kernan, 2015).

### **3. Las energías marinas en Argentina. Sitios de interés, estudios y proyectos actuales.**

El interés por el aprovechamiento de las energías marinas en nuestro país no es nuevo, sino que se remonta a principios del siglo XX cuando se estudió la posibilidad de aprovechar la energía mareomotriz en la provincia de Chubut. Durante todo el transcurso del siglo XX han sido elaborados numerosos proyectos para el aprovechamiento de energía mareomotriz, sin embargo, hasta la actualidad ningún proyecto fue concretado.

En el siglo XXI ha surgido un renovado interés en las energías marinas por parte de diversos sectores -principalmente el académico, y en menor medida el privado y gubernamental-, lo cual se ha traducido en la elaboración de nuevos proyectos y en la formación de grupos de investigación para el estudio del recurso, la divulgación y el desarrollo de tecnología nacional.

En noviembre de 2014 se publicó la primera edición del Catálogo de Energías del Mar realizado por el Grupo de Interés en Energías del Mar Argentino (GEMA). El catálogo es un inventario referido a energías marinas de estudios, iniciativas y proyectos de nuestro país, así como, del estado de arte de la tecnología en el mundo.

El GEMA es una iniciativa de la Academia del Mar<sup>10</sup> que tiene por objetivo establecer una red informal de contactos, que vincule especialistas, instituciones y organizaciones que estén trabajando o estudiando sobre las energías marinas - específicamente mareas, corrientes y olas-, cuya motivación es:

La existencia de un extenso mar de jurisdicción nacional, los crecientes requerimientos de energía que están siendo cubiertos por importaciones, y la certeza de que cualquier descubrimiento científico-tecnológico termina revirtiendo una aplicación que, directa o indirectamente, aporta un beneficio para el ser humano, motiva a propiciar iniciativas que si bien podrían no resultar atractivas frente a la diversidad de recursos existentes para resolver el problema energético, permitirían ampliar la frontera del conocimiento y fundamentalmente poner al MAR en la lista de los grandes temas nacionales. (GEMA, 2014, p.17).

---

<sup>10</sup> La Academia del Mar es una asociación civil de carácter científico y sin fines de lucro, fundada en 1995 en la Ciudad de Buenos Aires ([www.academiadelmar.com.ar](http://www.academiadelmar.com.ar)).

El 26 y 27 de noviembre del 2014 se realizó en la ciudad de Mar del Plata el Primer Seminario Internacional de Energías Marinas (SIEMAR)<sup>11</sup> organizado por la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) con el apoyo del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. El seminario contó con la presencia de destacados investigadores y académicos de universidades argentinas y del mundo (Alemania, Brasil, Canadá, Colombia, Corea del Sur, España, Francia, Noruega Portugal y Uruguay) quienes dieron a conocer sus experiencias, conocimientos, estudios e investigaciones sobre las energías marinas. El Segundo Seminario Internacional de Energías Marinas se realizará en septiembre de 2016 en la ciudad de Puerto Madryn.

### **3.1. Sitios de interés**

El extenso litoral marítimo de nuestro país (5.117 km) presenta numeroso y variados escenarios favorables para el aprovechamiento de las energías del mar.

Los principales sitios de interés para aprovechar la energía mareomotriz son: Puerto Rio Gallegos (1.9 GW-4.8 TWh), golfo San José (5 GW-9.4 TWh) y golfo Nuevo (6.5 GW-16.8 TWh). (Multon, 2012).

Las mayores mareas ocurren al noroeste de la provincia de Chubut, en la península de Valdés, conformada por los golfos San José, al norte, (alimentado por el golfo de San Matías), y el golfo Nuevo, al sur, (alimentado por el Océano Atlántico). (Fernández Díez, s.f.a).

La idea de aprovechar la energía de las mareas para reemplazar el uso de carbón, que se había tornado caro de repente, salió a la luz en la Argentina en 1923. El informe argentino, publicado en 1928, preveía no una sino cinco plantas: Deseado, Gallegos, Santa Cruz y San Julián, con la más grande cerca de San José cuya capacidad alcanzaría 1.000 MW. (Charlier & Finkl, 2009).

---

<sup>11</sup> [www.siemar.com.ar](http://www.siemar.com.ar).

El estrecho istmo Carlos Ameghino, de 5 a 7 km de ancho, separa el golfo San José del golfo Nuevo y actúa como un magnífico dique natural, embalsando a un lado y a otro el agua de las pleamares y de las bajamares que se alternan en ambos golfos. La onda de marea, se desplaza de sur a norte con una amplitud de 5,9 m y entre ambos golfos existe un intervalo pleamar-bajamar de 5 horas. Se ha calculado que con



Figura 47. Ubicación de la central en el istmo que separa los golfos de San José y Nuevo (Fernández Díez, s.f.a).

éstos desniveles se podría lograr una generación de energía del orden de 20 GW. Otras propuestas formuladas contemplan el cierre de los golfos San José y Nuevo mediante presas, y su comunicación por medio de un canal a través del istmo donde se ubicaría la central (Fig. 47), que podría generar del orden de 8 GW. (Fernández Díez, s.f.a). La energía de las mareas teórica máxima de San José es de unos 47.200 GWh por año. Una planta de doble efecto en una sola de las cuencas, produciría 16.000 GWh por año. Requeriría un cierre de 13.400 km. La cresta de la presa estaría 12,5 m sobre el nivel del mar. (Charlier & Finkl, 2009).

Ninguna de las propuestas fue concretada, principalmente por razones económicas y el potencial impacto ecológico por tratarse de una zona de procreación de ballenas y otros mamíferos marinos.

Chingotto (2006)<sup>12</sup> hizo una cronología de los numerosos estudios y propuestas sobre energía mareomotriz en la península de Valdez desde 1915 hasta 1986, clasificándolos en: 'POR EL "SI"' a aquellos que son favorables a la explotación de la energía de las mareas en ese sitio (16 trabajos); 'POR EL "NO"' a los estudio que se oponen (6 trabajos). Las conclusiones de Chingotto son:

<sup>12</sup> También reproducido en GEMA (2014).

- 1) Relevar todos los aprovechamientos hidráulicos de ríos probables en el país y cuantificar el costo de su ejecución y potencia probable.
  - 2) Extrapolar la demanda de energía eléctrica en el país en los próximos 20 años.
  - 3) La interrupción de energía generada por la planta mareomotriz hoy no constituye un problema, por la existencia del Despacho Único de Cargas, situado en Rosario, y de la Red Nacional de Interconexión, que podría ampliarse.
  - 4) Sería provechoso optar por una de las soluciones propuestas y construir un modelo a escala para experimentar.
  - 5) Centralizar el manejo del tema en una sola autoridad.
  - 6) Prever la utilización de aparatos de medición modernos y de herramientas de cálculo que nos brinda la informática (computadoras, ordenadoras, clasificadoras, etc.) y continuar con la recopilación de datos sostenidos y preventivos.
  - 7) Prever el impacto ecológico de las obras en la zona: efecto de la presión generada por los embalses sobre las napas freáticas; consecuencia de los trabajos: en la navegación, en la fauna avícola y en los cetáceos y anfibios del área.
  - 8) Control de la turbidez del agua, descargando sedimentos, barros y limo en tierra o en chatas.
  - 9) Llegar a la confección de un "Proyecto Básico" que contenga la documentación técnica y económica que defina la obra y que sea suficiente para el llamado a licitación pública.
  - 10) Prever el sistema de concesión de obra en el cual el concesionario perciba una parte del importe del kwh generado.
  - 11) Dar al tema tratamiento parlamentario, llegando a sancionar una ley que disponga lo necesario para concretarlo.
- Finalmente, el Gobierno Nacional, de acuerdo con toda la información anterior y teniendo en cuenta la situación económica del país, dispondrá la ejecución de tan importante emprendimiento energético, que constituye un desafío para las generaciones que lo lleven a cabo. (p.7).

Otra forma de energía marina abundante en las costas argentinas es la undimotriz. Como se observa de la Fig. 16, la zona sur del país es donde se tiene mayor posibilidad de obtener de energía de las olas con valores importantes.

El primer antecedente del estudio de la energía de las olas en nuestro país, se remonta a 1992 con la publicación del trabajo de Lanfredi *et al.* quienes calcularon la densidad de energías de las olas en cinco lugares a lo largo de la costa de la Provincia de Buenos Aires, utilizando información de acelerómetros (4 años), sensores de presión (1 año) y observaciones visuales (10 años). En la tabla 4 se reproducen los resultados obtenidos.

Es necesario realizar estudios para calcular el potencial energético undimotriz y de corrientes a lo largo de todo el litoral marítimo para determinar los sitios de mayor interés. Uno de los principales inconvenientes para esto es la generalizada falta de instrumentos de medición in situ a lo largo de nuestro litoral marítimo.

Tabla 4. Promedios anuales de energía de las olas media y máxima de cinco lugares de la Prov. de Buenos Aires. (Lanfredi et al., 1992).

Lugar	Energía de las olas (kW/m)	
	Media	Máxima
Mar de Ajó	2,3	8,2
Punta Médanos	5,5	69,0
Pinamar	4,2	18,5
Mar del Plata	4,3	34,2
Puerto Quequén	7,5	61,3

En cuanto a la energía mareomotérmica, si bien las zonas térmicamente favorables son las regiones ecuatoriales y subtropicales, en Argentina podría aprovecharse la energía del gradiente térmico a partir de reservorios geotérmico costeros.

Existe un campo de estudio potencial también en el aprovechamiento de la energía del gradiente salino ya que nuestro país cuenta con numerosas desembocaduras de ríos caudalosos.

### 3.2. Estudios y proyectos actuales

En esta sección se resumen los estudios y proyectos de actualidad sobre el aprovechamiento de energías marinas en nuestro país. La información fue extraída principalmente del Catálogo elaborado por GEMA (2014) y complementada con información obtenida de los sitios web y publicaciones relacionadas.

<b>Proyecto</b>	<b>Análisis de sistema de convertidores fluido-dinámicos de energía renovable para la Patagonia Austral de Argentina</b>
<b>Institución</b>	Universidad Nacional de la Patagonia Austral – Unidad Académica Caleta Olivia (UNPA–UACO)
<b>Autores</b>	Carlos Víctor Manuel Labriola, Cecilia Elizabeth Peralta
<b>Descripción</b>	Se analizaron los recursos oceánicos de las corrientes marinas y undimotriz a escala macro y se desarrollaron modelos de convertidores de energía de las corrientes marinas y de las olas para estudio y posterior dimensionamiento de prototipos de aplicación de dichas fuentes.
<b>URL</b>	<a href="http://ict.unpa.edu.ar/journal/index.php/ICTUNPA/article/view/ICT-UNPA-40-2012">http://ict.unpa.edu.ar/journal/index.php/ICTUNPA/article/view/ICT-UNPA-40-2012</a>

<b>Proyecto</b>	<b>Sistema de convertidores fluido-dinámicos de energía renovable para la Patagonia Austral de Argentina</b>
<b>Institución</b>	Universidad Nacional de la Patagonia Austral – Unidad Académica Caleta Olivia (UNPA–UACO)
<b>Autores</b>	Carlos Víctor Manuel Labriola y otros
<b>Descripción</b>	Este proyecto, continuación del anterior, se propone: la construcción modelos en la gama de 1 a 5 kW de potencia, ensayarlos y dimensionar prototipos en base a los parámetros de ensayo para aplicaciones concretas en la Patagonia; el estudio de los recursos de corrientes marinas y undimotriz a microescala en lugares posibles de aprovechamiento oceánico en base a datos existentes; el ensayo de modelos con posterior desarrollo de prototipos para la obtención de parámetros significativos para el escalado a potencias superiores; integración con otras fuentes de energía renovable: solar y eólica.

<b>Proyecto</b>	<b>Estudio del recurso energético marino en la Patagonia Austral</b>
<b>Instituciones</b>	YPF Tecnología S.A. (Y-TEC), Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Cruz (UTN-FRSC), Centro Nacional patagónico (CENPAT), INVAP Ingeniería S.A., Provincia de Tierra del Fuego, Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC).
<b>Participantes</b>	Alejandro Bellizi, Norma De Cristofaro, Alberto Keitelman, Jorge Pozzo, Andrés Rivas, Gustavo Seisededos, Gastón Segura, Juan P. Zagorodny, Gustavo Zubizarreta.
<b>Descripción</b>	En este proyecto se propone: el estudio del potencial de las costas del Sur de la Provincia de Santa Cruz originadas en las diferencias de energía potencial que producen las mareas y las corrientes; evaluar la factibilidad de pasar a la construcción de prototipos de centrales pequeñas con el objeto de aprovechar esas fuentes de energía y así recabar información sobre su factibilidad técnico-económica; realizar la medición de datos climatológicos y oceanográficos mediante dos boyas especiales, ubicadas en lugares estratégicos: una en la desembocadura del Río Gallegos y la otra en la entrada del Estrecho de Magallanes; el desarrollo y construcción de dos turbinas hidrocínicas, aptas para dichos emplazamientos; el estudio de la durabilidad y corrosión de los materiales a ser usados en las turbinas y el análisis de los posibles impactos ambientales de dichas instalaciones.
<b>URL</b>	<a href="http://www.conicet.gov.ar/2014/12/16/boyas-metocceanicas-para-analizar-el-potencial-energetico-del-mar-argentino/">http://www.conicet.gov.ar/2014/12/16/boyas-metocceanicas-para-analizar-el-potencial-energetico-del-mar-argentino/</a>

<b>Proyecto</b>	<b>Aprovechamiento de energía undimotriz</b>
<b>Institución</b>	Grupo Undimotriz I+D+i de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Buenos Aires (UTN–FRBA)
<b>Participantes</b>	Mario Pelissero, Alejandro Haim, Guillermo Oliveto, Roberto Tula, Mariano Monteneri, Emiliano Cirelli, Federico Muiño, Gustavo De Vita, Francisco Galia, Diego Gagnieri, Macarena Balbiani, Ana Julia Lifschitz, Néstor Ferré.
<b>Descripción</b>	Se diseñó un dispositivo (patentado en 2011) capaz de transformar la energía undimotriz en energía mecánica para luego transformarla en energía eléctrica. El dispositivo tiene la particularidad de que todo el sistema electromecánico se encuentra por encima de la superficie del mar, lo que beneficia su mantenimiento, además de que todo el sistema se encuentra

	<p>sellado y aislado de la corrosión marina. El equipo puede ser instalado off shore (costa afuera), o también en estructuras existentes como escolleras y muelles.</p> <p>Se construyó un generador de imanes permanente y dos prototipos en escala 1:20 y 1:10, este último para ser probado en el canal de olas del Instituto Nacional del Agua en Buenos Aires.</p> <p>Durante 2015, se trabajó en el diseño y desarrollo del equipo a escala 1:1 para su futura instalación en la escollera del Puerto de Quequén. Ver Fig. 48.</p>
<b>URLs</b>	<p><a href="http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz/">http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz/</a></p> <p><a href="http://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje4/4.05.pdf">http://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje4/4.05.pdf</a></p>

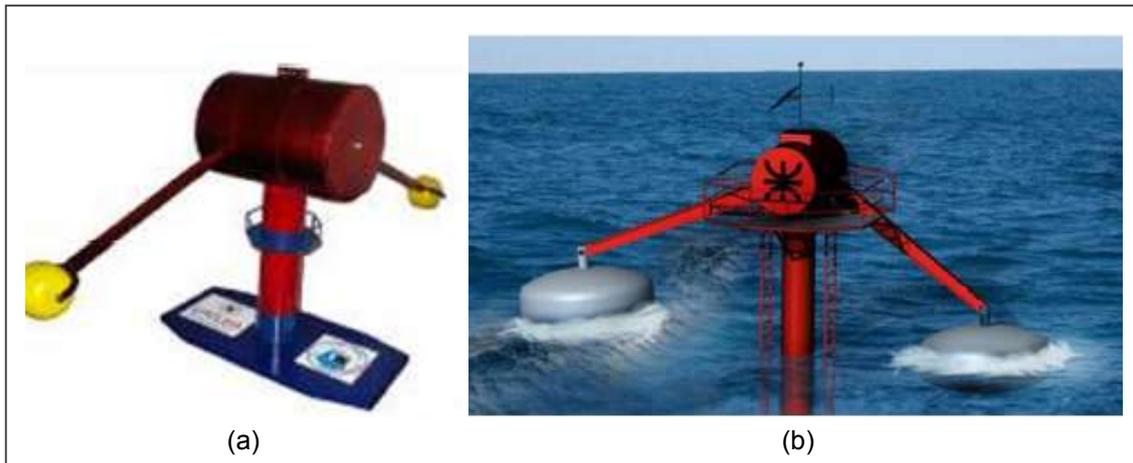


Figura 48. Dispositivo diseñado por el Grupo Undimotriz I+D+i de UTN-FRBA. (a) Fotografía funcional del dispositivo a escala 1:20. (b) Imagen descriptiva de un dispositivo en funcionamiento.

<b>Proyecto</b>	<b>Dispositivo captador de energía de las olas</b>
<b>Institución</b>	Desarrollo privado (Pilar, Prov. de Buenos Aires)
<b>Autores</b>	Javier Themtham, Luis Kayayán y Alfredo Soto.
<b>Descripción</b>	El sistema patentado consiste en aprovechar el movimiento ondulatorio del mar que actúa sobre una boya de libre flotación, sin mecanismos ni partes eléctricas, electrónicas o hidráulicas ancladas al fondo marino. Se ensayaron modelos a escala y verificaron los principios de funcionamiento del sistema mediante el empleo de un simulador de ola simple que se construyó para tal fin. El objetivo es abastecer energéticamente a costaneras o muelles.
<b>URL</b>	<a href="https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&amp;v=r8cgayNacF4">https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&amp;v=r8cgayNacF4</a>

<b>Proyecto</b>	<b>Módulo convertidor de energía de olas</b>
<b>Institución</b>	Desarrollo privado
<b>Autor</b>	Alberto Vilar
<b>Descripción</b>	El objetivo es desarrollar un mecanismo lo suficientemente flexible para manejar la totalidad de las características del recurso, transformando la energía de éstas en presión, dentro de un circuito hidráulico que moverá una turbina acoplada a un generador. Se recurre a un modelo convertidor que transforma la energía undimotriz (cinética y potencial simultáneamente) en energía de presión en un recipiente. La presión, regulada, ingresa a un sistema hidráulico convencional turbina/generador donde finaliza la etapa de conversión. Ver Fig. 49.

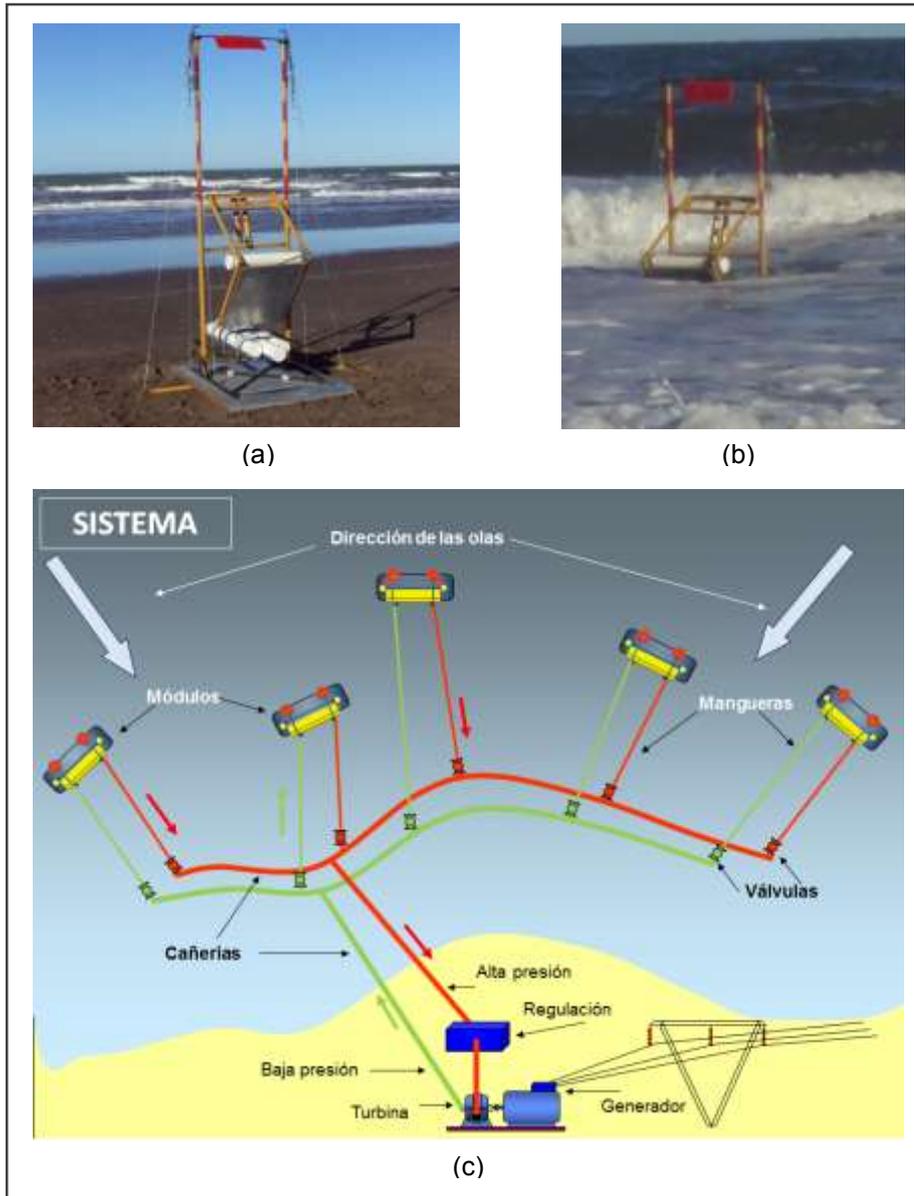


Figura 49. Módulo convertidos de energía de olas. (a) prototipo escala. (b) prueba de campo del prototipo. (c) sistema de dispositivos interconectados. (Vilar, 2014).

<b>Estudio</b>	<b>Panorama actual del recurso mareomotriz en el mundo y el desafío del aprovechamiento del estuario de Bahía Blanca</b>
<b>Institución</b>	Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Bahía Blanca
<b>Autores</b>	Oswaldo Ruffo, Raúl Dante Triventi, Patricia María Benedetti.
<b>Descripción</b>	Se brinda un panorama a nivel global del aprovechamiento del recurso clasificado de acuerdo a la tecnología utilizada; se propone encarar el estudio del aprovechamiento de las mareas presentes en el Estuario de Bahía Blanca y se dan las bases para el diseño de un dispositivo adaptado específicamente a este recurso.
<b>URL</b>	<a href="http://www.cibb.org.ar/congresoenergia/archivos/Trabajos_Congreso_Energias_Sustentables.pdf">http://www.cibb.org.ar/congresoenergia/archivos/Trabajos_Congreso_Energias_Sustentables.pdf</a> (p.33-44).

<b>Proyecto</b>	<b>Columna de agua oscilante (CAO) y Turbina axial de flujo reversible (TAFRE)</b>
<b>Instituciones</b>	Universidad Nacional de La Plata, Instituto Superior de Ingeniería de Toulon y Var (ISITV –Francia)
<b>Autores</b>	Camilo Rodriguez, Daniel Fruman, Guillermo Céspedes, Carlos Tedesco.
<b>Descripción</b>	<p>A principios de 1994, el grupo de la cátedra de Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas concibió la idea de ensayar un modelo de Columna de Agua Oscilante (CAO) y Turbina Axial de Flujo Reversible (TAFRE) en un canal de olas de 1,50 m de ancho y 1 m de profundidad del Laboratorio Guillermo C. Céspedes de la Universidad.</p> <p>La finalidad de la TAFRE es aprovechar la energía generada por el movimiento de las olas del mar, mediante el desarrollo de una turbina que genere energía mediante la rotación producida por el movimiento de flujo y reflujos de la marea. Los exhaustivos ensayos, realizados en un laboratorio francés en 2003, corroboraron el funcionamiento del modelo e hicieron factible un ofrecimiento que contemplaba la instalación de la turbina en la isla de Córcega, lo que luego se frustró por razones externas relativas a la política de ese lugar. En nuestro país podría utilizarse al sur de las costas de Mar del Plata.</p>
<b>URLs</b>	<a href="http://blogs.periodistadigital.com/aeu.php/2006/11/25/turbina_axial_de_flujo_reversible">http://blogs.periodistadigital.com/aeu.php/2006/11/25/turbina_axial_de_flujo_reversible</a> <a href="http://www.enernews.com/nota/213148/turbina-argentina-para-la-energia-mareomotriz">http://www.enernews.com/nota/213148/turbina-argentina-para-la-energia-mareomotriz</a>

<b>Proyecto</b>	<b>Sistema de generación de energías en base a las mareas oceánicas</b>
<b>Institución</b>	Desarrollo privado (Puerto Deseado, Prov. de Santa Cruz)
<b>Autor</b>	Patricio Bilancioni
<b>Descripción</b>	<p>A diferencia de los tradicionales dispositivos mareomotrices, este sistema no requiere turbinado y funciona las 24 horas. Tampoco requiere ningún tipo de combustible para ponerse en marcha, no produce impacto visual ni ambiental.</p> <p>El sistema puede instalarse sobre tierra firme en cualquier lugar de la costa con mareas adecuadas y funciona sobre la base de un reservorio que se llena durante el ascenso de la marea. En el reservorio habría dos cubas, montadas sobre cilindros oleohidráulicos. Una estaría en el piso y la otra en el borde del agua. Al llenarse la superior, elevaría la cuba vacía. Al descender la que está llena, hace correr un flujo de aceite a presión que mueve un motor hidráulico, produciendo la electricidad. Ese aceite que pasó por el motor, no sale nunca del circuito, en un proceso que se repite las 24 horas, a diferencia de los sistemas comunes que generan energía 12 horas diarias.</p>
<b>URL</b>	<a href="http://www.apuaye.org.ar/imagenes/Revista_Unica_117web.pdf">http://www.apuaye.org.ar/imagenes/Revista_Unica_117web.pdf</a> (p.42-46)

<b>Proyecto</b>	<b>Desarrollo de turbina hidrocínética para aprovechamiento de las corrientes de mareas</b>
<b>Institución</b>	INVAP
<b>Autor</b>	Alfredo Carlos De Nápoli
<b>Descripción</b>	Esta turbina o generador sumergido cuenta con un canalizador de flujo que acelera localmente la corriente de agua para lograr velocidades adecuadas para generar energía.

	El objetivo final de INVAP es ofrecer turbinas comerciales de distintas potencias, en un rango bastante amplio, de acuerdo a cada necesidad y a las características de los diferentes cursos de agua aprovechables, con la intención de llegar en un futuro cercano a máquinas que superen 1MW para ser utilizados en aplicaciones mareomotrices.
<b>URL</b>	<a href="http://www.invap.com.ar/es/2014-05-12-14-44-54/proyectos/turbina-hidrocinetica.html">http://www.invap.com.ar/es/2014-05-12-14-44-54/proyectos/turbina-hidrocinetica.html</a>

<b>Proyecto</b>	<b>Proyectos de energía mareomotriz en la cuenca atlántica de la Provincia de Santa Cruz</b>
<b>Institución</b>	Energía Argentina S.A. (ENARSA)
<b>Descripción</b>	ENARSA firmó un Memorando de Entendimiento, Cooperación y Confidencialidad, con la empresa rusa RUSHYDRO, la principal compañía rusa de generación de energía y la segunda en el mundo en las capacidades instaladas de generación hidroeléctrica, siendo además la compañía líder en Rusia en la producción de energía procedente de fuentes renovables. Se comenzaron los estudios preliminares para el desarrollo de proyectos de energía mareomotriz en la cuenca atlántica de la Provincia de Santa Cruz, una de las zonas del mundo con mayor amplitud de mareas. Se han analizado y visitado, las posibles localizaciones de los proyectos y recolectando datos necesarios para los estudios de pre-factibilidad correspondientes. Se prevé un potencial de generación eléctrica de aproximadamente 1000 MW entre los tres diferentes puntos visitados en el estuario del río Santa Cruz, el estuario del río Gallegos y el de Puerto Deseado. Se prevé en la primera fase del diseño del proyecto la construcción de una pequeña planta de energía mareomotriz comercial piloto, que será la primera planta en América del Sur, pudiendo medir así la eficiencia de dicha tecnología.
<b>URL</b>	<a href="http://www.enarsa.com.ar/index.php/es/energiasrenovables/395-energias-undimotriz-y-mareomotriz">http://www.enarsa.com.ar/index.php/es/energiasrenovables/395-energias-undimotriz-y-mareomotriz</a>

#### 4. Aspectos Ambientales

Desde el punto de vista ambiental, la principal ventaja del aprovechamiento de las energías renovables marinas, respecto del aprovechamiento de las fuentes no renovables, es el hecho de que en general no produce gases de efecto invernadero<sup>13</sup> ni residuos peligrosos.

Asimismo, se espera que la conversión de energías oceánicas en energía eléctrica no tenga impactos ambientales negativos significativos. No obstante, bajo ninguna circunstancia deben ser omitidas las buenas prácticas ambientales.

<sup>13</sup> La excepción sería el aprovechamiento de la energía térmica oceánica en la cual se libera a la atmósfera cierta cantidad de CO<sub>2</sub>. Esto se describe más adelante en la sección Plantas OTEC.

Estos emprendimientos, al igual que otros emprendimientos tecnológicos de gran escala, deben ser sometidos a Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) previas a su realización.

Estas evaluaciones permiten identificar la naturaleza, alcance e intensidad de los impactos (positivos y negativos) en las diferentes etapas del proyecto (construcción, operación y desmantelamiento). Asimismo, permiten diseñar y planificar de forma anticipada, las acciones de mitigación de los impactos negativos y los programas de monitoreo y control ambiental.

Tabla 3. Resumen de factores ambientales a ser tenidos en cuenta en los estudios ambientales de línea de base. (Huertas-Olivares & Norris. 2008).

<b>Sistema</b>	<b>Factores</b>
Abiótico	Geología y factores que intervienen en los procesos costeros
	Calidad del agua
	Calidad del aire
Biótico	Bentos
	Peces
	Mamíferos marinos
	Otra fauna acuática
	Flora acuática
	Ecología terrestre
	Aves
Socio-económico	Uso del suelo y del mar
	Arqueología y recursos culturales
	Socio-económicos
	Paisaje terrestre y marino

Los impactos dependerán del tipo de energía que se aprovechará, la tecnología a utilizar y, el lugar de emplazamiento y su ecología. En la tabla 3 se resumen de forma general, los potenciales factores ambientales que necesitan ser estudiados en este tipo de proyectos. La primera columna corresponde al sistema ambiental y la segunda columna referencia los factores ambientales que se consideran significativos.

Desafortunadamente, el conocimiento ecológico de la biota marina es relativamente pobre comparado con el conocimiento de los ecosistemas terrestres. Por otra parte, los estudios en ambientes marinos, especialmente en alta mar y en aguas profundas son costosos y requieren tecnologías submarinas

avanzadas. En consecuencia, la investigación de los efectos positivos y negativos en el medio marino es un reto y requiere la cooperación entre ecólogos e ingenieros. (Langhamer *et al.*, 2010).

#### **4.1. Plantas mareomotrices**

La tecnología de conversión de energía mareomotriz se considera madura, pero, como con todos los grandes proyectos de ingeniería civil, existen una serie de riesgos técnicos y ambientales a considerar. Un riesgo ambiental importante se relaciona con los cambios en los niveles de agua que modifican las corrientes y el transporte de sedimentos y depósitos (Centre for Renewable Energy Sources, 2006).

El aprovechamiento de la energía mareomotriz requiere de la construcción de una barrera para obtener una diferencia de altura del nivel del agua. Durante la operación, (i) el nivel de agua en la cuenca está siempre por encima de la marea baja y siempre por debajo de la marea alta, (ii) las tasas de flujo, tanto de la marea entrante como de la saliente se reducen en la cuenca, y (iii) las olas son detenidas por la barrera. Estos factores mecánicos pueden causar que las áreas de marismas expuestas se reduzcan, reduciendo también de manera significativa el alimento disponible para las aves -generalmente incluyendo las aves migratorias que pasan habitualmente por dichos hábitats especiales-. La barrera genera un gran impacto visual. No obstante, ésta puede ser usada como un viaducto para transporte o para ubicar otras construcciones, e.g. turbinas eólicas. (Twidell & Weir, 2006).

La alteración del régimen hidrodinámico implica una menor dispersión de efluentes, influyendo en el transporte de sedimentos. Para hacer una previsión de los cambios físicos inducidos en el estuario, es necesario conocer las distribuciones de la salinidad, turbidez, corrientes contaminantes y nutrientes. Las partículas en suspensión reducen la penetración de la luz solar, lo que puede afectar negativamente a la vida natural del estuario. (Fernández Díez, s.f.a).

Entre los impactos positivos puede mencionarse que: el caudal del río puede ser controlado y evitar inundaciones; se incrementa el acceso de los

barcos a los puertos de la cuenca; tener la profundidad y el caudal de la cuenca controlados permite actividades de ocio como la navegación. (Twidell & Weir, 2006).

Estudios realizados con posterioridad a la construcción de la planta de Rance determinaron que el mayor cambio había sido la desaparición de algunas especies durante la etapa de construcción y la colonización posterior de otras. Otros cambios medioambientales que se produjeron son: la creación de corrientes de alta velocidad cerca de las esclusas y sitio de máquinas en cuya proximidad de vez en cuando las mareas se producen de repente, desaparición de bancos de arena, disminución de la amplitud de las mareas, cambio en los patrones de navegación. En general, la planta mareomotriz de Rance ha afectado el medio ambiente menos de lo que lo hacen las plantas hidroeléctricas. (Charlier & Finkl, 2009).

#### **4.2. Dispositivos offshore (undimotriz y corrientes marinas)**

A continuación se describen las cuestiones que requieren especial consideración en el aprovechamiento de energía undimotriz o de corrientes marinas con dispositivos offshore. En varias de estas cuestiones puede aprovecharse el conocimiento adquirido en el aprovechamiento de la energía eólica offshore la cual cuenta con un desarrollo de la tecnología más maduro.

**Hábitat marino:** puede verse afectado positiva o negativamente. Las superficies artificiales por encima de agua podrían proporcionar hábitat para las focas y los leones marinos o zonas de nidificación de aves. Las superficies submarinas de dispositivos proporcionarían sustratos para diferentes sistemas biológicos, que podrían ser un complemento positivo o negativo a los hábitats naturales existentes. Con algunos dispositivos convertidores, puede ser necesario controlar el crecimiento de organismos marinos en algunas superficies. (U.S. Department of the Interior, 2006).

El hecho de que las nuevas estructuras sean atractivas para los organismos marinos sésiles puede convertirse en una carga técnica, conocida como contaminación biológica marina. Desde una perspectiva biológica esto puede ser

positivo ya que estos arrecifes artificiales contribuyen a una mayor riqueza y diversidad en el área, pero desde el punto de vista técnico resulta costoso para los proyectos offshore debido al aumento en el mantenimiento o incluso el desgaste mecánico no deseado que requiere medidas anti incrustantes costosas. Los principales organismos incrustantes en boyas y líneas de boyas son mejillones, percebes, algas, hidrozoos, gusanos de tubo y estrellas de mar. (Langhamer *et al.*, 2010).

El hábitat marino puede verse perturbado negativamente durante la *instalación* y el *desmantelamiento*. El aseguramiento de los dispositivos al fondo del océano y la instalación de los cables producen remoción de sedimentos. El desmantelamiento de las estructuras pueden perturbar a los organismos que se han adaptado a la presencia de las mismas. (U.S. Department of the Interior, 2006). La turbidez del agua generada en la fase de instalación puede afectar temporalmente a los productores primarios, impactando negativamente en el recurso bentónico submareal y por consiguiente, en el recurso alimentario de los peces. (Huertas-Olivares & Norris, 2008). Los huevos, algas y organismos bentónicos pueden quedar enterrado y suprimidos. La cantidad y concentración de partículas suspendidas producto de la agitación de sedimentos varía de acuerdo a la hidrodinámica y la topografía. (Langhamer *et al.*, 2010).

Otra preocupación es el riesgo de colisión de mamíferos marinos con los dispositivos. (Huertas-Olivares & Norris, 2008). Es poco probable que las colisiones con dispositivos unidimensionales resulten mortales. Sin embargo, las turbinas sumergidas para el aprovechamiento de la energía de corrientes marinas, tienen el potencial de ser más perjudiciales, dependiendo principalmente de la velocidad de rotación y el diseño de la turbina. (Langhamer *et al.*, 2010).

**Emisiones tóxicas:** en sistemas de trabajo con fluidos hidráulicos puede ser motivo de preocupación las fugas o derrames accidentales de los líquidos utilizados si estos son tóxicos para la biota. Cuando no puedan seleccionarse fluidos no tóxicos, cualquier impacto puede ser minimizado mediante planes de respuesta a derrames adecuados y características de diseño de contención secundaria. El uso de biosidas para controlar el crecimiento de organismos

marinos también puede ser una fuente de emisiones tóxicas. (U.S. Department of the Interior, 2006).

**Conflicto con otros usuarios del espacio marítimo:** si la selección de sitios para la instalación de los dispositivos no es cuidadosa, pueden ocurrir conflictos con otras actividades como la navegación comercial, la pesca y la navegación recreativa (U.S. Department of the Interior, 2006). Independientemente de la técnica de aprovechamiento, las instalaciones offshore obstaculizarán la pesca comercial en esa zona. Desde el punto de vista de la conservación de la naturaleza, esto será positivo ya que las zonas de veda son una creciente demanda por parte de la mayoría de los conservacionistas y ecologistas debido a la sobreexplotación de los mares. (Langhamer *et al.*, 2010).

**Impacto visual:** depende del tipo de dispositivo, del tamaño de las partes no sumergidas y de la distancia a la línea costera. Los dispositivos OWCs y los de rebose (*overtopping*) generalmente tienen un francobordo más alto y son los más visibles. Los convertidores offshore requieren dispositivos auxiliares de advertencia para la navegación, tales como luces, señales de sonido, reflectores de radar, y pintura contrastante para el día (U.S. Department of the Interior, 2006). Los convertidores sumergidos y los flotantes amarrados a una masa sumergida con bajo francobordo no son visibles desde la costa, o solo son visibles excepcionalmente con clima calmo y despejado. (Huertas-Olivares & Norris, 2008).

**Ruidos:** el aire que es aspirado y expulsado en dispositivos OWC es probablemente la mayor fuente de ruido sobre el agua. Algunos ruidos submarinos son producidos por dispositivos con turbinas, bombas hidráulicas, y otras partes móviles. La frecuencia del ruido también puede ser una consideración en la evaluación de los impactos sonoros. (U.S. Department of the Interior, 2006).

Durante la operación, el ruido y las vibraciones de los dispositivos sumergidos pueden perturbar a algunos mamíferos marinos y peces, dependiendo del rango de frecuencias. (Huertas-Olivares & Norris, 2008). Un gran número de especies de diferentes taxones (cetáceos, pinnípedos, teleósteos, crustáceos) utilizan sonidos bajo el agua para la interacción, como la

comunicación, la ecolocalización, la búsqueda de presas, la búsqueda de compañeros y la evasión de depredadores. (Langhamer *et al.*, 2010).

La producción de ruido por la perforación y colocación durante la construcción, el tendido de cables, así como el tráfico de barcos puede dañar el sistema acústico de especies dentro de un radio de 100 m desde la fuente y los organismos pueden así evitar estas áreas durante ese tiempo. (Langhamer *et al.*, 2010).

**Reducción de la altura de olas:** el impacto en las características de las olas sólo se observa hasta una distancia de entre 1 y 2 km del dispositivo WEC y en la dirección del desplazamiento de la onda. Por lo tanto, si los dispositivos se encuentran a mayor distancia de la costa no debería haber un impacto significativo en tierra. Sin embargo, la disminución de altura de ola podría ser un impacto significativo para surfistas. (U.S. Department of the Interior, 2006).

#### **4.3. Dispositivos onshore y nearshore (undimotriz)**

Huertas-Olivares y Norris (2008) mencionan las siguientes cuestiones que deben considerarse cuando el aprovechamiento se realiza mediante dispositivos instalados en la línea de costa o cerca de ella:

- El impacto de la instalación suele ser mayor que en el caso de los dispositivos offshore si se requiere excavación en la línea de costa.
- Las turbinas de los dispositivos OWC pueden emitir niveles incómodos de ruido, así como vibraciones en el agua, los cuales pueden perturbar a la fauna silvestre. Si bien pueden colocarse sistemas supresores de ruido, este es probablemente el impacto más significativo relacionado con las plantas OWC.
- Impacto visual. Si bien es tentador etiquetarlo como negativo, existe la posibilidad de que se convierta en un impacto positivo si se encuentra en las zonas donde puede haber un interés local o turístico importante.
- Si se instalan en pequeñas comunidades de islas remotas, un impacto positivo es la reducción de la dependencia de fuentes de energía externas al área.

Un efecto usualmente beneficioso de los esquemas nearshore es que pueden disminuir la erosión costera al modificar la actividad de las olas. (Brooke, 2003).

No se espera un impacto adverso significativo en la pesca si se evitan las zonas costeras sensibles. De todos modos, el diálogo con pescadores y otras partes interesadas debe formar parte del proceso consultivo previo a la implementación de cualquier proyecto. (Brooke, 2003).

#### **4.4. Plantas OTEC**

El desarrollo comercial de la energía térmica marina puede potencialmente afectar la atmósfera, el ambiente terrestre, el ecosistema marino, y varias actividades humanas en las proximidades de las instalaciones y los sitios de operación. Los impactos medioambientales netos del desarrollo comercial de este tipo de energía se esperan que sean mínimos comparados con los impactos de la producción de energía fósil y nuclear; sin embargo, hay incertidumbres respecto de la extracción y redistribución de grandes volúmenes de agua marina que deben ser evaluadas. (U.S. Department of Commerce, 1981).

Twidell & Weir (2006) enumeran los siguientes principales impactos medioambientales de las tecnologías OTEC:

- eficiencias termodinámicas pequeñas relacionadas con las diferencia de temperatura pequeñas entre el agua de la superficie y el agua de las profundidades;
- fugas y la probable contaminación de la planta, especialmente de los fluidos de trabajo y productos químicos anti incrustantes;
- grandes volúmenes de agua marina bombeada;
- mezcla forzada de agua profunda rica en nutrientes (nitrato, fosfato y silicato) con agua de la superficie irradiada por el sol;
- ubicación de la planta.

Fernández Díez (s.f.f) advierte que la construcción de estas plantas y la colocación de tuberías en las aguas costeras pueden causar daños en los arrecifes y ecosistemas marinos cercanos.

La construcción de plantas OTEC en tierra puede requerir la destrucción de hábitats terrestres existentes y puede tener efectos locales en los niveles de ruido, calidad del aire, y la calidad estética de la zona. Estos impactos son similares a aquellos relacionados con la construcción de plantas de energía convencionales. (U.S. Department of Commerce, 1981).

Los efectos biológicos totales de la liberación de grandes cantidades de agua fría rica en nutrientes en el ambiente más cálido de la superficie no se conocen completamente. Los efectos pueden ser o no ser deseables, y tienen que ser estimados a partir de ensayos a pequeña escala y modelos informáticos. Un despliegue de plantas OTEC a gran escala (por ejemplo, 100 estaciones a 10 km de separación) haría que el afloramiento de nitrato se eleve a una concentración que se encuentra naturalmente frente a Perú, donde las poblaciones de peces son mayores. En consecuencia, los impactos inmediatos no necesariamente son negativos para la humanidad, y ciertamente la posibilidad de enriquecer la pesca con nutrientes de aguas profundas se considera como un impacto potencialmente positivo. (Twidell & Weir, 2006).

El agua fría del mar procedente de los procesos mareomotérmicos puede tener diversos usos adicionales: como acondicionamiento de aire en edificios, alimentación de peces, crustáceos, algas y otras plantas marinas que encuentran en estas aguas profundas con muchos nutrientes (acuicultura). Otra ventaja significativa es que estas plantas, además de producir electricidad, pueden producir directamente agua potable, lo cual es muy conveniente en islas donde el agua potable escasea. (Fernández Díez, s.f.f).

Cuando el agua fría de las profundidades alcanza la superficie del océano, una proporción de CO<sub>2</sub> disuelto se libera a la atmósfera. Si se emite 50% del exceso de CO<sub>2</sub>, la tasa sería de alrededor de 1 kgkW<sup>-1</sup> e, en comparación con alrededor de 8 kgkW<sup>-1</sup> e de la generación de electricidad por combustibles fósiles. Sólo si la energía OTEC producida se utiliza para disminuir el uso de

combustibles fósiles, las emisiones globales de CO<sub>2</sub> son reducidas. (Twidell & Weir, 2006).

#### **4.5. Plantas PRO y RED**

Las instalaciones pueden estar situadas bajo tierra o en edificios bajos y no son importantes fuentes de ruido. Durante el proceso, ni el agua ni la sal se consumen, y no se producen óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ni monóxido de carbono (CO), ni dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (Kempener & Neumann, 2014).

En los alrededores directos de las plantas, podrían producirse zonas de turbulencia o de recirculación, lo que aumentaría el riesgo para los organismos. Para evitar esto, así como la posibilidad de este riesgo en las entradas de agua, el diseño de la planta debe adaptarse hidrodinámicamente. Es probable que la planta atraiga a los peces como resultado de la redistribución de nutrientes. El saldo neto de este impacto debe ser evaluado y en lo posible, deben diseñarse medidas de mitigación, las cuales pueden estar inspiradas en las experiencias de la energía hidroeléctrica que tiene efectos comparables. (Kempener & Neumann, 2014).

Los científicos ambientales están preocupados por el hecho de que las membranas filtren el plancton, peces y larvas de mejillón, lo cual podría tener un impacto en la vida marina, la biodiversidad y la futura viabilidad económica de los agricultores de mejillón. (Martens, 2015).

### **5. Conclusiones**

Las energías marinas han despertado el interés de muchos gobiernos y varias empresas del sector energético que vislumbran en ellas una opción prometedora para el abastecimiento energético libre de emisiones contaminantes y a la vez disminuir el consumo de energías fósiles.

Las tecnologías se encuentran en distintos grados de desarrollo, siendo la energía mareomotriz la que cuenta con mayor madurez. Las otras formas de

energía se encuentran en general en fase de investigación y desarrollo, siendo experimentadas con prototipos a diferentes escalas.

Si bien la mayoría de las instalaciones son experimentales, existiendo aún importantes desafíos por superar, también existen ya algunas plantas comerciales de magnitudes importantes y numerosas plantas piloto que han demostrado la viabilidad del aprovechamiento de las energías del mar en todas sus formas.

La elevada inversión y costos iniciales, así como los importantes costos de operación y mantenimiento que tienen las tecnologías aún en fase de desarrollo, irán decreciendo en el tiempo a medida que éstas sean perfeccionadas (tal como ocurrió con otras energías renovables como la eólica y la solar). La investigación, desarrollo e innovación son indispensables para lograr el afianzamiento y la disminución progresiva de los costos, hasta conseguir rentabilidad y eficiencia.

Los proyectos deben realizarse teniendo en cuenta las cuestiones medioambientales y de conservación en todas sus etapas, construcción, operación y desmantelamiento.

En Argentina tenemos un litoral marítimo muy extenso, con un gran potencial energético y por lo tanto hay mucho trabajo por hacer, desde estudiar el recurso y determinar los sitios más favorables contemplando las limitaciones ecológicas, hasta desarrollar tecnología y construir prototipos y plantas piloto.

Si en nuestro país se pudiera calcular el potencial del recurso con mayor precisión, respaldado por datos medidos in situ, aquellos sitios de gran potencial serían de interés para atraer inversiones del sector privado nacional e internacional.

Nuestro país necesita diversificar su matriz energética, aumentando la generación de energías renovables, no sólo para dar cumplimiento al compromiso global de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también para lograr la seguridad e independencia energética del país. En este contexto, las energías marinas son una opción interesante para investigar y desarrollar ya que de ellas podrían obtenerse importantes beneficios, no solo ambientales, sino también socio-económicos, como la creación de nuevas

fuentes de trabajo asociadas al desarrollo de una nueva industria y su cadena de suministros.

## 6. Referencias Bibliográficas

Alcock, J. (24 de abril de 2013). *Agucadoura Wave Farm, Portugal*. Recuperado el 20 de octubre de 2015, de The Green Age: <http://www.thegreenage.co.uk/?s=pelamis>

Barstow, S., Mørk, G., Mollison, D., & Cruz, J. (2008). The Wave Energy Resource. En J. Cruz (Ed.), *Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives*. Alemania: Springer.

Benalia, A., Benbouzid, M., & Lagoun, M. (2010). Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status. *2010 IEEE International Energy Conference*, 636-641.

Brooke, J. (2003). *Wave Energy Conversion*. Elsevier.

Business Engineering Ltd. (2005). *Stingray Tidal Stream Energy Device - Phase 3*. Recuperado el 15 de septiembre de 2015, de [http://ukerc.rl.ac.uk/pdf/DTI\\_T06002300000\\_Stingray\\_Phase\\_3.pdf](http://ukerc.rl.ac.uk/pdf/DTI_T06002300000_Stingray_Phase_3.pdf)

Centre for Renewable Energy Sources. (2006). *Ocean Energy Conversion in Europe - Recent Advancement and Prospects*. Pikermi, Grecia.

Charlier, R., & Finkl, C. (2009). *Ocean Energy. Tide and Tidal Power*. Berlin, Alemania: Springer. doi:10.1007/978-3-540-77932-2

Chingotto, M. R. (2006). Energía Mareomotriz ¿Sí? ¿Dónde? ¿No? ¿Por qué? Conclusiones. *Boletín del Centro Naval*(813), 101-107. Recuperado el 29 de noviembre de 2015, de <http://www.centronaval.org.ar/boletin/BCN813/813chingotto.pdf>

Cruz, J. (2008). Introduction. En J. Cruz (Ed.), *Ocean Wave Energy Conversion. Current Statud and Future Perspectives*. Alemania: Springer.

- European Renewable Energy Council. (2010). *Renewable Energy in Europe: Markets, trends and technologies* (Segunda ed.). Londres y Washington DC, Reino Unido y Estados Unidos: Earthscan.
- Fernández Díez, P. (s.f.a). *I.-Energía Mareomotriz*. Recuperado el 28 de junio de 2015, de Biblioteca sobre Ingeniería Energética: <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/mar/PDFs/01Mareas.pdf>
- Fernández Díez, P. (s.f.b). *II.-Energía de las corrientes marinas*. Recuperado el 28 de junio de 2015, de Biblioteca sobre Ingeniería Energética: <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/mar/PDFs/02Corrientes.pdf>
- Fernández Díez, P. (s.f.c). *III.-Energía de las Olas*. Recuperado el 28 de junio de 2015, de Biblioteca sobre Ingeniería Energética: <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/mar/PDFs/01Olas.pdf>
- Fernández Díez, P. (s.f.d). *IV.-Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*. Recuperado el 28 de junio de 2015, de Biblioteca sobre Ingeniería Energética: <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/mar/PDFs/02Olas.pdf>
- Fernández Díez, P. (s.f.e). *V.-Técnicas que aprovechan la energía de las olas (II)*. Recuperado el 28 de junio de 2015, de Biblioteca sobre Ingeniería Energética: <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/mar/PDFs/03Olas.pdf>
- Fernández Díez, P. (s.f.f). *VI.-Energía Mareomotérmica*. Recuperado el 28 de junio de 2015, de Biblioteca sobre Ingeniería Energética: <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/mar/PDFs/06Termicamarina.pdf>
- GEMA. (2014). *Catálogo Energías del Mar 2014*. Academia del Mar, Grupo de Interés en Energías del Mar Argentino, Buenos Aires.
- Heath, T. (2008). LIMPET. En J. Cruz (Ed.), *Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives*. Alemania: Springer.

- Huertas-Olivares, C., & Norris, J. (2008). Environmental Impact Assessment. En J. Cruz (Ed.), *Ocean Wave Energy. Current Status an Future Perspectives*. Reino Unido: Springer.
- International Energy Agency. (2015). *Energy and climate Change. World Energy Outlook Special Report*. París.
- Jara Tirapegui, W. (2006). *Introducción a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC)*. Santiago de Chile, Chile.
- Kempener, R., & Neumann, F. (2014). *Salinity Gradient Energy Technology Brief*. International Renewable Energy Agency (IRENA). Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de [http://www.irena.org/documentdownloads/publications/salinity\\_energy\\_v4\\_web.pdf](http://www.irena.org/documentdownloads/publications/salinity_energy_v4_web.pdf)
- Kernan, A. (29 de septiembre de 2015). *Salinity Gradient Power Quietly Approaching Cost-Competitiveness*. Recuperado el 16 de noviembre de 2015, de Leonardo Energy: <http://www.leonardo-energy.org/blog/salinity-gradient-power-quietly-approaching-cost-competitiveness>
- Korea Water Resources Corporation. (2015). *Sihwa-Lake Tidal Power Plant Projects*. Recuperado el 20 de agosto de 2015, de K-water: [http://english.kwater.or.kr/eng/busi/project03Page.do?s\\_mid=1192](http://english.kwater.or.kr/eng/busi/project03Page.do?s_mid=1192)
- Lanfredi, N., Pousa, J., Mazio, C., & Dragani, W. (1992). Wave-power potential along the coast of the province of Buenos Aires, Argentina. *Energy*, 17(11), 997-1006.
- Langhamer, O., Haikonen, K., & Sundberg, J. (2010). Wave power—Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1329-1335. doi:10.1016/j.rser.2009.11.016
- Marine Current Turbines Ltd (MCT). (s.f.). *Marine Current Turbines. An Atlantis Company*. Recuperado el 15 de septiembre de 2015, de <http://www.marineturbines.com/>

- Martens, E. (13 de junio de 2015). *Blue Energy: The Never-Ending Energy Source*. Recuperado el 29 de noviembre de 2015, de MSLGROUP Critical Conversations: <http://blog.mslgroup.com/blue-energy-the-never-ending-energy-source/>
- Multon, B. (2012). *Marine Renewable Energy Handbook*. Reino Unido y Estados Unidos: ISTE Ltd. y John Wiley & Sons, Inc.
- Nijmeijer, K., & Metz, S. (2010). Salinity Gradient Energy. En *Sustainability Science and Engineering* (Vol. 2, págs. 95-138). Países Bajos: Elsevier. doi:DOI10.1016/S1871-2711(09)00205-0
- Núñez Rivas, L. R. (2012). El aprovechamiento de las energías renovables marinas como opción tecnológica de futuro. *Revista Economía Industrial*(386), 99-108.
- Okinawa Prefecture. (s.f.). *The Okinawa Prefecture Ocean Thermal Energy Conversion Power Demonstration Project*. Recuperado el 30 de agosto de 2015, de OTEC Okinawa: <http://otecokinawa.com/en/Project/index.html>
- OTEC foundation. (23 de agosto de 2015). *World's largest OTEC plant connected to grid*. Recuperado el 30 de agosto de 2015, de OTEC News: <http://www.otecnews.org/2015/08/worlds-largest-otec-plant-connected-to-grid/>
- Power Technology. (s.f.a). *Paimpol-Brehat Tidal Farm, France*. Recuperado el 15 de septiembre de 2015, de Power Technology: <http://www.power-technology.com/projects/paimpol-brehat-tidal-farm/>
- Power Technology. (s.f.b). *Mutriku Wave Energy Plant, Spain*. Recuperado el 19 de octubre de 2015, de Powwer-technology.com: <http://www.power-technology.com/projects/mutriku-wave/>
- Power Technology. (s.f.c). *Statkraft Osmotic Power Plant, Norway*. Recuperado el 14 de noviembre de 2015, de Power Technology: <http://www.power-technology.com/projects/statkraft-osmotic/>

- Prado, M. (2008). Archimedes Wave Swing (AWS). En J. Cruz (Ed.), *Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives*. Alemania: Springer.
- Sarmiento, A., Neumann, F., & Brito e Melo, A. (2008). Pico – European Pilot Plant. En J. Cruz (Ed.), *Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives*. Alemania: Springer.
- Stenzel, P., & Wagner, H. (6 de octubre de 2010). *Osmotic power plants: Potential analysis and site criteria*. Recuperado el 9 de noviembre de 2015, de International Conference on Ocean Energy: <http://www.icoe-conference.com/documents/Y2tVaHVInjlxWS9WM2VuRjdJcWhWTUpTVFp3OVcvOGU5VnJLzk5U0FFQT18YzUwZTQ3ZDFmMDFkMDQxN2VhYjgwOWJkODI1NmI2N2I/>
- Tedd, J., Friis-Madsen, E., & Kofoed, J. (2008). Wave Dragon. En J. Cruz (Ed.), *Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives*. Alemania: Springer.
- Thomas, G. (2008). The Theory Behind the Conversion of Ocean Wave Energy: a Review. En J. Cruz (Ed.), *Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives*. Alemania: Springer.
- Thorsen, T., & Holt, T. (2009). The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*(335), 103-110. doi:10.1016/j.memsci.2009.03.003
- Twidell, J., & Weir, T. (2006). *Renewable Energy Resources* (Segunda ed.). Abingdon, Oxon, Reino Unido: Taylor & Francis.
- U.S. Department of Commerce. (1981). *Ocean Thermal Energy Conversion. Final Environmental Impact Statement*. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- U.S. Department of the Interior. (Mayo de 2006). *Technology White Paper on Wave Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf*. Recuperado el 10 de agosto de 2015, de Bureau of Ocean Energy Management: <http://www.boem.gov/Wave-Energy-White-Paper-2006/>

- Unión Europea - Comité de las Regiones. (2015). Desarrollar el potencial de la energía oceánica. *Proyecto de Dictamen*. Bruselas, Bélgica. Obtenido de <http://www.toad.cor.europa.eu/corwipdetail.aspx?folderpath=ENVE-VI/004&id=23522>
- Vilar, A. (2014). Sistema Modular de Conversión de Energía de Olas. . 1º SIEMAR, Mar del Plata.
- Villalonga, J. C. (2013). *Energías Renovables. ¿Porqué debería ser prioritario cumplir el objetivo del 8% al 2016?* Informe Técnico, Fundación AVINA Argentina, Grupo de Energías Renovables, Buenos Aires.
- Woode, E. (22 de enero de 2014). *Statkraft discontinues investments in pressure retarded osmosis*. Recuperado el 14 de noviembre de 2015, de ForwardOsmosisTech: <http://www.forwardosmosistech.com/statkraft-discontinues-investments-in-pressure-retarded-osmosis/>
- Yemm, R. (2008). Pelamis. En J. Cruz (Ed.), *Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives*. Alemania: Springer.