

Energías azules: Aprovechando energía cinética del agua con turbinas hidrocínéticas tipo Savonius

Iván Arizpe Dueñas

Abstract

La turbina savonius es una de las nuevas tecnologías que se han desarrollado para generar energía limpia a través de el movimiento del agua, con la finalidad de abandonar la explotación de combustibles fósiles haciendo la generación de energía un proceso más verde. Esta investigación usando una simulación numérica se enfoca en el análisis de la perturbación causada por una turbina savonius en una corriente de agua con la finalidad de determinar y encontrar métodos para tanto incrementar la eficiencia energética de las turbinas, como de sacar el mayor provecho de los cuerpos de agua en los cuales se usen estos instrumentos. Para lograr dicho objetivo se utiliza el programa para simulación de fluidos CFX-ANSYS con el que se simula y se recabarán todos los datos numéricos sobre los cuales se trabaja. La importancia de el uso de CFD en el estudio es que nos provee de herramientas para hacer un análisis preciso y con la menor cantidad de error experimental. Finalmente, la investigación cierra con un arreglo propuesto para abordar los problemas que retienen la eficiencia energética de la turbina; lo cual busca que se genere la mayor cantidad de energía por turbina.

1. Introducción

En la última década ha habido una tendencia a cambiar combustibles fósiles por fuentes de energía renovables, debido al impacto negativo que el uso de los combustibles fósiles tiene en el medio ambiente, llevando así a grandes avances tecnológicos dentro de la industria energética en el mundo al impulsar el desarrollo de tecnologías más eficientes en la generación de energía con recursos renovables. La principal meta de este cambio ha sido reducir la emisión de gases de efecto invernadero (o GHG por sus siglas en inglés), como una de las medidas para disminuir la huella de carbón de la actividad humana en el planeta y el impacto de esta en el medio ambiente. Una de las principales fuentes de energía renovable que ha tenido un gran desarrollo en busca de lograr transicionar a fuentes de energía limpia durante la última década han sido tecnologías basadas en energía hidroeléctrica.

El crecimiento en el uso y desarrollo de energías renovables ha llevado a un **incremento** de 8 puntos de porcentaje en la participación de las energías renovables en la generación de electricidad en el total de la energía mundial de 2011 a 2021; Siendo en 2021 un 15% de la energía mundial generada por fuentes hidroeléctricas [3] siendo China y Brasil los principales productores de energía hidroeléctrica.

Dentro del campo de las fuentes de energía hidroeléctricas en los últimos años las **turbinas hidrocínéticas** se han desarrollado como de las mejores alternativas para la producción de energía eléctrica en base a sistemas de fluidos y esto principalmente es debido a la flexibilidad que ofrece su aplicación, ya que las turbinas hidroeléctricas no precisan de una obra civil como lo haría una presa o cualquier central hidroeléctrica que opere a base de reservas de agua. Debido a que la energía hidrocínética es una solución todavía en desarrollo existe cierta confusión entre a que nos referimos con el término. Por lo que es importante definir que

refiriéndonos a turbinas hidrocínéticas nos referimos a turbinas que funcionan puramente con la corriente del agua sin el uso de reservas del agua y por lo tanto energía hidrocínética es energía generada con este tipo de sistemas. Dentro de los distintos tipos de turbinas hidrocínéticas el estudio presente se enfoca en turbinas hidrocínéticas savonius.

Las turbinas savonius en su forma básica se distinguen por tener una **forma de “S”** formada por dos cuchillas en forma semicircular, así como por ser turbinas verticales; es decir que el eje de rotación de la turbina es vertical en relación con la corriente del fluido que interactúa con la turbina para hacerla rotar.

Las turbinas Savonius tienen la habilidad de aceptar aire de cualquier dirección para girar, aunque en ciertos ángulos de rotación, no pueden empezar por su cuenta debido a tener un torque estático negativo [4]. Este efecto sin embargo es disminuido al tener más de una fase, es decir, teniendo más de una turbina en un generador en un arreglo vertical (una turbina sobre la otra) y manteniendo las cuchillas de las turbinas desfasadas [5].

Dichas turbinas tienen un gran potencial para la generación de energía eléctrica, debido a que gracias a su diseño tienen una gran fuerza de arrastre en agua debido a su densidad, esto hace que la turbina genere más torque y por consecuencia, más energía a diferencia de la aplicación en sistemas eólicos.

Siendo el peso la única desventaja, que es cancelada por la fuerza de empuje del agua [8]. Sin embargo, es importante investigar los efectos que pueden tener en el medio ambiente, así como en los sistemas en los que estarán funcionando (Ríos, Mares, Presas), y también investigar cómo sacar el mejor provecho de cada turbina en funcionamiento. En función de lo expuesto, **el enfoque de la investigación** presente es estudiar la perturbación que una turbina hidrocínética vertical Savonius tiene en un flujo de agua para así poder determinar una configuración óptima para la generación de energía. Es pertinente recalcar que la importancia de esta investigación proviene en la necesidad de incrementar la eficiencia de las turbinas hidrocínéticas en la aplicación, así como para exponer nuevos métodos de obtención de energía hidroeléctrica para reemplazar las plantas hidroeléctricas cuya construcción y uso tienen un efecto devastador para los ríos y sistemas ecológicos en los cuales impacta esta tecnología.

La investigación realizada estudiará la perturbación en el flujo causada por la turbina Savonius a través de la manipulación de un **modelo CFD** tridimensional de una turbina Savonius de dos cuchillas usando simulaciones con CFX-ANSYS para la simulación de la turbina y como perturba el flujo, así como para análisis numérico de las interacciones de la turbina con la corriente. El análisis tomará en cuenta varios valores de velocidad para el flujo para analizar la perturbación que la turbina tiene y como la turbina se ve impactada por la corriente para así determinar como la perturbación que genera puede afectar a otras turbinas. Después presentando soluciones y modelos de arreglos para un mayor aprovechamiento del área.

El alcance de la investigación presente deja de fuera estudios sobre el torque y aspectos mas allá de la perturbación causada por la turbina y la cuantificación de dicho fenómeno para encontrar arreglos en los que el espacio sea aprovechado al máximo. Por esto mismo, las simulaciones solo consideran las cuchillas de las turbinas savonius al modelarlas.

2. Metodología

2.1 Modelado de la turbina y metodología del simulador

En este estudio se presenta un análisis numérico de la perturbación en una corriente de agua causado por una turbina savonius, para este fin nos auxiliamos de CFX-ANSYS, una herramienta para análisis computacional de fluidos. Este estudio utiliza una simulación en dicho programa por medio de un modelo 3D de una turbina hidrocínética Savonius.

La metodología utilizada en el estudio de simulación está descrita en el diagrama de flujo en la Fig. 1. Para la simulación de la turbina se requiere de medidas y dimensiones con las que se planea trabajar de acuerdo con la finalidad del estudio. Se diseña un bosquejo en el editor CAD con el que se genera el cuerpo tridimensional junto con el dominio del fluido. Con este modelo tridimensional se introducen los datos para la simulación del escenario deseado, esto considera las condiciones iniciales, modelo de turbulencia, etc. Ya una vez el simulador termine de procesar datos se analizan los resultados y se procesan los datos.

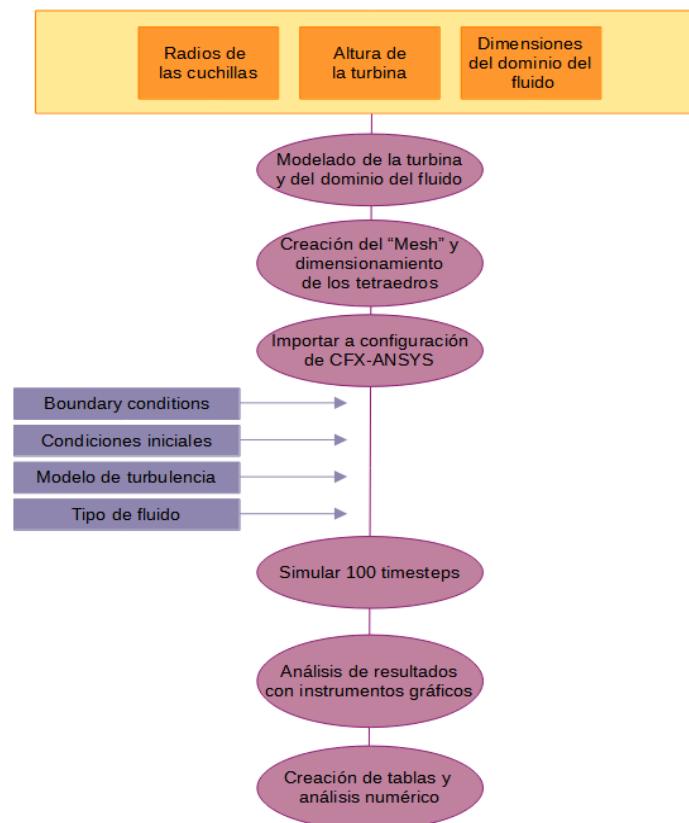


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología ocupada para el simulador

2.2 Metodología Numérica

La eficacia hidrocínética es calculada por la formula

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3$$

En la cual V es la velocidad de flujo, A es el área que recorre el rotor, ρ es la densidad de el fluido y C_p el coeficiente de poder de la turbina, es decir, el porcentaje de energía aprovechada. [11]

El número de Reynolds basado en el diámetro del rotor es definido por la formula:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}$$

En la cual Re es el número de Reynolds, ρ es la densidad del fluido, U es la velocidad de flujo, D es el diámetro del rotor y μ es la viscosidad absoluta del fluido [4].

2.3 Control de variables

Considerando que el foco de la investigación es analizar la perturbación que tiene la turbina en el flujo, ocupamos valores para la velocidad inicial del fluido en las que una perturbación tenga efectos significativos después de la interacción con la turbina.

Caso 1	15 m/s
Caso 2	25 m/s
Caso 3	35 m/s
Caso 4	45 m/s

La intención de este cambio de variable es que mientras mas alto sea la velocidad de flujo, se podrá ver un impacto significativo en la turbulencia generada por la turbina en el flujo, teniendo zonas de vórtice. El análisis se auxiliará con graficas entre velocidad de flujo y distancia de el eje x sobre el cual está situado la turbina.

Las variables constantes serán determinadas por las variables del fluido por defecto ya en CFX-ANSYS, de esta manera se generará la menor cantidad de error humano ya que los datos de CFX son probados por la empresa que desarrolla el software.

Variable	Valor Constante
Densidad	997 kg/m ³
Viscosidad dinámica	8.899x10 ⁻⁴ Pa S
Temperatura	298.15 K

El valor de la densidad del fluido, así como el de la viscosidad dinámica influyen dentro de el valor para el numero de Reynolds y la energía generada por la turbina. Mientras que cambios en la temperatura significarían cambios en la densidad y en la viscosidad. Debido a que es un análisis computacional, las variables se mantendrán constantes y no habrá errores debido a fluctuaciones en la velocidad del flujo inicial.

3. Marco Teórico

Contextualizando, el principio fundamental bajo el cual funcionan las tecnologías basadas en la energía hidroeléctrica es que se utiliza la energía cinética y gravitacional del agua encontrada en sistemas naturales como ríos, corrientes de marea u otros flujos de agua naturales o artificiales para su transformación a energía eléctrica por medio de un generador conectado a la turbina.

3.1 Generación de energía

La generación de energía en una turbina es dependiente del torque de esta, teniendo un torque mayor va a permitir incrementar la cantidad de energía generada, tómese como ejemplo la Tabla. 1, los datos presentados son datos experimentales [9] en los que se muestra indirectamente una proporcionalidad positiva entre el torque y la energía generada por la turbina.

Velocidad del agua	Torque	Energía generada
0.3 m/s	0.131 N m	0.288 W
0.65 m/s	0.655 N m	2.45 W
0.9 m/s	1.4 N m	6.164 W

Tabla 1 Relación entre variables en una turbina hidrocínética de 3 cuchillas [9]

Bajo esto podemos considerar que un incremento en el torque o velocidad del agua significaría un incremento en la energía generada.

Sin embargo, las turbinas hidrocínéticas en la practica no son capaces de convertir toda la energía cinética del agua en energía eléctrica, es considerado que solamente alrededor del 59% de la energía cinética en energía eléctrica, este porcentaje es conocido como el limite de Betz. Esto es representado en las ecuaciones para calcular la energía extraída por una turbina hidrocínética como el coeficiente de poder de una turbina, representado en la variable C_p [11].

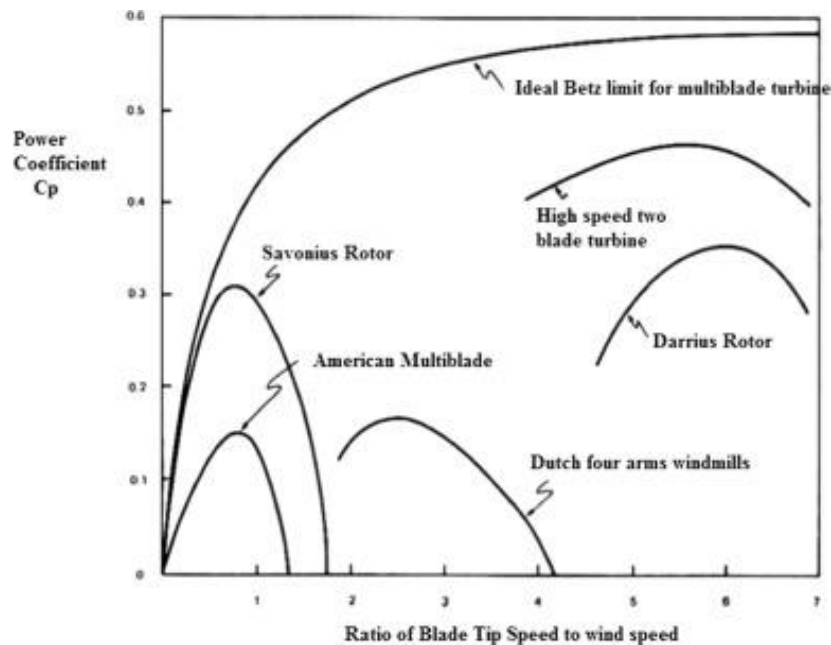


Fig. 2. Coeficiente de poder en turbinas con múltiples cuchillas

3.2 Numero de Reynolds

El número de Reynolds es un numero sin unidades, usado en dinámica de fluidos. En un fluido se pueden presentar distintos tipos de flujo, el flujo laminar en el que el fluido viaja en capas de manera continua sin turbulencia y el flujo turbulento en el que hay vórtices y remolinos dentro del flujo.

El número de Reynolds es una medida que sirve para determinar el tipo de flujo que se producirá y dependiendo del tipo de flujo habrá fuerzas que dominan sobre el movimiento en el fluido. Para el flujo laminar es considerado que el número de Reynolds tiene que ser $R > 2000$; y para tener flujo turbulento, se considera que $R > 4000$. [13]

3.3 Parámetros del modelo de la turbina

El modelo utilizado en la turbina modelada es el propuesto en Fig. 3. cuando $G/D=0$, la elección de este modelo es que, al utilizar más de una turbina, el flujo que pasa a través de la superposición puede tener un impacto en el movimiento de la turbina debido a que se generan remolinos detrás de la cuchilla superpuesta que está en una posición cóncava hacia la salida del fluido en el sistema así beneficiando el torque estático de la turbina [2].

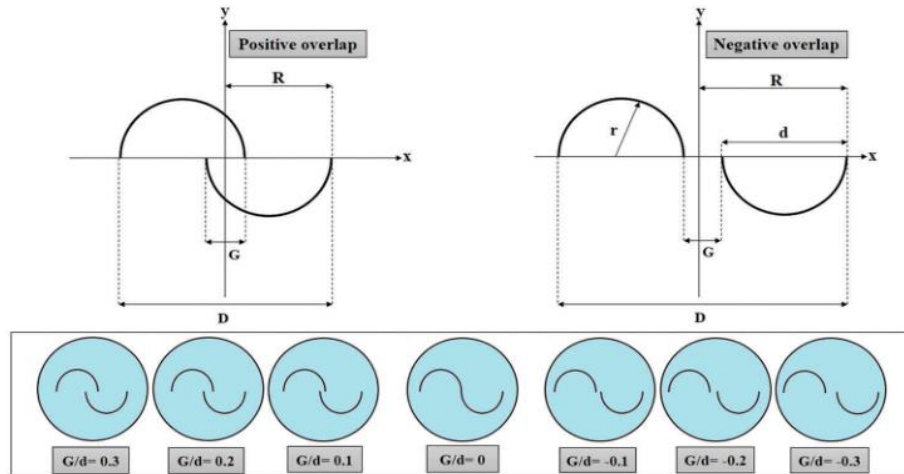


Fig. 3. Illustration of all inward, zero, and outward overlapping ratios under consideration. [2]

3.4 Modelo de turbulencia

Una zona de vórtice se considera como una zona en la cual se curva la línea de corriente, esto ocurre en el caso de la turbina gracias a la interacción del flujo con la turbina, creando turbulencia y remolinos por detrás de las cuchillas de la turbina. Debido a esto elegimos el modelo k- ϵ debido a que usa funciones basadas en la ley de la pared, esto nos ayuda a tener una mayor precisión computacional respecto a la interacción del agua con las puntas y áreas curvas en las cuchillas de la turbina. [9] Este modelo de turbulencia contribuye a una mejor representación de las zonas de vórtice.

4. Desarrollo

4.1 Modelado computacional

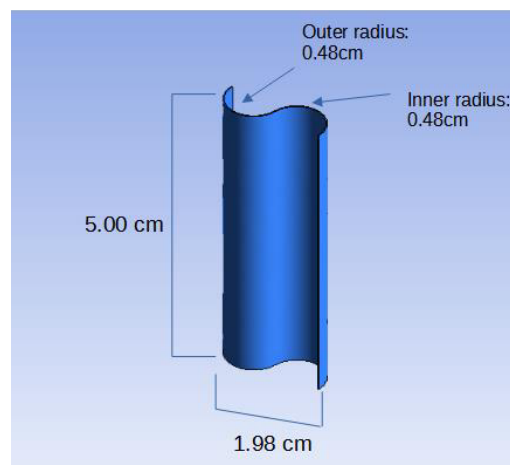


Fig. 4. Medidas de la turbina savonius.

La turbina está compuesta por dos semicírculos con un grosor de 0.20 cm, el radio de la turbina es de aproximadamente 2.00 cm y tiene una altura de 5.00 cm

Para trabajar con la turbina propuesta en la Fig. 4. creamos un dominio del fluido al cual le restamos la forma de la turbina la cual será un dominio sólido, el dominio tiene una altura de 5 cm para que no se tengan resultados hacia arriba de la turbina para que los datos generen ruido en los datos y obstruyan el análisis gráfico. Horizontalmente el dominio del fluido tendrá 40 cm de manera que quede en un radio de 20/1 cm con el diámetro de la turbina de manera que las paredes del dominio no interfieran con los datos de la zona.

Para tener suficiente espacio para analizar la perturbación de la turbina y como se va amortiguando esta perturbación, la longitud del dominio del fluido es de 50 cm.

Después de generar los cuerpos se genera la malla sobre la cual CFX va a simular la turbina y el fluido, para la turbina se generan tetraedros de 1×10^{-3} cm con el objetivo de que la malla sea lo suficientemente fina para que la simulación sea lo mas coherente con datos reales como sea posible considerando además que modelo de turbulencia usado en el simulador es k-épsilon que se basa en la ley del muro por lo que tener una malla fina es fundamental para la simulación.

Para finalmente simular nuestros casos definimos la entrada y salida del fluido, seleccionamos un fluido basado en las propiedades del agua e introducimos la variable independiente la cual es la velocidad de flujo desde la entrada de agua.

Para el procesamiento de datos se generan diversas regiones que toman en cuenta distintos aspectos de la perturbación que ocurre en el flujo, principalmente al enfoque de esta investigación interesa la zona del vórtice generado por la turbina, así como la línea de corriente en todo el dominio del flujo para poder observar la perturbación generada por la turbina. Con dichas regiones se crean tablas para analizar numéricamente la perturbación y como afecta otros factores como lo es el número de Reynolds.

4.2 Resultados computacionales

Las simulaciones se llevaron acabo en casos cuya velocidad inicial del fluido fue de 15 m/s, 25 m/s, 35m/s y 45m/s. Para estas velocidades, el número de Reynolds fue de 3.33×10^7 para la velocidad de 15 m/s, esto quiere decir que los efectos de la viscosidad de el fluido no tendrán ningún impacto en los resultados obtenidos. Los resultados de la simulación se muestran coherentes con los resultados de las investigaciones citadas.

Una observación sobre los remolinos formados detrás de la turbina es que para la cuchilla cuya posición es cóncava hacia la parte posterior de el dominio del fluido, se forma un remolino de mayor tamaño y menor velocidad de flujo dentro de este. Interpretando los datos podemos decir que esto se debe al cambio de momento que se crea después de la colisión del fluido con la turbina que está trabajando en contra de la corriente. La razón por la que esta turbina funciona es debido a que la presión que se crea dentro de la otra cuchilla cuya posición es cóncava en dirección a la parte frontal del dominio del fluido es mayor a la fuerza

de resistencia que impone el flujo chocando con la primera cuchilla. Este fenómeno tiene un gran impacto en la eficiencia de la turbina y la capacidad para generar energía que esta tiene ya que disminuye el torque de la turbina al tener un trabajo en contra de dicho torque. La representación gráfica del fenómeno explicado se puede ver en Fig. 5.

Dada la importancia de reducir el efecto que tiene la colisión del fluido a altas velocidades con la turbina consideramos la utilización de la región del vórtice para resguardar la cuchilla de una segunda turbina en la sección de la rotación en la que tiene una orientación cóncava hacia atrás.

Dentro del perfil del flujo ocurre un fenómeno después de los remolinos generados, el cual puede ser referido como amortiguación dado que la perturbación va a regresando a la velocidad y forma anterior a la colisión con la turbina mientras nos alejamos de esta.

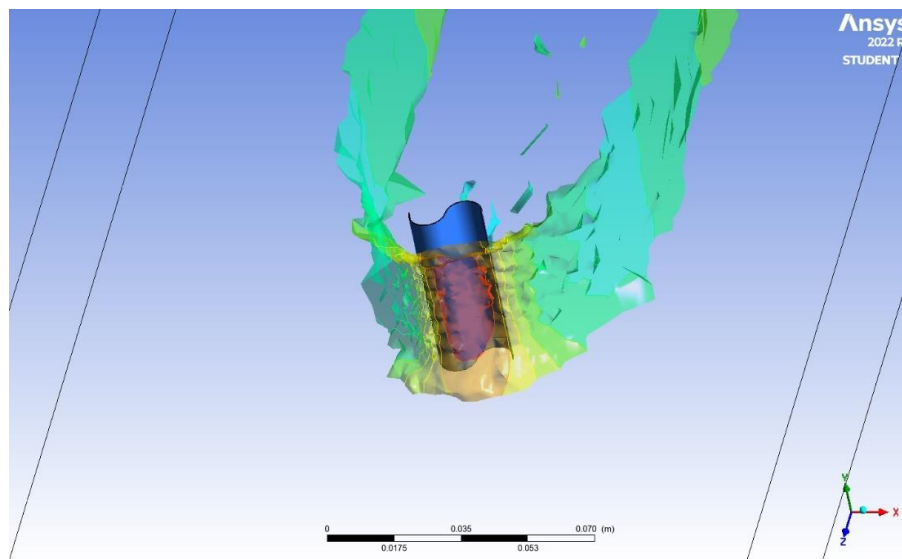


Fig. 5. Contorno de presión en la zona de vórtice

Esta diferencia en la interacción de las dos cuchillas de la turbina puede ser observada en el perfil de la velocidad en relación con el eje x en donde la turbina está centrada en $x=0$ y la cuchilla cóncava hacia la parte posterior está en el dominio negativo de X en Fig. 6 teniendo que hay una mayor concentración de puntos con valores de velocidad entre 40 m/s y 50 m/s esto es debido a que la colisión en direcciones contrarias entre la cuchilla y el fluido genera un cambio de momento incrementando la velocidad de las partículas de liquido después de dicha colisión.

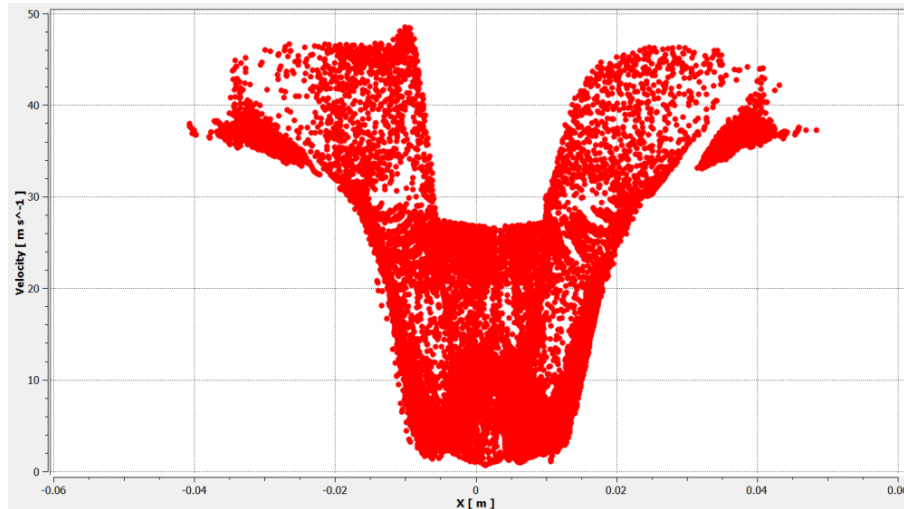


Fig. 6. Velocidad de flujo en la región central del vórtice representada con su dispersión en X, velocidad inicial de 35m/s

En la Fig. 6. vemos los valores de la velocidad del flujo dentro de la región del vórtice creado por la turbina. Sabemos que la turbina tiene un diámetro de 1.98 cm, aproximadamente 2 centímetros y que está centrada en $x=0$ entonces, auxiliándonos de la Fig. 6. podemos inferir que el mejor lugar para poner una segunda turbina será la sección posterior a los remolinos que se crean por la interacción de las turbinas con el fluido a velocidad.

Este efecto en términos de la energía aprovechada por la turbina hace que disminuya el torque y velocidad y así proporcionalmente disminuye la energía producida por la turbina.

4.3 Perfil de la región del vórtice

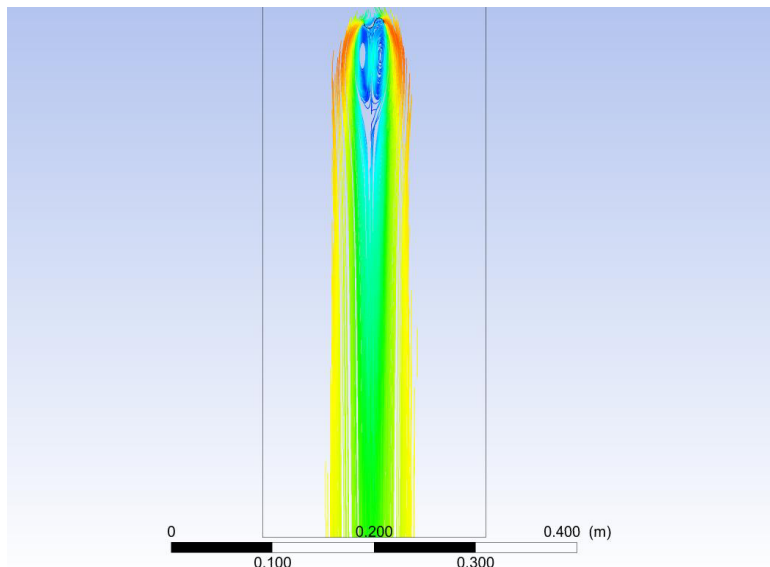


Fig. 7. Línea de corriente con velocidad de flujo inicial de 35 m/s

El perfil de la zona del vórtice es mostrado por la línea de corriente en la Fig. 7. Con este perfil podemos ver que en las orillas del vórtice la velocidad es virtualmente la misma que la del resto del fluido dado que mientras nos alejamos más de el punto de colisión entre el fluido y la turbina, los efectos de esta se amortiguan homogeneizándose con los valores de la velocidad de las partículas que rodean a la región del vórtice.

4.4 Propuesta de arreglo de dos turbinas

Para un arreglo en donde se aproveche la perturbación en el flujo causado por una primera turbina se considera que el punto donde hay menos velocidad del fluido por causa de la colisión es detrás de los remolinos creados inmediatamente después de la colisión con la primera turbina. Por lo que tenemos la siguiente propuesta para el caso en donde la velocidad inicial del fluido es de 35 m/s:

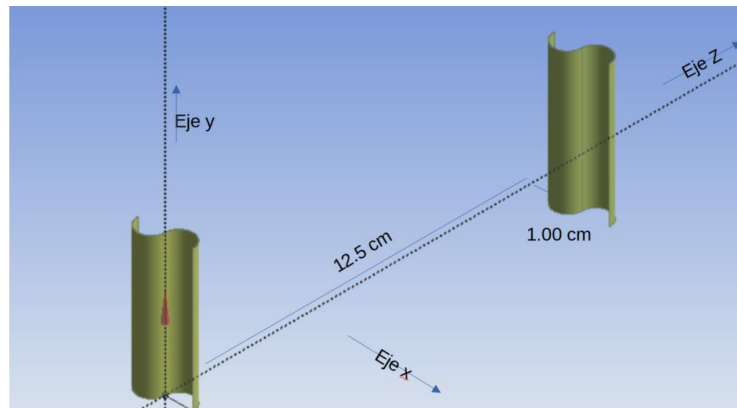


Fig. 8. Arreglo de dos turbinas propuesto

En la Fig. 8. Tenemos la primera turbina alineada al punto (0,0). La segunda turbina está a una distancia de 12.5 cm del eje x y desfasada del eje z por una distancia de 1.00 cm entre la cuchilla y el eje Z. La decisión de estas medidas se hizo conforme a las figuras Fig. 6, Fig. 9 y Fig. 7.

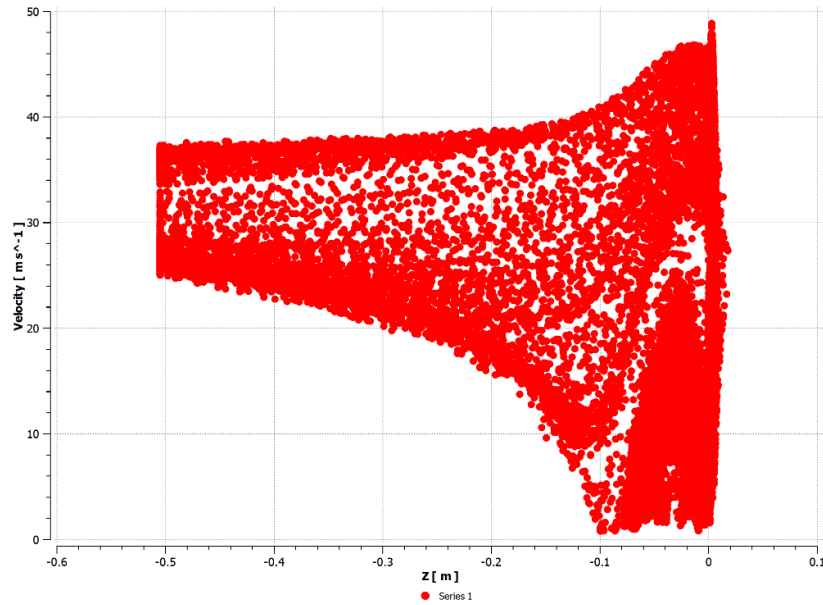


Fig. 9. Velocidad de flujo en la región central del vórtice representada con su dispersión en Z, velocidad inicial de 35m/s

Conforme a la distancia del eje X, es decir la posición en Z. Se elige esa distancia en base a la Fig. 9. Debido a que en ese punto el efecto de los remolinos creados detrás de las cuchillas deja de tener un efecto significativo en el flujo y así se tiene un movimiento mas continuo y menos dependiente de la posición de la primera turbina sin perder la deflexión que provee la región del vórtice.

En la Fig. 9. También se puede apreciar el efecto de amortiguación que mientras nos alejamos en Z del punto donde colisiona el flujo con la turbina, los valores de la velocidad tienden normalizarse con las demás partículas de agua con velocidad de 35 m/s.

4.5 Perturbación en el flujo causado por dos turbinas en un arreglo diagonal

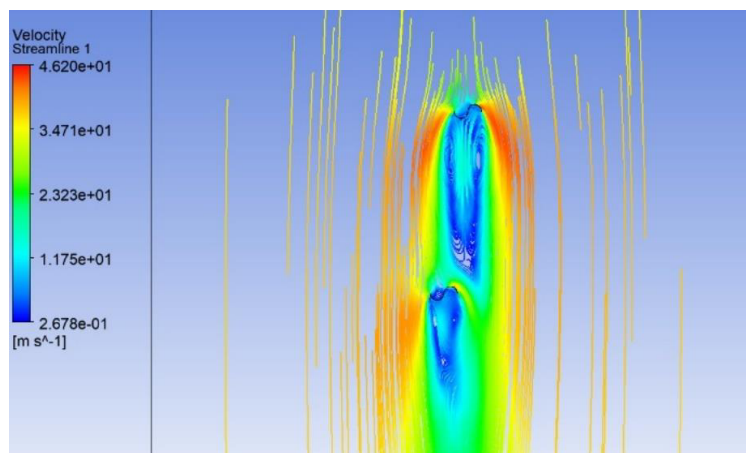


Fig. 10. línea de corriente en la región de vórtice de dos turbinas en un arreglo diagonal

El modelo falla en hacer la segunda turbina tan eficiente como la primera, aunque muestra un decremento en el efecto de torque negativo que genera la colisión con el fluido de la turbina cóncava hacia atrás. Para mejorar este modelo se debe incrementar la separación al eje Z para que más partículas colisionen con velocidades mas altas con la cuchilla de la turbina cóncava hacia enfrente, así teniendo más torque en la turbina sin perder por completo la deflexión causada por la región del vórtice causada por la primera turbina.

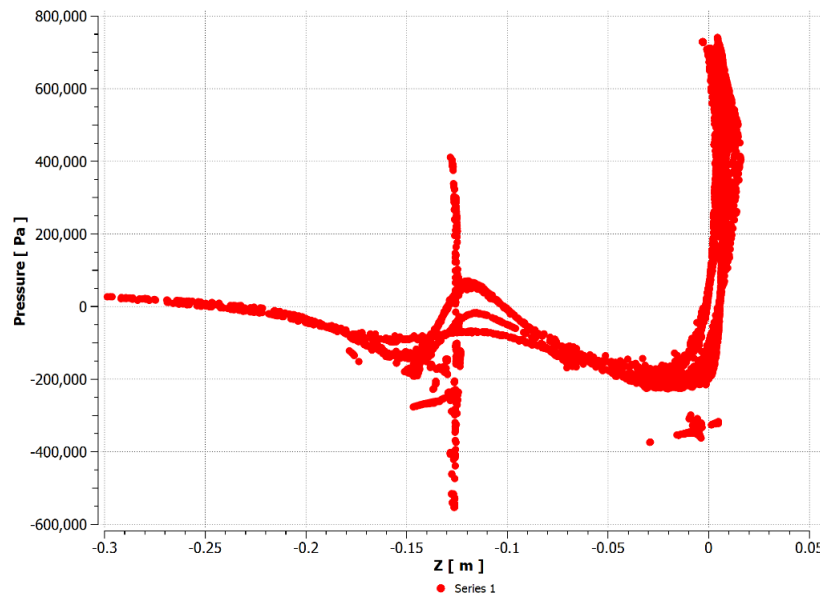


Fig. 11. Presión en la región central del vórtice de dos turbinas en un arreglo diagonal contra la dispersión en Z, velocidad inicial de 35m/s.

La línea de corriente dentro de la región central del vórtice creada por la perturbación de las turbinas en el arreglo propuesto en la Fig. 8 muestra que posicionar una segunda turbina detrás en diagonal de otra turbina aprovecha la región del vórtice generado por la primera turbina. El impacto de esto en la generación de energía es de un incremento debido a la deflexión que tiene lugar gracias a que cuando la cuchilla es cóncava hacia abajo colisiona con partículas a velocidades bajas lo que lleva a que el torque sea mayor al tener menos fuerza actuando en contra del trabajo de esta cuchilla. Véase Fig. 11, se puede observar un incremento en los puntos de presión a una distancia de 12.5 ± 0.5 cm del punto 0 (donde se encuentra la primera turbina), causado por la colisión de partículas del fluido con la segunda turbina.

Los resultados del arreglo propuesto muestran que el arreglo cumple con los objetivos de su diseño, aunque aún es perfectible para lograr una mejor eficiencia en el uso de turbinas Savonius.

5. Conclusiones

El propósito del trabajo fue analizar la perturbación en un flujo de agua causada por una turbina hidrocínética vertical Savonius en forma de la región del vórtice y con base en este análisis presentar una propuesta para aprovechar esta perturbación para mejorar la generación de energía de turbinas secundarias. Podemos concluir los siguientes puntos y hacer varias observaciones para la aplicación

- La parte de menor velocidad de flujo causada por una turbina frontal puede ser utilizada como deflector para reducir el arrastre que causa la colisión del líquido con la sección de la turbina en posición cóncava hacia atrás. El aprovechamiento de este fenómeno tiene un impacto positivo en la generación de energía de la turbina siempre y cuando las partículas impactando en la otra cuchilla de la turbina cuya concavidad está orientada hacia la entrada del flujo sean de la misma velocidad aproximadamente que si no se estuviera ocupando este método como “deflector”.
- El diseño de turbinas Savonius complementado por el uso de deflectores y la implementación de dos o más fases se puede llegar a una eficiencia energética mayor debido a la reducción en el torque negativo que genera la fuerza del flujo contra la cuchilla cuya concavidad y trabajo de rotación está en contra del flujo
- Reafirmamos una relación lineal evidente entre la velocidad de flujo y la prolongación perturbación en el flujo causado por la colisión con la turbina.

Estudios posteriores con el objetivo de lograr una mayor eficiencia energética y buscar un bajo impacto ambiental de las turbinas hidrocínéticas son necesarios para poder lograr una transición de una industria eléctrica basada en la explotación de combustibles fósiles a una basada en energías limpias para el aprovechamiento de los recursos renovables que poseemos y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental que tiene la actividad humana y la generación de electricidad. En busca de un mundo más limpio.

Bibliografía

[1] Mohd Badrul Salleh, Noorfazreena M. Kamaruddin, Zulfaa Mohamed-Kassim, Experimental investigation on the effects of deflector angles on the power performance of a Savonius turbine for hydrokinetic applications in small rivers, 2022, <https://0-doi-org.biblioteca-ils.tec.mx/10.1016/j.energy.2022.123432>.

[2] Hassanzadeh, Rahim & Mohammadnejad, Milad. (2019). Effects of inward and outward overlap ratios on the two-blade Savonius type of vertical axis wind turbine performance. International Journal of Green Energy. 16. 1-12. 10.1080/15435075.2019.1671420.

[3] Renewables 2019 Global Status Report, 2021.

- [4] M.A. Kamoji, S.B. Kedare, S.V. Prabhu, Performance tests on helical Savonius rotors, Renewable Energy, Volume 34, Issue 3, 2009, <https://0-doi-org.biblioteca-ils.tec.mx/10.1016/j.renene.2008.06.002>.
- [5] Tsutomu HAYASHI, Yan LI, Yutaka HARA, Wind Tunnel Tests on a Different Phase Three-Stage Savonius Rotor, JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 2005, Volume 48, Issue 1, Pages 9-16, Released on J-STAGE August 15, 2005, Online ISSN 1347-5371, Print ISSN 1340-8054, <https://doi.org/10.1299/jsmeb.48.9>.
- [6] Aditya Kumar Nag, Shibayan Sarkar, Performance analysis of Helical Savonius Hydrokinetic turbines arranged in array, Ocean Engineering, Volume 241, 2021, <https://0-doi-org.biblioteca-ils.tec.mx/10.1016/j.oceaneng.2021.110020>.
- [7] Dinesh Kumar, Shibayan Sarkar, Modeling of flow-induced stress on helical Savonius hydrokinetic turbine with the effect of augmentation technique at different operating conditions, Renewable Energy, Volume 111, 2017, <https://0-doi-org.biblioteca-ils.tec.mx/10.1016/j.renene.2017.05.006>.
- [8] Mohd Badrul Salleh, Noorfazreena M. Kamaruddin, Zulfaa Mohamed-Kassim, Experimental investigation on the effects of deflector angles on the power performance of a Savonius turbine for hydrokinetic applications in small rivers, Energy, Volume 247, 2022, <https://0-doi-org.biblioteca-ils.tec.mx/10.1016/j.energy.2022.123432>.
- [9] N.K. Sarma, A. Biswas, R.D. Misra, Experimental and computational evaluation of Savonius hydrokinetic turbine for low velocity condition with comparison to Savonius wind turbine at the same input power, Energy Conversion and Management, Volume 83, 2014, <https://0-doi-org.biblioteca-ils.tec.mx/10.1016/j.enconman.2014.03.070>.
- [10] Khan, M., Islam, N., Iqbal, T., Hinchey, M., & Masek, V. (2009). Performance of Savonius rotor as a water current turbine. The Journal of Ocean Technology, 4(2), 71-83.
- [11] Anuj Kumar, R.P. Saini, Performance parameters of Savonius type hydrokinetic turbine – A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 64, 2016, <https://0-doi-org.biblioteca-ils.tec.mx/10.1016/j.rser.2016.06.005>.
- [12] W.I. Ibrahim, M.R. Mohamed, R.M.T.R. Ismail, P.K. Leung, W.W. Xing, A.A. Shah, Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review, Energy Reports, Volume 7, 2021, <https://0-doi-org.biblioteca-ils.tec.mx/10.1016/j.egyr.2021.04.003>.
- [13] Shashi Menon, Chapter Five - Fluid Flow in Pipes, Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual, Gulf Professional Publishing, 2015, Pages 149-234, <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-830-3.00005-5>.