

La energía renovable procedente de las olas

*****Modesto Amundarain Ormaza

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, UPV/EHU, molty.amundarain@ehu.es

Laburpena: Energia berriztagarriak XXI. mendearen lehen urteetan ingurumen, gizarte eta helburu ekonomiko garrantzitsuak lortzera lagunduko dute. Artikulu honetan itsasoko olatuen energia berriztagarria eraldatzeko teknologia desberdinak aurkezten dira. Bereziki, OWC (Oscillating Water Column) teknologia deskribatzen da, bere funtzionamendua, egitura, arazoak eta kontrol-estrategiak azalduz.

Resumen: Las energías renovables ayudarán a alcanzar importantes objetivos económicos, ambientales y sociales en las primeras décadas del siglo XXI. En este artículo se presentan distintas tecnologías para extraer energía renovable a partir de las olas del mar. En particular se describe la tecnología OWC (Oscillating Water Column), explicando su funcionamiento, estructura, las problemáticas que plantea y propuestas de estrategias de control para solucionarlas.

1. Introducción

La segunda década del siglo XXI ha comenzado sumergida en una profunda crisis económica, en particular en los países pertenecientes a la Unión Europea. Por otra parte, la sociedad ha de mentalizarse que es ineludible acometer cambios en el marco energético actual, con la intención de caminar hacia un sistema energético sostenible. Ha llegado el momento de apostar por las energías renovables para lograr atenuar el “temido” cambio climático y a la vez activar la recuperación económica. De hecho, las fuentes energéticas renovables crean mayor número de puestos de trabajo por KW producido que otras fuentes de energía de origen fósil. En este sentido, las energías renovables, tanto eólica como solar, gozan de una importante presencia, mientras que otras, como por ejemplo las provenientes del mar, tienen un futuro prometedor. El mar ocupa más de un 70% de la superficie terrestre y contiene una enorme cantidad de energía en sus diferentes formas, la cual es perfectamente aprovechable. Dentro de las energías renovables que el mar nos ofrece cabe destacar el aprovechamiento de la energía de las olas, denominada energía olamotriz o undimotriz.

En Euskadi ya se han dado los primeros pasos para impulsar la energía procedente de las olas, con la cual se podría abastecer el 10% del consumo eléctrico vasco. En Julio de 2011, el EVE (Ente Vasco de Energía), agencia energética perteneciente al Gobierno Vasco, ha puesto en marcha en Mutriku la primera planta en el mundo que utiliza múltiples turbinas basadas en la tecnología OWC.

El artículo está estructurado de la siguiente forma: En el apartado 2 se describen diversas energías renovables procedentes del mar. Algunos conceptos sobre la energía olamotriz y los distintos convertidores de esta energía son presentados en las secciones 3 y 4 respectivamente. En los apartados 5 y 6 se explica el sistema OWC implementado. Para finalizar, se exponen algunas conclusiones.

Para hacer referencia de este artículo:

Amundarain, M. (2012). La energía renovable procedente de las olas. *Ikastorratza*. e-Revista de Didáctica 8, Retrieved 2012/02/25 from http://www.ehu.es/ikastorratza/8_alea/energia/energia.pdf (ISSN: 1988-5911)

2. Energías renovables procedentes del mar

Las energías renovables provenientes del mar se deben a la influencia de la radiación solar y de los campos gravitatorios solar, terrestre y lunar sobre los océanos. Si se comparan con el resto de las energías renovables, las investigaciones y los proyectos para conseguir energía procedente del mar se encuentran en una fase inicial, sin embargo su potencial es muy alto. Entre las posibles fuentes de energía procedentes del mar podemos encontrar:

- **Gradiente salino:** La diferencia de salinidad entre el agua de océanos y ríos se mantiene, esencialmente, por evaporación del agua de los océanos y por la lluvia recibida por los ríos. En estas zonas puede obtenerse energía debido a las diferencias de presión osmótica.
- **Corrientes marinas:** Es el caso de las turbinas marinas, cuyo funcionamiento es similar a un aerogenerador eólico, con la diferencia que, en este caso, es el flujo de corriente marina el que hace girar al rotor. Para que esto se produzca es necesaria una velocidad superior a 5 nudos.
- **Mareomotriz:** Se basa en el aprovechamiento de la energía liberada por el agua del mar en sus movimientos de ascenso y descenso de las mareas.
- **Térmica oceánica:** Se obtiene a partir de la diferencia de temperaturas entre la superficie y las profundidades del mar. Para el aprovechamiento de esta energía es necesaria, al menos, una diferencia de temperatura de 20°C.
- **Vientos oceánicos:** En algunas zonas oceánicas los vientos pueden generar de 500 a 800 vatios de energía por metro cuadrado. Por ello, los parques eólicos marinos se convertirán en una importante fuente de energía renovable en un futuro próximo. Se espera que, para finales de esta década, se instalen en los mares europeos parques eólicos con una capacidad total de miles de megavatios.
- **Biomasa marina:** Los microbios constituyen hasta el 90% de la biomasa marina, la cual contiene una ingente cantidad de energía para la producción de biocombustibles. De hecho, la masa de los microbios presente en los océanos equivale a 240.000 millones de elefantes africanos.
- **Olamotriz:** Las olas se forman en el mar, entre otras causas, por la acción del viento, el cual, al soplar origina olas que alcanzan gran tamaño y, por el impulso del viento, corren sobre la superficie marina a gran velocidad descargando toda su potencia sobre los obstáculos que encuentran en su camino.

Se ha estimado un potencial teórico de energía oceánica superior a 100.000 TWh/año (como referencia, el consumo de electricidad en el mundo ronda los 16.000 TWh/año). Con la tecnología actual se estiman 45.000 TWh/año para la energía de las olas, 2.200 TWh/año para la procedente de las mareas, 20.000 TWh/año para las provenientes del gradiente salino y 33.000 TWh/año para la térmica oceánica (EREC, 2010).

3. Energía olamotriz

A continuación se definen una serie de parámetros relativos a las olas, algunos de los cuales quedan también reflejados gráficamente en la figura 1.

SWL Nivel del mar sobre el cual se mide la elevación de la ola, Still Water Level.

L, T_w Longitud de onda y periodo de la ola.

h, H Profundidad del fondo marino con respecto al SWL y altura de la ola.

η Oscilación de la superficie libre o elevación de la ola respecto al SWL.

C_g, C Velocidad del frente de ola y velocidad de la ola.

Una fracción de la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra se invierte en un calentamiento desigual de la misma, lo que provoca en la atmósfera zonas de altas y bajas presiones, generando desplazamientos del aire en forma de viento. La intensidad del oleaje depende de la intensidad del viento, de su duración y de la longitud sobre la cual éste transmite energía a la ola. A pesar de no considerar las olas con periodos más pequeños o grandes que las formadas por el oleaje del viento, 2 a 30 segundos, la descripción matemática de las olas es un tema complicado de abordar. Con la finalidad de describir la dinámica de la ola, se han desarrollado una serie de teorías con diferente grado de complejidad: Airy, Stokes, Cnoidal y ola solitaria. La primera y más simple descripción, atribuida a Airy en 1845, es suficientemente precisa para muchos y variados propósitos en ingeniería (Chadwick, Morfett & Borthwick, 2004).

Como sucede con otros recursos renovables, la energía de las olas está distribuida de forma dispar, como puede observarse en la figura 2, resultando ser las regiones con mayor actividad del oleaje, aquellas que se localizan entre los 30° y 60° de latitud en ambos hemisferios, donde prevalecen los vientos del oeste. El recurso energético de Europa es uno de los más importantes, sólo superado en algunos lugares de América del Sur y de las Antípodas. La capacidad energética varía entre los 20 KW/m de la región más al sur de Europa, las Islas Canarias, y los 75 KW/m en Irlanda y Escocia. El país dominante en lo concerniente a esta energía es el Reino Unido. Le siguen, aunque a cierta distancia, Portugal, España y Dinamarca (Westwood, 2004).

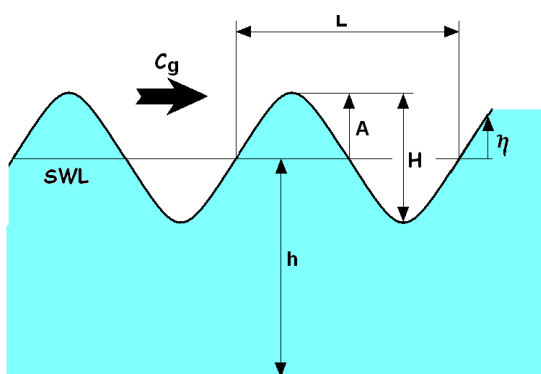


Fig. 1. Parámetros de una ola.

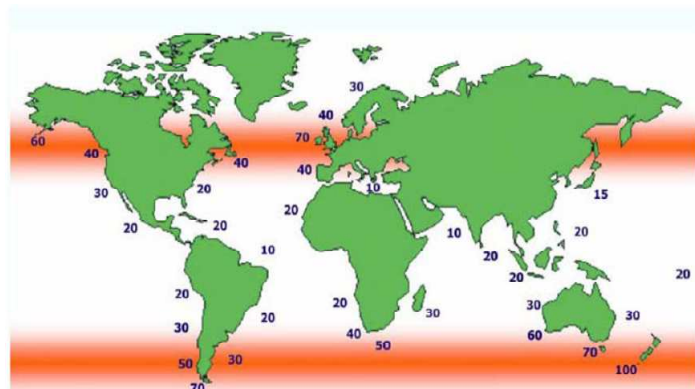


Fig. 2. Distribución mundial media en KW/m.

4. Dispositivos convertidores de energía olamotriz

Existe una amplia variedad de dispositivos que, utilizando diferentes tecnologías, convierten la energía procedente de las olas en electricidad. En Polinder & Scuotto (2005) y, actualizada, en Falcão, (2010) se analizan diferentes tecnologías y convertidores de energía de las olas.

Los sistemas que se emplean actualmente para extraer energía de las olas son (Creus, 2004):

- **Flotadores:** Anclados en el fondo o unidos a una masa sumergida.
- **Depósitos:** Almacenan agua aprovechando la energía cinética de las olas que vuelve al mar tras pasar por una turbina.
- **Balsas o pontones:** Aprovechan el movimiento relativo con el oleaje.
- **Neumáticos:** Las olas comprimen y descomprimen un flujo de aire que mueve una turbina, como es el caso del OWC.
- **Dispositivos móviles articulados:** Se mueven con las olas actuando sobre un generador hidráulico.

Estos sistemas se pueden clasificar atendiendo a diversos factores, destacando la clasificación en función de principio de funcionamiento o tecnología utilizada. Las diferentes tecnologías utilizadas para la energía de las olas, así como los convertidores más importantes que utilizan dichas tecnologías se presentan en la figura 3 (Falcão, 2010). Utilizando esta clasificación tenemos:

✓ Dispositivos de columna de agua oscilante

Están considerados como una de las mejores técnicas para convertir la energía de las olas en electricidad. Serán descritos en apartados posteriores.

✓ Dispositivos oscilantes

Proporcionan un movimiento de oscilación vertical y/o de rotación que es convertido por un sistema hidráulico o mecánico en un movimiento lineal o rotativo, que a su vez mueve un generador eléctrico. Dentro de los dispositivos oscilantes podemos distinguir los flotantes y los sumergidos.

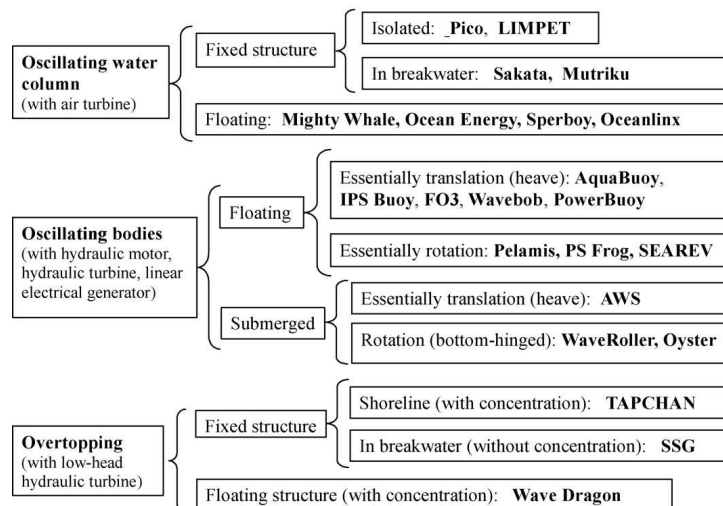


Fig. 3. Diferentes tecnologías para extraer energía de las olas.



Fig. 4. Instalación de Santoña (Power Buoy).



Fig. 5. Pelamis.

Entre los dispositivos de estructura flotante podemos distinguir:

- Los absorbedores puntuales, básicamente de traslación, como por ejemplo las boyas Power Buoy o tecnología OPT de Santoña (debe su nombre a la empresa estadounidense que las desarrolla, Ocean Power Technologies), la cual puede observarse en la figura 4. Las boyas obtienen energía a partir del movimiento relativo entre el flotador y el mástil mediante un sistema hidráulico que acciona un generador. La salida eléctrica se transforma de baja a media tensión en una subestación submarina desde donde se lleva mediante una línea eléctrica submarina hasta la subestación del Faro del Pescador. Entre otros absorbedores puntuales tenemos, el primer absorbedor puntual a escala real del mundo, conocido con el nombre de IPS Buoy, el Aqua Buoy y el Wavebob.
- Los de estructura articulada, esencialmente de rotación, como por ejemplo el dispositivo Pelamis de la figura 5, el cual se basa en una estructura articulada que dispone entre sus nodos de unión un sistema hidráulico que actúa sobre un generador eléctrico. Se estima que la cantidad de energía obtenida por 30 de estos sistemas podría abastecer aproximadamente 20.000 hogares con un consumo medio europeo. Se trata de una tecnología comercialmente afianzada.

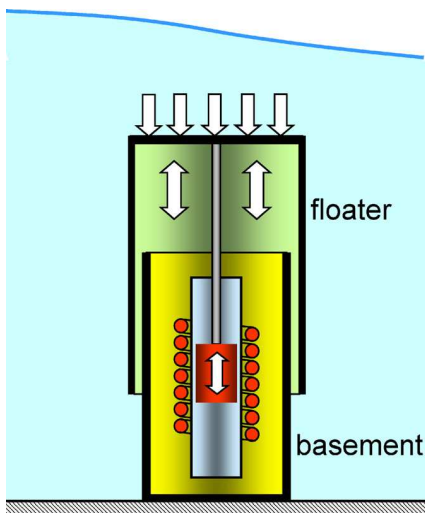


Fig. 6. AWS.



Fig. 7. Oyster.

Entre los dispositivos de estructura sumergida podemos distinguir:

- Los sistemas con un movimiento lineal, entre los que destaca el oscilador de la ola de Arquímedes AWS (Archimides Wave Swing) que se muestra en la figura 6, el cual está formado por dos partes principales, una fija sobre el fondo marino, y otra móvil que se desplaza verticalmente como resultado de la variación de presiones hidrostáticas bajo el agua, debido al movimiento inducido por las oscilaciones ascendentes y descendentes de las olas.
- Los sistemas que poseen un movimiento rotación, como por ejemplo el Wave Roller y el Oyster. Este último puede observarse en la figura 7. Consiste en un módulo anclado en el fondo del mar que, al oscilar, acciona unos pistones, los cuales a su vez entregan el agua de mar presurizada a una unidad de transformación hidroeléctrica terrestre.

✓ **Dispositivos colectores de olas**

Estos dispositivos capturan la energía de un frente de olas mediante un colector de olas para mover una o varias turbinas hidráulicas de salto reducido, denominadas turbinas Kaplan, aprovechando la energía potencial de las olas. Se distinguen dos tipos de convertidores, los de estructura fija o situados en la costa, y los de estructura flotante, alejados de ella.

En los dispositivos de estructura fija el funcionamiento es similar a las centrales hidroeléctricas. Las olas entrantes acceden a un depósito situado en una cota superior a la del mar a través de una rampa, para después hacer pasar el agua por unas turbinas acopladas a unos generadores eléctricos antes de ser devuelta al mar. Podemos distinguir: el SSG (Seawave Slot-Cone Generator), el cual almacena agua en varios dispositivos colocados a distintas alturas y utiliza una turbina con varias etapas, y el TAPCHAN.

Entre los dispositivos convertidores de estructura flotante, cuyo funcionamiento es similar a los anteriores, podemos citar al convertidor de olas danés Wavedragon, el cual se muestra en la figura 8, caracterizado por tener un reflector que dirige las olas incidentes por una rampa hasta un depósito situado en la parte posterior por encima del nivel del mar.



Fig. 8. Wavedragon.

5. Tecnología OWC. Columna de agua oscilante

El OWC de la figura 9, uno de los convertidores de energía olamotriz más utilizados en la actualidad, captura la energía entregada por las olas, la transfiere a una turbina tipo Wells que, acoplada a un generador, la inyecta a la red. Es una estructura normalmente ubicada en la costa, cuya parte superior forma una cámara de aire y cuya parte inferior está sumergida en el agua y abierta a la acción de las olas. El flujo bidireccional de aire desplazado por la columna de agua mueve una turbina de aire montada en la parte superior de la estructura. Al utilizar energía neumática para generar energía mecánica, el mantenimiento es más sencillo y económico (Pereiras, 2008). Tenemos ejemplos de instalaciones costeras, cerca de la costa y en los rompeolas. Todas ellas son similares y comprenden: la cámara de captura, el grupo turbo-generador y el sistema de instrumentación y control. Las plantas de: LIMPET en la isla de Islay, Escocia; PICO, en las Azores, Portugal; PORT KEMBLA situada a 100 Km de Sydney, Australia; VIZHINJAM cerca de Trivandrum, India, SAKATA en el puerto de Sakata, Japón y la planta MOWC de Mutriku son buenos ejemplos de aplicación real de esta tecnología.

En cuanto a la cámara de captura, el principal requerimiento es la creación de una cámara de aire adecuada para la captura de la energía de las olas, que sirva de soporte para la instalación del grupo turbina-generador y que resista el embate de la mar. Las distintas estructuras son similares y contienen: el labio, la cámara de captura y el conducto que termina en el exterior. El labio frontal debe penetrar en la mar, de manera que la cámara de captura no quede nunca conectada con la atmósfera exterior. Algunas plantas han adoptado un colector inclinado debido a que presenta dos ventajas, por una parte facilita el movimiento ascendente y descendente del agua por el colector, de manera que reduce las turbulencias, así como las pérdidas en la captura de energía y, por otra, aumenta el área de la columna de agua, lo que permite sintonizar mejor la frecuencia de oscilación de la columna de agua con las frecuencias de las olas incidentes.

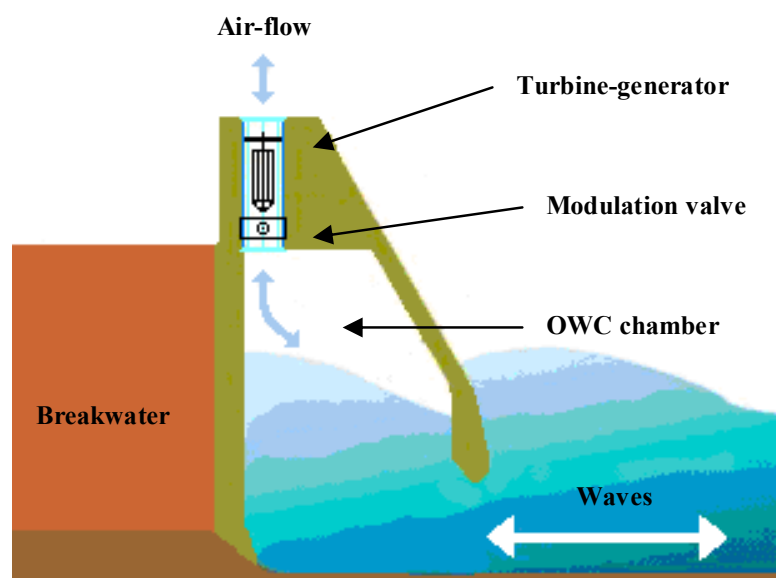


Fig. 9. Esquema de un OWC.



Fig. 10. NEREIDA MOWC de Mutriku.

El 8 de Julio de 2011, en la localidad costera de Mutriku, Euskadi, se ha puesto en funcionamiento una planta que utiliza esta tecnología. El proyecto, denominado NEREIDA MOWC (las nereidas son las ninfas del mar, hijas de Nereo, el dios de las olas, y Doris), se muestra en la figura 10.

Constituye la primera instalación de este tipo en Europa. Tiene 100 metros de longitud y está compuesta por 16 cámaras de captura y, en cada una de ellas, en el orificio superior, se acopla un grupo turbogenerador de 18,5 KW de potencia nominal, consiguiendo una potencia total de 296 KW. Se estima una producción anual de 600.000 KWh, evitando la emisión anual de 600 toneladas de CO₂. Se ha estimado una potencia media anual para la zona de 7,14 KW/m (Tease, Lees & Hall, 2007).

Las turbinas utilizadas son de tipo Wells de paso fijo, lo que les otorga simplicidad y robustez. El grupo turbo-generador, que en Mutriku está instalado verticalmente, dispone en su parte inferior de una válvula tipo mariposa para aislar la cámara en el caso que fuera necesario. Las dimensiones de la turbina, 2,83 metros de alto y 1,25 metros de anchura máxima, y su peso de aproximadamente 1.200 Kg. simplifican las operaciones de montaje y desmontaje. En la configuración eléctrica de la planta, las dieciséis turbinas están separadas, para su control, en dos grupos de ocho turbinas. Como se indica en Ortubia, Lopez de Aguilera & Torre-Enciso (2008), para el control de cada turbina se tiene en cuenta, en cada momento, la medida de la presión dentro de la cámara, para fijar la velocidad de giro de cada turbina optimizando la potencia extraída. Según García, Diego, Fdez. de Arróyabe, Garmendia & Rasilla (2004), la altura media de las olas en la costa cantábrica es inferior a dos metros, con un período que oscila entre los 8 y 12 segundos.

6. Estructura del sistema implementado, problemáticas planteadas y estrategias de control

Como se ha comentado anteriormente, el sistema OWC es uno de los dispositivos más utilizados en la actualidad. Además, se ha comprobado que es una de las tecnologías que mejor se adapta a las características de la costa vasca. Desde el año 2008, el grupo de investigación en Control Automático de la UPV/EHU, perteneciente al departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, mantiene, entre otras, una línea de investigación referente a la energía de las olas, Line of Research on Wave Energy (<http://lineofresearchonwaveenergy.blogspot.com/>). Además de diversas publicaciones recogidas en el JCR y numerosos congresos internacionales, disfruta de un convenio de colaboración con el EVE para el impulso de la tecnología OWC. El objetivo de las investigaciones ha consistido en la resolución de las problemáticas de control planteadas en una planta olamotriz de generación de energía eléctrica basada en la tecnología OWC. Para ello se ha realizado un estudio teórico, modelado, control, simulación y experimentación de la planta (Amundarain, 2011; Amundarain, Alberdi, Garrido & Garrido, 2011a,b; Amundarain, Alberdi, Garrido, Garrido & Maseda, 2011; Alberdi, Amundarain, Garrido, Garrido & Maseda, 2011 & Alberdi et al., 2011)

En la figura 11 se muestra el sistema OWC desarrollado. En él se observan las siguientes partes: las olas que entran al dispositivo convertidor, la cámara de captura, la cual transforma la energía incidente de las olas en energía neumática, la turbina Wells que transforma esa energía neumática en mecánica y, por último, el generador de inducción doblemente alimentado, que la convierte en energía eléctrica liberándola hacia la red. Además, se eligen como actuadores: un convertidor de frecuencia en configuración “back-to-back”, formado por los convertidores de tensión RSC (Rotor Side Converter) y GSC (Grid Side Converter) acoplados por medio de un condensador de enlace C, una válvula serie y el circuito de protección, Crowbar, para la superación de los huecos de tensión de la red eléctrica. Por ultimo, se observa el sistema de control, encargado de mejorar el rendimiento de la planta.

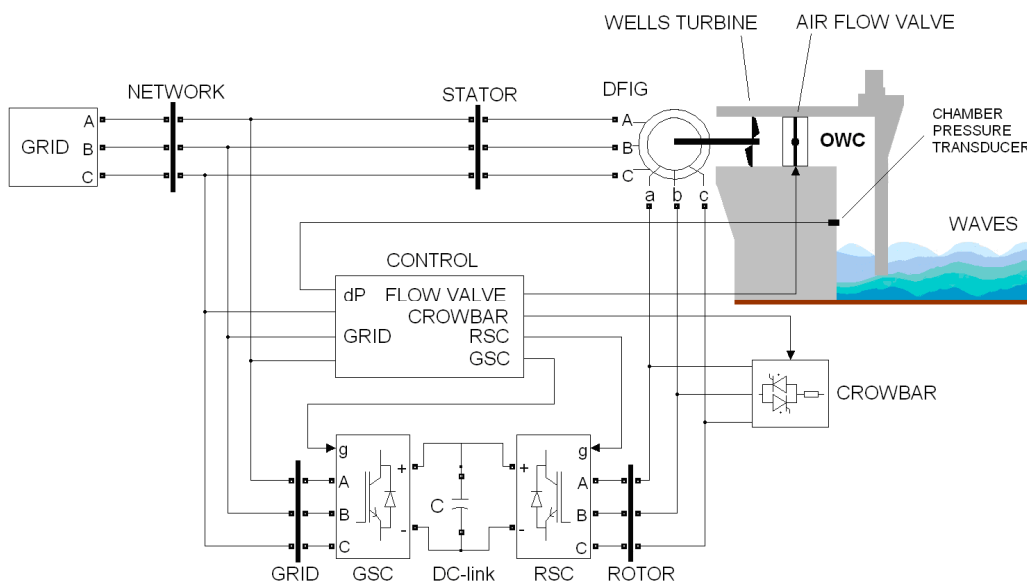


Fig. 11. Esquema general del sistema OWC desarrollado.

A continuación se van a explicar algunos de los componentes del sistema descrito. Se pueden distinguir tres bloques claramente diferenciados:

➤ **El sistema a controlar**, formado por las olas, la cámara de captura, la turbina Wells y el generador doblemente alimentado (DFIG). En Amundarain (2011) se aborda el estudio de las olas y la cámara de captura. Existen en la actualidad dos tipos de turbinas para la extracción de la energía generada por las olas, la Wells y la impulso (Setoguchi & Takao, 2006). Es el dispositivo más importante y complejo dentro de un sistema OWC. El flujo de aire en la turbina es bidireccional y de características sumamente irregulares, debido a que la amplitud y la frecuencia del mismo dependen de las condiciones del oleaje (Pereiras et al., 2008).

La turbina Wells de la figura 12 fue propuesta en 1976 por el Dr. A.A. Wells. En las últimas décadas numerosos autores han realizado diversos estudios de esta turbina. En la actualidad, debido a su sencillez y relativa facilidad de fabricación, están operativas en diversas centrales, por ejemplo, LIMPET, PICO y Mutriku. Su principal característica es que, debido a su geometría, siempre gira en el mismo sentido, independientemente del sentido del flujo de aire en la cámara de captura.

El comportamiento de una turbina Wells suele computarse en función del coeficiente de flujo. Este coeficiente determina el punto de funcionamiento de una turbina y se define mediante la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{Q}{r\omega_1 a} = \frac{V_x}{r\omega_1} \quad (1)$$

donde Q es el caudal de la turbina, r es el radio medio, ω_1 es la velocidad angular de la turbina, a es el área transversal y V_x es la velocidad del flujo de aire.



Fig. 12. Turbina WELLS.

En lo referente al **generador** utilizado, teniendo en cuenta que la turbina Wells opera de forma óptima bajo un régimen de velocidades variables que dependen del oleaje, se torna conveniente el uso del generador de inducción de velocidad variable como el DFIG. Este generador tiene la ventaja de que la electrónica de potencia utilizada sólo tiene que procesar una fracción de la potencia nominal del generador (del orden del 25%), lo que implica un importante ahorro de costes. Con esta configuración se consigue controlar la potencia activa y reactiva (Tapia, Tapia, Ostolaza, & Saenz, 2003) con bajos niveles de armónicos, tanto en el lado del generador como en la red.

➤ **Los actuadores** se encargan de operar sobre el sistema a controlar, de tal forma que se mejore su comportamiento. La válvula serie tiene como misión la de regular el flujo de aire a través de la turbina. Los convertidores estáticos de potencia (RSC y GSC) son dispositivos, formados por componentes electrónicos, que convierten la energía eléctrica de un tipo en otro. Por último, el circuito Crowbar se encarga de proteger al sistema ante la aparición de huecos de tensión en la red eléctrica. Un hueco de tensión es una perturbación en forma de bajada transitoria de la tensión de alimentación, con una duración de segundos, que ocasiona en el rotor (la parte del generador que gira) del DFIG grandes corrientes que pueden destruir la electrónica de potencia asociada al sistema.

➤ **El sistema de control** se encarga de proporcionar las señales apropiadas a los actuadores comentados anteriormente para que estos operen sobre el sistema a controlar de forma satisfactoria. Como se puede observar, este sistema de control tiene como señales de entrada la diferencia de presión en la turbina, medida con un transductor de presión, y la tensión de red. Las salidas del sistema de control, Flow valve, RSC, GSC y Crowbar, son las señales de control a aplicar a los actuadores.

Las **principales problemáticas**, las cuales han sido resueltas mediante diversas estrategias de control propuestas son:

➤ Uno de los principales inconvenientes, inherentes a la turbina Wells, es debido a que la potencia máxima que puede ser extraída de la turbina está limitada por el comportamiento en pérdida de la misma. A mayor altura de la ola le corresponde una mayor velocidad del flujo de aire, V_x , y, en consecuencia, debiera obtenerse más potencia extraída por la turbina. Ahora bien, cuando el coeficiente de flujo, presentado anteriormente en la expresión (1), supera un cierto valor, el cual dependerá de la turbina utilizada, puede ocurrir que ésta opere en un punto de funcionamiento en el cual se frene, y la potencia obtenida sea incluso inferior al de una ola de menor altura. Es fácil observar en la citada expresión, que modificando la velocidad del generador acoplado a la turbina, es decir el denominador, se puede controlar el coeficiente de flujo evitando el comportamiento en pérdida de la turbina y por lo tanto obteniendo una mayor potencia.

➤ Debido a que en el DFIG el estator (la parte del generador que no gira) se encuentra directamente unido a la red, son muy sensibles a variaciones de tensión, lo que causa un elevado número de desconexiones (Rodríguez, Arnalte & Burgos, 2002). Por esta misma razón son

incapaces de hacer frente directamente a los huecos de tensión, lo que obliga a disponer de equipamiento suplementario, como por ejemplo los denominados “Crowbar” o el “DC Chopper”.

Se han propuesto y desarrollado las siguientes **estrategias de control** para resolver las problemáticas anteriormente planteadas.

➤ Para maximizar la potencia extraída de la planta o seguir una potencia activa de referencia concreta, impuesta por los requisitos de red, se han propuesto dos métodos de control. El primer método de control propuesto ha sido el **control de la velocidad de rotación**. Este método adapta de forma novedosa la velocidad de rotación del generador a las diferentes presiones de entrada en la turbina mediante el actuador RSC, con la finalidad de evitar el comportamiento en pérdida de la misma. El segundo método de control propuesto, y con la misma finalidad que el anterior, ha sido el **control del flujo de aire** regulado mediante una válvula serie por medio de un controlador PID.

Ambos métodos presentan mejoras relevantes respecto del caso no controlado, si bien el método de control de la velocidad de rotación del DFIG obtiene mejores resultados que el método de la regulación del flujo de aire en lo que al objetivo anteriormente citado de maximizar la potencia activa generada se refiere. La explicación radica en que aunque ambos métodos actúan modificando el coeficiente de flujo, en el primer método esta modificación se realiza variando la velocidad del generador doblemente alimentado, de tal forma que se aprovecha todo el flujo de aire que se puede extraer de la ola. En cambio, en el segundo método, la modificación del coeficiente de flujo se realiza en base a una variación en el flujo de aire que entra por la turbina a través de la correcta regulación de una válvula serie, no pudiéndose lograr con este segundo método resultados comparables con el método de control de la velocidad de rotación, que funciona siempre con el máximo flujo de aire disponible.

➤ Se ha implementado una estrategia de control que combina los dos métodos anteriormente descritos para las dos posibles situaciones, es decir, aquella en la cual el objetivo es maximizar la obtención de energía, evitando para ello el efecto en pérdida de la turbina, y aquella en la cual se quiere obtener una potencia de referencia concreta dependiendo de los requisitos de la red de distribución de energía eléctrica. Para la primera situación se ha observado que el método combinado no aporta beneficio alguno con respecto al método de control de la velocidad de rotación del DFIG por medio del RSC, el cual ha sido el que mejores resultados ofrece para esta situación. Además en el caso del control utilizando el método combinado se observa un ligero retraso inducido por la combinación con el segundo método. Para la segunda de las situaciones se ha comprobado que el método combinado sí aporta beneficios con respecto a los dos métodos utilizados de forma separada, pudiéndose determinar que este método combinado es más efectivo a la hora de conseguir una potencia de referencia concreta y más limpia.

➤ Para finalizar las estrategias de control implementadas, se ha desarrollado un método de control que coordina la correcta activación de los actuadores propuestos, RSC, GSC, válvula y Crowbar para la correcta superación de los fenómenos que se derivan de la aparición de los huecos de tensión de red. Este método de control coordinado tiene como objetivo que, cuando una perturbación ocurre en forma de hueco de tensión en la red, las referencias de los esquemas de control, tanto del RSC como del GSC deben ser modificadas en relación a las referencias que se tenían en un funcionamiento normal de la planta en ausencia de huecos de tensión en la red eléctrica.

7. Conclusiones

La energía olamotriz, también denominada undimotriz, es una de las formas de obtener energía renovable más prometedora. Existen en la actualidad varios dispositivos que extraen energía de las olas, siendo la tecnología OWC, basada en turbinas Wells, una de las que más se adapta a las características de la costa vasca.

Las dos situaciones más habituales de funcionamiento normal de la planta de generación olamotriz implementada son: la maximización de la potencia activa generada evitando el comportamiento en pérdida de la turbina, y la obtención de una potencia activa de referencia concreta, impuesta por los requisitos de la red. Para estas dos situaciones se observa que las estrategias de control propuestas; el control de la velocidad de rotación y el control del flujo de aire, junto con una estrategia consistente en el uso combinado de ambos mejoran el comportamiento del sistema.

Para resolver el problema ocasionado por los huecos de tensión en la red eléctrica es necesaria una estrategia de control que coordine los diferentes actuadores empleados para mejorar el comportamiento de la planta en la superación satisfactoria de los fenómenos que se derivan de la aparición de los huecos de tensión en la red eléctrica, cumpliendo por una parte los requisitos marcados por normativa ante este tipo de perturbación, y por otra protegiendo al sistema de tales contingencias.

Agradecimientos

El autor quiere agradecer al MICINN y la UPV/EHU por la financiación recibida para dar soporte a las investigaciones realizadas, así como al EVE por el convenio de colaboración para el estudio de la tecnología OWC.

Referencias

- Alberdi, M., Amundarain, M., Garrido, A.J., Garrido, I. & Maseda, F.J. (2011). Fault-Ride-Through capability of OWC-based Wave Power Generation Plant equipped with Doubly-Fed Induction Generator and Air Flow Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, 58, 1501–1517.
- Alberdi, M., Amundarain, M., Garrido, A.J., Garrido, I., Casquero, O. & De la Sen, M. (2011). Complementary Control of Oscillating Water Column-Based Wave Energy Conversion Plants to Improve the Instantaneous Power Output. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26, 1021–1032.

- Amundarain, M., Alberdi, M., Garrido, A.J., Garrido, I. & Maseda, F.J. (2011). Control strategies for avoiding the stalling behaviour in the Wells turbine. *Renewable Energy*, 35, 2639–2648.
- Amundarain, M., Alberdi, M., Garrido, A.J. & Garrido, I. (2011a). Modeling and simulation of wave energy generation plants: Output power control. *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, 58, 105–117.
- Amundarain, M., Alberdi, M., Garrido, A.J. & Garrido, I. (2011b). Neural rotational speed control for Wave Energy Converters. *International Journal of Control*, 84, 293–309.
- Amundarain, M. (2011). Control y simulación de generadores olamotrices OWC. Editorial Académica Española.
- Chadwick, A., Morfett, J. & Borthwick, M. (2004). *Hydraulics in civil and environmental engineering*. Creus, A. (2004). *Energias Renovables*. Ed. Ceysa.
- EREC. (2010). *Renewable Energy in Europe, Markets, Trends and technologies*. European Renewable Energy Council.
- Falcão, A.F. de O. (2011). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 899–918.
- García, C., Diego, C., Fdez. de Arróyabe, P., Garmendia, C. & Rasilla, D. (2004). *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Universidad de Cantabria, Santander.
- Ortubia, I., Lopez de Aguilera, L.I., & Torre-Enciso, Y. (2008). Implantación de una central undimotriz en el nuevo dique de abrigo al puerto de Mutriku. III Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas. Barcelona.
- Pereiras, B. (2008). Estudio de una turbina impulso radial para el aprovechamiento de la energía del oleaje. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid.
- Polinder, H. & Scuotto, M. (2005). Wave energy converters and their impact on power systems. *International Conference on Future Power Systems*. 62–70, Amsterdam.
- Rodriguez, J.L., Arnalte, S. & Burgos, J.C. (2002). Automatic Generation Control of a Wind Farm with Variable Speed Wind Turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17, 279–284..
- Setoguchi, T. & Takao, M. (2006). Current status of self rectifying air turbines for wave energy conversion. *Energy Conversion and Management*, 47, 2382–2396.
- Setoguchi, T, Santhakumar, S., Takao, M. & Kim, T. (2003). A modified Wells turbine for wave energy conversion. *Renewable Energy*, 28, 79–91.
- Tapia, A., Tapia, G., Ostolaza, J.X. & Saenz, J.R. (2003). Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18, 194–204.
- Tease, W.K., Lees, J. & Hall, A. (2007). *Advances in Oscillating Water Column Air Turbine Development*. Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Portugal.
- Westwood, A. (2004). *Ocean Power. Wave and tidal energy review*. Elsevier, 5, 50–55.