

## PRUEBAS EXPERIMENTALES CON ROTORES SAVONIUS Y HELICOIDALES

JOSÉ LÓPEZ GONZALEZ, SERGIO DAVID BARRANCO,  
ANDRÉS ORLANDO CUÉN ULLOA, ERICK IVÁN GARCÍA  
SANTIAGO MARIÑO TAPIA, ISMAEL MARIÑO TAPIA

### Introducción

El acelerado crecimiento de la población mundial, así como la rápida evolución, la expansión de la tecnología y las diversas actividades humanas, entre otras, han incrementado la demanda energética. México no es la excepción, puesto que se ha estimado un crecimiento en la demanda energética de 66.5% en un lapso de 35 años (CEFP, 2006). Por esto, la generación de energía a precios asequibles y con responsabilidad ambiental es un aspecto crítico para todos los sectores de la población (gobiernos, industria, educación e investigación). Aunque es innegable que el consumo de hidrocarburos ha impactado negativamente al medio ambiente global, aun cuando se cuenta con reservas probadas para varias décadas, estos combustibles son finitos y no renovables en la escala de tiempo humana.

Por estas razones, la sociedad científica está en busca de fuentes alternativas de energía de carácter renovable y lo menos contaminantes posible, que además permitan alcanzar una estabilidad energética semejante a la que ofrecen los combustibles fósiles. En México, las energías renovables (hidráulica, eólica, solar y biomasa) tienen un aporte en el sector energético de 10.46% (SENER 2020); sin embargo, la energía contenida en el océano no ha sido objeto de interés aun cuando ésta posee un importante potencial disponible en sus cinco tipos de energía: oleaje, mareas, corrientes, gradiente térmico y gradiente salino.

El presente documento muestra los resultados obtenidos de la evaluación de dos turbinas que utilizan las corrientes marinas como fuente de energía; una del tipo helicoidal y otra de álabes rectos, las cuales forman parte del hidrogenerador HIPA (Figura 1), antes generador Impulsa. El hidrogenerador HIPA es un dispositivo que aprovecha las corrientes marinas y está clasificado como un dispositivo flotante de flujo conducido y eje vertical (López-González *et al.*, 2011).

Las turbinas recta y helicoidal del hidrogenerador están diseñadas para operar dentro de una corriente (agua o viento), donde los álabes captan la energía cinética del fluido y la transmiten por medio de un rotor de eje vertical para generar energía eléctrica.

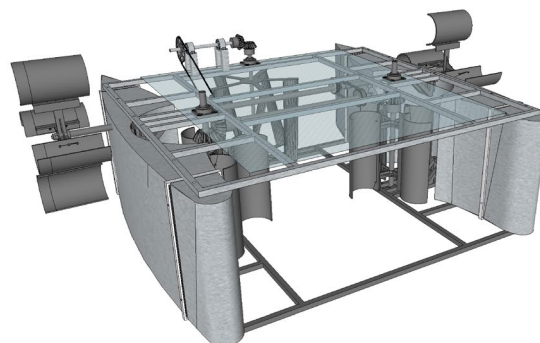


Figura 1. Vista frontal del HIPA con las turbinas rectas y helicoidal

Ambas turbinas comparten similitudes en su altura (50 cm), su radio (31 cm) y su rotor (1" de diámetro). Mientras que su principal diferencia radica en que la turbina recta (Figura 2a) está conformada por cuatro álabes rectos de 10 cm de radio instalados a 90°, mientras que la turbina helicoidal (Figura 2b) está conformada por 5 álabes helicoidales de 5 cm de radio con un ángulo de torsión de 30°. Los álabes están unidos en cada extremo por una base metálica al rotor, donde se encuentran integrados los rodamientos, soportes y engranajes de transmisión.

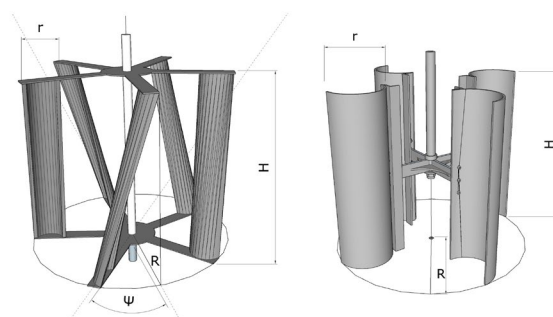


Figura 2. Vista frontal de turbina helicoidal y recta

### Determinación de la eficiencia de las turbinas

La potencia de una turbina está dada por el torque y la velocidad angular.

$$P = T \cdot \omega \quad [1]$$

El coeficiente de potencia se puede entender como la relación entre la potencia entregada por el dispositivo y la potencia del fluido, que teóricamente está definida por:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho AV^3} \quad [2]$$

Donde A es el área transversal, V es la velocidad de la corriente, y rho es la densidad del fluido. El cálculo de la potencia real que una turbina puede extraer de un fluido está definido como la diferencia entre la energía a la entrada y a la salida del dispositivo, y se expresa así:

$$P_c = \frac{1}{2} m (V^2 - V_0^2) \quad [3]$$

Donde: "P<sub>c</sub>" es la potencia mecánica extraída por el rotor, "V" es la velocidad del fluido en la entrada del rotor, y "V<sub>0</sub>" es la velocidad del fluido en la salida del rotor.

De esta manera, el flujo de agua a través del rotor se puede obtener mediante la expresión:

$$m = \rho A \frac{(V + V_0)}{2} \quad [4]$$

y la máxima potencia extraída se alcanza cuando V<sub>0</sub> = 1/3 V.

$$P_{cmax} = 0.59 \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad [5]$$

Lo que indica que en condiciones ideales un dispositivo que no tiene pérdidas (100% eficiente), sólo puede extraer 59% de la energía cinética del fluido; sin embargo, en la práctica el coeficiente de potencia de un dispositivo oscila entre 20 y 50 % (Forslund, 2018).

### Metodología

Las pruebas consistieron en colocar las turbinas y los instrumentos de medición dentro de una corriente de viento.

### Montaje de equipo e instrumentación

Las pruebas se realizaron en la azotea del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería de la UNAM campus Sisal, a una altura aproximada de 7 m.

La instrumentación incluyó la instalación de un torquímetro y un anemómetro ultrasónico, con el primero se obtiene el par motor y la velocidad angular, mientras que el segundo mide la velocidad del viento que mueve al rotor.

Las pruebas experimentales (Figura 3) se llevaron a cabo del 20 de octubre al 5 de noviembre de 2021. El registro de datos se realizó a una frecuencia de muestreo de 1 Hz para el torquímetro y 16 Hz para el anemómetro.

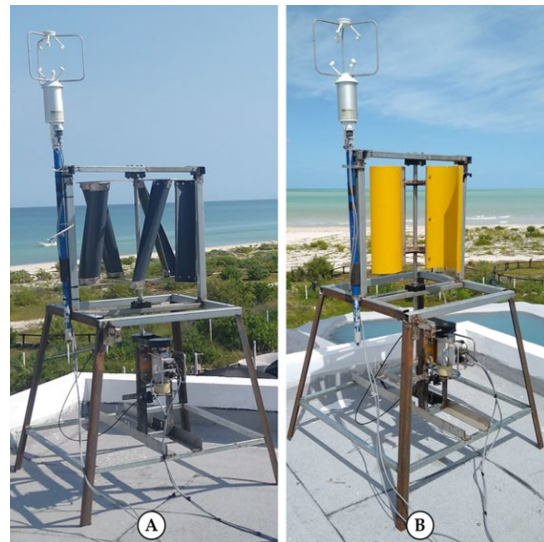


Figura 3. Pruebas físicas con la turbina helicoidal y recta

Con los datos recabados durante las pruebas se obtuvo la potencia de cada turbina y la eficiencia de generación como se describe a continuación.

### Procesamiento datos

Posteriormente a la campaña experimental se realizó un procesamiento de datos, el cual consistió en agrupar los datos del torquímetro y anemómetro. Debido a las características de cada equipo, éstos se encontraban a frecuencias de muestreo distintas, se homologaron las series temporales a una frecuencia de 1 Hz. Debido a que el experimento se llevó a cabo con las condiciones de viento de la zona y fue variable en todo el intervalo de tiempo, los datos de las dos series temporales se agruparon en función de la velocidad del viento y del tipo de rotor. De esta manera, el rango de velocidades para el rotor recto quedó de 8.5 m/s a 12.5 m/s, y para el rotor helicoidal de 6.5 a 12.5 m/s.

Posteriormente, se graficaron como una dispersión de puntos (torque-potencia) para una determinada velocidad del viento.

Finalmente, se realizó un ajuste para los datos del rotor recto y el rotor helicoidal, para cada velocidad seleccionada y se graficó la curva de potencia.

### Resultados y Discusión

En la figura 4 se muestran las curvas de potencia de la turbina de álabes rectos para las diferentes velocidades del viento; en color rojo se muestran los valores para la velocidad de 6.5 m/s, en color azul para la velocidad de 8.5 m/s y en color magenta para 12.5 m/s, así mismo, con marcadores circulares se muestra la potencia máxima teórica obtenida en cada curva (ver tabla 1), mientras que la línea recta en color negro corresponde a la curva de potencia máxima del rotor vs velocidad del viento.

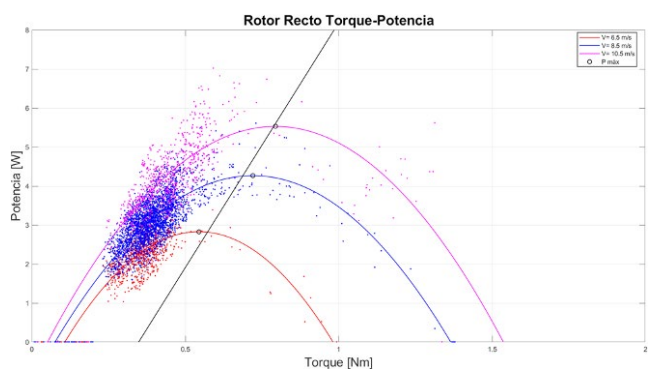


Figura 4. Curvas de potencia para la turbina recta

En la figura 5 se muestran las curvas de potencia para la turbina helicoidal en función del torque; en color verde se muestran los datos para la velocidad de 6.5 m/s, en color rojo para 8.5 m/s, en azul de 10.5 m/s y en magenta para la velocidad de 12.5 m/s. Los marcadores circulares muestran las potencias máximas para cada curva respectivamente (ver tabla 1).

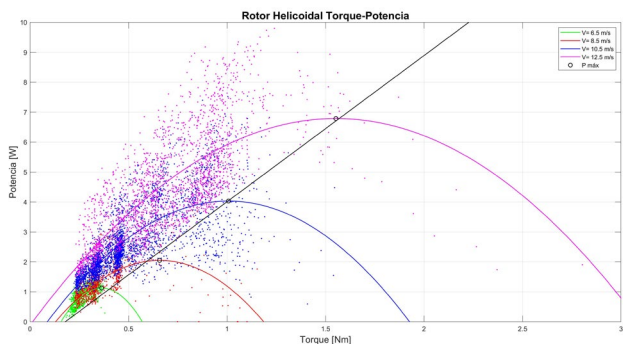


Figura 5. Curvas de potencia para la turbina helicoidal

En la tabla 1 se muestran los resultados de las potencias máximas, la velocidad del viento y el torque alcanzado con cada turbina de las figuras 4 y 5. Así mismo, en las últimas dos columnas de la tabla se puede observar la diferencia en porcentaje entre ambas turbinas, este cálculo se obtuvo al comparar las potencias obtenidas en cada velocidad. En la tabla se puede observar que la turbina de álabes rectos es más eficiente cuando la velocidad del viento es de 8.5 y 10.5 m/s, en cambio el rotor helicoidal resulta ser más eficiente cuando la velocidad del viento es de 12.5 m/s.

De igual manera se puede observar que la turbina helicoidal puede vencer el estado de reposo con velocidades más bajas en el viento (6.5 m/s), mientras que la turbina de álabes rectos vence el reposo sólo a velocidades superiores (8.5 m/s).

Tabla 1. Potencias máximas y diferencias de eficiencia entre turbinas

Turbina	V [m/s]	T [Nm]	P [W]	$\eta$ [%]	$\Delta\eta$ [%]
Recta	8.5	0.5444	2.8259	137.8	37.8
	10.5	0.7202	4.2685	105.9	5.9
	12.5	0.7939	5.5318	81.5	-
Helicoidal	6.5	0.3638	1.1258	100.0	-
	8.5	0.6577	2.0504	100.0	-
	10.5	1.0071	4.0311	100.0	-
	12.5	1.5525	6.785	122.7	22.7

Así mismo, estos resultados se pueden observar en la gráfica de la figura 6, donde se muestra una comparación entre los resultados de torque y potencia para ambas turbinas; en color azul se muestra la potencia máxima alcanzada con la turbina de álabes helicoidales, mientras que en color rojo se muestra la potencia máxima alcanzada en la turbina de álabes rectos.

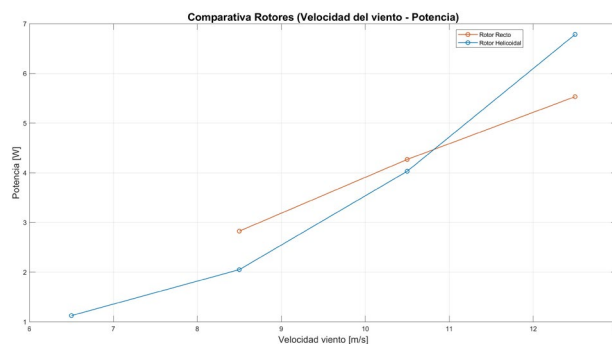


Figura 6. Potencia máxima alcanzada con las turbinas

Los resultados muestran que el torque y la potencia alcanzada con la turbina de álabes rectos es mayor a velocidades de 8.5 y 10.5 m/s, mientras que la turbina helicoidal alcanza mayor torque y potencia con velocidades del viento superiores a 12.5 m/s, también, se observó que la turbina helicoidal rompe el estado de reposo antes que la turbina recta (a velocidades del viento bajas), por lo que comienza a producir a partir de velocidades de 6.5 m/s, en cambio la turbina de álabes rectos inicia con velocidades de 8.5 m/s.

## Conclusiones

Por tanto, se puede concluir que la turbina de álabes rectos resulta ser más eficiente que la turbina helicoidal a velocidades de viento bajas (menores a 10.5 m/s), ya que en promedio es 38.7 % más eficiente a una velocidad del viento de 8.5 m/s y 5.9 % más eficiente a velocidad de 10.5 m/s. Mientras que la turbina helicoidal demostró ser más eficiente a velocidades altas (superiores a 12.5 m/s) ya que con vientos de 12.5 m/s es 22.7 % más eficiente que la turbina de álabes rectos. Lo anterior está directamente relacionado con la geometría de cada turbina y a la superficie de contacto de los álabes.

Se puede concluir que la turbina helicoidal trabaja a velocidades más bajas como se comprobó en este experimento,

siendo la velocidad de arranque de 6.5 m/s; sin embargo, es más eficiente a velocidades más altas. La turbina de álabes rectos necesita mayor velocidad de arranque, pero es más eficiente a velocidades bajas, con lo cual permite proponer ambas turbinas aptas para el aprovechamiento de corrientes en lugares donde el recurso es bajo. Sin embargo, es necesario señalar que se le podrían realizar algunas modificaciones a ambas turbinas con la finalidad de aumentar su eficiencia para determinados lugares, estas modificaciones podrían ser: incrementar el área de contacto de cada paleta o modificar el ángulo de torsión en los álabes, lo cual permitirá un desempeño más adecuado de la turbina para las condiciones de cada sitio en particular. |

## Referencias

- 
- CEFP. Indicadores de economía y de finanzas públicas de países seleccionados. CEFP/041/2006.
- Forslund, J. (2018). *Studies of a Vertical Axis Turbine for Marine Current Energy Conversion - Electrical system and turbine performance*. Uppsala University.
- López-González, J.; Silva-Casarrín, R. y Mendoza-Baldwin, E. G. (2011). Aprovechamiento de la energía de las corrientes con el Hidrogenerador IMPULSA. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 2(4), 97-110.