

## MODELACIÓN FÍSICA DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA TIPO ARQUÍMEDES

Varvasino Juan Francisco, Sutin Freiman Joel,  
Arturo Rivetti, Mauricio Angulo, Cecilia Lucino, Sergio Liscia

UIDET Hidromecánica - Facultad Ingeniería - UNLP.  
Calle 47 N° 200, La Plata (CP1900), Argentina  
[joasutin@hotmail.com](mailto:joasutin@hotmail.com) [jfvarva@gmail.com](mailto:jfvarva@gmail.com)

### Introducción

La demanda de electricidad a nivel mundial aumenta del orden del 2% anualmente, y alcanza valores del orden del 5% en los países de mayor crecimiento. Un mundo con población en aumento debe contar con una provisión confiable de energía ya que la misma es un bien indispensable para el desarrollo y crecimiento de la sociedad. [1]

La matriz energética de Argentina está compuesta en primer lugar por un 60,5% proveniente de centrales que utilizan combustibles fósiles, mayormente gas natural, luego, en segundo lugar, aparecen las centrales hidroeléctricas con un 25,8% y, el 13,7% restante proviene de centrales atómicas y energías sustentables. [2]

Las principales fuentes de energía mencionadas anteriormente son incompatibles con la conservación del ambiente. Ante la problemática emergente del cambio climático, las alternativas de generación de energías limpias cobran mayor relevancia pese a las complicaciones de llevar este tipo de soluciones a grandes escalas. Por otro lado, debe entenderse que el problema no sólo radica en la generación de energía sino también en su transporte y distribución, cuestión que afecta fundamentalmente a los pequeños poblados alejados de los grandes centros de generación eléctrica imposibilitando el desarrollo de estos.

Dado esto y a sabiendas que todavía hay poblados sin disponibilidad eléctrica, se decidió estudiar, a nivel de modelo físico, una turbina hidrocínética tipo Arquímedes. Las turbinas hidrocínéticas permiten generar energía eléctrica a partir de una fuente renovable, utilizando la energía de los cursos de agua, principalmente de ríos, mares y canales artificiales, entre otros.

### Metodología

Con el objetivo de analizar el comportamiento de una turbina hidrocínética que aprovecha la componente cinética de un río sin regulación, se diseñó y construyó un modelo físico para determinar la potencia mecánica que la turbina puede aprovechar del flujo a diferentes velocidades de rotación y determinar la curva de rendimiento para diferentes condiciones de ensayo.

La evaluación de la eficiencia de una turbina hidrocínética se basa en el modelo unidimensional de Betz el cual establece que la potencia del escurrimiento se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P_h = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V_{in}^3 \quad (1)$$

Donde la  $P_h$  es la potencia del flujo,  $\rho$  es la densidad del agua,  $A$  es el área perpendicular al escurrimiento y  $V_{in}$  es la velocidad del escurrimiento.

Al estudiar la potencia mecánica de la turbina, sin considerar el sistema de transmisión eléctrico del generador, queda como resultado la siguiente expresión:

$$P = P_h \cdot \eta_h \cdot \eta_m \quad (2)$$

Donde  $P$  es la potencia mecánica de la turbina restando las perdidas friccionales,  $P_h$  es la potencia hidráulica,  $\eta_h$  es el rendimiento hidráulico y  $\eta_m$  es el rendimiento mecánico.

La potencia resultante se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P = T \cdot \omega = m \cdot g \cdot v \quad (3)$$

Donde  $T$  es el Torque de la turbina correspondiente a la potencia mecánica,  $\omega$  es la velocidad angular de la turbina,  $m$  es la masa del sistema de contrapeso,  $g$  es la gravedad y  $v$  es la velocidad ascensional del contrapeso.

Para medir la potencia de la turbina se diseñó un sistema de poleas y contrapeso que consiste en un conjunto de pesas unidas al eje de la turbina mediante un sistema de poleas, en donde el giro de la turbina genera un desplazamiento ascensional de las pesas, siendo ese movimiento, la velocidad del contrapeso  $v$  que se considera para el cálculo de la potencia de la turbina, ec.3.

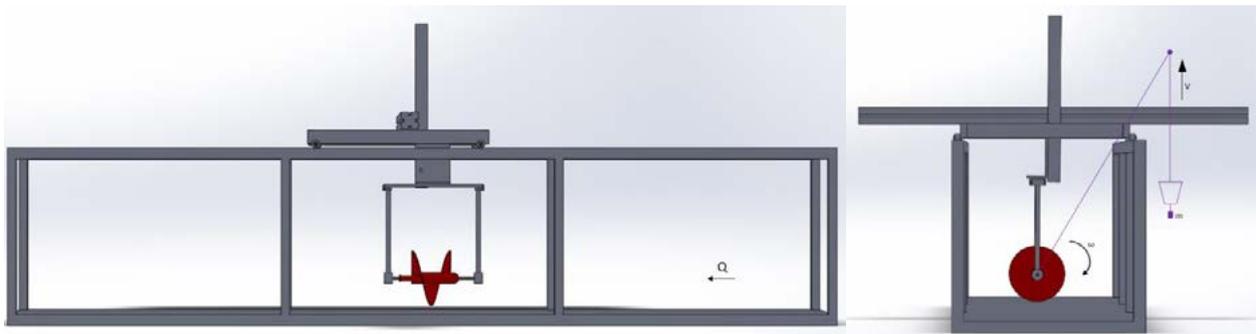


Ilustración 1. Modelo físico de la turbina hidrocinética implantado en el canal de ensayos. Izquierda, vista lateral donde se indica el sentido del escurrimiento. Derecha, la vista frontal donde se esquematiza el sistema de medición de torque.

Si a la potencia  $P$  le sumamos las perdidas friccionales que se disiparon durante el ensayo se obtiene el rendimiento mecánico de la turbina.

$$P_{diss} = f \cdot (m_t - \rho \cdot V_t) \cdot g \cdot \omega \cdot r_{soporte} \quad (4)$$

Donde  $P_{diss}$  es la potencia disipada,  $r_{soporte}$  es el radio del dispositivo de soporte,  $f$  es el coeficiente de fricción entre las 2 superficies donde se produce el giro de la turbina,  $m_t$  es la masa de la turbina,  $V_t$  es el volumen de la turbina.

$$\eta_h = (P + P_{Lm}) / P_h = P_m / P_h \quad (5)$$

### Configuración del modelo físico

Para el dimensionado del modelo físico de la turbina hidrocínética tipo Arquímedes, se partió de un diseño optimizado en CFD por la UIDET de Hidromecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.

Partiendo de esta geometría, se diseñó el modelo físico mediante las “Leyes fundamentales de la similitud”, las cuales implican una similitud tanto dinámica, cinemática como geométrica en los puntos de funcionamiento denominados homólogos. Se admite que entre puntos de funcionamiento homólogos en semejanza absoluta se conserva el rendimiento.

La condición limitante para la construcción del modelo físico es el tamaño del canal en el cual se ensayó. El canal presenta una sección cuadrada de 60cm de lado, por lo que se adoptó un diámetro de rodete para el modelo de 20cm. Este diámetro se lo adoptó con el objetivo de reducir la influencia del torque friccional en las mediciones y, a su vez, dejar una distancia al fondo de  $D/2$  y de las paredes laterales de  $D$  para que el efecto pared no tenga influencia.

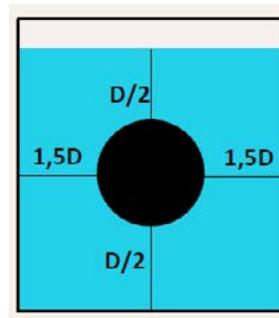
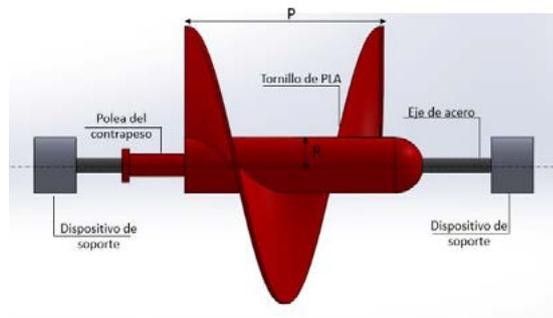


Ilustración 2. Componentes de la turbina hidrocínética    Ilustración 3. Ubicación de en el canal.

Tabla 1. Datos de partida de la modelación matemática y física.

Datos turbina	Modelado numérico	Modelado físico
Diámetro [m]	0,510	0,200
Velocidad [m/s]	1,000	0,2041
$E_c$ [cm]	5,10	0,22

Una vez dimensionada, se la construyó en el Laboratorio de Hidromecánica con una impresora 3D, la cual utiliza plástico PLA para fabricar las piezas. Una vez construida, se le aplicó macilla para minimizar las irregularidades y darle una mejor terminación, además se la pintó con pintura sintética.



Imagen 1. Turbina macillada y pintada con hilo enrollado en su polea trasera.

El contrapeso recorre una distancia  $L$ , la cual tiene una trayectoria rectilínea vertical ascendente. Al comenzar el ensayo, el contrapeso se encuentra apoyado en el suelo y el ensayo termina cuando el contrapeso llega hasta la polea ubicada en el puente colgante.



Imagen 2 Trayectoria del hilo que conecta la turbina con el contrapeso.

Los parámetros que se midieron durante el ensayo para poder obtener la curva de rendimiento de la turbina son:

1. Caudal circulante por el canal se obtuvo con un vertedero triangular aguas abajo del canal. [3]

$$Q = [8 \cdot C_e \cdot (2g)^{1/2} \cdot \tan(\theta/2) \cdot H^{5/2}] / 15 \quad (6)$$

Donde  $C_e$  es el coeficiente de contracción del vertedero,  $\theta$  es el ángulo del vertedero y  $H$  es la altura de agua desde el paramento a la superficie libre.

2. La masa del sistema de contrapeso ( $m$ ) que se midió con una balanza de precisión.
3. La velocidad angular de la turbina ( $\omega$ ) se la midió con una cámara de fotos que capturaba el paso de una marca negra sobre el eje de la turbina.

De esa forma, se procesó el video donde se captura el giro de la turbina y, cada vez que la cámara capta el sector pintado de negro implica un giro de una vuelta de la turbina.

Este procedimiento se realizó para obtener entre 7 a 10 puntos de funcionamiento asociados a contrapesos que varían de 35 a 250 gramos.

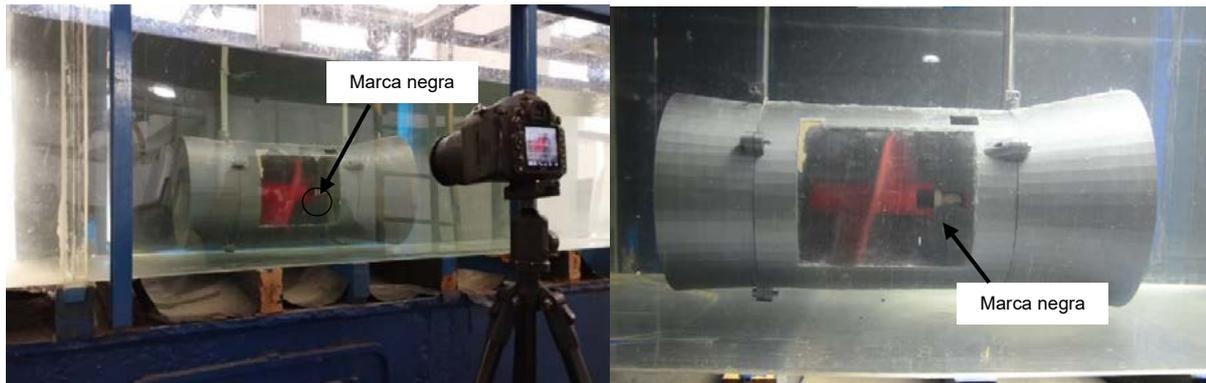


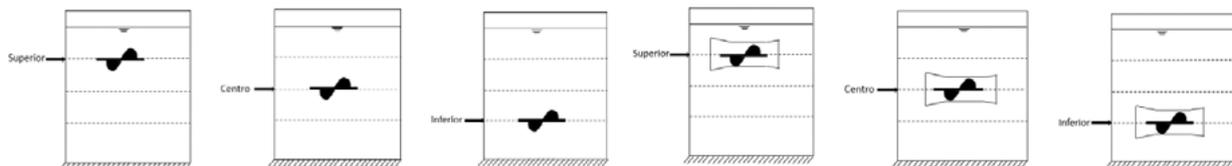
Imagen 3 La cámara está grabando el giro de la turbina mientras se realiza el ensayo.

## Resultados

El ensayo se repitió para 3 profundidades diferentes. En la Tabla 2, se muestran los rendimientos máximos de la turbina hidrocínética con sus revoluciones por minutos asociadas para los diferentes escenarios ensayados.

Tabla 2. Rendimientos máximos de la turbina hidrocínética para los diferentes escenarios.

Escenario	Libre		Con tobera	
	n (RPM)	nh (%)	n (RPM)	nh (%)
A 5cm de la superficie libre	38	40,2%	60	67,6%
Sección central	36	40,4%	60	66,6%
A 5cm del fondo	36	35,9%	58	68,6%



A continuación, se presentan los escenarios que resultaron más favorables tanto para la alternativa sin nada como la alternativa con tobera.

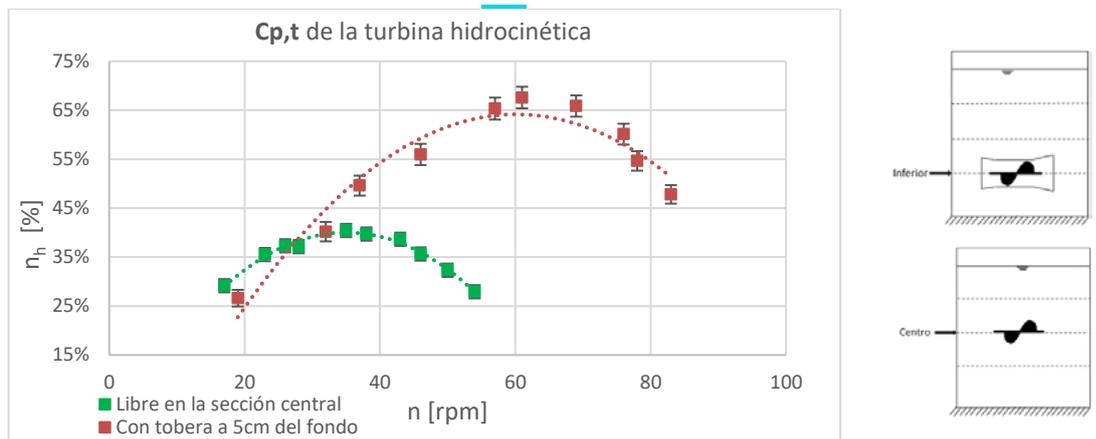


Fig. 1 Comparación de las curvas de Rendimiento vs  $n$  [rpm] de la modelación física con su banda de incertidumbre para una condición sin tobera en la sección central y con tobera a 5cm del fondo.

Adicionalmente, se realizará una comparativa con bibliografía que se utilizó para desarrollar el presente informe. En la publicación [4] se presenta un gráfico que compara el funcionamiento de diferentes rotores de turbinas hidrocínéticas. A continuación, se presenta donde se ubica nuestra turbina hidrocínética tipo Arquímedes sin tobera, respecto del resto tipo de tipología de turbinas y disposición de las palas.

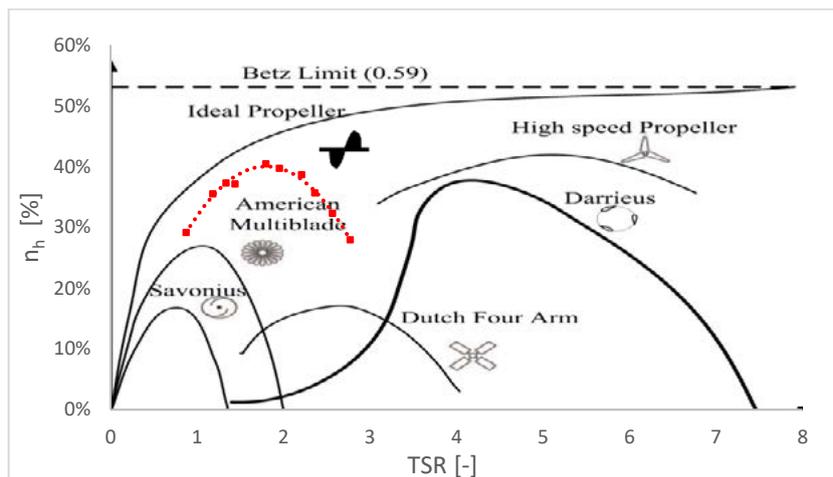


Fig. 2 Comparativa del funcionamiento de los rotores de la literatura con obtenido en el presente estudio.

## Conclusiones

Para los casos sin tobera, la mayor eficiencia de la turbina se dio para la condición en la cual se encuentra en la sección central, mientras que en la alternativa de tobera el rendimiento máximo se da cuando la turbina se encuentra a  $0,75D$  del fondo. Al estar cerca del fondo, el agua se encuentra más contenida por los bordes sólidos, factor que favorece a encauzar el flujo y generar una mayor eficiencia de la turbina.

El uso de la tobera genera un incremento de la eficiencia de valores próximos al 25%, siendo ésta una mejora considerable del rendimiento de la turbina.

Tal sistema puede servir como protección a la turbina frente a obstáculos que el cauce del río arrastre. Cabe mencionar que el punto óptimo de funcionamiento de la turbina con tobera se encuentra prácticamente para el doble de velocidad de rotación. La turbina libre alcanza su punto óptimo en 36 rpm y la alternativa con tobera en 57 rpm.

Los valores de  $n_h$  tienen una diferencia del orden del 10% respecto con la modelación numérica. Tal diferencia puede deberse a la interposición del sistema de soportes y, de la manera que se escaló la turbina hidrocínética, el valor de Reynolds no está bien representado y esto conlleva un comportamiento diferente del flujo.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la UIDET- HIDROMECHANICA de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), en especial al director Sergio Liscia, a la Coordinadora Cecilia Lucino, y a los profesores Mauricio Angulo y Arturo Rivetti, por asesorarnos y facilitarnos el uso de sus instalaciones y equipamientos a lo largo del proyecto.

### **Bibliografía**

1. "Aprovechamiento energético de un curso de agua"- Proyecto de instalaciones hidromecánicas, UNLP- 2004.
2. Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima (CAMMESA) – "Informe anual 2020".
3. Taller de hidráulica aplicada facultad de ingeniería - Universidad Nacional de La Plata"- P. Consoli y E. Lacunza, UNLP- 2021.
4. "Power Tracking Control Challenges in Hydrokinetic Energy Conversion Systems"