

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**AVANCES EN LA EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA
UNDIMOTRIZ EN URUGUAY**

Rodrigo Alonso⁽¹⁾, Eduardo Goldsztn⁽²⁾ y Luís Teixeira⁽¹⁾

*(1) Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, (2) Instituto de Mecánica y Producción Industrial.
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.
ralonso@fing.edu.uy, egoldsztn@gmail.com y luistei@fing.edu.uy .*

RESUMEN: (1^{era}. hoja)

Este artículo presenta los avances obtenidos en la evaluación de la utilización de la energía undimotriz en Uruguay. Se identifican las tecnologías más desarrolladas y en particular aquellas cuya aplicación se considera acorde a la realidad de Uruguay. En lo que respecta a la evaluación del recurso, se implementó el modelo de generación y propagación del oleaje Wavewatch III. El modelo es alimentado con los datos de reanálisis NCEP-CFSR correspondientes al campo de viento en superficie. Mediante el mismo, se obtienen los estados de mar en la zona de interés con una resolución de 1km x 1km. Los estados de mar obtenidos en las simulaciones se contrastaron con los estados de mar registrados por mediciones in-situ y con datos satelitales altimétricos, obteniéndose muy buenos resultados. Finalmente se presenta la modelación física a escala 1:20 de un dispositivo de conversión de la energía del oleaje del tipo placa o sistema de impacto, experiencia desarrollada en pos de generar capacidades para el estudio de este tipo de dispositivos.

ABSTRACT: (1^{era}. hoja)

The main advances in the assessment of wave power available in Uruguay are shown in this paper. A review of the state of the art of wave energy converters devices was done and the most appropriate to Uruguayan conditions were indentified. The full-spectral third-generation wind-wave model Wavewatch III was used to obtain the wave climate with a spatial resolution of 1km in the Uruguayan continental platform. Wave conditions obtained by the model show a good agreement with in-situ measurements and altimetry satellite data. Finally, a physical model (1:20) of an oscillating wave surge converter was implemented in order to have a first experience of WEC analysis in the laboratory.

PALABRAS CLAVES: Energía Undimotriz, Modelo de generación y propagación del oleaje, Dispositivos de conversión de la energía del oleaje (WEC)

INTRODUCCIÓN

A partir del incremento de los precios del petróleo en 1973 comenzó un proceso intensivo de investigación sobre la posibilidad de aprovechamiento de fuentes de energía renovables. Si bien, desde los inicios de dicho período ha resultado claro que la obtención de energía del mar es una tarea difícil, en la actualidad la obtención de energía de las olas es objeto de creciente atención y numerosos países realizan esfuerzos en investigación, desarrollo e innovación para su aprovechamiento. Diferentes esquemas tecnológicos han demostrado ser aplicables en gran escala bajo condiciones de operación exigentes y ya hay un número de plantas comerciales en construcción y algunas en operación en Europa, Estados Unidos y Australia. Sin embargo, es necesaria una amplia labor de I+D+i, con el fin de conseguir la mejora continua de la tecnología de conversión y así lograr su competitividad en el mercado energético mundial.

Uruguay no cuenta con la explotación de recursos energéticos fósiles y ha maximizado el uso de sus recursos macro-hidráulicos; resulta por lo tanto imperioso explotar las energías renovables autóctonas. Aprovechamientos micro-hidráulicos, energía eólica, biomasa y biocombustibles, son opciones maduras tecnológicamente y, por lo tanto, las que primero deben explotarse. En el largo plazo sin embargo, todas las fuentes renovables deben ser consideradas y, de ser factible, explotadas en forma sostenible. En este contexto el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Universidad de la República (Udelar), ha comenzado a trabajar desde inicios del 2011 en la exploración de la posibilidad de aprovechar la energía de las olas en Uruguay mediante un proyecto cuyos objetivos generales son:

1. Analizar el espectro de tecnologías existentes y en desarrollo a los efectos de identificar las líneas conceptuales más promisorias y adaptables a Uruguay.
2. Caracterizar el recurso undimotriz evaluando su potencial.
3. Desarrollar capacidades para estudiar mediante modelación física y numérica dispositivos de conversión de la energía de las olas (WEC, por su sigla en inglés).

En este artículo se presentan los avances obtenidos por el IMFIA en el marco de dicho proyecto. Se presenta la metodología seguida en cada caso para dar cumplimiento a los objetivos planteados así como los principales resultados obtenidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de tecnologías

La identificación de las tecnologías más desarrolladas se realizó siguiendo la metodología propuesta en el reporte de la consultoría realizada por la empresa Garrad Hassan Inc. (2009). La misma, requiere realizar una búsqueda exhaustiva de WECs sobre los que se hayan realizado publicaciones, luego se analiza el estado de desarrollo de cada una en función del cumplimiento de etapas comunes y esperables en esta clase de proyectos. Las etapas de desarrollo consideradas se presentan en la Tabla 1. Finalmente las tecnologías identificadas como las más desarrolladas son evaluadas considerando las fortalezas y debilidades del país para poder aplicarlas.

Tabla 1.- Etapas de desarrollo analizadas.

Dimensión del emprendimiento	Desarrollo de la tecnología	Avances en modelación física y numérica	Diseño de prototipo
a) Existencia en el mercado (al menos cinco años)	e) Método de extracción de potencia	h) Modelación física	k) Verificación independiente
b) Empleo de personal (más de 10 personas)			
c) Inversión realizada (más de US\$ 1,5 M)	f) Estrategia de instalación	i) Modelación numérica	l) Construcción de un prototipo a escala completa
d) Inversión realizada (más de US\$ 15 M)	g) Estrategia de operación y mantenimiento	j) Instalación de prototipo (Escala mayor a 1:5)	

Evaluación del recurso

En lo que respecta a la evaluación del recurso, se implementó el modelo numérico de propagación y generación del oleaje Wavewatch III (Tolman 1997, 1999a, 2009). Modelo denominado de tercera generación, desarrollado en NOAA/NCEP. El modelo, implementado en el cluster informático de la Facultad de Ingeniería (UdelaR), permite, a partir de la información del campo de viento en superficie, calcular el estado de mar, con una resolución espacial de 1 km aproximadamente, en gran parte del Río de la Plata y en una amplia zona de la plataforma continental de Uruguay (Figura 1, derecha). Los datos de viento empleados corresponden a los datos de reanálisis NCEP-CFSR (Saha et.al., 2010) cuya resolución espacial es de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ y su resolución temporal es de 6 horas. El dominio de cálculo está conformado por una serie de grillas anidadas que realizan los cálculos en simultáneo, intercambiando información según el esquema denominado anidamiento en dos direcciones. La grilla más gruesa es una grilla global de $1^\circ \times 1^\circ$ mientras que la más fina cubre la región de interés con una resolución de 1 min x 1 min. La localización y resolución de las grillas de cálculo se presenta en la Figura 1 (izq.) mientras que en la Figura 1 (der.) se presenta la grilla de mayor resolución que se corresponde con la zona de interés del proyecto.

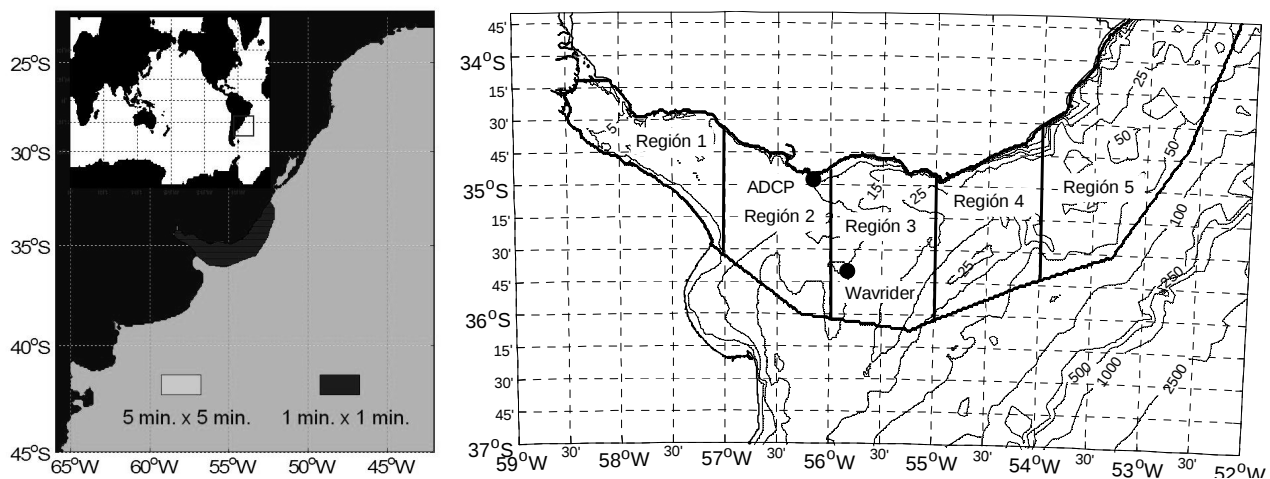


Figura 1.- Izquierda: Grillas de cálculo. Global ($1^\circ \times 1^\circ$), Regional (5min x 5 min) y local (1min x 1min). Derecha: Delimitación de la grilla de cálculo local (1min x 1min) y regiones establecidas para comparar los resultados del modelo

El modelo se encuentra implementado y su ejecución conlleva tiempos razonables. Los resultados obtenidos fueron contrastados con mediciones in-situ y datos satelitales. Las mediciones in-situ corresponden a una boya del tipo Waverider de la empresa Datawell instalada y operada por la empresa Hidrovía S.A y a un perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés) instalado, operado y mantenido entre el IMFIA, la Intendencia de Montevideo (IM) y el Servicio de Oceanografía e Hidrografía de la Armada (SOHMA). En la Figura 2 se indica la localización de estos dos equipos de medición superpuesto con la batimetría de la zona. Los datos satelitales fueron obtenidos de la base de datos del proyecto GlobWave (Ash et.al, 2010). La base está conformada por datos provenientes de distintos satélites, uniformizados a un mismo formato y con información sobre la calidad del dato. Los satélites que conforman la base son 8 y permiten obtener información continua durante el período 1991-2009. En la Tabla 2 se presenta información sobre estos 8 satélites. A los efectos de visualizar la cobertura espacial de los datos, sobre el mapa de la Figura 2 se superponen las trayectorias en la región del satélite Envisat, uno de los satélites que conforman la base de datos.

Tabla 2.- Características de los datos históricos altimétricos de la base de datos L2P del proyecto GlobWave.

Satélite	Período disponible	Referencia oficial
ESA ERS-1	1/2/92 -2/6/96	CERSAT http://cersat.ifremer.fr
ESA ERS-2	15/5/95-22/6/2003	CERSAT http://cersat.ifremer.fr
ESA Envisat	26/8/2002-22/3/2008	ESA www.esa.int
CNES/NASA Topex-Poseidon	25/9/92 -8/10/05	AVISO www.aviso.oceanobs.com PODAAC http://podaac.jpl.nasa.gov
CNES/NASA Jason1	15/01/2002 -12/2010	AVISO www.aviso.oceanobs.com PODAAC http://podaac.jpl.nasa.gov
CNES/NASA Jason2	12/2008 -12/2010	AVISO www.aviso.oceanobs.com PODAAC www.eumetsat.int
US Navy Geosat	31/3/1985- 30/12/1989	NOAA www.noaa.gov
US Navy/NOAA GFO	8/1/2000-23/7/2008	NOAA www.noaa.gov

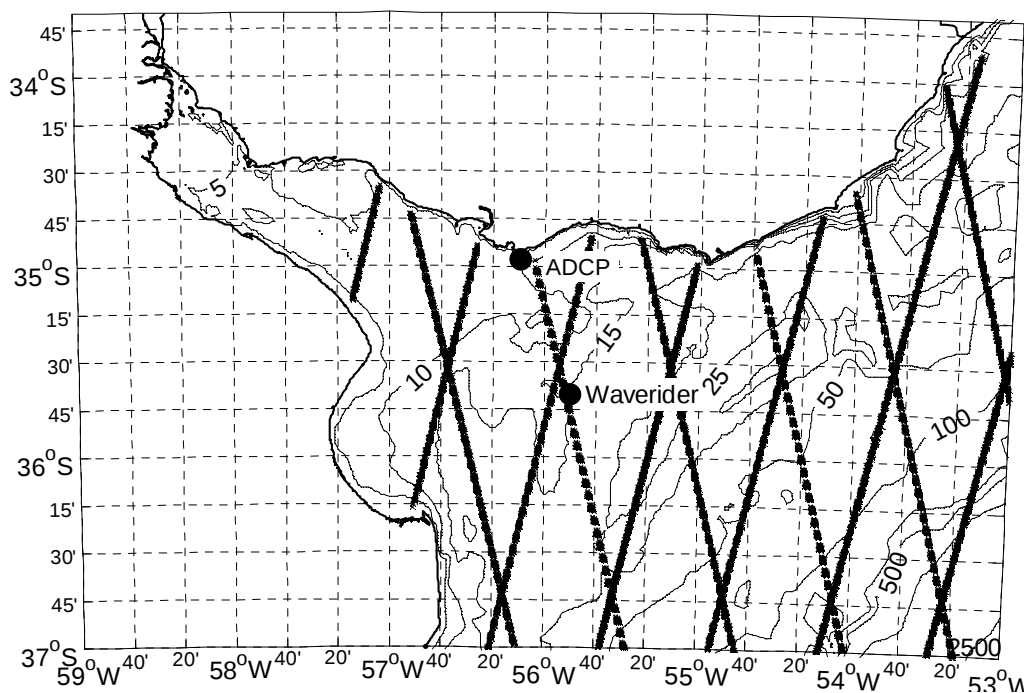


Figura 2.- Localización de los puntos de medición in-situ y trayectorias del satélite Envisat.

Previo a analizar los resultados del modelo, se analizó la concordancia entre los datos satelitales y las mediciones in-situ. Para ello, se implementó un algoritmo de búsqueda que considera que dos medidas registraron el mismo estado de mar si estas se corresponden con puntos que no distan más de 15 km entre sí y con instantes de tiempo que no difieren en más de una hora y media entre sí. En caso de que más de un dato satelital cumpla con esta condición, se selecciona aquel de mayor cercanía espacial a la medida in-situ. De esta forma se obtuvo para comparar con las medidas de la boya Waverider, 157 datos correspondientes al satélite Envisat, 36 datos del satélite ERS2, 308 datos del satélite Jason1 y 155 datos del satélite Topex/Poseidon. En cuanto a las medidas del ADCP, debido a la fecha de las mismas y a su proximidad con la costa, no se encontraron datos satelitales plausibles a ser comparados siguiendo el criterio de proximidad temporal y espacial establecido.

El Wavewatch III brinda la posibilidad de ser implementado considerando tres formas distintas de representar los procesos de aporte de energía por el viento y disipación de energía por whitecapping. Estas tres formas se identifican en este artículo como ST1 (WAMDIG,1988), ST2 (Tolman y Chalikov,1996) y ST3 (Ardhuin,2008). Se realizó la simulación del período 01/2005 - 06/2005 con cada una de las tres modalidades. Los resultados obtenidos se compararon con las mediciones in-situ de la boya Waverider y del ADCP, así como con los datos satelitales. En base a los resultados obtenidos se escogió la modalidad que mejor representa los registros in-situ y

satelitales. Finalmente, para la versión escogida, se realizaron modificaciones en los parámetros involucrados en el proceso de whitecapping procurando mejorar aún más los resultados del modelo.

Las diferencias obtenidas al comparar tanto los datos satelitales con las medidas in-situ, así como los resultados del modelo con las medidas in-situ o satelitales, se cuantificaron mediante el cálculo de los siguientes descriptores estadísticos:

- Error medio (EM): $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - O_i) ..$
- Error absoluto medio (MAE): $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - O_i|$
- Error cuadrático medio (RMSE): $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - O_i)^2}$
- Coeficiente de correlación (r): $\frac{\sum(Y-\bar{Y})-(o-\bar{o})}{\sqrt{\sum(Y-\bar{Y})^2} \sqrt{\sum(o-\bar{o})^2}}$

Donde Y_i y O_i son las dos series de datos que se comparan y N es la cantidad de datos de las mismas.

Modelo Físico

Una primera experiencia en la modelación física de WECs se obtuvo a partir de la implementación de un modelo a escala 1:20 de un dispositivo del tipo placa o sistema de impacto. El mismo consiste en una placa que gira en torno a un eje horizontal ubicado en uno de sus extremos, mientras que el otro extremo se encuentra libre y cuenta con un elemento de flotación. La placa tiene un pistón acoplado que se desplaza acompañando el movimiento de la misma. Al pistón se conectan dos pequeños tubos, uno oficia de toma y el otro de impulsión. La conexión de cada tubo cuenta con una válvula de retención que garantiza un único sentido del flujo. De esta forma el dispositivo permite convertir parte de la energía del oleaje incidente en energía contenida en un flujo a presión en el tubo de la impulsión. El flujo a presión puede ser convertido a energía eléctrica mediante dispositivos conocidos como por ejemplo una turbina Pelton. En la Figura 3 se muestran fotografías del dispositivo.



Figura 3.- Vista lateral (izq.) y frontal (der.) del dispositivo ensayado en la configuración placa horizontal con escollera detrás.

El modelo del dispositivo se instaló en un canal vidriado de 12 metros de largo por 0.5 metros de ancho que en uno de sus extremos cuenta con un bateolas de pala que genera oleaje regular. Se midió la potencia del flujo a presión en el tubo de impulsión, haciéndolo trabajar contra un tanque hidroneumático a presión constante o contra un estrangulamiento. Se ensayaron las distintas configuraciones que se muestran en la Figura 4. Éstas son: placa horizontal próxima a la superficie (Configuración 1), placa horizontal próxima a la superficie con una escollera rebasable detrás (Configuración 3), con una escollera no rebasable detrás (Configuración 4), placa horizontal

sumergida (Configuración 2) y placa vertical con el nivel medio del agua por encima del flotador (Configuración 5), placa vertical con el nivel medio del agua en el punto medio del flotador (Configuración 6) y placa vertical con el nivel medio por debajo del flotador (Configuración 7).

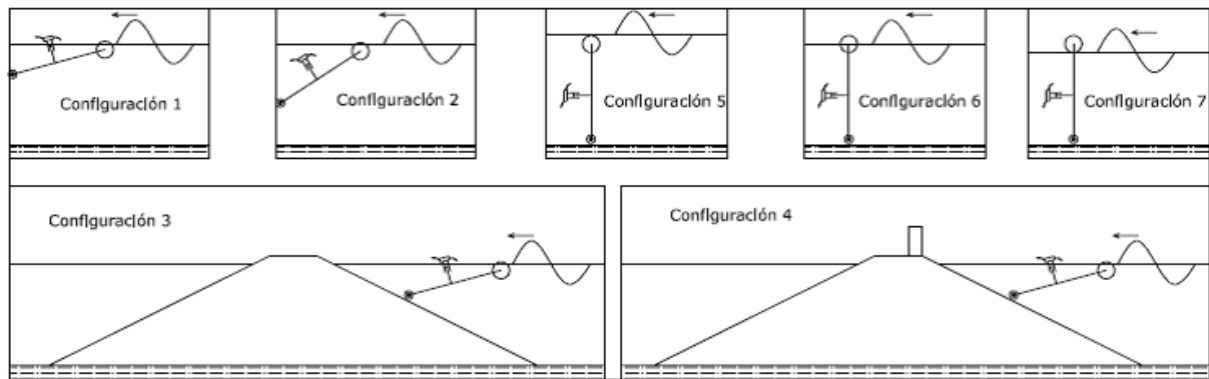


Figura 4.- Esquema de las distintas configuraciones ensayadas.

Los ensayos se realizaron fijando condiciones de oleaje incidente de forma que se correspondan con condiciones de oleaje en prototipo de ocurrencia frecuente en la costa atlántica de Uruguay. La escala de longitudes del modelo es 1:20 y respetando la similitud de Froude la escala de tiempo es $1:\sqrt{20}$. De esta forma las condiciones establecidas fueron:

- Altura de ola: $H_{\text{modelo}}=6 - 7\text{cm}$, $H_{\text{prototipo}} = 1.5\text{m} - 1.75\text{m}$.
- Período: $T_{\text{modelo}}=1.8 \text{ s}$, $T_{\text{prototipo}} = 8 \text{ s}$.
- Profundidad: $d_{\text{modelo}}= 31.5 \text{ cm.} - 53 \text{ cm.}$, $d_{\text{prototipo}} = 6.3\text{m} - 10.6\text{m}$.

RESULTADOS

Análisis de tecnologías

Del análisis del espectro de las tecnologías existentes surge que, considerando las características de Uruguay, los dispositivos más convenientes deben ser instalaciones robustas, de mantenimiento sencillo, localizadas en la costa o “nearshore”, con un alto porcentaje de sus componentes por encima de la línea de flotación. Destacándose los dispositivos del tipo: Columna de agua oscilante (OWC), sistema de impacto o por rebosamiento.

Evaluación del recurso

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos al comparar las medidas de la boya Waverider con los datos satelitales. En el gráfico de la Figura 5 se presenta la comparación con los datos del satélite Envisat.

Tabla 3.- Comparación entre los datos satelitales y los registrados por la boya waverider.

	ME (m)	MAE (m)	RMSE (m)	r
Envisat	-0.01	0.12	0.16	0.96
Ers2	-0.04	0.21	0.27	0.84
Jason1	-0.07	0.18	0.23	0.91
Topex	0.06	0.11	0.18	0.93

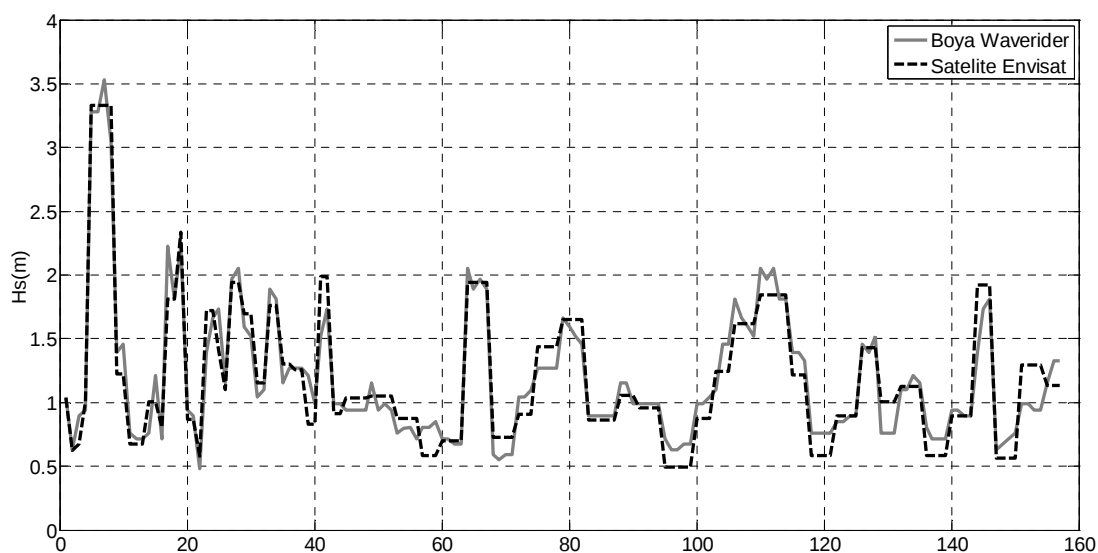


Figura 5.- Comparación entre los datos altimétricos del satélite Envisat y las medidas de la. Boya Waverider. Altura de ola significativa.

Se observa una muy buena concordancia entre los datos satelitales y los datos medidos por la boya. Ambas fuentes de información fueron utilizadas para calibrar el modelo. A continuación se presentan los resultados obtenidos con las tres modalidades del modelo comparados con las medidas de la boya Waverider (Tabla 4), comparados con las medidas del ADCP (Tabla 5) y comparados con los datos satelitales (Figura 6). En esta última comparación se consideraron las regiones delimitadas en la Figura 1 (der.).

Tabla 4.-. Comparación entre los resultados de H_s (m) del modelo y las medidas de la boya Waverider.

	ME	MAE	RMSE	r
ST1	-0,00	0,19	0,25	0,88
ST2	-0,06	0,20	0,26	0,88
ST3	-0,02	0,18	0,24	0,90

Tabla 5.-. Comparación entre los resultados de H_s (m) del modelo y las medidas del ADCP.

	ME	MAE	RMSE	r
ST1	0,00	0,14	0,20	0,84
ST2	-0,09	0,16	0,22	0,84
ST3	-0,04	0,14	0,21	0,83

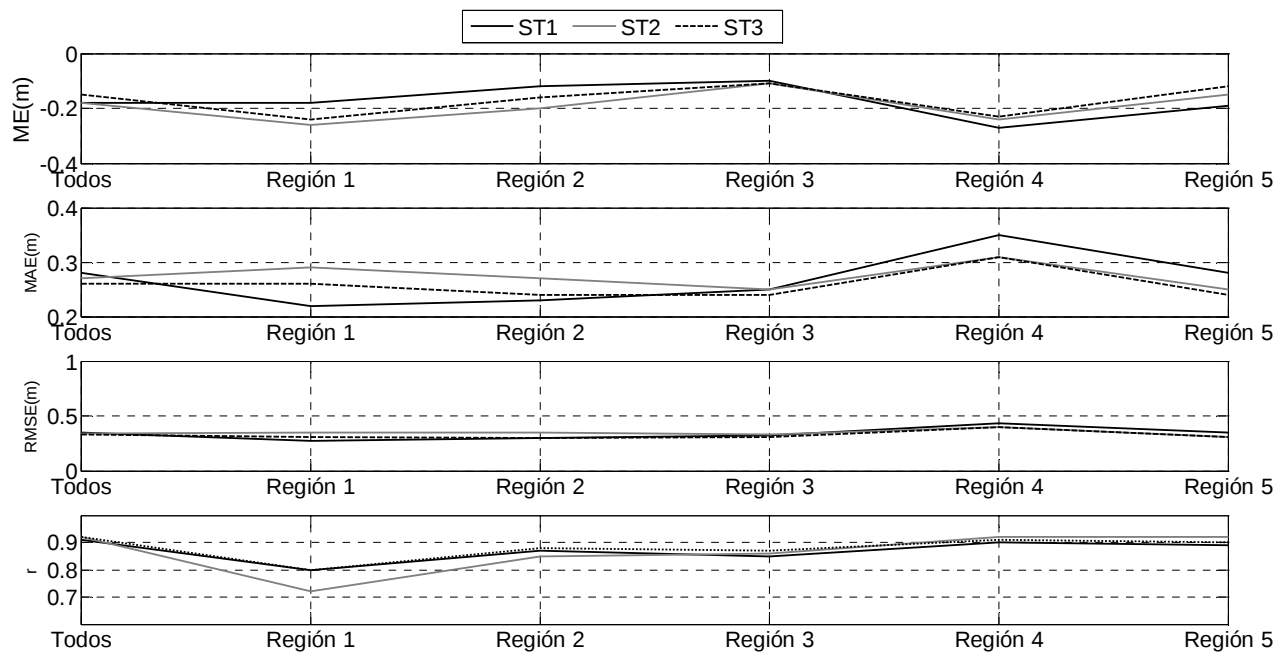


Figura 6.- Comparación entre los resultados de Hs (m) del modelo y los datos satelitales.

Se observa que con las tres implementaciones del modelo se obtuvieron buenos resultados en cuanto se obtuvieron errores bajos y correlaciones altas. Se optó por la implementación ST3 por ser la que presentó mejores resultados en las regiones 4 y 5, regiones de mayor potencial undimotriz y por lo tanto de mayor interés para el proyecto.

En la implementación escogida (ST3) el proceso de disipación de energía por withecapping está representado mediante la siguiente expresión:

$$S_{ds}(k, \theta) = C_{ds} \cdot f(k_i, \theta_j) \cdot N(k, \theta) \quad [1]$$

Donde $S_{ds}(k, \theta)$ y $N(k, \theta)$ son la densidad de energía espectral disipada por whitecapping y la densidad de energía espectral correspondientes al número de onda k y la dirección θ . Mientras que $f(k_i, \theta_j)$ es una función de todo el espectro y C_{ds} una constante adimensional cuyo valor por defecto en el modelo es -2.1. Se procedió a variar el valor de esta constante procurando disminuir los errores obtenidos inicialmente. Los mejores resultados se obtuvieron para $C_{ds} = -1.5$ y se presentan en la Tabla 6 y Figura 7.

Tabla 6.- Comparación entre los resultados de Hs (m) del modelo (ST3 y $C_{ds}=-1.5$) con las medidas de la boyta Waverider y con los datos satelitales.

	ME	MAE	RMSE	r
Boyta Waverider	0,04	0,11	0,22	0,96
Datos satelitales. Todo el dominio	-0.08	0,22	0,29	0,90
Datos satelitales. Región 5.	0	0,22	0,29	0,90

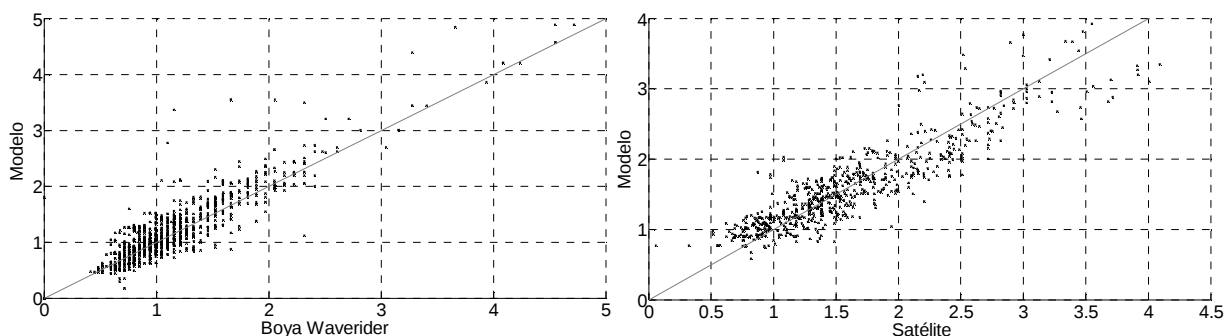


Figura 7.- Comparación entre los resultados de Hs (m) del modelo (ST3 y $C_{ds}=-1.5$) con las medidas de la boyta Waverider (izquierda) y con los datos satelitales (derecha).

Modelo Físico

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos al ensayar la configuración 3 haciendo trabajar al dispositivo contra un tanque hidroneumático a presión constante. El eje de las abscisas corresponde a la presión en el tanque mientras que el eje de las ordenadas corresponde a la potencia entregada por el dispositivo calculada multiplicando el caudal medio impulsado por la presión en el tanque. El valor máximo tiene lugar cuando la presión en la impulsión comienza a afectar el movimiento de la placa. Para presiones mayores el recorrido de la placa disminuye y por lo tanto disminuye el caudal impulsado y la potencia entregada.

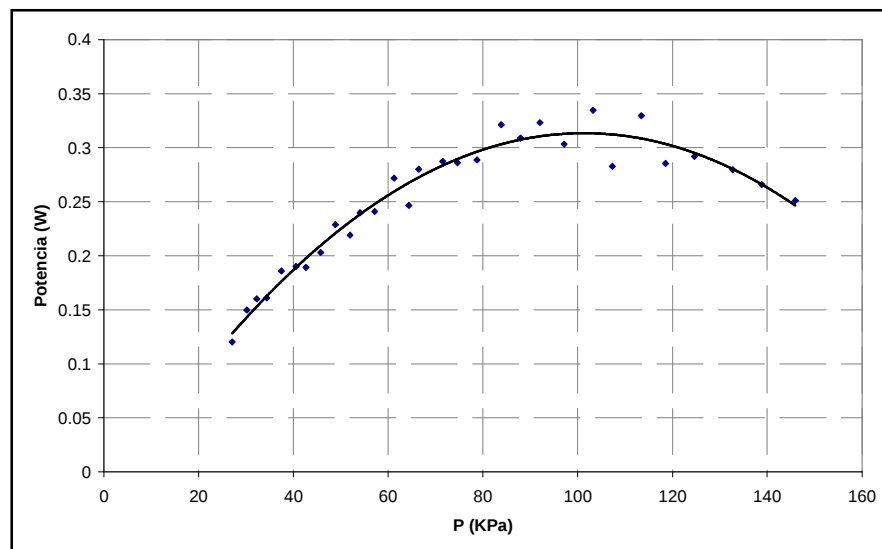


Figura 8.- Resultados del ensayo del dispositivo trabajando contra el tanque hidroneumático. Configuración 3

En la Tabla 7 se presenta un resumen de los resultados obtenidos al ensayar el resto de las configuraciones.

Tabla 7.- Resultados obtenidos mediante el modelo físico.

Configuración	Potencia incidente	Potencia aprovechada	Rendimiento
Configuración 1	3.73W	0.22W	5.8%
Configuración 2	3.76W	0.17W	4.5%
Configuración 3	3.76W	0.32W	8%
Configuración 4	4.1W	0.3W	8%
Configuración 5	4W	0.32W	8%
Configuración 6	4.17W	0.22W	5.2%
Configuración 7	4.11W	0.48W	11.7%

Se observa que el rendimiento del dispositivo ensayado se encontró entre el 4% y 12% dependiendo de la configuración. Los rendimientos más altos se obtuvieron con la placa dispuesta verticalmente y con el nivel de agua inmediatamente debajo del flotador. Modificaciones en dicho nivel, tanto que hagan emerger o sumergir más la placa, producen una disminución en el rendimiento. Mientras que para la placa dispuesta horizontalmente los rendimientos más altos se obtuvieron con la presencia de una escollera detrás.

CONCLUSIONES

Se presentaron los principales avances obtenidos por el IMFIA en la evaluación de la utilización de la energía undimotriz en Uruguay.

Se identificaron las tecnologías para convertir la energía del oleaje de mayor desarrollo y se procuró identificar aquellas cuya aplicación se adecúa mejor a las características de Uruguay. Si bien no se identificó una tecnología concreta que prevalezca claramente sobre las demás, se considera que los dispositivos más convenientes deben ser instalaciones robustas, de mantenimiento sencillo, localizadas en la costa o “nearshore”, con un alto porcentaje de sus componentes por encima de la línea de flotación. Destacándose los dispositivos del tipo: Columna de agua oscilante (OWC), sistema de impacto o por rebosamiento

Para la evaluación del recurso, se implementó el modelo de generación y propagación del oleaje Wavewatch III. El modelo permite obtener los estados de mar en gran parte del Río de la Plata y la plataforma continental uruguaya con una resolución espacial de aproximadamente 1 km. Los resultados obtenidos se contrastaron con mediciones in-situ y con datos satelitales altimétricos obteniéndose muy buenos resultados. El modelo está siendo utilizado para generar el clima de olas en toda la zona de interés y los resultados permitirán una caracterización exhaustiva del recurso.

Se estudió mediante modelación física un dispositivo de conversión de la energía del oleaje del tipo placa. A partir de los resultados obtenidos se obtuvo una idea primaria del rendimiento que se puede obtener con este tipo de dispositivos trabajando en condiciones de oleaje razonables para la costa atlántica de Uruguay. Este estudio, si bien tuvo un carácter exploratorio, constituye un primer paso para el IMFIA en el estudio mediante modelación física de dispositivos de conversión de la energía del oleaje. En la medida que Uruguay recorra el camino de la explotación undimotriz, el aprendizaje adquirido permitirá afrontar con experiencia acumulada los estudios de laboratorio que necesariamente requerirán emprendimientos de esta índole

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ash, E.R. and Collard F.** (2010) *Product User Guide, ESA Globwave Project Deliverable D9*, Logica, UK.
- Tolman, H.L.** (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14.*,USA.
- Saha, S., et.al.** (2010). “The NCEP Climate Forecast System Reanalysis”. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 91, No. 8, pp. 1015-1058.