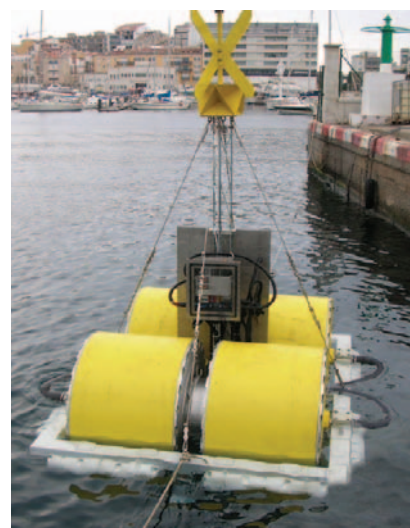


De energía cinética a energía eléctrica

Tuvalu: el balanceo que produce energía

Aparte de desarrollar las energías renovables más usuales, como la energía solar o la eólica, para cumplir con el protocolo de Kioto hace falta encontrar nuevas alternativas que proporcionen un buen rendimiento con el mínimo impacto ecológico, paisajístico y social. Las olas del mar pueden ser una de las fuentes naturales que proporcionen una energía prácticamente inacabable. Una empresa catalana, *Arlas Invest S.L.*, está desarrollando un sistema, llamado Tuvalu, que aprovecha la energía de las olas del mar.



Este sistema se basa en unas boyas que simplemente con el balanceo que provocan las olas del mar consigue transformar este movimiento en energía eléctrica. De hecho, lo que se hace es transformar energía cinética, procedente del movimiento de las olas, en energía eléctrica lista para ser consumida. En el sistema de Tuvalu la fuerza sale gratis, pues la constituyen las olas del mar.

Dicho de esta manera, este sistema, inventado por José Antonio Serrano alrededor del año 2000, parece muy sencillo, pero detrás hay un gran ingenio y un proceso muy bien estudiado para demostrar su viabili-

dad. La boya está unida al fondo del mar mediante un cable y el sistema de control de los motores se encarga de mantener este cable siempre tensado, de forma que las olas no lo arrastren, simplemente lo balanceen. Este movimiento hace desenrollar el cable de un tambor que al girar acciona un motor eléctrico que genera energía.

El principio de funcionamiento era muy ingenioso y parecía sencillo, por lo que sus posibilidades podían ser muchas, pero de la idea al primer prototipo había un largo camino por recorrer. Para desarrollarlo se requerían unos medios técnicos y unos conocimientos en áreas muy especí-

■ Ubicación de la boya generadora en el mar y descarga de Tuvalu en el puerto de Palamós.

ficas, por lo que José Antonio Serrano se puso en contacto con distintos centros de la Universidad Politécnica de Catalunya. El *Centro de Innovación Tecnológica en Convertidores Estáticos y Accionamientos (CITCEA)* fue el encargado de desarrollar el complejo sistema electrónico de la boya. Con el *Laboratorio de Ingeniería Marina (LIM)* se hicieron las pruebas del primer

Estructura del sistema

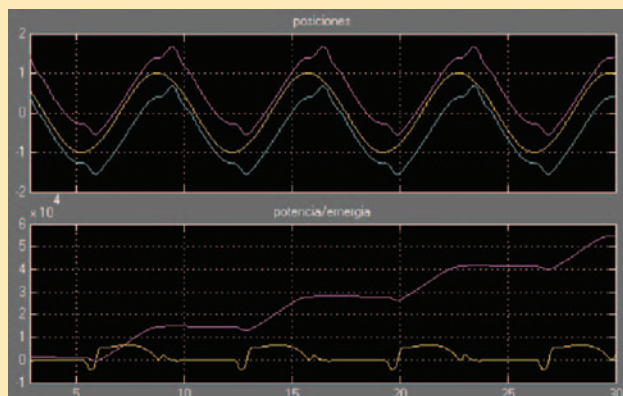
El sistema estará formado por una estructura metálica que soporte diversos tambores, de dos a cuatro, dependiendo del tamaño de la boya. En cada uno de estos tambores habrá un cable enrollado que anclará el tambor con una estructura sumergida a unos 10 metros de profundidad. Esta estructura se mantendrá a esta profundidad mediante unos flotadores y una cadena al muerto que anclará todo el sistema al fondo marino.

El movimiento de balanceo de las olas del mar se transmite a la boya y gracias al cable anclado a la boya intermedia giran los tambores. Mediante un sistema de transmisión, basado en una corona dentada y un reductor, el movimiento del mar se multiplica para accionar un motor *brushless*. Este motor es controlado por un convertidor estático diseñado específicamente para la aplicación para obtener energía a partir del movimiento del motor.

El funcionamiento de cada módulo se basa en usar el motor como freno eléctrico cuando la ola está subiendo, es decir, usar el motor como generador, y cuando la ola esté bajando, usar el motor para recoger el cable y preparar la boya para la siguiente ola. La energía que se obtiene al subir la ola es mucho más grande que la necesaria para recoger el cable en la bajada. Esta diferencia de energías es la que produce un balance neto positivo al final de un ciclo.

La energía eléctrica se dispone en forma de tensión continua que se almacena en un bus de condensadores. Se pretende crear parques de aproximadamente mil boyas cada uno, las cuales tendrán el bus de continúa compartido. Esto permitirá que cuando unas boyas están subiendo la ola (generando), otras estarán bajando la ola (consumiendo), de manera que el aporte de energía en el bus sea más o menos constante.

Este aporte de energía se deberá transportar a la costa y convertirse en energía apta para poder ser inyectada a la red eléctrica.



Simulaciones

En una primera parte del proyecto se han realizado una serie de simulaciones con diversos objetivos:

- Obtener una primera aproximación al sistema y prever posibles problemas.
- Verificar el correcto funcionamiento del sistema y la viabilidad técnica del mismo.
- Crear y comprobar diversos algoritmos para la obtención óptima de energía a partir de las olas del mar.

Este último era el objetivo principal, ya que la fuerza que ejercen las olas sobre la boya son cíclicas y bastante irregulares. Por lo tanto, hace falta un algoritmo que en cada momento indique qué par debe hacer el motor

para que el balance de energía sea el óptimo.

Para una primera aproximación se ha simulado con olas sinusoidales y regulares, las cuales son fácilmente predecibles y por ello se puede aprovechar su energía de forma relativamente eficiente.

En una segunda aproximación se han simulado perfiles de olas reales obtenidas de estudios marinos. Con estas olas se ha puesto de manifiesto que los sistemas con demasiados parámetros se vuelven altamente inestables, difíciles de ajustar e ineficientes. Así se ha llegado a un algoritmo que se basa sólo en dos parámetros. El resultado final ha sido un algoritmo muy robusto para los distintos tipos de ola y sus variaciones. Este algoritmo es el que posteriormente se ha aplicado al convertidor para su verificación en el modelo final.

Maqueta

Para tener una primera aproximación real del sistema y ver el comportamiento en el agua se ha construido una maqueta a escala 1:8 para poder realizar ensayos en el canal para simulación de olas del LIM (UPC). Así se ha validado el algoritmo obtenido con las simulaciones de una forma barata y rápida.

modelo a escala en el canal de simulación de oleaje de que disponen.

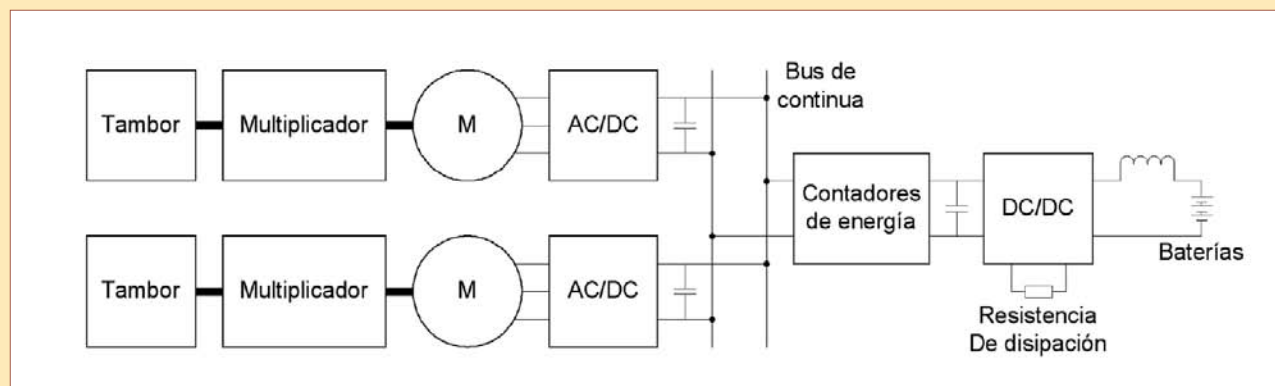
El trabajo conjunto del inventor y de los técnicos de la universidad fue tan efectivo que el prototipo ganó la medalla de oro en el "Gran Premi Internacional de la Inventiva 2002" y el premio especial del ayuntamiento

de Vilanova i la Geltrú en la "IX Fira Internacional d'invents i noves patents Galactica 2002". Era un buen inicio, pero las dificultades para salir al mercado aún eran muchas.

En el mismo año 2002 se constituyó la sociedad *Arlas Invest S.L.*, que sería la encargada de desarrollar el

sistema. En sus inicios, el proyecto fue apoyado por el programa Innova, el CDTI (*Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial*), el CIDEM, el ICAEN (*Instituto Catalán de la Energía*) y el IDAE (*Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*). Con todo este soporte se

Prototipo



En el prototipo, además de tener que diseñar dos convertidores a medida para poder controlar los motores *brushless* y aplicar el algoritmo del control, se ha encontrado con otra problemática, el prototipo de boya debía ser autónomo y por tanto no depender de alimentación exterior.

Este problema se ha solucionado diseñando un convertidor DC/DC invertible que a partir de unas baterías mantiene la tensión del bus y permite alimentar tanto los motores para recoger el cable como toda la electrónica de control. El convertidor DC/DC, además, debe permitir cargar las baterías de forma controlada, ya que un exceso de carga llevaría a la destrucción de éstas irremediablemente. Dado que es un prototipo, la energía generada sobrante se tendrá que disipar de alguna manera, es por ello que este convertidor tiene además unas resistencias de disipación para disipar toda la energía que no se pueda almacenar.

Hay dos casos en que no se puede almacenar la energía en las baterías; el primero se produce cuando las baterías están llenas y el segundo cuando los generadores aportan un exceso de energía al bus de forma demasiado rápida. En este caso, se inyecta todo lo posible en las baterías y lo que no se puede se disipa en las resistencias para evitar tensiones peligrosas en el bus.

Debido a que la mayor parte de energía se aporta en unos pocos instantes, en la subida de la boya se ha optado por aumentar mucho la capacidad de almacenar energía del bus. Así es más difícil hacer aumentar la tensión del bus y hay menos necesidad de disiparla, con lo que se puede enviar más hacia las baterías y aumentar así la autonomía del sistema. Además, esta gran capacidad contribuye a estabilizar la tensión del bus de forma notable.

Para contabilizar la energía generada realmente por el sistema, se dispone de unos contadores de energía que llevan un cómputo de la energía neta entregada por los módulos al convertidor DC/DC.

Al tratarse de un prototipo es imprescindible implementar un sistema para la adquisición y envío de todos los datos del sistema para el control, análisis y optimización del mismo. Para ello se ha utilizado un PC *embedded* que, a través de comunicación GPRS, comunica con una estación remota en la costa. Este PC dispone de una tarjeta CAN que le permite comunicarse en tiempo real con el control de los convertidores y adquirir las variables que caracterizan el sistema en tiempo real. Estos datos se empaquetan y se envían mediante GPRS a la estación remota, donde son analizados y permiten detectar cualquier anomalía en el funcionamiento de la boya, así como la posibilidad de actuar y modificar los parámetros de generación en tiempo real.

Cada uno de los tres convertidores está controlado por un DSP de última generación, el cual lleva incorporado los algoritmos pertinentes en cada caso. En el caso de los AC/DC, incorporan todo el algoritmo de generación; en el caso del DC/DC, incorporan el control, la tensión del bus, carga de las baterías y disipación de energía sobrante. Existe un cuarto DSP que hace de master y se encarga de la supervisión y control del sistema; así, la comunicación entre este master, los convertidores y con el PC *embedded* se realiza vía bus CAN. Toda la electrónica, tanto la de potencia como el control, ha sido diseñado e implementado específicamente para este proyecto por el CITCEA (Centro de Innovación tecnológica de la UPC).

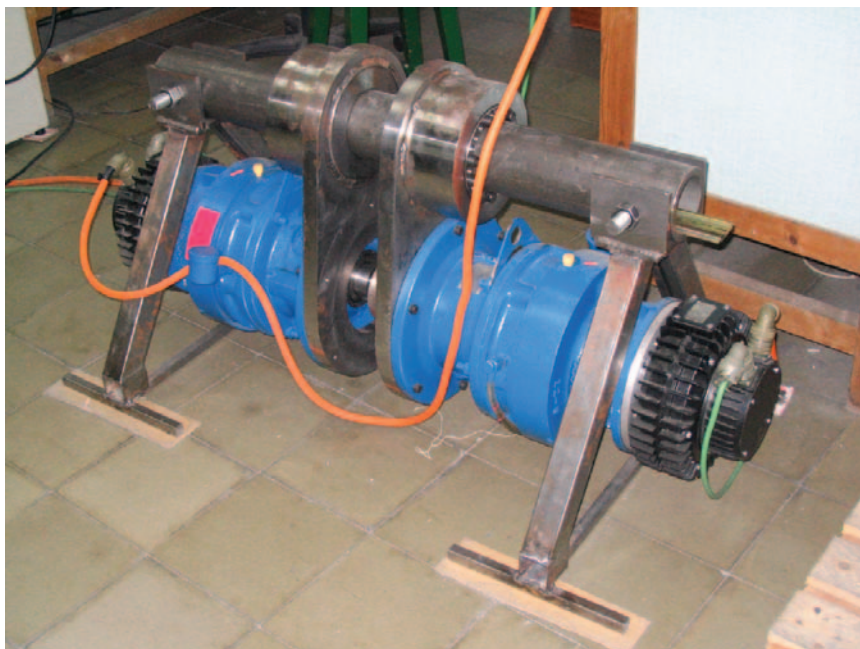
pudo perfeccionar el sistema y desarrollar una segunda patente.

En ese momento, *Arlas Invest* ya podía ofrecer información muy concreta sobre las dimensiones del sistema y de su rendimiento. Tenía que ser instalado en puntos de costa con profundidades de entre 30 y 150 me-

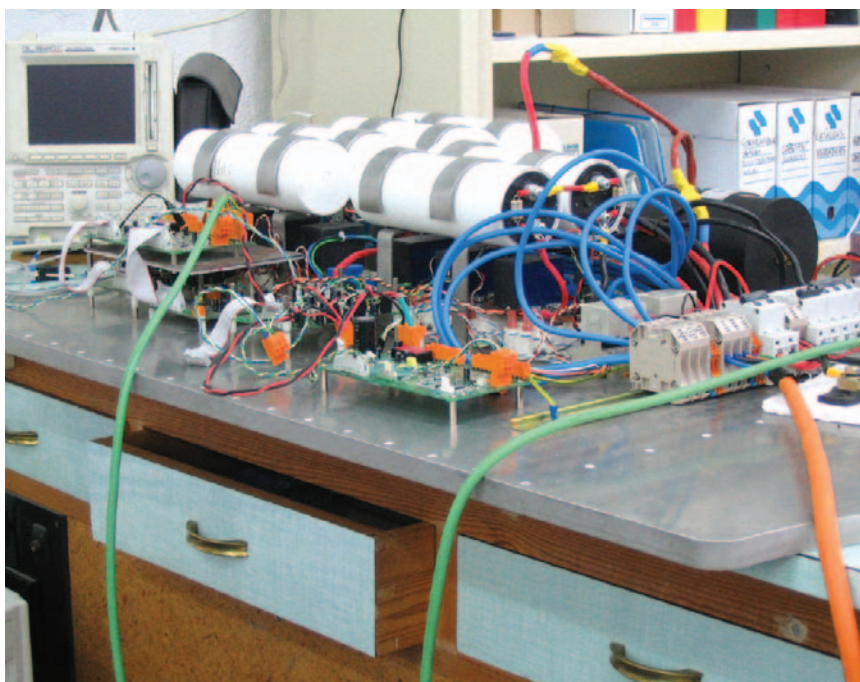
tros y que estén a más de 200 metros de la costa, en zonas donde no haya bañistas, y a partir de 50 metros en el resto. Instalarlo a más profundidad lo hace muy costoso tanto económica como técnicamente.

Los datos concretos de dos puntos de la costa peninsular indicaban mu-

chas posibilidades de rendimiento. En Palamós, la instalación de una boya 5 x 5 metros costaría unos 30.000 € y proporcionaría una energía de 60,7 MWh al año, la energía consumida por 12 viviendas. Un sistema parecido instalado en la Estaca de Bares, en el Cantábrico, pro-



■ Prototipo de laboratorio del generador eléctrico y del motor simulador de olas marinas.



■ Elementos de control y gestión de la energía eléctrica de Tuvalu.

porcionaría aproximadamente un 25% más de energía, 76,5 MWh anuales, suficiente para 15 viviendas.

Con estos datos se puede hacer un cálculo sobre una central entera. Se propone un campo de mil boyas separadas entre sí unos 20 metros. El generador de cada una de éstas estaría conectado a un cable submarino que llevaría la energía a la costa.

Dispuestas dentro de un círculo con un diámetro de unos 892 metros, en total ocuparían una superficie de 0,625 kilómetros cuadrados. Un parque de estas características instalado en Palamós costaría unos 30 millones de euros, pero produciría unos 60 GWh anuales, energía suficiente para 12.000 viviendas. Al precio actual de la electricidad, se amortiza-

ría en unos 8,7 años. En Estaca de Bares se suministraría energía a unas 15.000 viviendas y el parque se amortizaría en 6,9 años.

También es necesario destacar las ventajas que presenta esta solución con respecto a los parques eólicos. De un lado, la energía cinética de las olas es superior a la del viento, de manera que dispositivos mucho más pequeños que los grandes aerogeneradores pueden tener suficiente energía como para ser rentable. Otra ventaja respecto a los parques eólicos es que éstos deben trabajar dentro de ciertos márgenes, a parte de necesitar un viento mínimo y la imposibilidad de operar si éste es excesivamente fuerte. En el caso del sistema Tuvalu, sólo un oleaje muy fuerte obligaría a detener el sistema para no ponerlo en peligro.

En cuanto al impacto ambiental, es mucho menor. El parque de boyas es mucho menos visible que un parque eólico, y no son necesarias grandes carreteras para su construcción. Además, puede estar cerca de los núcleos urbanos.

En el momento de escribir estas líneas se está preparando una prueba piloto en Palamós. Además, se está elaborando un proyecto a escala real en tres tipos de mar totalmente distintos, en Cataluña, Galicia y Canarias, para demostrar su buen funcionamiento en todos ellos. En el ámbito internacional, Emiratos Árabes Unidos, Chile y Senegal han mostrado su interés en implantar el sistema.

Arlas Invest han calculado que, utilizando un 25% de las zonas costeras del mundo se podrían instalar un total de 2 millones de boyas. Esto significaría una reducción muy importante de la dependencia mundial del petróleo, así como una reducción en la producción de emisiones de dióxido de carbono. Puede ser que en pocos años el sistema se revele como susceptible de ser aplicado a gran escala.

**Joan Bergas, Gabriel Gross
Jordi Motjé, Joan Salabert**
CITCEA-UPC

www.citcea.upc.edu