

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2025,
Volumen 9, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA TURBINA DE PEQUEÑA ESCALA PARA TUBERÍAS DE AGUA VARIANDO EL NÚMERO DE ÁLABES

NUMERICAL SIMULATION ANALYSIS OF A
SMALL-SCALE TURBINE FOR WATER PIPELINES
VARYING THE NUMBER OF BLADES

Miguel Angel Chagolla Aranda

Tecnológico Nacional de México

Enrique de Jesús Moreno Carpintero

Tecnológico Nacional de México

Erik Rosado Tamariz

Tecnológico Nacional de México

Rafael Campos Amezcua

Tecnológico Nacional de México

Miguel Angel Chagolla Gaona

Tecnológico Nacional de México

Arturo Abúndez Pliego

Tecnológico Nacional de México

Karol Hernández Ramírez

Tecnológico Nacional de México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rm.v9i1.16125

Análisis de la Simulación Numérica de una Turbina de Pequeña Escala para Tuberías de Agua Variando el Número de Álabes

Miguel Angel Chagolla Aranda¹

miguel.ca@cenidet.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-7649-7389>

Tecnológico Nacional de México, Cenidet
México

Enrique de Jesús Moreno Carpintero

enrique.mc@zacatepec.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5472-1503>

Tecnológico Nacional de México IT de
Zacatepec
México

Erik Rosado Tamariz

erik.rt@cenidet.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0003-1476-7897>

Tecnológico Nacional de México, Cenidet
México

Rafael Campos Amezcua

rafael.ca@cenidet.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3380-2598>

Tecnológico Nacional de México, Cenidet
México

Miguel Angel Chagolla Gaona

miguel.cg@zacatepec.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0001-0915-487X>

Tecnológico Nacional de México IT de
Zacatepec
México

Arturo Abúndez Pliego

arturo.ap@cenidet.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8220-4338>

Tecnológico Nacional de México, Cenidet
México

Karol Hernández Ramírez

L23090591@cenidet.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0007-1718-1716>

Tecnológico Nacional de México IT de
Zacatepec
México

RESUMEN

El aprovechamiento de la energía hidráulica en sistemas de tuberías representa una alternativa eficiente y sostenible para generar electricidad a pequeña escala. En este contexto, las turbinas tipo Savonius son una opción para la obtención de energía en tuberías de redes de distribución de agua, ya que convierten la energía cinética del agua en energía mecánica o eléctrica, siendo ideales para espacios confinados y comunidades con recursos limitados. En este estudio, se simuló el efecto del número de álabes en la velocidad del flujo usando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) en condiciones de estado permanente, variando de 2 a 12 álabes. Los resultados indican que las turbinas con menor número de álabes logran mayores velocidades máximas del fluido, pero generan extensas áreas con velocidades negativas, pudiendo reducir su eficiencia. La turbina con seis álabes mostró un equilibrio óptimo entre velocidades axiales positivas y negativas, destacando como la configuración que podría ser más eficiente. Estos hallazgos contribuyen al diseño de turbinas más efectivas para aplicaciones específicas.

Palabras clave: energía hidráulica, turbinas tipo savonius, dinámica de fluidos computacional (CFD), diseño de turbinas

¹ Autor principal

Correspondencia: enrique.mc@zacatepec.tecnm.mx

Numerical Simulation Analysis of a Small-Scale Turbine for Water Pipelines Varying the Number of Blades

ABSTRACT

The utilization of hydraulic energy in piping systems represents an efficient and sustainable alternative for generating electricity on a small scale. In this context, Savonius-type turbines are an option for energy generation in water distribution network pipes, as they convert the kinetic energy of water into mechanical or electrical energy. They are ideal for confined spaces and communities with limited resources. In this study, the effect of the number of blades on flow velocity was simulated using Computational Fluid Dynamics (CFD) under steady-state conditions, varying from 2 to 12 blades. The results indicate that turbines with fewer blades achieve higher maximum fluid velocities but generate extensive areas of negative velocities, potentially reducing their efficiency. The six-blade turbine demonstrated an optimal balance between positive and negative axial velocities, standing out as the most potentially efficient configuration. These findings contribute to the design of more effective turbines for specific applications

Keywords: hydraulic energy, savonius-type turbines, computational fluid dynamics (CFD), Turbine design

Artículo recibido 05 diciembre 2024
Aceptado para publicación: 25 enero 2025



INTRODUCCIÓN

El acelerado ritmo de la vida moderna exige un suministro eficiente de recursos y servicios. Muchas actividades socioeconómicas dependen, directa o indirectamente, de la electricidad. Para mantener el actual modelo económico, es esencial encontrar una forma de suministrar energía de manera constante sin agotar los recursos naturales, considerando el impacto socioambiental diario (IRENA, 2020). Por lo que se buscan intensamente recursos renovables para generar energía eléctrica, resultando en un aumento significativo del desarrollo de sistemas de energía verde, aunque con diversas deficiencias. Entre estos recursos renovables se encuentran los generadores mareomotrices, los paneles solares, las turbinas eólicas, las centrales geotérmicas y las turbinas hidráulicas. La operación eficiente de estas tecnologías depende de múltiples factores, como la falta de espacio adecuado entre embalses, las anomalías climáticas, la intermitencia de los generadores eólicos y solares, y la dependencia de las mareas en los generadores mareomotrices. Aunque estos problemas pueden minimizarse, seguirán existiendo otras limitaciones (Talha et al., 2020).

En este contexto, el aprovechamiento de la energía disponible en los sistemas de transporte de agua, como las tuberías de edificios y viviendas, donde el agua fluye a altas velocidades, representa una solución alternativa a esta problemática (Breeze, 2019; Sthel et al., 2013; Das, 2015; Junejo et al., 2018). Una de las soluciones es la instalación de turbinas hidráulicas adaptadas al área de la sección transversal de las tuberías (Ma et al., 2018; Hamlehdar et al., 2022; Hasanzadeh et al., 2021), conocidas como energía hidroeléctrica de conductos, que utiliza la energía mecánica del agua en los sistemas de suministro de agua a través de conductos para generar electricidad. Generalmente, estos conductos son tuberías existentes de sistemas de distribución de agua (Abdullah et al., 2021).

Actualmente, existe una tendencia mundial para desarrollar aplicaciones de turbinas hidráulicas en conductos, ya que generan una huella de carbono mínima y pueden proporcionar electricidad de manera relativamente económica y fácil. En este sentido, se están desarrollando turbinas de baja potencia que permitan obtener energía de manera más eficiente que los dispositivos actuales. Las turbinas Savonius desempeñan un papel clave en el aprovechamiento de la energía en sistemas de tuberías de agua, especialmente en aplicaciones de pequeña escala y en entornos donde el flujo es constante, pero de baja velocidad.



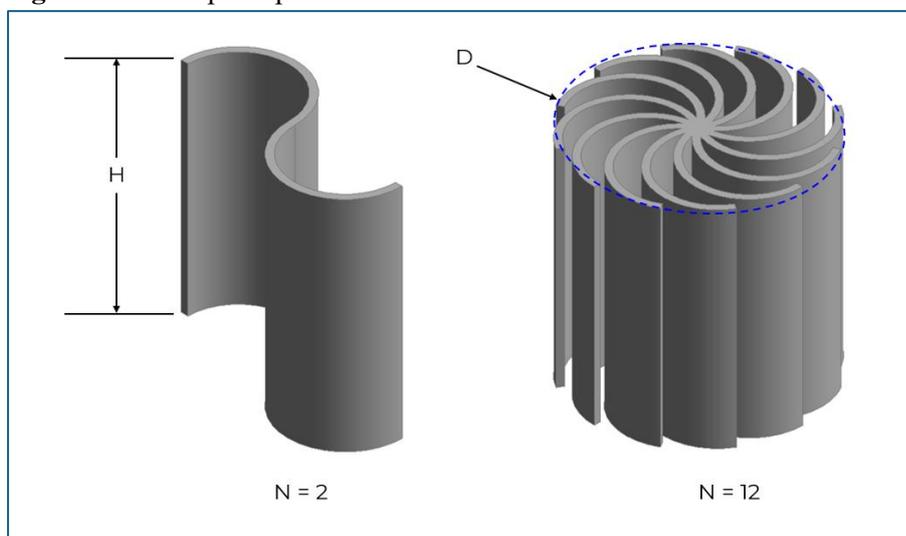
Su diseño simple y eficiente permite convertir la energía cinética del agua en energía mecánica o eléctrica, útil en infraestructuras hidráulicas como distribución de agua potable, riego y tratamiento de aguas residuales.

Estas turbinas son eficientes en espacios confinados y de bajo costo, promoviendo el uso de energías renovables en comunidades rurales con recursos energéticos limitados. Se han logrado avances en el desarrollo de dispositivos capaces de extraer suficiente energía para alimentar sensores de monitoreo de redes hidráulicas (Patel & Patel, 2021; Kumar & Saini, 2017; Yao et al., 2023; Yeo et al., 2019; Payambarpour & Najafi, 2020; Chen et al., 2021; Titus & Ayalur, 2019); sin embargo, en la literatura se destaca la necesidad de seguir mejorando el diseño de esta tecnología para optimizar su eficiencia (Samora et al., 2016; Hamzah et al., 2018; Payambarpour et al., 2019; Payambarpour et al., 2020; Lahamornchaiyakul & Kasayapanand, 2023). Debido a lo anterior, en este trabajo se lleva a cabo la simulación del patrón de flujo de agua entre los álabes de una turbina de pequeña escala tipo Savonius, variando el número de álabes para determinar la configuración que maximiza la velocidad del flujo.

METODOLOGÍA

Los principales parámetros de diseño de la turbina tipo Savonius son la altura (H), el número de álabes (N) y el diámetro (D). En esta simulación, dichos parámetros son los siguientes: una altura de 100 mm, un diámetro de 100 mm, y un número de álabes que varía entre 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 y 12. En la Figura 1 se muestra la turbina utilizada en la simulación de las configuraciones con 2 y 12 álabes y los parámetros de diseño definidos.

Figura 1.- Principales parámetros de diseño

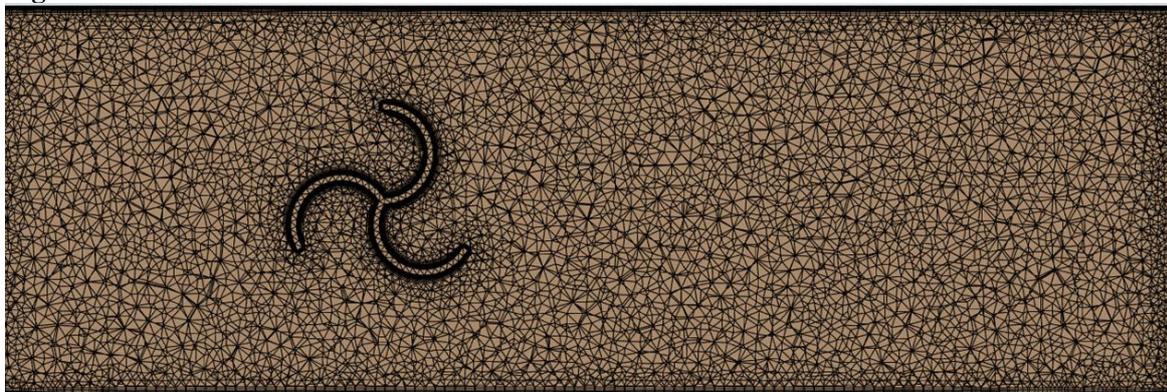


El uso de CFD ha ganado amplia aceptación en los últimos años como una herramienta poderosa y prometedora para el diseño y optimización de microturbinas (Payambarpour & Najafi, 2020). En este estudio, se llevaron a cabo simulaciones mediante CFD para evaluar el efecto de diferentes números de álabes de una turbina de pequeña escala en el comportamiento de la velocidad del fluido en las proximidades de los álabes. El software empleado para las simulaciones fue Ansys Fluent.

El dominio computacional se definió como una cavidad con un ancho equivalente a tres veces el diámetro de la turbina y una altura igual a dos veces su diámetro. La turbina se posicionó a una distancia de dos veces su diámetro respecto a la entrada y a cuatro veces su diámetro respecto a la salida, ya que estas dimensiones aseguraron un flujo desarrollado a la salida.

La malla utilizada fue híbrida, con elementos tetraédricos en el fluido y elementos hexaédricos en las superficies de la tubería. En las cercanías de la turbina, se realizó un refinamiento de la malla para capturar los efectos de la capa límite y la interacción entre el fluido y la turbina, como se muestra en la Figura 2. El total de elementos empleados fue de 1,002,341, un valor similar al reportado para un sistema equivalente en una turbina de pequeña escala, según Lahamornchaiyakul, 2024.

Figura 2.- Distribución de la malla en la sección interior.



Dado que el fluido utilizado en la simulación es agua, el fluido se consideró incompresible. El modelo de turbulencia utilizado fue κ - ϵ realizable, y la simulación se llevó a cabo en estado permanente.

Las condiciones de frontera definidas fueron las siguientes: en la entrada, se impuso una velocidad del fluido de 5 m/s; en la salida, se estableció una presión atmosférica de 101.3 kPa. Las paredes de la tubería se modelaron con una condición de no deslizamiento tipo muro, mientras que la turbina se definió como un elemento fijo. El criterio de convergencia se estableció en 1×10^{-6} en términos de la velocidad del fluido.

Las simulaciones se realizaron bajo estos parámetros para una turbina con 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 y 12 álabes, considerando una distribución uniforme alrededor del diámetro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

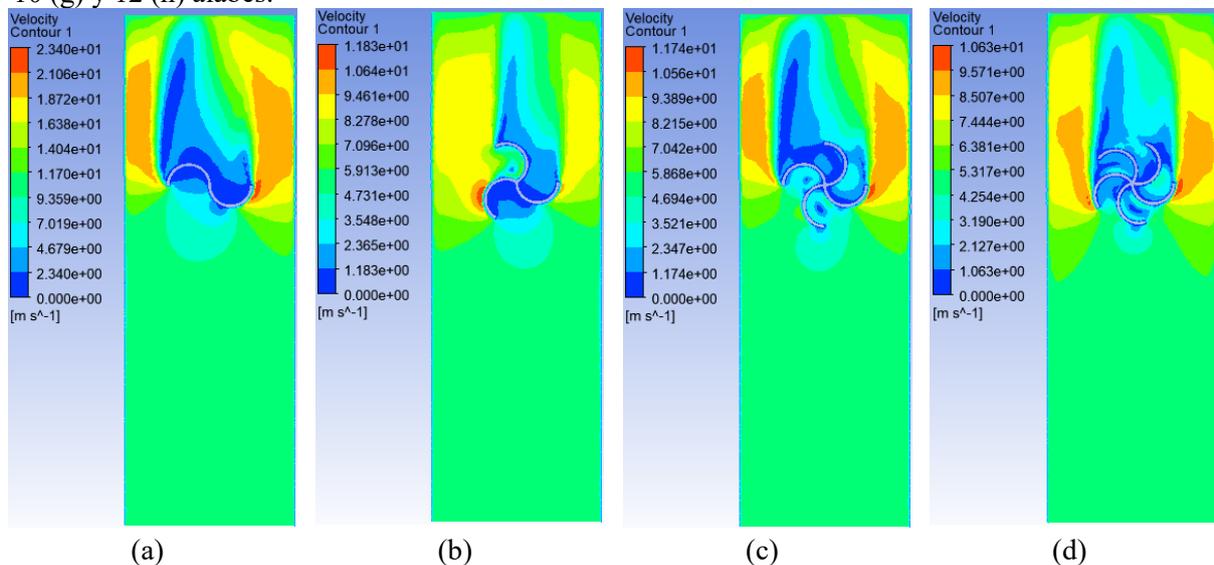
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas al variar el número de álabes, analizando la velocidad total y la velocidad axial del flujo (dirección perpendicular a las caras de entrada y salida del sistema).

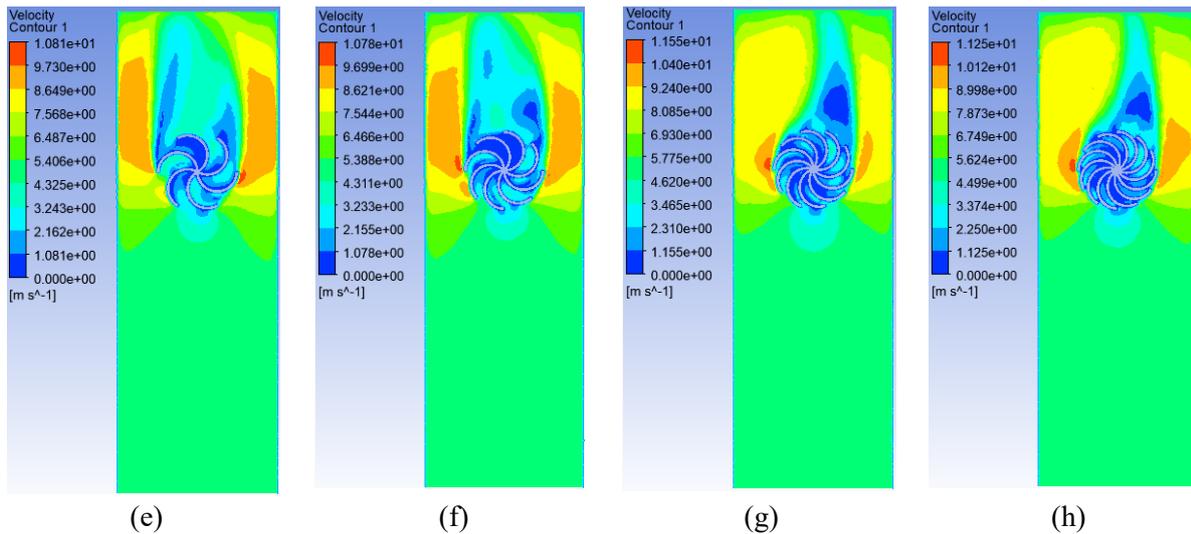
En la Figura 3 se muestra la distribución de la velocidad total del flujo para turbinas con 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 y 12 álabes. En la Figura 3(a) se observa que la velocidad máxima se alcanza con la turbina de dos álabes, registrando un valor de 23.4 m/s. Además, las velocidades mínimas se localizan en las regiones internas del diámetro de la turbina, mientras que las velocidades máximas se concentran entre los costados de la turbina y la tubería debido a la reducción del área transversal por donde pasa el fluido.

La velocidad máxima del flujo disminuye a medida que aumenta el número de álabes, alcanzando su valor más bajo con cinco álabes, con 10.63 m/s (Figura 3(d)).

Sin embargo, en las turbinas con seis y ocho álabes (Figuras 3(e) y 3(f)), se observa un ligero incremento en la velocidad máxima respecto a la turbina de cinco álabes, con valores cercanos a 10.8 m/s. Por otro lado, en las turbinas con diez y doce álabes (Figuras 3(g) y 3(h)), la velocidad máxima aumenta nuevamente en comparación con las de seis y ocho álabes, alcanzando 11.55 m/s y 11.25 m/s, respectivamente.

Figura 3.- Velocidad total del flujo para los casos de la turbina con 2 (a), 3 (b), 4 (c), 5 (d), 6 (e), 8 (f), 10 (g) y 12 (h) álabes.





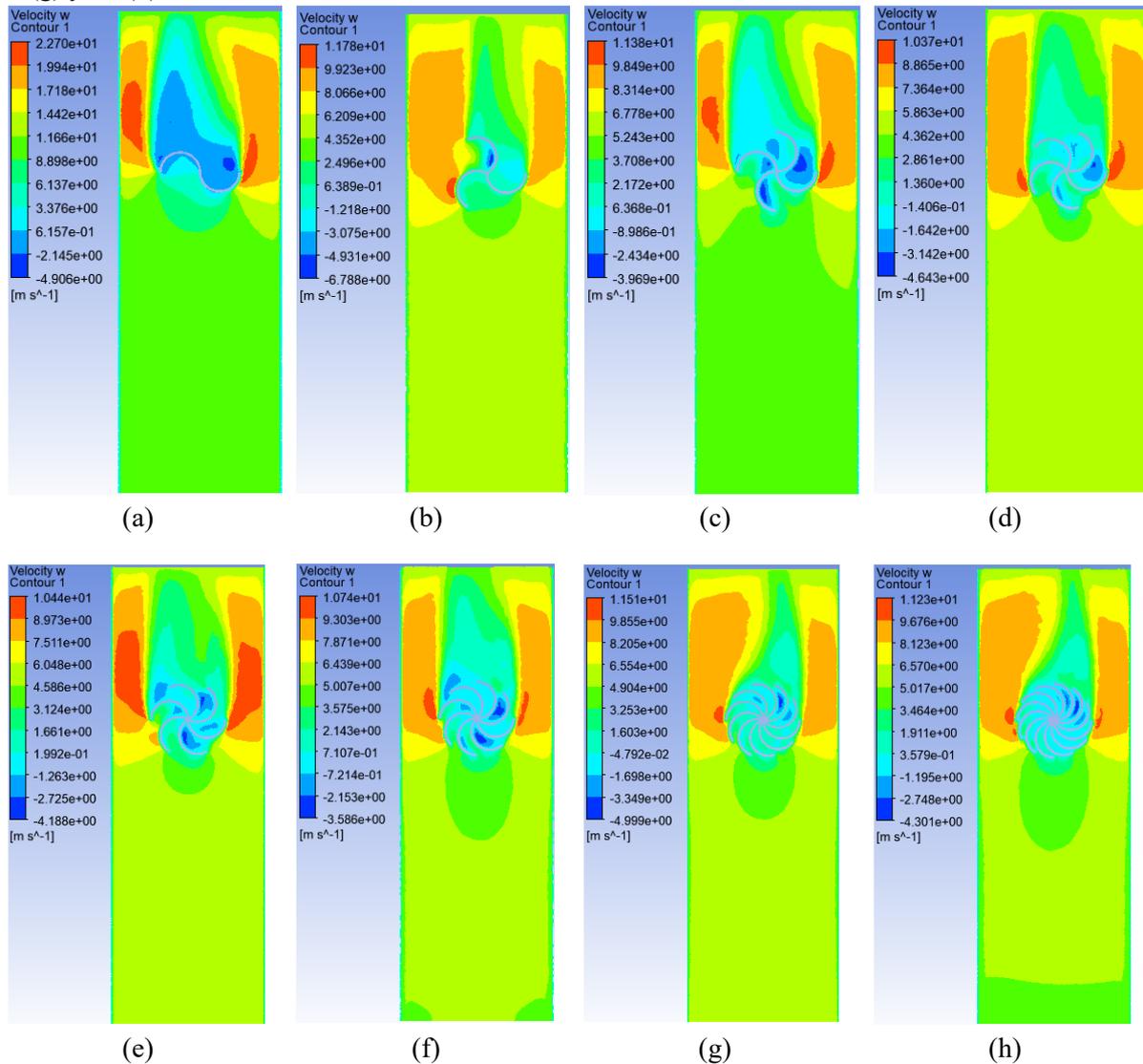
En la Figura 4 se muestra la velocidad axial del flujo para turbinas con 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 y 12 álabes. La velocidad axial representa el flujo en la dirección en la que los álabes generan el movimiento de la turbina. Una velocidad positiva indica que el flujo se mueve de la parte superior hacia la inferior de la imagen, mientras que una velocidad negativa corresponde al sentido opuesto.

Las velocidades negativas en los álabes de una turbina Savonius pueden reducir su eficiencia, ya que el flujo en la fase de escape no contribuye efectivamente al movimiento rotacional. Este flujo negativo disminuye la energía extraída del fluido, genera vórtices en la parte trasera del álabes y puede interferir con el flujo que impacta otros álabes. Además, estas velocidades negativas incrementan la turbulencia, la resistencia, y producen fuerzas opuestas que afectan el desempeño general de la turbina.

La velocidad axial máxima se encontró en el caso de la turbina con dos álabes (Figura 4(a)). Sin embargo, esta configuración también presenta la mayor región con velocidades cercanas a cero o negativas. Conforme aumenta el número de álabes en las turbinas de tres, cuatro y cinco álabes (Figuras 4(b), 4(c) y 4(d)), la velocidad axial máxima disminuye, alcanzando un valor mínimo de 10.37 m/s. En este intervalo de configuraciones, la turbina con tres álabes presenta las velocidades negativas más altas, con un valor máximo de hasta -6.78 m/s. A partir de la turbina con seis álabes hasta la de diez (Figuras 4(e), 4(f) y 4(g)), la velocidad axial máxima aumenta progresivamente, alcanzando un máximo de 11.51 m/s en el caso de la turbina con diez álabes. No obstante, también se observa un incremento en las velocidades negativas en estas configuraciones. En la turbina con diez álabes, la velocidad axial negativa alcanza un valor de hasta -4.99 m/s.

Por último, en la turbina con doce álabes (Figura 4(h)), la velocidad axial máxima muestra un ligero descenso respecto a la turbina con diez álabes, mientras que las velocidades negativas permanecen similares.

Figura 4.- Velocidad axial del flujo para los casos de la turbina con 2 (a), 3 (b), 4 (c), 5 (d), 6 (e), 8 (f), 10 (g) y 12 (h) álabes.



De todos los casos simulados, la turbina con seis álabes es la que presenta la mayor región con valores positivos y de mayor magnitud de la velocidad axial. Aunque la turbina con dos álabes alcanzó la velocidad axial máxima, muestra menores áreas con valores positivos de velocidad axial, y las regiones con velocidades cercanas a cero o negativas son mayores tanto en magnitud como en extensión.

El comportamiento mencionado es similar a los resultados obtenidos para la velocidad total del flujo, lo cual se debe a que la dirección predominante del flujo es la axial.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de las simulaciones con diferentes números de álabes para una turbina de pequeña escala tipo Savonius, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Velocidad máxima del flujo

La turbina con dos álabes alcanzó la mayor velocidad máxima del flujo (23.4 m/s); sin embargo, también presentó las mayores áreas con velocidades negativas.

A medida que aumenta el número de álabes, la velocidad máxima disminuye, alcanzando su valor más bajo con cinco álabes (10.63 m/s).

Un incremento en la velocidad máxima se observa nuevamente en las turbinas con seis a doce álabes, siendo la turbina de diez álabes la que alcanza un máximo de 11.55 m/s.

Velocidad axial del flujo

La turbina con dos álabes presentó la mayor velocidad axial máxima, pero también mostró la mayor extensión de áreas con velocidades negativas.

La configuración con tres álabes alcanzó las velocidades negativas más altas (-6.78 m/s).

La configuración con seis álabes destacó por tener la mayor región con valores positivos y de mayor magnitud de velocidad axial, logrando un equilibrio entre eficiencia y minimización de áreas con velocidades negativas.

Comportamiento general

Las configuraciones con menor número de álabes (dos particularmente) alcanzan mayores velocidades máximas, pero presentan extensas áreas con velocidades negativas, lo que podría reducir su eficiencia.

La turbina con seis álabes parece ofrecer un equilibrio óptimo entre velocidad axial positiva y minimización de velocidades negativas, lo que sugiere una mayor eficiencia en términos de aprovechamiento energético del flujo.

En resumen, aunque las turbinas con menor número de álabes pueden alcanzar velocidades máximas más altas, las configuraciones con un mayor número de álabes, específicamente seis, podrían ofrecer una mayor eficiencia general debido a un mejor balance entre las velocidades positivas y negativas del flujo. Este análisis proporciona una base sólida para futuras optimizaciones en el diseño de turbinas de pequeña escala tipo Savonius para aplicaciones específicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdullah, M. F., Jauhari, I., Mohd Sabri, M. F., & Nik Ghazali, N. N. (2021). A Novel Vertical Axis Parallel Turbines System for In-pipe Hydropower Generation: Conceptual Design and Preliminary Experiment. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1880501>
- Breeze, P. (2019). Power generation technologies. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00136-6>.
- Chen, H., Kan, K., Wang, H., Binama, M., Zheng, Y., & Xu, H. (2021). Development and Numerical Performance Analysis of a Micro Turbine in a Tap-Water Pipeline. *Sustainability*, 13(19), 10755. <https://doi.org/10.3390/su131910755>.
- Das, G. (2015). Advantages of green technology. *International Journal of Research - GRANTHAALAYAH*, 3(9), 1-5. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v3.i9SE.2015.3121>
- Hamlehदार, M., Yousefi, H., Noorollahi, Y., & Mohammadi, M. (2022). Energy recovery from water distribution networks using micro hydropower: A case study in Iran. *Energy*, 252, 124024. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124024>
- Hamzah, I., Prasetyo, A., Tjahjana, D. D. D. P., & Hadi, S. (2018). Effect of blades number to performance of Savonius water turbine in water pipe. *AIP Conference Proceedings*, 1931, 030046-1–030046-4. <https://doi.org/10.1063/1.5024105>
- Hasanzadeh, N., Payambarpour, S. A., Najafi, A. F., & Magagnato, F. (2021). Investigation of in-pipe drag-based turbine for distributed hydropower harvesting: Modeling and optimization. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126710>
- IRENA. Renewable Energy Statistics 2020, (2020). Available online: <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>
- Junejo, F., Saeed, A., & Hameed, S. (2018). 5.19 Energy Management in Ocean Energy Systems. *Comprehensive Energy Systems*, 5, 778-807. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00539-3>
- Kumar, A., & Saini, R. P. (2017). Performance analysis of a Savonius hydrokinetic turbine having twisted blades. *Renewable Energy*, 108, 502–522. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.006>



- Lahamornchaiyakul, W., & Kasayapanand, N. (2023). The Design and Analysis of a Novel Vertical Axis Small Water Turbine Generator for Installation in Drainage Lines. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(2), 235–246. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.48388>
- Lahamornchaiyakul, W. (2024). Numerical simulation of a novel small water turbine generator for installation in a deep-flow hydroponics system. *International Journal of Renewable Energy Development*, 13(1), 88–98. <https://doi.org/10.14710/ijred.2024.58247>
- Ma, T., Yang, H., Guo, X., Lou, C., Shen, Z., Chen, J., & Du, J. (2018). Development of inline hydroelectric generation system from municipal water pipelines. *Energy*, 144, 535-548. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.113>
- Mutlu, Y., & Çakan, M. (2018). Evaluation of in-pipe turbine performance for turbo solenoid valve system. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 12(1), 625-634. <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1506364>
- Patel, V., & Patel, C. (2021). Performance investigation of twisted blade inline Savonius turbine at variable load condition using numerical method. *Materials Today: Proceedings*, 49, 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.868>
- Payambarpour, S. A., & Najafi, A. F. (2020). Experimental and numerical investigations on a new developed Savonius turbine for in-pipe hydro application. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 234(2), 195-210. <https://doi.org/10.1177/0957650919854>
- Payambarpour, S. A., & Najafi, A. F. (2020). Experimental and numerical investigations on a new developed Savonius turbine for in-pipe hydro application. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 234(2), 195–210. <https://doi.org/10.1177/0957650919854583>
- Payambarpour, S. A., Najafi, A. F., & Magagnato, F. (2019). Investigation of Blade Number Effect on Hydraulic Performance of In-Pipe Hydro Savonius Turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, 394191. <https://doi.org/10.1155/2019/8394191>



- Samora, I., Hasmatuchi, V., Münch-Alligné, C., Franca, M. J., Schleiss, A. J., & Ramos, H. M. (2016). Experimental characterization of a five blade tubular propeller turbine for pipe inline installation. *Renewable Energy*, 95, 356-366. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.023>
- Sthel, M. S., Tostes, J. G., & Tavares, J. R. (2013). Current energy crisis and its economic and environmental consequences: Intense human cooperation *Natural Science*, 5(2), 244-252. <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2013.52A036>
- Talha, M., Saeed, A., Jaffer, M., Khan, H. Y., Haider, A., & Ali, W. (2020). Design and analysis of inline pipe turbine. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme. Edición Especial, Abril 2020*, 6373. <http://doi.org/10.17993/3ctecno.2020.specialissue5.63-73>
- Titus, J., & Ayalur, B. (2019). Design and fabrication of in-line turbine for pico hydro energy recovery in treated sewage water distribution line. *Energy Procedia*, 156, 133-138. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.117>
- Yao, Y., Shen, Z., Wang, Q., Du, J., Lu, L., & Yang, H. (2023). Development of an inline bidirectional micro crossflow turbine for hydropower harvesting from water supply pipelines. *Applied Energy*, 329, 120263. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120263>
- Yeo, H., Seok, W., Shin, S., Huh, Y. C., Jung, B. C., Myung, C. S., & Rhee, S. H. (2019). Computational analysis of the performance of a vertical axis turbine in a water pipe. *Energies*, 12(20), 3998. <https://doi.org/10.3390/en12203998>

