

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA TURBINA SAVONIUS EN CONDICIONES DE SUPERFICIE LIBRE

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF A SAVONIUS TURBINE UNDER FREE SURFACE CONDITIONS



¹Nicolás Ardila Vergara
²Mateo Velandia Suarez
³Laura Catalina Ramírez Villareal

^{1,2,3}Universidad Nacional de Colombia

Cómo citar: Velandia Suarez, M., Ardila Vergara, N. ., & Ramírez Villareal, L. C. (2025).
Análisis del comportamiento de una turbina Savonius en condiciones de superficie libre.
Publicaciones E Investigación, 19(2). <https://doi.org/10.22490/25394088.10452>

Recibido 10 mayo aprobado 20 junio 2025

RESUMEN

El diseño de turbinas en canales con interfaz agua-aire plantea desafíos significativos en el campo de la ingeniería hidráulica. Este estudio investiga el comportamiento del flujo a través de una turbina sumergida, y utiliza simulaciones avanzadas para modelar con precisión las interacciones entre los fluidos. La metodología empleada permite evaluar el rendimiento del diseño de la turbina en condiciones complejas y ofrece una solución para mejorar la eficiencia en sistemas de energía renovable.

Palabras clave: turbina Savonius; superficie libre; simulación CFD; eficiencia hidrocínética; interfaz agua-aire.

ABSTRACT

The design of turbines in channels with a water-air interface poses significant challenges in the field of hydraulic engineering. This study investigates the flow behavior through a submerged turbine and uses advanced simulations to accurately model fluid interactions. The methodology employed allows for the evaluation of turbine design performance under complex conditions and offers a solution for improving efficiency in renewable energy systems.

Keywords: Savonius turbine; free surface; CFD simulation; hydrokinetic efficiency; water-air interface.

¹ niardilav@unal.edu.co / ORCID 0009-0000-6102-7520
² mavelandias@unal.edu.co / ORCID 0009-0003-4500-4849
³ aremirezvi@unal.edu.co / ORCID 0009-0006-5252-9063



1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, las regiones aisladas sin conexión a la red eléctrica enfrentan dificultades de suministro energético. Una solución viable es el uso de fuentes renovables, entre ellas, las turbinas hidrocinéticas, que destacan en entornos fluviales. A diferencia de las hidroeléctricas convencionales, no requieren grandes extensiones de terreno, lo que las hace adecuadas para zonas remotas. Su diseño portátil y el fácil mantenimiento también las convierte en una opción más económica (Ibrahim et al., 2021).

Las turbinas de eje horizontal, adaptadas de la industria eólica, han sido las más usadas en ríos grandes. Sin embargo, su funcionamiento exige cuerpos

de agua profundos y con alta velocidad, condiciones que no siempre están presentes en los ríos colombianos (Benavides-Morán, 2022).

Esta investigación se enmarca en el proyecto FLUSS, cuyo objetivo es analizar la viabilidad de las turbinas hidrocinéticas tipo Savonius de eje horizontal en ríos de montaña. El problema se plantea para responder preguntas sobre el desempeño de la turbina en un entorno de laboratorio antes de realizar la construcción y el diseño de un banco para pruebas de turbinas en el canal de ensayos hidráulicos del laboratorio de hidráulica, el cual se observa en la figura 1.

Figura 1. Canal de hidráulica Universidad Nacional de Colombia



Fuente: Elaboración propia

Las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) corresponden a coeficientes adimensionales útiles para el análisis a escala real de la turbina en el canal. Estas ecuaciones permiten estimar las cargas sobre la estructura y calcular el coeficiente de generación de potencia de la turbina,

información que es fundamental para el desarrollo de un prototipo a escala real. En la tabla 1 se describe cada uno de los parámetros generales empleados en el estudio y diseño de la turbina.

Tabla 1. Descripción de parámetros generales de análisis para una turbina Savonius

Símbolo	Descripción	Unidades
C_p	Coefficiente de potencia	[1]
C_d	Coefficiente de arrastre	[1]
C_l	Coefficiente de sustentación	[1]
C_m	Coefficiente de momento	[1]
F_d	Fuerza de arrastre	[N]
F_l	Fuerza de sustentación	[N]
M	Momento	[Nm]
ω	Velocidad angular	[rad/s]
TSR	Tip speed ratio	[1]
U_∞	Velocidad de referencia	[m/s]
A_t	Área transversal	[m ² /s]
e	Overlap ratio	[1]
ρ	Densidad del agua	[kg/m ³]
R	Radio de la turbina	[m]

Fuente: Elaboración propia

$$C_p = C_m * TSR \quad (1)$$

$$TSR = \frac{\omega R}{U_\infty} \quad (2)$$

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho A_t R U_\infty^2} \quad (3)$$

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho A_t U_\infty^2} \quad (4)$$

2. MATERIALES Y MÉTODO

Para estudiar el desempeño de la turbina Savonius, se utilizó el software Ansys Fluent. Se aplicó el método VOF (Hirt & Nichols, 1981) para simular la interacción agua-aire de la superficie libre y ecuaciones RANS con un modelo de turbulencia k-omega. En este estudio, se implementó para la turbina una malla con movimiento impuesto, a velocidades fijas y con flujo no estacionario. Al variar la velocidad de rotación de la malla en diferentes simulaciones, fue posible evaluar la curva de desempeño de la turbina en su rango de operación. En la figura 2 se presentan las constantes y las variables de cada simulación, en las que las RPM serán la variable independiente principal de este estudio.

Tabla 2. Parámetros necesarios para la simulación

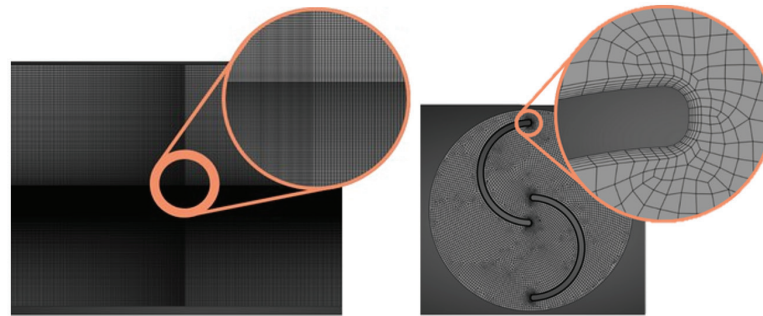
Parámetro	Valor
U_∞	0.1250 [m/s]
$D_{turbina}$	0.1710 [m]
Δt	0.01 [s]
$T_{simulación}$	20 [s]
$Re_{turbina}$	1.9393e+04
TSR y valores asociados	
TSR	0.4000, 0.6000, 0.8000, 1.0000
RPM	5.5844, 8.3766, 11.1688, 13.9610

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó una malla overset con los dominios del canal y de la turbina y su vecindad por separado. El dominio del canal incluye una malla estructurada y la turbina una malla no estructurada. Se llevó a cabo

un control de tamaño local de bordes priorizando la interfaz agua-aire, como se observa en la figura 2, y el dominio cercano a la turbina, con el objetivo de representar con precisión la capa límite y la superficie libre.

Figura 2. Detalle de los enmallados; canal (izquierda), turbina (derecha)

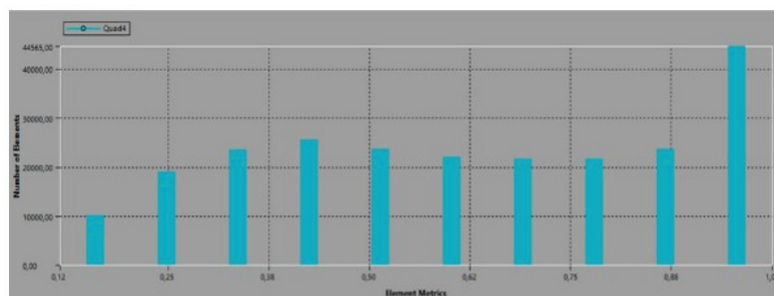


Fuente: Elaboración propia

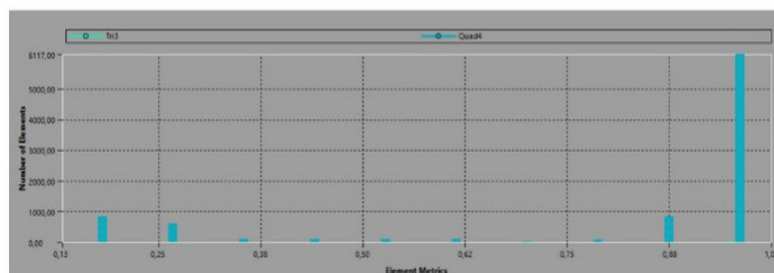
Para evaluar la calidad de los elementos, se realizó un estudio especial. Si bien la calidad de los elementos de la malla estructurada es baja, como se observa en la figura 3, fue necesario sacrificarla en el canal para

representar de forma precisa la superficie libre, y así evitar que las ecuaciones de RANS presenten divergencias en el tiempo.

Figura 3. Gráficas de calidad de los elementos del canal y la turbina



Element quality canal



Element quality turbina

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Condiciones de contorno y dominio de simulación



Fuente: Elaboración propia

Al definir las condiciones de contorno para la turbina, se empleó una condición de contorno de velocidad de entrada para la entrada de agua al canal, una salida de presión en el techo del dominio, una salida de presión en la salida física del sistema (especificando una altura de agua de $h=0.4\text{ m}$) y, en el resto de las paredes, condiciones de no deslizamiento.

3. DESARROLLO

Se ejecutaron cuatro simulaciones independientes, en las cuales se reportaron campos de velocidades, campos de fracción de volumen y los coeficientes de sustentación, arrastre y momento de la turbina. En la figura 5 se muestra el campo de velocidades para un

Tip Speed Ratio (TSR) = 0.8 tras alcanzar el estado pseudoestacionario.

Entre los resultados del campo de velocidades se aprecian una estela de vórtices que son causados por la rotación de la turbina y una mayor velocidad cerca del suelo, debido al bloqueo entre la turbina y el fondo del canal. Aunque la geometría simulada en este artículo difiere de la presentada por Patel & Patel (2023), es posible observar los mismos patrones en el campo de velocidades que los reportados en sus simulaciones bajo flujo totalmente sumergido, así como un desprendimiento de la capa límite alrededor de la curvatura de los álabes y zonas de recirculación en el álabe superior.

Figura 5. Campos de velocidades del canal

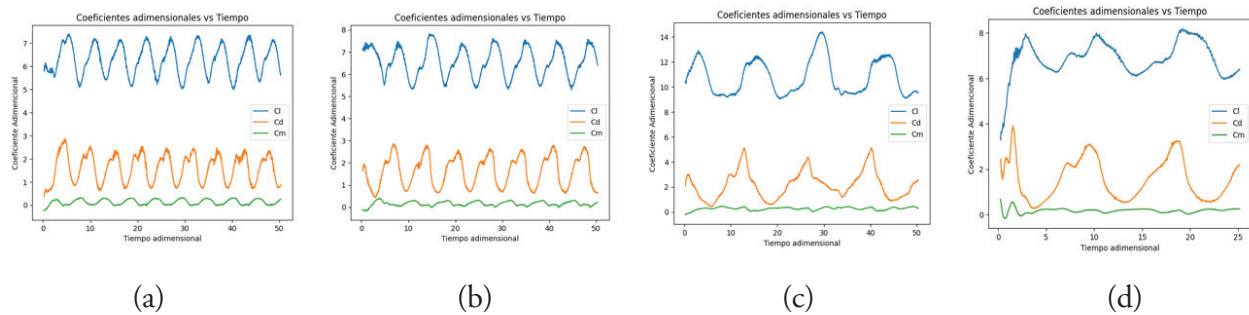


Fuente: Elaboración propia

En la figura 6 se presentan los coeficientes de sustentación, arrastre y momento frente al tiempo para cada TSR simulado. Se determina que la turbina en todos los casos alcanzó un estado pseudoestacionario,

lo que permitió calcular promedios temporales por ciclo de los coeficientes para evaluar el desempeño frente a las variaciones de la velocidad angular.

Figura 6. Coeficiente de sustentación, arrastre y momento frente al tiempo para (a) TSR = 1; (b) TSR = 0.8; (c) TSR = 0.6 y (d) TSR = 0



Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

Al comparar los resultados obtenidos para el coeficiente de momento con la bibliografía, se nota que para un TSR = 0.8 se presenta un perfil polar similar al reportado por Patel & Patel (2023). Sin embargo, existe un notable corrimiento de fase que podría deberse al efecto de la superficie libre o del piso del canal, lo que crea una constricción que podría modificar el comportamiento de la turbina.

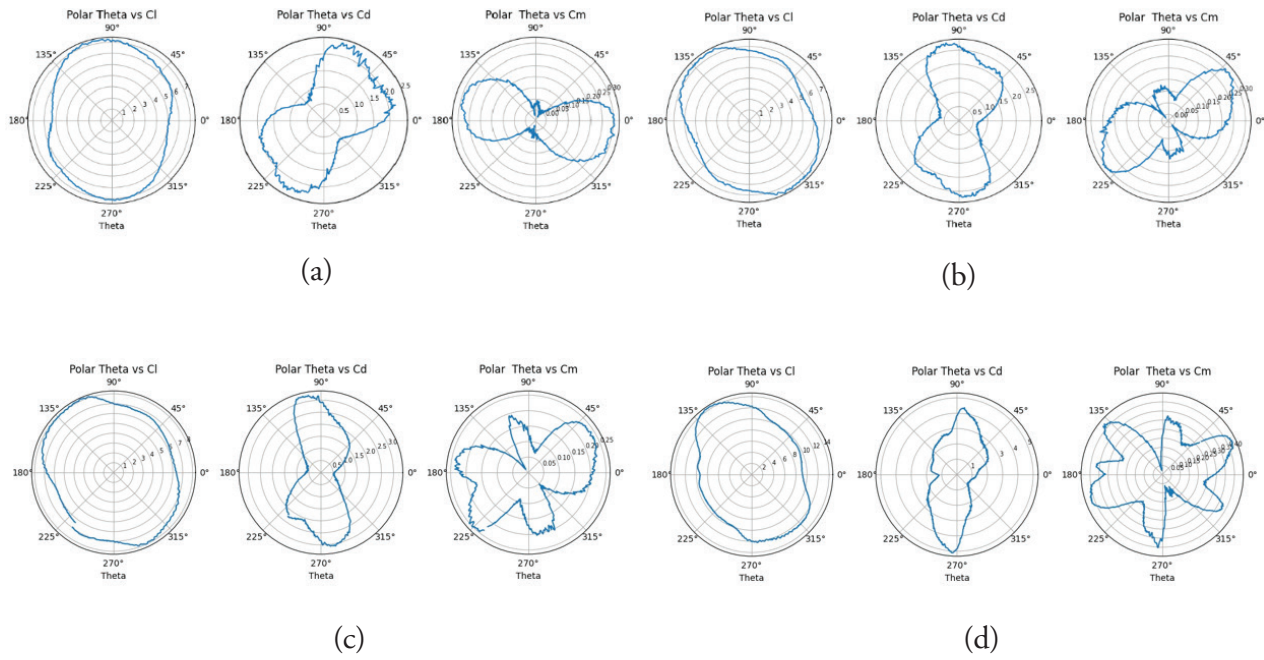
Al graficar en forma polar los coeficientes adimensionales, se detalla que el cambio en la velocidad angular incide en los armónicos presentes en los coeficientes adimensionales y su simetría. Se advierte que, al disminuir la velocidad de la turbina, se pierde la simetría entre el álabe superior e inferior tanto en momento como en arrastre, lo cual puede estar asociado a frecuencias de desprendimiento de vórtices cercanas a la frecuencia de rotación de la turbina. No obstante, es preciso realizar un postproceso más detallado de la simulación y compararlo con datos experimentales.

Adicionalmente, los coeficientes de sustentación son positivos y elevados. Estos resultados deben confirmarse con pruebas experimentales, debido a que se sospecha que puedan tratarse de errores numéricos, ya que la experiencia empírica indica coeficientes de sustentación negativos para este tipo de turbina.

En las cuatro velocidades simuladas, los resultados siguen una tendencia similar a la de Patel & Patel (2023); no obstante, el coeficiente de potencia con superficie libre es menor que en flujo uniforme sin esa condición. Este resultado deberá analizarse con mayor detalle, ya que Whelan et al. (2009) señalan que, para coeficientes de bloqueo altos, el coeficiente de potencia debe aumentar un 42.75 % frente al 7-10 % reportado por Patel & Patel (2023).

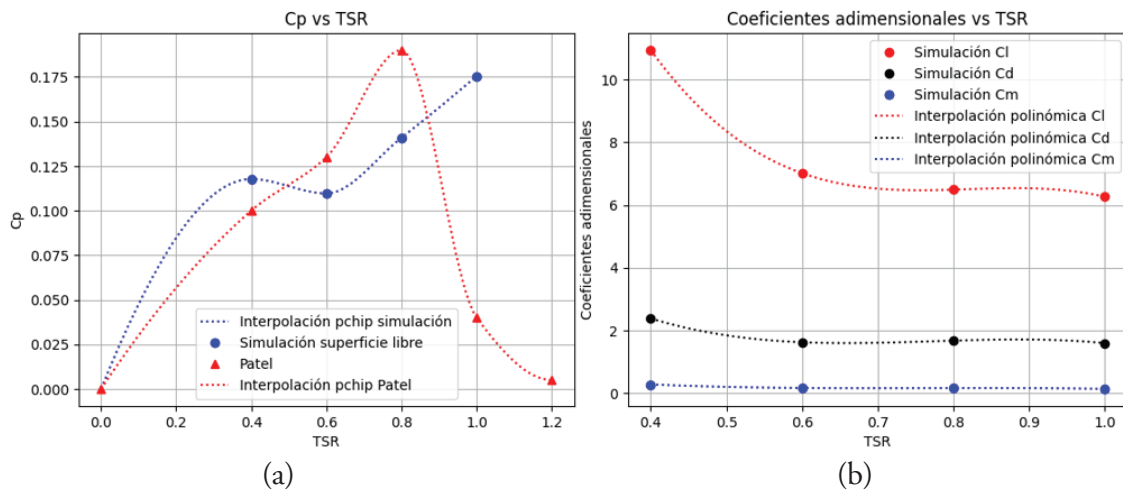
Además, tanto las fuerzas de arrastre de la turbina como las fuerzas de sustentación disminuyen con la velocidad angular de la turbina. Este comportamiento habrá de verificarse mediante pruebas en laboratorio.

Figura 7. Coeficiente de sustentación, arrastre y momento frente al ángulo para (a) TSR = 1, (b) TSR = 0.8, (c) TSR = 0.6, (d) TSR = 0.4



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. (a) coeficiente de potencia frente a TSR y (b) coeficiente de sustentación, momento y arrastre



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Prototipo de turbina hidrocínética tipo Savonius



Fuente: Elaboración propia

En la figura 9 se observa el prototipo de la turbina hidrocínética y su banco de pruebas, cuyas dimensiones se diseñaron a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones. Este banco de pruebas, que aún se encuentra en desarrollo, se empleará posteriormente para validar experimentalmente los coeficientes adimensionales presentados en la figura 8.

5. CONCLUSIONES

- Los campos de velocidad cercanos a la turbina corresponden a los valores reportados en Patel & Patel (2023), con quienes se realizó la comparación.
- Se detecta una alta dependencia del coeficiente de arrastre respecto al ángulo γ , en general, un corrimiento de fase del coeficiente de momento γ , en consecuencia, del coeficiente de potencia frente a los datos de la literatura sin superficie libre.
- Para los puntos explorados, el TSR máximo obtenido no coincide con el reportado en los estudios previos, y se pronostica una respuesta más plana respecto a la frecuencia angular de la turbina.

REFERENCIAS

- Benavides-Morán, A., Rodríguez-Jaime, L., & Laín, S. (2021). Numerical Investigation of the Performance, Hydrodynamics, and Free-Surface Effects in Unsteady Flow of a Horizontal Axis Hydrokinetic Turbine. *Processes*, 10(1), 69. <https://doi.org/10.3390/pr10010069>
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Ibrahim, W. I., Mohamed, M. R., Ismail, R. M. T. R., Leung, P. K., Xing, W. W., & Shah, A. A. (2021). Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy Reports*, 7, 2021-2042. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.003>
- Patel, R. S., & Patel, V. K. (2023). Numerical investigation and experimental validation about negative overlap in Savonius hydrokinetic turbine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(12), 648. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04557-4>
- Whelan, J. I., Graham, J. M. R., & Peiró, J. (2009). A free-surface and blockage correction for tidal turbines. *Journal of Fluid Mechanics*, 624, 281-291. <https://doi.org/10.1017/S0022112009005916>