

# Desarrollo de un proyecto para la conversión directa de la energía del oleaje en energía eléctrica

## Development of a project for direct conversion of wave energy into electricity

M. Lafoz<sup>1\*</sup>, M. Blanco<sup>1</sup>, P. Moreno-Torres<sup>1</sup>, G. Navarro<sup>1</sup>, C. Vázquez<sup>1</sup> y L. García-Tabarés<sup>1</sup>

### Palabras clave

energía undimotriz;  
absorbedor puntual;  
generador lineal;  
reluctancia conmutada;

### Sumario

El CIEMAT ha participado durante los dos últimos años en el desarrollo y puesta en marcha de un sistema para la conversión de energía del oleaje en energía eléctrica, dentro del marco de un proyecto denominado UNDIGEN, con financiación pública del MINECO y fondos FEDER. Se trata de una colaboración con la industria española para la realización de un dispositivo a escala 1:1 en el que se está probando una nueva tecnología de accionamiento eléctrico para generación. El artículo describe la tecnología utilizada y hace un recorrido por las etapas más críticas del proyecto, desde el diseño hasta la puesta en marcha en mar, resaltando la importancia de una etapa previa de pruebas en laboratorio del sistema completo, la cual se han llevado a cabo en las instalaciones del Laboratorio Conjunto de Electromagnetismo Aplicado CEDEX/CIEMAT.

### Keywords

wave energy;  
point absorber;  
linear generator;  
switched reluctance;

### Abstract

CIEMAT has participated during the last two years in the development and commissioning of a system to convert wave energy into electricity in the frame of a public project named UNDIGEN funded by the Ministry of Economy and Competitiveness and FEDER funds. It is based on the collaboration with the Spanish industry for carrying out a 1:1 scale device where a new concept of electric drive for generation is being testing. The paper describes the technology and moves along the most critical stages of the project, from designing to commissioning at the sea location, pointing out the importance of a previous stage of laboratory testing, which has been accomplished in the facilities of the Joint Laboratory of Applied Electromagnetics CEDEX/CIEMAT.

## 1. INTRODUCCIÓN: LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ Y EL PROYECTO UNDIGEN.

El recurso undimotriz (se denomina así al tipo de energía originado por el oleaje) es diez veces más energético que el solar o el eólico. Además de la alta densidad energética, la alta disponibilidad de recurso y el escaso impacto ambiental son un buen punto de partida para estudiar un tipo de energía en continuo desarrollo en todo el mundo y que se engloba dentro de las llamadas energías marinas.

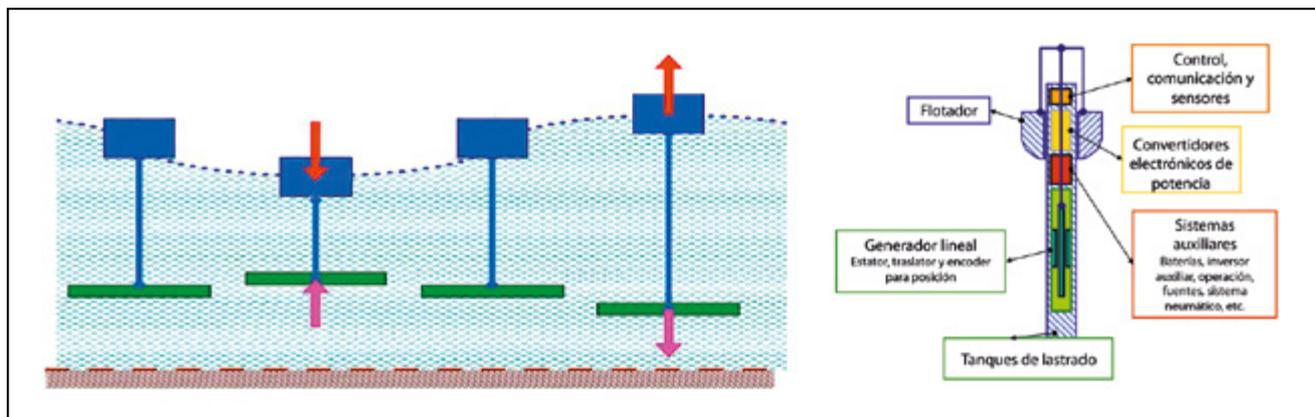
De forma más general las energías marinas incluyen distintos tipos. En primer lugar la energía eólica offshore, es decir generadores eólicos colocados en una localización alejada de la costa, ya sea mediante estructuras fijadas al fondo marino o sobre plataformas flotantes o semisumergidas. Cabe destacar entre los proyectos de este tipo el gran proyecto previsto para los próximos años en el Mar del Norte. En segundo lugar la energía de las mareas o corrientes (denominada “tidal”) que consiste en turbinas sumergidas que aprovechan el flujo de agua. Como ejemplo de este tipo, los proyectos llevados a cabo a lo largo de la costa atlántica de Francia. Por último la energía de las olas

(denominada también undimotriz), en la que se aprovecha la oscilación de la superficie marina para producir el movimiento de algún dispositivo mecánico que luego transforma esa energía en eléctrica. Las tecnologías existentes hoy en día para realizar esta transformación son muy diversas y además dependen mucho de las características del recurso undimotriz (altura de ola y periodo típico) en la localización donde se instale el dispositivo y de la potencia que se seleccione para cada unidad. Son destacables el gran proyecto de 62.5 MW que se está llevando a cabo en las costas de Victoria, en Australia, o los proyectos experimentales en las islas de Orney en Escocia. En España se están llevando a cabo también un buen número de proyectos en energías de las olas, un total de 26 se contabilizaron en 2013, principalmente la costa del País Vasco, Cantabria, Galicia e Islas Canarias. Centros especializados como el BIMEP o la Plataforma Oceánica de Canarias ofrecen emplazamientos para pruebas de dispositivos marinos de distinto tipo. Su principal aplicación es para suministro eléctrico en zonas de difícil acceso a una red eléctrica, donde el precio de la energía sea elevado, aunque también pueden ser utilizadas para alimentación de sistemas autónomos y como refuerzo de instalaciones de generación convencional.

Este artículo se centra en un tipo de dispositivo para la conversión de la energía de las olas conocido como *absorbedor puntual* (V.D. Colli *et al.*, 2006; Yu, Z. & J. Falnes,

\* Corresponding author: [marcos.lafoz@ciemat.es](mailto:marcos.lafoz@ciemat.es)

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, España.



**Figura 1.** Principio de funcionamiento de un absorbedor puntual y partes de un conversor de energía de las olas del tipo absorbedor puntual.

1998), consistente en dos cuerpos con simetría axial que se mueven verticalmente uno con respecto al otro por el efecto de las fuerzas de flotación sobre los cuerpos debido a las elevaciones de las olas. Un primer cuerpo se denomina *flotador* y que se mueve con la ola, mientras que un segundo cuerpo, *tubo*, dotado de una extensión para proporcionar estabilidad hidrodinámica mantiene su posición frente al desplazamiento de las olas (Yu, Z. & J. Falnes, 1995), o bien se diseñan ambos para conseguir un movimiento resonante con respecto a la frecuencia de las olas. La figura 1 muestra un esquema con el principio de funcionamiento de este dispositivo y sus componentes principales.

El movimiento del flotador con respecto al tubo es transformado en energía eléctrica a través de un dispositivo denominado *power take-off* (PTO). Los primeros desarrollos de absorbedores puntuales contenían un sistema hidráulico con un pistón que aumentaba la presión de un fluido en un circuito neumático que a continuación se inyectaba en una turbina y ésta a su vez movía un generador eléctrico rotativo, produciendo potencia eléctrica. Estos sistemas se están sustituyendo por soluciones más eficientes que prescinden de la parte neumática y utilizan directamente una sofisticada solución mecánica para conectar con un generador eléctrico rotativo, o soluciones que utilizan un generador eléctrico lineal que recoge directamente el movimiento de los dos cuerpos del absorbedor y lo transforma en energía eléctrica. Esta es la opción que se va a presentar en este trabajo y que ofrece la ventaja de una mayor simplicidad y robustez, aunque aumenta el tamaño del generador eléctrico.

En concreto, se describirá uno de los proyectos llevados a cabo en España durante los últimos dos años, dentro de los proyectos I+D+i de la convocatoria INNPACTO 2011 del Ministerio de Economía y Competitividad, cofinanciado con fondos FEDER. El proyecto se denomina UNDIGEN: Funcionalidad de Sistemas de Generación Eléctrica Undimotriz una con un presupuesto de 25M€ y que ha tenido como miembros de un consorcio a las empresas WEDGE-GLOBAL y FCC, al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y a la Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN). Además, en el desarrollo han participado como subcontratadas las empresas DEGIMA, CINTRA NAVAL, ELINSA, INABENSA, ITXASMARINE y la Universidad Carlos III de Madrid.

El objetivo del proyecto ha sido el desarrollo completo de un absorbedor puntual para validar el funcionamiento

de un nuevo generador lineal y su accionamiento eléctrico, para lo cual se ha construido un prototipo a escala 1:1 que se ha probado en la costa de la isla de Gran Canaria.

## 2. LA ETAPA DE DISEÑO DEL SISTEMA COMPLETO

El proyecto comienza con una etapa de diseño del absorbedor puntual que se puede dividir en dos tareas principales: un primer paso para el diseño previo de la geometría externa o envolvente y una segunda fase para el diseño estructural del dispositivo completo. Estas dos tareas, diseño geométrico y diseño estructural, podrían relacionarse con la ingeniería conceptual e ingeniería de detalle respectivamente. El proceso de diseño comienza con un estudio hidrodinámico del dispositivo basado en el criterio de adecuar sus frecuencias de resonancia naturales con el oleaje más frecuente de la localización donde se va a instalar. En este caso, en las instalaciones reservadas por la Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN), en la costa nordeste de la isla de Gran Canaria. Dicha sintonización de frecuencias de resonancia implica maximizar la potencia extraída del oleaje (Falnes, 2002). A la vista de la figura 2 y la tabla 1 el oleaje más frecuente en la localización de PLOCAN (Boya de Las Palmas Este, 2011) es de 1,5 m de altura significativa ( $H_s$ ) y 8 segundos de periodo de pico ( $T_p$ ) (Conde, 1982).

El procedimiento de diseño se basó en un análisis iterativo de diversas geometrías con el objetivo principal de adecuar su frecuencia natural para maximizar la energía extraída, teniendo que cumplir además con una serie de requisitos previos, tales como:

1. Simplificar la geometría de los cuerpos flotantes, así como las posibles cargas estructurales con el fin de facilitar las iteraciones de diseño de la ingeniería de detalle.
2. Definir una fuerza máxima de actuación entre ambos cuerpos flotantes, una velocidad relativa máxima y una carrera máxima con el fin de adecuar el dispositivo al generador lineal existente.
3. Minimizar la inercia de los cuerpos con el fin de reducir los requerimientos de los sistemas de frenado y supervivencia.
4. Evitar el fenómeno de “*slamming*”, el cual se da cuando el movimiento de uno de los dos cuerpos flotantes provoca que éste o bien abandone el contacto con el agua, o bien quede totalmente sumergido.

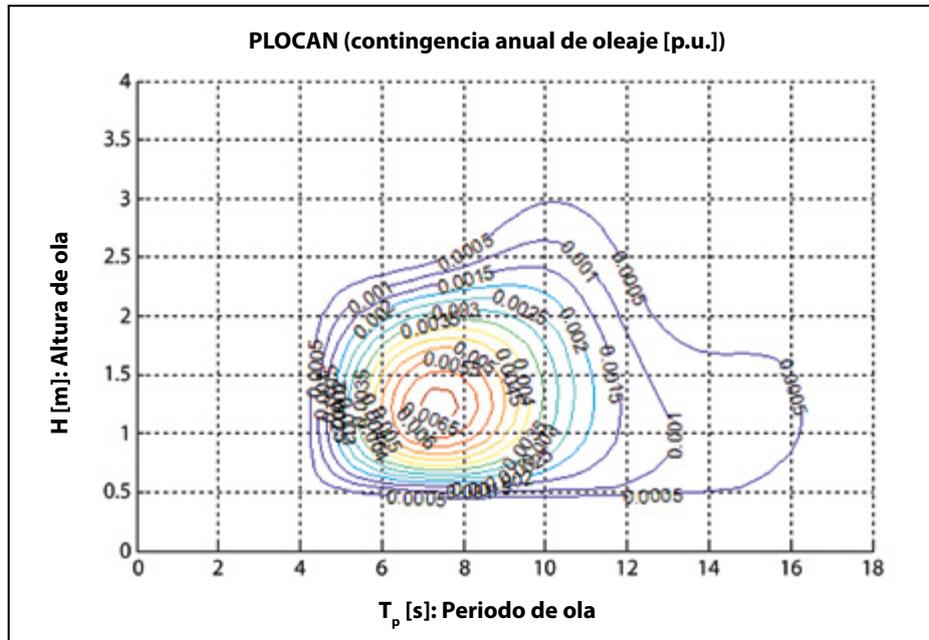


Figura 2. Diagrama de contingencia de oleaje anual de la ubicación.

Tabla 1. Tabla de contingencia de oleajes de la ubicación

		<=2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	>20.0	TOTAL
$H_s$ (m)	<=0.5	---	0,37	0,72	1,48	1,90	1,83	1,05	0,52	0,03	---	7,90
	1.0	---	0,71	9,88	10,30	5,97	3,98	3,48	2,33	0,20	0,06	36,89
	1.5	---	---	6,10	17,14	6,15	2,03	1,37	1,05	0,09	---	33,94
	2.0	---	---	0,31	8,56	5,61	0,79	0,57	0,23	0,52	---	16,13
	2.5	---	---	0,02	0,82	2,69	0,26	0,15	0,09	0,04	---	4,07
	3.0	---	---	---	0,04	0,53	0,13	0,03	0,01	0,03	0,01	0,78
	3.5	---	---	---	---	0,09	0,11	0,01	---	---	---	0,21
	4.0	---	---	---	---	0,01	0,03	0,02	---	---	---	0,06
	4.5	---	---	---	---	---	0,01	0,02	---	---	---	0,03
	5.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	> 5.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
TOTAL		---	1,08	17,02	38,34	22,95	9,15	6,70	4,23	0,46	0,07	100%

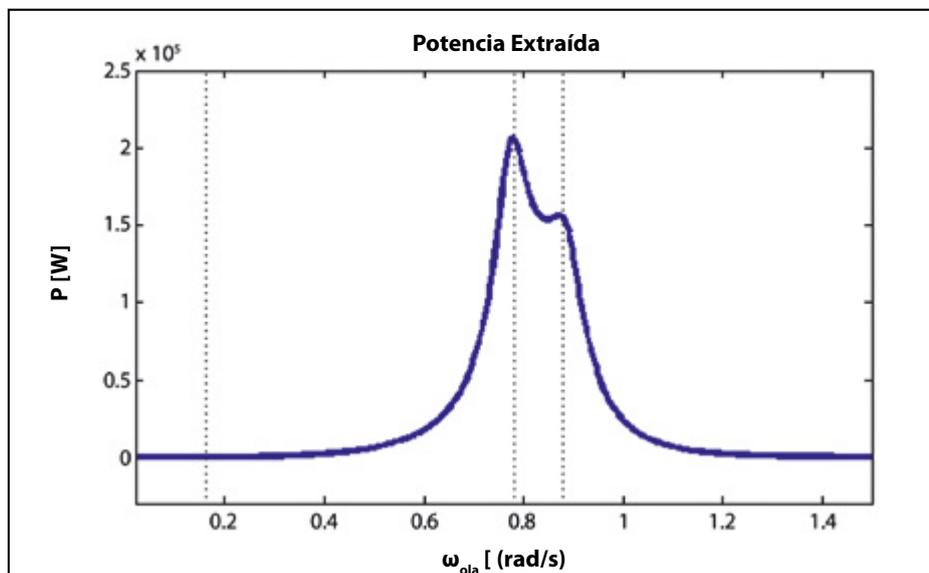


Figura 3. Gráfico de absorción de energía del oleaje. Se muestra la potencia absorbida ( $\omega$ ) ante una ola de 1m de amplitud con respecto la frecuencia angular (rad/s) del oleaje.

El proceso iterativo de cálculo proporciona como resultado una geometría y unas dimensiones concretas del absorbedor puntual, las cuales son utilizadas como entrada para el proceso de diseño estructural. La figura 3 muestra uno de los resultados de este proceso de diseño, donde se aprecia la potencia obtenida en función de la frecuencia del oleaje y los desplazamientos que sufrirán los dos cuerpos del absorbedor en función de la misma.

En la segunda etapa de diseño se desarrollan los planos de detalle y de construcción del absorbedor puntual, donde se tienen en cuenta un gran número de factores y casuística de muy diversa naturaleza, tales como: cálculo de esfuerzos estructurales debidos al oleaje, diseño del sistema de fondeo, diseño del tren de potencia entre ambos cuerpos flotantes y el generador lineal, diseño de pasos de hombre tanto para puesta en marcha como para inspección, distribución de tanques de lastrado, estudio y diseño de maniobras de botadura y fondeo, definición de los alojamientos de los equipos de control, electrónica de potencia y comunicaciones, etc.

### 3. UN NOVEDOSO ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO PARA HACER LA CONVERSIÓN EN ENERGÍA ELÉCTRICA

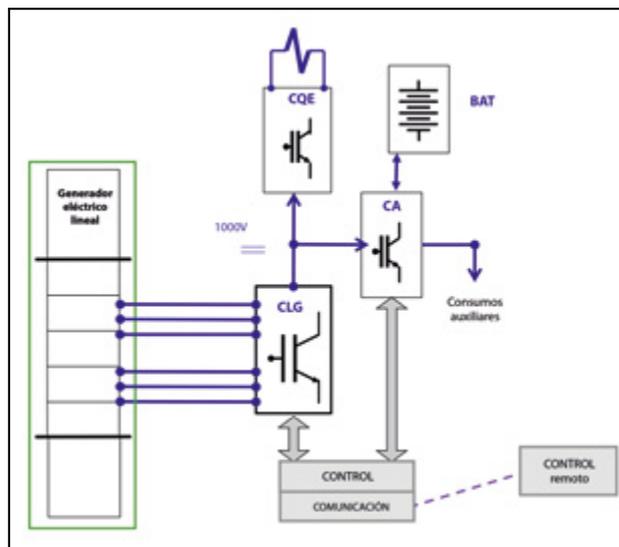
Las principales novedades que aporta este sistema sobre otros similares son que el conjunto del generador lineal y los convertidores electrónicos son más eficientes y robustos que otros sistemas hidráulicos o mecánicos.

En cuanto al generador lineal, está compuesto por una parte móvil denominada translator (análogo al rotor en el caso de máquinas rotativas), que está unida al flotador, y otra fija, el estator, que está unida al tubo. De entre los diferentes tipos de generador que se pueden elegir, se ha seleccionado el tipo de reluctancia conmutada (Blanco, Navarro & Lafoz, 2009) porque aporta una serie de ventajas interesantes para esta aplicación como son: robustez, bajo coste, posibilidad de escalado y posibilidad de grandes desplazamientos o carreras con un translator poco costoso. Se trata de un generador capaz de manejar una potencia de 200kW y con una velocidad máxima de 1 m/s. La figura 4 presenta una imagen del generador durante sus ensayos de caracterización en laboratorio.



**Figura 4.** Generador lineal de reluctancia conmutada utilizado en el convertidor de energía de las olas.

El conjunto de convertidores electrónicos de potencia que gestionan la potencia eléctrica en el sistema han sido específicamente desarrollados para esta aplicación y su esquema de conexión se muestra en la figura 5. Directamente conectado a las fases del generador hay un convertidor



**Figura 5.** Esquema completo de la parte eléctrica.

(CLG) cuya misión es aplicar sobre éste las corrientes eléctricas necesarias para hacerlo funcionar en el punto óptimo de funcionamiento, en el cual será capaz de obtener la máxima energía de las olas. De esta forma, la potencia mecánica producida en el captador por las olas será transformada en energía eléctrica y volcada en una etapa de corriente continua de 1000V. Desde esa etapa de corriente continua la potencia toma diferentes caminos. Parte de ella pasa a través de un convertidor de auxiliares (CA), reduciendo su tensión a 300V para alimentar todos los consumos eléctricos que se incluyen en el captador (control, operación, sensores de medida, compresor de sistema neumático, electroválvulas y sistemas de instrumentación). En esa etapa de 300V hay conectado también un conjunto de baterías (BAT) que se utilizará para asegurar el funcionamiento del sistema y el arranque cuando el dispositivo no está generando potencia. Por otro lado, el resto de potencia obtenida del generador y que no se requiere para alimentar auxiliares ni cargar baterías, en condiciones normales sería enviada hacia la red a través de un convertidor electrónico de red y un cable submarino para utilizarla en las aplicaciones en tierra que la demandaran. En el caso concreto del proyecto UNDIGEN no se ha dispuesto este convertidor de red ni el cable submarino, sino que se ha trabajado en el funcionamiento del resto del sistema, considerando que esa última parte de conexión a red y cable está tecnológicamente resuelta y no exigía un desarrollo específico de investigación, lo cual habría supuesto por otro lado una inversión económica demasiado elevada para esta etapa de validación de tecnología. En lugar de ello se ha decidido disipar la potencia generada en una resistencia eléctrica a través de un convertidor de continua que disipa la potencia (CQE) según se va generando. Todos los convertidores electrónicos, la sensorica del sistema, la instrumentación y la operación del sistema completo está gobernado por un sistema de control basado en microcontroladores y procesadores digitales de señal (DSP) que reciben medidas del sistema y deciden sobre la actuación de los distintos subsistemas, llevando al dispositivo a todos los modos de operación definidos (parada, arranque, generación, seguridad, etc.). Los microcontroladores se encargan de los controles específicos de cada convertidor electrónico de potencia, un DSP de bajo nivel se encarga de dar las consignas

oportunas a dichos convertidores y gestionar la estrategia de operación óptima del sistema, y un segundo DSP de alto nivel se encarga de la operación de planta y de la gestión de las comunicaciones con el exterior.

#### 4. PRUEBAS PREVIAS DEL SISTEMA COMPLETO EN LABORATORIO

Una vez que todos los equipos eléctricos, electromecánicos, electrónicos y de control que van a estar incluidos dentro del captador han sido desarrollados, y antes de integrarlos en el captador, es fundamental una etapa previa de pruebas en laboratorio de todos los dispositivos juntos para comprobar la interacción entre los mismos y el funcionamiento conjunto. Esto, que en proyectos que utilizan equipos convencionales no suele ser tan necesario, en este caso donde muchos de los equipos desarrollados son muy específicos para la aplicación, y teniendo en cuenta la accesibilidad reducida tanto a los equipos instalados dentro del captador de energía como al captador en su localización definitiva en alta mar, hacen necesario plantear como indispensable una campaña completa de ensayos del sistema en laboratorio. De esta forma se reducen considerablemente los tiempos durante la puesta en marcha, el coste total del proyecto y los riesgos durante las primeras etapas de funcionamiento del sistema.

El CIEMAT ha sido el encargado de diseñar, desarrollar, probar y poner en marcha todos los equipos eléctricos, electrónicos de potencia y de control del dispositivo. Las pruebas de los dispositivos se han llevado a cabo en las instalaciones del Laboratorio Conjunto de Electromagnetismo Aplicado, dentro del Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF) que dispone de las capacidades tanto mecánicas como eléctricas para realizar los ensayos previos del generador lineal junto con todos los equipos electrónicos de potencia, eléctricos y de control. La duda que surge en primer lugar es ¿cómo se puede probar en un laboratorio un generador que va a funcionar movido por la fuerza de las olas?. En un primer momento se planteó la opción de utilizar un actuador hidráulico que fuese capaz de imprimir una fuerza del mismo tipo que el oleaje existente en la zona de instalación final. Esta opción se descartó por problemas de espacio y por el coste. No obstante se encontró una forma de hacerlo bastante ingeniosa y que proporcionaba al sistema la posibilidad de ser probado a potencia completa, con un consumo eléctrico desde la red prácticamente despreciable y con la capacidad de utilizar cualquier criterio de operación e incluso ajustar el sistema para trabajar de forma óptima. Para ello, se dividió el generador en dos submáquinas, aprovechando que está fabricado de forma modular. Una de ellas, denominada *actuador*, se alimenta de forma que proporcione una fuerza equivalente a la fuerza que aportaría el flotador del captador en unas condiciones determinadas de oleaje en la localización elegida para la instalación. Esta fuerza puede ser obtenida previamente mediante modelos matemáticos del captador completo sometidos a un estudio hidrodinámico. Por otro lado la otra submáquina, denominada *generador*, recibe la fuerza ejercida por el *actuador* y la transforma en potencia eléctrica bajo unas determinadas condiciones de control definidas por el propio sistema.

La figura 6 muestra un esquema de los ensayos del accionamiento eléctrico completo en los laboratorios del CEDEX/CIEMAT.



**Figura 6.** Ensayos del sistema completo en los laboratorios del CEDEX/CIEMAT.

De esta forma, a partir de un cierto consumo en la red eléctrica para mover el actuador, el generador es capaz de producir energía eléctrica para enviar a la etapa de continua de 1000V y de ahí, una parte a través del convertidor de auxiliares alimenta los consumos propios del sistema y recarga el conjunto de baterías y el resto es disipado por el sistema en la resistencia de quemado, un funcionamiento prácticamente análogo al que tendrá en el captador definitivo. Utilizando este esquema se pueden realizar varios ensayos, utilizando patrones tanto de oleaje regular como irregular, así como algunas estrategias de control para ajustar el sistema a las mejores condiciones de trabajo, ya que las condiciones que se pueden reproducir en laboratorio son muy similares eléctricamente a las que se van a presentar en la localización final. La figura 7 presenta algunos resultados experimentales obtenidos tanto para la parte del actuador (*izq*) como para la parte del generador (*dcha*) en cuanto a corrientes en las fases de la máquina, posición del translator y velocidad de referencia (establecida por el algoritmo de control) y medida.

#### 5. LOS AJUSTES FINALES Y PUESTA EN MARCHA EN EL PUERTO

Una vez probados en laboratorio los equipos principales que participarán en la generación de energía, la siguiente etapa es enviarlos para su integración dentro del captador en fábrica, el cableado definitivo, la fijación de los elementos y armarios a la estructura y realización de pruebas de estanqueidad. A continuación el dispositivo completo se ha llevado al puerto de Las Palmas de Gran Canaria para su botadura. La figura 8 muestra una imagen del captador undimotriz una vez que se depositó en el agua. No son nada despreciables las labores de logística que son necesarias para esta maniobra de botadura puesto que es necesaria una grúa de grandes dimensiones, los permisos pertinentes por parte de las autoridades portuarias y realizar un equilibrado del peso mediante los llenados de los tanques de lastrado de ambos cuerpos del captador. Una vez en el agua se procede a su izado para colocarlo en posición vertical mediante el reajuste de los tanques de lastrado, dejándolos a continuación en los niveles definitivos que lleven a los cuerpos a sus líneas de flotación adecuadas.

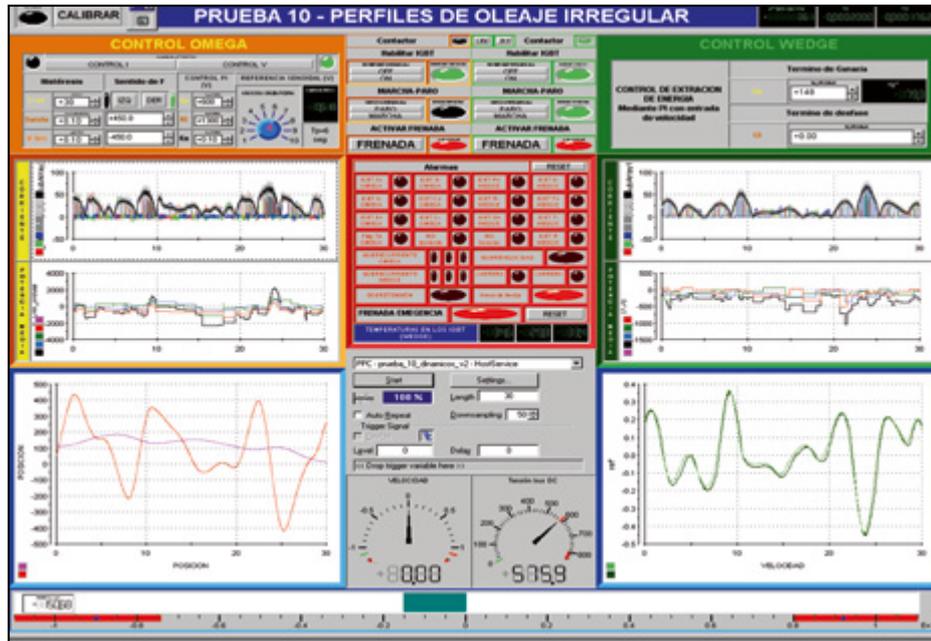


Figura 7. Resultados en laboratorio con las pruebas actuador-generador.



Figura 8. Captador undimotriz durante la botadura en el puerto de Las Palmas de Gran Canaria.

A partir de aquí comienza una etapa final de acoplamiento e instalación de algunos sistemas que no se han podido instalar estando el dispositivo en posición horizontal, así como una validación completa en puerto de todos los sistemas internos: sistema eléctrico completo, alimentación de todos los dispositivos de operación, circuitos

neumáticos para el frenado y bloqueo del dispositivo en situación de parada y emergencia, convertidores electrónicos de potencia, dispositivos de control y entorno de comunicaciones con el puesto de operación que estará en la costa.

## 6. LA PUESTA EN MARCHA EN EL MAR Y LAS PRUEBAS DEFINITIVAS

Después de validar todos los sistemas en el captador, aún en el puerto, se procede a liberar los dos cuerpos y a dejar que oscilen libremente para probar las estrategias de frenado y bloqueo, protecciones de sobrecarrera, sobrevelocidad y todos los aspectos mecánicos que son necesarios para el funcionamiento seguro del sistema cuando esté en alta mar. Es fundamental que todos los entornos de control y comunicación funcionen correctamente desde el puerto e incluso aprovechando que al estar en una zona al final de un muelle del puerto hay cierto oleaje es interesante probar las primeras actuaciones de generación eléctrica,



Figura 9. Maniobra de remolcado del captador y de anclaje al fondo marino.

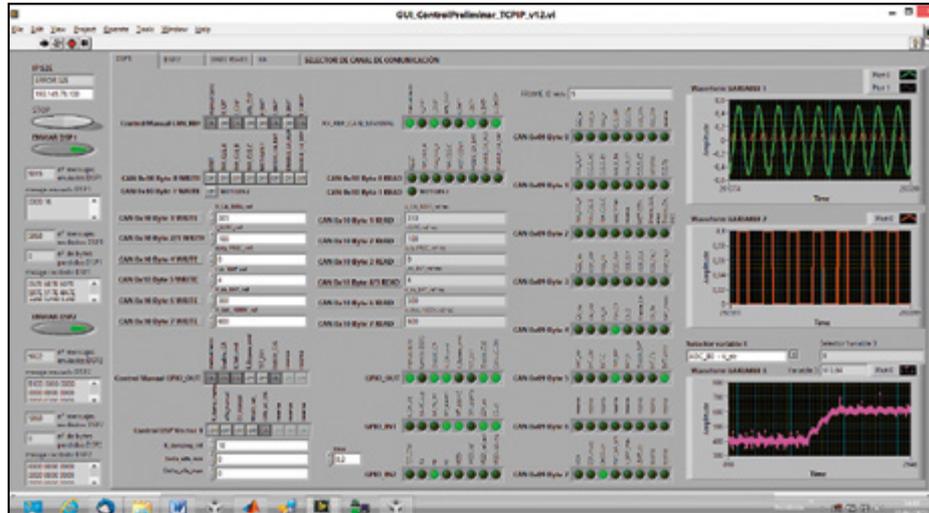


Figura 10. Entorno de operación remota del captador undimotriz.

aunque obviamente no hay recurso suficiente para recoger una cantidad importante de energía.

Una vez llevadas a cabo todas las comprobaciones necesarias se remolca el dispositivo al punto de alta mar donde va a estar en pruebas por un tiempo. Este lugar es una zona reservada por PLOCAN para pruebas de captadores a 3 millas de la costa y que está protegida del tráfico marítimo. El sistema es anclado al fondo marino, donde previamente se ha situado un muerto de hormigón de peso suficiente para soportar los esfuerzos a los que va a estar sometido el captador, estando conectado al mismo a través de una boya intermedia semisumergida. Para esta maniobra es necesario personal especializado en estas tareas y es importante haberlas planificado perfectamente con anterioridad para reducir los riesgos y el coste de la puesta en marcha. La figura 9 presenta una fotografía durante este proceso.

Una vez preparado el sistema para la operación, ésta se puede llevar a cabo desde un puesto de control situado en tierra. La comunicación se produce vía radio y el DSP de alto nivel que realiza el control de planta es el encargado de gestionar todas las operaciones necesarias para el arranque del sistema. La operación del sistema se puede realizar de forma manual, operando cada uno de los sistemas paso a paso, o bien de forma automática, ya que el sistema de control tiene programada una secuencia de estados por los que se va pasando: parada, arranque, espera y generación, confirmándose en cada paso todas las actuaciones que son necesarias antes de pasar al siguiente. La figura 10 presenta uno de los entornos de monitorización y operación que se utilizan para comandar el sistema desde tierra y que permite tener acceso a todas las variables del sistema.

Aunque el PTO está preparado para proporcionar una potencia de hasta 200kW, el recurso undimotriz en la localización donde se está probando se ha estimado que producirá potencias significativamente menores. No obstante, esta primera campaña de operación no persigue obtener la máxima potencia sino otros aspectos importantes como son:

- Demostrar la funcionalidad y robustez de este nuevo tipo de power take-off instalado en el absorbedor puntual

- Probar la supervivencia del sistema completo ante situaciones adversas de mar como alturas de ola extremas y tormentas
- Probar distintas estrategias de operación del sistema para encontrar la que permite optimizar la cantidad de energía obtenida del oleaje
- Validar el modelo hidrodinámico desarrollado con los datos recogidos y corregir posibles desviaciones en el mismo para posteriores estudios del dispositivo en otros emplazamientos
- Tomar medidas de potencia generada y relacionarlas con los valores de oleaje resultado de las previsiones dadas por Puertos del Estado, para poder desarrollar modelos que establezcan una relación entre la altura de ola y periodo y la energía obtenida, algo muy importante para la explotación industrial como sistema de generación.



Figura 11. Captador undimotriz durante las pruebas de generación.

El dispositivo está en estos momentos en pruebas tal y como se muestra en la figura 11, y su comportamiento es satisfactorio hasta la fecha. Está previsto que siga recogiendo datos de funcionamiento durante los próximos meses que permitan realizar un análisis completo del comportamiento y que permitan el desarrollo de trabajos futuros.

Estos pasan por: utilizar el dispositivo en un emplazamiento de mayor potencial undimotriz, probar la funcionalidad completa como sistema aislado con una aplicación real o realizar la conexión a red del sistema.

## REFERENCIAS

- Colli, V.D. , Cancelliere, P., Marignetti, F., Di Stefano, R., Scarrano, M. (2006) "A Tubular-Generator Drive For Wave Energy Conversion" *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, June 2006. Vol 53 (4), pags. 1152-1159.
- Yu, Z., Falnes, J. (1998), "State-space modelling of dynamic system in ocean engineering". *Journal of hydrodynamics, Ser. B*, 1 1-17. China Ocean Press
- Yu, Z. , Falnes, J. (1995) "State-space modelling of a vertical cylinder in Heave". Elsevier, *Applied Ocean Research* 17 265-215
- Falnes, J. (2002) "Ocean Waves And Oscillating Systems. Linear interactions including wave-energy extraction". Ed. Cambridge University Press
- Boya de Las Palmas Este - Conjunto de Datos: REDCOS (CODIGO B.D. 1414/LONGITUD -15.397 E/LATITUD 28.067 N/PROFUNDIDAD 48 m)" BANCO DE DATOS OCEANOGRÁFICOS DE PUERTOS DEL ESTADO - AREA DE MEDIO FÍSICO - www.puertos.es. 2011
- Conde, J.J. (1982) "Estimación paramétrica del oleaje JONSWAP I" y "Estimación paramétrica del oleaje JONSWAP II". *Revista de Obras Públicas*. Noviembre 1982, pag. 715-720 y Diciembre 1982, pag. 783-797.
- Blanco, M., Navarro, G., Lafoz, M. (2009) "Control of power electronics driving a switched reluctance linear generator in wave energy applications" *Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on*. Date: 8-10 Sept. 2009.