

ESTUDIO DEL CONO DE SOMBRA DE UNA TURBINA HIDROKINÉTICA DE LECHO FLUVIAL Y PROPUESTA INICIAL DE UNA GRANJA DE GENERACIÓN HIDROFLUVIAL

STUDY OF THE SHADOW CONE OF A HYDROKINETIC TURBINE OF FLUVIAL BED AND INITIAL PROPOSAL OF A FARM OF HYDROFLUVIAL GENERATION

José R. González^a, Sergio Oller Aramayo^a y Liz G. Nallim^a

^aICMASa, INIQUI (CONICET), Facultad de Ingeniería, UNSa, Avda Bolivia 5150 Salta Argentina,
gonzalezjoseraul20@gmail.com, <http://www.unsa.edu.ar>, <http://www.conicet.edu.ar>

Palabras clave: Cono de sombra, turbina, simulación numérica.

Resumen. Las turbinas hidrocínéticas para lechos fluviales, se desarrollaron con el objetivo de aprovechar la energía cinética de los ríos. Para optimizar dicho aprovechamiento es que se opta por diseñar granjas de turbinas, las cuales se componen de una configuración serie-paralelo de turbinas ubicadas de modo que el fluido turbinado no afecte a las demás. En el presente trabajo se estudia el fenómeno físico que se produce por la interacción entre la turbina y el fluido. Este fenómeno delimita una zona llamada “cono de sombra”, donde el fluido cuenta tanto con velocidades inferiores a la de ingreso como con vórtices turbulentos, por lo que no es aconsejable ubicar turbinas dentro de dicha zona. Cada turbina cuenta con un cono de sombra propio, dado que dicho fenómeno se encuentra vinculado con su geometría. Para analizar este fenómeno se simuló una turbina hidrocínética particular dentro de un flujo confinado, y así visualizar las características del cono de sombra, proponiendo luego una primera distribución de las demás turbinas. A las superficies que rodean el volumen de control se le impusieron condiciones de no deslizamiento, con el objeto de simplificar la simulación y, por ende, la cantidad de elementos. La discretización de los cuerpos se realizó mediante un mallado no estructurado de volúmenes finitos, implementando un algoritmo de turbulencia del tipo $k-\varepsilon$ y una resolución implícita.

Keywords: Shadow effect, turbine, numeric simulation.

Abstract. The hydrokinetic turbines for riverbed have been design to take advantage of kinetic energy of rivers. To make better use of resources, we choose to implement turbine farms. The turbines are located in series-parallel configuration to avoid the interference between them. The objective of this work is to study the physical phenomenon originated for the interaction between the turbine and fluid, which delimits a zone called shadow effect. There, the fluid velocity is less than in inlet and turbulent vortices be formed. For this reason it is not advisable to place turbines in this zone. This phenomenon is associated with the geometry of the turbine so each turbine has a particulate shadow. Simulating a particular turbine in confined flow, the characteristics of this phenomenon were obtained and an initial distribution of turbines was proposed. Non-slip conditions were imposed on the surfaces surrounding the control volume, in order to simplify the simulation and, therefore, the quantity of elements. The discretization of the bodies was done by unstructured meshing of finite volume elements. In addition, a turbulence algorithm of type $k-\varepsilon$ and an implicit resolution were implemented.

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad energética, el deterioro progresivo del medio ambiente y las nefastas secuelas sobre éste, resultado del elevado consumo de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica, contribuyeron al progreso de otras fuentes de energía del tipo renovables y llevaron a un estudio minucioso respecto al panorama energético. Una de las energías cuyo estudio y desarrollo ha progresado notablemente es la hidroeléctrica, la cual aporta actualmente más del 16% de la matriz eléctrica mundial (Misterio de Energía y Minería (MINEM), 2016), constituyendo una fuente fundamental para cualquier país, ya que utiliza recursos renovables y no degradables, y presenta una disponibilidad casi permanente. Además de tener la tasa más baja de emisión de gases de efecto invernadero, la generación hidráulica tiene una serie de ventajas frente a otras tecnologías de generación eléctrica, entre las que se destaca una mayor eficiencia y vida útil más larga. A pesar de esto, la generación hidroeléctrica convencional cuenta con importantes desventajas, tales como la necesidad de embalsamientos de agua y desviaciones de cauces de ríos para su funcionamiento. Esto, además de su elevada dificultad y riesgo en la realización de las obras civiles pertinentes, significa una gran inversión económica; sin mencionar el impacto ambiental que se produce por la modificación del terreno. Es por ello que la generación hidroeléctrica mediante turbinas hidrocínicas no convencionales, como las de lechos fluviales, cobran una gran importancia ya que carecen de la necesidad de un embalse y la desviación del cauce de los ríos para su funcionamiento.

Para realizar un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos mediante la aplicación de turbinas hidrocínicas no convencionales, se opta por agruparlas en una cuadrícula con distancias tales que los flujos turbinados no afecten el funcionamiento de las turbinas contiguas. Dichas distancias resultan sumamente importantes dado que, la interacción entre las turbinas y el fluido, genera sobre este último perturbaciones en la región ubicada corriente abajo del rotor. Las mencionadas perturbaciones se caracterizan por una intensa mezcla turbulenta, movimientos helicoidales y un complejo sistema de remolinos, conocidos usualmente como estelas. Estas estelas delimitan una región con forma de tronco-cono, siendo los laterales de dicha región los límites que marcan la distancia entre turbinas de forma paralela; el mencionado fenómeno se conoce como cono de sombra. Actualmente existen pocas investigaciones relacionadas con dicho fenómeno, puesto que el mismo es particular para cada tipo de turbina, dado que uno de los factores con el que está relacionado es la geometría de los álabes pertenecientes a la turbina. El estudio relacionado al cono de sombra se encuentra más orientado actualmente a los aerogeneradores, debido a que dicha tecnología cuenta con avances más importantes comparados con las turbinas hidrocínicas no convencionales, contando estas últimas con poco desarrollo comercial en la actualidad (E. Mohammadi, et al, 2018).

El presente trabajo tiene como objeto el estudio de una turbina hidrocínica de lecho fluvial de alto rendimiento, con el fin de estudiar el cono de sombra característico de la misma y con esto brindar una primera aproximación de las distancias relativas entre turbinas para el diseño de una granja de generación. La mencionada turbina se escogió dado que cuenta con premisas de diseño basadas en álabes fluidomecánicamente más eficientes (los cuales cuentan con perfiles alares de alto coeficientes de sustentación (*lift*) y bajo coeficiente de resistencia (*drag*)) (M. S. Selig, 1997), y un diseño estructural (rotor-álabes) basado en materiales compuestos de baja inercia rotacional, lo que ayuda principalmente en su capacidad de arranque a bajas velocidades de flujo, como así también en su eficiencia (S.A. Oller, et al, 2014). Este tipo de turbina posee la desventaja de no contar con una ecuación característica que facilite su análisis, dado que la distancia entre los álabes resulta muy superior al diámetro

del rotor, por lo que no se puede considerar una cantidad de álabes infinitos y por ende se debe proceder a aplicar la “teoría alar”. Además, al tener una longitud alar sumamente superior a su ancho, se imposibilita realizar un estudio unidimensional del comportamiento del flujo, por lo que debe realizar un análisis tridimensional; es por esto que el análisis mediante métodos computacionales, resulta fundamental. La mencionada turbina se muestra en la Figura 1, en donde se puede apreciar los 8 alabes, el cono y el *hub* que componen la misma.

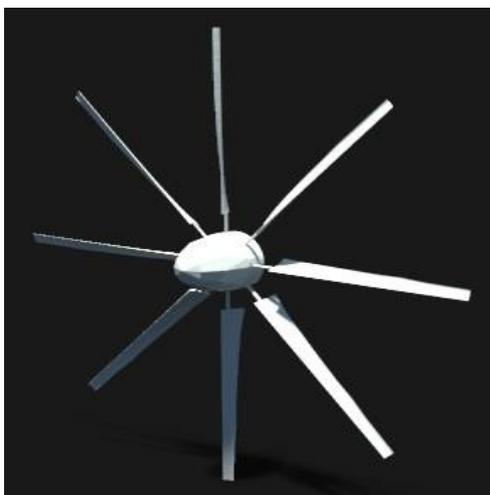


Figura 1. Render - Turbina Hidrocinética de Lecho Fluvial.

2 SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para estudiar el cono de sombra, producto de la interacción entre la turbina escogida y el fluido, se optó por realizar un análisis computacional mediante la implementación del software comercial ANSYS FLUENT. El mencionado análisis consta de 4 (cuatro) etapas, las cuales son: definición del Dominio Computacional, mallado del dominio, condiciones de contorno o de frontera y resultados.

2.1 Dominio Computacional

El dominio computacional empleado para la simulación se encuentra compuesto por el dominio fluido (volumen de control) y el cuerpo de la turbina, encontrándose ubicado éste último a 6 metros de la cara izquierda del dominio y a 20 metros de la superficie derecha del mismo. Dichas dimensiones se escogieron asumiendo que el fluido ingresara al volumen de control por la parte izquierda, totalmente desarrollado. Sin embargo, como ya se explicó anteriormente, aguas abajo de la turbina es donde se produce el cono de sombra, por lo que se necesita establecer una distancia tal que permita al fluido turbinado desarrollarse completamente hasta alcanzar nuevamente su régimen estacionario. Las dimensiones de las aristas menores del volumen de control son de 10 metros, dado que se espera que el cono de sombra formado por el fluido turbinado cuente con dimensiones menores, quedando implícito en el volumen de control. Dichas dimensiones se pueden apreciar en la Figura 2. Cabe destacar que, por el momento, no existe ningún criterio reconocido para dimensionar el volumen de control para este tipo de turbinas, por lo tanto, en el presente trabajo se hizo uso del criterio empleado para las turbomáquinas convencionales.

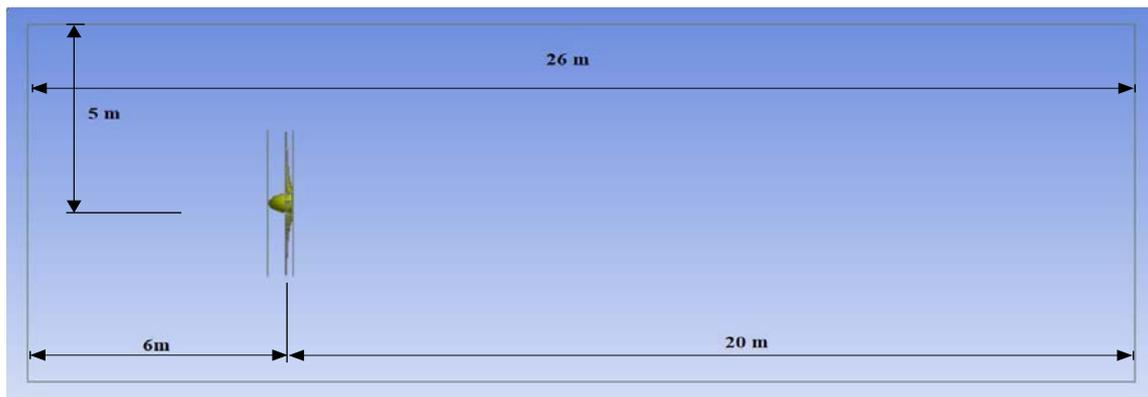


Figura 2. Dimensiones del Dominio Computacional.

Para poder mejorar la discretización de la turbina y el entorno en donde ésta interactúa con el fluido, y teniendo en cuenta la compleja geometría con la que ésta cuenta, se implementó un dominio auxiliar el cual rodea completamente a la misma, tal y como se muestra en la Figura 3.

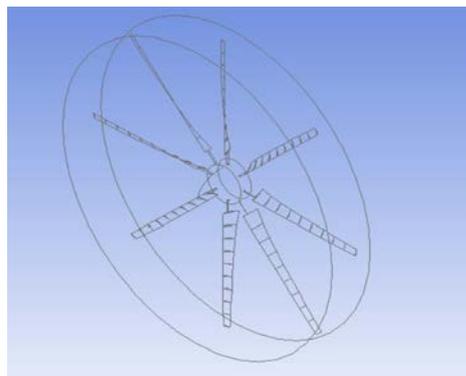


Figura 3. Dominio auxiliar.

2.2 Mallado

Teniendo en cuenta la complejidad de las geometrías implícitas en el volumen de control y el dominio auxiliar, se procedió a aplicar dos métodos distintos de mallado para cada uno. El mallado del volumen de control se realizó mediante el método “patch independient” de ANSYS, estableciéndose un número aproximado de 1000 elementos y un “ángulo característico” (feature angle) de 30° , con el objetivo de discretizar de la mejor forma el volumen de control sin extremar en el uso de elementos, considerando que la mayor cantidad de ellos son requeridos para discretizar la geometría más compleja. Adicionalmente, se implementó un refinamiento de la malla bajo la especificación de “proximidad y curvatura”, obteniéndose la discretización del volumen de control mostrada en la Figura 4. Respecto a la discretización del dominio auxiliar, el cual contiene la geometría de la turbina, se optó por implementar el mismo método que en el caso anterior, radicando la diferencia en los parámetros de mallado ingresados. En este caso se estableció una dimensión máxima de 0.9 m por elemento, un refinamiento basado en curvatura teniendo en cuenta un “ángulo de curvatura normal” de 6.10° , y un refinamiento con un tamaño mínimo de elemento de 0.001 m. Estos últimos parámetros se escogieron con el objetivo de que el mallador, al avanzar por

la geometría superficial de los álabes, pueda adecuarse lo mejor posible a su forma. Con esto se obtuvo una discretización del volumen auxiliar y de la superficie de los álabes, como se muestra en la Figura 5 y en la Figura 6, respectivamente. Finalmente, habiendo discretizado todos los cuerpos actuantes como se explicó anteriormente, se obtuvo un número total de 1.116.585 elementos y 1.597.863 nodos.

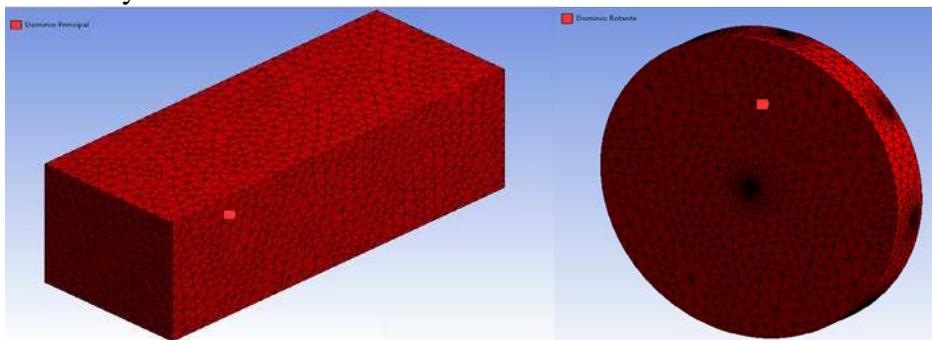


Figura 4. Mallado - Volumen de Control. Figura 5. Mallado – Volumen Auxiliar.

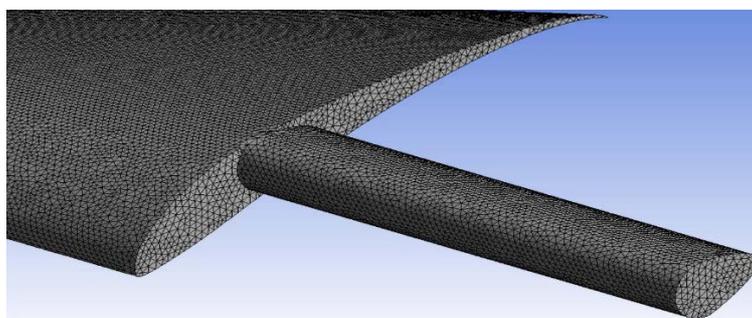


Figura 6. Mallado – Álab y soporte.

Antes de establecer las condiciones de contorno del problema se impusieron nombres a tres superficies diferentes que componen los límites del volumen de control: “inlet” a la superficie por donde ingresará el fluido, “outlet” a la superficie por donde el fluido abandona el volumen de control, y “Wall” a las demás superficies que rodean el volumen de control, las cuales simularán el confinamiento de la turbina.

2.3 Condiciones de Contorno

Primeramente, se establecieron las condiciones generales del problema, optando por una “resolución basada en presiones” considerando “velocidades absolutas”. Respecto a la dependencia temporal del flujo, se parametrizó la simulación considerando un “flujo transitorio”, con el objetivo de establecer un tiempo de flujo adecuado para verificar el desarrollo del cono de sombra. Para esto, se estableció un *step time* igual a 0.001 segundos y 15000 pasos (*number of time steps*), con el objetivo de lograr que el flujo cuente con una duración de 15 segundos considerando inicialmente que, en dicho tiempo, el flujo se encontrará establecido completamente.

De la gran cantidad de modelos físicos que proporciona el software ANSYS, y teniendo en cuenta las características del problema, se escogió un modelo de turbulencia del tipo “k-ε” ya que, además de ser uno de los modelos de turbulencia más habituales para este tipo de análisis, cuenta con una gran relación entre precisión y coste computacional. Las constantes escogidas para dicho modelo fueron: $C_{\mu}=0.09$, $C_{1-\epsilon}=1.44$, $C_{2-\epsilon}=1.92$, y números de Prandtl

TDR y TKE iguales a 1.3 y 1 respectivamente. Para el tratamiento en las cercanías de las paredes se hizo uso de la opción “*estandar Wall functions*”, estableciendo además un parámetro y^+ objetivo igual a 110, obteniéndose así una altura aproximada del primer elemento igual a 2.34 mm. Luego de la discretización se obtuvo un parámetro y^+ igual a 100, satisfaciendo así el parámetro y^+ objetivo antes planteado.

Finalmente se establecieron las condiciones de frontera del dominio computacional teniendo en cuenta las regiones limítrofes del volumen de control, nombradas anteriormente como “inlet”, “outlet” y “Wall”. Para el “inlet”, se partió de la condición de funcionamiento con la que se estudió la turbina escogida (flujo de 2 m/s que produce una velocidad de rotación en la turbina de 20 rpm) y de una de las premisas más importantes en la mecánica de los fluidos, la cual indica que “un sistema con un objeto en movimiento a través de un fluido estático, es equivalente a un sistema donde sea el fluido el que se mueve alrededor de un objeto estático” (Badshah Mujahid, et al, 2019). A partir de lo anterior, se estableció que la turbina se encuentre estática y que el fluido ingrese con un movimiento rototraslacional, con velocidades de 2 m/s y 20 rpm, produciendo el mismo efecto que en las condiciones de funcionamiento antes mencionadas. Respecto al “outlet”, teniendo en cuenta que se estableció una resolución basada en la presión, se aplicó como valor inicial para la iteración una presión de 0 Pa. Finalmente, para las paredes que rodean la periferia del volumen de control (Wall), con motivo de la simulación y teniendo en cuenta que se consideró un flujo confinado, se estableció la condición “no slip” o no deslizante, lo que significa que en los puntos pertenecientes a dicha superficie la velocidad del fluido resulta nula.

2.4 Resultados

Para realizar el análisis de resultados, se hizo uso de dos métodos de visualización de resultados, los “contornos” (gradiente de colores relacionados a una escala de valores, ya sean de velocidad, presión, densidad, etc.) y “las líneas de corriente” o “*streamline*” (representan la trayectoria de cada partícula del fluido perteneciente al flujo).

Primeramente, se reflejaron los “contornos de velocidad” en un plano auxiliar (creado en la parte media del volumen de control), estableciendo una escala de velocidades partiendo desde los 0 m/s hasta los 2.1 m/s. En los primeros instantes, antes de hacer contacto con la turbina, el flujo se mantuvo a una velocidad de traslación igual a 2 m/s, tal y como fue impuesta en las condiciones de contorno. Al encontrarse con la turbina, aproximadamente en el paso 26 (Figura 7), se produce una deformación de las líneas de flujo, tal y como se puede apreciar gracias al cambio de tonalidad de colores en sus alrededores. En el paso 65 (Figura 8), se aprecia claramente la formación del principio del cono de sombra aun sin desarrollarse totalmente, además de una gran disminución de la velocidad detrás del rotor de la turbina, dado su notorio color amarillo, lo que representa una velocidad de flujo cercana a 1 m/s. Al transcurrir el tiempo se nota el desarrollo del cono de sombra detrás de la turbina, siendo éste en un principio de mayor dimensión que la turbina. A medida que el flujo comienza a estabilizarse, adquiere un diámetro cercano al diámetro de la turbina.

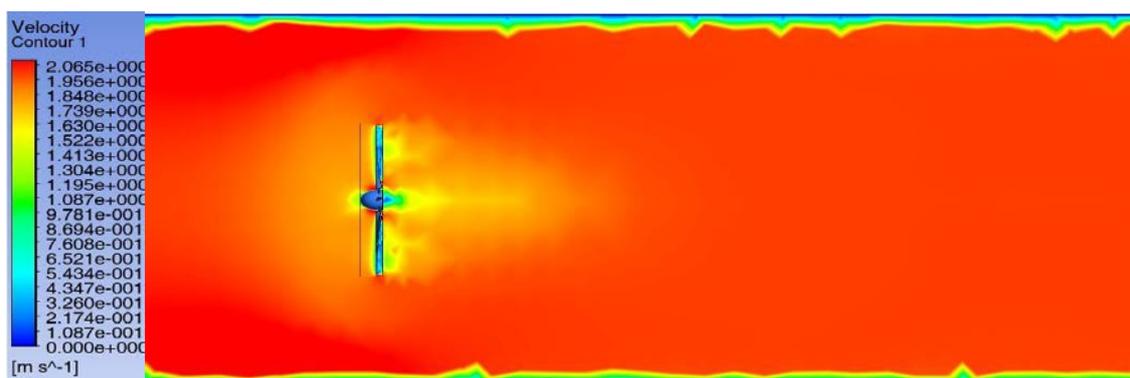


Figura 7. Desarrollo del flujo – 0,026 segundos.

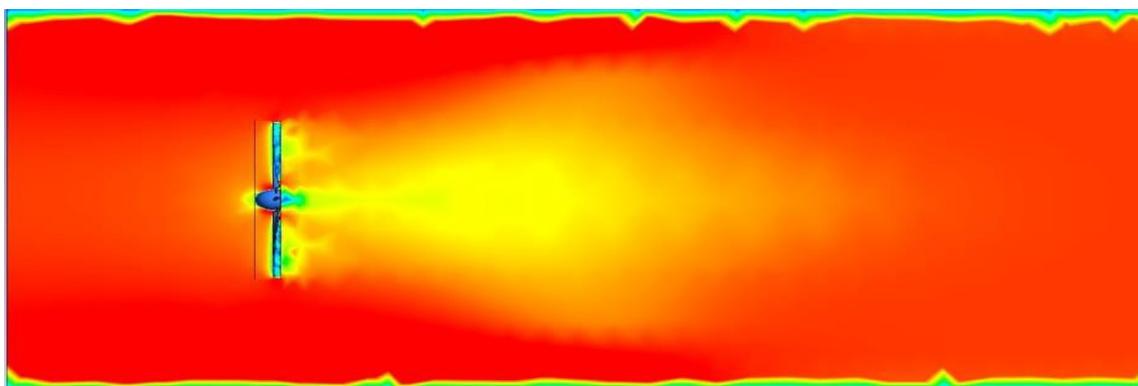


Figura 8. Desarrollo del flujo – 0,0065 segundos.

Finalmente, alrededor de los 10 segundos, el flujo adquiere su estado permanente, tal y como se observa en la Figura 9. Se puede concluir que el flujo se encuentra en dicho estado, dado que no se aprecian irregularidades aguas abajo de la turbina a medida que transcurre el tiempo; manteniéndose de esa forma hasta el final de la simulación, por lo que se concluye que el tiempo de simulación establecido resulta adecuado. En esta última figura, se puede apreciar claramente el cono de sombra, delimitado por un color amarillo, el cual se encuentra vinculado a velocidades menores que 2 m/s. Esto resulta lógico ya que, recordando la teoría del “límite de Betz”, el fluido al ser turbinado cede parte de su energía a la turbina, disminuyendo así su velocidad sin llegar a detenerse totalmente.

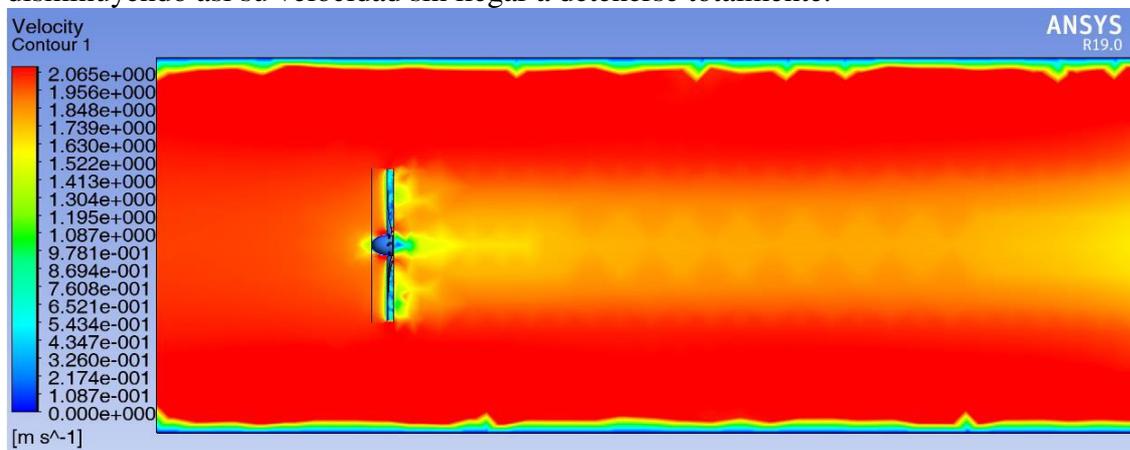


Figura 9. Contornos de velocidad – flujo en estado estacionario.

Al analizar las líneas de corriente (*streamlines*) podemos observar tanto, el efecto de los alabes de la turbina sobre la trayectoria del fluido, como el movimiento de roto traslación con la que ingresa el fluido desde el “*inlet*”, tal y como se estableció en las condiciones de contorno impuestas. En la Figura 10 se puede apreciar, además de la forma de ingreso rotante del fluido, el efecto de la consideración de flujo confinado impuesto como condición de contorno dada la velocidad nula representada por color azul en las líneas de corriente en contacto con las paredes del volumen de control.

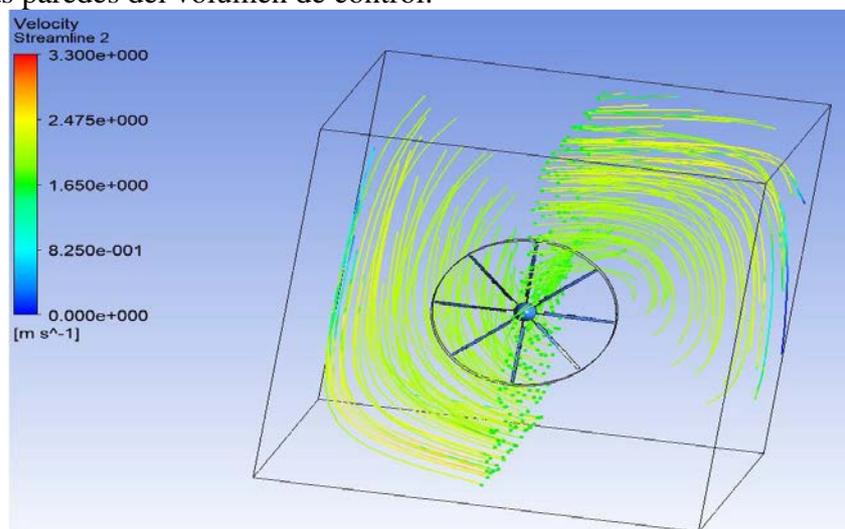


Figura 10. Líneas de corriente partiendo desde el *Inlet*.

En la Figura 11, al esquematizarse las líneas de corriente que parten desde la turbina hacia el “*outlet*”, se puede notar claramente el efecto de los alabes sobre el fluido apreciando como las líneas de corriente siguen la forma del perfil utilizado en el diseño del alabe; además se observa el efecto de los distintos “ángulos de calaje” de cada segmento que conforma el alabe. Por último, cabe destacar que, en las puntas de los alabes se nota una distribución no homogénea de líneas de corrientes, por lo que se puede inferir que se forman “estelas turbulentas”, las cuales marcan los límites del cono de sombra. La existencia de dichas estelas marca que resulta imperioso impedir que fluido de la estela turbulenta contacte con las demás turbinas, ya que esto podría disminuir notoriamente el funcionamiento y por ende el rendimiento de las turbinas; es por esto que se aconseja no implantar turbinas dentro de los límites marcados por el cono de sombra.

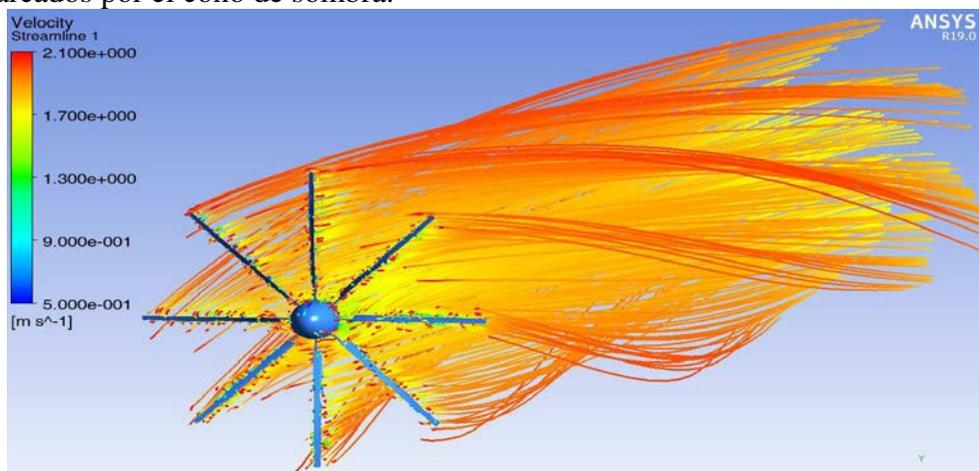


Figura 11. Líneas de corriente partiendo desde la turbina.

3 CONCLUSIONES

Como se explicó anteriormente, el cono de sombra resulta de suma importancia en el diseño de granjas para generación, dado que las dimensiones del mismo delimitan las distancias relativas entre las turbinas que conforman dichas granjas. Como resultado de la simulación realizada en el presente trabajo, se obtuvo la forma del cono de sombra específico de la turbina escogida, el cual se muestra en la Figura 9. En dicha figura se puede apreciar que el mismo cuenta con un diámetro aproximadamente 0-5 metros mayor al diámetro de la turbina en la mayor parte del dominio. Además, se puede notar que en las cercanías del *outlet* el diámetro del cono comienza a crecer, por lo que se concluye que, para un estudio más preciso del mismo, se debe realizar nuevas simulaciones con longitudes de dominio aguas abajo mucho mayor, con el fin de visualizar completamente dicho efecto.

Teniendo en cuenta las dimensiones y la forma que toma el cono de sombra, se puede concluir inicialmente que, turbinas contiguas ubicadas de forma paralela deben respetar una distancia transversal superior a los 2.5 metros desde el centro del cono de sombra. Además, teniendo en cuenta el efecto de apertura del cono que se aprecia al final del dominio, a una distancia aproximada de 18 metros, se puede inferir que la distancia longitudinal respecto a la primera turbina no debe superar dicha dimensión. Finalmente, considerando lo mencionado anteriormente, se propone como disposición inicial la mostrada en la Figura 12, siendo la distancia D_1 igual a $1.7D$ y D_2 igual a $1.25D$, donde D es el diámetro del rotor de la turbina implantada. Cabe destacar que, para conocer la distancia óptima del siguiente conjunto de turbinas respecto de la primera, se debe estudiar mediante la ampliación de la dimensión del dominio aguas abajo, el punto o la distancia a la que el fluido retoma su condición inicial (2 m/s); de esto resulta una futura línea de estudio sumamente importante ya que, al estudiar dicho efecto, se podrá inferir sobre la cantidad de hileras de turbinas que se puede colocar en un río (bajo la disposición asumida anteriormente).

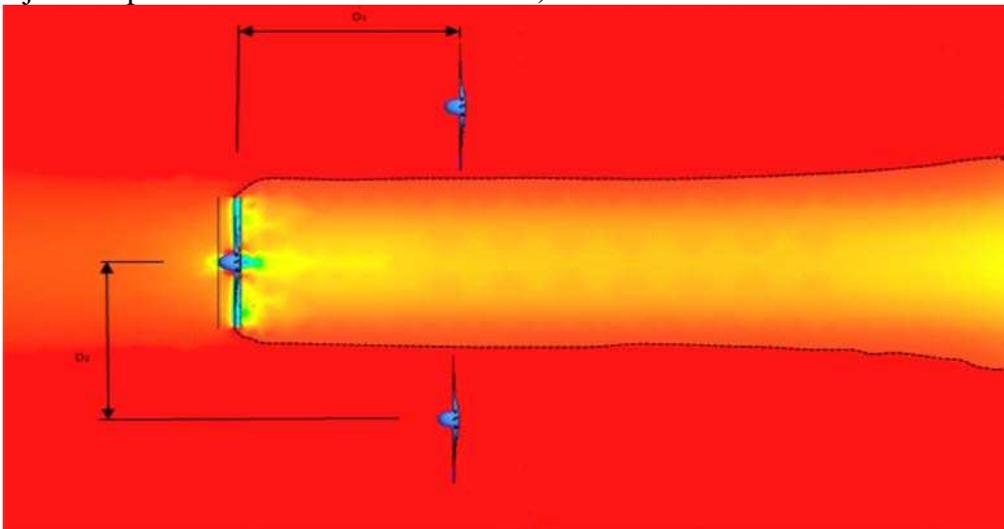


Figura 12. Disposición propuesta para granja hidrocinética.

Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que el modelo de turbulencia empleado resultó correcto, sin embargo, para futuras aplicaciones específicas se estudiara el tipo de modelo de turbulencia más conveniente.

REFERENCIAS

- Misterio de Energía y Minería (MINEM), Escenarios Energéticos 2025, 2016.
- Mohammadi, E., Fadaeinedjad, R., et al, Using a new wind turbine emulator to analyze tower shadow and yaw error effects. *Energy Conversion and Management*, 174:378-387, 2018.
- Selig M. S., Guglielmo J. J., High-Lift Low Reynolds Number Airfoil Design, *Journal of Aircraft* Vol. 34, 1997.
- Oller S. A., Nallim L. G., Oller S., Fluid dynamic design of an axial rotor for hydrokinetic riverbed turbine – Improvement introduced by high lift foil profile, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 35. no. 4, pp. 1198-1206, 2016.
- Badshah Mujahid, Badshah Saeed, et al, Coupled Fluid-Structure Interaction Modelling of Loads Variation and Fatigue Life of a Full-Scale Tidal Turbine under the Effect of Velocity Profile, *Energies*, doi:10.3390/en12112217, 2019