

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LAS CORRIENTES CON EL HIDROGENERADOR IMPULSA

• José López-González • Rodolfo Silva-Casarín •
• Edgar Gerardo Mendoza-Baldwin •
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

En este trabajo se presentan las particularidades del proceso de diseño y los resultados de las primeras pruebas de un hidrogenerador para aprovechamiento de las corrientes marinas. El dispositivo, nombrado IMPULSA, es precisamente una turbina flotante de eje vertical y flujo conducido, cuyo desarrollo ha superado ya las etapas de conceptualización (con base en trabajos previos), construcción de modelos y pruebas de funcionamiento iniciales. El diseño geométrico de la carcasa que alberga los rotores se probó en una instalación experimental; de estos ensayos se obtuvieron los coeficientes de empuje y sustentación para calibrar y caracterizar el flujo a través del hidrogenerador con simulación numérica, utilizando la herramienta computacional *PHOENICS* con la que, a su vez, se verificó el funcionamiento óptimo de dicha carcasa. Un segundo grupo de ensayos, llevados a cabo en un canal de riego, mostró la conveniencia de utilizar un rotor helicoidal tipo Savonius de cuatro álabes, ya que permite aprovechar condiciones de velocidad relativamente bajas en el fluido. Los resultados del modelo numérico coinciden con los registros experimentales, en que la construcción del dispositivo es viable en lugares con velocidades de corriente superiores a 1 m/s.

Palabras clave: energía oceánica, corrientes de marea, turbinas de corriente marina (MCT).

Introducción

La generación de energía por medios convencionales es, a medida que el tiempo avanza, una alternativa que rápidamente pierde viabilidad. Desde el punto de vista de responsabilidad ambiental, es necesario deponer el uso de los combustibles fósiles, más aún cuando su disponibilidad es cada vez menor y las dificultades que representa su extracción tienden a encarecer la energía que generan (Ballenilla, 2004). El caso de las hidroeléctricas, que si bien ambientalmente son menos agresivas, no es distinto, ya que su impacto social es muy elevado y requieren el almacenamiento de grandes volúmenes de agua que bien podrían utilizarse para riego o para abastecer las necesidades tanto de pequeñas poblaciones como de las grandes

ciudades. Al respecto, basta citar el ejemplo de México, donde debido a su geografía y clima se distinguen dos grandes zonas de disponibilidad totalmente opuesta: el sur y sureste, donde la disponibilidad natural media per cápita es 7.3 veces mayor que en el resto del país, y el norte, donde se asienta el 77% de la población, pero sólo se tiene el 32% de la disponibilidad media natural nacional (Conagua, 2008). Por lo tanto, una alternativa que se ha explorado en años recientes con mucho éxito es la desalinización; sin embargo, dos temas no resueltos de esta actividad son la excesiva cantidad de energía necesaria para el proceso y la disposición de los vertidos hipersalinos. Por otra parte, la demanda de energía mantiene una tendencia ascendente, ya que aun cuando los avances tecnológicos han reducido significativamente el consumo de energía de los aparatos electrodomésticos

y mecánicos, la cantidad de usuarios también ha aumentado casi exponencialmente. De ahí que de acuerdo con la IEA (International Energy Agency), se espera que la producción mundial de electricidad se incremente a más del doble al llegar al primer cuarto del siglo XXI y la producción de energías renovables un 57% (IEA, 2007). El aumento poblacional y las necesidades energéticas previstas hacen que el enfoque mundial esté centrado en la utilización de energías y combustibles limpios, los cuales, además de no contaminar, se encuentran en el medio ambiente de manera natural, es decir, no se requiere de un gasto energético adicional para su extracción, y su explotación no supone descargas o emisiones residuales dañinas. El reto, desde hace décadas, es encontrar la forma de captar este tipo de combustibles de manera óptima, eficiente y a un costo tal que les permita competir contra las fuentes de energía convencionales (Dincer, 2000).

Entre las fuentes de energía limpia que han atraído la atención del hombre desde hace siglos se encuentra el océano, ya que en él se concentran la energía solar, eólica y astronómica, que dan origen a fenómenos como el oleaje, las mareas, los gradientes térmicos (OTEC) y las corrientes, de los cuales también es posible captar y convertir la energía que contienen (Charlier y Justus, 1993).

De las diferentes fuentes de energía disponibles en el océano, este trabajo presenta un dispositivo diseñado para aprovechar la energía de las corrientes marinas, la cual presenta las ventajas de ser abundante, regular y predecible (Bahaj y Myers, 2003; Charlier, 2003). En México, las corrientes marinas más importantes y relativamente permanentes se encuentran asociadas con la corriente del Golfo, con velocidades máximas de 2 a 3 m/s; un caso específico es el canal de Cozumel, donde las velocidades alcanzan los 1.5 m/s y son muy regulares (Cetina *et al.*, 2005; Chávez *et al.*, 2003). Es importante señalar que la ubicación geográfica de México hace que un número importante de eventos

de corrientes de gran magnitud no puedan ser aprovechadas debido a que están asociadas con fenómenos extremos, como los huracanes (Escalante *et al.*, 2009), por lo que sólo las corrientes de régimen medio son útiles para la generación de energía. Otra zona con velocidades importantes es el alto Golfo de California, donde la velocidad máxima es de 1.3 m/s (Lavín *et al.*, 1997; Palacios *et al.*, 2005; Roden, 1964). El dispositivo ideado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para aprovechar las corrientes marinas lleva por nombre Hidrogenerador IMPULSA.

El principio de operación del Hidrogenerador IMPULSA es semejante al de los sistemas que actualmente se utilizan para el aprovechamiento eólico o aerogeneradores, los cuales, aunque se encuentran en funcionamiento desde hace décadas, siguen siendo sujetos de investigación y desarrollo (Bryden *et al.*, 2004); lo mismo ocurre en el caso que atañe a este trabajo, en el que el dispositivo de conversión se encuentra dentro del mar y busca aprovechar las corrientes marinas. Entre las interrogantes y problemas aún por resolver se tienen la eficiencia y respuesta del dispositivo a la variación en la dirección de las corrientes; la interacción y perturbación de la capacidad instalada del hidrogenerador con diferentes condiciones de oleaje; la afectación hidrodinámica cuando se coloca una serie de dispositivos, y problemas internos del mismo como corrosión, cavitación, anclaje y mantenimiento, entre otros (Bahaj *et al.*, 2007).

Sin embargo, y a pesar de la incertidumbre que aún se tiene, el Hidrogenerador IMPULSA posee un grupo de características, ya probadas y evaluadas experimentalmente, que lo convierten en una opción viable para la generación de energía; las características se describirán más adelante.

A continuación, a modo de marco conceptual, se presenta una breve revisión del funcionamiento de las turbinas comúnmente empleadas para el aprovechamiento de las corrientes marinas.

Generalidades de las turbinas marinas

Las turbinas mayormente empleadas para aprovechar las corrientes marinas son de dos tipos. Por un lado, las conocidas como de eje horizontal o paralelo a la dirección del fluido. Este tipo de turbina se ha empleado con gran éxito en el aprovechamiento de recursos eólicos, por ello existe una serie de esfuerzos por trasladar esa experiencia al caso de las corrientes marinas (Bahaj y Myers, 2003). Los resultados obtenidos reportan eficiencias en condiciones ideales de entre 30 y 40% respecto de la energía cinética del fluido (Bryden *et al.*, 1998; Garret y Cummins, 2004; Gorban *et al.*, 2001). El segundo tipo de turbinas es conocido como de eje vertical o perpendicular a la trayectoria del fluido. Las turbinas marinas de eje vertical han sido objeto de menos estudios y aplicaciones, y aunque algunos autores reportan eficiencias alrededor de 20 a 30% menores a las turbinas de eje horizontal (In *et al.*, 2009; Kamoji *et al.*, 2009; Saha *et al.*, 2008), su instalación y construcción requieren menores inversiones y esfuerzos; adicionalmente, los dispositivos ya terminados son más robustos, lo que compensa su relativamente baja eficiencia.

Es de notar que aun cuando las eficiencias promedio reportadas parecen bajas (del orden de 30%), se ha demostrado analíticamente que la eficiencia máxima de una turbina es de aproximadamente 60% de acuerdo con Ley de Betz (Rauh y Seelert, 1984); más aún, de acuerdo con Gorban *et al.* (2001), este valor teórico de referencia es mucho menor. En este contexto, eficiencias promedio de entre 20 y 30%, aunque superables, quedan dentro del rango de los dispositivos comerciales existentes.

Hidrogenerador IMPULSA

El Instituto de Ingeniería diseñó y construyó dos prototipos escala 1:30 y 1:12 de una turbina flotante de eje vertical y de flujo conducido llamada Hidrogenerador IMPULSA. En la literatura se pueden encontrar tres tipos de turbina de este tipo (figura 1): la turbina Darrieus, cuyas variantes incluyen la turbina Gorlov, que es una turbina Darrieus helicoidal; la turbina Savonius, y la turbina Panémona (Hartono, 2002; In *et al.*, 2009). En estos dispositivos, la energía cinética del fluido actúa sobre los álabes, cuya forma favorece la generación de fuerzas diferenciales en la cara expuesta al flujo, de donde se deriva un momento motor con intensidad dependiente del ángulo de ataque de las corrientes.

El diseño innovador del Hidrogenerador IMPULSA consiste en la integración de varias características, como son la forma de los flotadores, que favorecen el encauzamiento del flujo con una reducción del área hidráulica; los canales interiores, que buscan incrementar el torque, y la forma de los álabes, con los que se pretende elevar la eficiencia de la turbina. Estas mejoras convierten al Hidrogenerador IMPULSA en un dispositivo factible tanto técnica como económicamente. El dispositivo es una combinación de la turbina Savonius, Panémona y Darrieus; consiste en una carcasa que aloja dos rotores con cuatro álabes y está diseñada de forma aerodinámica para disminuir las pérdidas a la entrada del dispositivo. Este hidrogenador cuenta con dos cavidades que evitan el flujo sobre el lado convexo de los álabes, para evitar el torque negativo y aumentar la eficiencia (Deda y Atilgan, 2008;

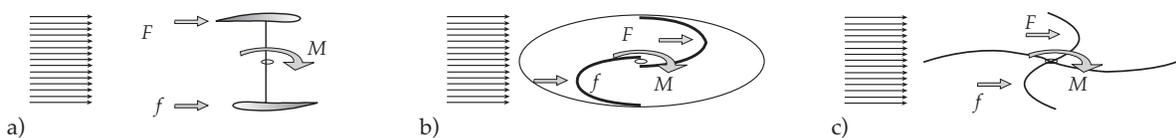


Figura 1. Turbinas de eje vertical: a) Darrieus, b) Savonius, c) Panémona.

Deda et al., 2008). Adicionalmente, cuenta con un conducto interior que direcciona el flujo hacia el lado protegido del rotor, incrementando el torque positivo. Por otro lado, los rotores son helicoidales, lo que permite captar energía aun con bajas velocidades del fluido y mejora el desempeño general de la turbina (Kamoji et al., 2009; Saha y Jaya, 2006; Saha et al., 2005). Las turbinas más desarrolladas de eje vertical son Proteus, OcGen, Hydrogen y Blue Energy. En general, la ventaja del Hidrogenerador IMPULSA es que integra varias características de las turbinas antes mencionadas, y la desventaja, como en todos los casos, es la baja eficiencia registrada.

El sistema se diseñó de manera que se mantenga en flotación, lo que permite que los generadores se ubiquen fuera del agua, que la colocación en sitio sea por medio de un sistema de anclaje común, y que el retiro para mantenimiento o deposición sea relativamente fácil. Otra importante ventaja de dichas características geométricas y de colocación es que al limitar pocos grados de libertad, el sistema es capaz de auto alinearse con la dirección del fluido (Hartono, 2002). El Hidrogenerador IMPULSA cuenta también con dos concentradores laterales que provocan un efecto Venturi (amplificación de la velocidad por reducción del área hidráulica): aumentan el área de captación, direccionan

el flujo sobre un lado de los álabes, y aseguran la flotabilidad y estabilidad de todo el dispositivo. En la figura 2 se presentan esquemas en planta y perfil del sistema, tal como se ha descrito, mientras que la figura 3 muestra la conceptualización artística del dispositivo.

Diseño geométrico del dispositivo

Existen varias técnicas para simular el flujo a través del dispositivo, una de ellas es la técnica conocida como LES (por su siglas en inglés, Large-Eddy Simulation), la cual proporciona una solución del campo fluido tridimensional y no estacionaria, resolviendo físicamente la turbulencia, con excepción de las pequeñas escalas que son modelizadas. Por otro lado existen los modelos que utilizan un cierre de las ecuaciones tipo RANS (Reynolds Average Navier Stokes), estableciendo un promedio de Reynolds sobre todas las escalas turbulentas, de manera que sólo proporcionan información sobre los valores medios de las magnitudes del fluido. En este caso, para determinar la geometría óptima de la carcasa y los concentradores, se utilizó la herramienta computacional *Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series*, CFD *PHEONICS* por sus siglas en inglés. Dicho programa resuelve las ecuaciones de

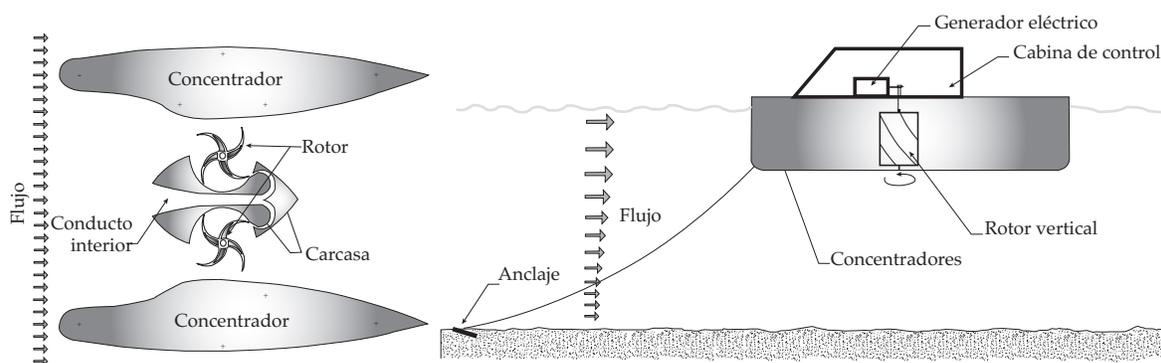


Figura 2. Esquema hidrogenerador IMPULSA, a) planta, b) perfil.

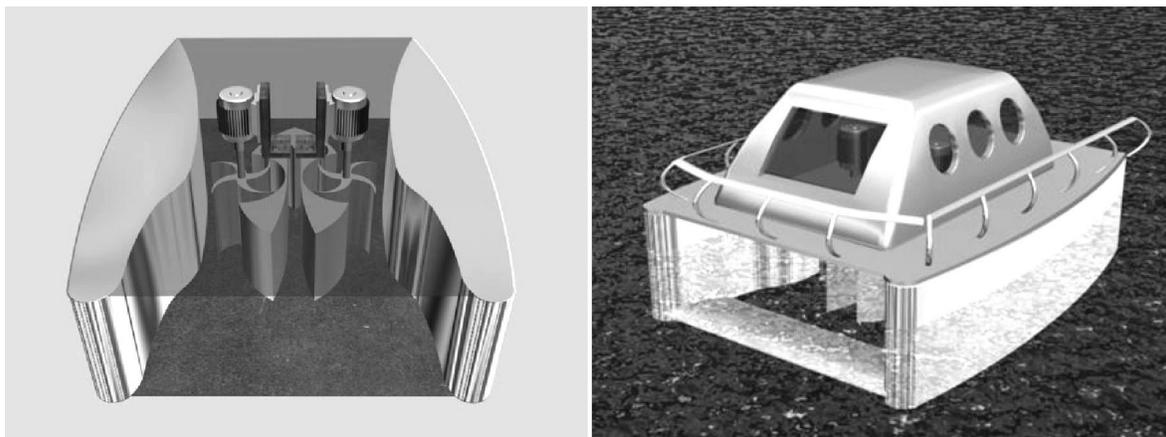


Figura 3. Conceptualización artística del Hidrogenerador IMPULSA.

conservación de masa, momento y energía en sus tres formas: parabólica, hiperbólica y elíptica (Spalding, 1981), en dos y tres dimensiones (técnica RANS). La interfaz consiste de un módulo de entrada que genera un archivo donde se especifican el tamaño del dominio computacional, detalles del arreglo de la malla, el tipo de coordenadas, la posición y dimensiones de los elementos dentro del fluido, así como sus características físicas; también se especifican las condiciones iniciales y los valores de frontera (Baskaran, 1994; Cham, 1989). Los resultados de la modelación numérica se resumen en la figura 4, en la que se presentan, en los paneles a), b), c), d) y e), los valores de velocidad de una corriente de 1.5 m/s (valor de velocidad muy común en las costas mexicanas), que viaja de izquierda a derecha, e interactúa con cinco diferentes configuraciones de carcasa y concentradores del Hidrogenerador IMPULSA. Así, en el panel a) se tiene una carcasa simple, sin conducto interior y sin concentradores; en la b), un conducto interior recto y sin concentradores, y en el panel c) se engrosó la entrada del conducto interior. El panel d) es el resultado de la modelación con el mismo conducto interior que el anterior, pero se incluyeron dos pequeños concentradores, y en el panel

e) la configuración geométrica corresponde a un conducto interior ancho, con una bocana grande y dos concentradores robustos. De los resultados numéricos se determinó que la configuración más conveniente es la que se presenta en el panel e), puesto que el fluido es perpendicular a la disposición de los álabes y se tienen las mayores velocidades en la zona de los rotores. Asimismo, estos resultados mostraron que el conducto interior puede contribuir favorablemente, no sólo porque direcciona el flujo en el sentido del giro, sino porque disminuye la presión negativa, lo que en ocasiones induce una disminución de la velocidad en el compartimiento de los rotores, como se aprecia en la figura 4a. Finalmente, en el panel e1) de la figura 4 se muestra el campo de líneas de corriente de la configuración óptima, en él se puede verificar el bajo nivel de turbulencia en la interacción del dispositivo con la corriente modelada.

Modelado físico

Una vez definida la geometría, se construyeron dos modelos del Hidrogenerador IMPULSA, uno de 100 Watts, con dimensiones de 20 cm de altura, 60 cm de ancho y 120 cm de largo (ver figura 5). Este primer modelo cuenta con un

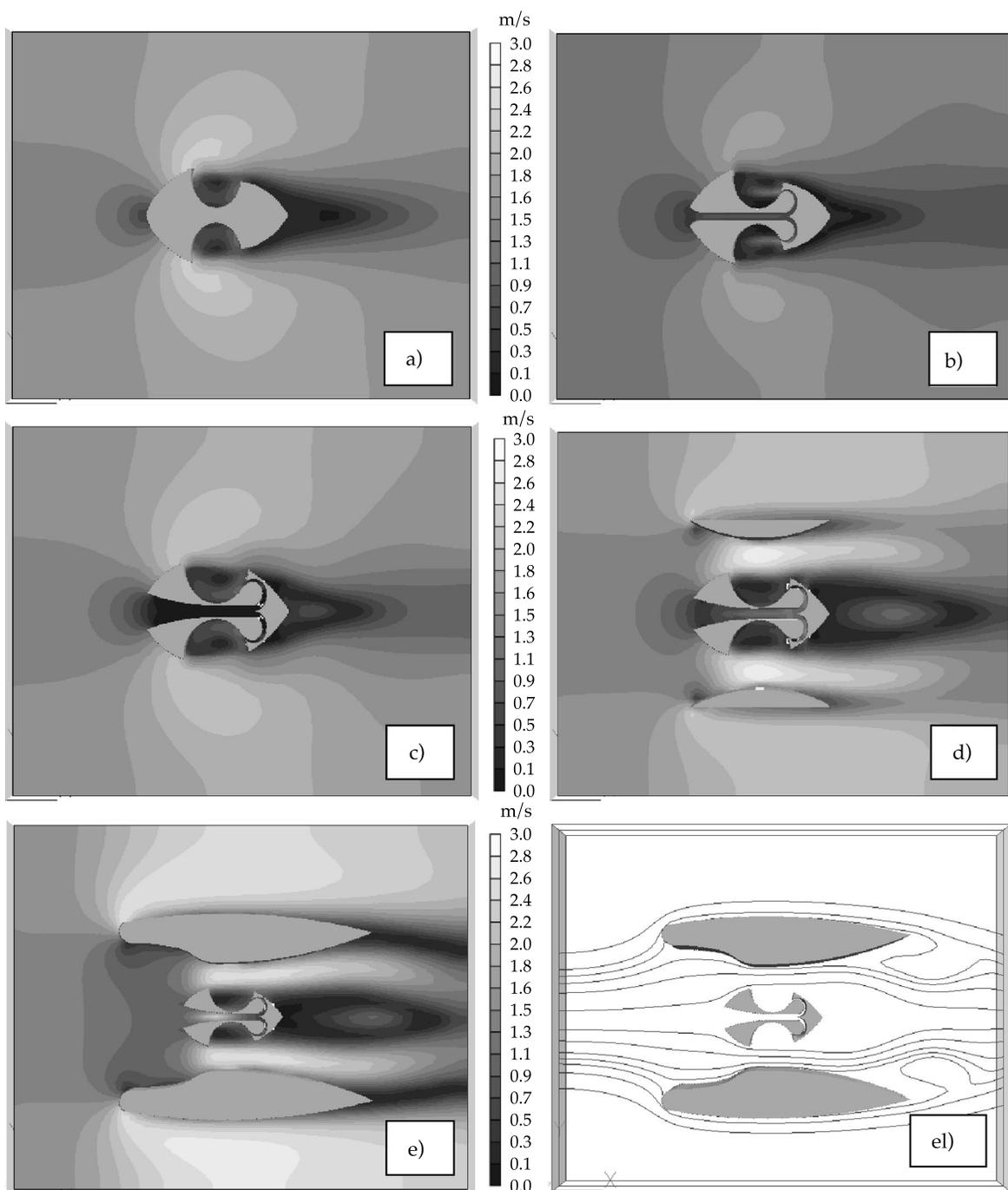


Figura 4. Distribución de velocidades con diferentes carcasas y concentradores a), b), c), d) y e); en e1) se muestran las líneas de corriente del caso e).

eje de transmisión para acoplar los dos rotores y éste, a su vez, se acopla a un torquímetro digital. El modelo está fabricado de acrílico y los concentradores son de aluminio. El segundo

modelo es de 500 Watts; con 50 cm de altura, 160 cm de ancho y 200 cm de largo. Tiene una caja de engranes con relación 10:1, como transmisión acoplada al torquímetro. Está fabricado de



Figura 5. Hidrogenerador IMPULSA de 100 W.

fibra de vidrio y los concentradores son de aluminio (ver figura 6). El cuadro 1 presenta un resumen de las dimensiones de cada uno de los modelos.

Se llevaron a cabo dos etapas de experimentación, la primera se realizó en el canal de remolque del laboratorio Ohmsett (The National Oil Spill Response Test Tank Facility), en New Jersey, Estados Unidos (figura 7). Estas instalaciones, que son mantenidas y operadas por el Departamento del Interior (Minerals Management Service, MMS), consisten en un

canal de 203 m de largo, 20 m de ancho y 3.4 m de profundidad. El puente de arrastre en el que se colocó el dispositivo tiene una velocidad máxima de 3.34 m/s. Los experimentos se llevaron a cabo en este laboratorio, debido a que en México no existe un canal con las dimensiones y capacidad de gasto suficientes para las dimensiones del modelo de hidrogenerador de 500 Watts.

La segunda etapa experimental se llevó a cabo en un canal artificial de riego en Las Estacas, estado de Morelos, México (figura 8),

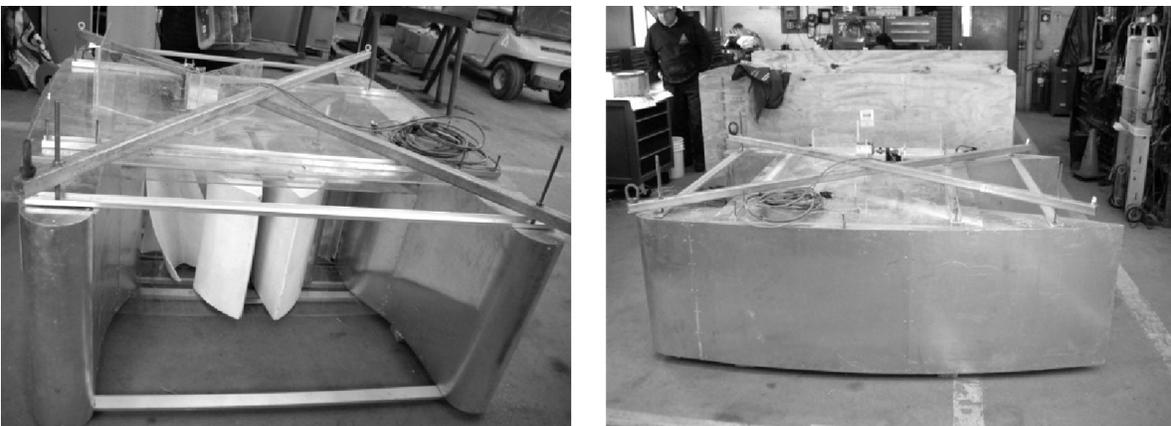


Figura 6. Hidrogenerador IMPULSA de 500 W.

Cuadro 1. Dimensiones de los modelos de hidrogenerador.

Hidrogenerador de 100 W		
Elemento	Dimensión	Unidad
Radio de los rotores	0.09	m
Altura transversal	0.20	m
Ancho transversal de entrada	0.60	m
Área en la entrada	0.12	m ²
Ancho transversal en la turbina	0.09	m ²
Área en la turbina	0.02	m ²

Hidrogenerador de 500 W		
Elemento	Dimensión	Unidad
Radio de los rotores	0.18	m
Altura transversal	0.50	m
Ancho transversal de entrada	1.20	m
Área en la entrada	0.60	m ²
Ancho transversal en la turbina	0.18	m ²
Área en la turbina	0.09	m ²



Figura 7. Canal de arrastre en las instalaciones de Ohmsett, New Jersey, Estados Unidos.

cuyas dimensiones, en la zona donde se llevó a cabo la prueba, son 4 m de ancho y 1.5 m de profundidad. La velocidad de la corriente, no controlada en específico para los ensayos, fue de 1.04 m/s. La finalidad de ambas pruebas fue exponer los modelos a corrientes constantes para verificar su funcionamiento; en un trabajo posterior se modelará en presencia de corrientes y oleaje, para contar con un caso más apegado a la realidad.

Primera etapa de experimentación

Las pruebas de la primera etapa consistieron en arrastrar el dispositivo a lo largo del canal a una velocidad y torque constante; una vez terminada cada prueba se incrementó el torque, apretando un tornillo media vuelta cada vez. El torque se aplicó directamente en el eje

del torquímetro de forma mecánica (fricción en el eje del torquímetro), y la velocidad angular se registró por medio de un dispositivo digital que reporta el número de vueltas y el tiempo. Los datos fueron colectados en una computadora durante todo el tiempo de recorrido. Este proceso se repitió hasta alcanzar el torque máximo (rotor totalmente detenido para la velocidad seleccionada). Se llevaron a cabo pruebas para velocidades de 1.29, 1.54 y 1.9 m/s.

Como equipo adicional se colocó una celda de carga para medir la fuerza de arrastre y, en la torre de control, se colectaron los datos de la velocidad de desplazamiento del puente. De esta manera, la potencia del dispositivo, P [W], se puede evaluar como el producto del torque, T [Nm], y la velocidad angular, $\bar{\omega}$ [1/s], de modo que la potencia queda expresada como:

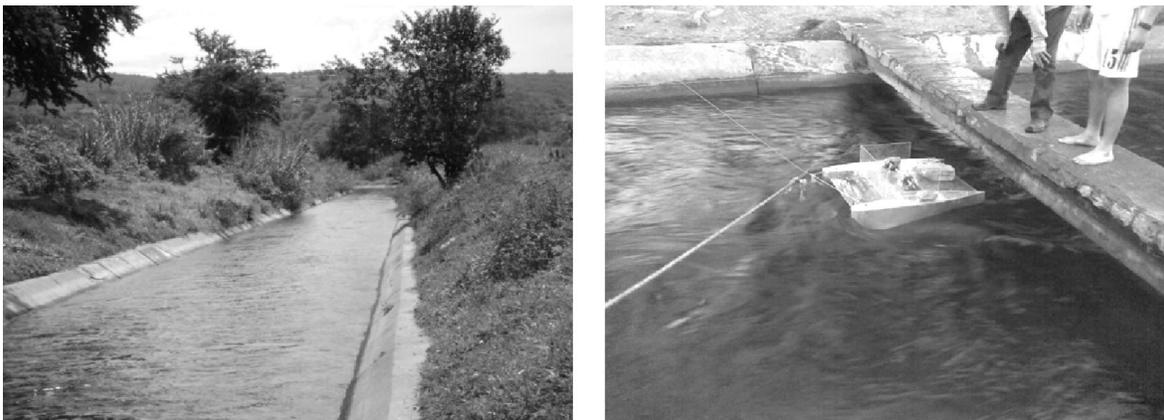


Figura 8. Canal en Las Estacas, Morelos, México.

$$P = T\bar{\omega} \quad (1)$$

La potencia del sistema es comparada entonces con la potencia teórica del fluido, la cual es proporcional a la densidad del fluido ρ [kg/m³] por el área trasversal de la turbina A [m²] y por la velocidad del fluido al cubo v [m/s], a fin de estimar la eficiencia del dispositivo:

$$P_f = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

La potencia del fluido puede ser calculada en función de la cantidad de agua que pasa por el dispositivo y ésta, a su vez, es inversamente proporcional a la fuerza de arrastre, lo cual se puede escribir como:

$$P = Cd \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3)$$

Donde el coeficiente de arrastre Cd puede ser expresado de la siguiente manera:

$$Cd = \beta \left(1 - \frac{v}{v_0}\right)^n \quad (4)$$

Donde β es un coeficiente que depende de la forma de los álabes y el valor de n toma en cuenta la variación no lineal de acuerdo con la relación de velocidad del fluido antes de la turbina v_0 y la velocidad tangencial en los rotores v . Los coeficientes de arrastre para elementos donde el flujo no penetra el objeto dependen de la forma de la superficie, la velocidad del fluido y la rugosidad relativa, y se obtienen, generalmente, de manera experimental. En el cuadro 2 se presentan algunos valores del coeficiente de arrastre para cuerpos sumergidos en un fluido. Un coeficiente aproximado para el Hidrogenerador IMPULSA, de acuerdo con dicho cuadro y la forma del dispositivo, oscilará entre 2 y 2.30. Por otra parte, el número de Reynolds en los experimentos se encuentra entre los valores de 1×10^6 y 1.6×10^6 , y debido a que el dispositivo es semi-impermeable, el valor del coeficiente de arrastre resultó menor de lo esperado, como se aprecia en la figura 9, donde el coeficiente de arrastre osciló entre 1.6 y 1.8:

$$F = Cd \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (5)$$

El coeficiente de arrastre experimental se obtuvo directamente, conocida la fuerza

de arrastre, el área transversal y la velocidad del fluido, despejando de la ecuación (5). Los resultados de la figura 9 de torque contra potencia se obtuvieron calculando el coeficiente de arrastre, con un valor de $\beta = 1.44$ y $n = 0.5$ se calcula la fuerza de arrastre y se obtiene el torque, que es igual a fuerza por distancia.

Segunda etapa de experimentación

Adicionalmente a los experimentos efectuados en Ohmsett, se realizaron varias pruebas en un canal localizado en Las Estacas, Morelos. Las pruebas consistieron en determinar la velocidad angular máxima sin torque y posteriormente incrementar el torque hasta detener completamente el rotor (torque máximo) (figura 10). También se hicieron pruebas para verificar la conveniencia del conducto interior (ver figura 2), para lo cual se realizaron experimentos con dicho conducto tapado y destapado. Adicionalmente, se trabajó con uno de los rotores girando libremente y posteriormente con el mismo rotor completamente detenido. La velocidad de la corriente en los ensayos fue de 1.04 m/s.

Conclusiones

De los resultados de la modelación se obtuvieron una serie de guías preliminares

que permitieron evaluar la geometría de la carcasa y concentradores del dispositivo, y reducir el proceso de prueba y error en la modelación física. Con esto se comprueba que ambas técnicas de modelado, lejos de ser excluyentes, se complementan y requieren una de la otra para llevar un análisis a sus últimas consecuencias.

En todo caso, la geometría que se determinó como óptima luego del análisis numérico mostró un buen funcionamiento en el modelo físico y permitió un estudio más completo y de otros parámetros durante la experimentación.

Respecto del conducto interior, que es una idea original, es claro que aumenta considerablemente la eficiencia, ya que, por un lado, aumenta el flujo que pasa a través de la turbina y, por otro, disminuye el torque negativo y la presión negativa en los rotores. Se pudo demostrar que, con un rotor completamente libre, se presenta mayor flujo en el segundo rotor, lo que disminuye la eficiencia del sistema. Por otro lado, con un rotor completamente detenido, aumenta la potencia sobre el segundo rotor, pero se incrementan las pérdidas. Por lo tanto, para que el sistema funcione adecuadamente, es conveniente que los dos rotores trabajen de manera sincronizada.

Cada una de las partes cumple con una función específica particular y cada una

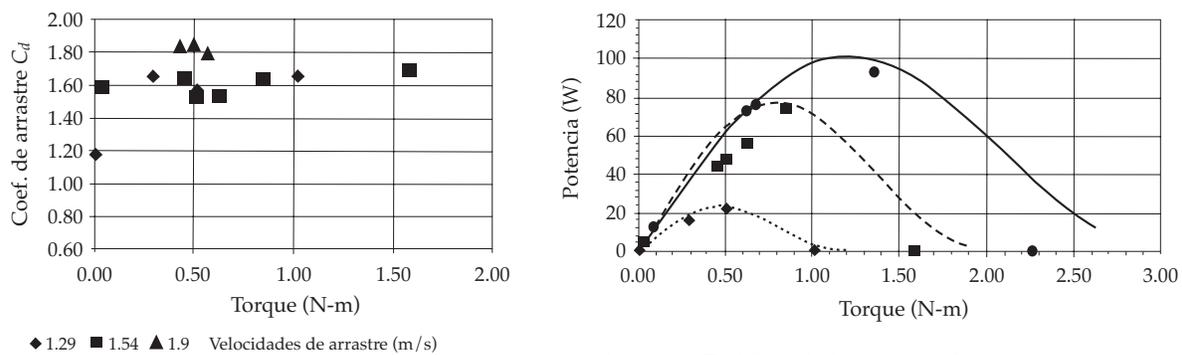


Figura 9. Resultados del canal de arrastre Ohmsett (hidrogenerador de 500 W).

Cuadro 2. Valores aproximados de C_d para cuerpos sumergidos (Streeter et al., 2000).

Forma del cuerpo		Relación	C_d	Reynolds	
Circular			1.20	1.0E+04	1.5E+05
Elíptico		2:1	0.60	4.0E+04	1.0E+05
		4:1	0.46	1.0E+05	
		8:1	0.32	2.5E+04	
			0.29	2.5E+04	
Cuadrado			2.00	3.5E+04	1.0E+05
			1.60	1.0E+04	
Triangular			2.00	1.0E+04	
Semitubular			2.30	4.0E+04	
			1.12	4.0E+04	

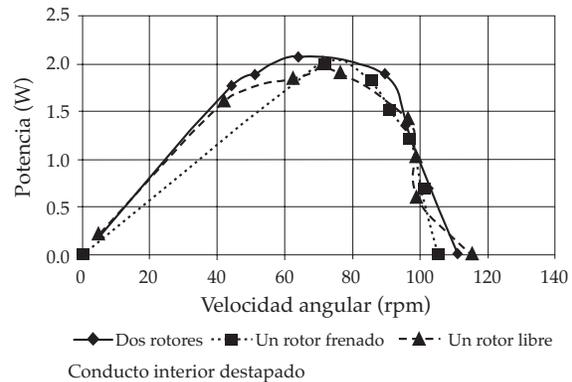
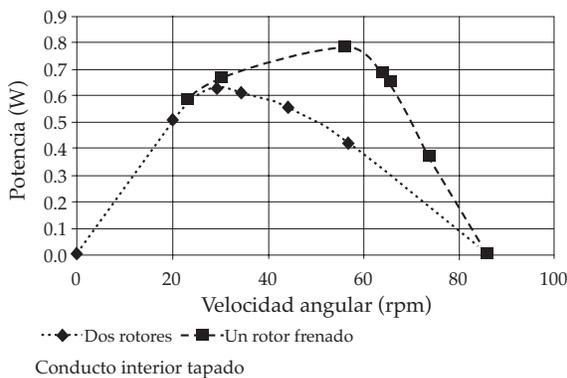


Figura 10. Velocidad angular contra potencia, hidrogenerador de 100 W.

de ellas se evaluó por separado, incluso se realizaron experimentos y simulaciones numéricas con diferentes formas de carcasa, rotores y concentradores, llegando finalmente al diseño mostrado.

Un punto importante de resaltar es que el coeficiente de arrastre sin torque es muy elevado (figura 9) y no cambia considerablemente a medida que se incrementa el freno mecánico, lo que significa que el sistema es muy impermeable y de ahí su bajo desempeño. En la búsqueda de elevar la eficiencia del sistema se pueden tomar acciones, como aumentar la

separación entre los rotores y permitir mayor paso de agua a través de la turbina.

Los experimentos indican que los efectos de escala están relacionados directamente con el número de Reynolds y el coeficiente de arrastre, el cual, a su vez, es función del número de Reynolds; sin embargo, es necesario llevar a cabo experimentos exhaustivos para verificar esta hipótesis. Lo que sí está claro es que las pérdidas por fricción decrecen conforme la escala del dispositivo disminuye. El Hidrogenerador IMPULSA, en el estado de avance que se encuentra actualmente,

es un dispositivo capaz de generar energía de calidad. Su adaptación, escalamiento y colocación dependerá de las condiciones de cada sitio en específico y la eficiencia esperada es muy sensible al régimen de corrientes locales (magnitud y dirección). Sin embargo, el dispositivo es aún objeto de estudios y mejoras, entre las que se cuentan la búsqueda de una geometría capaz de captar mayor flujo y que presente menor resistencia al paso del flujo (disminución del coeficiente de arrastre), los cuales se están llevando a cabo en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Agradecimientos

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, y al proyecto IMPULSA, "Desalación de agua de mar con energías renovables", así como al personal del laboratorio Ohmsett (The National Oil Spill Response Test Tank Facility) por las facilidades proporcionadas para llevar a cabo los experimentos y al Departamento del Interior Minerals Management Service (MMS).

Recibido: 06/05/10
Aceptado: 03/11/10

Referencias

- BAHAJ, A.S., BATTENA, W.M.J., and MCCANNB, G. Experimental verifications of numerical predictions for the hydrodynamic performance of horizontal axis marine current turbine. *Renewable Energy*. Vol. 32, No. 15, 2007, pp. 2479-2490.
- BAHAJ, A.S. and MYERS, L.E. Fundamentals applicable to the utilization of marine current turbines for energy production. *Renewable Energy*. Vol. 28, 2003, pp. 2205-2211.
- BASKARAN, A. A numerical model to evaluate the performance of pressure equalized rainscreen walls. *J. Bug Environ*. Vol. 29, 1994, pp. 159-171.
- BRYDEN, I.G., GRINSTEAD, T., and MELVILLE, G.T. Assessing the potential of a simple tidal channel to deliver useful energy. *Applied Ocean Research*. Vol. 26, No. 5, 2004, pp. 198-204.
- BRYDEN, I.G., NAIR, S., FRAENKEL, P., and BULLEN, C.R. Matching Tidal Current Plant to Local flow conditions. *Energy, Elsevier Science Ltd*. Vol. 23, No. 9, 1998, pp. 699-709.
- CETINA, P., CANDELA, J., SHEINBAUM, J., OCHOA, J., and BADAN, A. Circulation along the Mexican Caribbean coast. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111, 2005, pp. 1-19.
- CHAM, T. The PHEONICS-I.66 user guide. London: CHAM Development Team, 1989.
- CHARLIER, R.H. A "Sleeper" awakes: tidal current power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 7, No. 6, 2003, pp. 515-529.
- CHARLIER, R.H. and JUSTUS, J.R. *Ocean Energies, Environmental, Economic and Technological Aspects of Alternative Power Sources*. Netherlands: Elsevier, 1993.
- CHÁVEZ, G., CANDELA, J., and OCHOA, J. Subinertial flows and transports in Cozumel Channel. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108, 2003, pp. 1-19.
- CONAGUA. *Programa Nacional Hídrico 2007-2012*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008.
- DEDA, B. and ATILGAN, M. An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius win rotor. *Energy Conversion and Management*. Vol. 49, 2008, pp. 3425-3432.
- DEDA, B., ATILGAN, M., and OZDAMAR, A. An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining. *Experimental Thermal and fluid Science*. Vol. 32, 2008, pp. 1673-1678.
- DINCER, I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 4, 2000, pp. 157-171.
- ESCALANTE, M.E., SILVA, C.R., MENDOZA, B.E., MARIÑO, T.I., and RUIZ, R.F. Análisis de la Variación del Nivel del Mar y de las Corrientes Marinas Inducidas por el Huracán Wilma Frente a Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 2, 2009, pp. 111-126.
- GARRET, C. and CUMMINS, P. Generating power from tidal currents. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. ASCE. Vol. 130, No. 3, 2004, pp. 114-118.
- GORBAN, A.N., GORLOV, A., and SILANTYEV, V.M. Limits of the Turbine Efficiency for free fluid flow. *Journal of Energy Resources Technology*. Vol. 123, 2001, pp. 311-317.
- HARTONO, W. A floating tied platform for generating energy from ocean current. *Renewable Energy*. Vol. 25, 2002, pp. 15-20.
- IEA. *Energy Technologies at the Cutting Edge*. Paris: International Energy Agency, 2007.
- IN, S., HAN, Y., and SEUNG, K. Optimization of cycloidal water turbine and the performance improvement by individual blade control. *Applied Energy*. Vol. 86, 2009, pp. 1532-1540.
- KAMOJI, M.A., KEDARE, S.B., and PRABHU, S.V. Performance tests on helical Savonius rotors. *Renewable Energy*. Vol. 34, 2009, pp. 521-529.
- LAVÍN, M.F., DURAZO, R., PALACIOS, E., ARGOTE, M.L., and CARRILLO, L. Lagrangian Observations of the

- Circulation in the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 27, 1997, pp. 2298-2305.
- PALACIOS, E., CARRILLO, L., LAVÍN, M.F., ZAMUDIO, L., and GARCÍA, A. Hydrography and circulation in the Northern Gulf of California during winter of 1994-1995. *Continental Shelf Research*. Vol. 26, 2005, pp. 82-103.
- RAUH, A. and SEELERT, W. The Betz optimum efficiency for windmills. *Applied Energy*. Vol. 17, No. 1, 1984, pp. 15-23.
- RODEN, G.L. Oceanographic aspects of the Gulf of California, Marine Geology of the Gulf of California. *A symposium. Amer. Assoc. Petroleum Geologists*. Vol. 3, 1964, pp. 30-58.
- SAHA, U.K. and JAYA, M. On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renewable Energy*. Vol. 31, 2006, pp. 1776-1788.
- SAHA, U.K., MAHANTA, P., GRINSPAN, A.S., SURESH, K.P., and GOSWAMI, P. Twisted bamboo bladed rotor for Savonius wind turbines. *Journal of the Solar Energy Society of India (SESI)*. Vol. 4, 2005, pp. 1-10.
- SAHA, U.K., THOTLA, S., and MAITY, D. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol. 96, 2008, pp. 1359-1375.
- SPALDING, D.B. A general purpose computer program for multidimensional one and two-phase flow. *Math Comput. Simulation*. Vol. 23, No. 3, 1981, pp. 267-276.
- STREETER, V.L., WYLIE, E.B., and BEDFORD, K.W. *Mecánica de Fluidos*. España: McGraw Hill, 2000.

Abstract

LÓPEZ-GONZÁLEZ, J., SILVA-CASARÍN, R. & MENDOZA BALDWIN, E.G. *The use of energy from currents with an impulse hydro-generator*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. II, No. 4, October-December, 2011, pp. 97-110.

This work presents the specifics of the design process and results of the initial tests of a hydro-generator for use in oceanic currents. The device is an impulse hydro-generator, which is a flow-driven turbine with a floating vertical axis. Its design has gone from conceptualization (based on previous works) to the construction of models and initial function tests. The geometric design of the frame that houses the rotors was tested with an experimental installation. These tests produced thrust and lift coefficients to calibrate and characterize the flow through the hydro-generator with numerical simulations using the PHOENICS computation tool. This tool also verified the optimal functioning of the frame. A second group of tests carried out in an irrigation canal showed the advantage of using a helical Savonius rotor with four blades, which enables using relatively low velocity flow conditions. The results from the numerical model showed a good fit with experimental results in terms of the construction of this device being viable for locations with current velocities over 1m/s.

Keywords: ocean energy, tidal currents, marine turbines.

Dirección institucional de los autores

M.C. José López González

Dr. Rodolfo Silva Casarín

M.C. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria

Instituto de Ingeniería

Delegación Coyoacán

04510 México, D.F., MÉXICO

Teléfono: +52 (55) 5623 3668

Fax: +52 (55) 5616 2164

JlopezGo@iingen.unam.mx

rsilvac@iingen.unam.mx

emendozab@iingen.unam.mx