

ÍNDICE

1.	Introducción.....	6
2.	¿Pueden producir los puertos energía renovable de origen marino?..	10
2.1.	Infraestructura Inteligente y sistemas energéticos marinos....	12
2.2.	De puerto medieval a puerto contemporáneo.....	12
2.3.	Un poco de historia: De Arquímedes a la energía de las olas...13	
2.4.	La marea como recurso.....	15
2.4.1.	Un poco de historia. De los “tide mills” o los molinos de marea de Londres del siglo III a la Central de La Rance (Francia S.XX).....	19
2.4.1.1.	Una infraestructura que genera paisaje y ordena el territorio.....	22
2.4.1.2.	Molinos de mar y puerto.....	23
2.4.1.3.	Una primera conclusión.....	24
2.4.1.4.	Si fueron tan útiles y tan importantes, ¿Por qué dejaron de usarse los molinos de agua?.....	24
2.4.2.	El presente inmediato de las tecnologías que aprovechan la energía de las mareas.....	27
	2.4.2.1. Sistemas de generación mediante embalse controlado. Centrales mareomotrices.	27
2.4.2.1.1.	Instalaciones en funcionamiento.....	29
2.4.2.1.2.	Instalaciones de barrera con mayor tamaño.	31
2.4.2.1.3.	La inversión económica y el impacto ambiental como factores limitantes.....	31
2.4.2.2.	Sistemas convertidores de la corrientes de las mareas	31
2.4.2.2.1.	Los sistemas convertidores de energía de las corrientes marinas hoy.....	32
2.5.	La ola como recurso.....	34
2.5.1.	La energía contenida en las olas.....	35
2.5.2.	Un poco de historia. La energía de las olas en la historia de la evolución tecnológica.....	38
2.5.3.	Los sistemas Convertidores de energía de las olas hoy.	40

2.6.	La energía maremotérmica, la temperatura del agua como recurso.....	43
2.6.1.	Un emplazamiento próximo a lugares profundos.....	46
2.6.2.	Un poco de historia. George Claude, un emprendedor colosal.....	47
2.6.3.	La energía maremotérmica hoy.....	50
2.7.	La energía osmótica del agua salada como recurso.....	52
2.7.1.	Presión retardada por osmosis (PRO).....	53
2.7.2.	Electrodialisis Inversa (EDI).....	55
2.8.	Conclusión 1: La respuesta a la primera pregunta es si.....	57
3.	¿Cómo justificar la puesta en servicio de convertidores energéticos marinos en un recinto portuario?.....	59
3.1.	Producir energía de origen renovable en España.....	60
3.1.1.	Los éxitos del marco regulatorio renovable.....	65
3.2.	Los Puertos y la Energía.....	70
3.2.1.	¿Cómo justificar la puesta en servicio de convertidores energéticos marinos en un recinto portuario?.....	73
3.2.2.	Apunte 1. Un matiz relevante.....	73
3.2.3.	La figura de la actividad “Servicios Energéticos” en el Espacio portuario.....	73
3.3.	El uso del dominio Público Portuario estatal.....	74
3.3.1.	Secuencia del Procedimiento autorización para el uso de espacio en recinto portuario.....	77
3.3.2.	Secuencia del procedimiento de concesión de uso de espacio en recinto portuario.....	78
3.3.3.	Apunte 2. Solicitar una concesión administrativa.....	79
3.4.	Barreras no técnicas.....	79
3.5.	Conclusión 2. Fortalezas de los recintos portuarios para la generación de energía.....	81

4. Definición de la propuesta.....	82
4.1. Trasformar energía, una manera de almacenarla.....	84
4.2. Infraestructuras en el espacio marítimo.....	86
4.3. Infraestructuras en el espacio terrestre.....	87
5. La selección de los sistemas de generación de corriente.....	88
5.1. El sector. Una primera impresión.....	89
5.1.1. El esfuerzo de Emec, de la IEA-OESⁱ y de Jack Hardisty.....	90
5.2. Requisitos técnicos para el volcado a red de los sistemas de generación de energía eléctrica de origen marino.....	93
5.2.1. La producción de corriente ¿en continua o en alterna?	
5.2.2. Diversidad de sistemas de generación.....	96
5.2.3. Sistemas de operación y control.....	99
5.2.4. Supervisión de funcionamiento.....	100
5.2.5. La propuesta de Hardisty seis instalaciones de energía de las mareas.....	100
5.3. Requisitos que ha de cumplir la conexión a la red de los convertidores marinos.....	103
5.3.1. La frecuencia.....	105
5.3.2. La tensión.....	105
5.3.3. Factor de potencia y control de tensión.....	105
5.3.4. Calidad de la potencia Producida.....	107
5.3.5. Protecciones del sistema.....	108
5.3.6. Toma a tierra.....	110
5.4. Impacto generado por el volcado a red de la energía generada con los convertidores marinos.....	112
5.4.1. Análisis del sistema.....	115

6.	Tipos de generadores	118
6.1.	Tipos de Convertidores de la energía de las corrientes marinas.....	119
6.1.1.	Tipos de turbinas empleadas en los convertidores de energía de la corriente de las mareas.....	120
6.1.1.1.	Turbina Horizontal de flujo axial.....	120
6.1.1.1.1.	Sistema SeaGen.....	121
6.1.1.1.2.	La Turbina Gorlov.....	122
6.1.1.2.	Turbina Horizontal de conducto con flujo axial.....	123
6.1.1.3.	Turbina vertical de flujo axial.....	124
6.1.1.4.	Turbina de flujo cruzado.....	127
6.2.	Tipos de Convertidores de la energía de las olas.....	128
6.2.1.	Muchos y poco contrastados.....	130
6.2.2.	Tipos de convertidores según su posición relativa a la costa.	
6.2.2.1.	Instalaciones en la costa.....	131
6.2.2.1.1.	Sistema de columna oscilante (OWC). Drakoo.....	131
6.2.2.1.2.	Sistema OWC de desalación directa Oceanlinx.....	133
6.2.2.1.3.	Convertidores hidráulicos de costa. El Pendulor, el Seahorse.....	134
6.2.2.1.4.	Sistemas de generación con Power Take Off eléctrico.....	138
6.2.2.2.	Instalaciones cerca del litoral.....	139
6.2.2.2.1.	El sistema WaveStar.	139
6.2.2.2.2.	Sistemas flotantes.....	140
6.2.2.2.2.1.	Sistema de generación lineal El Wedge y el OPT.....	140
6.2.2.2.2.2.	El sistema de masa rotante El Wello OY.....	143
6.2.2.2.2.3.	Sistemas semi-sumergidos: El AWS.....	146
6.2.2.2.2.4.	Sistemas sumergidos. El Oyster.....	147
6.2.2.2.3.	Instalaciones en mar abierto.....	148
6.2.2.2.3.1.	Sistemas atenuadores. El Pelamis.....	148
6.2.2.3.	Sistemas totalizadores El Wave Dragon.....	150

7.	Una propuesta para el Puerto Deportivo Marina Lanzarote como caso práctico.....	152
7.1.	El Puerto Deportivo Marina Lanzarote.....	153
7.1.1.	Presentación. Características del Puerto Deportivo Marina Lanzarote.....	154
7.2.	Estimación de los Recursos energéticos renovables marinos del Puerto Deportivo Marina Lanzarote.....	157
7.2.1.	Corrientes de marea. Túnel de desagüe del Puerto Marina Lanzarote.....	158
7.2.2.	Olas de pequeño tamaño producidas por el viento y las corrientes de marea.	158
7.2.3.	Olas de primer impacto y retorno. La Punta de la Lagarta.....	159
7.2.4.	Olas en el frente litoral.....	160
7.3.	Criterios a tener en cuenta en la selección de equipos.....	162
7.4.	Cuatro artefactos flotantes convertidores de energía marina para el Puerto Deportivo Marina Lanzarote.....	163
7.4.1.	Drakoo para electrificar pantalanes con la ola pequeña...164	
7.4.2.	Sistema Gorlov para desalar agua con las corrientes de marea.....	167
7.4.3.	Wello Oy para la fabricación de hielo de la Cofradía del Puerto de Arrecife.....	171
7.4.4.	SeaHorse para la dotación de aire comprimido en varadero	175
7.5.	Prospección económica.....	180
8.	Conclusión.....	183

1. Introducción

Puerto de Los Ángeles, California. Octubre de 2013. “Se inicia el servicio de conexión eléctrica desde el buque al muelle para embarcaciones de gran eslora...” (http://www.marinelink.com, 2013)

No es nuevo que las embarcaciones tomen corriente de la red eléctrica del puerto, ni agua, ni hielo. No es nuevo. Tal vez la novedad está en la dimensión, esta vez el servicio alcanza a las embarcaciones de marina mercante de gran eslora, en eso y en que supone el inicio de lo que puede ser una tendencia en el objetivo estratégico de reducir las emisiones de CO_2 en puerto.

“Con la conexión eléctrica desde el muelle al buque, una gran embarcación de crucero puede recortar el consumo de combustible hasta en 20 toneladas métricas y reducir las emisiones de CO_2 en 60 toneladas métricas durante una estancia de 10 horas en puerto” (Marquart, 2012,p57, Revista ABB4/10).



Imagen 1: Infografía Puerto de California

Fuente: Elaboración propia con imágenes rescatadas de <http://www.abb.com/industries/ap>

Una estrategia de trabajo, reducir emisiones CO_2 , que se asienta en un entramado normativo impulsado a lo largo de los últimos años, tanto desde el ámbito nacional con la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), como de organismos supranacionales como la CEE, la ONU o la propia OMI (Organización Marítima Internacional), que haciendo uso del convenio MARPOL y más en concreto de su Anexo VI de prevención de contaminación atmosférica, ha venido definiendo una sucesión de medidas de control que como la

MEPC.190(60) 26 de marzo de 2010 de control de emisiones frente a la costa de Norteamérica, que han ayudado a materializar esta “conexión a tierra” californiana.

Un marco normativo que plantea reducir la contaminación atmosférica generada por las embarcaciones que termina depositándose en el espacio terrestre, continental o insular.

Tierra adentro, impulsados por la dinámica de los vientos, los residuos emitidos desde la chimenea de cualquier embarcación, son incontrolables.

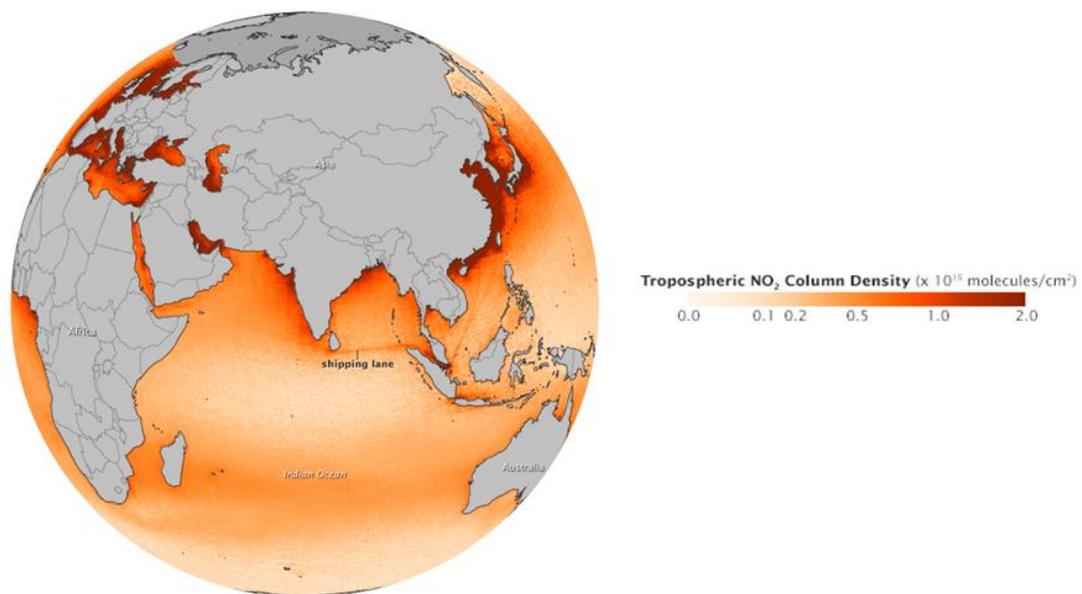


Imagen 2: Dispersión de la contaminación atmosférica generada por las embarcaciones de marina mercante.
Fuente: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php> 8 de febrero 2013

Así es más fácil entender la filosofía del marco normativo que intenta aliviar el problema controlando la fuente de emisión, exigiendo responsabilidades, vía sanción a quien contamine más de la cuenta, y por otro lado abrir soluciones.

Si un buque que está en puerto, la mejor forma de aminorar su “huella ecológica” es exigirles que pare sus motores, y se conecte a la red del puerto.

Aunque ya la Unión Europea con la **Recomendación 2006/339/CE** de la Comisión, de 8 de mayo, sobre el fomento del uso de electricidad en puerto por los buques atracados en puertos comunitarios [Diario Oficial L 125 de 12.5.2006], fue la que abrió posibilidad de que los buques puedan engancharse a

tierra. Después del puerto alemán de Lübeck (2008) y de Rotterdam (2012), el Puerto de California ha sido el tercero en ponerlo en marcha.

Un nuevo concepto de puerto, que abre una nueva área de negocio, vender electricidad a las embarcaciones a cambio de ahorrar combustible, de no generar emisiones, a cambio de no generar ruido.

Un área de negocio que acerca a los sistemas de generación renovable marinos al puerto por ser el mar un acumulador de energía.

“Además de almacenar parte de la energía solar que recibe (aproximadamente 194 W/m^2), el mar actúa como transformador de las diferencias de atracción gravitatoria sobre las aguas por la acción de la luna y el sol que combinadas con las inercias de la propia rotación terrestre origina las mareas y las corrientes marinas” (Miguélez Pose, 2009, p.67).

Una acumulación energética en el medio marino que es bastante superior a las necesidades energéticas mundiales actuales y en la que se identifican cuatro fuentes o recursos, estos son:

- La energía contenida en las olas.
- La energía generada por las mareas corrientes marinas.
- La energía que se puede generar por el gradiente térmico.
- La energía que se puede generar por el gradiente de salinidad.

El presente Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Marítima hace una prospección de cómo se puede aprovechar la energía renovable marina en una infraestructura portuaria y la articula en torno a **seis cuestiones:**

- 1) ¿Pueden producir los puertos energía renovable de origen marino?**
- 2) ¿Cómo justificar la puesta en servicio de convertidores energéticos marinos en un recinto portuario?**
- 3) Definición de la propuesta.**
- 4) Criterios técnicos para la elección del sistema de generación marino.**
- 5) Tipos de generadores que se pueden instalar en un espacio portuario.**
- 6) Un caso práctico para el Puerto Deportivo Marina Lanzarote.**

2. ¿Pueden producir los puertos energía renovable de origen marino?



Imagen 3: Puerto de Stromness (Islas Orcadas, Escocia)

Fuente: Elaboración propia.

Visita a Stromness, el puerto con más energía renovable marina del mundo.

Stromness, en La isla de Mainland (15.000 habitantes), en el archipiélago de las Islas Orcadas, Norte de Escocia, cuenta con el primer centro dedicado a la prueba en mar abierto de convertidores energéticos marinos del mundo. Financiado por la Unión Europea, el EMEC (The European Energy Marine Centre Ltd.), gestiona desde 2003 dos áreas para la prueba de convertidores marinos:

- El punto de vertido de Billia Croo Wave Site en el que se prueban equipos convertidores de olas.
- El puerto de Kirkwall desde el que se gestiona el Tidal Test Site destinado a la prueba de equipos convertidores de corriente de marea de la Isla de Eday.

Una actividad de prueba de equipos en mar abierto que, como veremos más adelante, también ha servido para optimizar el volcado a la red eléctrica de tierra de la energía producida.

Para obtener información sobre experiencias de aprovechamiento de energía marina en puertos, visité las instalaciones del Emec y sus puertos. Dos pequeños puertos de abrigo, sin apenas servicios, que sirven para dar logística a la prueba de equipos (de esfuerzos y componentes) en mar abierto, puertos sobre los que no se ha planteado todavía una reutilización de la energía captada.

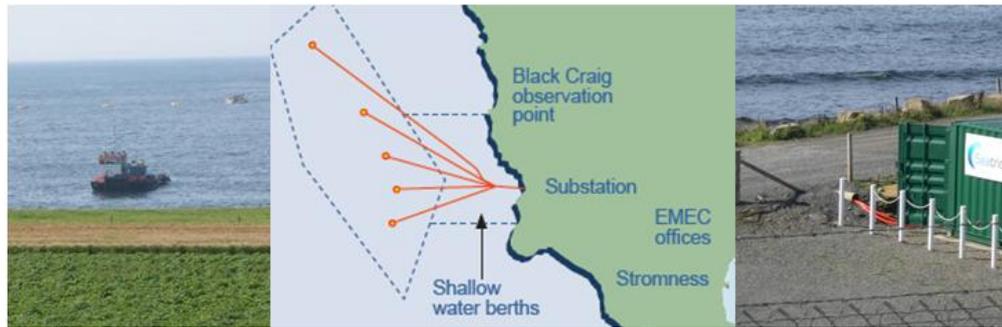


Imagen 4: Localización del punto de volcado a red más próximo a Stromness

Fuente: Fotos de elaboración propia con Plano tomado de [www:// emec.uk.org](http://www://emec.uk.org)

2.1. Infraestructura inteligente y sistemas energéticos marinos.

La ausencia de servicios energéticos en los puertos de las Islas Orcadas puede estar debida a su ya comentado pequeño tamaño y su escasa población (15.000 habitantes). Una anécdota, pues como podrá ver el lector en este texto, producir energía en puerto no es otra cosa que reivindicar que la infraestructura portuaria gane en intención, en servicio, en inteligencia. No es otra cosa que reivindicar con las debidas matizaciones lo que ya se hizo antes.

2.2. De puerto medieval a puerto contemporáneo.

Es decir, si queremos que los puertos produzcan energía debemos saber que antes ya se produjo trabajo usando la energía del mar. Si queremos minimizar el impacto, aprender de errores, debemos reconocer antes el paisaje, en él está la respuesta.

Si el lector pudiera hacer un recorrido por la costa Este de Canadá y Estados Unidos, la costa de el Reino Unido, Francia, España y Portugal, podría acumular suficiente información de ejemplos prácticos de un tipo de infraestructura, los molinos de mar (Tide Mills), que ya desde el año 200 d.c. hasta entrado el siglo XX usaron la energía de la subida y la bajada de las mareas para producir trabajo.

Un patrimonio de casi dos millares de molinos de mar asentados en estuarios y bárcenas, con los que el hombre consiguió moler grano aprovechando el empuje de las mareas.

Un patrimonio, que nos da una primera respuesta y nos acerca a una de las aventuras más sorprendentes de la historia de la humanidad. Esa que imbrica las

soluciones de Arquímedes en la Siracusa del Siglo III A.C. con los prototipos que los técnicos del EMEC prueban en las Islas Orcadas del Siglo XXI.

La lógica de la evolución tecnológica no siempre es lineal y rítmica. Como veremos a lo largo de este repaso histórico introductorio, la evolución de los sistemas que aprovechan los potenciales del medio marino está lleno de intermitencias que en muchas ocasiones dependen de coyunturas, de casualidades o de intuiciones puntuales.

A lo largo de este texto el lector encontrará referencias a distintas propuestas, a instantes y personas que consiguieron aportar/concretar alguna idea que sirvió para este presente. Así con este texto el lector tiene oportunidad de revisar una historia en la que todo está por hacer.

2.3. Un poco de historia: De Arquímedes a la energía de las olas.

La figura de Arquímedes surge como un referente irrenunciable. Es posible que a su nombre se le hayan añadido más méritos de los que acumuló en vida, pero el hecho de trabajar y definir conceptos como empuje, densidad, el número pi, la catapulta regulable, las poleas, el empleo de los espejos parabólicos, el cálculo de los volúmenes de distintas figuras geométricas, el tornillo para elevar agua, los mecanos que invento o sus estudios sobre la palanca delatan una gran libertad mental y una enorme astucia.

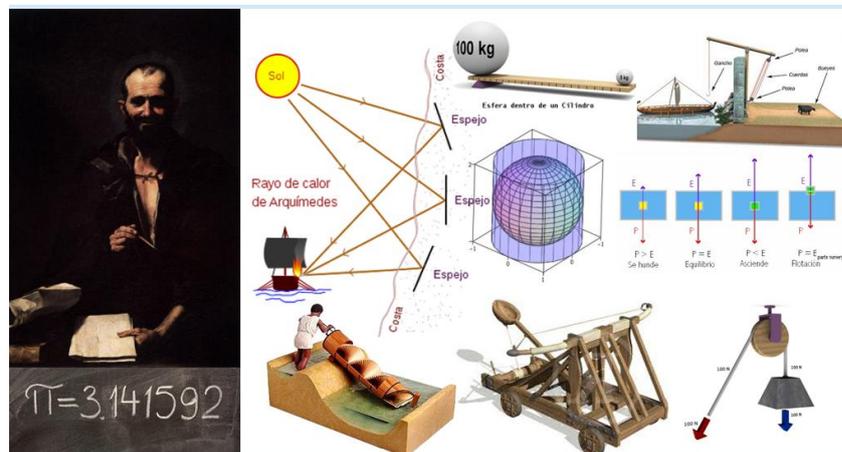


Imagen 5: Composición con los inventos de Arquímedes más conocidos, tornillo sinfín, catapulta, polea, palanca volumen de la esfera, número π , espejos convexos, definición del empuje.

Fuente: Elaboración propia con diversas fuentes.

Arquímedes, y la coyuntura en la que le tocó vivir.

La experiencia vital de Arquímedes sirve para reivindicar la lógica con la que se gestionaba el conocimiento durante el imperio de Alejandría. El concepto de

museo vivo como una universidad sin filósofos. La creación de una biblioteca universal. La consolidación de la geometría, el nacimiento de la ingeniería científica, son ejemplos de un instante de la humanidad, que permitía a ciudadanos como, Herón de Alejandría, Euclides, Ptolomeo y el mismo Arquímedes, entre otros, afianzar un lenguaje que les facilitaba expresar los destellos de su intuición.

La procedencia insular del genio pudo ayudar a que el omnipresente medio marino fuera un recurso más en las soluciones que impulsaba. Un esfuerzo que la comunidad científica reconoce casi 2.200 años después incluyendo la denominación de Arquímedes a varios proyectos de energías renovables marinas.

Así la propia definición del empuje que experimenta un cuerpo al desalojar un volumen, es, en sí mismo, un yacimiento energético renovable, pues es el principio que activa los sistemas de generación de energía de las olas denominados undimotrices.

Sus estudios sobre la palanca, el desarrollo de la garra como sistema de defensa anti naval, “el tornillo de Arquímedes” como antesala de la hélice que el austriaco Joseph Ressel consigue definir, casi 22 siglos después (1897), nos acercan la realidad insular y marítima del genio.

En su página web el EMEC (www.emec.co.uk), hace un esfuerzo por aglutinar en una misma vista la práctica totalidad de desarrolladores de sistemas energéticos renovables que evolucionan prototipos para producir energía con la fuerza de las olas y corrientes marinas. Resulta llamativo y destacable como buena parte de esos inventos retoman y afinan conceptos que Arquímedes impulsó 22 siglos antes.

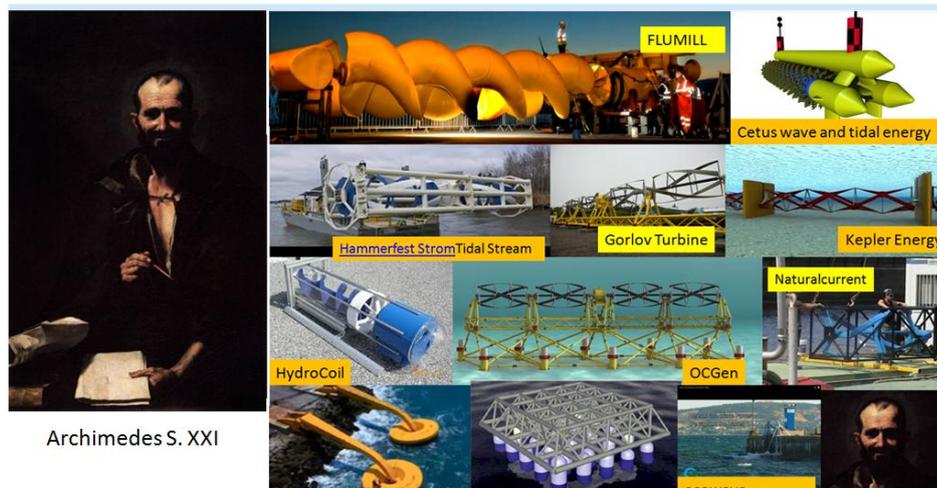
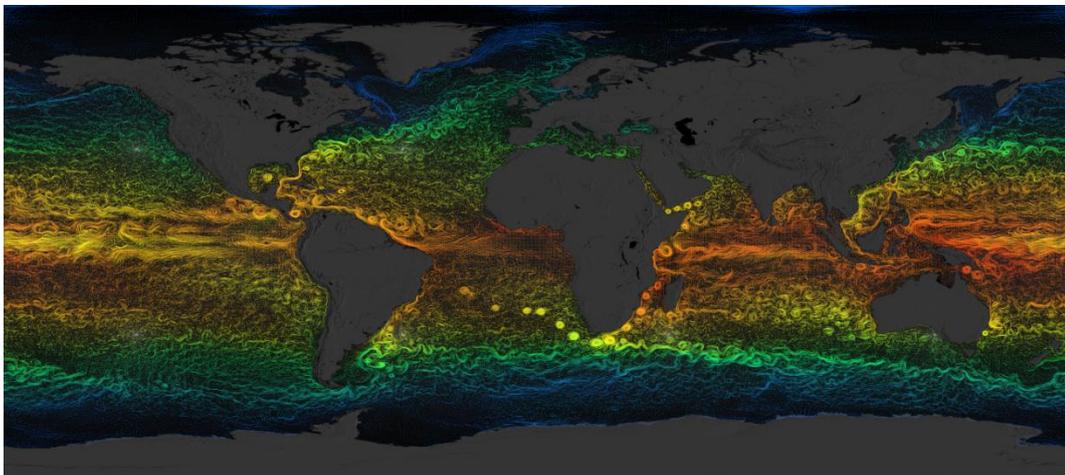


Imagen 6: Composición de convertidores marinos que usan soluciones inventadas por Arquímedes
Fuente: Elaboración propia con imágenes obtenidas de varios autores.

2.4. La marea como recurso



En un texto que Williams G.E. publicó en el año 2000 en Reviews of Geophysics titulado “Geological constraints in the precambrian history of the earth’s rotation and the Moon’s orbit”, encontramos un dato que nos ayudará a contextualizar una definición de la energía de las mareas, aquí lo tienes (traducido):

“El fenómeno de las mareas da lugar a una pérdida continuada de energía mecánica en el sistema Tierra-Luna, debido al bombeo de agua a través de las restricciones del lecho marino. Esta pérdida de energía produce la disminución de la velocidad de rotación terrestre, de tal forma que el periodo de rotación se ha incrementado desde 21,9 horas hasta las 24 horas actuales en los últimos 620 millones de años, periodo en el que la Tierra ha perdido un 17% de su energía rotacional”.

Un dato que nos ayuda a entender que la energía de las mareas depende de:

- La atracción lunar la que origina el desplazamiento de las aguas.
- Las mareas son la manifestación terrestre de los flujos de energía cinética y potencial en el sistema Tierra-Luna y Sol.
- La influencia del sol produce la aparición de 2 abultamientos mareales de origen solar.
- Los 2 abultamientos mareales parecen viajar alrededor de la Tierra al mismo ritmo que la rotación terrestre.
- Estas interacciones Luna-Sol sobre las aguas de la Tierra dan lugar a que la superficie de los océanos se eleve.
- Cuando los abultamientos mareales lunar y solar se superponen es cuando se dan las grandes mareas vivas. En la imagen 7 vemos cual es la relación del campo gravitatorio que forman la Luna, Tierra y Sol durante las mareas vivas.

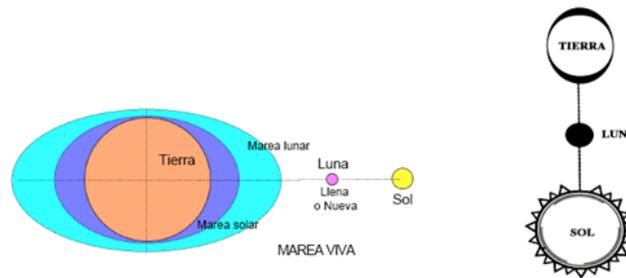


Imagen 7: Marea Viva o Equinoccial.

Fuente: <http://es.libros.redsauce.net>

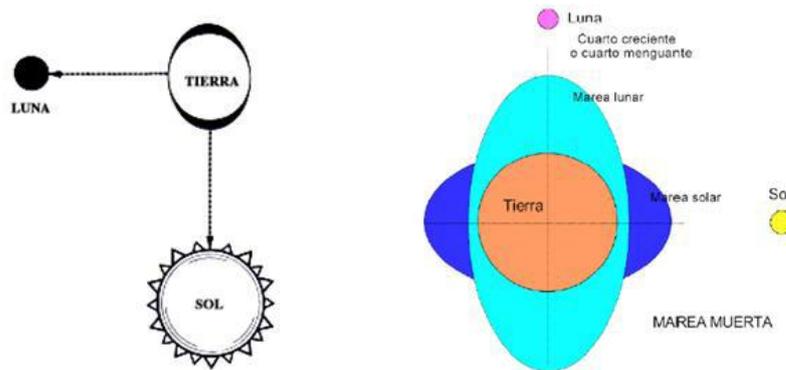


Imagen 8: Marea Muerta o de Cuadratura.

Fuente: <http://es.libros.redsauce.net>

En la imagen 8 vemos cual es la posición en la que se encuentran la luna, el Sol y la Tierra durante las mareas muertas.

Todos los días las aguas del océano suben y bajan de nivel dos veces, es decir que a lo largo de 24 horas hay dos pleamares y dos bajamares.

Las mareas están influenciadas por la luna, cuando esta se encuentra sobre el meridiano de un lugar la atracción es mayor, se produce entonces el flujo o ascenso de agua al que corresponde otro flujo en el lado contrario de la tierra. La hidrosfera o superficie de agua adopta en consecuencia la forma de una elipsoide en cuyo eje menor se encuentran las bajamares.

La subida y bajada de la marea es más apreciable en la franja litoral y el intervalo de tiempo entre bajar y pleamar es de doce horas y veinticinco minutos, lo que produce un retraso de 15 minutos al día (que coincide con el retraso que acumula cada día la Luna para alcanzar su punto más alto).

La amplitud de la marea no es la misma en todos los lugares de la Tierra, siendo nula en algunos mares interiores, como el Mar Negro, escasa en el

Mediterráneo (20-40 cm), al igual que en el Pacífico. Y alcanzando valores notables en determinadas zonas del océano Atlántico.

Los lugares de la tierra en los que la diferencia de cota entre marea alta y baja es mayor los encontramos en la siguiente imagen:



Imagen 9: Localizaciones con mayor amplitud de marea del planeta.

Fuente: Energies Renovables Marines: implicació en el món actual i futur i fonts existents. Viabilitat de subministrament energètic d'un port català. Autor: Denis Pons Fernández.



Imagen 10: Distribución del recurso energético de la marea en el litoral de la Unión Europea

Fuente: <http://www.emec.uk.org>

En la práctica, la energía de las mareas termina siendo un recurso estable y predecible por ser una consecuencia de procesos astronómicos regulares y no de procesos atmosféricos.

Esa constancia y disponibilidad del recurso mareomotriz, no pasó desapercibida en la historia de la humanidad. Como veremos en las siguientes páginas, el

hombre no dejó nunca de buscar soluciones que le permitieran aprovechar la energía de las mareas.

2.4.1. Un poco de historia. De los “tide mills” o molinos de marea de Londres del siglo III a la Central de La Rance (Francia S.XX).

“No tenemos del pasado más que una imagen deformada, y en todo caso incompleta. Es necesario admitir que lo imposible a veces también pudo realizarse”(Torija Herrera, 2009, p.76).

Destinados a generar trabajo con la energía de las mareas, los molinos de marea (tide mills) se construyeron a lo largo de casi 18 siglos.

Desde una primera referencia que lo ubica en el mismo río Támesis en el Londres del siglo III, hasta la construcción (en 1961) de la Instalación de la Rance en la Bretaña Francesa y la de la bahía de Kislaya (URSS, 1968). (construcciones que no son molinos de mar pero que si aprovechan la energía de las mareas), se estima en casi dos millares el número de molinos de mar dispuestos en las costas del hemisferio Norte que baña Océano Atlántico.

Así a lo largo de esos 18 siglos de historia de la humanidad, el litoral que conforman Canadá, Estados Unidos a un lado del Atlántico, y el Reino Unido, Irlanda, Países Bajos, Bélgica, Francia, España y Portugal al otro lado ha sido protagonista de la evolución del molino de mar un “artificio menor”(Tajamar, 2005, p.27) cuya singularidad “nos obliga a relacionarlo “dentro del campo de la tecnología, con la evolución económica de las regiones”.

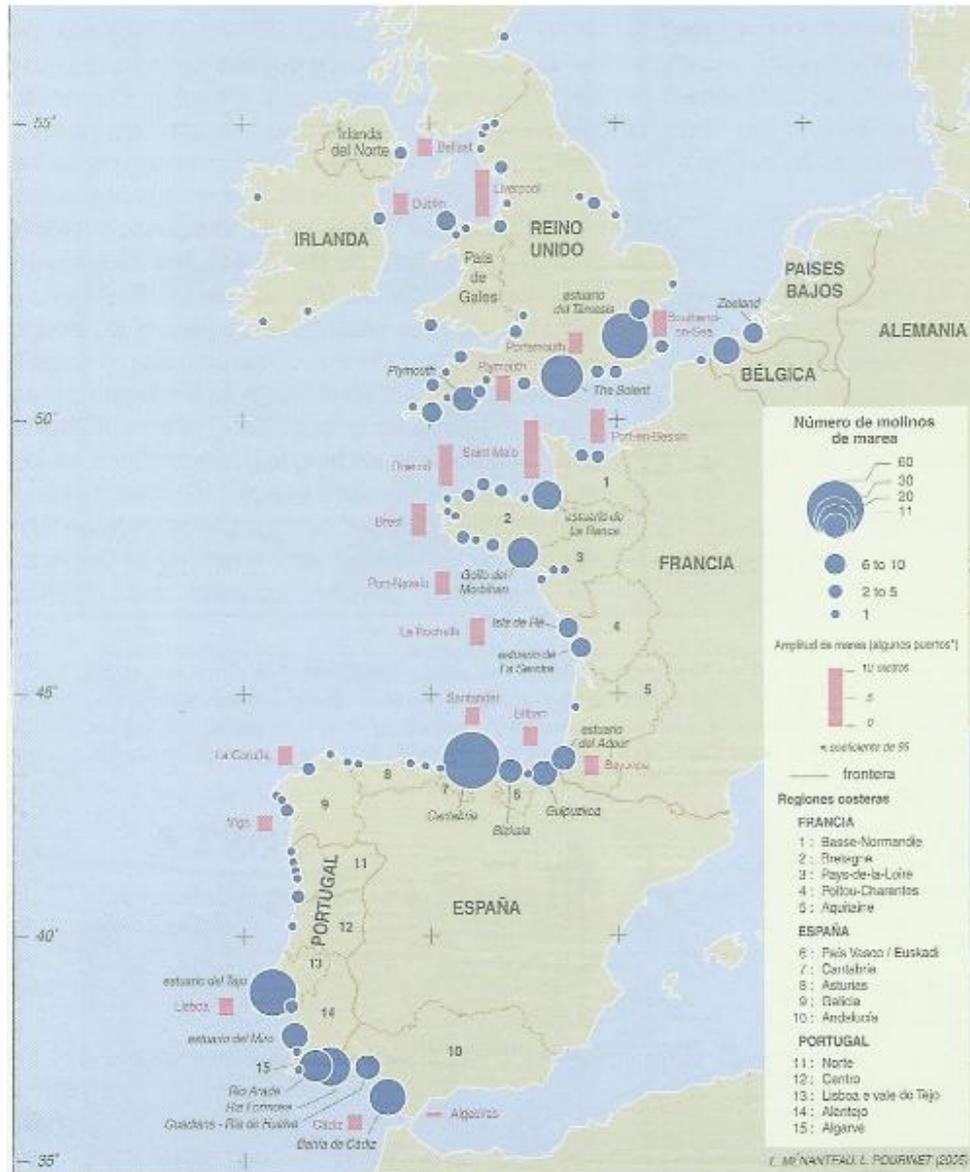


Imagen 11: Distribución de Molinos de Marea por el litoral Europeo.

Fuente: Molinos de mar y estuarios. Litoral Atlántico 2005.

Una infraestructura que tuvo su momento de máximo apogeo a lo largo de los siglos XVII, XVIII y XIX, y que paulatinamente se dejó de utilizar una vez se inventa la máquina de vapor primero (1763), y que casi desaparece una vez se consolida el empleo de los motores de combustión interna bien entrado el siglo XX.

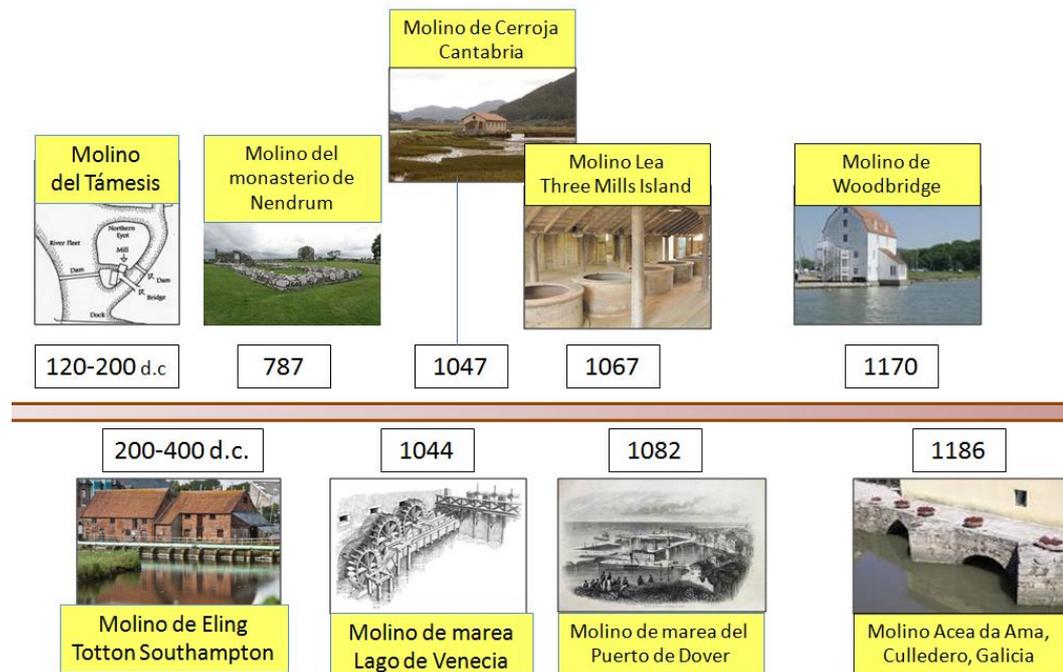


Imagen 12: Secuencia histórica de los molinos más antiguos.

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de varios autores.

Los molinos de mar, se pueden describir como infraestructuras localizadas en el espacio intermareal bien en el litoral, bien en los estuarios marinos, ensenadas o bárcenas. Su cometido es interceptar directamente el flujo de las mareas y, por tanto, interviene en la regulación de los caudales y salinidad de sus aguas.

Existen diferentes tipos de modelos dependiendo de su adaptación al entorno medioambiental, es decir, a las mareas, a las condiciones topográficas y a la disposición de la propia rueda de molino.

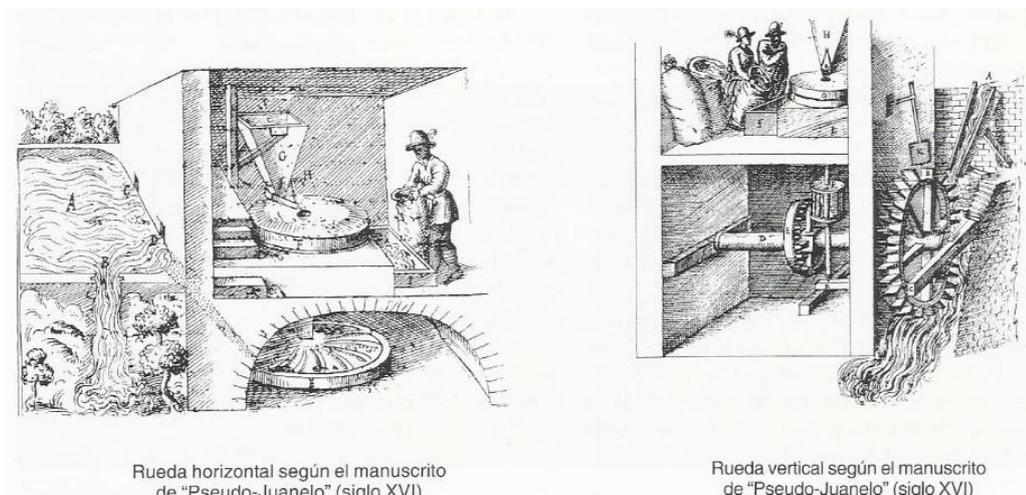


Imagen 13 : Diferentes disposiciones de ruedas de molino de marea.

Fuente: Molinos de mar y estuarios. Litoral Atlántico 2005.

Su implantación propició a lo largo del siglo XVIII la creación de instalaciones industriales en el medio rural de toda la cornisa cantábrica, molinos de mar ferrerías y astilleros.

Con el siguiente Código QR, el lector podrá visualizar un video editado por El Diario Montañés sobre el molino de marea de Santa Olaja rehabilitado en 2003.



<http://www.eldiariomontanes.es/videos/cantabria/cantabria-general/2346962266001-santa-olaja-molino-mareas-marismas-joyel.html>

2.4.1.1. Una infraestructura que genera paisaje y ordena territorio.

Los caudales provocan los cambios morfológicos al desplazarse los puntos de equilibrio entre aguas marinas y fluviales y por lo tanto los lugares de depósitos de limos y arenas. La salinidad, sus diferentes grados, da lugar a variados sistemas de flora y fauna que por encima de ciertos límites hace incompatibles sus hábitats.

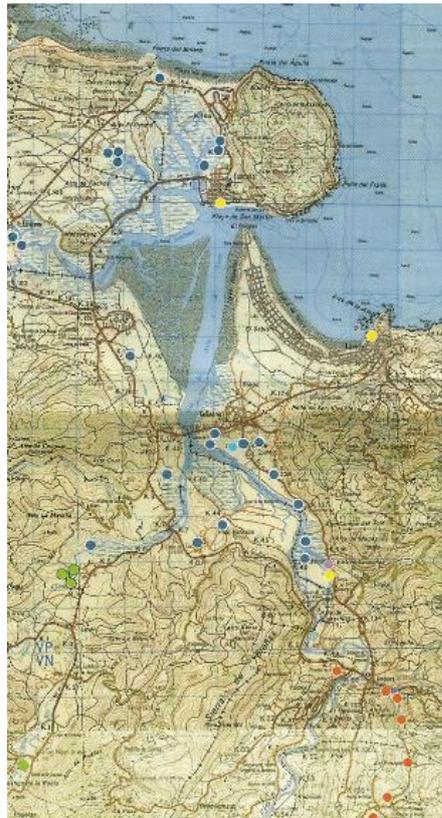
Y de la misma forma que flora y fauna son diferentes de éste o aquel lado de las presas, sucede que en el subsuelo ocurren fenómenos interrelacionados, que tendrán influencia en la agricultura o en el abastecimiento de agua a las poblaciones.

Así la implantación de un molino de mar implica la generación de un paisaje pues con el paso de los años se forjó una estrecha interrelación entre la actividad humana tradicional, como la molinería y la pesca que a su vez ocasionó transformaciones geomorfológicas que afectó a la organización social de cada lugar.

2.4.1.2. Molinos de mar y puerto.

En el texto ya comentado de “Molinos de mar y estuarios”, encontramos una ilustración realizada por los arquitectos Luis Azurmendi y M^a Ángeles Gómez que nos ayuda a visualizar la relación que tenían los molinos de mar con los puertos.

“La organización territorial en base a la actividad productiva y comercial queda ilustrada en el plano del estuario del río Asón. El trigo procedente de Francia y Castilla era transformado en harina en los molinos de mar (azul). El mineral de hierro es transformado en herramientas y clavazón para la industria naviera en las ferreterías y martinetes (en rojo). Los astilleros (azul claro) puertos (amarillo) y almacenes morado son los elementos que articulaban toda la producción y comercialización” (Asoc. Cult. Tajamar, 2005,p.56).



Molinos de mar en azul, ferreterías en rojo, astilleros en azul claro, puertos en amarillo y almacenes en morado

Imagen 14: Detalle Organización territorial en base a la actividad productiva

Fuente: Luis Azurmendi y M^a Ángeles Gómez. Molinos de mar y estuarios. Litoral Atlántico 2005.

2.4.1.3. Una primera conclusión:

Esta perspectiva integradora del recurso energético renovable marino con la infraestructura portuaria nos puede servir para contestar afirmativamente a la pregunta con la que hemos iniciado este capítulo. Esa que nos pedía encontrar precedentes de generación de energía renovable de origen marino vinculada a infraestructuras portuarias.

Una respuesta, que automáticamente nos abre una duda.

2.4.1.4. Si fueron tan útiles y tan importantes, ¿Por qué dejaron de usarse los molinos de agua?

La respuesta a esta cuestión puede tener tres recorridos, el social, el tecnológico y el legislativo.

a. Los molinos y la gente.

En un catálogo de exposición que el escritor Sammlung Goetz realiza para el artista Andreas Slominski denominada “Mouling Rouge”, Goetz apunta algunas claves que pueden ayudar al lector a descifrar el motivo por el que los molinos dejaron de aparecer en centro de los cuadros, porqué dejaron de usarse. Según Goetz los molinos “*no tienen horas normales de trabajo*”, “por lo que sus trabajadores no pueden participar en la vida normal del pueblo”.

“La vida del molinero, en la costa, está sometida a la alternancia de las mareas. En su actividad profesional hay dos periodos muy diferentes que se repiten sin cesar: el periodo de las “aguas vivas” aprovechado para la molienda, y el de las “aguas muertas”, dedicado a la conservación del molino y a los viajes, si el molinero trabaja solo”(Slominski, 2012,p89).

Según Goetz la localización de los molinos (de viento) “*son sospechosas de ser siniestras o misteriosas*”, al fin y al cabo debían ser lugares ventosos, expuestos al rigor de los vientos y de las corrientes.

Si buscáramos en la literatura clásica referentes sobre los molinos y las personas nos encontraríamos, en su capítulo octavo a Don Quijote, a todo galopar, lanza en mano, dispuesto a vencer a los gigantes que resultaron ser molinos. Es de destacar como Cervantes, fino e irónico, encuentra la forma de protestar contra los molinos, un escritor manco que tenía por profesión la de recaudar impuestos por toda la orografía española, pone a su hidalgo caballero a luchar contra los molinos.

Pero no es Cervantes el único autor de la literatura universal que nos apunta capítulos de polémica relacionada con los molinos.

En el Siglo XX y con el texto “Rebelión en la granja”, George Orwell, describe en uno de sus capítulos más intencionados la lucha que provoca la construcción de un molino en la granja. La enorme sensibilidad y preocupación que demostró tener Orwell (autor de la célebre 1984), con la ética de la evolución tecnológica, aporta momentos especialmente decepcionantes en la construcción de un molino de viento que:

“Haría funcionar una dinamo y suministraría energía eléctrica a la finca. Eso permitiría dar luz a las cuadras y poner calefacción en invierno, y también haría funcionar una trituradora de paja una cortadora de remolacha forrajera y una ordeñadora eléctrica”(Orwell, 1944, p87).

Un objetivo que desencadena, una trama de guerras de poder, de traiciones y de abusos que Orwell consigue sintetizar en una frase.

“Si hubiera podido expresar sus pensamientos habría sido para decir que no era eso lo que habían querido al ponerse a trabajar, hacía años...”

Al enorme esfuerzo que supone la construcción de molinos de mar, que normalmente eran edificaciones aisladas y expuestas a un entorno riguroso, había que añadirle el esfuerzo que requería su explotación.

La rotación de las mareas hacía que la apertura y cierre de compuertas no tuviera un horario regular. Organizar la salida y la entrada de grano en la molienda, las averías, las crecidas del río, las tormentas, con los mantenimientos nos ayudan a entender que las personas que los explotaban participaran poco en la vida social.

b. La evolución tecnológica como causa de la desaparición de los molinos de mar.

Es fácil entender que con la llegada de sistemas de generación energética más constantes como la máquina de vapor o los motores de combustión interna, los molinos de mar empezaran a dejar de usarse.

Así, con el tiempo y las nuevas tecnologías, los astutos molinos de mar quedaron expuestos a la intemperie, al desuso, al rigor de las crecidas del mar, del río, a los vientos que poco a poco los fueron borrando del paisaje un patrimonio arquitectónico mecánico del que por alguna razón consciente o inconscientemente decidimos olvidar.

c. El marco normativo que obligó a desecar las marismas.

Pero ese olvido colectivo fue reforzado con la ley de Cambó que en 1918 promovió la desecación de las marismas por entender que era un suelo improductivo. “Así los cambios tecnológicos y de productividad, de los hábitos de alimentación, de organización de los sectores productivos del campo, los molinos pierden su función y se abandonan los estuarios, dentro de una política general higienista, rural y urbana, son sometidos a una presión de “saneamiento”, que se traduce en una euforia de desecaciones y concesiones” que la propia ley Cambó impulsa, “aparecen los grandes muros de desecación, incluso las propias presas de los molinos será a veces utilizadas como muros de contención, y las grandes extensiones del mar en ensanches de ciudades o praderas...”.

2.4.2. El presente inmediato de las tecnologías que aprovechan la energía de las mareas

El resultado al igual que ocurre con electricidad la corriente continua y la corriente alterna con el motor diesel y de gasolina, la energía de las mareas ha encontrado dos opciones preferentes bien:

- Sistemas de generación mediante embalse controlado. Centrales Mareomotrices.
- Sistemas convertidores de la corrientes de las mareas.

2.4.2.1. Sistemas de generación mediante embalse controlado. Centrales mareomotrices.

Como hemos visto en la introducción anterior la combinación de embalse controlado mediante compuertas con molino de mar es una de las primeras opciones que se desarrolló para explotar el recurso energético de la marea.

Una opción a considerar cuando:

La diferencia de cota entre la pleamar y la bajamar supera los 4 metros de altura.

Lo permitan las condiciones orográficas Preferentemente en estuarios y embalses.

No genere un impacto ambiental irreversible, por afección al ciclo vital de la biodiversidad.

La clave del funcionamiento de una central mareomotriz, es contener el agua en un depósito artificial durante la pleamar y soltarla durante la bajamar.

Al igual que en las centrales hidroeléctricas, el agua pasa a través de unas turbinas para generar electricidad.

La forma más simple de construir este depósito artificial es levantando un dique de contención en la parte estrecha de un estuario.

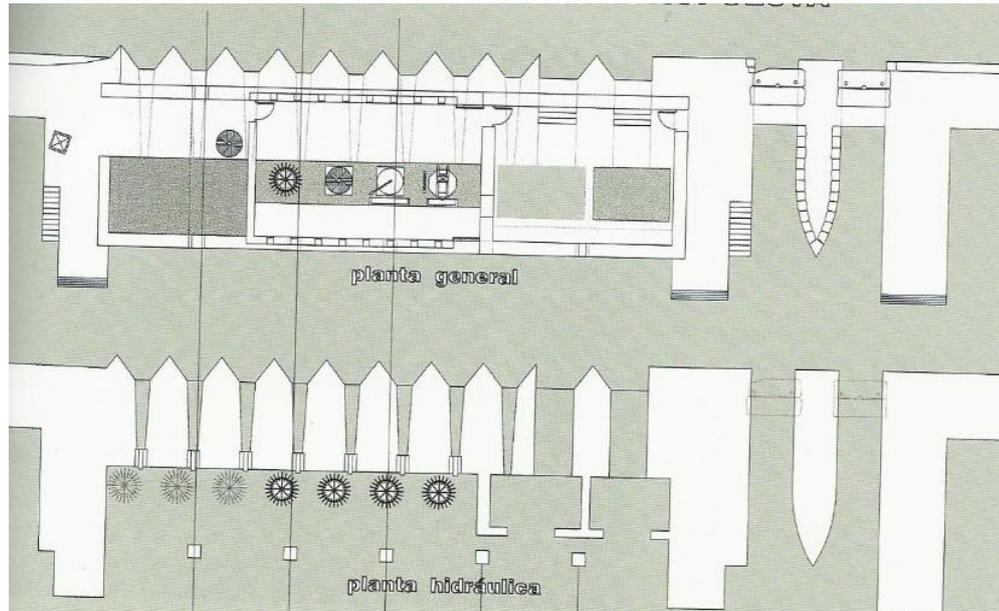


Imagen 15: Planta general e hidráulica del Molino de Santa Olaja.

Fuente: Molinos de mar y estuarios. Litoral Atlántico 2005.

Un 25% del tiempo produciendo.

La cantidad teórica de energía extraíble por ciclo de marea (unas 12 horas), el rendimiento probable de las centrales mareomotrices no superará el 25%, por lo que el potencial aprovechable es considerablemente menor que el disponible.

Como ya se ha indicado, sólo hay un número limitado de lugares en todo el mundo, donde las condiciones de la marea son adecuadas para su explotación (que tengan mareas de unos 4 metros de altura), ya que se requieren circunstancias muy especiales de acumulación en bahías en las que la fricción del agua crea un desnivel suficiente para permitir su paso por turbinas de gravedad.

La clave está en que cuando la marea está crecida se cierra el estuario de forma que, al bajar la marea, se establece una diferencia de niveles de agua, entrando en funcionamiento la turbina hasta que, debido a la siguiente marea, los niveles se igualan.

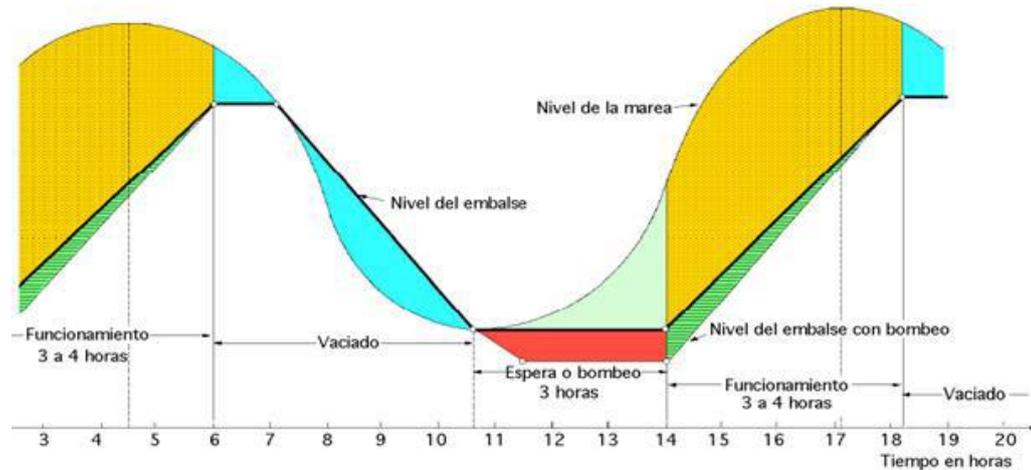


Imagen 16: El ciclo de la marea y el ciclo de funcionamiento de un sistema captador de marea de efecto simple.
Fuente: El posible aprovechamiento de las corrientes marinas en Veracruz. Camacho Barradas José Miguel. 2011.

El funcionamiento de una central mareomotriz puede optimizarse disponiendo de más una presa de almacenamiento y secuenciando convenientemente la descarga de las mismas. En el siguiente código QR vemos un proyecto Surcoreano para incorporar una doble etapa en las instalaciones de Sihwa Tidal Power Plant.



<http://www.youtube.com/watch?v=lnHwb8BKJzU>

2.4.2.1.1. Instalaciones en funcionamiento:

La mayor central de energía mareomotriz del planeta se ha instalado en el borde del lago artificial de Sihwa frente al mar cercano a Seúl, y ocupa una superficie de 140.000 metros cuadrados. Cuenta con diez turbinas de 25,4 megavatios y ocho compuertas operan en la parte inferior de esta estación de 15 pisos de altura, cuya construcción se inició en 2004 y supuso un desembolso de 335 millones de dólares.

La segunda planta más grande de energía mareomotriz con una capacidad de 240Mw está en el estuario de La Rance, al norte de Francia. Esta estación de energía ha estado en operación desde 1968, con una disponibilidad del 93% y es la única en operación hoy en día sobre una base comercial.

Otra instalación a destacar es el Proyecto de Energía de Mareas Annapolis de 20Mw, en Annapolis real, en Nueva Escocia en la bahía de Fundy operó en su primer año (1984) con un 99% de disponibilidad.

Estos emplazamientos han proporcionado valiosísima información para el desarrollo de esta tecnología y han servido para demostrar la viabilidad de esta fuente de energía.

La antigua Unión Soviética construyó una pequeña planta de demostración de 400 kilowatts en Kislogubskaya en 1967.



Imagen17: Mosaico de instalaciones mareomotrices de Sihwa y La Rance.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de tomadas de varios autores.

2.4.2.1.2. Instalaciones de barrera con mayor tamaño.

Instalación	País	Sistema de Power Take Off
Barrera de La Rance	Francia	Turbina de Bulbo
Barrera de Annapolis	Nueva Escocia, Canadá	Turbina de Straflo
Silwa Tidal Barrag	Korea	Turbina de Bulbo
Jiangxia	China	No especificada
Kislaya Guba	Rusia	Turbina de Bulbo
Offshore Tidal Lagoons	Reino Unido	No especificado
Tidal Delay	Australia	No especificado
Two-Basin Barrage	México	No especificado

Tabla 1: Sistemas de barreras de mayor tamaño.

Fuente: Ocean Energy: Global technology development status. IEA-OES Document No. T0104

2.4.2.1.3. La inversión económica y el impacto ambiental como factores limitantes.

Este tipo de soluciones requiere de una infraestructura de gran tamaño, y por tanto muy costosa, su explotación es compleja y además de generar energía de forma intermitente genera impacto ambiental por afección a la salinidad de los suelos, y al cambio del ciclo vital de la biodiversidad presente en los embalses.

Un cuadro de conclusiones que hacen que estas instalaciones no sean rentables y muy poco competitivas frente a los convertidores de las corrientes de las mareas.

2.4.2.2. Sistemas convertidores de la corrientes de las mareas.

En el último bloque de este mismo trabajo veremos el detalle del cómo funcionan los convertidores de energías de las corrientes marinas, denominados TEC (Tidal Energy Converter).

Como primera nota podemos apuntar que en principio son sistemas que no requieren tanta infraestructura para su puesta en servicio como los de barrera, que son más versátiles y que por el momento alcanza un tamaño más contenido.

En la actualidad se contabilizan hasta 88 desarrolladores de sistemas TEC que tratan de alcanzar el diseño más eficiente para el recurso corriente marina.

Una línea de trabajo que aprovechando los avances de la energía eólica, se inicia a mediados de la década de 1980 y que hasta 1990 destaca por ser un periodo en el que no

se consiguieron avances significativos, una lógica de funcionamiento en la que se empleaban componentes convencionales para conseguir una fiabilidad segura a un coste mínimo.

Es el año 1988 en el estrecho de Kurashima Japón se instala una turbina de 1,5 metros que era capaz de generar 3,5kW.

La segunda fase en el desarrollo de los equipos TEC se inicia a partir de 1990 y va a suponer un aumento del número de sistemas a desarrollar e instalar y va a mejorar el detalle tanto en los materiales empleados como en la calidad y profundidad de los estudios sobre las corrientes.

Una de las consecuencias de este avance en la prueba de equipos y conocimiento es que entre 1992-1993, se consigue reducir el coste de producción del kWh producido hasta unos 15 euros, una cifra que no está lejos de otras tecnologías como la fotovoltaica que alcanzaba por entonces un coste de casi 10 €/kWh.

En 1994, en el lago Linnhe, Escocia, Marine Current Turbines S.A.(MCT) va a conseguir poner en marcha un rotor flotante de 3,5 metros de diámetro que será capaz de generar 15 kW de potencia con una corriente de 2,25 m/s.

Será a partir de 1996 cuando se va a desarrollar rotores, para aguas poco profundas, que alcanzan los 15 metros de pala y potencias de entre 200 a 700 kW. Una generación de rotores que tuvo complejos problemas técnicos y de mantenimiento que se intentaron subsanar con una segunda generación de rotores con multiplicadora de baja velocidad o cambio de velocidad hidráulico.

1.4.2.2.1. Los sistemas Convertidores de energía de las corrientes marinas hoy:

En la actualidad se está desarrollando la tercera generación de estos equipos a los que se han incorporados nuevos sistemas de control y electrónica de potencia.

En la última parte de este trabajo el lector tiene ocasión de ver un análisis más detallado sobre las características técnicas de este tipo de equipos.

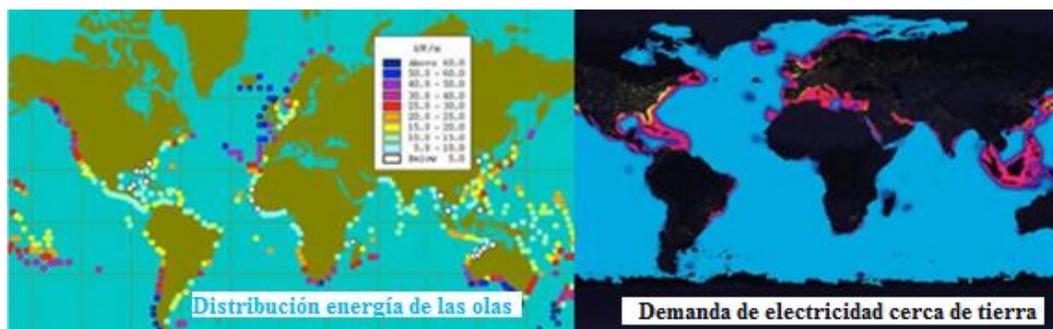
En la siguiente imagen se incorpora una vista mural en la que aparece la totalidad de sistemas “Tidal” que linkea la página web del emec (noviembre 2013).



Imagen 18: Composición vistas de sistemas de generación con energía de las mareas.

Fuente: Elaboración propia con imágenes enlazadas de <http://www.emec.org.uk/>

2.5. La ola como recurso



2.5.1. La energía contenida en las olas.

En el libro “La energía que viene del mar”, encontramos una definición sintética que nos ayuda a entender mejor este recurso:

“La energía de las olas es una forma de energía solar concentrada”

“Su tamaño y frecuencia depende de la velocidad del viento”, por lo que puede considerarse como “energía eólica y por tanto solar concentrada-almacenada”.

La ola transmite dos pulsos a las partículas de agua que la forman:

La energía cinética y la energía potencial.

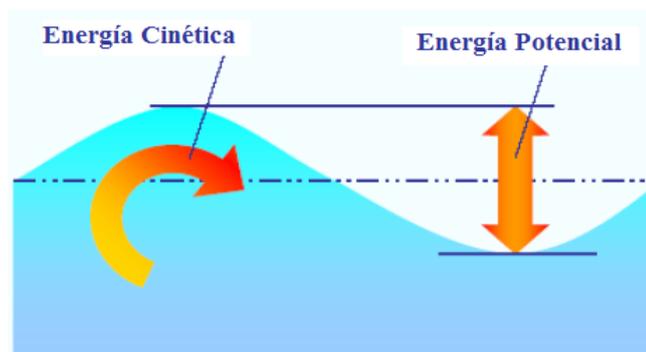


Imagen 19: Energías cinética y potencial de la ola.

Fuente: Una aproximación al aprovechamiento de la Energía de las olas Julia Fernández Chozas. 2008



Imagen 20: Origen de la energía de las olas.

Fuente: Una aproximación al aprovechamiento de la Energía de las olas Julia Fernández Chozas. 2008

La ola es, por tanto, un derivado terciario de la energía solar (imagen 16). El calentamiento de la superficie terrestre produce viento y este a su vez genera oleaje. Las diferencias de densidad generan desplazamientos del aire (viento), de distinta intensidad y duración que consigue producir una ola.

El oleaje actúa como acumulador de energía, pues consigue recibir energía almacenarla en su capa superficial y transportarla a lo largo de miles de millas marinas con mínimas pérdidas de energía.

La energía generada en cualquier parte del océano acaba en el borde continental.

Pese a que las pérdidas de energía son mínimas, la densidad energética del oleaje es menor cerca de la costa, por la interacción de las olas con el lecho marino. Una pérdida de energía que puede ser compensada por los fenómenos de reflexión y de refracción de las olas provocadas por el choque de las olas con los obstáculos presentes en la trama del litoral que originan las llamadas concentraciones de energía o hot spot.

Otra característica destacable del recurso ola es que es más estable que el viento, es concentrado, predecible, de alta disponibilidad y cercano a los consumidores.

El potencial energético de las olas.

La potencia de las olas depende del cuadrado de la altura de la ola, o lo que es lo mismo, de su energía cinética y del periodo o frecuencia del movimiento.

La potencia del frente de ola por unidad de longitud (b=1) es:

$$P_{1m\ ola} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \frac{H^2}{2} \cdot c \cdot \text{sen}^2 \left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot x - \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t \right) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot h \cdot L}{Sh(4 \cdot \pi \cdot h \cdot L)} \right)$$

En la que:

γ es el peso específico del agua

H es la altura de la ola

C es la velocidad de la ola

L es la longitud de la onda.

El EMEC (European Maritime Energy Centre) ha realizado un esfuerzo divulgativo de definición del recurso primero a la vez que ha establecido cual es el procedimiento que ha de seguirse para medir la energía de las olas y generado un plano de cuál es la potencia media en los distintos puntos del litoral europeo.

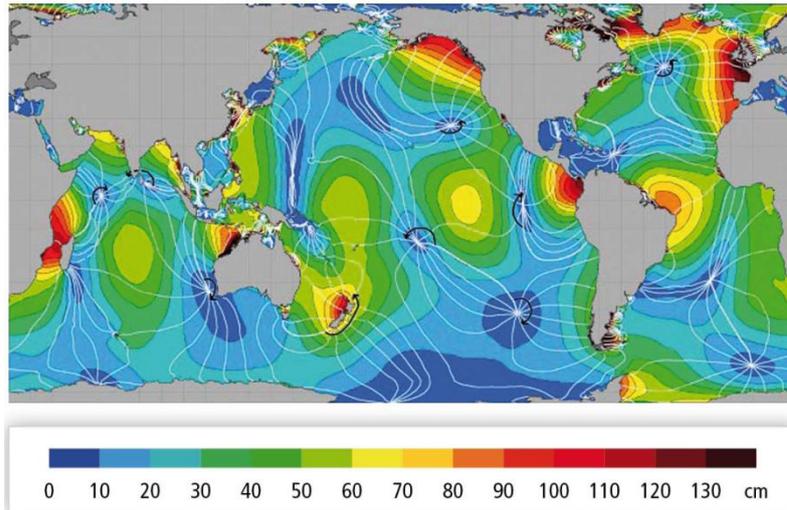


Imagen 21: Distribución del tamaño medio de las olas por el globo terráqueo.

Fuente imagen generada por la NASA y divulgada en el espacio web <http://www4.rgu.ac.uk>

Por su parte el Instituto para la diversificación y el ahorro de energía Idae ha generado un plano de detalle sobre cuál es la potencia media que tienen las olas que bañan la costa española y que vemos en la siguiente imagen.



Imagen 22: Vista del plano de potencial de la energía de las olas generado por el Idae.

Fuente: <http://www.enola.ihcantabria.com>

2.5.2. Un poco de historia. La energía de las olas en la historia de la evolución tecnológica.

En 1799 Girard Messers propone una patente en la que un sistema flotante queda conectado a la costa por una palanca, que conseguía transmitir un movimiento alternativo que por medio de un trinquete se terminaba convirtiendo en movimiento rotativo.

En 1869, aparece el registro de un invento del español Ruiz que aprovechaba el paso de las olas a través de un dique hacia un depósito interior. Una creación que mejoró el también español Bernot en 1881 sustituyendo el complicado sistema de válvulas por compuertas.

En 1885 José Barrufet y Veciana (12) publicó en un opúsculo de 32 páginas un ingenio para aprovechar la energía de las olas que denominó “marmotor” que contaba con flotadores que subían y bajaban libremente a impulso de las olas, y que a través de un trinquete transmitían energía al eje horizontal, asociado a su vez al volante de inercia.

1892 A.W. Stahl, publica uno de los primeros artículos que abordan la energía de las olas y que tituló “*The utilization of the power of ocean waves*”.

En 1898 P. Wright patenta un motor que recibe la denominación de Wave motor y que McCormick analiza en una publicación de 1981.

En 1910 Bochaux-Praceique consigue generar la luz y la energía de su casa en Royan cerca de Burdeos en Francia. En la que es reconocida como la primera columna de oscilación de agua.

En 1911, esta vez en Estados Unidos la revista “Power” publica un artículo sobre la última tecnología en motores de olas inventada por la *Wave Power Company*.

1921 el Instituto Oceanográfico de Mónaco, utiliza una bomba accionada por las olas para elevar agua a 60 m con una potencia de 400 W.

En 1926, Volvemos a los sistemas de generación de energía el señor Coyne experimenta en la costa de la Bretaña un sistema que alcanza un rendimiento del 5%.

En 1945 Yoshio Masuda inicia una serie de experimentos con la idea de utilizar la energía de las olas para alimentar las luces de navegación. Entre ellos estaba el concepto de extracción de energía a partir del movimiento angular en las articulaciones de una balsa articulado, que fue propuesta en 1950 por Masuda.

En 1974 Stephen Salter publica en la revista Nature un artículo sobre la captación de la energía de las olas con un convertidor denominado Duck, que consigue captar la atención de la comunidad científica internacional.

1974 M.E. McCormick publica un artículo en *of Hydronautics sobre, Analysis of a Wave-Energy Conversion Buoy*, con el que se inicia una labor de divulgación de un tipo de soluciones que de forma simultánea e inconexa empiezan a desarrollarse en países como Noruega, Francia y Japón entre otros.

1976 Mashuda promueve la construcción del primer convertidor de gran tamaño para desarrollar pruebas en mar abierto. Un sistema que denominó Kamei y que consistía en una embarcación de 80 metros de eslora por 12 de manga que se utilizó como plataforma de pruebas de distintos equipos de columna de agua oscilante.

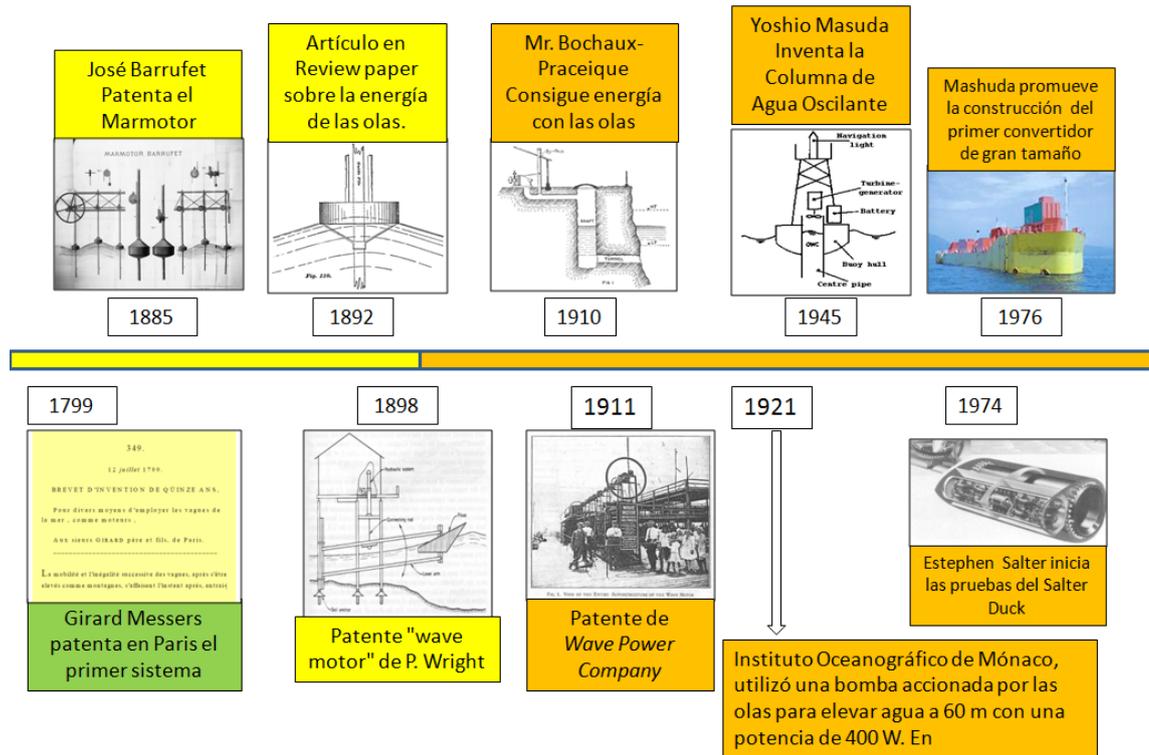


Imagen 23: Evolución histórica de los primeros convertidores de energías de las olas.

Fuente: Elaboración propia con recursos y anotaciones tomadas de varios autores.

2.5.3. Los sistemas Convertidores de energía de las olas hoy:

De 1855 a 1973, ya había 340 patentes registradas solamente en el Reino Unido.

Esta última referencia al elevado número de patentes nos ayuda a entender el paisaje. Si el lector cuenta con un sistema de Smartphone, el siguiente código bidi le permitirá acceder a la página web del Emec en el que se incorpora una lista de desarrolladores de sistemas WEC (Wave Energy Convertors) que producen energía con la energía de las olas.



<http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/>

Un total de 188 patentes con distinto nivel de maduración y para el que es complejo organizar una clasificación nítida. Muchas de ellas son soluciones conceptuales, que no terminan de definir cuál va a ser su régimen de uso, es decir, la frecuencia, la altura o la estacionalidad de la ola, para la que están pensados.

Son muchos los autores que tratan de organizar una clasificación según su ubicación si están vinculados a estructuras de tierra, (On Shore), estructuras de mar (Off Shore), o cerca de tierra (Near Shore), según si está aislado, apoyado en el fondo, en dique, si es flotante o sumergido, según su tamaño, o según el sistema de generación, bien por turbina vertical, turbina horizontal, si es activado por un sistema hidráulico, o accionado por aire etc.



Imagen 24: Sistemas Off-shore Flotantes.

Fuente: <http://www.tecnalia.info>

El propio Emec propone una clasificación que incorporamos en la siguiente vista pero que no nos ayuda puesto que abarca a la totalidad de sistemas.



Imagen 25: Clasificación de convertidores de olas según el principio de captación.

Fuente: <http://www.emec.uk.org>

Para que el lector comparta la complejidad he elaborado, en la siguiente imagen, un mosaico de propuestas de sistemas de generación de energía de las olas.



Imagen 26: Mosaico de gráficos de sistemas convertidores de olas.

Fuente: Elaboración propia empleando imágenes de varios autores.

2.6. La energía maremotérmica, la temperatura del agua como recurso.



Es en el libro 20.000 leguas de viaje submarino, de Julio Verne (1870), en el que por primera vez se anticipa la idea, el concepto de generar energía aprovechando el gradiente térmico entre las aguas superficiales y las profundas.

A diferencia de otros recursos energéticos marinos no existe una variedad de tecnologías y sistemas tan abultada.

El principio de funcionamiento que activa de estos sistemas de generación denominado Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC), es el de la diferencia de temperatura, de un mínimo de 20°C, entre la lámina de agua superficial y la profunda.

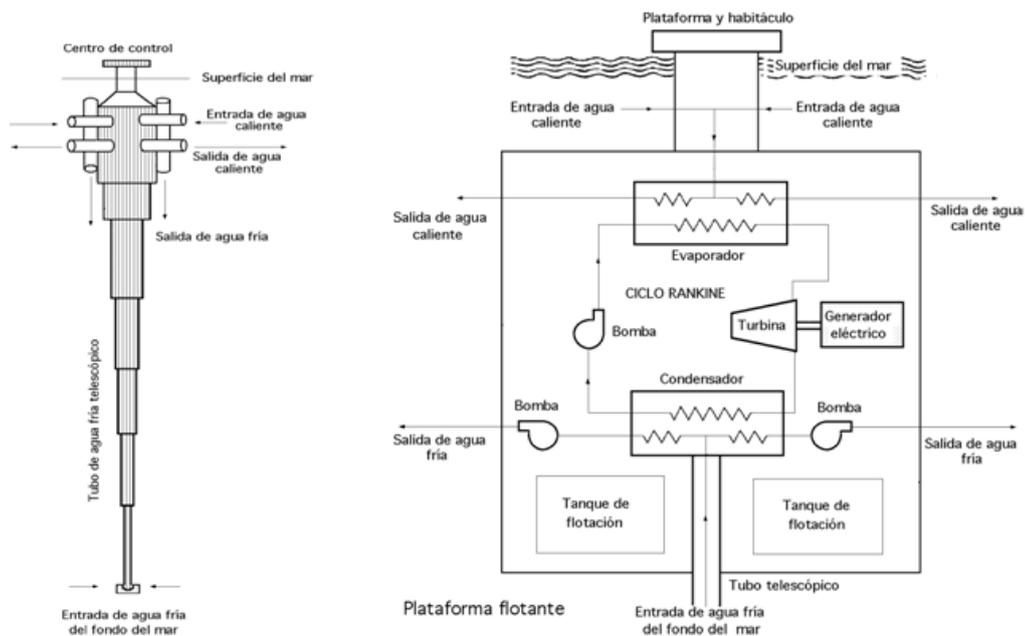


Imagen 27: Disposición Esquemática de una Central C.E.T.O.

Fuente <http://es.libros.redsauce.net>

Entre el foco frío y el caliente incorporamos un compresor y una turbina de baja presión que viene a funcionar atendiendo a las etapas que dispuso Rankine en su ciclo térmico y que según el tipo de fluido caloportador empleado puede ser un sistema en ciclo térmico cerrado (con amoníaco NH_3 o tetrafluoretano CH_2FCF_3), o en ciclo abierto (utilizando agua caliente como fluido de trabajo).

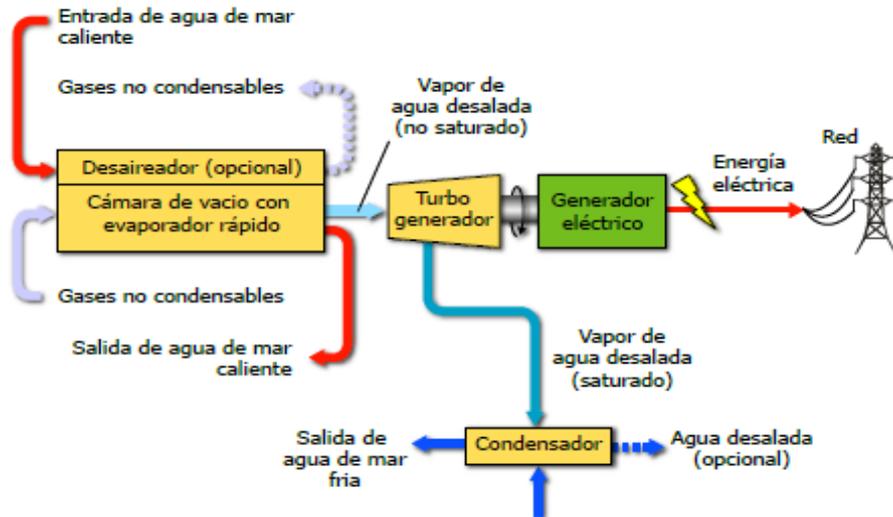


Imagen 28: Esquema conceptual de una central maremotérmica de ciclo abierto.

Fuente: Energies Renovables Marines: implicació en el món actual i futur i fonts existents. Viabilitat de subministrament energètic d'un port català. Autor: Denis Pons Fernández

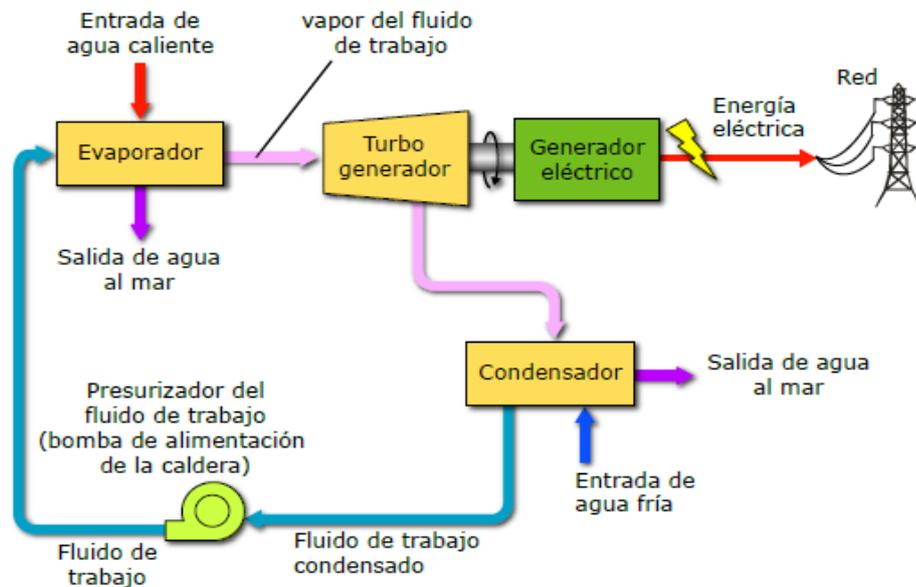


Imagen 29: Esquema conceptual de una central maremotérmica de ciclo cerrado.

Fuente: Energies Renovables Marines: implicació en el món actual i futur i fonts existents. Viabilitat de subministrament energètic d'un port català. Autor: Denis Pons Fernández.

La idea es que el agua caliente de la superficie de mar se bombea hacia un intercambiador de calor por el que circula el fluido “caloportador” de trabajo que se vaporiza al absorber el calor del agua, siendo la expansión del vapor la que hace girar la turbina de baja presión que arrastra un alternador que genera energía eléctrica.

Una vez sale de la turbina el fluido de trabajo, todavía en fase de vapor, atravesará un segundo intercambiador de calor por el que circula el agua fría con el que se consigue condensar, para que una vez líquido pueda reiniciar el ciclo.

Este tipo de plantas requiere costosas inversiones, tanto para su materialización como para su explotación, ya que trasladar la energía producida al punto de consumo implica salvar grandes distancias y a que para su generación requiere considerables profundidades.

2.6.1. Un emplazamiento próximo a lugares profundos.

Como hemos visto los criterios de operación en condiciones aceptables de rendimiento, requieren de una localización en la que la diferencia de temperatura entre las aguas superficiales y profundas, supere los 18°C de forma constante y durante todo el año.

Unos requisitos que son posibles a una profundidad aproximada a los 100 m.

Esta premisa hace como mejores candidatos las regiones ecuatoriales tropicales y subtropicales. Siendo los emplazamientos con mejores condiciones los siguientes archipiélagos:

Las islas de la Polinesia.

La Indias Occidentales

El Golfo de Guinea

El Mar del Coral

Islas Canarias.

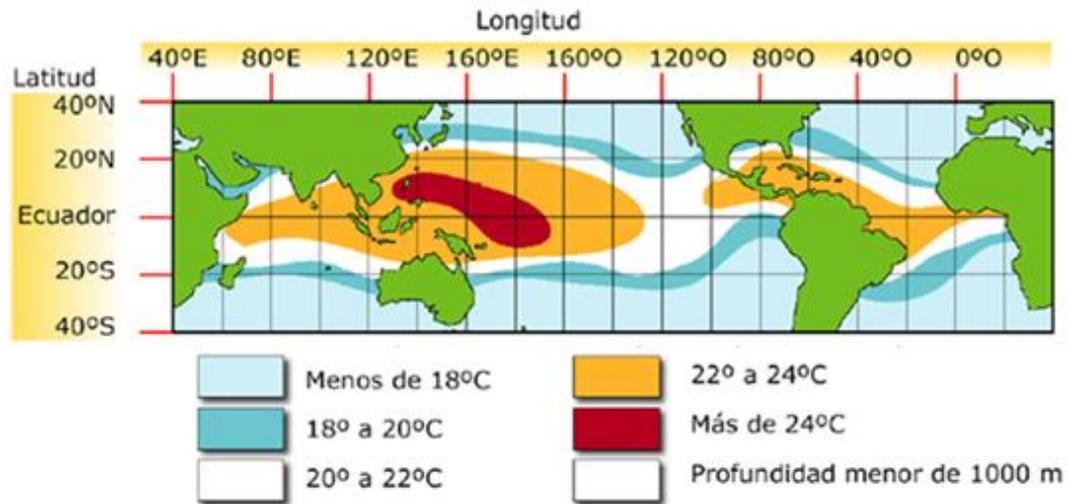


Imagen 30: Diferencia de temperatura entre la capa superficial del mar y los 1000 metros de profundidad
Fuente: <http://ecofactory.blogspot.com.es/2008/02/otec-energia-termica-oceanica.html>.

2.6.2. Un poco de historia. George Claude, un emprendedor colosal.

En 1930 y con cámaras de cine como testigos George Claude, discípulo del físico Jacques Arsene d'Arsonval (que en 1881 había propuesto el empleo de la energía térmica del mar para producir energía).

Claude, que para entonces ya era un prestigioso, famoso y millonario ingeniero químico francés que a comienzos de Siglo XX había conseguido inventar y patentar las luces de neón, licuar el oxígeno, separar los gases que forman el aire, el argón, el helio, fabricar amoniaco y fundar la que hoy es una de las mayores multinacionales del ámbito químico, Air Liquide.

Como decíamos, en 1930, el inventor George Claude consigue construir en la isla de Cuba una planta de 22 kW de potencia que funcionaba mediante el ciclo abierto de Rankine (con agua de mar), entre dos fuentes térmicas con 14°C de diferencia, y que para obtener un rendimiento del 1% empleó un total de 2 kilómetros de tubería de 1,6 metros de diámetro.

Una planta que el lector puede ver en el código adjunto a pie de texto, videos del propio Claude describiendo, con ímpetu, el funcionamiento de la planta, en el mismo espacio web el lector encontrará imágenes del cómo se armaron y botaron a la bahía de Matanzas los 2 kilómetros de tubos que hicieron funcionar a la máquina hasta que 11 días después una tempestad destruyó la conducción de agua fría.

En la misma web podremos encontrar del segundo experimento de Claude que en 1935 construyó sobre la Tuinisie, un buque mercante de 10.000 Toneladas que fondeó en aguas profundas en la costa de Brasil y que “estaba equipado con un total de 8 turbinas de ciclo abierto, con 257 kW cada una, que unidas entre sí activaban un alternador de 800 kW, y un compresor rotativo de amoniaco destinado a fabricar hielo” (Friedich, 1991, p.231).



<http://www.otecnews.org/2013/01/georges-claude-the-genius-gone-astray/>

El enorme coste de explotación de este tipo de plantas es el factor que más limita su uso En Costa de Marfil (1954), la compañía francesa Societé Energie des Mers completó un proyecto con dos módulos (de 5 MW cada) y una potencia neta de 7 MW que en ciclo abierto y con una tubería de 4 km alcanzaba un gradiente térmico de 20° C. Un esfuerzo que quedó abandonado a cuenta de los ya mencionados costes de explotación y la bajada del precio del petróleo.

Los sucesores de Claude.

En la década de los 60 y en Estados Unidos se desarrollan de forma simultánea tres proyectos de gran potencia que funcionarán con amoniaco como fluido caloportador en ciclo cerrado, estas son:

La central de Lockheed de 160 MW

La T.R.W. de 100 MW

La John Hopkins University de 100 MW

Por su parte, la compañía eléctrica Tokio Electric Power Company desarrolló entre 1970 y 1981 una experiencia piloto en la isla Nauru de una pequeña planta maremotérmica que funcionó en ciclo cerrado de 100 kW, pero que sólo en consumo propio funcionamiento gastaba 90 kW. También en este caso los costes de explotación forzaron su cierre.

Durante la década de los 70 se instaló en Keahole Point (kona, Hawai), un centro de investigación que funcionó ininterrumpidamente hasta 1999 y que puso en marcha pequeñas plantas con una potencia no superior a los 300kW.

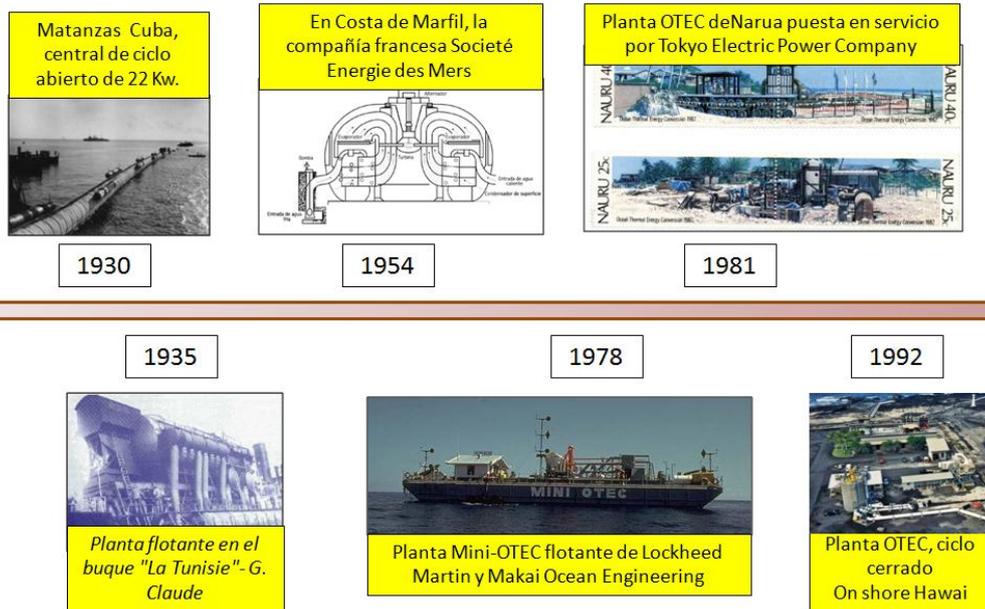


Imagen 31: Evolución histórica de los sistemas maremotérmicos.

Fuente: Elaboración propia con recursos tomados de varios autores.

2.6.3. La energía maremotérmica hoy.

OTEC para desalar agua en los buques de la USNAVY:

En la actualidad cabe destacar el esfuerzo que la empresa Ocean Thermal Energy Corporation está desarrollando para la marina de los Estados Unidos, un diseño con el que se propone sustituir el uso de generadores auxiliares para la desalación de agua por una planta de OTEC de 13MW de potencia.

Hawaii, siguiente etapa:

El equipo Lockheed Martin se ha unido a Makai Ingeniería oceánica para completar el diseño de una planta de OTEC cerrada de 10 MW que iniciará su funcionamiento en 2013.

Hainan, China:

La empresa Lockheed, está construyendo una planta de 10 MW de capacidad en Hainan, sur de China.

Isla de Kume, Okinawa, Japón:

En fase de pruebas durante los años 2013 y 2014, se trata un trabajo que coordina la Universidad de Saga y que cuenta con una planta OTEC de 50 kW de potencia, que reutiliza un tubo de admisión preexistente (empleado como toma de agua para la pesca y la agricultura), y tiene por cometido analizar los cambios de temperatura que produce el cambio climático sobre la masa de agua.

Otros usos:

Desalación:

Produce agua salada mediante la condensación del vapor de agua en los condensadores de superficie. Los primeros datos apuntan que una planta de 2 megavatios podría producir alrededor de 4.300 metros cúbicos de agua desalada al día.

Aire acondicionado:

El agua de mar fría utilizada en un sistema OTEC supone una oportunidad para proporcionar grandes cantidades de refrigeración para las industrias y los hogares cercanos a la planta. El agua se puede utilizar en los intercambiadores de calor para proporcionar aire acondicionado para edificios.

El Hotel Intercontinental resort de Bora Bora.

Utiliza un sistema de OTEC que usa la fuente fría para generar aire acondicionado. El sistema de agua de mar pasa a través de un intercambiador de calor donde se enfría el agua dulce en un sistema de circuito cerrado.

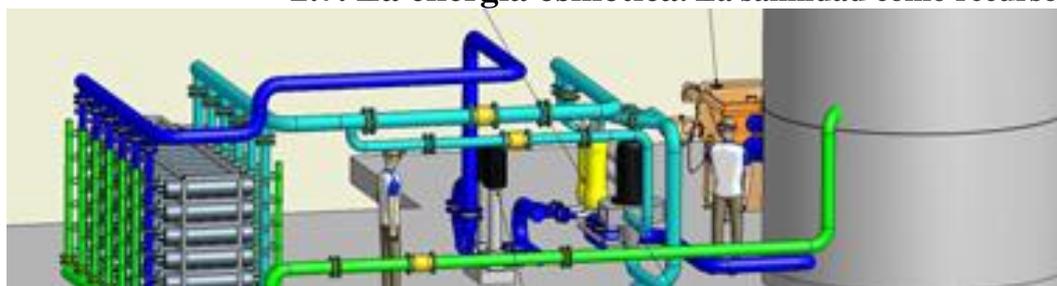
El Copenhagen Energy.

Inauguró en 2010 una planta de refrigeración para el distrito de Copenhague, Dinamarca. La planta suministra agua de mar fría para edificios comerciales e industriales, y ha reducido el consumo de electricidad en un 80 por ciento.

Bahamas.

Océano Thermal Energy Corporation (OTE) ha diseñado un sistema OTEC para un resort de vacaciones en las Bahamas.

2.7. La energía osmótica. La salinidad como recurso.



En 1960 con la creación de las membranas sintéticas de ósmosis a cargo del Ingenieros Químicos Sidney Loeb y Srinivasa Sourirajan, se abre una doble línea de trabajo, de un lado la desalación de aguas y de otro la generación de energía. A lo largo de los últimos años se han desarrollado dos opciones para aprovechar las membranas sintéticas de ósmosis en generación de energía:

- Presión retardada por Osmosis (PRO).
- Electrodiálisis Inversa (EDI).

2.7.1. Presión retardada por osmosis (PRO).

También llamada energía osmótica, fue definida en el año 1973 por el Ingeniero norteamericano Sidney Loeb, y es desarrollada, desde 1998 por la empresa noruega Statkraft.

El proceso consiste en introducir agua de mar (que en este proceso es denominado fluido hipertónico), con agua de río (denominado fluido hipotónico). Ambos fluidos se introducen, mediante bombas de aspiración, en dos cámaras separadas por una membrana semi-permeable.

La diferencia de concentración salina produce una circulación de fluido hipotónico (agua dulce) a través de la membrana hacia la cámara hipertónica, para igualar la concentración en ambas cámaras, se incrementa la presión en la cámara donde se produce la mezcla.

Éste incremento de la presión se denomina la presión osmótica y se puede calcular de la siguiente manera:

$$\Pi = \rho_{resultant} \cdot g \cdot h$$

Donde:

Π : es la presión osmótica.

$\rho_{resultant}$: Densidad resultante de la mezcla de agua dulce y salada.

g: gravedad: 9,81 m/s².

h: Diferencial de altura de la columna de agua.

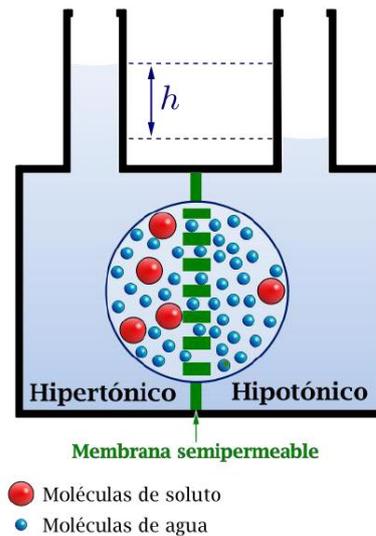


Imagen 32: Representación del proceso (PRO) .

Fuente: Energies Renovables Marines: implicació en el món actual i futur i fonts existents. Viabilitat de subministrament energètic d'un port català. Autor: Denis Pons Fernández.

La presión osmótica es la que produce la elevación de la columna de agua. Cuya presión es la que se emplea para accionar un turbogenerador como vemos en la siguiente fig

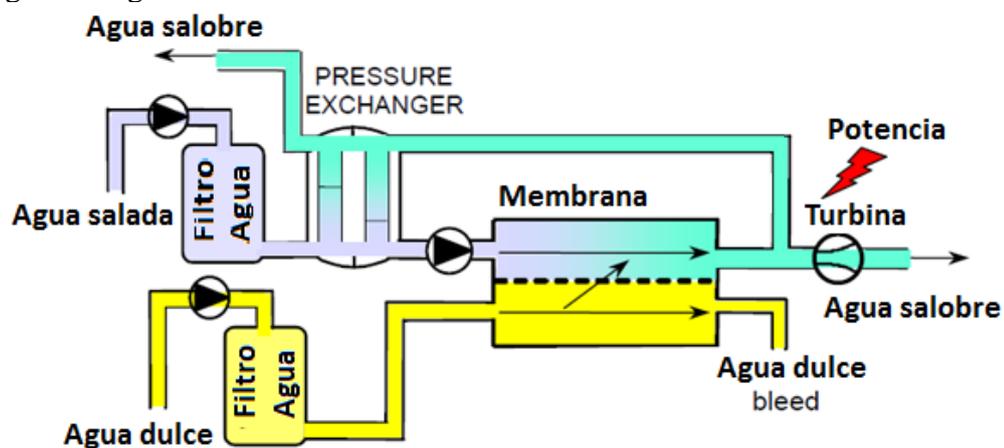


Imagen33: Esquema proceso PRO

Fuente: Energies Renovables Marines: implicació en el món actual i futur i fonts existents. Viabilitat de subministrament energètic d'un port català. Autor: Denis Pons Fernández

A la simplicidad del sistema hay que añadir que el residuo producido es de escasa toxicidad, pues como podemos ver en el esquema anterior, de un lado obtendremos agua dulce y del otro agua salobre con una menor salinidad que el agua de mar.

Con el siguiente código QR el lector puede visualizar un video en el que se explica el principio de funcionamiento del sistema PRO puesto en

funcionamiento en la planta noruega de Statkraft (a 60 km de Oslo), y que entró en funcionamiento en 2009.



<http://www.youtube.com/watch?v=Oc5bXa5PcWo>

2.7.2. Electrodialisis Inversa (EDI).

Fue el mismo ingeniero químico norteamericano Sidney Loeb (1917-2008) el inventor de este segundo proceso de generación de energía por ósmosis que después desarrolló la empresa Blue Energy en Holanda (2002).

Consiste en hacer circular el agua dulce de los ríos y el agua salada marina en sentido contrario por el espacio espacios libre entre dos tipos de membranas, una permeable para los cationes y la otra, permeable también, para los iones.

Las membranas están dispuestas de forma alternativa y están fabricadas en un polímero que fuerza el tránsito, a través de la membrana, de los iones (no del agua) que componen la sal que han de estar previamente divididos según la carga.

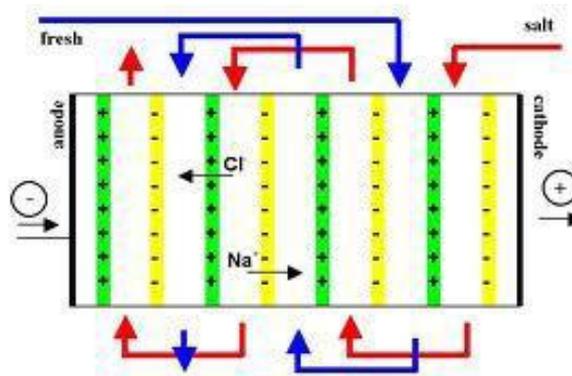


Imagen34: Esquema proceso EDI.

Fuente: Energías Renovables Marinas: implicación en el món actual i futur i fonts existents. Viabilitat de subministrament energètic d'un port català. Autor: Denis Pons Fernández

Así el flujo residual obtenido es un agua salobre con una concentración de sal mayor que el agua dulce y menor que el agua de mar.

El tránsito de electrones crea una diferencia de potencial a través de la membrana que se puede calcular mediante la ecuación de Nernst (Walther Nernst).

Donde:

$$E = \frac{RT}{zF} \ln \frac{\text{ión fuera de la celda}}{\text{ión dentro de la celda}}$$

E: Potencial electrico [V].

R: Constante de los gases ideales: 8,31 J/(K·mol).

T: temperatura en Kelvin [K].

z: moles de electrones transferidos.

F: Constante de Faraday: 9,649 · 10⁴ C/mol.

Esta ecuación establece que cuando la membrana queda en equilibrio termodinámico (finaliza el flujo a través de la membrana), queda cargada a la tensión E.

Un dato: Colocando 50 membranas intercambiadoras de iones y 50 membranas intercambiadoras de cationes se obtiene un potencial de 8,6 V.

El potencial total es la suma de diferentes potenciales generados en cada una de las membranas

Con el siguiente código QR el lector puede visualizar un video de la empresa Blue Energy que nos explica el principio de funcionamiento del proceso EDI.



<http://www.youtube.com/watch?v=opLU5AsBoFc>

2.8. Conclusión 1: La respuesta a la primera pregunta es si.

El primer bloque de este Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Marítima se ha hecho un repaso, de histórico a contemporáneo, de los sistemas de generación energética en el medio marino.

Así el lector sabe que existen tres líneas de trabajo predominantes:

Una vista que nos ayuda a reconocer:

Primero, el dinamismo creativo que vive el sector de la generación energética marina renovable.

Segundo, nos ayuda a visualizar que una proporción elevada de estos sistemas propuestos están en fase de prototipo, que no han sido desarrollados en escala real, y que por tanto, no han alcanzado la etapa de comercialización.

Tercero, muchas de estas propuestas o ingenios son Construcciones Navales (legalmente reconocidos como artefactos navales), que flotando, sumergidas o semi-sumergidas que pueden producir servicio.

Es este tercer matiz, que indica que muchos de los sistemas energéticos renovables son construcciones navales, es el que queremos explorar en el presente Trabajo de Fin de Carrera para el Grado en Ingeniería Marítima.

Pues entra de lleno en el marco de competencias profesionales del Graduado en Ingeniería Marítima.

Llegados a este punto, el lector puede entender que de alguna manera todos los entornos económicos más relevantes del planeta. Los que cuentan con una mayor capacidad industrial. Con una tradición naval más antigua se han posicionado para no perder el paso en la “guerra tecnológica” para evolucionar sistemas de generación de energía marina.

Tanto noruegos, como daneses, como británicos, estadounidenses, canadienses, japoneses, coreanos o chinos están tratando de posicionarse ante una línea de trabajo a la que aún no se ha dimensionado ni el formato, ni el tamaño óptimo.

Pues no todas las zonas tienen igual potencial eléctrico y no todas las localizaciones cuentan con una fácil descarga a tierra.

La posibilidad de reconvertir los astilleros en “fábricas de sistemas de generación energética marítima renovable”, ya ha sido contemplada por algunos de los astilleros más grandes del mundo como es el Astillero Lindø Yard (Dinamarca).

Un astillero, el Lindø entre 2008-2009 construyó la serie Emma, Eleonora, Elly, Ebba, Estelle, Eugen y Evelin Maersk, un conjunto de 7 buques gemelos de 397 metros de eslora y con una capacidad de carga de 15.500 contenedores, y que se ha planteado reorientar, readaptar su capacidad de trabajo hacia la evolución de los sistemas energéticos renovables marinos. Una estrategia que apuesta por la creatividad, recupera el atrevimiento para el sector astillero y lo vincula al creciente sector de las energías renovables marinas.

La última edición de la Bilbao Energy Week 2013, se apuntó a esta tendencia y programó en el recinto ferial una secuencia de jornadas, exposición y actos que pretendían generar sinergias entre el sector naval y el de los desarrolladores de sistemas energéticos.

La propia localización de Aberdeen, centro logístico del negocio de las plataformas petrolíferas del Reino Unido, se ha reconvertido, con el apoyo del EMEC, en el primer lugar de pruebas del mundo.

3. ¿Cómo justificar la puesta en servicio de convertidores energéticos marinos en un recinto portuario?

Como hemos visto existen opciones tecnológicas que pueden instalarse en un espacio portuario y producir energía que se puede volcar a la red eléctrica de tierra.

Pero esa sencillez de lo técnicamente posible ha de ser encajada en el marco regulatorio que afecta:

- A la generación transporte y distribución de energía.
- Uso y gestión del espacio portuario.

3.1. Producir energía de origen renovable en España.

Con la Ley 54/1997 de 27 de noviembre del sector eléctrico, se inicia un proceso de liberalización del sector eléctrico español que tiene por objetivo.

- Garantizar el suministro eléctrico.
- Garantizar la calidad de dicho suministro.
- Garantizar que se realice al menor coste posible

Y que como principio inspirador, se apunta en su preámbulo:

“No considera necesario que el Estado se reserve para sí el ejercicio de ninguna de las actividades que integran el suministro eléctrico. Así, se abandona la noción de servicio público”.

Un marco de referencia en el que *“la planificación estatal, queda restringida a las instalaciones de transporte, buscando así su imbricación en la planificación urbanística y en la ordenación del territorio”.*

Así con la Ley 54/1997 se delimita en la escala macro de la economía nacional un nuevo espacio económico y financiero que ha requerido un encadenado de cambios regulatorios que terminó redibujando el sector energético nacional.

Una regulación que no fue simultánea, ni homogénea, ni escalonada, ni tuvo igual porción de éxito en sus distintas líneas de actuación, y que persiguiendo la

máxima del ahorro de costes para la producción y el consumo. Forzó la roturación del negocio energético en tres grandes áreas:

- El negocio de la producción de energía.
- El negocio de la distribución de energía.
- El negocio de la comercialización de energía.

Tres líneas de negocio que termina soportando el usuario.

Ahora es el usuario quién ve, desde el punto más alejado de la red, y a final de mes. Como le llega una factura llena de conceptos como; compensaciones a la producción con renovables, a la producción con carbón, al déficit tarifario, a la subida de los combustibles, al mercado de futuros a la subasta energética a la estimación de consumo.

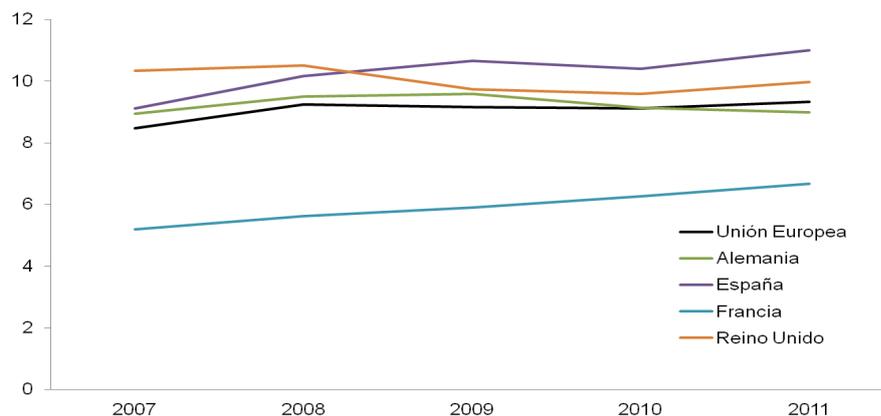


Imagen 35: Incremento interanual del precio de la electricidad para consumidores industriales.

Fuente: Eurostat .

Una tarifa eléctrica que justifica en sí misma las inercias de un sistema energético que no sólo ganó en complejidad sino que llegó a convertirse en una vía recaudatoria de ciclo corto del mecanismo financiero del Estado. Que en entre otras figuras llegó a permitir el cobro, no sólo la energía consumida, sino que activó el cobro de estimaciones de consumo por un periodo de tiempo que con frecuencia excedía el mes.

Cómo hemos visto antes, con la Ley 54/1997 de 27 de noviembre del sector eléctrico se inicia la liberalización de la actividad de producción de la energía:

- Inicia la privatización (mercado libre) de la generación de energía en España
- Genera la figura de ayuda a la competitividad de los operadores preexistentes al objeto de permitir una transición *“de un sistema intervenido y burocratizado a un sistema más libre de funcionamiento del sector”*.
- Se desgrava la producción y comercialización de combustibles y de biocombustibles.
- Reconoce la producción de energía con fuentes de origen renovable. Una línea de trabajo que habilitó el RD /2004 de 12 de marzo y cuyos aspectos más relevantes analizamos a continuación:
 - o Establece unos primeros objetivos temporales de volumen de generación por tecnología y para los que se crea una tarifa de energía por kWh producido, y por tipo de tecnología y que tendrá vigor por un periodo de tiempo estimado similar al de amortización de los equipos.
 - o La idea de este primer RD es que las instalaciones “vivan” el periodo de amortización de costes con una tarifa positiva y que una vez cubiertos los costes iniciales, pueda formar parte del conjunto de infraestructuras energéticas que operan en el mercado energético nacional.
- En 2007 el Estado decide apretar el acelerador y aprueba un segundo Real Decreto , el RD 661/2007 de 25 de mayo, que tiene por objeto iniciar un marcaje en corto a los sectores eólicos y fotovoltaicos que ya estaban a punto de alcanzar los objetivos de producción previstos por el RD 436/2004, y se propone repetir jugadas con otras tecnologías de generación de energía con fuente renovables que no terminaban de seducir a los inversores como la producción con biocombustible, biomasa, residuos, geotérmica y por primera vez la producción con energía marina, en la siguiente imagen tenemos una vista en la que se puede contrastar que tarifa correspondió a cada recurso energético renovable.

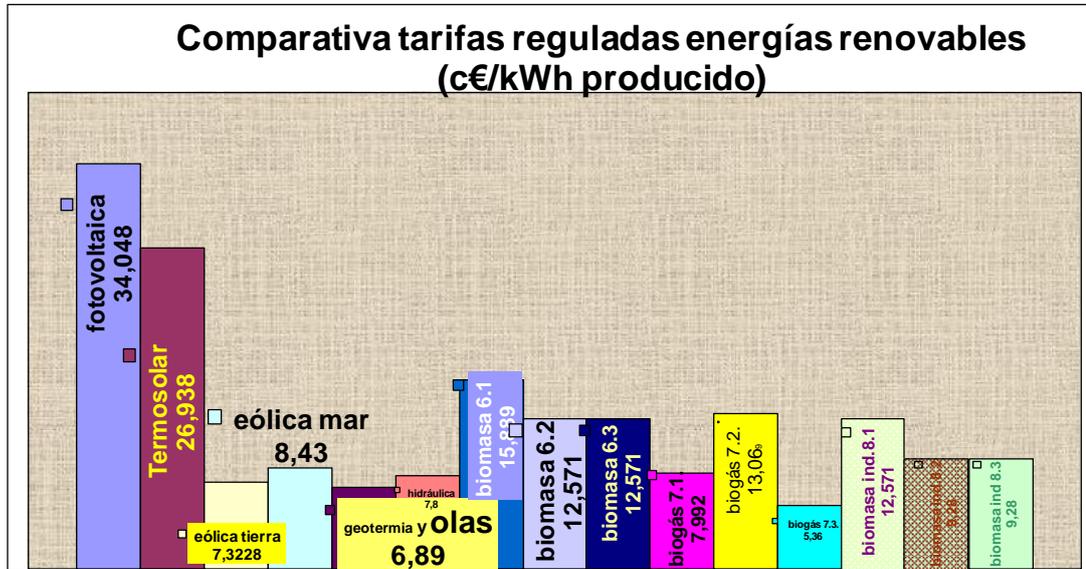


Imagen 36: Comparativa de tarifas reguladas por el RD661/2007.

Fuente: Elaboración propia con datos tomados del RD661/2007.

- Es el 1 de agosto de 2007, en pleno verano cuando se define el primer RD 1028/2007 que regula la producción de energías en el mar. En un instante en el que la tecnología se encuentra sin evolucionar, el Estado marca objetivos y establece tipos de tarifa para proyectos consolidados y para proyectos piloto. Un interesante esfuerzo normativo que entre las conclusiones de provecho está que hace un primer intento por definir cuál es la secuencia que debe seguir un promotor de este tipo de infraestructuras para la puesta en servicio de estos equipos, y ante qué órganos ha de presentar su propuesta los periodos de información pública la convocatoria de concurso. Una norma que es más precisa cuando el recurso marino es el eólico off-shore y más abierta para los otros sistemas de generación.

Para que el lector pueda consultarlo he incorporado las siguientes vistas de las etapas del trámite, que van desde que el promotor plantea su propuesta, las características que ha de recoger el proyecto, pasando por el concurso para la obtención de la concesión de uso del dominio público, la consulta a las distintas administraciones implicadas y la duración del permiso de reserva de zona.

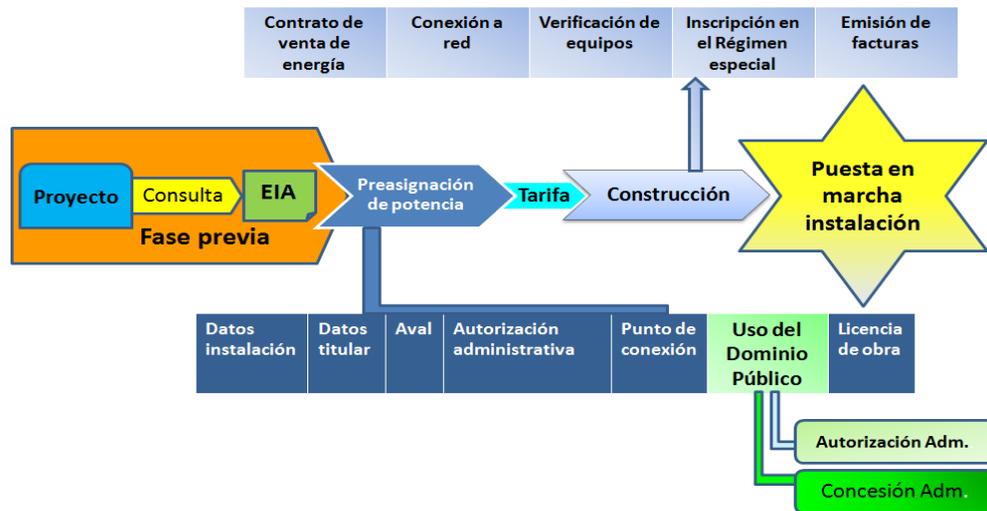


Imagen 37: Procedimiento a seguir para la Puesta en marcha de una planta de generación con fuentes renovables marinas. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de RD1028/2007, el Artículo 4 RDL de 7 de abril de 2009 y el RD 661/2007.

Dado que en España hay muy pocas instalaciones que hayan cumplido con todos los pasos que establece esta normativa he incorporado en el siguiente gráfico la relación de pasos que tuvo que seguir el Ente Vasco de la Energía (EVE), para poner en marcha el proyecto de investigación y prueba de equipos denominado BIMEP.



Imagen 38: Procedimientos seguidos por el Ente Vasco de la Energía para poner en marcha las instalaciones del BIMEP.

Fuente: Elaboración propia con información tomada de la página <http://www.eve.es/Proyectos-energeticos/Proyectos-en-desarrollo/bimep/Sobre-bimep.aspx>

3.1.1. Los éxitos del marco regulatorio renovable

La insistencia generalizada de los inversores por continuar con la producción con eólica y fotovoltaica, descartando otras opciones como biomasas, biocombustibles, enrareció el ambiente. En el año 2008, España consigue ser el primer país mundial en potencia de energía solar fotovoltaica, el Mix energético nacional había cubierto los objetivos de producción con paneles y molinos. Se había conseguido abaratar costes (sólo en fotovoltaica de 6€/W instalado a menos de 3€/Wh instalado), el sistema tarifario que lo soportaba había llegado a su tope.

Era el momento de la biomasa, la geotermia, la termosolar, etc. El país contaba con un sector financiero fuerte. Había dinero. La construcción llegaba a su zenit, existía una experiencia de éxito con el ejemplo de las fotovoltaicas y eólicas, y había un marco legal para intentarlo con otras tecnologías.

Lo que sucedió después fue una bronca mediática impulsada por los productores de renovables y por los productores no renovables que se escapó al control del Estado. Estamos hablando de un sector fuerte con capacidad financiera que pretendió marcar el paso, decir que tecnología es la que hay que financiar. Vivimos un instante en el que es muy barato generar una campaña de opinión en contra o a favor de conseguir una tarifa más ventajosa para los intereses propios que sostenible para el sistema.

Y en medio de esa guerra mediática, el Estado perdió la iniciativa y la nitidez cediendo a un lado y al otro hasta agotar los márgenes del marco tarifario que terminó forzando distintos RD de recorte hasta que en enero de 2012 apareció el RD de moratoria que deja en un “ya veremos” la producción con renovables y con el que posiblemente el legislador pretenda aliviar la presión mediático-social generada por los distintos actores que conforman el sistema de generación de energía eléctrica nacional.



Imagen39: Pantallazo que comunica la suspensión temporal de primas a instalaciones de generación en régimen especial.

Fuente: <http://www.idae.es>

Un conjunto de actores que atiende a un perfil heterogéneo en el que se mezclan inversores, con especuladores, con financieros, con ingenieros, con matemáticos, con ahorradores. Por un instante hablar de renovables, de energía, era como hablar de fútbol, todo el mundo tenía un interés, una opinión, todo el mundo quería su porción de negocio.

Es posible que el Estado haya pecado de débil en una batalla que sólo tenía que regular, y marcar el paso.

Es posible que este escenario de confrontación haya enlentecido la labor del Estado. La ley 54/1997 de 27 de noviembre, le daba competencias para planificar la red y a día de hoy no es posible inyectar más renovables. La red eléctrica no está planificada, envejece, no tiene capacidad para dar salida a toda la energía que puede producirse, una red que necesita ser adaptada al mercado que la nutre que necesita mejorar su eficiencia.

A cuenta de estas deficiencias en la planificación estatal, el paisaje rural se ha llenado de parques eólicos, de huertos solares, que producen energía muy lejos de los lugares de consumo.

España ha puesto en servicio tecnologías que son más modernas y a la vez más intermitentes que las que se han puesto en marcha en el resto de países de su entorno, y menos biomasa.

Mientras, el sector productivo no renovable ha puesto en servicio, recientemente, multitud centrales térmicas de gas de ciclo combinado pensadas para funcionar 5.000 horas año y que a cuenta de la estrategia de promoción de las renovables, sólo operan en los momentos en que disminuye el viento y el sol. Un régimen de uso, que termina acortando el ciclo de vida de este tipo de instalaciones y que afecta a la rentabilidad de su explotación.

Por otro lado llama la atención que el Estado no haga efectiva la devolución de concesiones caducadas por la construcción de pantanos que impulsó el régimen franquista cincuenta, sesenta, setenta años antes y que fue regulada por el Real Decreto 916/1985.

Es decir, el proceso liberalizador del sector de la producción de energía en España está lleno de matices que apuntan que no ha alcanzado su madurez, que no contenta a todos los actores y que no parece dibujar un objetivo común.

En medio de la escalada de precios de los combustibles, de la tarifa eléctrica. En una coyuntura de crisis financiera y económica, surge el malestar de los consumidores, de los grandes consumidores de energía que ven como el consumo de energía afecta a su propia competitividad y en la que la idea de “escaparse de la red eléctrica” apunta ser una solución sugerente.

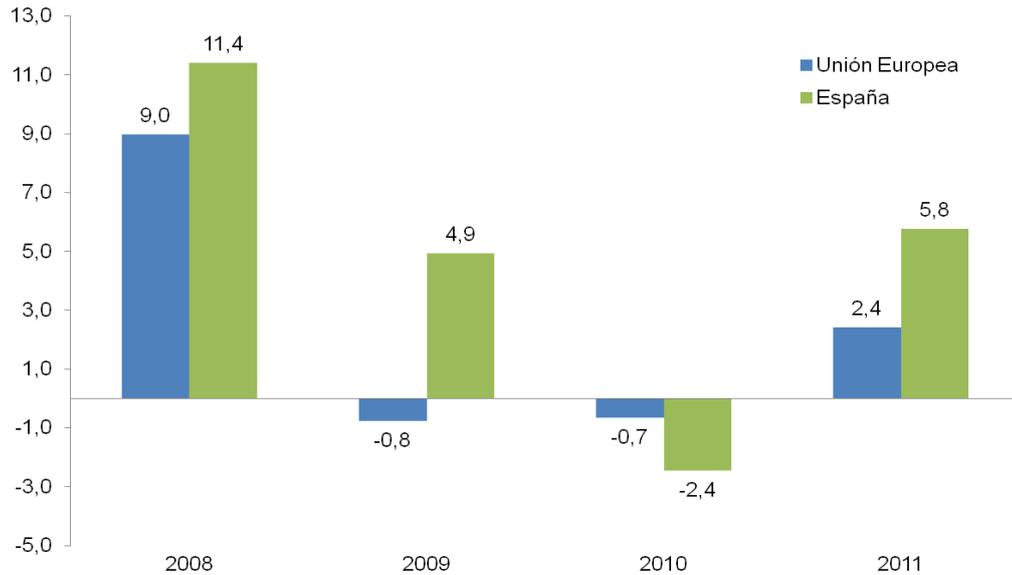


Imagen 40: Incremento interanual del precio de la electricidad para consumidores industriales.

Fuente: Eurostat.

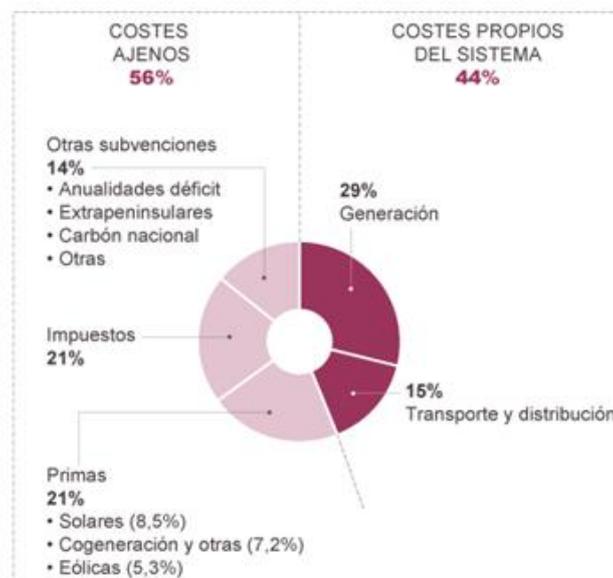


Imagen 41 : Composición de la tarifa eléctrica

Fuente: <http://www.elpais.com> 20 de diciembre de 2013.

Así el Estado se encuentra con un nuevo hueco por regular, la producción de energía eléctrica para el AUTOCONSUMO.

En ella se encuentran nuevos actores. Ahora es el tejido productivo del país el que espera una solución. Son los grandes consumidores los mismos en cuyo consumo se asienta el marco tarifario, los que han entendido que es técnicamente posible producir la energía que consumen, que es más barato producir la energía que se consume.

Un frenazo relativo.

Así el frenazo a la generación con renovables que impulsa el Real Decreto Ley 1/2012 de 28 de enero “Moratoria”, es complementado con nuevas normas que tratan de ralentizar, retardar la generación en régimen de autoconsumo.

Un panorama que en contra de lo que pudiera parecer no supone un frenazo en la regulación del sector eléctrico, ni a las oportunidades de los sistemas de generación con energías renovables. Pues de forma simultánea, el propio Estado, ha gestado tres líneas de trabajo:

- Plan para el Ahorro Energético.
- El Código Técnico de la Edificación.
- La estrategia 2020.

De entre estas tres líneas de trabajo cabe destacar las cifras que la estrategia 2020 reserva para la puesta en servicio de sistemas energéticos marinos:

	2010			2015			2020		
	MW	GWh	GWh (normalizados)(*)	MW	GWh	GWh (normalizados)(*)	MW	GWh	GWh (normalizados)(*)
Hidroeléctrica (sin bombeo)	13.226	42.215	31.614	13.548	32.538	31.371	13.861	33.140	32.814
< 1 MW (sin bombeo)	242	802	601	253	772	744	268	843	835
1 MW-10 MW (sin bombeo)	1.680	5.432	4.068	1.764	4.982	4.803	1.917	5.749	5.692
>10 MW(sin bombeo)	11.304	35.981	26.946	11.531	26.784	25.823	11.676	26.548	26.287
por bombeo	5.347	3.106	(**)	6.312	6.592	(**)	8.811	8.457	(**)
Geotérmica	0	0	(**)	0	0	(**)	50	300	(**)
Solar fotovoltaica	3.787	6.279	(**)	5.416	9.040	(**)	7.250	12.356	(**)
Solar termoelectrica	632	691	(**)	3.001	8.287	(**)	4.800	14.379	(**)
Energía hidrocinética, del oleaje, mareomotriz	0	0	(**)	0	0	(**)	100	220	(**)
Eólica en tierra	20.744	43.708	42.337	27.847	55.703	55.538	35.000	71.640	70.734
Eólica marina	0	0	0	22	66	66	750	1.845	1.822
Biomasa, residuos, biogás	825	4.228	(**)	1.162	7.142	(**)	1.950	12.200	(**)
Biomasa sólida	533	2.820	(**)	817	4.903	(**)	1.350	8.100	(**)
Residuos	115	663	(**)	125	938	(**)	200	1.500	(**)
Biogás	177	745	(**)	220	1.302	(**)	400	2.600	(**)
Totales (sin bombeo)	39.214	97.121	85.149	50.996	112.797	111.464	63.761	146.080	144.825

(*) En esta columna aparecen los valores normalizados para la producción hidráulica y eólica según se recoge en el Artículo 5, Apartado 3 de la Directiva 2009/28/CE, utilizando las fórmulas de normalización contenidas en su Anexo II.

(**) Estas producciones no se normalizan. Se consideran los mismos valores que la producción sin normalizar.

Tabla 2: Objetivos 2010, 2015 y 2020 del Plan de energías renovables en el sector eléctrico (potencia instalada, generación bruta sin normalizar y generación bruta normalizada)

Fuente: <http://www.idae.es>

Líneas en las que cabe encajar el desarrollo de experiencias de generación de energía con sistemas de energéticos renovables, no tanto para la producción de energía eléctrica, sino para la producción de servicios energéticos (vectorizando la energía).

3.2. Los Puertos y la Energía.



Actualmente, los recintos portuarios son grandes consumidores de energía, pues además de la actividad de transporte marítimo, dan acogida a actividades industriales, de varada, servicios, talleres, astilleros, logísticas, etc.

Actividades que consumen energía para generar servicios.

Resulta llamativo observar como en la memoria anual que elaboran las distintas Autoridades Portuarias de nuestro país, computan el consumo en energía eléctrica del puerto por ser un coste que afecta a la propia competitividad de cada una de las instalaciones (ver cuadro de consumos eléctricos del Puerto de las Palmas).

Puerto de Las Palmas		
Año	Consumo de la luz (kWh)	Consumo kWh/m² Zona de servicio
2009	7.667.517	1,77
2010	7.768.365,14	1,79
2011	5.648.829	1,30
Puerto de Arrecife		
2009	903.137	1,71
2010	950.000	1,79
2011	935.000	1,76
Puerto del Rosario		
2009	306.737	1,659
2010	380.000	2,055
2011	431.045	2,331

Tabla 3: Memoria ambiental 2012 autoridad Portuaria del Puerto de Las Palmas

Fuente: Autoridad Portuaria Puertos de Las Palmas

La escalada del precio del kWh consumido afecta a la cuenta de explotación de cada uno de los recintos. Unos costes que, según el Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante, cada Autoridad Portuaria ha de asumir, afrontar, reducir atendiendo a su propio criterio técnico. Bien endosando

el coste de los consumos a los concesionarios, bien explorando nuevas vías de negocio, o empleando los recursos que estime conveniente.

Cada Autoridad Portuaria es responsable de la competitividad del recinto portuario que explota.

Ese principio de competitividad que plantea el RDL 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley de Puertos y de la Marina Mercante tiene por objeto que el espacio portuario sea:

- Más autónomo.
- Más competitivo.
- Que desarrolle una gestión profesionalizada.
- Adaptar el desarrollo del Puerto a un entorno cambiante:
 - o Competencia inter-portuaria.
 - o Atender al efecto globalizador de la economía.
 - o Consolidación del mercado interno comunitario.
 - o Creciente liberalización del mercado.

Un RDL 2/2011, de 5 de septiembre, que atiende a la filosofía de exploración de nuevas áreas de negocio en pro de la competitividad como así lo refleja su preámbulo:

“La introducción de novedosos elementos en la gestión del dominio público portuario para conseguir un completo desarrollo del modelo concesional en beneficio de la máxima rentabilización socioeconómica de aquél; el fomento de la inversión privada en las instalaciones y los equipamientos portuarios; y la disminución de los costes del sistema portuario español en aras de la mejora de la competitividad y la capacidad de inversión en las infraestructuras.”

Los espacios portuarios son grandes consumidores de energía que están pegados al mayor recurso energético de la Tierra, el Mar.

3.2.1. ¿Cómo justificar la puesta en servicio de convertidores energéticos marinos en un recinto portuario?

Una lectura de la normativa en vigor y varias consultas realizadas a los servicios jurídicos de la Autoridad Portuaria del Puerto de Las Palmas, apuntan que, en principio, se puede encajar una propuesta para utilizar la energía del mar para generar servicios energéticos en el recinto portuario como la que esbozamos en este Trabajo de fin de Grado.

3.2.2. Apunte 1: Un matiz relevante.

Para evitar fisuras, recuperamos la idea, utilizar convertidores de energía marina para producir servicios energéticos en el recinto portuario.

Este matiz nos permitiría “salvar” los requisitos dispuestos por la normativa de generación con renovables que vimos en el capítulo anterior. Puesto que no se va a volcar energía eléctrica a la red eléctrica, sino que se va a utilizar convertidores de energía marina para producir energía eléctrica con la que se va a generar servicios energéticos como distribución de frío, calor, aire comprimido o agua desalada.

Outputs que no son computables por el marco regulatorio eléctrico.

3.2.3. La figura de la actividad “Servicios Energéticos” en el espacio portuario:

Los servicios energéticos quedan definidos en el artículo 106 como servicios generales y su régimen de prestación de servicios se ajustará a las normas y criterios técnicos del Puerto.

El régimen de Prestación de este tipo de servicios será:

- Iniciativa privada
- Libre concurrencia
- Obtención de licencia:
 - o Titulares.
 - o Para cada servicio.
 - o Autoprestación e integración de servicios portuarios.

3.3. El uso del dominio público en el recinto portuario.



Es el libro primero de RDL 2/2011, de 5 de septiembre, el que define en su capítulo c. cómo es la gestión, la composición y la utilización del dominio Público Portuario estatal.

Es interesante destacar que toda propuesta a realizar en puerto ha de:

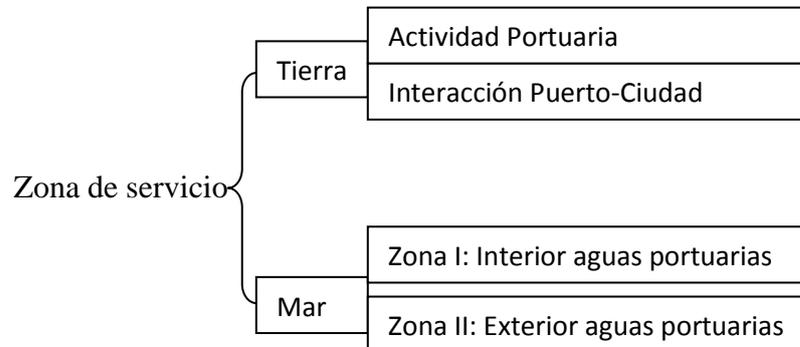
- Garantizar el interés general (art.66).
- Ha de ser encajada en el Plan Director de Infraestructuras del Puerto (con el que se resuelve las posibles incompatibilidades urbanísticas (Art. 54).
- El Plan director de Infraestructuras ha de estar encajado en el Plan director (art.54).
- El Plan Director ha de estar reconocido en los Planes de Empresa del Puerto (art.54).
- Los Planes de Empresa dentro del Marco estratégico (art.54).
- El Marco estratégico dentro del Modelo de desarrollo propuesto por Puertos del Estado, (art.54).



Imagen 42: Secuencia jerárquica de los distintos planes que rigen la gestión de los espacios portuarios.

Fuente Elaboración propia con notas tomadas del de RDL 2/2011, de 5 de septiembre.

Conforme al artículo 69 la delimitación del espacio y usos portuarios atiende a:



En el artículo 72 nos encontramos una condición que es preceptiva en el régimen de utilización del dominio público portuario: “la ocupación de espacios de dominio portuario sólo para actividades relacionadas con la actividad portuaria”

Mientras, es el artículo 73 el que establece el régimen de utilización y aporta un matiz que es relevante para la propuesta que defendemos en este trabajo:

Art.73.5: “Los titulares de autorizaciones y concesiones deberán comprometerse al desarrollo de una actividad mínima o tráfico mínimo que garantice una explotación razonable del dominio público.”

Suponiendo que se ha superado los requisitos de planificación y de ordenación urbanísticas en vigor, y volviendo al Libro II en este capítulo encontramos dos recorridos. Según el nivel de madurez de la solución propuesta.

Si se decidiera desarrollar una experiencia piloto experimental. El promotor tendría que solicitar una autorización para el uso de la lámina de agua y de la superficie requerida. Un procedimiento más corto que estimara por un periodo de tiempo no superior a los tres años y con instalaciones que tendrían que ser desmontables.

3.3.1. Secuencia del Procedimiento autorización uso espacio en recinto portuario.

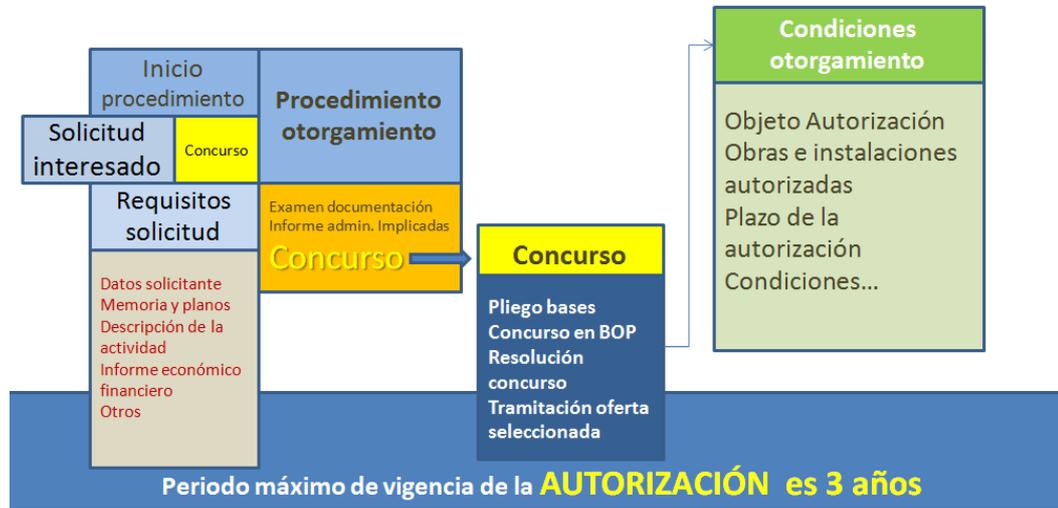


Imagen 43: Secuencia para la obtención de una AUTORIZACIÓN para el uso del espacio portuario (con carácter personal e intransferible(art.80)).

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del RDL 2/2011, de 5 de septiembre.

En caso de que la propuesta sea madura, el promotor podría obtener una concesión administrativa para el uso del espacio portuario (tanto la lámina de agua, como de la superficie terrestre estimada). Un permiso de uso que podría alcanzar los 35 años de vigencia.

Según la entidad del proyecto, la concesión administrativa podría:

- Requerir de un proceso concursal para su resolución.
- Ser de otorgamiento directo.

En el primer caso el promotor/ aspirante a concesionario tendría bien plantear su propuesta, o participar en un concurso ya convocado, como vemos en la siguiente secuencia.

3.3.2 Secuencia del procedimiento de concesión de uso de espacio en recinto portuario.

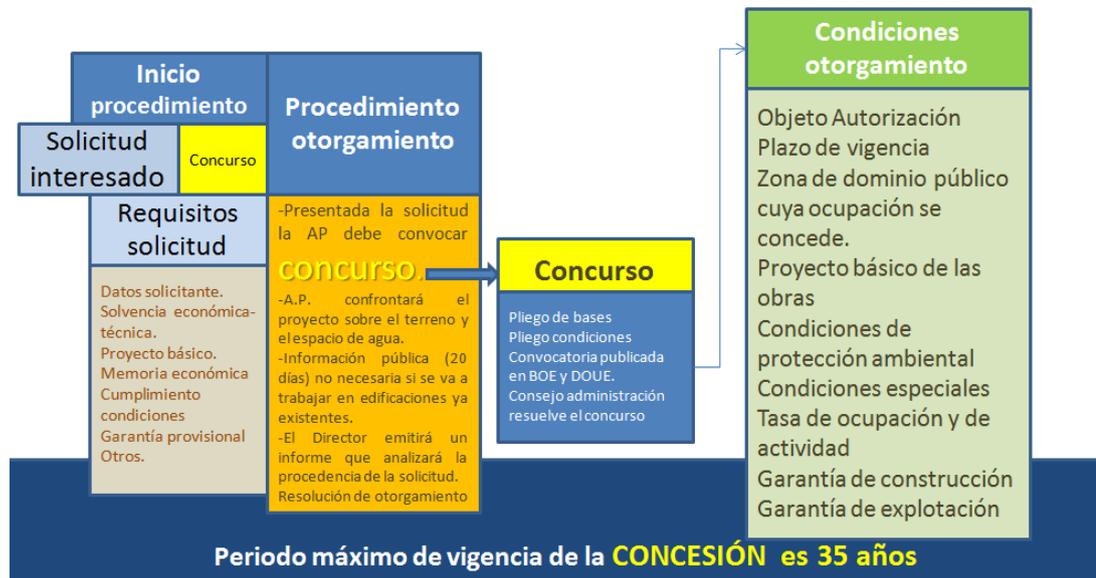


Imagen 44: Secuencia para la obtención de una Concesión para el uso del espacio portuario.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del RDL 2/2011, de 5 de septiembre.

El otorgamiento directo es regulado por el artículo 83 del RDL 2/2011, de 5 de septiembre y supone una línea directa de acceso a la Concesión administrativa cuando:

- El solicitante sea otra administración pública.
- Cuando fuera declarado desierto el concurso convocado para el otorgamiento de una concesión.
- “Cuando la superficie a ocupar por la concesión sea inferior a 2.500 metros cuadrados o para instalaciones lineales, tales como tuberías de abastecimiento, saneamiento, emisarios submarinos, líneas telefónicas o eléctricas, conducciones de gas, entre otras, que sean de uso público o aprovechamiento general.

En estos casos, el procedimiento de otorgamiento de la concesión será el previsto en los apartados 2 y siguientes del artículo 85, sin necesidad de convocatoria de concurso ni del trámite de competencia de proyectos.”

3.3.3. Apunte 2. Solicitar una concesión administrativa.

Este último recorrido para obtener una concesión administrativa para el uso del espacio portuario por otorgación directa, resulta muy esclarecedor pues puede ser utilizado para dar cabida a la propuesta que estamos esbozando en este trabajo.

3.4. Barreras no técnicas a tener en cuenta en la definición de una propuesta:

El mar es de todos, y localizar un área, una lámina de agua, para emplazar en ella equipos convertidores de energía de las olas o las corrientes y su correspondiente tejido de conectores, cableados, sistemas de anclaje, etc. Requiere de un trabajo de campo que ayude a identificar cuanto de compatible es la propuesta y cuál es el calado de las afecciones tanto ambientales, como sociales y económicas que dicha iniciativa puede generar.

Debe entender el lector que este trabajo de campo en el que se hace un inventario de afectados y la previsión de impacto, es parte de los trámites exigidos y ya comentados en el apartado anterior.

Dada la relevancia que pueden tener algunas de los impactos sobre la propia viabilidad del proyecto, he considerado interesante compartir con el lector una relación de escenarios en los que es menos posible implantar un sistema de generación energético renovable como el que nos ocupa.

Competencia con otros usuarios:

- Rutas comerciales.
- Zonas de pesca.
- Industria petrolera.
- Práctica de Surf.
- Práctica de remo.
- Zona de recreo turístico.
- Zona de ejercicios militares.
- Zonas de protección ambiental.
- Equipamiento de litoral:
 - o Puentes.
 - o Puertos.

Impactos ambientales:

- Afecciones a la vida marina.
- Emisión de ruidos.
- Generación de sedimentos.
- Alteraciones a la geografía de la costa.
- Disturbios producidos con la mar en calma.

Impactos sociales:

- Afección a actividades económicas- sociales.
- Impacto visual.
- Afecciones a la red eléctrica a la que se vuelca la corriente.

Impactos en tierra:

- Afecciones a los propietarios del terreno utilizado para la localización de estaciones transformadoras y la conducción de la línea de salida de corriente.
- Acceso rodado al área de vertido.

3.5. Conclusión 2. Fortalezas de los recintos portuarios para la generación de energía.

Esta pequeña lista de posibles afectados nos ayuda a acercarnos a un aspecto colateral que acompaña al desarrollo de las energías renovables, y es, su dispersión por el territorio.

Con el objetivo de evitar la concentración de sistemas de generación para dar mayor robustez a la red ante eventuales caídas del sistema de distribución, hemos asistido, a lo largo de la última década, al emplazamiento de equipos de generación tanto eólicos, como fotovoltaicos, entre otros, en lugares remotos alejados de los sumideros de consumo. Una estrategia que, en la praxis, supone uno de los procesos de antropización del paisaje más profundos del último siglo. Así cada instalación de generación nueva implica nuevos impactos al entorno, la puesta en servicio de nuevos tendidos eléctricos, accesos rodados, estaciones transformadoras, etc.

Una estrategia de generación que contrasta con la de producir energía justo donde está el consumo.

Ante este panorama reivindicar la generación de energía en el recinto portuario es reivindicar un espacio en el que se consume energía, que suele estar próximo a la trama urbana que también es una gran consumidora de energía. Es decir, tenemos un espacio (ciudad y puerto), con un intenso consumo de energía pegado a un recurso energético estable y predecible.

Conclusión del Capítulo 3: Utilizar sistemas de generación de energía de origen marino para la producción de servicios energéticos en el espacio portuario.

4. Definición de la propuesta:

Una vez hemos visto cómo ha sido la evolución de las distintas opciones tecnológicas que aprovechan el recurso energético presente en el medio marino para generar energía, una vez hemos hecho un análisis de de cuáles son las oportunidades y las posibilidades del mercado de la energía eléctrica y de cuál es la normativa que rige el uso y gestión de los espacios portuarios.

Entiendo que es el momento de hacer un primer esbozo de la propuesta de instalación que defenderemos en este Trabajo de fin de Grado en Ingeniería Marítima.

Entendiendo que la producción de energía eléctrica con fuente de origen renovable cuenta con un marco regulatorio riguroso y que la tecnología de generación no ha alcanzado aún una madurez tecnológica que le permita ser competitiva.

La propuesta de utilizar sistemas de generación de energía con fuentes renovables marinas en el espacio portuario que nos ocupa atiende a 2 principios.

- 1) No volcar energía a la red eléctrica.
- 2) Producir servicios generados con energía renovable en el recinto portuario como:
 - Producir agua salada.
 - Producir electricidad para su venta directa a embarcaciones.
 - Producir frío.
 - Producir hielo.
 - Producir calor.
 - Producir aire comprimido.

4.1. Trasformar energía en producto energético.

Esta propuesta pretende emplear el recurso energético de origen marino y transformarlo en productos energéticos que se comercializarían en el recinto portuario como:

- m^3 de agua desalada.
- m^3 de aire comprimido.
- Frigorías por hora.
- Calorías por hora.
- kWh vendido a las embarcaciones atracadas en Puerto.

Recordemos que la infraestructura que necesitamos estará compuesta de dos superficies, el terreno ocupado en el lado tierra en el que se instalarán la subestación para el volcado de la energía generada y los distintos sistemas para el procesado de dicha energía, y la de la lámina de agua en la que se encontrarán los convertidores de energía, los puntos de conexión, las subestaciones y el cableado, entre otros.

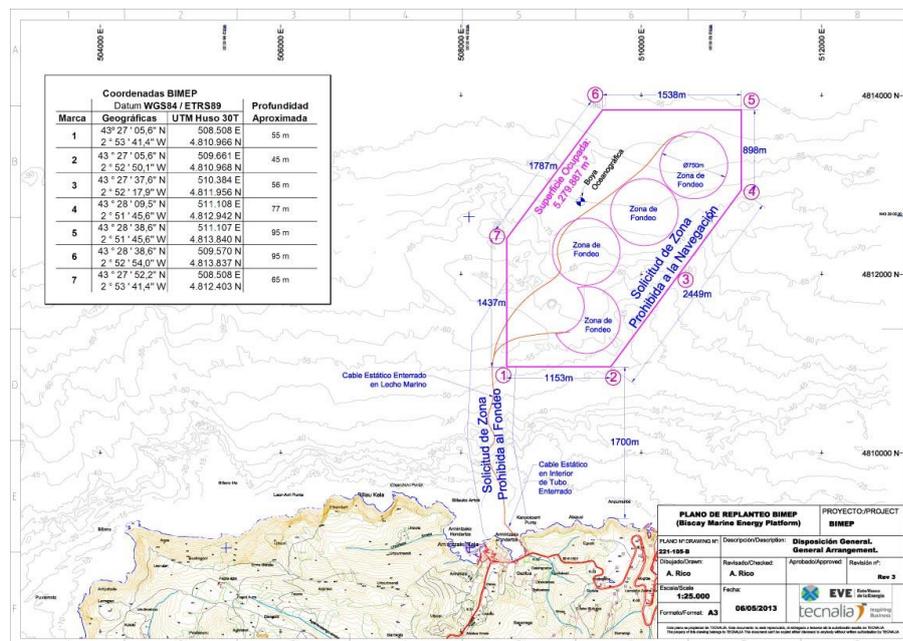


Imagen 45: Disposición general de la instalación Bimep, así como el trazado del cable y las áreas destinadas al fondeo de los dispositivos captadores de energías marinas.

Fuente: <http://bimep.com/sobre-bimep/localizacion-de-bimep/>

Dado que el título de Grado en Ingeniería Marítima que quiero obtener con este Trabajo supone asumir competencias para instalaciones ubicadas sobre embarcaciones o artefactos flotantes, este trabajo tendrá un mayor detalle para el lado de la instalación que está en el agua.

En el siguiente gráfico se incorpora una vista en la que se ven los distintos componentes que forman parte de la instalación.

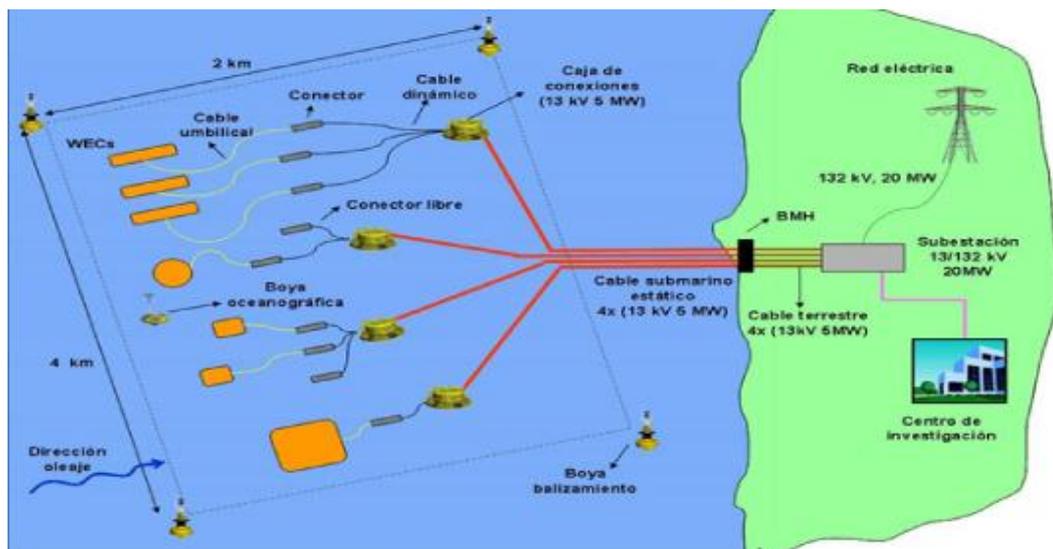


Imagen 46: Componentes de instalación de generación marina

Fuente: <http://bimep.com/sobre-bimep/localizacion-de-bimep/>

Relación de equipos que forman parte de la instalación.

- Convertidos de energía.
- Anclajes y amarres del equipo.
- Cableado submarino.
- Caja de conexiones.
- Conexión electrónica de potencia.
- Estación transformadora y de conexión a la red eléctrica de tierra.

Actualmente existe muy poca experiencia en la construcción de plantas de generación de energía marítima en alta tensión, por lo que no contamos con una estimación robusta de qué partes de la instalación son más costosas. En el cuadro siguiente podemos ver una tabla comparativa de la diferencia de costes entre los parques eólicos marinos y los terrestres, un cuadro comparativo que generó la

Agencia Internacional de la Energía en el año 2009 y que sólo nos sirve para asumir que los sistemas dispuestos en el medio marino son más caros.

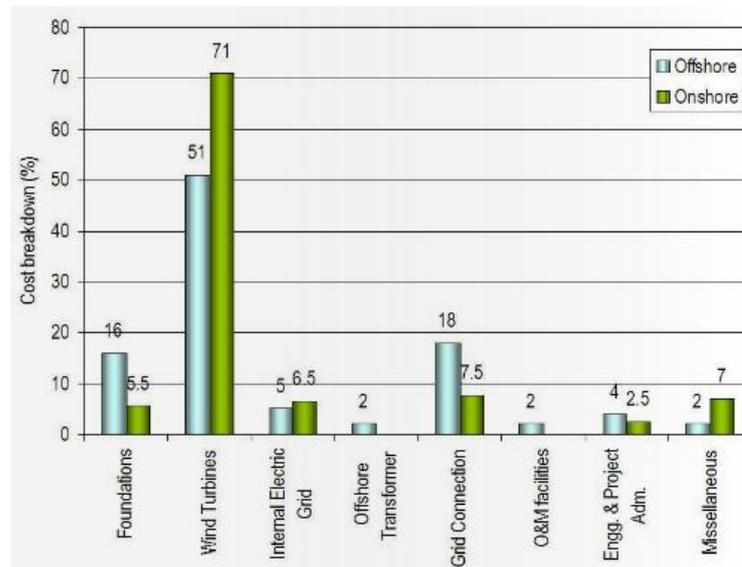


Imagen 47: Comparativa de costes de las distintas etapas de un proyecto eólico en tierra y uno en mar .

Fuente: Document T0311. Potential Opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to wind energy. IEA.OES. 2009.

El cuadro de costes de un sistema marítimo dependerá en parte del diseño y configuración de la planta en aspectos como:

4.2. Infraestructuras en el espacio marítimo:

Necesitaremos autorización para el uso de una superficie de lámina de agua en la que asentar los equipos de generación de energía (zona I ó zona II) y del lecho submarino en el que asentaremos el cableado eléctrico y las estaciones de estabilizado de pulso eléctrico (electrónica de Potencia).

- Lámina de agua:
 - o Sistemas de generación.
 - Wec.
 - Tec.

- Lecho submarino:
 - Cableado. La provisión de cables, la protección, la derivación a tierra
 - El tipo de cable, alto o medio voltaje.
 - La capacidad.
 - El número de líneas.
 - Los requerimientos para “subir el cable” hasta los equipos generadores.
 - La localización de equipos para el control de potencia en el fondo.
 - La localización de conectores.
 - Que permitan la conexión y desconexión de equipos para tareas de mantenimiento de los convertidores.
 - Cableado mar-tierra.

4.3. Infraestructuras en el espacio terrestre:

Simultáneamente y como parte de la misma propuesta, necesitaremos autorización para el uso de una superficie de terreno en el que dar acogida a los distintos servicios.

- Centro de transformación en tierra.
- Planta de procesado de la energía:
 - Potabilizadora por ósmosis inversa.
 - Equipo de generación de frío.
 - Equipo de generación de calor.
 - Sistema de generación de aire comprimido.
 - Venta de energía a embarcaciones.
 - Canalización de servicios.
 - Conductos refrigeración.
 - Tuberías agua Dulce.
 - Tuberías Aire comprimido.
 - Conducción eléctrica.

5. La selección de los sistemas de corriente.

5.1. El sector. Una primera impresión.

En el comienzo de este trabajo el lector ha tenido ocasión de ver de un solo golpe de vista casi 250 equipos de generación de energías del mar (175 WECs +88 TECs).

Una vista que ha sido compuesta atendiendo a los listados de desarrolladores que enlaza el EMEC en su página web, y que nos ayuda a entender el despliegue creativo que vive el sector.

Otro matiz relevante, es que al visitar cada uno de esos links, vemos que muy pocos han llegado a la escala real y que multitud de promotores se encuentran en la etapa inicial.

Promotor de energía renovable marina busca quien lo financie...

Un lento repaso de las distintas propuestas nos ayuda a realizar un “retrato robot” del sector. Gente que es capaz de materializar una idea en patente, y que para impulsar su propuesta se asocia con un manager especializado en el sector que usará todo su talento en la búsqueda de financiación. Moviendo “la propuesta” por distintos foros especializados, virtuales o congresuales.

Así, la promoción de las bondades de cada propuesta ha ayudado a definir un nuevo lenguaje técnico-gráfico. La evolución de las herramientas de representación gráficas animadas en tres dimensiones y a todo color son un potente y sugerente recurso de venta de un producto que ni sus promotores han visto culminado y al que todavía le queda demostrar “cómo funciona”.

Así, resulta llamativo y esclarecedor que a día de hoy (noviembre de 2013), exista en las islas Orcadas el único lugar de pruebas operativo (a la espera de que Japón, Chile, España, China y Korea inicien la puesta en marcha de sus instalaciones), y más de 250 patentes pendientes de ser materializadas.

El evocador medio marino es protagonista de un mercado virtual.

La prueba en mar sigue siendo costosa, y las soluciones propuestas necesitan ser robustas y como aprendimos de Arquímedes, astutas.

5.1.1. El esfuerzo de Emec, de la IEA-OES y de Jack Hardisty.

Ante este panorama y a fin de “reconvertir” tanta propuesta visual en proyecto técnico. El EMEC ha desarrollado, a partir de 2009, una línea editorial de 12 capítulos denominada Marine Renewable Energy Guides (“Guía de las Energías Renovables Marinas”), con la que quiere ayudar a contextualizar, bajo criterio técnico, el proceso de definición de las propuestas desde que sólo es una patente hasta que se materializa en el mar.

Un trabajo redactado en clave introductoria- divulgativa con el que el citado Centro Europeo de las energías marinas pretende fijar criterios comunes para:

- Valoración del desarrollo de un convertidor de energía de las olas.
- Valoración del desarrollo de un convertidos de energía de las corrientes marinas.
- La caracterización del recurso energía de las olas.
- La caracterización del recurso energético de las corrientes marinas.
- Guía de salud y seguridad en el sector de las energías marinas.
- Guía para la certificación de esquemas de los generadores de energía marinos
- Guía para el diseño básico de sistemas convertidores de energía marina.
- Guía para el mantenimiento de equipos.
- Guía para la conexión a red de los convertidores de energía.
- Prueba en canal de equipos convertidores de energía de las olas.
- Guía para el desarrollador de proyectos en le industria de las energías Marinas.
- Guía para el ensamblaje, manufactura y testado de los convertidores de energías marinas.

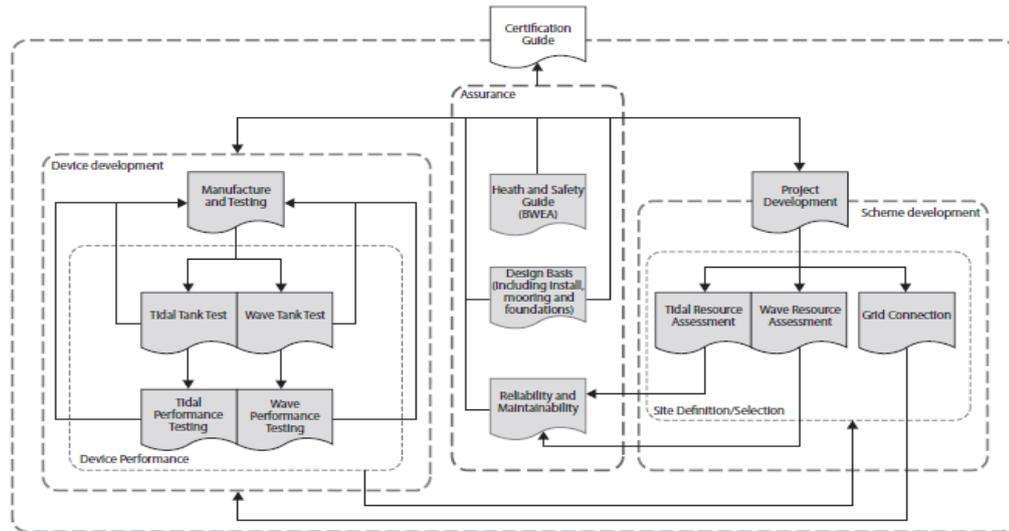


Imagen 48: Esquema guías Emec

Fuente: <http://www.emec.uk.org>

Un esfuerzo correcto pero que no nos vale para analizar tendencias.

Llama la atención que el EMEC no haya realizado un esfuerzo divulgativo de mayor detalle, sobretodo porque en su planing de trabajo 2014-2025 se propone instalar un total de 1500 equipos en las aguas de las Islas Orcadas, lo que realza su posición de liderazgo y de acumulación de experiencia en la prueba de equipos energéticos marinos.

Así, con fecha de marzo de 2009 en la página de PowertechLabs he localizado el texto (activable en el siguiente código QR): “Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy”



<http://www.calameo.com/books/000672419693949819baa>

Un texto en el que Jahangir Khan, Gouri Bhuyan y Ali Moshref atienden a una petición realizada por la Agencia Internacional de la Energía para la implementación y desarrollo de los sistemas energéticos marinos.

Un trabajo que en su anexo III realiza un estudio del estado del arte sobre que recorridos se están siguiendo los distintos promotores para conseguir volcar a red la energía que producen los convertidores energéticos marinos. Y sobre qué se puede aprender, y en qué se parecen dichos equipos a los sistemas energéticos eólicos desarrollados en los últimos años.

Así en la página 14 del texto “The potential Opportunities...” encontramos un eficaz análisis coyuntural de cómo el legado de la energía eólica marina puede contribuir al desarrollo de la producción de energía marítima, citando que:

- Ha establecido un diseño básico de turbina Offshore.
- Ha fijado códigos y métodos para el trabajo Offshore.
- Minimiza el trabajo en el mar.
- Ha disminuido los costes de amarre y anclaje.
- Mejora en los equipos de medida de viento y de ola.
- Ha reducido el peso de la turbina.
- Ha estandarizado esquemas para el volcado a red y de electrónica de potencia.
- Ha desarrollado turbinas de gran tamaño y potencia.
- Ha establecido pautas para minimizar las posibles afecciones ambientales.

Una aportación que nos ayuda a entender mejor la filosofía de un texto que fue redactado en Canadá y que cuenta con un marcado carácter didáctico y que sin llegar a analizar los algoritmos de los sistemas de control de potencia nos ayuda a fijar conceptos.

Entre otros textos consultados destacar también el esfuerzo de Jack Hardisty para culminar el libro “The análisis of tidal stream power”, un trabajo de autor hecho a base de calma y fundamento que ayuda al lector a asimilar los distintos conceptos que implica desarrollar un convertidor de la energía de las mareas, matices que van desde la misma definición de las mareas hasta un análisis físico del potencial energético contenido en las corrientes que empujan las mareas.

5.2. Requisitos técnicos para el volcado a red de los sistemas de generación de energía eléctrica de origen marino.

5.2.1. La producción de corriente ¿en continua o en alterna?

Si atendiéramos a la experiencia acumulada en los sistemas de generación de energía eólica offshore, deberíamos advertir que está constatado que para el caso de sistemas de generación de energía eólica offshore de gran potencia, la generación en corriente continua es más económica, incluso provee una flexibilidad adicional en el suministro y control de la potencia reactiva y de control de la tensión.

Una ventaja que es debida a que cuenta con dos sistemas de control de potencia, uno en el parque de generación y un segundo en la estación transformadora de acople a la red de tierra lo que ayuda a la fiabilidad del sistema.

En el caso de los sistemas energéticos marinos los aspectos que tendríamos que tener en cuenta a la hora de realizar una comparativa entre alterna o continua tendrían que atender a:

- El desarrollo de las interfaces de electrónica de potencia y la gestión de las condiciones de pico y el cálculo de la eficiencia de la transmisión de la potencia como vemos en la siguiente figura.
- La disminución de pérdidas (en el transformador, en la transmisión de la línea (que son menores en corriente alterna)) y en la gestión de la potencia reactiva (que es producida en la línea de corriente continua y consumida por los equipos de corriente alterna).
- Valorar los beneficios adicionales como el control real de la potencia reactiva y la disminución de los cortes mediante el empleo de equipos efectivos de electrónica de potencia.

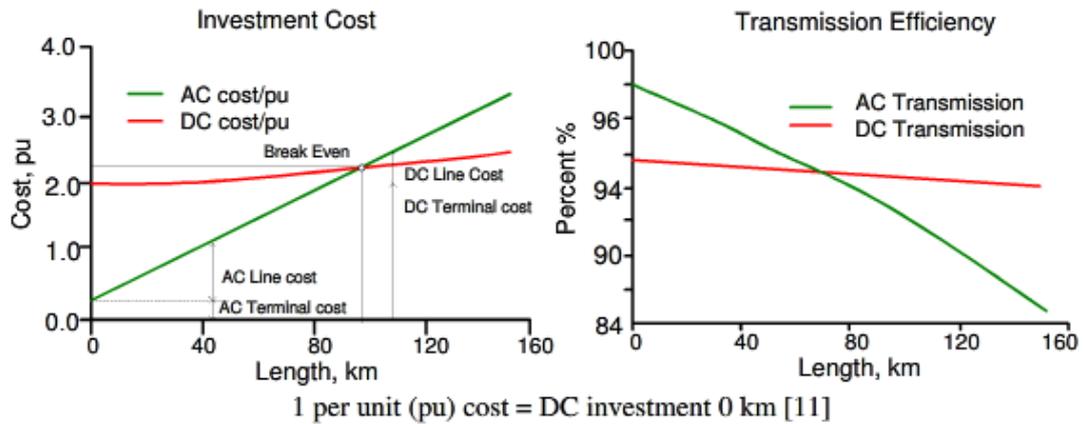


Imagen 49: Coste del cableado de AC vs CC y eficiencia de transmisión.

Fuente: “Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy” Document T0311. Powertech Labs 2009.

En el texto “The Opportunitities...” de la IEA-OES encontramos un la referencia de cómo en los parques eólicos que generan en alterna, se está optando por instalar un transformador en cada equipo generador, al objeto de incrementar la tensión del pulso de salida. Un valor que es incrementado con la incorporación de un segundo transformador que adapta la salida de un grupo de generadores a alta tensión, una configuración que ayuda a disminuir las pérdidas en el transporte hasta la subestación de tierra. En el siguiente esquema podemos ver un ejemplo de esta disposición.

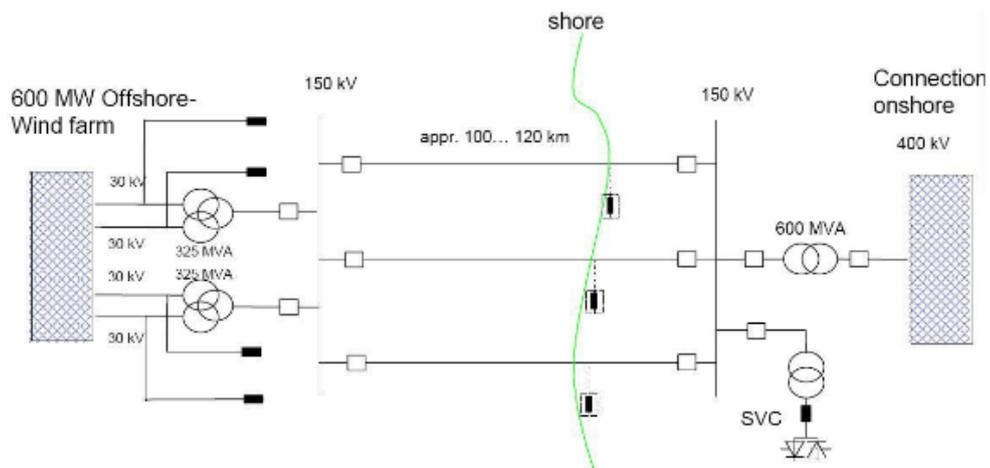


Imagen50: Ejemplo de generación en corriente alterna.

Fuente: “Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy” Document T0311 Powertech Labs 2009.

La opción de transportar corriente continua, puede obedecer al siguiente esquema.

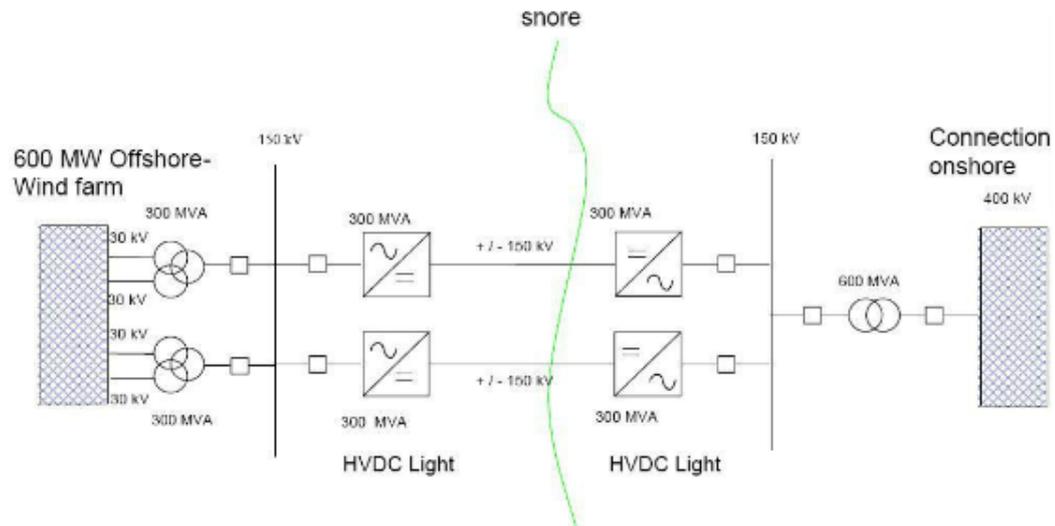


Imagen51: Transporte en corriente continua.

Fuente: "Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy" Document T0311 Powertech Labs 2009.

Primero tenemos el generador que produce en alterna de alta tensión (ACHV), y que mediante un sistema rectificador con tiristores rectifica el pulso a corriente continua de alta tensión (DCHV). Que es cómo se transporta esta corriente, hasta que en el lado tierra, mediante un sistema inversor de corriente, el pulso vuelve a ser de corriente alterna con alta tensión (ACHV).

Los textos consultados para elaborar este apartado coinciden en que es posible que el transporte en continua sea más económico, pero este es un matiz que no podemos asegurar pues falta su aplicación práctica.

5.2.2. Diversidad de sistemas de generación.

La posible solución a si la generación y el transporte de corriente se realiza en alterna o en continua dependerá del tipo de generador que se utilice. En este aspecto, el legado de la energía eólica resulta muy útil para su empleo en los sistemas turbinados, en el texto Power Systems Analysis & Design encontramos el esquema de las 5 disposiciones de los generadores de energía eólica:

- SCIG (Generador de inducción de Jaula de ardilla) que transforma directamente en pulso eléctrico el giro transmitido por la multiplicadora.

Una velocidad de giro constante, y por tanto sincronizada, a la frecuencia a la que opera la red eléctrica.

En el segundo esquema vemos como el flujo de carga de estos terminales opera con muy pequeñas oscilaciones en el ratio de velocidad. El mayor inconveniente de este generador de inducción es la potencia reactiva que consume para su excitación y las altas intensidades requeridas para el arranque. Para evitar estos efectos la turbina típica suele equipar un banco de condensadores que ayude a poner un banco de condensadores.

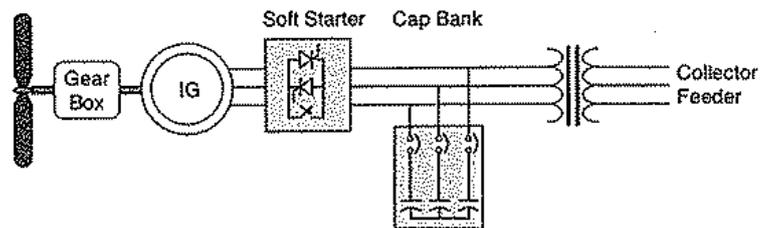


Imagen52: Esquema de generador de inducción con jaula de ardilla.

Fuente: Power System, Analysis & Design. 5ª Edición J. Duncan Glover, Mulukutla S.Sarma y Thomas Overbye. Ed. Cengage 2012.

- Generador de inducción conectado directamente al transformador de tensión. Este sistema es muy similar al ya descrito con el añadido de una resistencia variable y un sistema de control de potencia externo. La resistencia variable está conectada al interior del rotor y puede controlar rápidamente la corriente del rotor y puede ayudar a gestionar mejor las posibles oscilaciones en la red.

En la curva añadida encontramos que el efecto de la resistencia variable alcanza el régimen de alta velocidad.

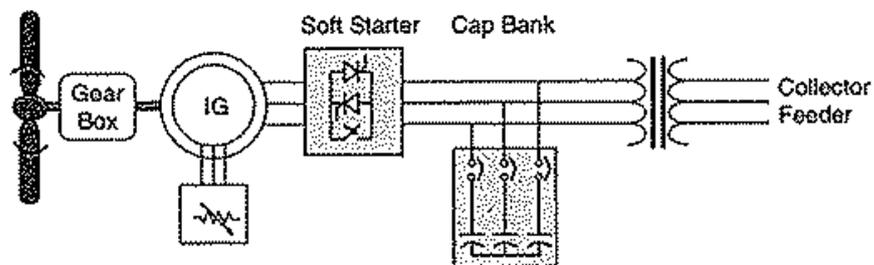


Imagen 53: Generador inducido conectado directamente al transformador.

Fuente: Power System, Analysis & Design. 5ª Edición J. Duncan Glover, Mulukutla S.Sarma y Thomas Overbye. Ed. Cengage 2012.

- DFAG Generador Asíncrono de Doble Inducción. Esta disposición supone un “paso más” en las posibilidades de regulación y control pues puede controlar la frecuencia y la excitación del equipo. El control de la excitación lo consigue mediante un anillo deslizante que es el que regula la intensidad, un convertidor de tensión con el que pueden ajustar la intensidad del rotor y la fase casi instantáneamente.

Este sistema de control del rotor está permanentemente retroalimentado por la salida a red.

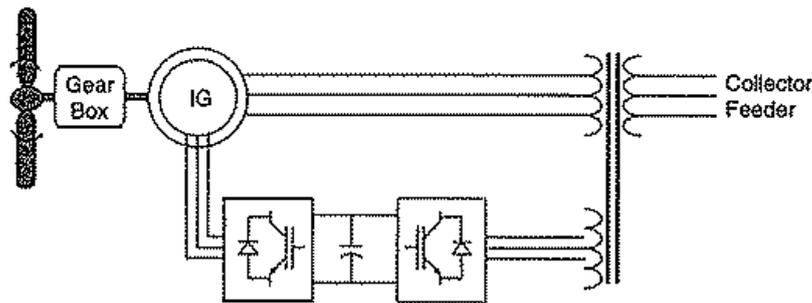


Imagen 54: Generador asíncrono con inducción doble.

Fuente: Power System, Analysis & Design. 5ª Edición J. Duncan Glover, Mulukutla S.Sarma y Thomas Overbye. Ed. Cengage 2012.

- Tipo 4 consiste en un generador que ofrece una gran flexibilidad en el diseño y operación la entrega a la red la realiza después de pasar a continua y de nuevo a alterna. El generador cuenta con un diseño convencional, es síncrono con un número de polos elevado.

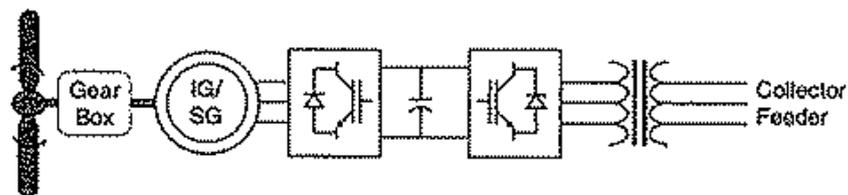


Imagen 55: Generador Tipo 4.

Fuente: Power System, Analysis & Design. 5ª Edición J. Duncan Glover, Mulukutla S.Sarma y Thomas Overbye. Ed. Cengage 2012.

- El quinto y último tipo de turbina eólica es de velocidad variable y está conectada a un convertidor de velocidad y par con un generador síncrono. El convertidor de par y velocidad es el que cambia la velocidad a una salida constante de velocidad. En la salida está acoplado un generador síncrono operando a una velocidad preestablecida (a la frecuencia de la

red) que puede estar directamente conectada a la red o a través de un circuito de conexión. El generador síncrono puede ser diseñado para cualquier velocidad (con 4 ó 6 polos y medio o alto voltaje).

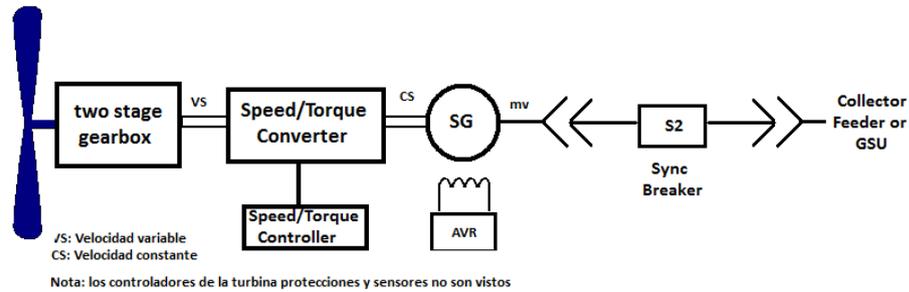


Imagen 56: Generador Síncrono.

Fuente: Power System, Analysis & Design. 5ª Edición J. Duncan Glover, Mulukutla S.Sarma y Thomas Overbye. Ed. Cengage 2012.

Esta relación de disposiciones de los distintos generadores que han utilizado y evolucionado los desarrolladores de la energía eólica, nos acercan la complejidad que implica la generación cuando la fuente es renovable y por tanto inconstante, y cómo a partir de un recurso oscilante se ha de intentar generar un pulso estable que podamos volcar a red. Será en el capítulo 6 (a partir de la página 122 de este trabajo), donde analizaremos las distintas configuraciones que se están probando tanto en los convertidores de energía de las mareas como en los de la energía de las olas.

5.2.3. Sistemas de operación y control.

La primera palabra que debemos utilizar como requisito para los sistemas de operación y control de los generadores que emplean un recurso renovable, es, que primero deben ser varios mecanismos y que deben ser dinámicos y después que deben contar con una nutrida red de información.

El desarrollo de los convertidores de energía del mar, tanto de la energía de las olas como la de las corrientes, no ha alcanzado en muchos casos soluciones para el control de potencia, como advierte el texto “The pottential...” este “no es un problema trivial”.

Más adelante haremos un análisis más detallado, pero en este punto cabe destacar una tendencia que detectamos en las soluciones de control de potencia para los

convertidores de energía de las olas, en los que en la transmisión del empuje, se intercalan etapas de acumulación, bien por aire o por flujo hidráulico, etapas en las que se consigue acumular parte del empuje de la ola, y que son intercaladas para dosificar su salida hacia el sistema turbinado que da tracción a la multiplicadora que hace girar al generador.

5.2.4. Supervisión de funcionamiento.

La posibilidad de optimizar, en tiempo real, el empuje de las olas y corrientes hace indispensable disponer en la planta de generación de un sistema de comunicaciones que aporte información de en qué estado se encuentra cada uno de los equipos generadores.

Una red de sensores que permita identificar desperfectos, conectar o desconectar equipos cuando así lo indiquen las condiciones meteorológicas o la propia red eléctrica y que deben estar embebidos además de en los propios generadores, en cada uno de los equipos de la planta, para que puedan ser operados desde la planta de control.

Advierte el texto “Potential Opportunities...” que los sistemas marinos no han alcanzado este nivel de desarrollo y que lo necesitan.

5.2.5. La propuesta de Hardisty seis instalaciones de energía de las mareas.

Aunque es sólo una suposición en el libro que publicó en 2009 Jack Hardisty “The Analysis of Tidal Stream Power” encontramos una propuesta que quiere solucionar la integración en la Red Eléctrica del Reino Unido de la potencia producida por el empuje que en dirección Sur-Norte realiza la energía de las mareas.

Entendiendo, como hemos visto, que los sistemas energéticos renovables dependen de un recurso redundante, intermitente e impredecible Hardisty se propone explorar la constancia y predictividad del recurso marea.

Cuenta que una la crecida de la marea tarda cinco horas en recorrer la distancia que hay entre el Mar Celta, al Norte de Escocia y que ese lapso de tiempo casi transcurre un ciclo de marea. O lo que es lo mismo en palabras de Hardysti.

“La energía de las mareas ofrece la oportunidad de reconducir este problema aprovechando el cambio de la marea a lo largo de la línea litoral”

Para no quedarse en una suposición el señor Hardysti plantea seis emplazamientos en los que propone localizar seis sistemas para convertir la energía de las corrientes de las mareas. Una opción que según sus cálculos permitirá proveer un valor de potencia estable a la Red Eléctrica del Reino Unido.

Las localizaciones propuestas son Severn, Menai St., Mersey, Clyde, Tyne y Humber y los datos estimados de las localizaciones los vemos en la siguiente tabla.

	Severn	Menai St	Mersey	Clyde	Tyne	Humber
Tidal diamond	SN052L	SN048F	SN045M	SN040A	SN0201	SN017A
Latitude	51 23.23	53 08.72	53 23.02	55 58.59	55 00.91	53 43.85
Longitude	03 04.98	04 16.67	02 59.78	04 44.07	01 22.20	00 20.92
Time	7.10	9.80	11.10	1.00	3.20	5.75
Phase (h)	0.00	2.70	4.00	5.90	8.10	10.65
Peak current (knots)	3.9	3.6	5.2	4.2	2.6	5.0
Peak current ($m s^{-1}$)	1.95	1.80	2.6	2.1	1.3	2.5
Maximum power ($kW unit^{-1}$)	148	117	352	185	44	313
Mean power ($kW unit^{-1}$)	30	23	70	37	9	63
Annual output ($MW h unit^{-1}$)	260	204	616	325	77	548
Balancing units	17	10	5	5	24	5
Installed capacity (MW)	2.5	1.2	1.8	0.9	2.8	1.6
Annual output (MW h)	4417	2044	3079	1623	4904	2738

Tabla 3: Localización de sistemas de generación Tidal propuesta por Hardisty.

Fuente: The Analysis of Tidal Stream Power. Jack Hadirsty. John Willey & Sons. 2009.

Mientras que la estimación de la potencia que puede volcarse a red la vemos en la siguiente curva.

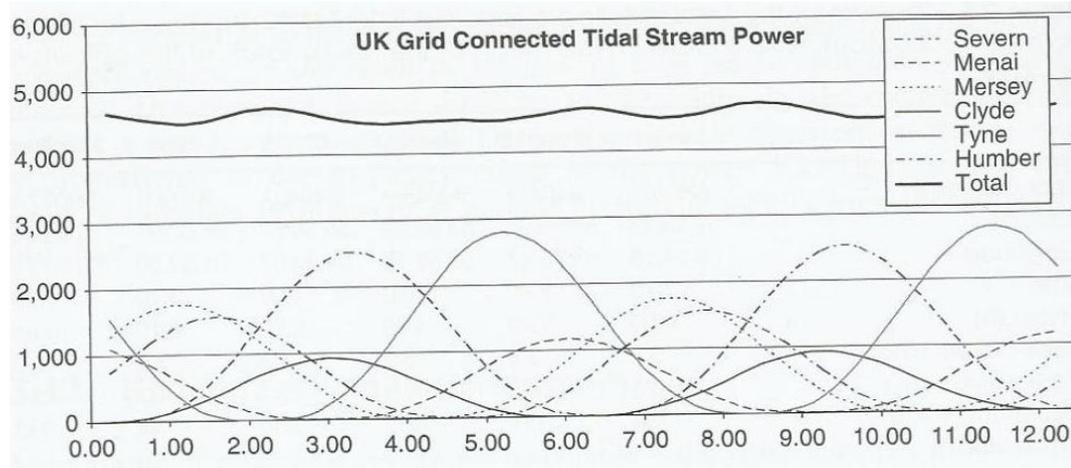


Imagen 57: Curva de producción de energía estimada en la propuesta planteada por Hardisty.

Fuente: *The Analysis of Tidal Stream Power*. Jack Hadirsty. John Willey & Sons. 2009.

Como vemos, la propuesta de Jack Hardisty podría suponer un aporte constante y continuo de energía a la red eléctrica del Reino Unido, una propuesta la de este profesor de la Universidad de Hull que coincide de forma simultánea con el esfuerzo que el Emec realizó para establecer cuáles han de ser las condiciones de volcado a red de los sistemas de generación marina.

5.3. Requisitos que ha de cumplir la conexión a la red de los convertidores marinos.

Con el texto “Guidelines for Grid Connection of Marine Energy Conversion Systems”, el EMEC hace un esfuerzo por contextualizar una guía de buenas prácticas sobre los conceptos que han de tenerse en cuenta en el proceso de enganche a la red eléctrica de los convertidores marinos.

Adaptado a la red eléctrica británica, este documento define la relación de requisitos y de hitos que es necesario tener en cuenta para un diseño apropiado y puesta en servicio de las interfaces de conexión a tierra de los equipos convertidores de energía marina, al objeto de evitar disturbios en la red o el deterioro de las condiciones existentes.

La idea del EMEC es proveer un texto que facilite al promotor información práctica de cuáles han de ser las características del pulso eléctrico que puede volcar:

- Conexiones a la red eléctrica de tierra a 132kv.
- Los sistemas de generación han de estar adaptados al código de distribución británico.
- El área geográfica de aplicación de estas recomendaciones es sólo el Reino Unido.
- Este documento no cubre el diseño de la subestación ni las especificaciones del equipo de generación.

Uno de los aspectos a destacar del texto es que plantea que en el proceso de diseño y puesta en servicio de la interface de conexión a la red, tanto el promotor como el operador de red, tengan ocasión de dialogar para definir cómo se va a realizar el volcado a red la energía producida.

La clave de este planteamiento se basa en que estamos en un momento, en el que la generación no ha alcanzado el nivel de producción de la gran escala por lo que los estándares de diseño están en fase de evolución y de mejora continua.

Así la normativa de referencia para el volcado a la red eléctrica del Reino Unido ha de ser la última edición de los siguientes textos.

- Notas para guiar la protección incorporada a equipos y plantas de generación con una potencia superior a 5MW, para operación en paralelo con la red pública de suministro del sistema de distribución. Engineering Technical report No.133. revisión 1,1995.
- Planificación de los niveles de distorsión armónica de la tensión y la conexión de equipos no-lineales para los sistemas de transmisión y redes de distribución en el Reino Unido. Engineering Recommendation G5/4-1, Issue 1, 2005.
- Planificación de límites para las fluctuaciones de voltaje causadas por los equipos industriales, comerciales y domésticos. Engineering Recommendation P.28, Issue 1, 1989.
- Planificación de límites para el desequilibrio de tensión en la red eléctrica del Reino Unido de 132kV y menores, Engineering Recommendation P29, Issue 1, 1990.
- Recomendación para la conexión de una planta integrada al sistema público de distribución de 20kV para una salida de potencia de 5 MW, Engineering Recommendation G75/1, Issue 2, 2002.
- Recomendaciones para la conexión de una planta integrada en el sistema público de distribución de suministro eléctrico, Engineering Recommendation G59/1, Issue 1, 1991.
- Statutory Instrumentation 2006 No.1521. The electricity safety quality and continuity (Amendment) regulations 2006.
- El Código de distribución y la guía para el código de distribución de los operadores autorizados de la red de distribución.

Por otro lado el texto del EMEC también establece, en su capítulo 4, los parámetros eléctricos que ha de cumplir el pulso eléctrico que se incorpora a la red.

En este punto el redactor recupera la idea, antes señalada, de que es importante que tanto promotores o desarrolladores de equipos de generación se pongan en

contacto con los operadores de la red para establecer de mutuo acuerdo el término y las condiciones de la conexión.

Así el redactor aclara en este mismo capítulo cuáles son las condiciones a la que opera la red eléctrica del Reino Unido y las posibles márgenes que tienen las distintas variables.

5.3.1. La frecuencia:

- En condiciones normales ha de ser de $50\text{Hz} \pm 1\%$
- En condiciones excepcionales, los valores establecidos en Engineering Recommendation G59/1 para 0,5 segundos de duración:
 - o Una pérdida de frecuencia del 6% (47Hz).
 - o Un incremento de frecuencia del 1% (50,5Hz).

5.3.2. La tensión:

Según la Sección 27 del texto The electricity safety, Quality and Continuity Regulations, 2002, el enganche a red de menos de 132kV debe soportar valores de tensión que oscilan un 6 % por encima y por debajo de la tensión nominal.

5.3.3. Factor de potencia y control de tensión:

El control del factor de potencia es un ítem importante pues permite controlar el flujo de potencia reactiva en el punto de conexión a la red.

- Modo del control del factor de potencia.
 - o Control del factor de potencia en el generador:
 - Se puede establecer que funcione dentro de un rango de valores del factor de potencia.
 - Se puede establecer entre el promotor de la planta y el operador de red un valor fijo para el factor de potencia.
 - o Control del factor de potencia en el punto de conexión.
 - Hay que definir entre el operador de la red y el promotor del sistema de generación un acuerdo sobre el máximo nivel de potencia reactiva que entra y sale del sistema.

Es posible que estos valores de referencia para el factor de potencia superen la capacidad de los pequeños generadores, por lo que el texto EMEC recomienda como mejor opción concretar, entre el operador de red y el promotor, para cada caso un rango de valores del factor de potencia asumible.

- Modo de control de tensión:

El generador debe estar diseñado, construido y operando con un monitor de tensión en el punto de conexión.

Para ajustar el consumo de potencia reactiva debe poder regular la tensión en el punto de consumo a un valor dentro del rango especificado por el operador.

- Modo de control del factor de potencia o modo de control de tensión.

En determinadas condiciones funcionamiento de la red, el operador de red puede necesitar que algunos de los generadores operen sus instalaciones en otro modo de control del factor de potencia.

Si el operador de red lo requiere los equipos productores controlarán el factor de potencia mediante:

- Modo control del factor de potencia.

En este caso los generadores en condiciones normales de funcionamiento deberán operar modificando el factor de potencia, haciéndolo dentro de un rango de valores establecidos por el operador de la red.

Para esta condición de funcionamiento la tensión en el punto de conexión debe estar dentro de un rango de valores establecido por el operador de la red.

- Modo control de Tensión.

Este tipo de generadores debe estar diseñado construido y operar para ajustar el consumo de energía reactiva, para regular el consumo de tensión en el punto de conexión de acuerdo con los requisitos establecidos por el operador de red.

Este modo de control debe actuar cuando:

- La tensión en el punto de conexión supera el límite especificado por el operador de la red.
- Cuando el generador recibe la orden de incrementar la tensión.

5.3.4. Calidad de la energía producida.

Debido a que no existen suficientes precedentes en el desarrollo de equipos generadores marinos de alta tensión, el texto del EMEC aporta una referencia a los estándares establecidos para las turbinas eólicas de la Norma BS EN 61400-21:2002, en la que se aporta nociones y criterios para modificar la calidad de la señal de salida de potencia de un generador para mejorar posibles saltos de tensión fluctuaciones de tensión y emisión de armónicos.

- Fluctuaciones de tensión.

Debido a las arrancadas y paradas del equipo de generación (motivadas por la propia inconstancia del recurso), se pueden producir perturbaciones en la tensión de la red, que incluso puede generar daños a otros usuarios.

De acuerdo con la sección DPC 4.2.3. del Código de Distribución, las fluctuaciones de tensión en el punto de conexión deben ajustarse a lo definido en la Engineering Recommendation P28 Issue 1.

El impacto ocasionado por la operación intermitente de los generadores sobre la tensión de la red, debe ser considerada en los trabajos de diseño y construcción de los equipos fijando

- Identificando un valor de las fluctuaciones que ocasiona el generador al sistema eléctrico en su funcionamiento normal.
- Fijar un número de arrancadas y paradas como parte de la rutina de funcionamiento del generador.
- Cuantificando un número de disparos ocasionales de encendido y apagado del equipo generador, particularmente transformadores.

El cálculo de cada ítem puede realizarse siguiendo la recomendación del texto Engineering Recommendation P28. Un conjunto de cálculos cuyos resultados han de ser valorados por el operador de red.

- Emisión de armónicos.

El punto de conexión a red puede estar expuesto a la distorsión de armónicos debido a la presencia de uno o más armónicos que modifican la frecuencia fundamental.

Según 4.2.3. del DPC del Código de Distribución el contenido de armónicos en el punto de conexión a red deberá satisfacer los límites fijados en el Engineering Recommendation G5/4-1, la conexión del equipo generador no debe incrementar el nivel de armónicos especificados en el texto Engineering Recommendation G5/4-1. Los tipos de armónicos que tendremos en el punto de conexión a la red son:

- Armónicos provenientes de la red en el punto de conexión.
- Armónicos provenientes del generador en el lado de la generación.

- Cambios en la tensión.

De acuerdo con la sección del DPC 4.2.3. del código de distribución los cambios de tensión en el generador deberán cumplir los requisitos establecidos en el Engineering Recommendation P29.

Al definir y construir la infraestructura eléctrica debe tenerse en cuenta la interacción que puede producir el generador sobre la tensión en el punto de conexión y considerar que valores límite de tensión no deben superarse.

5.3.5. Protecciones del sistema

- Protección general.

Debe estar en orden a:

- Proteger los equipos de generación ante sobrecargas y fallos de suministro.
- Proteger la infraestructura eléctrica ante faltas de suministro en la red y por fallo en el suministro aportado por los generadores a conectar.
- Proteger la red de las perturbaciones causadas por los generadores y por la falta de suministro en la red.

- Protección en el generador.

Es el diseñador el que dimensiona cómo y cuánto va a proteger el equipo de generación, atendiendo siempre a las especificidades del Engineering recommendation G59 y G75.

- Protección de la red eléctrica.

En este caso la Norma recomendada son los capítulos que van del 5.3.2. al 5.3.8. del BS EN 60255.

- o Circuitos interruptores o fusibles.

Como es difícil acceder a los generadores marinos se emplearán circuitos interruptores en sustitución de los fusibles, pues estos pueden ser reseteados remotamente.

Los sistemas de generación pueden estar compuestos por líneas de cableado relativamente largos. La interrupción de corriente en dicho bobinado puede suponer un condicionante significativo por la capacidad y la tensión que transita por dicho circuito. Debido a esto se hace recomendable considerar para el diseño de estos sistemas el empleo de interruptores que además de cortar el pulso eléctrico detengan el giro del propio generador.

- o Discriminación.

Es recomendable contar con un nivel de discriminación menor al de los estándares industriales. Esto implica disminuir la sensibilidad para evitar que una falta de pulso provoque la desconexión de más equipos a parte del defectuoso.

- o Localización de los equipos de protección.

La accesibilidad de los mismos es un criterio relevante, bien en la subestación de tierra o en subestaciones localizadas off-shore en estructuras fijadas al fondo, puede ser una opción correcta que es mejorada con la colocación de los sistemas de protección en cada uno de los generadores (una disposición que aporta mayor protección a los equipos).

Una cuestión que dependerá del tipo de protección a instalar, por ejemplo si la protección es para proteger de altas y bajas frecuencias, puede localizarse en la subestación de tierra, mientras

que la protección para los cambios de tensión mejora cuando es localizada en cada equipo generador.

- Rango de tensión.

Se hace necesario emplear equipos de protección que puedan seguir operando durante los intervalos en los que el valor de la tensión “se sale” del rango de valores establecido (momento de arrancada o de excitación de los transformadores).

- Comunicación con los equipos de protección.

Se hace recomendable disponer de una red de comunicaciones de fibra óptica entre los diferentes equipos sistemas generadores y estaciones que permita establecer un Sistema de Supervisión y Adquisición de Datos que facilite la diagnosis de las posibles incidencias.

- Elección de un sistema de derivación a tierra.

En el diseño del sistema de protección puede ser ventajoso adoptar los principios recomendados para los tendidos eléctricos de alta tensión fijados por las Normas BS 7671 y la IEC 60364.

- Aislamiento eléctrico.

En este caso los requisitos a tener en cuenta están fijados por las Engineering Recommendation números G59/1 y G75, junto con la ETR 113.

5.3.6. Toma a tierra.

En la práctica la toma a tierra es requerida para:

- Permitir que los equipos operen en condiciones de seguridad.
- Para proteger a las personal y animales.
- Para proteger la línea de iluminación.

- Infraestructura eléctrica onshore.

Los criterios de referencia están establecidos en el texto “The Electricity safety Quality and Continuity Regulations”, 2002.

- Infraestructura eléctrica offshore y generadores marinos.

El documento de referencia es el “The Electricity safety Quality and Continuity Regulations”, 2002.

- Compatibilidad electromagnética.

El documento de referencia para el sistema eléctrico británico es un texto producido por la industria de fabricantes de turbinas eólicas denominado PD CLC/TR 50373:2004.

5.4. Impacto generado por el volcado a red de la energía generada con los convertidores marinos.

Impacto local y calidad de la salida de potencia.

- Estabilidad de la tensión de red.

En las inmediaciones a los sistemas de generación, incrementa la tensión por encima de los límites prescritos, la dimensión de esta subida de tensión depende de las condiciones de carga y de los parámetros de red.

Dependiendo del sistema de conversión que se esté empleando se puede controlar los efectos de esta subida de tensión.

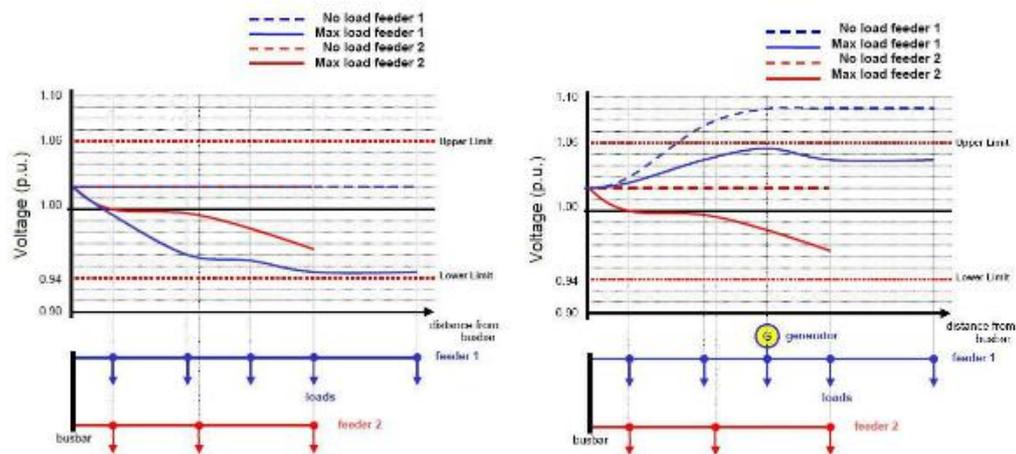


Imagen 58: Curvas de tensión con o sin generación adicional.

Fuente: "Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy" Document T0311. Powertech Labs 2009.

- Métodos que pueden mitigar este problema.
 - Refuerzo de la red:
 - Incrementar la capacidad de los conductores.
 - Incrementar la capacidad de los transformadores.
 - Desconectar la multiplicadora del generador.
 - Optimizar el tamaño de la planta de generación.
 - Ajustes del factor de potencia. Operar sobre el principal factor de potencia incrementa la tensión en el terminal del generador y vice-versa. La incorporación de un banco de condensadores ayudará a controlar el valor de la tensión.

- Regulación de transformadores. El sistema debe regular la tensión de la línea (mientras se está con la carga alta subir un punto y bajar cuando las condiciones de generación son óptimas).
- Fluctuaciones de la red.

Como ya hemos comentado, los sistemas de generación marinos, debido a las intermitencias del recurso, a las condiciones de encendido y parada. Las interacciones con la red pueden agravar las fluctuaciones.

Por eso, algunos desarrolladores de convertidores incorporan mecanismos intermedios de almacenamiento de energía que consiguen mejorar el promedio de descarga de los generadores de descarga directa.

Las medidas más comunes para el control de las fluctuaciones son:

- Utilizar arrancadores progresivos en los generadores de inducción.
- Utilizar interfaces de electrónica de potencia para estabilizar las fluctuaciones de potencia.

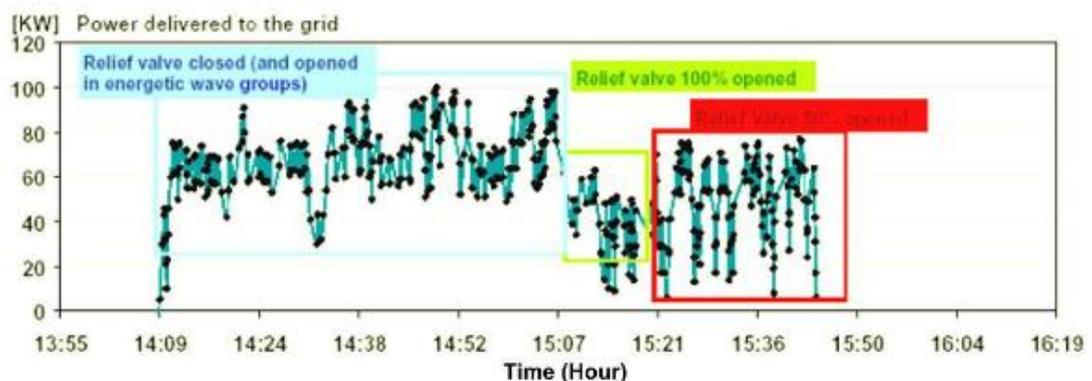


Imagen 59: Variaciones de baja frecuencia y posibles fluctuaciones en la red producidas por un convertidor de energía marina.

Fuente: “Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy” Document T0311. Powertech Labs 2009.

- Transición de potencia:

Las variaciones o subidas de tensión son atribuidas en gran parte a las súbitas y a las sostenidas alteraciones de tensión de la red. Dichas condiciones pueden ocurrir cuando se desconecta súbitamente el generador de la red, debido a falta de empuje (olas o corrientes), o debido a un endurecimiento de la meteorología. En encendido y apagado intermitente de los convertidores acoplados con máquinas de inducción ayuda a

complicar el problema. Como los equipos tienden a variar sus condiciones de trabajo o responden a las condiciones cambiantes del recurso, estos efectos se pueden propagar por toda la red.

- La producción de Armónicos.

Los armónicos es el concepto que nos sirve para medir la distorsión que afecta a la onda sinusoidal principal. En el cuadro siguiente incorporamos una tabla en las que se ven distintos tipos de “disturbios de onda” y sus posibles causas.

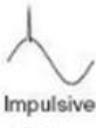
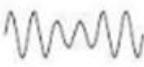
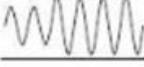
Electrical Disturbance	Cause of Disturbance
 <p>Impulsive Transients (Surges or Spikes)</p>  <p>Oscillatory</p>	<ul style="list-style-type: none"> • motors in air conditioners, HVAC equipment, elevators, water coolers, fans • lightning • photocopiers and laser printers • static discharge • routine utility activity • electronic air ionizers • kitchen appliances
 <p>Noise</p>	<ul style="list-style-type: none"> • HVAC equipment • kitchen appliances • radios, telephones • light dimmers • overhead lines • electronic lighting • building transformers • electronic air ionizers • vacuum cleaners
 <p>Harmonic Distortion</p>	<ul style="list-style-type: none"> • computers • televisions, video cassette recorders • electronic lighting
 <p>Sag</p>	<ul style="list-style-type: none"> • motors in air conditioners, HVAC equipment, elevators, water coolers, fans • photocopiers and laser printers • routine utility activities
 <p>Swell</p>	<ul style="list-style-type: none"> • motors in air conditioners, HVAC equipment, elevators, water coolers, fans • photocopiers and laser printers
 <p>Undervoltage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • improper wiring and grounding • improper voltage tap adjustment • defective building transformer
 <p>Overvoltage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • improper wiring and grounding • improper voltage tap adjustment • defective building transformer • crossed power lines
 <p>Interruption</p>	<ul style="list-style-type: none"> • lightning • tripped circuit breaker, blown fuse • downed power lines

Tabla 5: Tipos de armónicos y causa que lo produce.

Fuente: “Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy” Document T0311. Powertech Labs 2009.

La presencia de armónicos afecta también a las condiciones de tensión constante y frecuencia estable en cualquier punto de la red de alterna, por poco que sea y en valor variable siempre hay un nivel de distorsión denominado Total Harmonic Distortion (THD). La presencia de generadores con inversores acoplados, generadores síncronos, asíncronos, las variaciones de velocidad en los mismos pueden deteriorar, incrementar la presencia de armónicos en la onda sinusoidal principal.

El empleo de generadores de inducción en los sistemas convertidores de la energía de las mareas y de olas, puede no contribuir a la distorsión de armónicos.

Sin embargo muchos de los sistemas de conversión utilizan generadores magnéticos (rotativos o lineares) de salida directa o mediante multiplicadora acoplada, o generadores de inducción doble que trabajan a velocidad variable generan un pulso para el que los sistemas de control de potencia (de plena carga para los generadores magnéticos y de carga parcial para los de doble inducción), usan esquemas que pueden inyectar armónicas dentro de la red.

- **Potencia reactiva:**

En un sistema de generación de potencia, la potencia reactiva es producida por la capacidad de los componentes (condensadores, cables, etc..) y es consumida por los componentes con inducción (transformadores, motores, reactores, etc.).

Los convertidores de energía de las mareas y las olas con máquinas de inducción pueden alcanzar un consumo significativo de potencia reactiva (de un 35% a un 40% de la capacidad). Entonces para minimizar las pérdidas del sistemas son necesarias técnicas de compensación.

5.4.1. Análisis del sistema

- **Estudios de flujo de carga.**

Previo a la puesta en servicio de los equipos se hace necesario un seguimiento de cuál es su régimen de generación para evaluar la potencia, las variaciones de tensión y las posibles sobrecargas. Este trabajo de

campo debe ser elaborado con la suficiente precisión para desarrollar con ellos modelos que anticipen distintos escenarios de funcionamiento.

- Faltas de producción.

Las conexiones internas de un parque de generadores, las uniones del tendido offshore con la red de tierra pueden producir cortes en la generación. Los incidentes que a priori pueden producir dichas interrupciones son:

- Estado del mar, por viento tormenta puede generar sobre carga o cortes en parte o en la totalidad del sistema de generación.
- La actividad humana como la pesca o el arrastre de anclas puede desconectar una parte o la totalidad del circuito con la planta de tierra.
- Propias de la red eléctrica. En este caso es la red eléctrica la que presenta caídas de tensión, sobrecargas en la línea, daños en el tendido.

Los métodos para reducir las faltas de suministro incluyen en la red eléctrica se recomienda usar un limitador de corriente en el reactor, un cambio en la multiplicadora, etc.

- Estabilidad del sistema:

Las redes de distribución de energía modernas son enormemente complejas, están interconectadas entre distintos formatos de generación y por tanto sujetas a la dinámica de distintos fenómenos. La estabilidad es uno de los aspectos que requiere una atención extra, el objetivo es que la red no exceda sus límites y que por tanto no provoque pérdidas en la generación.

El factor de estabilidad puede ser estudiado a través de:

- La estabilidad de la tensión de la red. La habilidad a desarrollar es que el sistema de generación aporte de manera compensada y en condiciones de operación normales un pulso con una tensión lo suficientemente estable.
- Estabilidad transitoria. Es la habilidad del sistema de mantenerse en condiciones de sincronismo después de una perturbación transitoria.

- Pequeñas señales de estabilidad. Es la forma que toma el ángulo de estabilidad en las zonas en la que el sistema ha sufrido pequeños disturbios y su efecto sobre ella sincronización del sistema.
- Estabilidad de la frecuencia. En este caso se hace un seguimiento de la evolución de la frecuencia de la red a lo largo de periodos preestablecidos.

En ausencia de modelos matemáticos dinámicos, que puedan ser utilizados para el estudio y simulación de escenarios de la estabilidad transitoria, para sistemas de generación de olas y mareas. La valoración de la estabilidad de los equipos generadores marinos de gran tamaño para su integración en red es bastante compleja.

6. Tipos de generadores:

Tipos de Convertidores de la energía de las corrientes marinas.

Tipos de Convertidores de la energía de las olas.

6.1. Tipos de convertidores de la energía de las corrientes marinas.

Según la página web del EMEC existen en la actualidad (noviembre de 2013), un total de 88 propuestas con las que distintos desarrolladores tratan de optimizar el formato que mejor aprovecha el recurso energético presente en las corrientes que impulsan las mareas.

Un conjunto de soluciones que tiende a seguir un hilo común y es que conceptualmente está aprovechando buena parte de las soluciones que como hemos visto en el capítulo 1.4. de éste mismo trabajo ha desarrollado la industria eólica a lo largo de los últimos años.

Así, los distintos desarrolladores de este tipo de convertidores han coincidido en utilizar turbinas para la generación de energía y las utilizan bien para trabajar en posición horizontal, o bien en posición vertical.

Dos disposiciones del equipo rotacional al que engrana el generador, que condicionan el diseño de cada convertidor y en base a las cuales actuará el flujo de agua que podrá ser canalizado o no.

Como hemos comentado en otros apartados de este capítulo. Nos encontramos con propuestas que no han sido desarrolladas hasta la escala 1/1, por lo que no se cuenta con datos objetivos sobre las mejoras que aporta cada propuesta de diseño.

Este matiz hace que en este capítulo de características de los convertidores no debemos ir más allá de una toma de notas de cuáles son las soluciones más empleadas como, la disposición de la turbina, y la canalización, o no, del flujo de corriente.

6.1.1. Tipos de turbinas empleadas en los convertidores de energía de la corriente de las mareas:

6.1.1.1. Turbina Horizontal de flujo axial.

Se trata de una de las soluciones más avanzadas y con las que antes se ha iniciado la generación a gran escala. Utiliza un concepto muy similar al de las turbinas eólicas, que se lleva evolucionando en el reino Unido desde 1976 en ellas la turbina es de reacción y está en posición horizontal, una disposición (como vemos en la figura), en la que el diseño del álabe y su ángulo de ataque (variable), es el elemento que consigue convertir en rotacional el flujo de corriente.

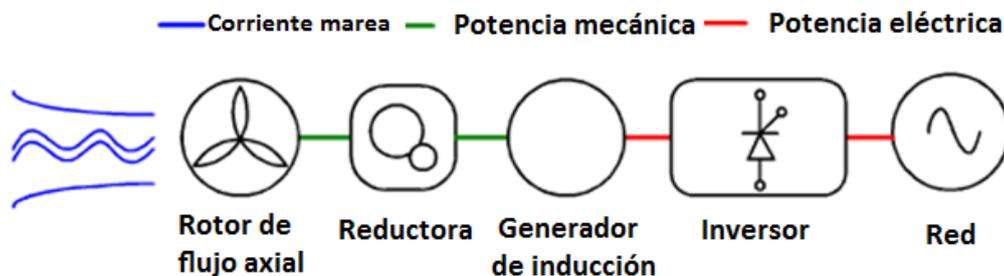


Imagen 60: Power Take Off de turbina horizontal de flujo axial.

Fuente: "Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy" Document T0311. Powertech Labs 2009.

La transmisión de potencia de esta disposición puede ser, hidráulica o mecánica:

- Transmisión hidráulica. En la siguiente imagen vemos una disposición tipo de un sistema de transmisión de potencia hidráulico, una solución muy empleada en los sistemas eólicos de gran potencia por su gran capacidad de control, una característica a tener en cuenta para operar en condiciones de climatología adversa.

La principal ventaja de la transmisión hidráulica (que vemos en la siguiente imagen), es que no necesita inversores, sólo requiere de sistemas de protección para sobrecarga, las humedades y el control las inercias del sistema.

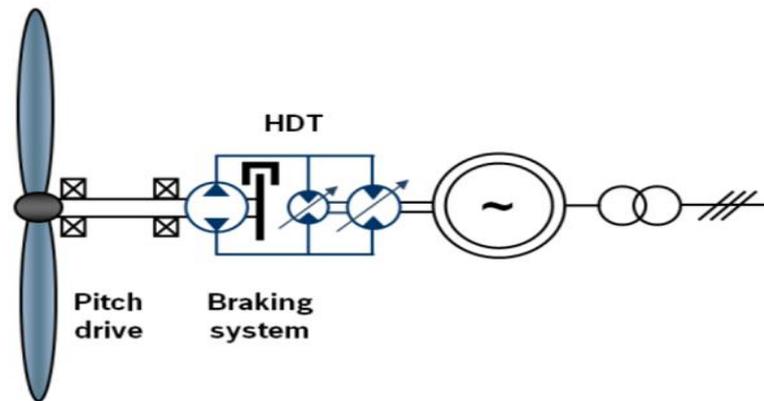


Imagen 61: Power Take Off hidráulico de turbina horizontal.

Fuente: Efficient Power Take Offs for Ocean Energy Conversion. Varios autores. Icoe 2012

- Transmisión mecánica: Es una disposición en el que un rotor de velocidad variable transmite giro a una reductora que va a un generador que dependiendo del tipo de reductora puede ser síncrono.

Como vemos en la siguiente imagen, esta combinación es más compleja que la anterior pues a la salida del generador a un rectificador y de rectificador a red.

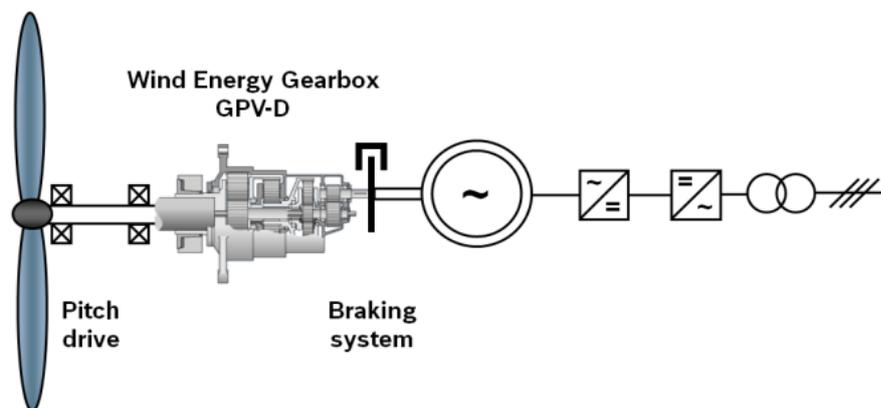


Imagen 62: Power Take Off con reductora.

Fuente: Efficient Power Take Offs for Ocean Energy Conversion. Varios autores. Icoe 2012

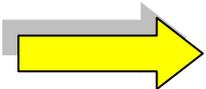
6.1.1.1.1. Sistema Sea Gen:

En 2009 la empresa *SeaGenTM* puso en marcha un equipo con dos rotores que alcanzaban los 1,2 MW de potencia. En esta solución, la corriente de agua incide sobre una hélice de paso variable que

puede funcionar con las dos direcciones (subida y bajada de la marea), y que transmite giro a un generador que es asíncrono y cuya velocidad de giro es regulada por una multiplicadora elíptica. El transformador los sistemas de control de potencia y las seguridades están alojados en el pilar central del dispositivo.



<http://www.youtube.com/watch?v=Fiw-RxNdYTQLatu>



6.1.1.1.2. La Turbina Helicoidal Horizontal Gorlov:

La turbina helicoidal fue creada por el ingeniero mecánico ruso Alexander Gorlov en 1995, es muy similar, en su disposición a la turbina, Darrieus excepto por el tipo de álabe helicoidal que monta (ver imagen arriba).

Es la disposición del álabe alrededor de la circunferencia del rotor la que le permite una puesta en servicio a velocidades más bajas y mantener una inercia de giro más constante ante las posibles fluctuaciones del flujo de marea.

La turbina helicoidal Gorlov está ideada para convertir la energía cinética de la corriente en electricidad está diseñada para emplearla en aplicaciones hidroeléctricas



Imagen 63: Detalle de instalación de una turbina Gorlov horizontal en Korea del Sur.

Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Gorlov_helical_turbine

6.1.1.2. Turbina Horizontal de conducto con flujo axial:

La clave de esta disposición es un conducto que consigue dirigir el flujo de corriente hacia los álabes de la turbina que está dispuesta en posición horizontal, esta canalización del flujo por un conducto que estrecha su sección hasta llegar a las aspas del rotor consigue un incremento de velocidad respecto a la corriente predominante que optimiza la obtención de energía.

El primer prototipo que empleó esta disposición se puso en marcha en las Race Rocks de Canadá. Actualmente esta disposición se encuentra en fase de evolución. En cuanto a la configuración de su sistema de generación cabe destacar que entre las primeras configuraciones se han ensamblado con generador acoplado directamente y que producía pulso eléctrico a cada giro del rotor. Una disposición que vemos en el siguiente esquema.

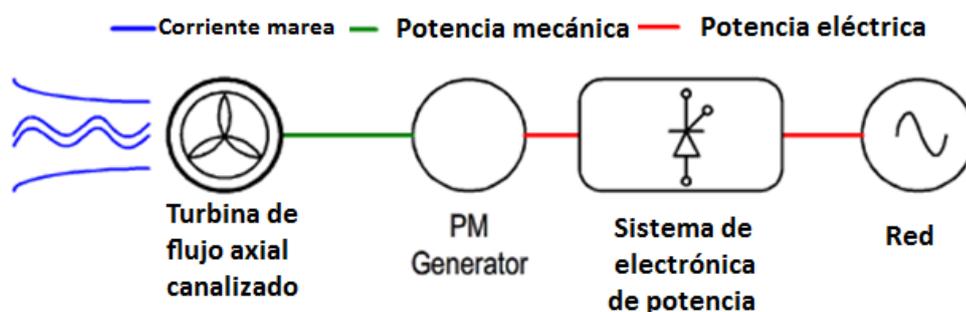


Imagen 64: Power Take Off de turbina horizontal con flujo canalizado.

Fuente: "Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy" Document T0311. Powertech Labs 2009.

Entre las propuestas que más han evolucionado esta configuración encontramos la desarrollada por la empresa británica The Clean Current™ que podemos ver utilizando el siguiente código QR.



<http://www.cleancurrent.com/video>

6.1.1.3. Turbina vertical de flujo axial.

Entre 1976 y 1984 Peter Fraenkel, reconocido desarrollador de turbinas para el aprovechamiento de la energía de las corrientes de las mareas e impulsor de los proyectos de IT, Seafloow y SeaGen entre otros. Empleó, por primera vez, en el río Nilo, en la provincia de Juba, Sudán, una turbina de flujo vertical que empleó para labores de riego. Un esfuerzo con el que el señor Fraenkel rescató una disposición en vertical de la turbina que ya se utilizaba en la antigüedad y que cuenta con grandes ventajas de tipo operacional pues permite un ascenso de la turbina y multiplicadora a superficie más cómodo y por tanto un mejor mantenimiento.

En la siguiente imagen podemos visualizar un esquema genérico de cuál es la disposición de los distintos elementos que componen este tipo de convertidores. En ella vemos que la generación es en corriente alterna y que vía rectificador se pasa a continua para que una vez se ha estabilizado el pulso, éste se hace pasar por un inversor que adapta el pulso de salida con la tensión y frecuencia que requiere la red.

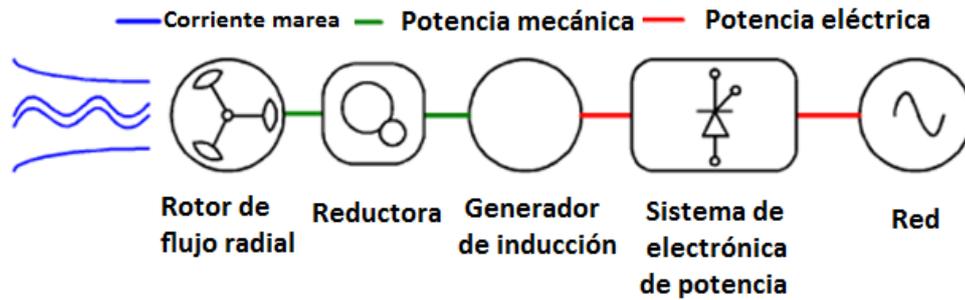


Imagen 65: Power Take Off de turbina vertical.

Fuente: "Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy" Document T0311. Powertech Labs 2009.

En su texto "The Analysis of tidal Stream Power Jack Hardisty identifica según su fijación al lecho marino, tres tipos de turbinas verticales:

- Fijadas al fondo. Un ejemplo de esta disposición es la turbina que el ingeniero finlandés S.J. Savonius desarrolló en 1922. Una propuesta de formas simples y que está compuesta por dos copas fijadas, en dirección opuesta, a un eje central. Cada copa toma impulso del flujo y hace girar el eje llevando a la copa opuesta al punto en el que incide la corriente.

En el siguiente código QR encontraremos una propuesta denominada EXIM que recientemente ha desarrollado la empresa SeaPower.



<http://www.seapower.se/login.aspx?ReturnUrl=%2fDefault.aspx>

- Base elevada. Uno de los ejemplos más reconocibles de esta disposición es la turbina que el ingeniero francés George J.M. Darrieus patentó en 1931, un invento que inicialmente se

dimensiono para una turbina eólica y que David Swan reconvirtió, en 1982, a turbina vertical con flujo canalizado, para el aprovechamiento de la corriente de las mareas del East river de New York.

El invento de Darrieus consiste en dos o más álabes flexibles, a menudo dispuestos en forma de espiral y fijados a un eje vertical y que al recibir el flujo de corriente consigue un par que hace girar el eje.

En esta disposición el cálculo del ángulo de ataque del álabe ayuda a optimizar la generación de energía, por el contrario entre los aspectos a mejorar está el elevado mantenimiento que requieren.

Entre los desarrolladores que han evolucionado este concepto se encuentra la empresa canadiense Blue Energy Company que vemos en el siguiente código QR.



http://peswiki.com/index.php/Directory:Blue_Energy

6.1.1.4. Turbina de flujo cruzado.

Se las conoce como turbinas de baja velocidad, es un diseño más complejo en el que en un túnel de sección rectangular se canaliza el flujo que encontrará en el centro del conducto a los álabes dispuestos en el perímetro del rotor. Esta disposición fue descrita con todo lujo de detalle por Mockmore y Merryfield en 1949 y más recientemente ha sido adaptada para su uso por la empresa británica Neptune Renewable Energy que podemos ver en el código QR que sigue.



<http://www.youtube.com/watch?v=E5DgfYfpk5c>

6.2. Tipos de Convertidores de la energía de las olas:

En la ya mencionada página web del EMEC, aparecen “linkeados” hasta un total de 183 propuestas para aprovechar el recurso energético presente en la ola. Una variedad de opciones que viene motivada por la propia complejidad del recurso, por sus cambios de frecuencia y tamaño, y sobre todo, porque aprovechar la energía de la ola es una actividad que casi no se ha desarrollado.

Si de algo nos vale este trabajo es para que el lector pueda visualizar que la evolución tecnológica, en lo referente a los mecanismos empleados y a su disposición para generar energía con los recursos energéticos de ola y corriente de marea, ha evolucionado poco.

El hándicap que supone elegir un régimen de funcionamiento (frecuencia y altura de la ola entre otros), que optimice la capacidad de generación, ha de ser contrastado con su localización y las necesidades de refuerzo estructural que le permitan soportar los regímenes de tormenta. Así la inercia de las corrientes, las embestidas de las olas más grandes, con sus retornos, subidas y bajadas, que ha de soportar un convertidor en medio de la tempestad, son, por definición, uno de los factores que más condicionan la viabilidad de una propuesta.

El diseñador de un convertidor tiene que dimensionar protocolos de apagado, inmersión o desconexión para el tiempo que “dure la tormenta”. Ha de buscar un diseño robusto, sencillo, de pocas articulaciones y que requiera poco mantenimiento.

Del mural de imágenes de los distintos tipos de convertidores de energía de las olas que vimos en el capítulo de introducción de este trabajo obtenemos una primera conclusión. El tamaño de los equipos.

A diferencia de las soluciones para la energía de las corrientes de las mareas o la de la energía eólica, los convertidores de energía de las olas tienden a ser pequeños (a excepción de los Pelamis, Wavestar o Seahorse), son muchos los desarrolladores que optan por evolucionar convertidores de pequeño tamaño dispuestos en parques de generación.

Otra tendencia destacable de los convertidores de olas, es la de intercalar en los sistemas de generación, una etapa para la acumulación de energía para mejorar la salida de potencia (power take off).

La clave de esta etapa es convertir el empuje de la ola, en aire a presión, agua a presión o aceite a presión. Una acumulación que será convenientemente dosificada en su salida a generador al objeto de obtener una producción estable.

6.2.1. Muchos, y poco contrastados.

Al igual que sucede con los convertidores de las corrientes de las mareas, son muy pocos los mecanismos que han sido probados a escala 1/1 y a diferencia de los primeros la variedad de soluciones propuestas para aprovechar la energía de las olas es mucho mayor.

“El mercado europeo de los accionamientos mecánicos y eléctricos de velocidad variable de los últimos años indica una fuerte disminución de los accionamientos eléctricos de corriente continua, mientras que se aprecia un fuerte ascenso de los accionamientos de corriente alterna y un moderado incremento de los accionamientos hidráulicos.

La disminución del uso de los accionamientos eléctricos de corriente continua se debe a las limitaciones de tipo dimensional (potencia, velocidad, tensión de delgas) y de tipo funcional (incompatibilidad con exigencias de seguridad con atmósferas explosivas) o de fiabilidad (atmósferas corrosivas) que ofrece el uso del colector de delgas y escobillas en estos motores” (Abalat. 2012. P.47.)

Organizar una clasificación en base a las características técnicas de este tipo de equipos supone asumir el riesgo de que será incompleta, muchos de los promotores no exponen públicamente el diseño interno de sus equipos, ya que esa información implica un contenido económico.

6.2.2. Según su posición relativa a la costa.

6.2.2.1. Instalaciones en la costa.

En este grupo encontramos, soluciones que son integradas a la franja litoral (incluidas las estructuras portuarias), una localización en la que el recurso energético de la ola es menor (que en mar abierto) y los requisitos para fijar las propias estructuras implican un mayor coste económico, por el contrario son sistemas más accesibles con un mantenimiento más sencillo y que tienden a tener una mayor capacidad nominal que los convertidores de alta mar.

6.2.2.1.1. Sistema de columna oscilante (OWC). Y sistema Drakoo.

Inventado en 1940 por el japonés Yoshio Masuda es uno de los sistemas menos utilizados debido a los altos costes que requiere su construcción. En este tipo de dispositivos conocidos como OWC (Oscillating Water Column) utiliza la oscilación de agua dentro de una cámara en la que la crecida de la ola empuja el aire hacia la salida en la que está una turbina que permite la entrada de un nuevo volumen de aire cuando baja la ola, una turbina (tipo Wells) que consigue mantener su sentido de giro utilizando los flujos de aire de entrada y salida a la cámara.

En el siguiente esquema podemos ver la disposición de elementos de generación de la instalación de 400kW de potencia que se instaló en 1998 en la Isla de Pico en el archipiélago de las Azores. Como vemos, tenemos una cámara de aire una turbina Wells, un generador alimentado con doble inducción que genera en corriente continua y la etapa de electrónica de potencia que adapta el pulso de salida a los requisitos de tensión y frecuencia que demanda la red.

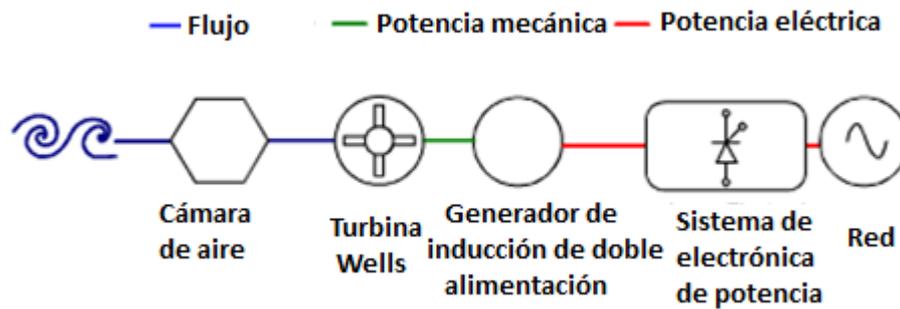


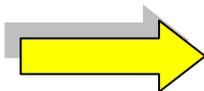
Imagen 66: disposición del Power Take Off de un sistema de columna oscilante.

Fuente: "Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy" Document T0311. Powertech Labs 2009.

Si el lector desea visualizar imágenes de cómo funciona un sistema OWC puede visualizarlo con el siguiente código QR.



<http://www.youtube.com/watch?v=7m1QrqPtQ8Q>



El sistema Drakoo. En noviembre de 2012 la empresa de la república de Singapur Hann-Ocean Energy comenzó las pruebas en aguas abiertas del prototipo denominado Drakoo, un sistema portátil de columna oscilante y que es capaz energía con olas de pequeña altura (de entre 0,2 a 1,2 m), una propuesta que todavía está en fase de estudio y que tiene fecha de 2017 para iniciar su comercialización, pero que apunta ser una solución adecuada para las aguas interiores de puerto.

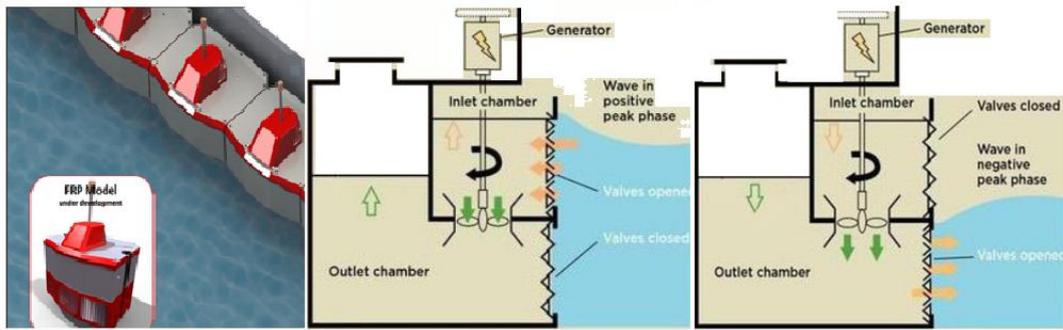


Imagen 67: Secuencia de funcionamiento del sistema Drakoo

Fuente: Drakoo - The Highly Efficient and Cost-Effective Wave Energy Converter Ponencia en el World Future Energy Summit 15-17 de enero 2013

Podemos ver un video explicativo del funcionamiento del sistema Drakoo en el siguiente código QR.



<http://www.youtube.com/watch?v=jNOK5MiSdf0>

6.2.2.1.2. Sistema OWC de desalación directa Oceanlinx:

Desarrollada en Australia por la empresa Oceanlinx bajo la denominación de Energetech, se trata de un sistema de columna de agua oscilante cuyo desarrollo se inició en el año 2002 y que en octubre de 2013 se convirtió en el puerto de Macdonnell en una planta de 1 MW de capacidad.

Se trata de una propuesta que utiliza la disposición de columna de agua oscilante (OWC) para bombear un caudal de aire que es el que activa una turbina que arrastra a un generador.

El rasgo más relevante de este captador de ola son sus dimensiones, cuenta con un conducto por el que la ola se canaliza hasta el área de

captación de 20 metros de frente de entrada de ola de por 20 de profundidad.

Conceptualmente está ideado para localizarlo en zonas próximas al litoral o para fijarlo a la plataforma de tierra.

Entre las prestaciones que se propusieron desarrollar sus promotores estaba la de utilizar la presión de trabajo para tomar agua hacerla pasar por una membrana de ósmosis inversa y desalarla.

Un planteamiento del que no he obtenido datos de producción
En la siguiente imagen el lector puede ver la disposición del sistema de generación

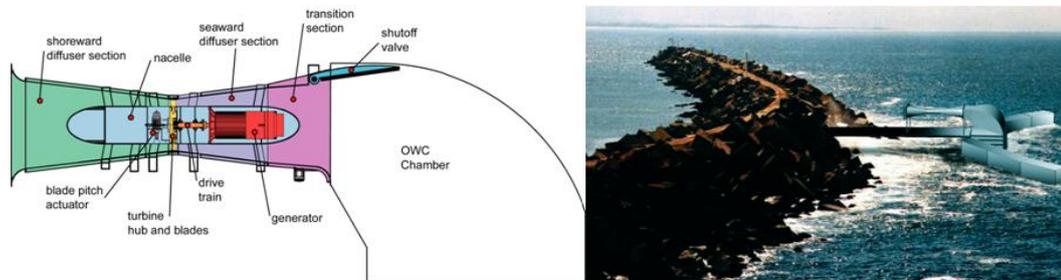


Imagen 68: Disposición interna y vista exterior del sistema ENERGETECH.

Fuente: Elaboración propia varios autores

En el siguiente código QR el lector puede visionar



<http://www.oceanlinx.com/news/video-news>

6.2.2.1.3. Convertidores hidráulicos de costa. El Pendulo, el Seahorse

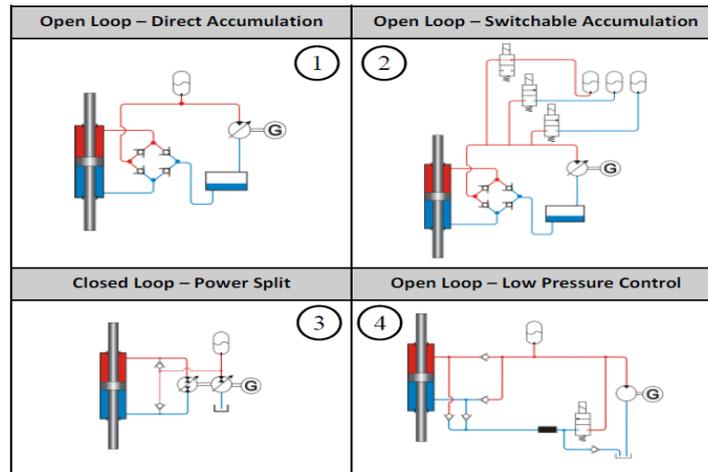


Imagen 69: Distintas disposiciones de convertidores de energía con PowerTake Off Hidráulico.

Fuente: Efficient Power Take Off for Ocean Energy Conversion. Varios autores. 2012.

En este apartado hemos aglutinado un total de tres propuestas (de diferente promotor) que son diseñadas para ser dispuestas sobre diques o infraestructuras de abrigo, de disipación, transmisión o reflexión de olas y cuyo cometido es aprovechar el empuje de la ola para impulsar un cilindro hidráulico que a su salida hacer girar un motor hidráulico al que se engrana un generador.

La diferencia entre estos mecanismos reside en el tipo de elemento sobre el que incide la ola, en el caso del Pendulo es una compuerta sujetada por sus extremos superiores la que hace moverse al cilindro, mientras que en los sistemas Wavestar y Eco-wave el elemento impulsado por la ola es un flotador articulado por una palanca que lo fija al dique y en cuya base se encuentra el cilindro que activa al equipo de generación.

El esquema de funcionamiento genérico de este tipo de convertidores atiende a la siguiente figura.

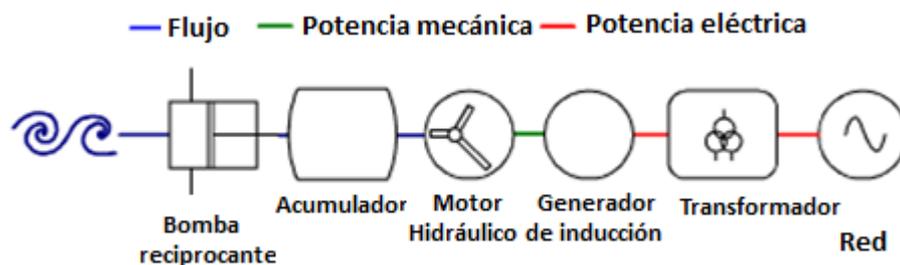


Imagen 70: Power Take Off hidráulico del convertidor Pelamis.

Fuente: "Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy" Document T0311. Powertech Labs 2009.

El sistema Pendulor.

Empezó a desarrollarse en Japón en 1978, consiste en un hueco en la pared del dique con forma de “U” acostada que tiene a su entrada una compuerta articulada desde su parte superior y que abre y cierra con el impulso de la ola creciente y su retroceso, dicho portón está conectado con un cilindro hidráulico que tiene su lado estático fijado a la estructura dique en la que se asientan los sistemas de conversión de energía, y que genéricamente atiende a la disposición que vemos en la siguiente figura.

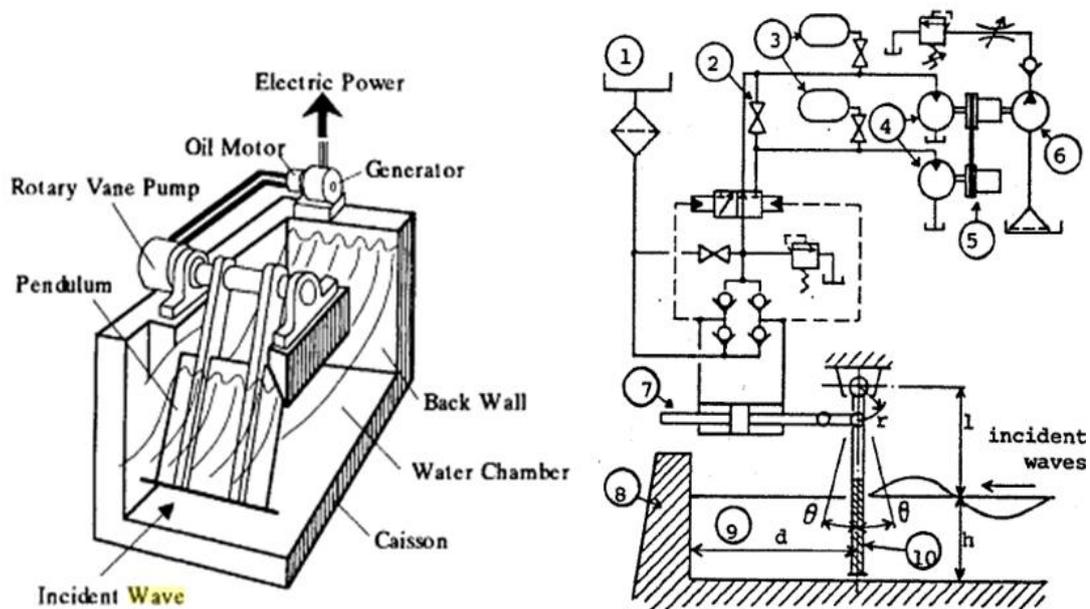


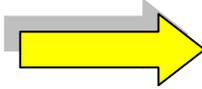
Imagen 71: Power Take Off del convertidor Pendulor

Fuente: Varios autores.

El código QR que acompañamos a continuación permitirá al lector ver cómo funciona un sistema Pendulor.



<http://www.youtube.com/watch?v=scxg6rbovy0>



El Seahorse (sistema hidráulico de agua dulce):

En junio de 2012, en el Puerto de Pecém, Brasil, se inició la puesta en servicio de una central undimotriz con una potencia de 50 kW.

La iniciativa impulsada por el Instituto Alberto Luiz Coimbra de Posgrado e Investigación de Ingeniería (Coppe), vinculado a la Universidad Federal de Rio de Janeiro, ha recibido el nombre de Seahorse y en su primera versión está compuesta por dos grandes brazos mecánicos fijados al muelle del Puerto. En el extremo de estos brazos, en contacto con el agua del mar, hay una boya circular.

Con el movimiento de las olas, la estructura se mueve hacia arriba y hacia abajo, accionando bombas hidráulicas, que hacen que el agua dulce contenida en un circuito cerrado, en el que no hay intercambio con el ambiente, circule en una red de alta presión.

El agua a gran presión se dirige a un acumulador de dos etapas, que tiene agua y aire comprimidos en una cámara hiperbárica y que es el pulmón del dispositivo. Su cometido, es proporcionar agua a presión (a un valor prescrito), que se lanza contra los álabes de una turbina Pelton a la que está acoplado un generador eléctrico.

En la siguiente imagen incorporamos una vista del esquema de funcionamiento del sistema Seahorse.

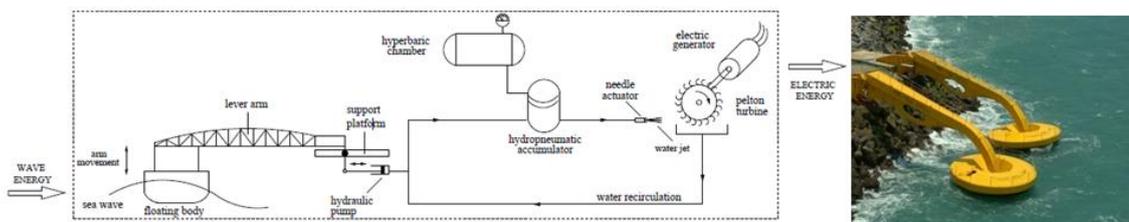


Imagen 72: Power Take Off del convertidor Seahorse, Brasil Pecem.

Fuente: Wave-to-wire model and energy storage analysis of an ocean wave energy hyperbaric converter. Varios autores. 2008.

Si el lector desea visualizar en detalle el funcionamiento del sistema, puede activar el siguiente código QR.



<http://www.youtube.com/watch?v=7BhslJPe7Hw>

6.2.2.1.4. Sistemas de generación con Power take off eléctrico. El Ecowave.

En este apartado he incorporado la relación de equipos que he detectado que se montan Onshore y cuya secuencia de generación de energía no cuenta con etapas intermedias de acumulación.

Sistema Ecowave.

Se trata una propuesta de origen israelí en fase de evolución (actualmente se están probando equipos de media escala de entre 100-150 kW de potencia).

Conceptualmente es muy parecida al sistema Seahorse pues es un flotador articulado que por medio de un brazo transmite vía palanca movimiento producido por el empuje de la ola a un equipo de generación que queda localizado en el lado de Puerto.

Una disposición denominada WavePlane Electric A/S (WPE)

En este caso el Power take off es directo a un generador eléctrico. Pasar contenido electrónica de potencia.



<http://www.ecowavepower.com/category/video/>

6.2.2.2. Instalaciones cerca del litoral

6.2.2.2.1. El sistema WaveStar.

Como principio de funcionamiento utiliza un flotador articulado por palanca y que en su unión al cuerpo de la estructura central, cuenta con un cilindro hidráulico que con la subida y bajada de la ola bombea aceite que hace girar el motor.

Lo relevante de esta propuesta, que está siendo desarrollada por la empresa danesa Wave Star Energy ApS, es el número de 20 flotadores, lo que supone una capacidad de generación que alcanza los 1,6 MW de potencia.

En la siguiente figura, el lector puede ver cuál es la disposición del flotador como activa al circuito hidráulico que a su vez arrastra al generador y realiza el volcado a tierra.

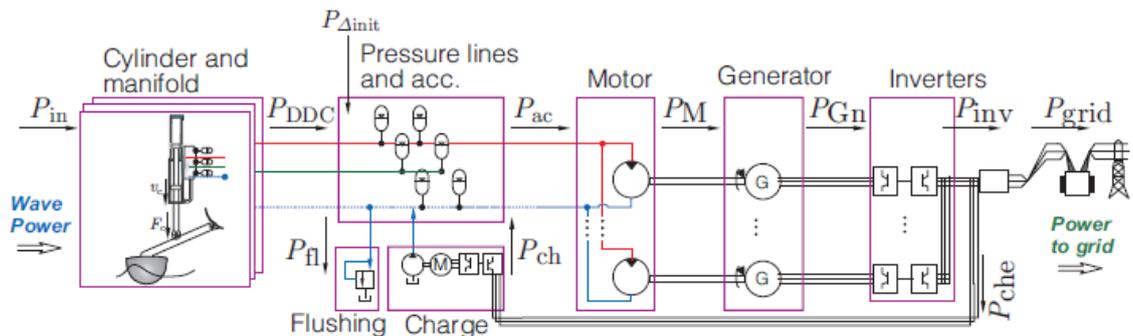


Imagen73: Power Take Off Hidráulico del sistema Wavestar.

Fuente: Discrete Displacement Hydraulic Power Take-Off System for the Wavestar Wave Energy Converter. Varios autores 2013.

Para obtener un mayor detalle del funcionamiento del sistema Wavestar, el lector puede activar el siguiente código QR.



<http://www.youtube.com/watch?v=-Irte-VJ1x4>

6.2.2.2.2. Sistemas flotantes:

6.2.2.2.2.1. Sistema de generación lineal. El sistema Wedge y el OPT..

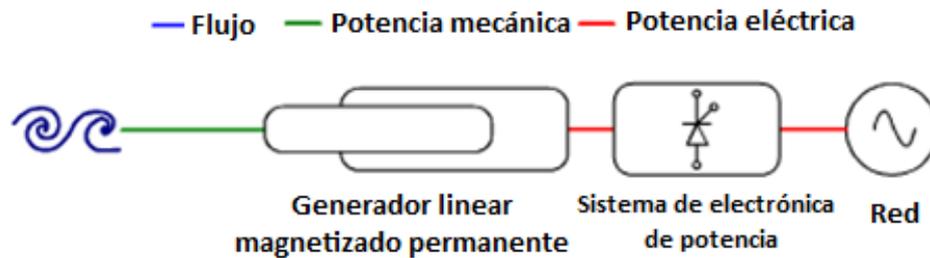


Imagen 74 Power Take Off de Reluctancia conmutada.

Fuente: “Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy” Document T0311. Powertech Labs 2009.

Sistema Wedge:

Sistema desarrollado por la empresa cántabra Wedge Global S.L. en colaboración con el Cimat (Ministerio de Educación y Ciencia), y que utiliza un generador lineal de reluctancia conmutada (imanes no permanentes).

Una disposición en la que la salida de potencia es directa, “de la ola al cable”, ahorrando así etapas, no reversibles de acumulación hidráulica o neumática (con las pertinentes pérdidas de carga y requisitos de mantenimiento que conlleva).

Un formato de generación cuyo estudio e investigación se inició en 2006 y que en la actualidad no ha iniciado su etapa comercial. Conceptualmente el sistema Wedge es más simple, integra al generador, la electrónica de potencia y el sistema de control en un mismo cuerpo y no necesita sistemas intermedios de transmisión de empuje.

Está compuesta por una estructura magnética reluctante de polos salientes en el estator y en el rotor. En los polos del estator se colocan las bobinas concentradas, que conectadas a pares diametralmente opuestos forman las fases del motor. En cada fase la conmutación de la corriente se efectúa a través de un convertidor estático. La secuencia de

conmutación de los interruptores estáticos viene controlada por la posición del rotor mediante sensores de posición ópticos o magnéticos. Esta máquina está constituida por:

- Estructura magnética reluctante.
- Convertidor estático.
- Dispositivo de control formado por sensores de posición y secuencia de conmutación.

Una disposición que requiere de un complejo proceso de montaje y de un exigente mantenimiento por la sensibilidad de los componentes a la agresión del ambiente y el medio marino en la siguiente imagen el lector puede ver cómo es la disposición de este sistema de generación en el sistema Wedge.

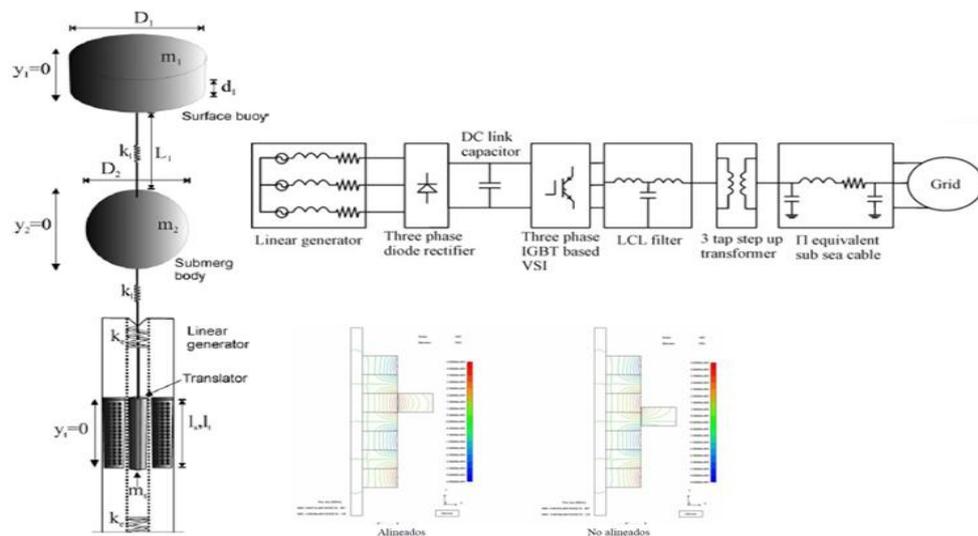


Imagen 75: Power Take Off del convertidor Wedge

Fuente: Varios autores.

En el siguiente código QR el lector puede visualizar el funcionamiento del prototipo de generador de Wedge.



Sistema OPT:

Desde 1994 la empresa OPT utiliza es un diseño estadounidense denominado Power Buoy que captura la energía de la ola mediante el empleo de boyas de gran tamaño ancladas al fondo. Un sistema que ha sido probado tanto en el continente americano como en Oceanía y en Europa.

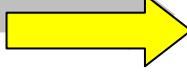
En 2006, OPT formó una empresa conjunta con Iberdrola SA, la petrolera Total, el IDAE y la Agencia de Desarrollo Local Regional SODERCAN, para el desarrollo de la energía de las olas en la costa Norte de España.

El sistema de generación de energía empleado por OPT es un generador lineal que en su última versión alcanza los 32 metros de altura los 11 metros de diámetro y es capaz de producir 866 kW de potencia pico para un rango de olas de hasta 6 metros de altura. En el siguiente video lo podemos ver en funcionamiento.



<http://www.youtube.com/watch?v=EsRzTl6Q24E>

6.2.2.2.2.El sistema de masa rotante



Wello OY

Sistema Finlandés que en septiembre de 2013 concluyó la etapa de prueba en mar abierto en las islas Orcadas (iniciada en junio de 2010). El Wello Oy consiste en un casco en el que la obra viva está diseñada para captar el empuje de la ola, en su interior cuenta con una cámara de aire que alberga la “sala de máquinas” en la que el elemento fundamental es una masa excéntrica alineada a un eje que se encuentra en el centro del casco y que es la que va convertir en movimiento rotatorio los empujes de las olas. Un giro que se transmitirá directamente al generador y de ahí a tierra.

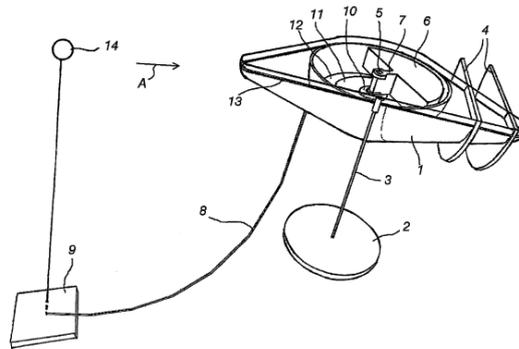


Imagen 76: Disposición del sistema Wello Oy

Fuente: <http://www.ipaaustralia.com.au/applicant/wello-oy/patents/AU2009295772/>

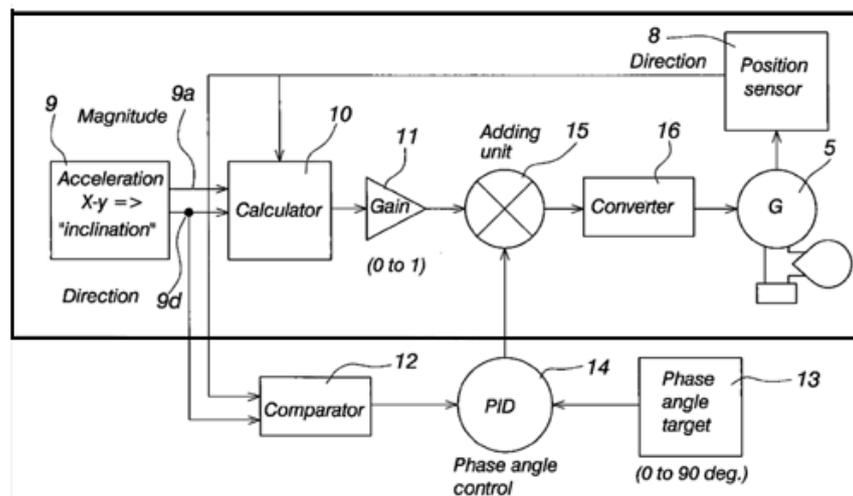


Imagen 77: Diagrama de bloques del sistema Wello Oy

Fuente: <http://www.ipaaustralia.com.au/applicant/wello-oy/patents/AU2009295772/>

Así el rotor de masa excéntrica gira continuamente en una misma dirección buscando el punto con menor influencia de la gravedad y la mayor inclinación respecto a la vertical. Esta masa de 120 toneladas, en principio es incrementada hasta un máximo de 200 toneladas. El rotor completa una vuelta por cada paso de ola, y toma un régimen de revoluciones por minuto que oscila entre las 5-15 rpm. Desde que la velocidad de rotación coincida con la frecuencia de la ola, el sistema control optimiza la potencia de salida mediante el par máximo del sistema rotacional. Este control se realiza mediante la introducción de una fase de retraso equivalente a un desplazamiento angular entre la posición instantánea del rotor y el ángulo de inclinación del eje del motor. Para pequeñas olas este desfase es de 0° , pero para olas de gran tamaño dicho retardo puede alcanzar los 90° .

La estrategia de control de potencia está diseñada para obtener en todo momento el máximo par de giro posible y por tanto la mayor salida de potencia posible.

El rotor con su volante de inercia está directamente acoplado al generador, y no dispone de reductora. El generador empleado en el prototipo de escala real es de giro síncrono con magnetización permanente y alcanza 1 MW de potencia máxima, siendo de velocidad de giro entre las 5-15 rpm produce un pulso con frecuencia variable que será adaptado a la tensión de red mediante un convertidor de potencia.

Este sistema al ser de generación “en seco” conlleva un mantenimiento del sistema de generación menos costoso.

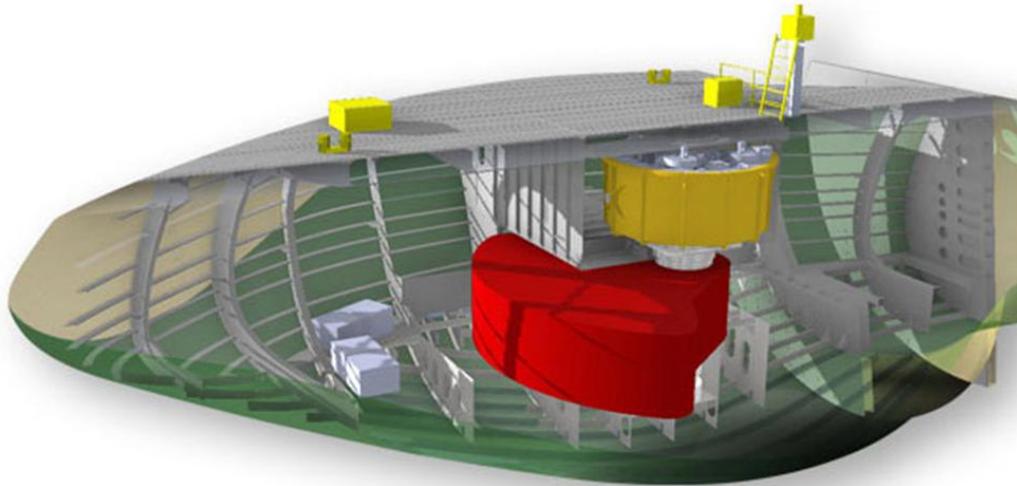


Imagen 78 : Disposición interna e imágenes exteriores del sistema Wello Oy.

Fuente: <http://www.wello.com>

En el video linkeado al siguiente código QR, el lector puede ver el principio de funcionamiento de este sistema.



<http://www.wello.eu/penguin.php>

6.2.2.2.3. Sistemas semi-sumergidos. El AWS (Archimedes Wave Swing).

Es una de las soluciones con PowerTake Off hidráulico más consolidada. Desarrollada inicialmente (1993) por la empresa holandesa Teamwork Technology, de trata de un proyecto que fue vendido en el Reino Unido en 2004 y donde recibió la denominación comercial de AWS Ocean Energy Ltd. con sede en la ciudad de Inverness Escocia.

Actualmente los escoceses han continuado la evolución de este equipo alcanzando prototipos que, probados en el Lago Ness son capaces de generar potencias de entre los 2,4 y los 4MW.

Principio de funcionamiento.

La generación eléctrica es producida gracias al principio de Arquímedes. El sistema está compuesto por dos cilindros, uno interior fijado al lecho marino y uno exterior dispuesto concéntricamente al primero.

Es el cilindro exterior el que se va a desplazar en sentido vertical a cada paso de ola. Este movimiento presuriza el aire que hay dentro del cilindro y genera una fuerza ascendente en el cilindro móvil.

El sistema de conversión eléctrica ha dejado de ser hidráulico para incorporar un sistema de imanes permanentes en el lado móvil y una bobina fija en el cilindro inferior. Así el paso de la ola genera un campo electromagnético, un pulso eléctrico que es volcado a la red de tierra.

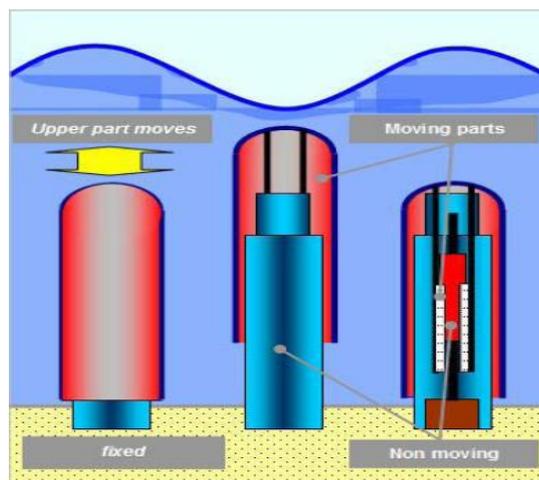


Imagen79: Componentes y movimiento relativo del sistema AWS.

Fuente: Energies Renovables Marines: implicació en el món actual i futur i fonts existents. Viabilitat de subministrament energètic d'un port català. Autor: Denis Pons Fernández.

Con el siguiente código QR, el lector puede visualizar el funcionamiento del AWS.



<http://www.youtube.com/watch?v=hip6lu-q6FA>

6.2.2.2.4. Sistemas sumergidos. El Oyster de Aquamarine:

Oscilante sumergido con un PTO hidráulico de agua dulce

En el verano del 2009 fue instalado con éxito en las instalaciones del EMEC en las Islas Orcadas, iniciando su producción en octubre de 2009. Ideado para generar energía en el rango que va entre los 25 y los 50 metros de profundidad.

El sistema está compuesto por un captador que formado por una base fija al fondo y una pared que en la vertical es la que recibe los impactos de la ola. Estos impulsos son los que activan una bomba que empuja una línea de agua dulce que en ciclo cerrado va a alcanzar la costa en la que se encuentra el equipo de generación.

La línea de agua dulce impacta contra los álabes de una turbina Pelton y el giro de esta es el arrastra al generador.

En la siguiente imagen observamos cómo es el funcionamiento del sistema.

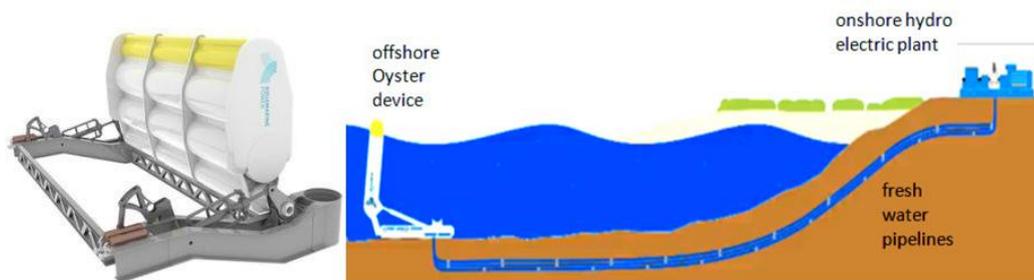


Imagen 80: Disposición del Convertidor Oyster Aquamarine

Fuente: Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter. Varios autores. 2010

Mientras que en el siguiente código QR podemos visionar su funcionamiento.



<http://www.youtube.com/watch?v=VYmyCGM1tGk>

6.2.2.2.3. Instalaciones en mar abierto:

6.2.2.2.3.1. Sistemas atenuadores. Un Bulge wave llamado Pelamis.

Etimológicamente pelamis platourus significa serpiente marina de vientre amarillo que vive en aguas tropicales y subtropicales.

Una denominación como otra cualquiera con la que los promotores de este sistema no sólo consiguieron una denominación curiosa sino que consiguieron captar la atención de los inversores frente a otros sistemas de funcionamiento zigueante similares y con nombre de reptil menos amable (como el Anaconda entre otros).

Como convertidor de olas el Pelamis, desarrollado por la empresa escocesa Pelamis Wave Power, es reconocido como uno de los desarrollos que alcanzó antes la etapa comercial, entre 2004 y 2007 desarrolló una etapa de prueba en el mar abierto de las Islas Orcadas, se trataba de un primer prototipo de 150 metros de eslora y 750 kW de potencia que fue mejorado con otros tres dispositivos que sumaban un total de 2,25 MW de potencia que se pusieron en funcionamiento a

partir de 2008 en el parque de generación de Aguadoura en la costa este de Portugal.

Una experiencia que sólo duró cinco meses y que sirvió de experiencia para la puesta en servicio de una nueva planta a partir de 2010, de nuevo en las Islas Orcadas.

En la siguiente imagen, vemos que el dispositivo de salida de potencia del Pelamis depende de la presión que fuerza el paso de la ola en las sobre los cilindros hidráulicos que unen a las articulaciones del dispositivo, un empuje de fluido que es acumulado en un depósito que a su salida se encuentra con un motor hidráulico que es el que arrastra al generador en alterna.

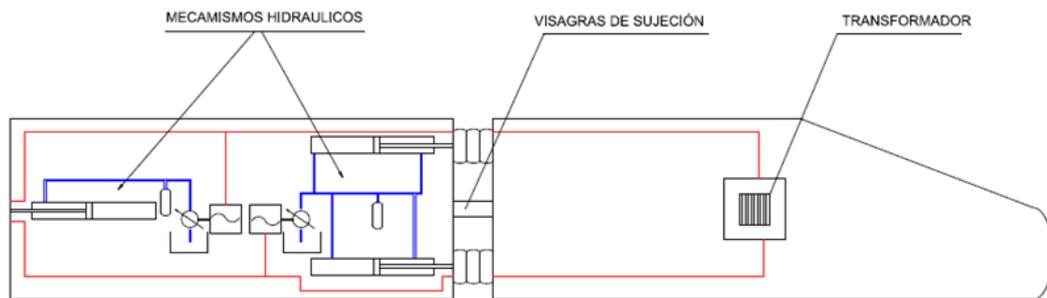


Fig. 5.2. Dispositivo convertidor de energía.

Imagen 81: Power Take Off del Pelamis

Fuente: <http://www.pelamiswave.com/pelamis-technology>



<http://www.youtube.com/watch?v=S2EtwMjMW6A>

6.2.2.3. Sistemas Totalizadores

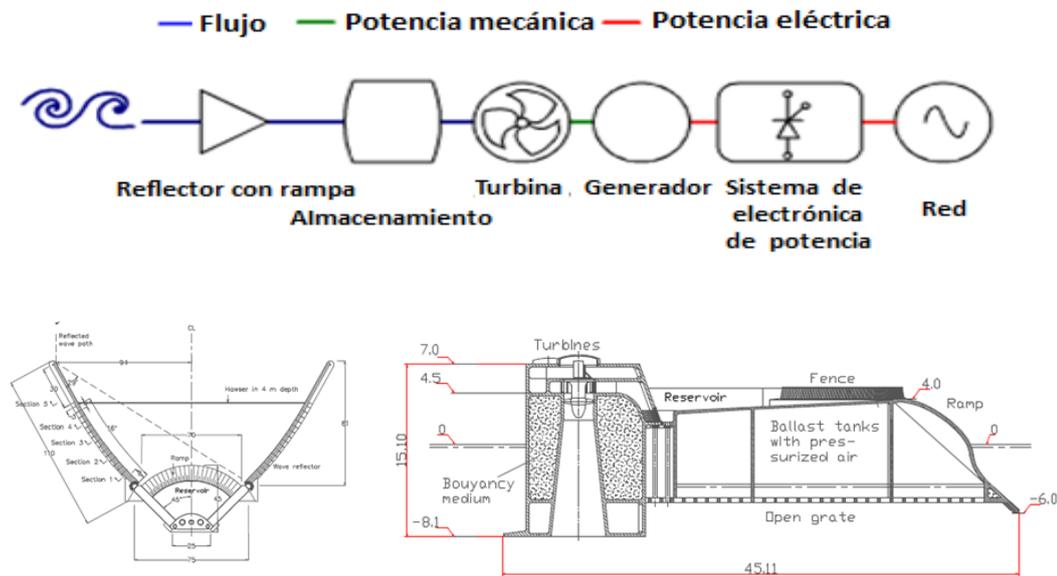


Imagen 82: Combinación de imágenes del Power Take Off y disposición del convertidor Wave Dragon. Fuente: Varios autores.

Se trata de una propuesta que el ingeniero danés Erik Friis-Madsen's empezó a dibujar en 1986 y que es materializada por primera vez en 1997 y que en 2003 alcanza la escala real (actualmente supera las 20.000 horas de funcionamiento).

Funcionamiento del sistema:

Consiste en una plataforma situada en alta mar con dos brazos reflectores de olas que tienen por función conducir la entrada de la ola al sistema. En la zona central se sitúa una rampa por la que sube la ola y alcanza un embalse (por encima del nivel del mar), en el que el agua mantiene una energía potencial.

A la bajada del tanque el agua acciona una turbina de baja presión que transmite su giro a un generador.

Especificaciones técnicas del sistema Wave Dragon en escala real:

- Potencial: 4 MW máximo, 3MW para olas de 4 m de altura.

- Localización: Usualmente a una profundidad de entre 20-50 metros y con una distancia a la costa que en el caso de Dinamarca es de 25-100 km de la costa.
- Material de construcción y estructura: Hormigón armado y la estructura es calculada en base al cálculo de la construcción naval.
- Desplazamiento:
 - 6000 Toneladas el sistema de generación.
 - 2000 toneladas cada brazo reflector.
 - 1000 toneladas el agua contenida en el embalse.
 - 11000 Toneladas en total.
- Turbinas: De baja presión como las de las centrales hidroeléctricas ya existentes.
- Sistema de flotabilidad. El objetivo es regular el sistema para permitir la entrada de la ola hasta el embalse.

Con el código QR que acompaña este texto el lector puede visualizar cómo es el funcionamiento del sistema Wave Dragon.



http://www.youtube.com/watch?v=rgtk_Fsr0No

7. Una propuesta para el Puerto Deportivo Marina Lanzarote como caso práctico.

8.



Los capítulos previos del presente Trabajo de Fin de Grado han servido para justificar el empleo de convertidores energéticos marinos de olas y corrientes de marea en la producción de servicios energéticos en el recinto portuario.

En vez de utilizar la electricidad como vector energético la presente propuesta plantea convertir el impulso de la marea en aire comprimido, hielo, agua desalada, o pulso eléctrico para pantalanés, entre otros.

Es en este último capítulo en el que el lector encontrará una prospección de posibles soluciones para resolver parte de las demandas energéticas del Puerto deportivo Marina Lanzarote.

7.1. El Puerto Deportivo Marina Lanzarote

Localización:



Imagen 83: Localización del Puerto Deportivo Marina Lanzarote.

Fuente: Cámara de Comercio Lanzarote.

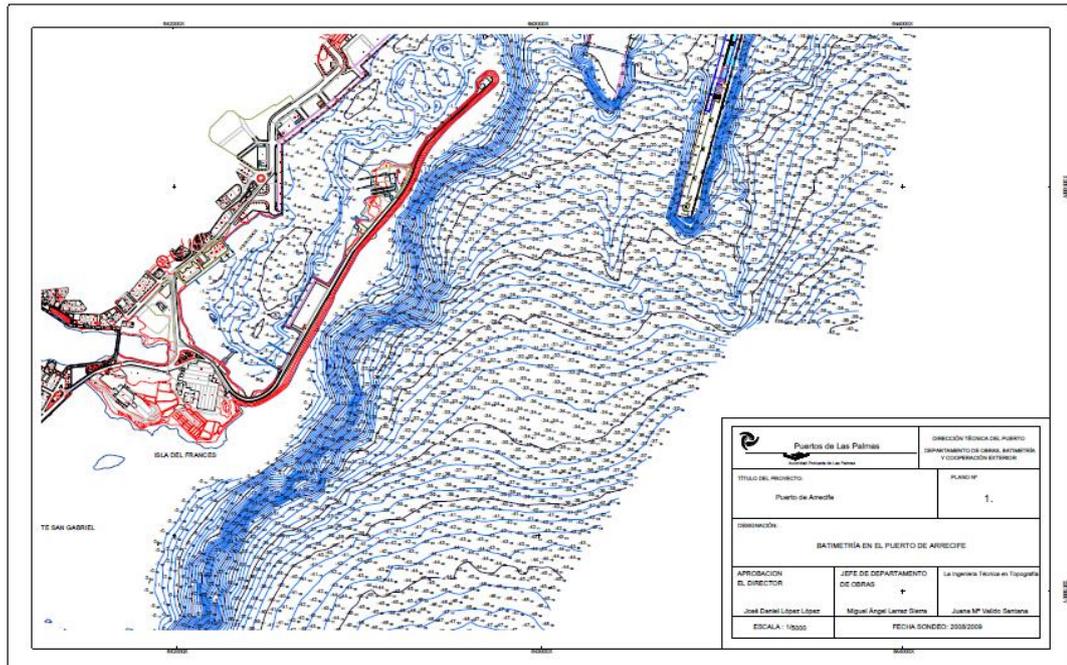


Imagen 84: Batimetría Puerto de Arrecife.

Fuente: Autoridad Portuaria de Las Palmas <http://www.palmasport.es/00000/paginas/html/default.htm>

7.1.1. Presentación. Características del Puerto Deportivo Marina Lanzarote:

En el momento en el que se concluye el presente Trabajo de Fin de Grado, el Puerto Deportivo Marina Lanzarote inicia su explotación comercial.

Se trata de un complejo completamente nuevo, construido bajo las premisas del código técnico de la edificación y que ha alcanzado una certificación energética de categoría A (nivel máximo).



Imagen 85: Infográfico Puerto Deportivo Marina Lanzarote.

Fuente: <http://lavozdelanzarote.com>

El Puerto Deportivo Marina Lanzarote es fruto de una concesión administrativa emitida por la Autoridad Portuaria de Las Palmas a favor de la empresa Calero Marinas y que abarca la construcción y explotación de este puerto deportivo por espacio de 35 años.

El proyecto cuenta con unos 443 amarres, de los cuales el 65 % será para los barcos de entre 6 y 10 metros (los más habituales de la isla), un 26,1 % será para embarcaciones de 12 a 18 metros, el 8 % para aquellos cuya eslora esté comprendida entre 20 y 30 metros y por último un 1 por ciento para barcos mayores de 60 metros.

Aparte de los amarres propiamente dichos, el nuevo puerto deportivo estará dotado de una amplia marina seca:

- Varadero:
 - 14.000 metros cuadrados de superficie útil.
 - Travel lift de 720 toneladas.
 - Varadas.
 - Mantenimiento y limpieza.
 - Servicio de mantenimiento.
 - Trabajos de pintura.
 - Mantenimiento de aparejo.
 - Velería.
 - Revisiones de motores.
 - Tratamientos de osmosis.
 - Servicio de buceo.
 - Inspecciones técnicas de embarcaciones "ITB".
 - Servicio de información.
- Aparcamientos (350 plazas).
- Zona de servicios:
 - Parafarmacia-
 - Tienda de Pesca.
 - Establecimientos para alquiler de vela.

7.2. Estimación de los Recursos energéticos renovables marinos del Puerto Deportivo Marina Lanzarote.

Debe entender el lector que este apartado del texto atiende más una apreciación cualitativa que cuantitativa, que este trabajo no es para estimar la calidad y robustez del recurso sino para apuntar tendencias y posibles soluciones.

La información con la que se cuenta es poco precisa no alcanza un nivel de detalle y como ocurre con otros recursos energéticos renovables, como el viento y el sol se hace necesario una secuencia de toma de datos a “pié de obra”, para confirmar la calidad del recurso y la localización más óptima.

En el siguiente plano el lector puede ver que he zonificado el espacio portuario en cuatro zonas

- Corrientes de marea. Túnel de desagüe del Puerto Marina Lanzarote.
- Olas de pequeño tamaño producidas por el viento y corrientes marea.
- Olas de primer impacto y retorno. La Punta de la Lagarta.
- Olas de Litoral. Trasera a muelle.

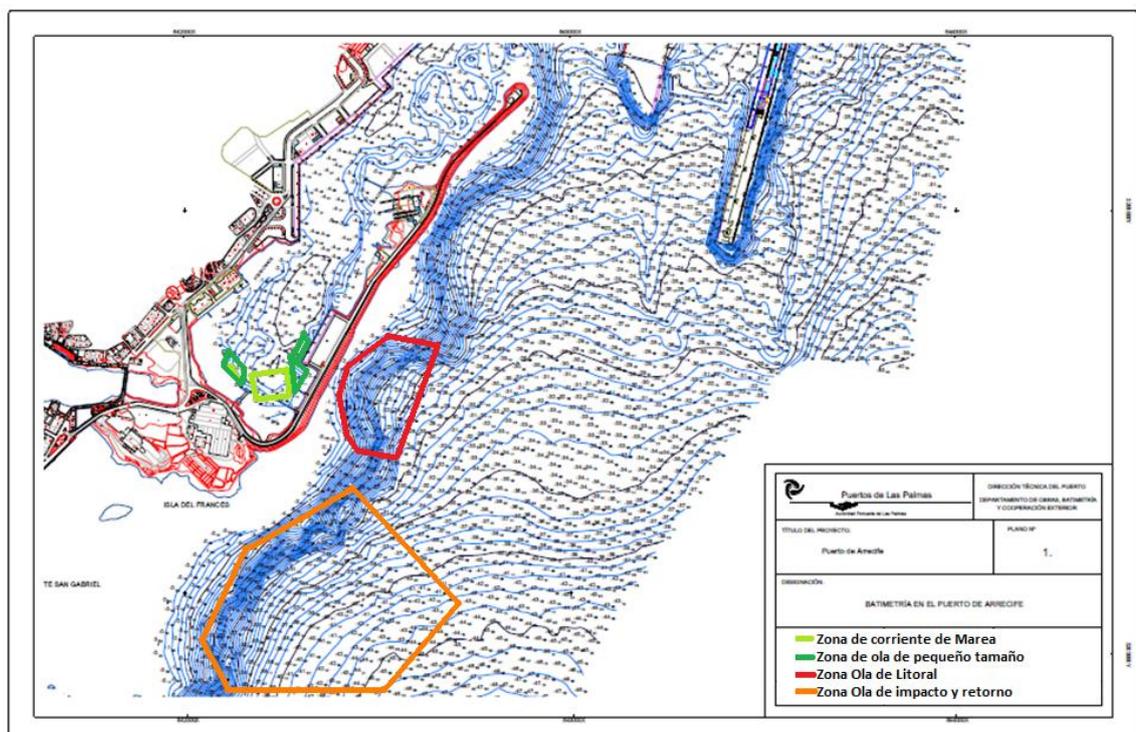


Imagen 86: zonificación del recinto Portuario según tipo de recurso energético marino.

Fuente: Elaboración propia con plano batimétrico de autoridad Portuaria del Puerto de Las Palmas.

- **7.2.1. Corrientes de marea. Túnel de desagüe del Puerto Marina Lanzarote.**

Un conducto estrecho por el que se renueva el agua de la Marina.

En su extremo Sur el Puerto cuenta con un túnel de unos 3 metros de diámetro 25 metros de longitud y de escasa profundidad (0-1 metros).

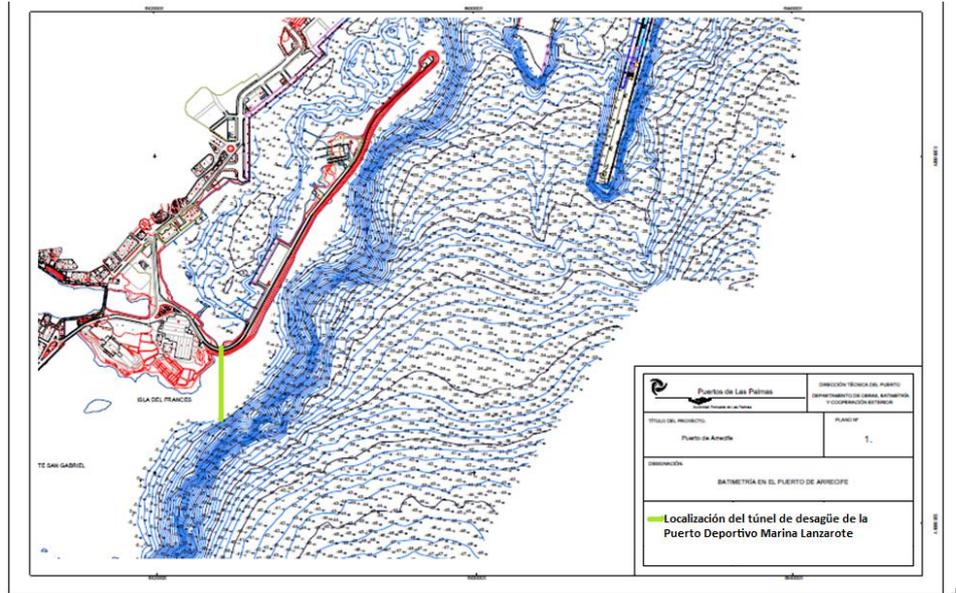


Imagen 87: Localización del túnel de desagüe del Puerto Marina Lanzarote.

Fuente: Elaboración propia con plano batimétrico de Autoridad Portuaria del Puerto de Las Palmas.

Con el túnel de desagüe se consigue dar salida y entrada al agua que impulsa la marea (de entre 2 y 2,5 metros de altura).

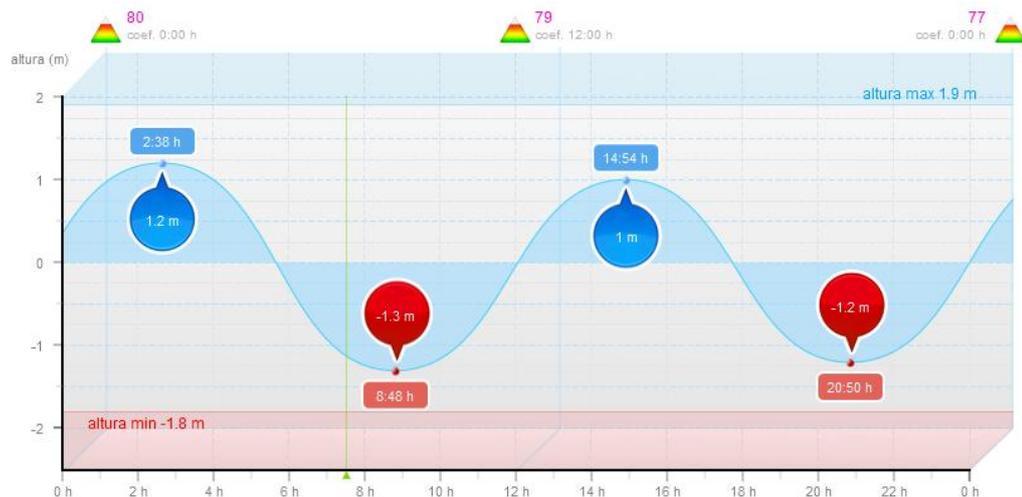


Imagen 88: Predicción de mareas para el Puerto de arrecife enero de 2014.

Fuente: <http://www.tablademareas.com/es/islas-canarias/arrecife-lanzarote>

Un conducto que debido a su estrecha sección produce un incremento en la velocidad de salida y entrada de agua a la Marina y que en ocasiones suma al empuje de la bajada de la marea la incidencia del Alisio que es el viento predominante.

Por el plano batimétrico podemos observar que se trata de un área con escasa profundidad. Con zonas que en su cota mínima oscilan entre los 5 y los 0 m.

En el siguiente código QR el lector puede visualizar como es la entrada del pulso de agua en un día de escaso viento, mar en calma y marea media (30 de diciembre de 2013).



http://www.youtube.com/watch?v=kaGISZixw-4&feature=em-share_video_user

Estimación del recurso corriente Marea.

El recurso predominante es un flujo laminar de crecida y descenso de marea que puede alcanzar los 2-3 metros por segundo de velocidad unas 16 horas diarias.

- 7.2.2. Olas de pequeño tamaño producidas por el viento y las corrientes de marea.

La falta de abrigo en la cara Norte de la Marina, el viento alisio predominante hace que sea muy habitual la formación de una ola de pequeña altura que empujada por el viento termina en el borde Sur del recinto portuario y que es más frecuente cuando el viento alisio (Noreste), tropieza con la ya mencionada crecida de la marea.

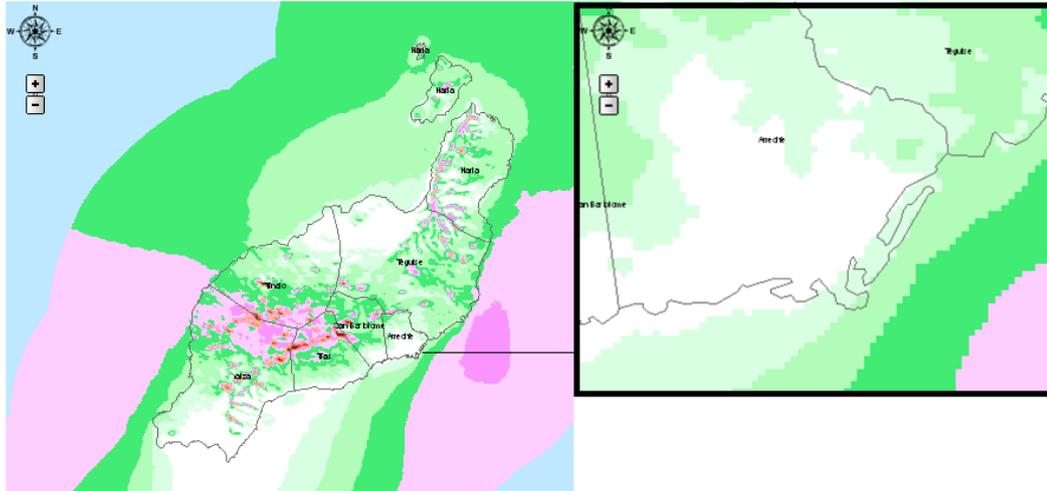


Imagen 89: Mapa eólico de Lanzarote con vista en detalle del municipio de Arrecife.

Fuente: <http://www.itccanarias.org/MapaEolicoCanarias/>

Estimación de recurso de ola de pequeño tamaño.

La ola de pequeño tamaño oscila los 20-40 cm y es más apreciable en los tramos de crecida de la marea, por lo que como dato mínimo tendremos este recurso activo unas 10 horas al día.

- 7.2.3. Olas de primer impacto y retorno. La Punta de la Lagarta.

Es en las afueras del abrigo Sur del Puerto de Arrecife, en las inmediaciones de la Punta La Lagarta donde contamos con uno de los recursos energéticos marinos más estables y abundantes.

Se trata de un emplazamiento en el que la ola que llega se encuentra con una masa de agua procedente del Muelle de los Mármoles.

El muelle de los Mármoles es un espigón que avanza unos 600 metros en la perpendicular a la línea de litoral, y que supone un obstáculo en la corriente de bajada de la marea y que en su extremo Este consigue proyectar la masa de agua en dirección a la Punta de la Lagarta.

Por tanto, en la Punta de la Lagarta se suma la masa de agua que viene del espigón del Puerto de los Mármoles con la ola natural y al que hay que añadir el efecto retorno de ola que ya ha impactado con la franja litoral.

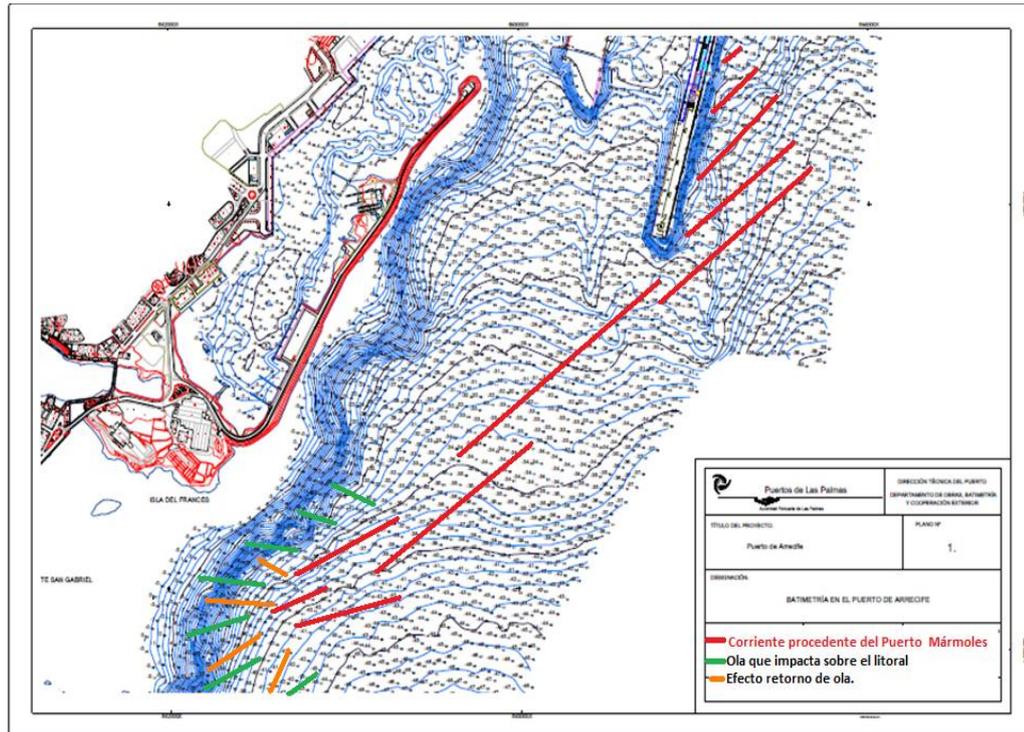


Imagen 90: localización de corrientes en el emplazamiento de Punta la Lagarta.

Fuente: Elaboración propia con plano batimétrico de Autoridad Portuaria del Puerto de Las Palmas.

El efecto que tiene esta coincidencia de olas y corrientes sobre la lámina de agua es el de un permanente “burbujeo” que aminora en los tramos de subida de marea y es más apreciable en las bajadas.

Estimación del recurso Ola de impacto y retorno.

Olas de tamaño mediano y corrientes enfrentadas unas 12-20 horas diarias.

- 7.2.4. Olas en el frente litoral.

El plano de zonificación que he elaborado para este proyecto señala con color rojo en la cara externa al Marina Lanzarote un área en el que el recurso a emplear es la ola que impacta en el litoral.

Como hemos visto en el apartado anterior el efecto generado por el muelle de los Mármoleos aguas abajo ayuda a incrementar el empuje de las olas en la secuencia de bajada de la marea, motivo por el que el recurso ola de litoral “sufrir” unas doce horas de distorsión al día y es “limpio” en la secuencia de crecida de la marea.

Como hemos señalado antes, este es un trabajo de estimación cualitativo del recurso en base a la cual realizaremos una prospección de generación de energía mediante el empleo de diversos convertidores.

Para este caso cabe señalar que he elegido una localización que en un futuro por concretar puede verse afectada por la construcción de un muelle de abrigo sobre el que no cuento con una información precisa y que como mal menor obligaría a “relocalizar” equipos.

Sobre el recurso Ola de litoral. La información que tenemos del recurso ola de litoral procede de dos trabajos uno realizado por el IDAE en 2011 y otro por la Universidad Politécnica de Cataluña (que me tocó coordinar en 2008), en ambos el recurso ola es escaso.

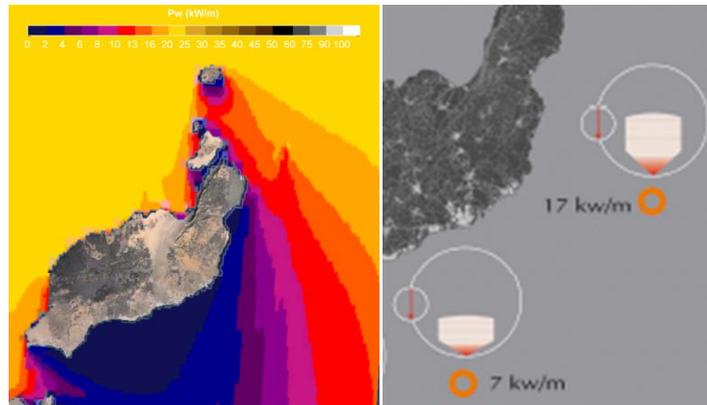


Imagen 91: Composición del Mapa de olas del Idae y Mapa de olas elaborado por el Cabildo de Lanzarote 2008.

Fuente: Elaboración propia

Estimación del recurso Ola de Litoral.

Se trata de una ola de entre 1 y 2 metros de tamaño con una frecuencia de doce segundos por ola (unos 2 millones de impactos anuales).

7.3. Criterios a tener en cuenta en la selección de equipos:

1. Reivindicación del artefacto flotante.
Dado que este es un Trabajo de Fin de Grado para la obtención del Grado en Ingeniería Marítima he preferido seleccionar equipos que en su secuencia de funcionamiento necesiten ir sumergidos semi-sumergido o flotantes.
2. Equipos de tamaño medio-pequeño por ser una zona con un recurso energético ola débil.
3. Localizaciones que no supongan una obstrucción para la navegación marítima. Los cuatro emplazamientos previstos ocupan porciones de la lámina de litoral en la que el tránsito de embarcaciones es prácticamente inexistente.
4. Equipos de fácil mantenimiento. Tal vez este es el aspecto que más ha pesado en la selección de equipos. He preferido el mantenimiento “en seco”, o con rotores accesibles, soluciones robustas, simples y que sean equipos que puedan hibernar en periodos de tormenta o fuerte adversidad meteorológica.
5. Impacto ambiental, se han elegido equipos desmontables cuya puesta en servicio no afecte al tránsito natural de la biota, en especial la opción tomada para el aprovechamiento del recurso corriente de marea habría sido más eficiente disponerla en el interior del túnel de desagüe pero esta mejora de rendimiento habría supuesto una obstrucción en el tránsito de las distintas especies, además de complicaciones en caso de obstrucción.
6. Generación sin ola. En el interior de la marina se localizan dos tipos de convertidores, una turbina Korlov y 50 equipos Drakoo, que han sido elegido por ser uno de giro lento (el sistema Korlov) y el segundo por ser un equipo cuyo principio de funcionamiento ayuda a absorber la ola de pequeño tamaño, lo que ayuda a mejorar la estabilidad de los barcos atracados en la marina.

7.4. Cuatro artefactos flotantes convertidores de energía marina para el Puerto Deportivo Marina Lanzarote:

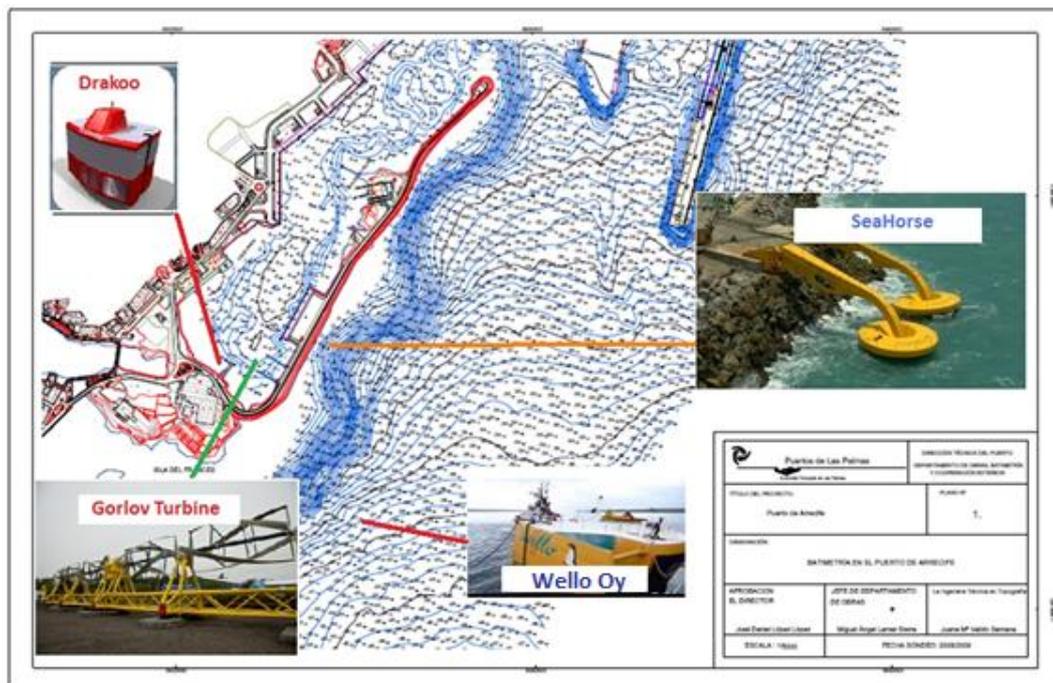


Imagen 92: Propuesta de localización de los equipos Drakoo, Gorlov, SeaHorse y Wello Oy en el Puerto Deportivo Marina Lanzarote

Fuente: Elaboración propia sobre plano batimétrico de la Autoridad Portuaria de Las Palmas.

- **7.4.1. Drakoo para electrificar pantalanes con la ola pequeña.**

Comentados en las páginas 136 y 137 de este Trabajo de Fin de Grado el sistema Drakoo es desarrollado en Singapur por la empresa Hann-Ocean-Energy y es operativo con un rango de ola que va desde los 30 cm a los 120 cm de altura.

Una solución en fase de desarrollo que espera iniciar su comercialización en 2017.

Por el momento el prototipo estrella es el denominado B0004SP que consiste en un módulo flotante de 2,88 x 3,0 x 2,39 que es capaz de generar una potencia nominal de 2,6 kWh.

Key Parameters	
Model No. B0004SP	Ver. 06/2012
Height	2.88 m
Width	3.00 m
Depth	2.39 m
Weight	2.97t
Draft	1.30 m
Freeboard	0.96m
Material	Mild Steel
Position Keeping	Attachable to floating platform or interconnected with Rigid Pontoon Connectors

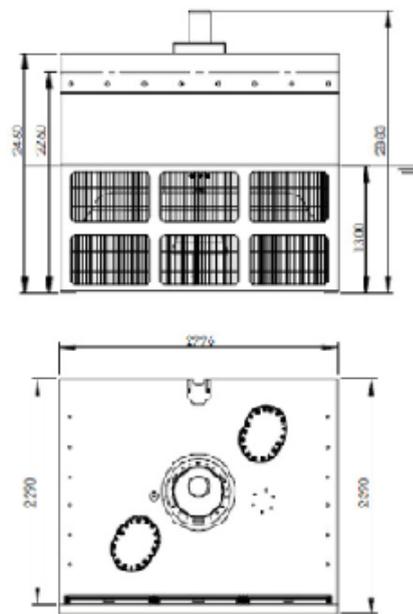


Imagen 93: Módulo Drakoo B0004SP y dimensiones.

Fuente: Hann-Ocean-Energy

Power Take-off System	
Model No. B0004SP	Ver. 06/2012
Power Take-off Driver	Kaplan Turbine
Electricity Generator	PMSG
Operational wave height	0.2 - 1.3m
Min. Wave Height and Period for Peak Output	0.9 m & 6 sec
Peak Output	4kW
Nominal Output	2.6kW
Output Voltage	100 - 400 Vac (3 phase)
Wave Absorption/Capture Efficiency (Peak)	> 80 %
Total efficiency (peak)	55%

Tabla 6: Dimensiones módulo Drakoo B0004SP

Fuente: Hann-Ocean-Energy

- Localización equipos en Marina Lanzarote.

Se propone instalar un total de 50 equipos, 30 en el borde Sur de la Marina y 20 en lado Norte del canal que conduce al túnel de desagüe.



Imagen 94: Simulación emplazamiento Drakoo.

Fuente: Elaboración propia

- **Estimación de generación según recurso**

Se pretende generar 100 kW de potencia Nominal para cubrir las demandas de consumo energético de:

- Iluminación de pantalanes
- Embarcaciones de 6 a 10 metros de eslora.

- **¿Qué hacer con su energía?**

Según el RD1837/2000 el concepto pantalán o plataforma flotante es considerado como artefacto flotante. Esta definición podría justificar el empleo de tramos de pantalanes alimentados con el sistema Drakoo como una embarcación con su propio sistema de iluminación y servicio de distribución de corriente.

Se trataría, por tanto, de una instalación autónoma que no comparte, no usa, servicios energéticos de tierra, más allá de una toma para la carga de baterías.

○ **Características de la instalación Drakoo.**

- Generadores + rectificadores + batería acumulación + inversor + contador de venta de energía en cada punto de toma.
- Diferencias con una instalación clásica.
 - Almacenamiento en baterías.
 - Ausencia de conexión eléctrica con la red de tierra.
 - Posibilidad de alimentar a embarcaciones con corriente continua directa (sólo embarcaciones que dispongan de regulador de entrada).

○ **Costes de generación del sistema Drakoo**

En una ponencia presentada por los promotores del sistema Drakoo en el World Future Energy Summit en Abu Dhabi (enero 2013), se aporta el dato en el que cada kWh producido con el sistema Drakoo tiene un coste de 0,06\$/kWh producido (**0,044€kWh**).

- **7.4.2. Sistema Gorlov para desalar agua con las corrientes de marea.**

La crecida y descenso de la marea genera, en el túnel de desagüe del puerto Marina Lanzarote, corrientes superficiales que oscilan los 1-3 m/seg.

Un dato que por sí mismo podría sugerir el emplazamiento de equipos de generación en el mismo túnel y que es descartado por suponer un obstáculo para el tránsito natural de biota y aguas de la marina.



Imagen 95: Turbina Gorlov horizontal.

Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Gorlov_helical_turbine

Para no obstaculizar la necesaria renovación de las aguas se ha elegido una turbina Gorlov en disposición horizontal (ver páginas 126 y 127 de este mismo trabajo), que consiste en un sistema modular, abierto, sumergido, fijado al fondo, de giro lento, fácil de mantener y desmontar.

○ **Localización del equipo Gorlov en la Marina Lanzarote.**

Coincide con la pasarela puente que conecta los pantalanes con el borde Sur de la Marina.

○ **Estimación de generación según recurso.**

Con la siguiente ecuación podemos calcular la energía cinética generada por las mareas.

$$K = \frac{1}{2} \rho \cdot u_0^3$$

Donde ρ es la densidad (normalmente 1024 kg/m^3 para el agua salada) y u es la velocidad de la corriente.

Una corriente que según el propio Gorlov puede ser aprovechada en un 35%.

○ **Las dimensiones del equipo.**

En el mercado no existe una solución que encaje con las características del emplazamiento previsto para el Marina Lanzarote.

Los datos obtenidos se han tomado del texto- tesis “**Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System**” proyecto de fin de Máster de Ingeniería Mecánica por la Universidad de Washington de Adam L. Niblick en el que se describe la turbina Gorlov en disposición vertical.

Así Niblick describe un módulo con un metro de diámetro y 2,5 metros de longitud (2,5 metros cuadrados de superficie de rotor), cuya salida de potencia atiende a la siguiente disposición.

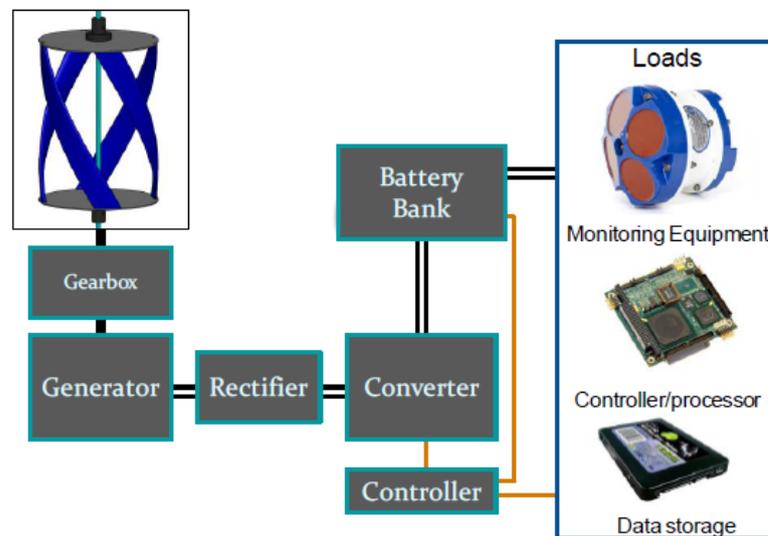


Imagen 96: Sistema de micro generación con turbina Gorlov.

Fuente: “**Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System**”. Adam L. Niblick. 2012.

Y en la que la producción de potencia es proporcional al flujo de corriente como podemos ver en la siguiente tabla:

Velocidad de la corriente de marea			Potencia de salida (en kW) según tamaño		
m/Seg	Feet/Seg	Nudos	1 x 2,5 (m)	2 x 5 (m)	3 x 7,5 (m)
1,5	4,9	2,9	1,48	5,92	13,32
2	6,6	3,9	3,50	14,00	31,50
2,5	8,2	4,9	7,84	27,36	61,56
3	9,8	5,8	11,81	47,24	6,29
3,5	11,5	6,8	18,76	75,04	168,84
4	13,1	7,8	28,00	112,0	252,0
4,5	14,8	8,7	39,87	159,48	358,83

Tabla 7: Comparativa de velocidad de corriente generación de potencia para distintos tamaños de módulos de Turbina Gorlov.

Fuente: <http://www.lucidenergy.com/>

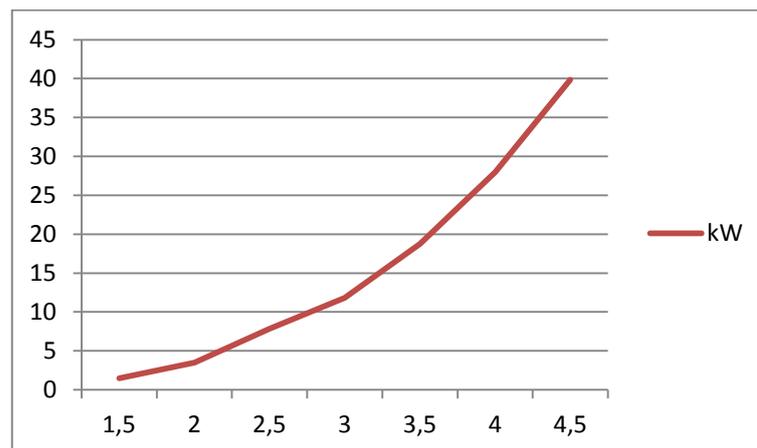


Imagen 97: Curva de potencia según velocidad de corriente de módulo turbina Gorlov de 1 metro de diámetro por 2,5 de largo.

Fuente: Elaboración propia con datos de la tabla anterior.

- **Número de equipos a instalar.**

15 módulos de 1 metro de diámetro por un largo de 2,5 metros con una capacidad de generación, según la disponibilidad de la corriente, de entre los 75 kW a los 450 kW.

- **Costes del sistema de generación Gorlov.**

En el trabajo desarrollado en junio de 2012 por el Intituto **Seasteading** denominado “Evaluation of Sustainable Energy Options for a Small City-on-the-Sea” firmado por Roth, Petrie y Willey. Se aporta un dato (p.19) que tomaremos para el desarrollo

de este trabajo, y es que la puesta en servicio de una turbina Helicoidal Gorlov alcanza los 1500\$/ kW(1100 €/kW).

Un dato que trasladado a los 15 módulos supone un coste aproximado de **82.500 euros**.

○ **¿Qué hacer con la energía captada por la Turbina Helicoidal Gorlov en el Puerto Marina Lanzarote?**

Desalar agua mediante el sistema de ósmosis inversa y que tiene un consumo energético que oscila los 2,5-4 kW/m³ agua desalada.

Este apartado lo desarrollo con datos obtenidos de una experiencia de desalación híbrida con aerogeneradores y sistema de generación térmico que desarrolló el Instituto Tecnológico de Canarias en el año 2000 con el que se trató de atender la demanda energética de una desaladora con una capacidad de producción de agua de 50 m³/día y un consumo eléctrico igual a 250 kWh/día (asumiéndose un gasto de 5,0 kWh^{elec} /m³ de agua producida).

Se obtiene que el sistema híbrido óptimo desde el punto de vista técnico-económico para estas condiciones sería el compuesto por: dos aerogeneradores, uno de 30 kW (FL30) y otro de 2,5 kW (WES5) de potencia nominal, un banco de 160 baterías (L16P), un convertidor (Conv.) de 15 kW y un generador (GEN) de 20 kW, el cual trabajaría alrededor de 592 horas al año y tendría un gasto de 2271 litros de combustible. El costo de la energía útil producida por el sistema (COE) sería de 0,378 \$/ kW. Para el cálculo se asume un precio del combustible igual a 0,8 \$/L.

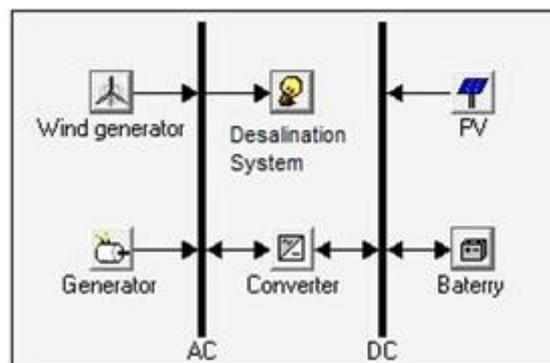


Imagen 98: Diagrama de sistema de desalación híbrida con energía eólica y generador.
Fuente: Proyecto de desalación con energía eólica desarrollado por el Instituto Tecnológico de Canarias y localizado en la dirección: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442011000100003&script=sci_arttext

- **7.4.3. Wello Oy para la fabricación de hielo de la Cofradía del Puerto de Arrecife.**

En las páginas 147,148 y 149 de este Trabajo, encontramos una síntesis del funcionamiento del sistema de masa rotante Wello Oy, un sistema que ha sido testado con diferentes condiciones de ola (hasta un tamaño máximo de 12 metros) en el punto de prueba de equipos de Billia Gro a cuatro kilómetros de Stromness , en las Islas Orcadas.

Y que he elegido por haber obtenido unos óptimos datos para olas de medio tamaño (2-3 metros), en los que se obtuvo un rango de potencia pico de entre 300kW y 700 kW, y una potencia nominal de entre los 160-180 kW.

○ **Localización equipos en Marina Lanzarote.**

Se propone instalar dos sistemas Wello Oy en la zona denominada Punta de la Lagarta (ver plano localización).

○ **Estimación de generación según recurso.**

Este apartado es puro supuesto, como hemos comentado en la descripción previa. El recurso a utilizar en esta disposición es el resultado de una combinación de la batimetría de la zona con las corrientes de marea, los vientos y los obstáculos no naturales que encuentran las aguas en su tránsito. A priori contrastando información con los responsables de Capitanía Marítima del Puerto de Arrecife, apuntan como dato estimado una ola de 1 metro de altura con una frecuencia mayor que la de ola de litoral (pero no determinada).

Esta estimación la he trasladado al técnico de Wello Oy Aki Luukkainen, responsable del análisis de datos del equipo que está en explotación en las Orcadas, nos ha remitido con cautela una cifra de potencia nominal de unos 100-150 kW por equipo.

○ **Número de equipos a instalar.**

Ha de entender el lector que estas cifras no son precisas, son sólo una primera aproximación. Se propone instalar dos equipos cuya

potencia total sea de 1,2 MW (de 0,6 MW por equipo) y que su potencia nominal para olas de 1-1,5m, alcanza el rango de los 200kW.

Para llegar a este dato me he puesto en contacto con el responsable de desarrollo del sistema Wello Oy en las instalaciones del EMEC de las Islas Orcadas, Aki Luukkainen, quien amablemente ha remitido un correo (que incorporamos a continuación), y que de forma, no oficial, valida el dato aproximado con el que trabajaremos en la cuenta de explotación que expondremos en el capítulo 6.5. de este TFG.

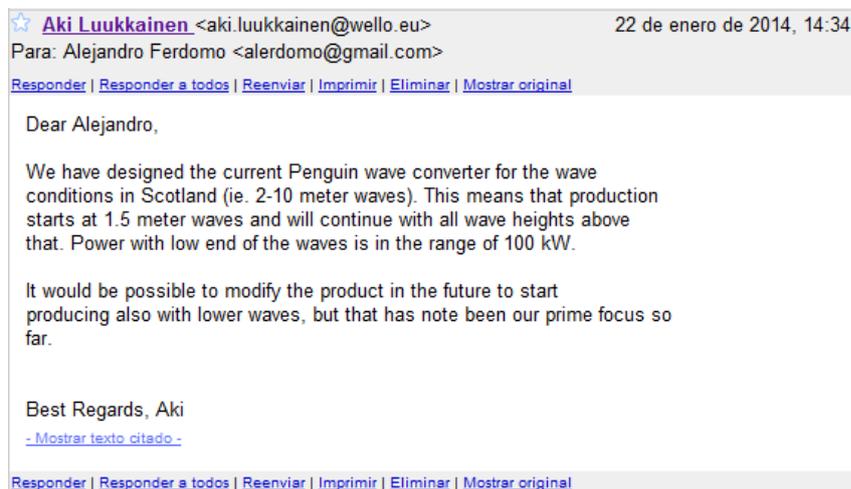


Imagen 99: Pantallazo de correo-e remitido por Aki Luukkainen, técnico responsable del desarrollo del sistema Wello Oy en las Islas Orcadas.

Fuente: Elaboración propia

o Costes de generación del equipo Wello Oy

Dado que el Wello Oy es un equipo que está en fase precomercial y que aún no ha generado datos solventes, he consultado un trabajo de la Comisión europea en el que profundiza sobre cuál es el estado del arte en el que se encuentran distintas tecnologías energéticas que pueden sustituir el empleo de combustibles fósiles, un texto titulado “**Energy technology developments beyond 2020 for the transition to a decarbonised European energy system by 2050**” con fecha junio 2013 con el que la Unión Europea apunta una estimación de cómo evolucionarán los costes €/kW instalado.

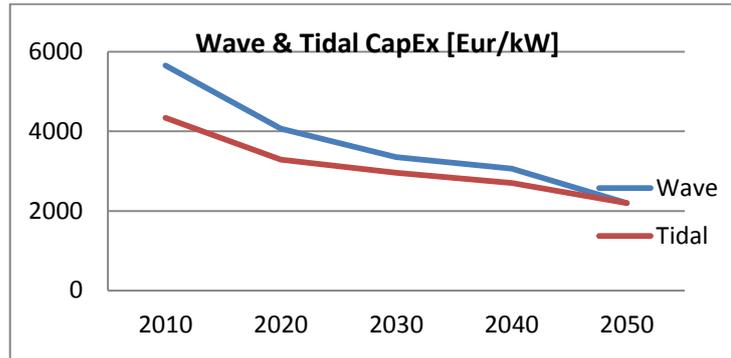


Imagen 100: Estimación de evolución del coste (€/kW) de puesta en servicio de sistemas de generación de energía marina.

Fuente: Energy technology developments beyond 2020 for the transition to a decarbonised European energy system by 2050. Comisión Europea 2013.

Una estimación de coste que aplicada al equipo Wello Oy supondría un coste para el año 2014 de unos 5.000 €/kW. Un dato estimado que nos lleva a hasta lo **3M€** por cada equipo Wello Oy, **6M€ en total**.

o **¿Qué hacer con su energía del Wello Oy?**

Producir hielo. Aunque esta sea una solución “de tierra“, que deja de ser competencia del Graduado en Ingeniería Marítima que desarrolla el equipo convertidor. La idea es transformar el pulso eléctrico en frigorías, activar los equipos compresores con el pulso eléctrico obtenido del empuje de la ola.

Dado que la generación de energía es fluctuante se hace necesario intercalar una etapa de baterías de almacenamiento en tierra que permita atender, de manera estable, la demanda requerida para la producción de hielo.

Para obtener un dato orientativo que ayude al lector he localizado información sobre las fábricas de hielo puestas en servicio por las distintas cofradías del país.

Un tipo de instalación que atiende al siguiente diagrama de flujo.

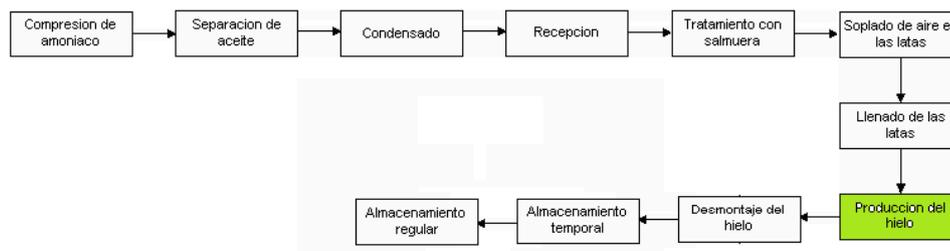


Imagen 101 : Diagrama de flujo de una fábrica de hielo.

Fuente: Elaboración propia con datos de varios autores.

La fabricación de hielo es una industria de servicio, lo que hace indispensable una estabilidad de suministro, circunstancia que ahonda en la necesidad de hibridar una capacidad de almacenamiento con la capacidad de generación.

En este trabajo de prospección se plantea poner en servicio dos equipos Wello Oy con una capacidad de generación máxima de 600 kW (por unidad y 1,2 MW en total). Un parque de generación para el que se presupone un dato base de 200 kW de capacidad de generación para olas de pequeño tamaño (y que está operativo una media de 16 horas al día).

Un dato meramente orientativo que necesariamente debe ser contrastado con ciclos de toma de medidas en el propio campo de olas por periodos superiores al año.

Entendiendo que nos adentramos en pura suposición, podemos entender que el parque de generación de equipos Wello Oy, atendería la demanda de una fábrica de hielo con un consumo de 200 kW de potencia eléctrica, un dato con el que según información aportada por la empresa Cofrico podría (con un consumo energético de 3,4 kWh/50kg a 7kWh/50kg) servir para generar un mínimo de 1.430 kg de hielo a la hora y por tanto, 34 toneladas/día.

Una producción que en caso de ser realizada con energía de la red implicaría un coste de 530 €/día (con una tarifa de 0,1154 €/kW(2014)), a la que habría que añadir los costes de mantenimiento y logística de la instalación, agua, freones, revisiones, etc.

No obstante, para definir un precio para el hielo a comercializar he consultado un trabajo publicado por el Observatorio del precio de los alimentos perteneciente al Ministerio de Ambiente Medio Litoral y Medio Marino que en noviembre de 2011 publicó el “Estudio de valor y formación de precios del pez espada”, en el que el precio del hielo que utiliza el armador es de 0.009 €/kg (en 2009), un dato muy similar al Precio Venta al Público de hielo en las cofradías de Puerto del Rosario y de Arrecife (0.012 €/kg en 2014).

Es en la tabla 9 del capítulo 6.5. de este Trabajo, dónde el lector podrá ver como se cruza el dato de la producción de hielo con su valor comercial (0.012€/kg).

- **7.4.4. SeaHorse para la dotación de aire comprimido en varadero.**

Descrito en la página 141 de este mismo trabajo.

- Localización equipos en Marina Lanzarote.

Se plantea instalar dos equipos en la cara exterior del muelle de abrigo (ver imagen localizaciones).

- Estimación de generación según recurso.

En el siguiente gráfico recupero una imagen del texto “Wave-to-wire model and energy storage analysis of an ocean wave energy hyperbaric converter”, un texto que elaborado por varios autores, trabaja datos reales tomados del convertidor SeaHorse.

En ellas vemos cómo en una secuencia de 180 segundos y con olas que casi no superan el metro de altura por encima y por debajo de la cota “cero” cual es:

- El volumen de aire que empujan.
- El flujo de aire que sale a la turbina.
- Y la potencia mecánica transmitida.

De estos datos el más determinante para este Trabajo de Fin de Grado es el flujo de aire que puede bombear el SeaHorse y la posibilidad de que dicho volumen de aire pueda ser almacenado en una cámara hiperbárica.

La fuerza que genera la ola la podemos calcular con la siguiente ecuación.

$$f_e t = F_e w \cdot \cos wt, \quad F_e w = A \frac{2p \cdot g^3 R_r(w)}{w^3}$$

Una ecuación que es válida para olas con frecuencia y amplitud estable.

Para olas irregulares se suele tomar la siguiente ecuación.

$$f_e(t) = \sum_{i=1}^N f_{e,i}(t)$$

Esta aproximación numérica a las olas reales está caracterizada por la altura de la ola un periodo pico

Finalmente el flujo de agua dentro del acumulador puede calcularse mediante la ecuación:

$$Q_{in}(t) = \begin{cases} 0, & v_n(t) > 0 \\ A_p v_n t & v_n(t) < 0 \end{cases}$$

Donde la velocidad para cada flotador es determinada por:

$$Q_i(t) = \sum_{n=1}^k Q_{int}(t)$$

La potencia de la ola incidente expresada en kW por metro de frente de ola es:

$$P_w = k_w H_w^2 T_w$$

Dónde H_w y T_w son respectivamente la altura y el periodo de la ola incidente.

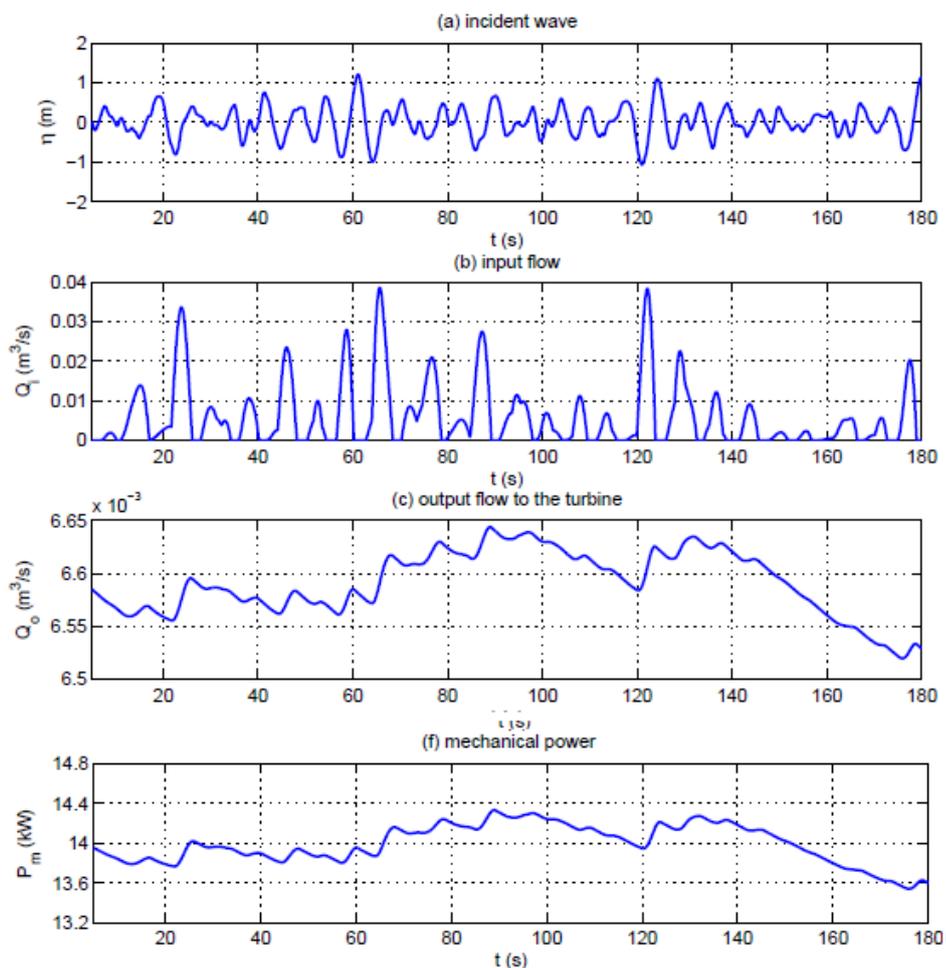


Imagen 102: Curvas de producción de aire comprimido y potencia del sistema SeaHorse.

Fuente: Wave-to-wire model and energy storage analysis of an ocean wave energy hyperbaric converter. Varios autores. 2008.

Cómo hemos visto en la página 141 de este mismo Trabajo el convertidor hiperbárico está compuesto por un sistema modular de bombeo, un acumulador hidroneumático, una cámara hiperbárica y la unidad de generación de energía eléctrica.

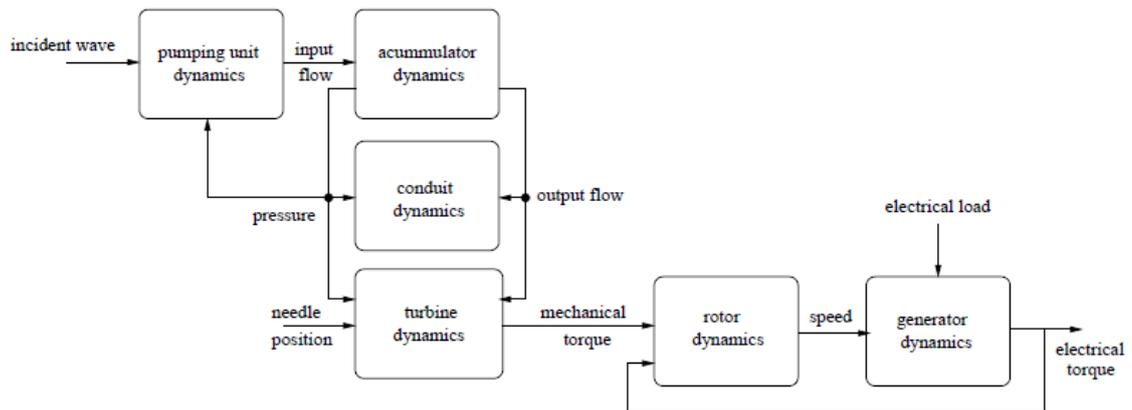


Imagen 103 : diagrama de Bloque del sistema de Power Take Off del Sea Horse

Fuente: Wave-to-wire model and energy storage analysis of an ocean wave energy hyperbaric converter

Para nuestra prospección no es necesaria la etapa de generación eléctrica puesto que nuestro objetivo es acumular aire comprimido para emplearlo en el varadero.

La sección interna del acumulador hidroneumático está compuesta por un lado en el que incide el agua dulce y un segundo volumen en el que se encuentra aire, separada ambas por un pistón, cuando el flujo de agua es mayor que el flujo de salida de aire, el pistón asciende y cuando el flujo de aire es mayor que el de agua el pistón desciende.

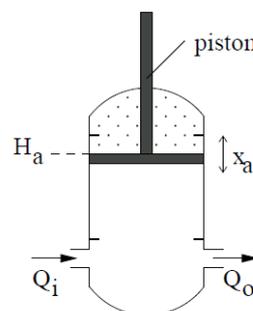


Imagen 104: Representación esquemática de un acumulador hidroneumático.

Fuente: Wave-to-wire model and energy storage analysis of an ocean wave energy hyperbaric converter

○ **Número de equipos a instalar.**

Dos. Conforme al gráfico dispuesto en la página 178 podemos estimar que cada flotador es capaz de mover 6.6 l/seg (un total de 13.2 l/seg), que suponen 43.92 m³/h y 1054 m³/d (que serviría para llenar un total de 351 botellas de 15 litros a 200 bares de presión).

○ **Los costes del sistema SeaHorse.**

Dado que la planta de Pecem es una planta piloto con 100 kW de capacidad de generación y que ha tenido un coste total de 7,1 millones de dólares (5,2 millones de euros). Y según estimaciones del equipo que desarrolla.

"We have a patent that includes several countries worldwide. We are interested in developing this topic and generating new business." According to the engineer, for generation at platforms in deep sea, the cost of electricity should be around 0.25 Brazilian reals (US\$ 0.15) per Kilowatt/hour (**0,11 €/kWh**). The energy that comes from the sea. Ament. Energia.2010.

○ **¿Cuánto cuesta producir aire comprimido?**

Para obtener el dato de que cantidad de energía (electricidad) ha consumido el compresor durante un tiempo determinado y la cantidad de aire comprimido que se ha entregado durante el mismo periodo. La cantidad de aire comprimido entregado se mide con un caudalímetro. Así se puede calcular la cantidad de kWh gastados para producir 1 Nm³/h de aire en el sistema en cuestión. En base al coste actual de 1 kWh del proveedor de electricidad, también se puede calcular el coste operativo de 1 Nm³/h de aire comprimido. Sin embargo, en este caso no se consideran los costes de inversión y mantenimiento del sistema de aire comprimido pertinente.

Los cálculos de costes operativos de este catálogo se basan en un compresor helicoidal que produce 6.080 l/minuto con una potencia de motor de 37 kW y un coste por kWh de aproximadamente 0,112 EUR. Esto significa 6.080 l/minuto x 60 minutos/h = 364,8 m³/h.

Por lo tanto, el gasto energético para producir 364,8 m³ es de 37 kWh, lo que significa $37 \text{ kWh} / 364,8 \text{ m}^3 = 0,101 \text{ kWh/m}^3$.

Entonces el coste es:

$$0,101 \text{ kWh/m}^3 \times 0,112 \text{ EUR} = 0,0113 \text{ EUR/m}^3.$$

Considerando que el 70% del coste total en un periodo de diez años corresponde a gasto eléctrico, el coste total será de **0,016 EUR por Nm³ producido**.

7.5. Prospección económica:

Este penúltimo capítulo es orientativo, en él se cruzan algunos números que hemos desglosado en el capítulo anterior, datos que ayudan a argumentar cuánto dinero pueden costar a día de hoy (febrero de 2014) los equipos escogidos, cuánto se puede ahorrar en la factura de la luz de la explotación portuaria gracias al empleo de equipos convertidores marinos, mientras que en la tercera tabla encontramos una estimación a la baja de los posibles ingresos por los servicios energéticos a prestar.

Dado lo conceptual que es esta prospección, el autor recomienda no utilizarlos sin una actualización previa, pues es más que posible que el paso del tiempo y los avances técnicos ayuden a disminuir el coste de puesta en servicio de equipos.

Cabe destacar que este trabajo es sólo una primera aproximación, faltan los costes de construcción y puesta en servicio de los equipos, mantenimiento, falta que los equipos alcancen su vida útil, que los desarrolladores encuentren el diseño más apropiado para cada condición y que la producción se estabilice.

Una vez aclarado, en la primera tabla, el lector tiene ocasión de comprobar una primera estimación de costes de producción y precio por kilowatio instalado.

Estimación de costes :

Equipo	Número equipos	Coste potencia a instalar (€)	Costes producción €/kWh
Wello Oy	2	6.000.000 €	No disponible
Drakoo	50	No disponible	0,044€/kWh
Turbina Helicoidal Gorlov	Cuerpo 15 módulos	82.500 €	No disponible
SeaHorse	2	No disponible	0,11 €/kWh

Tabla8: Estimación de costes instalación y costes por kWh producido.

Fuente: Elaboración propia con datos tomados del capítulo 6.4. del presente TFG.

Equipo	Número equipos	Potencia nominal kWh	Horas/día	Total de energía producida (kWh/día)	Energía producida Anual (MWh/año)	Ahorro en consumo electricidad (0,1154€/kWh) 2014
Wello Oy	2	200-300	18	3600	1.314	151.635,6€/año
Drakoo	50	100	10	1000	365	42.121,4€/año
Turbina Helicoidal Gor'lov	Cuerpo 15 módulos	75 a 450	16	1200	438	50.545,2 €/año
SeaHorse	2	28	20	560	204.4	23.356,96 €/año
				5360 kWh/día	2321,4MWh	267.889,56 €/año

Tabla 9: Estimación de generación y ahorro generado por la integración de sistemas renovables en el Puerto Deportivo Marina Lanzarote.

Fuente: Elaboración propia.

Estimación de ingreso por la producción de aire comprimido, agua desalada, hielo y venta de energía a pantalanes:

Equipo	Potencia nominal	Horas /día	Produc. hielo T/día (0,012€/kg)	Produc. Agua desalada m ³ /día (0,6 €/m ³)	Electricidad a pantalanes kWh/día ¹ (0,1154€/kWh-0,044€/kWh)	Produc. Aire Compr. m ³ /día (0,016€/m ³)	Previsión Ingresos €/año	Ahorro en consumo electricidad (11,54 c€/kWh) 2014	
Wello Oy	200 kWh	18h/d	(34 T/d) 408 €/d				148.920 €/a	151635,6€/a	
Drakoo	100 kWh	10h/d			71,4 €/d		26.061 €/a	42.121,4€/a	
Turbina Gorlov	75 kWh a 450 kWh	16 h/d		50m ³ / día 30 €/día			10.950 €/a	50545,2 €/a	
SeaHorse	28 kWh	20h/d				16,85€/d	6.155,36 €/a	23.356,96€/año	
							TOTAL	192.086 €/a	267889,56 €/a
							Total ahorro e ingresos	459.975 €/a	

Tabla 10 : Estimación de ingresos por venta de servicios energéticos en puerto y estimación de ahorro por no consumo de luz eléctrica al año.

Fuente:Elaboración propia con datos tomados del capítulo 6.4.

1 Costes venta de electricidad con del sistema Drakoo menos los costes de producción.

8. Conclusión

A lo largo de sus páginas el lector tiene la oportunidad de confirmar como de alguna manera la construcción naval, los artefactos navales han estado vinculados a la evolución de la historia del hombre. Desde los tiempos de Arquímedes, pasando por los molinos de agua, por George Claude, por Sidney Loeb, o por los técnicos del EMEC. El hombre ha intentado, de alguna manera, con la tecnología que tenía a su alcance, sacar algo de provecho de todo ese mar que tenía delante.

Con el primer tramo de este trabajo he tratado de hacer un extracto de todo ese esfuerzo poliédrico. Más allá de un repaso superficial, ha supuesto una oportunidad para aprender y reivindicar las claves de funcionamiento de los distintos procesos.

Con el segundo apartado he tratado de compartir con el lector una foto instantánea, de cómo es la normativa que afecta tanto a los sistemas energéticos como a los recintos portuarios.

Tal vez sea uno de los capítulos más complejos, más atrevidos y más necesarios del trabajo. Elaborado en colaboración con técnicos del Área de Energía del Cabildo de Lanzarote, técnicos de la Autoridad Portuaria del Puerto de Las Palmas y técnicos de la empresa Langlee Wave Power.

La “foto” obtenida ayuda a entender el complejo universo de la gestión de los recintos portuarios como el de la generación de energía eléctrica en régimen especial.

Así en este capítulo he tratado de convertir en cronograma de los procesos administrativos las notas que he ido tomando de que es lo que hay que hacer para asentar una actividad en el recinto portuario y de qué es lo que hay que hacer para poner en funcionamiento un sistema energético renovable marino.

Hay que destacar que en el apartado energético la normativa en vigor ha seguido un camino que es más complejo seguir cuando la tecnología no ha alcanzado su etapa madura, como es el caso de las renovables marinas.

Un escenario en el que hay que plantearse si es realmente necesario perseguir una tarifa energética. Si es el momento, por la propia competitividad de los procesos productivos de seguir dependiendo del vector electricidad para generar servicios.

La enorme subida de precios que ha tenido la tarifa de la luz invita a pensar que algunos procesos como la desalación de aguas, la generación de frío, los sistemas de bombeos de aguas fecales, la generación de aire comprimido pueden ser resueltos con convertidores energéticos renovables.

Así en el tercer bloque de este trabajo el lector tiene ocasión de ver una instantánea desde la perspectiva de cuáles pueden ser localizadas dentro o en las inmediaciones del los recintos portuarios de cómo es el Power Take Off de las distintas tecnologías.

Con este Trabajo de Fin de Grado reivindico la construcción naval como solución.

La idea es aprovechar el recurso marino en su vertiente ola y en su vertiente corriente de marea para generar en los puertos.

Con esta intención llegamos al último apartado en el que realiza una prospección de que equipos podrían ponerse en funcionamiento en el Puerto Deportivo Marina Lanzarote.

Una prospección para un puerto que cuenta con un recurso energético renovable medio-bajo y para el que se propone resolver los consumos de agua desalada, electrificación de pantalanes, producción de aire comprimido y fábrica de hielo.

Un esfuerzo de baja precisión que nos da una primera idea de que técnicamente es posible plantear soluciones que utilizando el empuje de las olas o las corrientes de marea se puede producir servicios que en la actualidad son generados con la electricidad que aporta la red. De que es viable sustituir la corriente eléctrica para producir de forma más competitiva servicios imprescindibles.

El incremento de población que se ha dado a lo largo de los últimos años en las áreas de litoral español, apunta a que es necesario empezar a prospectar sobre qué partes del consumo energético poblacional, frigorías de aire acondicionado, agua

desalada, bombeo de aguas fecales, etc., pueden ser resueltas con sistemas convertidores de energía marina.

Una línea de desarrollo en el que los espacios portuarios y las construcciones navales pueden ser protagonistas.

Bibliografía

Bibliografía.

1. *Arquímedes, alrededor del círculo* R.Torija Herrera Editorial Nivola, 1999.
2. *La energía que viene del mar.* Fernanda Miguélez Pose. Ed. Estudios Marítimos 2009.
3. *Energies Renovables Marines: implicació en el món actual i futur i fonts existents. Viabilitat de subministrament energètic d'un port català.* Autor: Denis Pons Fernández. 2011.
4. *Molinos de mar y estuarios Marinos.* Asociación cultural TAJAMAR. Ed. Litoral Atlántico 2005.
5. *Don Quijote de la Mancha.* Miguel de Cervantes Saavedra. 1605.
6. *Rebelión en la Granja.* George Orwell. 1945.
7. Andreas Slominski (Moulin Rouge). Sammlung Goetz. 2012
8. *El posible aprovechamiento de las corrientes marinas en Veracruz.* Camacho Barrradas José Miguel. 2011.
9. *El libro de las energías renovables,* Sociedad Anónima de Publicaciones Técnicas, Madrid 1991. Jacobo Friedrich
10. *Una aproximación al aprovechamiento de la Energía de las olas* Julia Fernández Chozas. 2008.
11. *Veinte mil leguas de viaje submarino (Vingt mille lieues sous les mers)* Julio Verne.1869.
12. *Document T0311. Potential Opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to wind energy.*IEA.OES. 2009.
13. *Pioneros españoles de las energías renovables.* Eduardo Lorenzo. Instituto de Energía Solar Universidad Politécnica de Madrid localizado en la página web <http://www.fotovoltaica.com/pioneros.pdf>
14. *The Analysis of Tidal Stream Power.* Jack Hadirsty. John Willey & Sons. 2009.
15. *Power System, Analysis & Design. 5ª Edición* J. Duncan Glover, Mulukutla S.Sarma y Thomas Overbye. Ed. Cengage 2012.

16. *Efficient Power Take Offs for Ocean Energy Conversion*. Varios autores. Icoe 2012.
17. *Conexión eléctrica desde el muelle al buque*. Revista ABB.4 2010
18. *Diseño y Simulación de una Máquina Eléctrica Lineal de Reluctancia Conmutada con un Programa Informático*. Proyecto fin de carrera David Gil Albalat. Mayo 2012.
19. *Electricity from Wave and Tide: An Introduction to Marine Energy* Escrito por Paul A. Lynn Ed Wiley 2014.
20. *Drakoo - The Highly Efficient and Cost-Effective Wave Energy Converter*.
21. *Ponencia en el World Future Energy Summit 15-17 de enero 2013*.
22. *Wave-to-wire model and energy storage analysis of an ocean wave energy hyperbaric converter*. Varios autores. 2008.
23. *Discrete Displacement Hydraulic Power Take-Off System for the Wavestar Wave Energy Converter* Rico H. Hansen 1,2,*, Morten M. Kramer 2 and Enrique Vidal. Agosto 2013.
24. *Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter* L. Cameron, R. Doherty, A. Henry, K. Doherty, J. Van 't Hoff, D. Kaye and D. Naylor, S. Bourdier, T. Whittaker. Aquamarine Power Ltd.2010
25. *Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System*. Adam L. Niblick. 2012.
26. *Conexión eléctrica desde el muelle al buque*. Revista Puertos. Nº 161. Diciembre 2011.
27. *Review of Marine Energy Technologies and Canada's R&D capacity*. Natural Resources Canada. Marine Energy Group. 2008.
28. *Interconexiones eléctricas submarinas*. Red Eléctrica. Juan Prieto Monterrubio. 2011.
29. *Survey and Characterization Tidal in Stream Energy Conversion (TISEC) Devices*. Roger Bedard. 2005.
30. *OCEANTEC: Sea Trials of a Quarter Scale Prototype*. F. Salcedo, P. Ruiz-Minguela, R. Rodriguez, P. Ricci and M. Santos. Tecnalia-Robotiker. 2009.

31. *Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System.* Adam L. Niblick. University of Washington. 2012.
32. *WAVE ENERGY UTILIZATION.* António F. O. Falcão. Università degli Studi di Firenze. 2012.
33. *OCEAN ENERGY: GLOBAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT STATUS. ANNEX I - Review, Exchange and Dissemination of Information on Ocean Energy Systems IEA-OES Document No.: T0104 March 2009.*
34. *Annual report 2012. Implementing agrrment on Ocean Energy Systems.* Brito e Melo and Dr. Huckerby.
35. *Diseño y Simulación de una Máquina Eléctrica Lineal de Reluctancia Conmutada con un Programa Informático.* Proyecto fin de carrera David Gil Albalat. Mayo 2012.
36. *Energías Renovables Marinas. Formato PPT.* Carlos J Renedo.
37. *Mini Centrales Hidroeléctricas Flotantes de Aprovechamiento Cinético.* Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Departamento de Tecnología Energética y Fluidomecánica. Norberto Cuenca Candel.
38. *ENERGÍA MAREMOTÉRMICA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.* Pedro Fernández Díez.
39. *Oregon Offshore Wave Power Demonstration Project.* Roger Bedard. 2005.
40. *State of the Art Analysis. Intelligent Energy Europe.* 2009.
41. *SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS.* Alba Vates Avilés. Proyecto Fin de Carrera. Università degli studi di Firenze. Facoltà di Ingegneria. 2009.
42. *Ocean Energy Technology Overview.* U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Federal Energy Management Program July 2009.
43. *Assessment of Performance of Wave Energy Conversion Systems.* Emec. 2009.

44. *Assessment of Performance of Tidal Energy Conversion Systems. Emec.2009.*
45. *Assessment of Wave Energy Resource. Emec. 2009.*
46. *Assessment of Tidal Energy Resource. Emec. 2009.*
47. *Guidelines for Health & Safety in the Marine Energy Industry. Emec.2009.*
48. *Guidelines for Marine Energy Certification Schemes. Emec 2009.*
49. *Guidelines for Design Basis of Marine Energy Conversion Systems. Emec.2009.*
50. *Guidelines for Reliability, Maintainability and Survivability of Marine Energy Conversion Systems. Emec. 2009.*
51. *Guidelines for Grid Connection of Marine Energy Conversion Systems. Emec.2009.*
52. *Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems. Emec. 2009.*
53. *Guidelines for Project Development in the Marine Energy Industry. Emec. 2009.*
54. *Guidelines for Manufacturing, Assembly and Testing of Marine Energy Conversion Systems. Emec. 2009.*
55. *The energy that comes from the sea. Mark Ament.Energia.2010.*
56. *Energy technology developments beyond 2020 for the transition to a decarbonised European energy system by 2050. Documento para su discusión en Comisión Europea. Mayo 2013.*

Fuentes consultadas en Internet

<http://www.marinelink.com/maritime/PORT-OF-LOS-ANGELES>

<http://www.abb.com/industries/ap>

<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php> 8 de febrero 2013

<http://www.emec.uk>

<http://es.libros.redsauce.net>

<http://www.youtube.com/watch?v=lnHwb8BKJzU>

<http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/mar/PDFs/01Olas.pdf>

<http://www4.rgu.ac.uk>

<http://www.enola.ihcantabria.com>

<http://www.tecnalia.info>

<http://es.libros.redsauce.net>

<http://ecofactory.blogspot.com.es/2008/02/otec-energia-termica-oceanica.html>

<http://www.eve.es/Proyectos-energeticos/Proyectos-en-desarrollo/bimep/Sobre-bimep.aspx>

<http://www.idae.es>

<http://www.elpais.com>

<http://bimep.com/sobre-bimep/localizacion-de-bimep/>

http://en.wikipedia.org/wiki/Gorlov_helical_turbine

<http://www.ipaustralia.com.au/applicant/wello-oy/patents/AU2009295772/>

<http://www.pelamiswave.com/pelamis-technology>

<http://www.palmasport.es/00000/paginas/html/default.htm>

<http://lavozdelanzarote.com>

<http://www.tablademareas.com/es/islas-canarias/arrecife-lanzarote>

http://en.wikipedia.org/wiki/Gorlov_helical_turbine

<http://www.lucidenergy.com/>

http://www.magrama.gob.es/es/alimentacion/servicios/observatorio-de-precios-de-los-alimentos/Estudio_Pez_Espada_tcm7-189670.pdf

<http://seasteading.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2012/06/Seasteading-Energy-Study-Roth.pdf>

<http://www.nrel.gov/otec> National Renewable Energy Laboratories, Department of Energy, USA.

Índice de imágenes

Imagen 1: Infografía Puerto de California.....	7
Imagen 2: Dispersión de la contaminación atmosférica generada por las embarcaciones.....	7
Imagen 3: Puerto de Stromness (Islas Orcadas, Escocia).....	11
Imagen 4: Localización del punto de volcado a red más próximo a Stromnes.....	12
Imagen 5: Composición con los inventos de Arquímedes más conocidos.....	13
Imagen 6: Composición de convertidores marinos que usan soluciones inventadas por Arquímedes.....	14
Imagen 7: Marea Viva o Equinoccial.....	16
Imagen 8: Marea Muerta o de Cuadratura.....	16
Imagen 9: Localizaciones con mayor amplitud de marea del planeta.....	17
Imagen 10: Distribución del recurso energético de la marea en el litoral de la Unión Europea.....	17
Imagen 11: Distribución de Molinos de Marea por el litoral Europeo.....	20
Imagen 12: Secuencia histórica de los molinos más antiguos.....	21
Imagen 13: Diferentes disposiciones de ruedas de molino de marea.....	21
Imagen 14: Detalle Organización territorial en base a la actividad productiva.....	23
Imagen 15: Planta general e hidráulica del Molino de Santa Olaja.....	28
Imagen 16: El ciclo de la marea y el ciclo de funcionamiento de un sistema captador de marea de efecto simple.....	29
Imagen 17: Mosaico de instalaciones maremotrices de Sihwa y La Rance.....	30
Imagen 18: Composición vistas de sistemas de generación con energía de las mareas.....	33
Imagen 19: Energías cinética y potencial de la ola.....	35
Imagen 20: Origen de la energía de las olas.....	35
Imagen 21: Distribución del tamaño medio de las olas por el globo terráqueo.....	37
Imagen 22: Vista del plano de potencial de la energía de las olas generado por el Idae.....	37
Imagen 23: Evolución histórica de los primeros convertidores de energías de las olas.....	40

Imagen 24: Sistemas Off-shore Flotantes.....	41
Imagen 25: Clasificación de convertidores de olas según el principio de captación.....	41
Imagen 26: Mosaico de gráficos de sistemas convertidores de olas.....	42
Imagen 27: Disposición Esquemática de una Central C.E.T.O.....	42
Imagen 28: Esquema conceptual de una central maremotérmica de ciclo abierto.....	45
Imagen 29: Esquema conceptual de una central maremotérmica de ciclo cerrado.....	45
Imagen 30: Diferencia de temperatura entre la capa superficial del mar y los 1000 metros de profundidad.....	47
Imagen 31: Evolución histórica de los sistemas maremotérmicos.....	49
Imagen 32: Representación del proceso (PRO).....	54
Imagen33: Esquema proceso PRO.....	54
Imagen34: Esquema proceso EDI.....	55
Imagen 35: Incremento interanual del precio de la electricidad para consumidores industriales.....	61
Imagen 36: Comparativa de tarifas reguladas por el RD661/2007.....	63
Imagen 37: Procedimiento a seguir para la Puesta en marcha de una planta de generación con fuentes renovables marinas.....	64
Imagen 38: Procedimientos seguidos por el Ente Vasco de la Energía para poner en marcha las instalaciones del BIMEP.....	64
Imagen 39: Pantallazo que comunica la suspensión temporal de primas a instalaciones de generación en régimen especial.....	66
Imagen 40: Incremento interanual del precio de la electricidad para consumidores industriales.....	68
Imagen 41 : Composición de la tarifa.....	68
Imagen 42: Secuencia jerárquica de los distintos planes que rigen la gestión de los espacios portuarios.....	75
Imagen 43: Secuencia para la obtención de una AUTORIZACIÓN para el uso del espacio portuario (con carácter personal e intransferible(art.80)).....	77
Imagen 44: Secuencia para la obtención de una Concesión para el uso del espacio portuario.....	78

Imagen 45: Disposición general de la instalación Bimep, así como el trazado del cable y las áreas destinadas al fondeo de los dispositivos captadores de energías marinas.	84
Imagen 46: Componentes de instalación de generación marina.....	85
Imagen 47: Comparativa de costes de las distintas etapas de un proyecto eólico en tierra y uno en mar	86
Imagen 48: Esquema guías Emec.....	91
Imagen 49: Coste del cableado de AC vs CC y eficiencia de transmisión.....	95
Imagen50: Ejemplo de generación en corriente alterna.....	95
Imagen51: Transporte en corriente continua.....	96
Imagen52: Esquema de generador de inducción con jaula de ardilla.....	97
Imagen53: Generador inducido conectado directamente al transformador.....	97
Imagen 54: Generador asíncrono con inducción doble.....	98
Imagen 55: Generador Tipo 4.....	98
Imagen 56: Generador Síncrono.....	99
Imagen 57: Curva de producción de energía estimada en la propuesta planteada por Hardisty.....	102
Imagen 58: Curvas de tensión con o sin generación adicional.....	112
Imagen 59: Variaciones de baja frecuencia y posibles fluctuaciones en la red producidas por un convertidor de energía marina.....	113
Imagen 60: Power Take Off de turbina horizontal de flujo axial.....	120
Imagen 61: Power Take Off hidráulico de turbina horizontal.....	121
Imagen 62: Power Take Off con reductora.....	121
Imagen 63: Detalle de instalación de una turbine Gorlov horizontal en Korea del Sur.....	123
Imagen 64: Power Take Off de turbina horizontal con flujo canalizado.....	123
Imagen 65: Power Take Off de turbina vertical.....	125
Imagen 66: disposición del Power Take Off de un sistema de columna oscilante.....	132
Imagen 67: Secuencia de funcionamiento del sistema Drakoo.....	133
Imagen 68: Disposición interna y vista exterior del sistema ENERGETECH.....	134

Imagen 69: Distintas disposiciones de convertidores de energía con PowerTake Off Hidráulico.....	135
Imagen 70: Power Take Off hidráulico del convertidor Pelamis.....	135
Imagen 71: Power Take Off del convertidor Pendulor	136
Imagen 72: Power Take Off del convertidor Seahorse, Brasil Pecem.....	137
Imagen73: Power Take Off Hidráulico del sistema Wavestar.....	139
Imagen 74 Power Take Off de Reluctancia conmutada.....	140
Imagen 75: Power Take Off del convertidor Wedge.....	141
Imagen 76: Disposición del sistema Wello Oy.....	143
Imagen 77:Diagrama de bloques del sistema Wello Oy.....	143
Imagen 78: Disposición interna e imágenes exteriores del sistema Wello Oy...	145
Imagen79: Componentes y movimiento relativo del sistema AWS.....	146
Imagen 80: Disposición del Convertidor Oyster Aquamarine.....	147
Imagen 81: Power Take Off del Pelamis.....	149
Imagen 82: Combinación de imágenes del Power Take Off y disposición del convertidor Wave Dragon.....	150
Imagen 83: Localización del Puerto Deportivo Marina Lanzarote.....	153
Imagen 84: Batimetría Puerto de Arrecife.....	154
Imagen 85: Infográfico Puerto Deportivo Marina Lanzarote.....	154
Imagen 86: zonificación del recinto Portuario según tipo de recurso energético marino.	156
Imagen 87: Localización del túnel de desagüe del Puerto Marina Lanzarote.....	157
Imagen 88: Predicción de mareas para el Puerto de Arrecife enero de 2014.....	157
Imagen 89: Mapa eólico de Lanzarote con vista en detalle del municipio de Arrecife.	159
Imagen 90: localización de corrientes en el emplazamiento de Punta la Lagarta....	160
Imagen 91: Composición del Mapa de olas del Idae y Mapa de olas elaborado por el Cabildo de Lanzarote 2008.....	161
Imagen 92: Propuesta de localización de los equipos Drakoo, Gorlov, SeaHorse y Wello Oy en el Puerto Deportivo Marina Lanzarote.....	163

Imagen 93: Módulo Drakoo B0004SP y dimensiones.....	164
Imagen 94: Simulación emplazamiento Drakoo.....	164
Imagen 95: Turbina Gorlov horizontal.....	165
Imagen 96: Sistema de micro generación con turbina Gorlov.....	167
Imagen 97: Curva de potencia según velocidad de corriente de módulo turbina Gorlov de 1 metro de diámetro por 2,5 de largo.....	168
Imagen 98: Diagrama de sistema de desalación híbrido con energía eólica y generador.....	169
Imagen 99: Pantallazo de correo-e remitido por Aki Luukkainen, técnico responsable del desarrollo del sistema Wello Oy en las Islas Orcadas.....	172
Imagen 100: Estimación de evolución del coste (€/kW) de puesta en servicio de sistemas de generación de energía marina.....	173
Imagen 101 : Diagrama de flujo de una fábrica de hielo.....	173
Imagen 102: Curvas de producción de aire comprimido y potencia del sistema SeaHorse.	176
Imagen 103 : diagrama de Bloque del sistema de Power Takeoff del Sea Horse	177
Imagen 104: Representación esquemática de un acumulador hidroneumático.....	177

Índice de Tablas

Tabla 1: Sistemas de barreras de mayor tamaño.....	31
Tabla 2: Objetivos 2010, 2015 y 2020 del Plan de energías renovables en el sector eléctrico (potencia instalada, generación bruta sin normalizar y generación bruta normalizada).....	69
Tabla 3: Memoria ambiental 2012 autoridad Portuaria del Puerto de Las Palmas.....	71
Tabla 4: Localización de sistemas de generación Tidal propuesta por Hardisty.....	101
Tabla 5: Tipos de armónicos y causa que lo produce.....	114
Tabla 6: Dimensiones módulo Drakoo B0004SP.....	164
Tabla 7: Comparativa de velocidad de corriente generación de potencia para distintos tamaños de módulos de Turbina Gorlov.....	169
Tabla 8: Estimación de costes instalación y costes por kWh producido.....	180
Tabla 9: Estimación de generación y ahorro generado por la integración de sistemas renovables en el Puerto Deportivo Marina Lanzarote.....	181
Tabla 10: Estimación de ingresos por venta de servicios energéticos en el puerto y estimación de ahorro no consumo de corriente eléctrica al año.....	182

Índice de códigos QR

Molino de Santa Olaja

<http://www.eldiariomontanes.es/videos/cantabria/cantabria-general/2346962266001-santa-olaja-molino-mareas-marismas-joyel.htm>.....22

Proyecto Sihwa Tidal Power de energía mareomotriz con barreras de doble efecto.

<http://www.youtube.com/watch?v=lnHwb8BKJzU>.....29

Acceso a página desarrolladores de sistemas convertidores de olas de la página del emec

<http://www.emec.uk.org>).....40

Los inventos de George Claude

<http://www.otecnews.org/2013/01/georges-claude-the-genius-gone-astray/>.....48

Funcionamiento de la planta de PRO de Statkraft

<http://www.youtube.com/watch?v=Oc5bXa5PcWo>.....55

Funcionamiento del sistema de generación EDI Blue Energy

<http://www.youtube.com/watch?v=opLU5AsBoFc>.....56

Acceso directo al document “Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to energy” de Powertech Lab.

<http://www.calameo.com/books/000672419693949819baa>.....91

Vista del funcionamiento del SeaGen	
http://www.youtube.com/watch?v=Fiw-RxNdYTQLatu	121
Vista del funcionamiento del sistema CleanCurrent	
http://www.cleancurrent.com/video	124
Vista del sistema EXIM de la empresa SeaPower	
http://www.seapower.se/login.aspx?ReturnUrl=%2fDefault.aspx	125
Vista del sistema Blue energy company	
http://peswiki.com/index.php/Directory:Blue_Energy	126
Vista del sistema de turbina de flujo cruzado de Neptune Renewable Energy	
http://www.youtube.com/watch?v=E5DgfYfpk5c	127
Vista del funcionamiento de un sistema de columna oscilante	
http://www.youtube.com/watch?v=7m1QrqPtQ8Q	132
Vista del funcionamiento del sistema Drakoo	
http://www.youtube.com/watch?v=jNOK5MiSdf0	133
Vista del funcionamiento ENERGETECH	
http://www.oceanlinx.com/news/video-news	134
Vista del funcionamiento del convertidor OWC Pendulor	
http://www.youtube.com/watch?v=scxg6rbovy0	136
Vista del funcionamiento del convertidor SeaHorse	
http://www.youtube.com/watch?v=7BhslJPe7Hw	137
Vista del funcionamiento del convertidor ecowave	
http://www.ecowavepower.com/category/video/	138
Vista del funcionamiento del convertidor Wavestar	
http://www.youtube.com/watch?v=-Irte-VJ1x4	139

Vista del funcionamiento del sistema Wedge

<http://www.wedgeglobal.com/en/waveenergy>.....141

Vista del funcionamiento del sistema OPT

<http://www.youtube.com/watch?v=EsRzTI6Q24E>.....142

Vista del funcionamiento del sistema Wello Oy

<http://www.wello.eu/penguin.php>.....145

Vista del funcionamiento del sistema AWS

<http://www.youtube.com/watch?v=hip6lu-q6FA>.....147

Vista del funcionamiento del sistema Oyster

<http://www.youtube.com/watch?v=VYmyCGM1tGk>.....148

Vista del funcionamiento del sistema Pelamis

<http://www.youtube.com/watch?v=S2EtwMjMW6A>.....149

Vista del funcionamiento del sistema Wave Dragon

http://www.youtube.com/watch?v=rgtk_Fsr0No.....151

Video olas en el Puerto Deportivo Marina Lanzarote

http://www.youtube.com/watch?v=kaGISZixw-4&feature=em-share_video_user
.....158