

**ANÁLISIS DE SISTEMA DE CONVERTORES FLUÍDO-
DINÁMICOS DE ENERGÍA RENOVABLE PARA LA PATAGONIA
AUSTRAL DE ARGENTINA**

**MSC. Ing. Carlos V. M. Labriola, Docente investigador UNPA,
carloslabriola54@yahoo.com.ar**

**Cecilia Elizabeth Peralta, alumna de Ing. Electromecánica UNPA,
ceciliaperalta_sc@hotmail.com**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PATAGONIA AUSTRAL
UNIDAD ACADÉMICA CALETA OLIVIA**

CALETA OLIVIA, 24 FEBRERO DE 2012

Resumen

El potencial de energía en mares y océanos se puede clasificar de distintas formas, por ejemplo: * La energía de las mareas ó Mareomotriz * La energía de las corrientes marinas * La energía de las olas ó Undimotriz * La energía térmica oceánica (OTEC). De estas formas de energía oceánica, tres son posibles en la zona Atlántica de nuestra Patagonia Austral, la Mareomotriz, la Undimotriz y la de corrientes marinas. La Energía

Mareomotriz se da desde Viedma hasta Tierra del Fuego con amplitudes de mareas de 4m hasta 20m, la Energía de las Olas se da en la costa de Chubut y Santa Cruz con potenciales de 10 a 30kW/m lineal de frente de ola y el aprovechamiento de las corrientes marinas se puede dar en lugares puntuales como ser la desembocadura del río Deseado o la de Río Gallegos.

Para estas Fuentes de Energía se está realizando un banco de pruebas de modelos convertidores de las mismas a Energía Eléctrica, en la Unidad Académica Caleta Olivia (UACO) de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA). Este banco dispondrá de dos canales de ensayos hidrodinámicos uno para energía de las corrientes marinas y otro para las olas. El primero dispondrá de una bomba de circulación con velocidad de fluido variable entre 0 y 4m/s. El banco para olas tendrá un sistema de batido del agua para producir ondas de amplitud y período variable. Además se están dimensionando dos modelos de convertidores de energía oceánica. Uno es una turbina, tipo eólica sumergida y el otro modelo es de tubo electromecánico oscilante como convertidor energético de las olas.

Palabras Clave: oceánica, mareomotriz, olas, eólica, modelos.

Introducción

Los océanos nos proveen de distintas formas de energía: mareomotriz, de las olas, de las corrientes marinas y la térmica oceánica. Las cuales poseen distintas características y formas de transformación. La Energía Mareomotriz se refiere a la provista por el movimiento de grandes masas de agua producido por las mareas. Es una Fuente Renovable previsible por su periodicidad diaria y en su amplitud según la posición del Sol, la Luna y latitud. Para la Energía Mareomotriz, como el caso del potencial en rías, puertos y desembocadura de ríos la costa de Santa Cruz [1], pueden utilizarse los mismos conversores de energía que para las corrientes marinas.

La Energía de las Corrientes Marinas es otra fuente de recurso energético, en la cual se aprovecha la energía cinética del flujo de agua, si su velocidad es aceptable de manera que sean capaces de accionar las turbinas generadoras. Las corrientes marinas mareomotrices u oceánicas son altamente predecibles y mantienen sus caudales conocidos y cuasi constantes según la época del año. Posee una alta capacidad energética pues la densidad del agua del mar tiene de promedio el valor de 1.012 Kg/m^3 lo que se traduce en que una corriente de agua marina que discurre a una velocidad de 2 m/s posee por cada m^2 de área perpendicular a su flujo, la misma energía que una corriente eólica de aprox. 20 m/s .

Las turbinas de mareas utilizan las corrientes de mareas que se mueven con velocidades entre 2 y 3 m/s (4 a 6 nudos) generando entre $4,09$ y $13,6 \text{ kW/m}^2$. La Energía Undimotriz es aquella producida a partir del movimiento de las olas. El viento transfiere energía a la superficie del océano, que se manifiesta en forma de ondas en la superficie. La energía de las olas es la que proveen las ondas en el agua (superficiales o a profundidad) de los mares y océanos e incluso en grandes lagos. Estas olas son producto del viento el cual tiene una previsibilidad a lo sumo de 72hs . Se define como olas a las ondas cuyos períodos están comprendidos aproximadamente entre 1 y 30 segundos [2]. Hay tres tipos de dispositivo conversores de energía de las olas: los basculantes flotantes, los sumergidos y los que están en las orillas. La Energía Térmica Oceánica se basa en los gradientes de temperatura entre las profundidades del océano (6°C) y la superficie en las zonas tropicales y ecuatoriales (15 a 25°C). Son lentas pero de gran caudal y se proponen turbinas con calentamiento de fluidos de bajo punto de ebullición, en ciclo binario (evaporación de alcoholes como fluido de trabajo e intercambiador de calor) para la generación de electricidad. También están las turbinas con eje vertical de rotación lenta producida por la masa convectiva de agua de gran caudal.

Para estudiar la Conversión de Energía de las Fuentes de Energía Oceánica de la Costa Austral de la Patagonia Atlántica, el Laboratorio de Energía Renovable de la UACO-UNPA está desarrollando dos modelos de conversión de Energía Oceánica. El primero es para conversión de la Energía Corrientes Marinas basado en turbinas eólicas sumergidas, el cual al disponer de una densidad del agua 800 veces mayor que la del aire permite obtener similares potencias con menores diámetros de rotor, a pesar de trabajar a velocidades menores de fluido (3m/s en agua y 10 a 20m/s en aire). Los desarrollos más relevantes en el tema los ha realizado el Reino Unido con Turbinas de hasta 400kW en operación en el mercado. En nuestro caso estamos desarrollando en la UACO-UNPA un modelo de hasta 2kW . En el caso de la Undimotriz se propone utilizar un tubo electromecánico basculante flotante con imanes permanentes de Ne-Fe-Bo y solenoides de inducción que proporcione unos cientos de W, para aplicación no sólo en el mar sino en grandes lagos. La UACO dispone de una pileta de hormigón armado ($\text{H}^\circ\text{A}^\circ$), la cual se reciclará, convirtiéndola en dos canales de ensayos hidrodinámicos, un canal para ensayo de modelos de turbinas eólicas sumergidas y el otro para sistemas basculantes de las olas.

En el caso de ensayo de turbinas sumergidas se intentará proporcionar un flujo uniforme, (o sea trabajar con velocidad constante a lo largo del banco de ensayos) el flujo de agua se proveerá mediante una turbina accionada por motor asincrónico conectado a regulador de velocidad que permitirá trabajar con una gama de velocidades semejantes al de flujo de las corrientes marinas.

1 Marcos de Referencia

1.1 Marco Histórico

Hasta mediados de 1970s para emprendimientos mareomotrices se utilizaban las turbinas bulbo, muy voluminosas y relación costo/kW generado alta. Además necesitaban una estructura de hormigón tipo dique de centrales compensadoras con gran impacto ambiental para la fauna ictícola a pesar que el dique era multipropósito (carretera, viaducto ferroviario, etc.) y con esclusa para embarcaciones. A mediados de los 1980s apareció la turbina Straflo, de menor tamaño, con rotor hidráulico y eléctrico en una misma pieza pero necesitaba de un dique de H°A° de similares características que el anterior. A mediados de los 1990s surgió la idea de las turbinas eólicas sumergidas, con la

ventaja de no necesitar o minimizar las estructuras de H°A° que cortan el paso del agua y de giro muy lento.

1.2 Marco Conceptual

En relación a las disposiciones técnicas la utilización de la nomenclatura adecuada, hacen del informe técnico del proyecto de investigación un documento legible para cualquier persona interesada.

H_s : altura significativa de ola (m).

T : período de la ola (s).

α : Coeficiente de transferencia de energía de las olas (s/u).

P_1 : Potencia dada por el conversor (W).

C_p : Coeficiente de extracción de Potencia del rotor sobre la corriente marina.

η_m : rendimiento del multiplicador.

η_g : rendimiento del generador.

$\rho_{a.m.}$: densidad del agua de mar.

A_1 : Área barrida por el rotor de la turbina mareomotriz.

v_1 : velocidad del fluido (agua de mar).

A_r : Área neta del rotor.

$F_{a.m.-rotor}$: Fuerza de agua de mar sobre el rotor de la turbina

1.3 Marco Teórico

El desarrollo de este trabajo se realiza detallando la disponibilidad de recursos técnicos en la UACO-UNPA, la información obtenida hasta ahora sobre los recursos mareomotrices y undimotriz para la zona de Caleta Olivia-Caleta Paula y el desarrollo de los modelos a ensayar en banco de ensayos proyectado.

2 Resultados, Análisis y Discusión

2.1 Materiales y Métodos

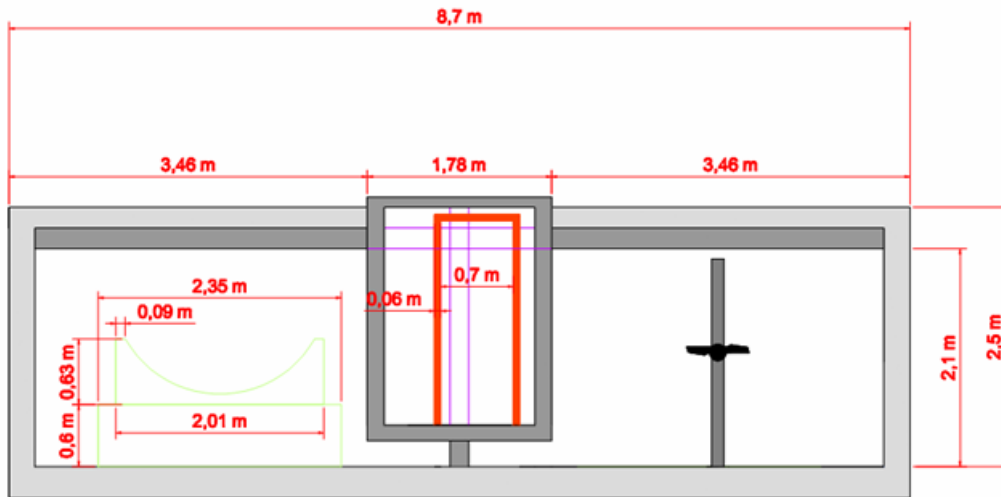


Fig. 3: Estructura de H°A° disponibles en UACO, Santa Cruz.

El sistema de las olas va en la estructura aladaña al banco de corrientes marinas de H°A°, la cual posee un generador de olas en un extremo del tipo tambor oval, de largo igual al ancho máximo permitido por la batea con un sistema electromecánico que le permita subir y bajar periódicamente en un lado para generar las olas. El fondo será de pendiente modificable para simular distintas situaciones de rugosidad de la costa.

2.2 Resultados

Estimación desarrollo y modelado de las olas.

El lugar elegido de estudio es Caleta Paula, Santa Cruz cuyos datos están en la Tabla I. El Puerto de Caleta Paula (Fig.4), se encuentra ubicado a unos 3,5 km de Caleta Olivia, la mayor parte de la obra portuaria está ejecutada en tierra, es decir como puerto interior, en un predio de 110 ha, en correspondencia con una caleta natural, siendo inaugurado y habilitado en forma definitiva el 24/09/98.

TABLA I - DATOS DE CALETA PAULA, SANTA CRUZ

Lugar	Densidad del agua de mar	Ubicación Geográfica	Intensidad de corrientes promedios	Amplitud de mareas máximas
Caleta Paula (Puerto de Caleta Olivia)	1025 kg/m ³	Lat: 46° 28' S Long: 67° 29' W	5/6 nudos (2,6 a 3,08 m/s)	5,6 metros

La titularidad del puerto corresponde a la Unidad Ejecutora Portuaria de la Provincia de Santa Cruz (UN.E.PO.Sc). y es la que ha provisto los datos correspondientes a periodos y alturas de olas. Obteniéndose potencias medias de 7,38 kW/m cuyo calculo se describe en ítem siguiente.



Fig. 4. Foto Satelital de Caleta Paula, Santa Cruz.

Otras estimaciones dan valores hasta 30kW/m de longitud de cresta de ola para aguas profundas, tal como muestra la Fig. 5, [3]. La manifestación ondulatoria superficial la provee el movimiento circular u oval de las partículas de fluido inmediatamente debajo de la onda de superficie [4]. Se puede apreciar en la Fig. 6, que a medida que se acerca a la costa la rugosidad del lecho marino le hace perder energía (menor amplitud) y por eso el cambio en el movimiento de partículas de fluido sumergido de forma de circular a oval [2].

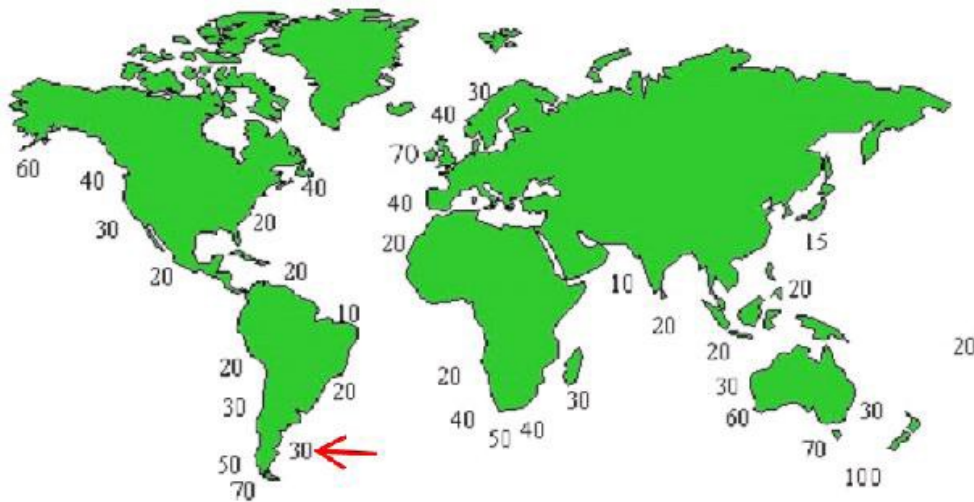


Fig. 5. Distribución de energía del oleaje para aguas profundas en kW/m de longitud de cresta de ola

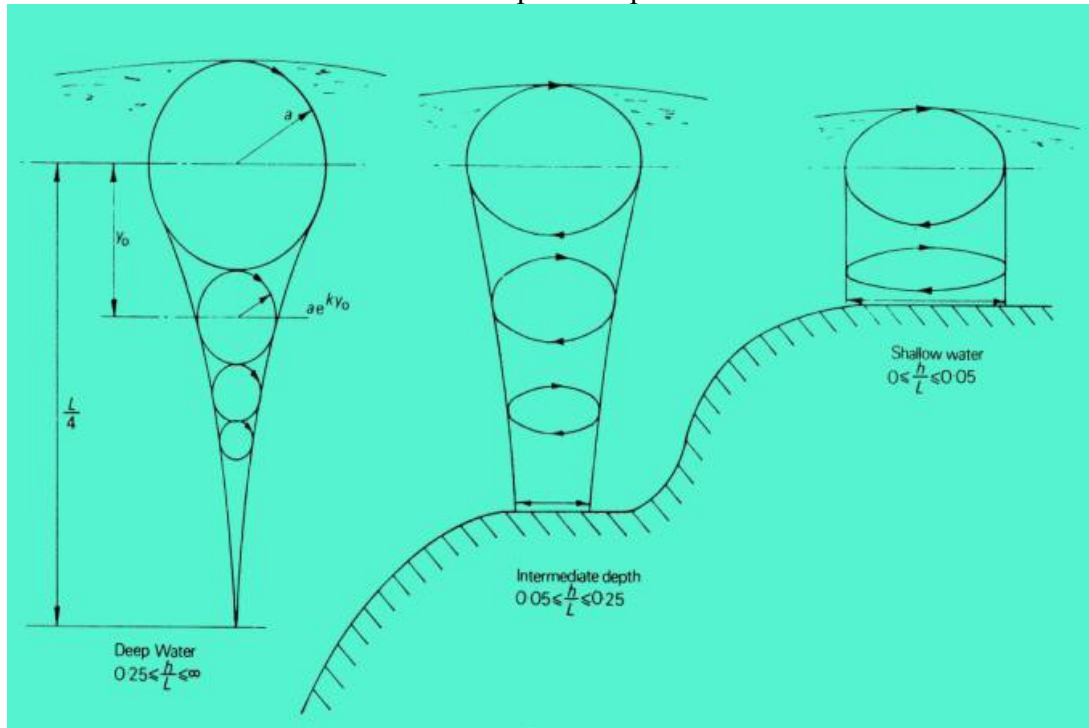


Fig.6. Desarrollo de las Olas hacia la costa [2].

La potencia suministrada por las olas se determina [4] en base a la expresión: (ver Apéndice)

$$P = \alpha \cdot H_s^2 \cdot T \text{ (kW/m)} \quad (1)$$

Respecto de α varía entre 0,44 y 0,59 (ver Apéndice) de acuerdo a distintos autores, ya que el campo de olas es aleatorio y en general la potencia depende de características espectrales de las ondas. Para estimaciones se adopta $\alpha = 0,5$ [4]. Asumiendo dicho valor de, considerando la media de los datos provistos por UN.E.PO.Sc. e introduciéndolos en (1) se obtienen potencias medias de de las olas en Caleta Paula de 7,38 kW/m.

Desarrollo de las Corrientes Mareomotrices

Para el caso de las corrientes marinas mareomotrices se estiman según cartas del Servicio de Hidrografía Naval. Los datos se encuentran en la Tabla II.

TABLA II - DATOS DE AMPLITUD DE MAREAS EN CALETA OLIVIA.

Lugar	Velocidad de las corrientes
Caleta Olivia	5/6 nudos (2,6 a 3,08 m/s)

En la Tabla III se muestra el potencial mareomotriz mediante la energía media anual en distintas partes del mundo y en un lugar de Argentina. es mayor, como puede ser el caso de Caleta Olivia (Lat. 46° S). Dicha tabla incluye los proyectos destinados a realizarse en los golfos de la Península de Valdés (Romero-Loscasoff) que se desechó la ejecución de los mismos al proclamarse Área Protegida (Ley Provincial N°4722) por la fauna marina que allí anida y se reproduce. Si bien el dato es para el Golfo Nuevo y San Jorge (Lat. 42°S) en Chubut, se sabe que a mayor latitud alejándonos del ecuador la amplitud de las mareas aumenta.

TABLA III - DATOS DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ EN DISTINTAS PARTES DEL MUNDO

PAÍS	UBICACIÓN	POTENCIA (MW)
En Operación:		
Francia	La Rance	240
Canadá	Annapolis Royal	20
China	Juangxia	3,9
Rusia	Kislaya Guba	0,4
Propuestas:		
Canadá	Bahía de Fundy Cumberland Basin	1400
China	Various	1000
Rusia	Bahía de Mezan Tugur	28000
Korea	Siwha y Garolim	740
India	Khambat	1800
Australia	Bahia Segura y Cabo Keraudren	600
Argentina	Golfos Nuevo y San José	1000

D. Desarrollo de modelos conversores de energía oceánica

Se ha definido al modelo para las corrientes marinas producidas por las mareas como una turbina de eje horizontal tipo eólico sumergida, porque se ha comprobado que su impacto ambiental a la fauna marina es mínimo y el impacto por su instalación es el menor de las tecnologías electromecánicas marinas [5]. Los parámetros de diseño se establecen junto a una gama de velocidades de agua de 1 a 4 m/s [6]. Para evitar distorsión del flujo de agua producidos por las paredes de la batea de H^oA^o y sus dimensiones para el ensayo en la UACO, se establece un diámetro de 0,60m para el rotor del modelo dada la salida de la bomba impulsora que produce la corriente de fluido. Se adoptan los parámetros detallados en Tabla IV para la turbina de dos aspas sumergida mareomotriz.

TABLA IV - PARÁMETROS ADOPTADOS PARA MODELO MAREOMOTRIZ

Turbina	Detalle/Dato	Unidades	Observaciones
Diám. Rotor	0.6	m	Máximo según dimensión de estanque
Área	0.28	m ²	
Vel. nominal	1 a 4 de a 0.5	m/s	Rango según datos marítimos
C _p	0,4	s/u	Adoptado
η _m	0.9	s/u	Adoptado
η _g	0.9	s/u	Adoptado

La expresión de la Potencia obtenida por una turbina del tipo eólico en bornes de generador [7] es:

$$P_1 = 1/2 \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \rho_a \cdot m \cdot A_1 \cdot (v_1)^3 \quad (2)$$

Para una gama de 1 a 4 m/s de corriente de las mareas podemos calcular la potencia de salida del modelo, cuyos resultados se muestran en la Tabla V.

TABLA V - POTENCIA DESARROLLADA EN BORNES DE TURBINA SUMERGIDA

Velocidad (m/s)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Potencia (kW)	0,05	0,16	0,37	0,73	1,26	1,99	2,98

También podemos estimar la fuerza que desarrollará el agua de mar sobre el modelo para lo cual hay que calcular el Área Neta del rotor previamente como:

$$A_n = 2 \cdot (\text{Largo del aspa} \cdot \text{ancho del perfil}) \text{ (m}^2\text{)} \quad (3)$$

La fuerza que realiza el agua sobre el rotor de 0,18m² de area neta está dada por la siguiente expresión [7]:

$$F_{a.m.-rotor} = 1/2 \cdot \rho_{a.m.} \cdot A_r \cdot (v_1)^2 \quad (4)$$

Los valores de esta fuerza según la gama de velocidades adoptada de las corrientes marinas de Tabla VI nos permitirán dar las bases para la elección del material de las aspas y sus espesores [8].

TABLA VI - FUERZA EJERCIDA POR EL FLUIDO SOBRE EL ROTOR DE LA TURBINA

Velocidad (m/s)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5
Fuerza (kg)	90	135	180	225	270	315	360	450
Tensión (DN/m²)	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2500

Se ha tomado como máxima velocidad de la corriente mareomotriz el de 5m/s que permite tener alrededor de un 20% de reserva sobre las máximas velocidades de corriente de agua registrada en la zona Patagónica Austral Atlántica [6].

Modelo de conversor energético de las olas

Para la obtención de la energía de las olas hay varios dispositivos que se han planteado electromecánicos, hidroeléctricos, etc. En nuestro caso se propone un sistema eléctrico de inducción imán-solenoides mecánicamente basculante por efecto de la variación de amplitud de las olas que esté flotando anclado al lecho marino a una distancia determinada de la costa. Una serie de estos tubos electromagnéticos encadenados uno a continuación de otro basculando puestos en arreglos serie paralelo pueden permitir obtener un nivel de tensión de CC que se convierta en la costa en CA requerida mediante inversores correspondientes.

El modelo que se propone ensayar en las bateas de H°A° es de a lo sumo un metro de longitud con un núcleo de varias rodajas N-S de imanes de Ne-Fe-Bo basculando. Con

Aprobado por Resolución Nro. 0318/12-R-UNPA

esa longitud y diámetro apropiado se disponen una serie de bobinas conectada en paralelo de longitud apropiada para obtener en este caso una tensión inducida por bobina del orden de 12 a 16V. Dichos modelos son la base de prototipos de mayor tamaño por escalado de los modelos.

2.3 Discusión

Disponer un banco de ensayos de dispositivos conversores de Energía Oceánica es destacable en un lugar donde estas Fuentes Renovables se manifiestan como muy buen nivel energético local. La UACO-UNPA dispone de construcciones adaptables (bateas de H°A°) para el banco de ensayos, lo que reduce costos y tiempos de ejecución. Los modelos prediseñados en este trabajo poseen tamaños ajustados a la disponibilidad de infraestructura como el caso de las bateas de H°A°. El tamaño de la turbina sumergida mareomotriz está limitado por la sección del flujo de la bomba de circulación del fluido para emular la corriente marina (Fig.3). El tamaño del tubo electromagnético basculante está limitado por el mayor tamaño de ola a reproducir.

Conclusiones

Lo detallado en este trabajo son las estimaciones de los recursos Mareomotriz y Undimotriz en la zona de Caleta Olivia [9] junto con disponibilidades técnicas y previsiones para el desarrollo de modelos y banco de ensayo de los mismos en la UACO-UNPA [10] [11].

Es muy relevante desarrollar y disponer en Santa Cruz, no solo de un banco de ensayos de energía oceánica sino también de los modelos a ensayar por la cercanía y las muy buenas características del recurso. Se proponen conversores energéticos de las mareas y de las olas, como ser: turbina tipo eólico sumergida y tubo electromagnético basculante. Dichos modelos son escalables a potencias mayores para permitir un producto terminado, adaptado a la tecnología local, aplicable como generador de electricidad para sitios aislados o interconectados costeros de la Patagonia Atlántica Austral.

Los ensayos se focalizarán en maximizar la conversión energética mediante dispositivos conversores de mínima intervención con el medio ambiente marino local. También es importante medir los esfuerzos que se originan en sus partes críticas (aspas en turbina sumergida, impacto en extremos de tubo basculante de las olas). Como se ha podido apreciar para un modelo de 60cm de diámetro el agua puede desarrollar con una velocidad de 5m/s hasta casi media tonelada (500kg) de fuerza concentrada en el rotor que daría unos 2500 DN/m².

Recomendaciones

Es relevante realizar más y mejores mediciones de los recursos de las olas y las mareas en el Atlántico Sur de la costa Patagónica. Para el caso de las olas es importante realizar mediciones con períodos de tiempo similares a los de las ondas superficiales de las olas existentes en el lugar. Lo que queda por evaluar respecto de los modelos de conversores de energía oceánica son los mayores tamaños a los que pueden ser escalados dichos modelos para poder obtener conocimiento que permita desarrollar prototipos de los conversores propuestos. Los prototipos se pretenden ensayar in situ en lugar a elegir en la costa de Santa Cruz.

Agradecimientos

Servicio de Hidrografía Naval

Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Unidad Académica Caleta Olivia

Apéndice

En la Fig. A.1.[12] se detallan distintos modelos matemáticos según espectros estimados para cada caso por cada autor.

Modelo	Espectro	Flujo de energía
Pierson-Moskowitz	$s(\omega) = \frac{8.1 \cdot 10^{-3} g^2}{(2\pi)^4 \omega^5} \exp \left[-0.74 \left(\frac{g}{2\pi\omega U_{19.5}} \right)^4 \right]$	$\bar{F} = 0,549 \cdot H_s^2 \cdot T_z$
Bretshneider-Mitsuyasu	$s(f) = 0.257 \cdot H_s^2 \cdot T_s \cdot (T_s \omega)^{-5} \cdot e^{-[1.03(T_s \omega)^{-4}]}$	$\bar{F} = 0,441 \cdot H_s^2 \cdot T_s$
Jonswap	$s(f) = \frac{a H_s^2 \omega_p^4}{\omega^5} \cdot e^{-\left[1.25 \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right]} \cdot \gamma \cdot e^{-\left[\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2}\right]}$	$\bar{F} = 0,458 \cdot H_s^2 \cdot T_s$
ISSC	$s(f) = \frac{0.313 H_s^2 \omega_p^4}{\omega^5} \cdot e^{-\left[1.25 \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right]}$	$\bar{F} = 0,5949 \cdot H_s^2 \cdot T_z$

Fig. A.1. Detalle de los modelos matemáticos de las olas.

Referencias

- [1] World Renewable Energy Congress, 2008: "Wind-Tidal Combined Generation System for Patagonia, Argentina", Co-author with Mr. Maxmiliano Biancucci desde 19 al 27, Julio, 2008, organizado por Strathclyde University y la World Renewable Energy Network, International Conference Building, Glasgow, Reino Unido.
- [2] Shaw, R., 1990 "Wave Energy a desugn challenge" Ellis Horwood Publ. 1990, pp. 55 a 70.

- [3] www.wave-energy.net, 2008.
- [4] Kerr, D., Marine Energy, *Philosophical Transactions of Royal Society*, 2006.
- [5] Biancucci, M., Labriola, C., "Wind-Tidal Combined Generation System for Patagonia, Argentina, - Environmental Analysis", *XI World Renewable Energy Congress*, 19 al 27, Julio, 2008, organizado por Strathclyde University y la World Renewable Energy Network, International Conference Building, Glasgow, Reino Unido.
- [6] Cartas del Servicio de Hidrografía Naval, 2008.
- [7] Freris L.L., Wind Energy Conversion Systems, Prentice Hall, 1990.
- [8] Mayer, R. M., Design of Composite Structures against Fatigue, 1996 edit. MEP.
- [9] Das Neves Guerreiro R., Chandare, S., Caracterización del recurso undomotoriz en el litoral marítimo Argentino, World Engineering Congreso, capítulo ECC, Buenos Aires, 17 al 20 de octubre del 2010.
- [10] Labriola, C., "Análisis de sistema de convertidores fluido-dinámicos de energía renovable para la Patagonia Austral de Argentina", Proyecto de Investigación en ejecución 2010-2012, UACO-UNPA.
- [11] Peralta, C., "Relevamiento para banco de ensayos de Energía Oceánica y modelo de turbina mareomotoriz", Trabajo Final de la Materia de Energía Eólica, Carrera de Ing. Electromecánica or. Energía Renovable, UACO-UNPA, 2011.
- [12] Berta Cavia del Olmo- Tesis de Maestría "Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores".