

ppi 201502ZU4659

Esta publicación científica en formato digital es
continuidad de la revista impresa

ISSN 0254 -0770 / e-ISSN 2477-9377 / Depósito legal pp 197802ZU38



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABSTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Dr. Ignacio Rodríguez Iturbe - Zuliano ilustre
Ingeniero civil, hidrólogo profesor universitario,
doctor honoris causa de la Universidad del Zulia,
epónimo de la orden al mérito Dr. Ignacio Rodríguez Iturbe,
ciudadano ejemplar con numerosos premios nacionales e internacionales.



VOLUMEN 46

EDICIÓN CONTINUA

AÑO 2023

Análisis CFD sobre la Influencia del Ángulo de Ataque en el Coeficiente de Potencia de Turbinas Helicoidales Gorlov

Gustavo José Marturet Pérez^{1*}, Gustavo Elías Marturet García², Rafael Antonio Guerra Silva³, María Josefina Torres⁴, Carlos Francisco Torres Monzón⁵

¹Departamento de Mecánica, Universidad Politécnica Territorial del Estado Bolívar (UPTEB), Ciudad Bolívar, 8001, Bolívar, Venezuela.

²Universidad de Los Andes (ULA), Venezuela. Facultad de Ciencias Económicas y Sociales. Economía. Mérida, 5101, Venezuela.

³Industrial Technology and Packaging, Orfalea College of Business. California Polytechnic State University. 1 Grand Ave., Bldg. 3. San Luis Obispo, CA 93407, United States.

⁴Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Av. Universidad, Paramillo, San Cristóbal, Táchira, CP 5001, Venezuela.

⁵Departamento de Ciencias Térmicas, Universidad de Los Andes (ULA), Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Mérida, 5101, Venezuela.

*Autor de correspondencia: marturet@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v46a09>

Recepción: 11 de julio de 2022 | Aceptación: 02 de septiembre de 2023 | Publicación: 28 de septiembre de 2023

Resumen

Las turbinas helicoidales Gorlov son empleadas para la generación de energía eléctrica a partir de la energía cinética de ríos y corrientes marinas. Esta investigación trató sobre el análisis de la influencia del ángulo de ataque de los perfiles de álabes en el coeficiente de potencia de turbinas helicoidales Gorlov, haciendo uso de la simulación en dinámica de fluidos computacionales (CFD, por sus siglas en inglés). La construcción de un dominio computacional se hizo partiendo del diámetro de la turbina. Como modelo de turbulencia para el modelo matemático se empleó el SST $k-\omega$. Un estudio de sensibilidad del mallado del dominio indicó como suficientes las mallas de unos 65000 nodos para los cálculos del torque. Los álabes fueron rotados en ángulos de ataque de ± 12 , ± 9 , ± 6 y $\pm 3^\circ$; posteriormente, se valoraron los coeficientes de potencia o rendimiento de la turbina para cada caso. Se determinó la influencia del ángulo de ataque del álabe de turbinas helicoidales en el coeficiente de potencia, como mejora de su rendimiento. Los resultados mostraron variaciones en el rendimiento de la turbina conforme cambiaba el ángulo de ataque; siendo de 6° el ángulo de ataque con el que se obtuvo mayor rendimiento.

Palabras clave: coeficiente de potencia; dinámica de fluidos computacionales; turbinas helicoidales Gorlov.

CFD Analysis about the Influence of Attack Angle on the Power Coefficient of Gorlov Helical Turbines

Abstract

The Gorlov helical turbines are used for the generation of electric energy starting from kinetic energy from the rivers and marine currents. This research dealt with the analysis of the influence of attack angle of the blades

profiles on the power coefficient of Gorlov helical turbines, and doing use of simulation on computational fluids dynamics (CFD). The building of the computational domain was done starting from the turbine diameter. For the turbulence model as mathematic model was used the SST $k-\omega$. A sensibility study for the meshing of the domains indicated as enough meshes of near 65000 nodes for the calculations of the torque. The blades were rotated in attack angles of ± 12 , ± 9 , ± 6 y $\pm 3^\circ$; subsequently the power coefficients or turbine performance were evaluated in every situation. It was determined the angle of attack of the blades profiles of helical turbines on the coefficient of power as an upgrade of its performance. The results showed variations in turbine performance as the attack angle changed; 6° being the attack angle with which the greatest performance was obtained.

Keywords: computational fluids dynamic; Gorlov helical turbines; power coefficient.

Análise CFD sobre a Influência do Ângulo de Ataque no Coeficiente de Potência das Turbinas Helicoidais Gorlov

Resumo

As turbinas helicoidais Gorlov são usadas para gerar energia elétrica a partir da energia cinética dos rios e das correntes oceânicas. Esta pesquisa tratou da análise da influência do ângulo de ataque dos perfis das pás no coeficiente de potência de turbinas helicoidais Gorlov, utilizando simulação de dinâmica de fluidos computacional (CFD). A construção de um domínio computacional foi feita com base no diâmetro da turbina. O SST $k-\omega$ foi utilizado como modelo de turbulência para o modelo matemático. Um estudo de sensibilidade da malha de domínio indicou que malhas de cerca de 65.000 nós eram suficientes para cálculos de torque. As lâminas foram giradas em ângulos de ataque de ± 12 , ± 9 , ± 6 e $\pm 3^\circ$; Posteriormente, foram avaliados os coeficientes de potência ou desempenho da turbina para cada caso. Foi determinada a influência do ângulo de ataque da pá helicoidal da turbina no coeficiente de potência, como melhoria no seu desempenho. Os resultados mostraram variações no desempenho da turbina conforme o ângulo de ataque mudava; 6° sendo o ângulo de ataque com o qual foi obtido o maior desempenho.

Palavras - chave: coeficiente de potência; dinâmica de fluidos computacional; turbinas helicoidais Gorlov.

Introducción

Las turbinas helicoidales tipo Gorlov (THG) son uno de los tipos de turbinas hidrocínicas empleadas para la conversión de energía en ríos y mares (Marturet *et al.*, 2022). En la Figura 1 se muestra un modelo de turbina hidrocínica Gorlov. Con estas turbinas la energía cinética contenida en el flujo de agua es convertida en energía mecánica. Este proceso de conversión puede cuantificarse con la eficiencia del sistema; más específicamente, el coeficiente de potencia de la turbina, tal y como indican los estudios de Bachant y Wosnik (2015). Dichos autores emplearon el coeficiente de potencia como medida de la capacidad de conversión energética de THG.

En los estudios de diseño, optimización y de flujo sobre THG, por razones de costos de experimentación, se emplean técnicas en dinámica de fluidos computacionales (CFD, por su siglas en inglés). También, se elaboran metodologías de análisis numérico con técnicas de simulación, empleando regímenes transitorios, como en el trabajo de Satrio *et al.* (2018). En otras investigaciones se ha empleado el régimen estable, tal y como desarrollaron Marturet y Torres (2012). Adicionalmente, Marturet *et al.* (2017) en sus estudios de THG compararon modelos de turbulencia para la elaboración del análisis en CFD. En la investigación de Takludar *et al.* (2017) se determinaron experimentalmente el rendimiento de turbinas helicoidales y compararon coeficientes de potencias de unidades individuales con arreglos en tándem de dos unidades idénticas de turbinas de tres álabes tipo NACA 0022, estableciendo los mejores coeficientes de potencia para unidades individuales.

Por otra parte, Barrera *et al.* (2018) estudiaron la influencia del Y plus (Y^+) sobre fuerzas de fricción para determinar: esfuerzos cortantes sobre paredes de dominios computacionales, coeficientes de arrastre en simulaciones que emplean diferentes densidades de mallas para análisis en CFD y su importancia en análisis de flujos viscosos y tiempos de simulación. Pineda-Ortiz *et al.* (2020) dieron a conocer un estudio sobre el estado del arte en THG y los métodos numéricos empleados en el análisis predictivo del rendimiento de turbinas hidrocínicas, entre otros. Al-

Dabbag y Yuce (2019), y Muratoğlu y Demir (2020), evaluaron el rendimiento de turbinas helicoidales para diferentes configuraciones de la geometría del rotor de las turbinas, aunque sin considerar la posición angular del álabe respecto al flujo de fluido como oportunidad de estudio. Estas investigaciones anteriormente señaladas revelaron como objetivos: metodologías de análisis numérico, regímenes de trabajo estable o transitorio, modelos de turbulencia, coeficientes de potencia de diversos arreglos operacionales de turbina, precisión de dominios computacionales, coeficientes de arrastre y/o sustentación. Una oportunidad de desarrollo en THG son las modificaciones en el diseño de la geometría de la turbina, como ejemplo para mejorar su rendimiento. Marturet *et al.* (2022) presentaron un sumario referenciado de estudios en turbinas Gorlov, en los cuales uno de los parámetros estudiados fue el coeficiente de potencia frente a modificaciones en la geometría de estas turbinas. Adicionalmente, en la investigación de Yilmaz *et al.* (2019), se elaboró un estudio del efecto del número de álabes sobre rendimiento de turbinas Gorlov.

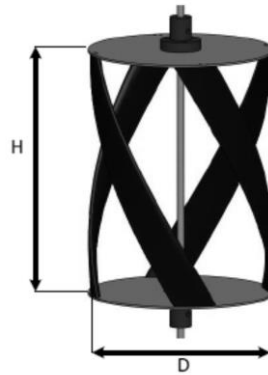


Figura 1. Modelo de turbina helicoidal Gorlov. Se indican parámetros dimensionales para el área de sección transversal (A_t). H: altura, D: diámetro.

En la Figura 2 se muestra el detalle del ángulo de ataque α del álabe con respecto a la longitud de cuerda del álabe de la THG. La línea horizontal de referencia de α coincide con la dirección del vector velocidad de flujo \vec{u}_0 del dominio computacional, en la dirección del eje X. El plano de referencia para los ángulos de ataque α a simular, coincide con la dirección del eje X de la Figura 2; correspondiendo a valores positivos de α las rotaciones en sentido horario y a valores negativos las rotaciones en sentido antihorario.

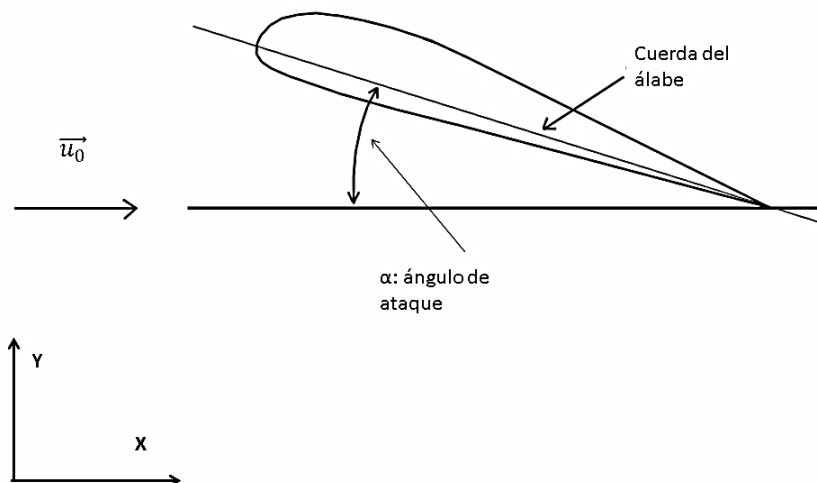


Figura 2. Ángulo de ataque del álabe con respecto a la longitud de cuerda del álabe de la turbina helicoidal Gorlov y vector velocidad de flujo. Medidas de α son: ± 12 , ± 9 , ± 6 y $\pm 3^\circ$. u_0 : velocidad de flujo.

En esta investigación se analizó la influencia en el coeficiente de potencia de la turbina de diferentes posiciones angulares del perfil de álabe respecto del flujo. Como oportunidad de investigación y desarrollo en tecnologías de turbinas Gorlov, se estudió la incidencia de ángulos de ataque de álabes en el rendimiento de estas

turbinas. En su metodología, este trabajo se apoyó en técnicas de CFD para dominios bidimensionales (Satrio *et al.*, 2018). Los álabes modelados corresponden a un perfil de turbina de tres álabes tipo NACA0015, y se posicionan en ángulos de ataque α de: ± 12 , ± 9 , ± 6 y $\pm 3^\circ$; todos para un mismo diámetro de THG.

Materiales y Métodos

Modelo físico y condiciones de contorno

En la Figura 3 se presenta un plano de corte XY de la zona del rotor de tres álabes de la THG. Se puede notar que el ángulo α para 0° indica un álabes en posición horizontal (parte superior de la Figura 3).

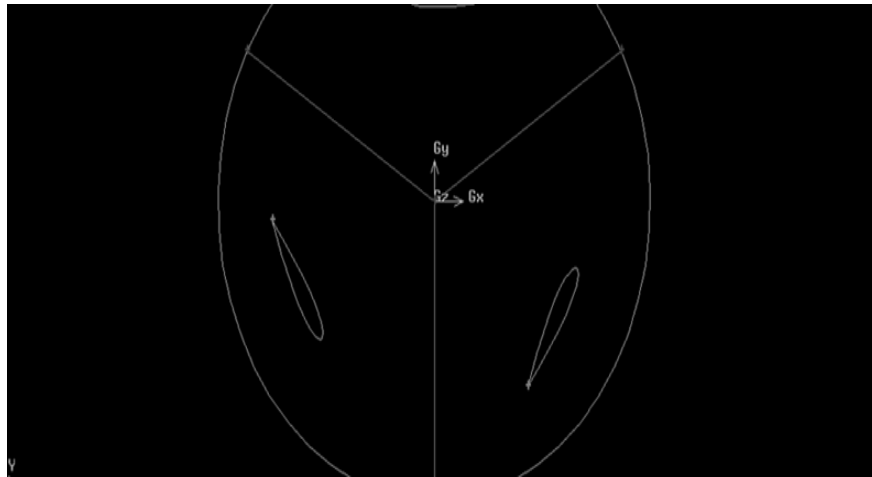


Figura 3. Rotor de tres álabes de la turbina helicoidal Gorlov. Plano de corte XY en 2D. G_x y G_y son los ejes de coordenadas X y Y.

El modelado de dominio computacional $10D \times 24D$ de la THG tuvo como base el diámetro D de la turbina de 300 mm. En la Figura 4 se indica la configuración de condiciones de borde del dominio. La velocidad de entrada (*velocity inlet*) se consideró uniforme, mientras que en la de salida del dominio se fijó la presión (*pressure outlet*). La turbina rotó a la velocidad angular de estudio. Las paredes del dominio se configuraron como se indica en la Figura 4. La turbina rotó a la velocidad de estudio y se fijó la velocidad de flujo uniforme a la entrada del dominio computacional.

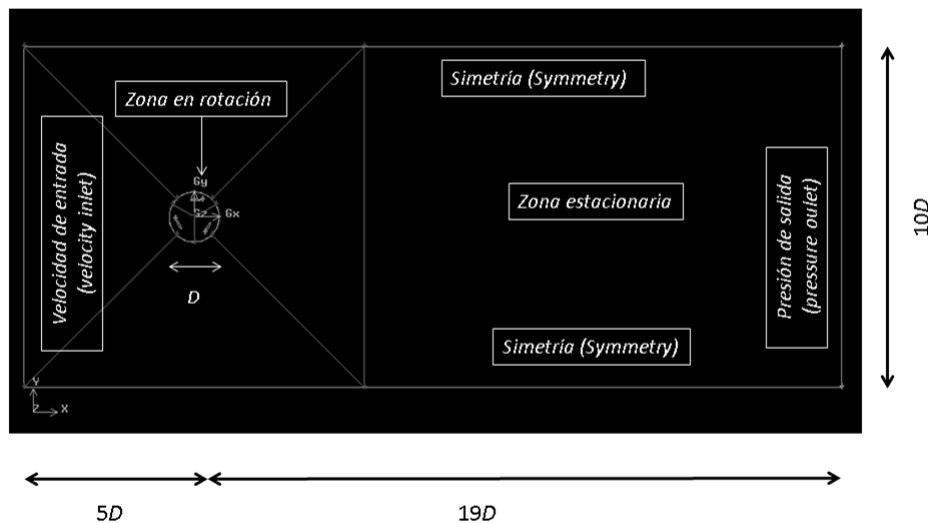


Figura 4. Dominio de turbina helicoidal Gorlov y condiciones de contorno.

El diseño de la turbina para esta investigación correspondió con el diseño experimental estudiado por Chettiar *et al.* (2015), y cuya geometría se describe en la Tabla 1. En cuanto a las propiedades del agua, se tuvieron: densidad (ρ) de 998,2 kg/m³ y viscosidad dinámica (μ) de 0,001003 kg/(m.seg). En la Figura 5 se detallan las dimensiones de la THG, según la Tabla 1, con álabes espaciados a 120°.

Tabla 1. Datos sobre la geometría de turbina helicoidal Gorlov para las modelaciones.

Parámetro	Valor
Tipo de álabe	NACA0015
Longitud de cuerda	100 mm
Número de álabes	3
Diámetro de turbina	300 mm

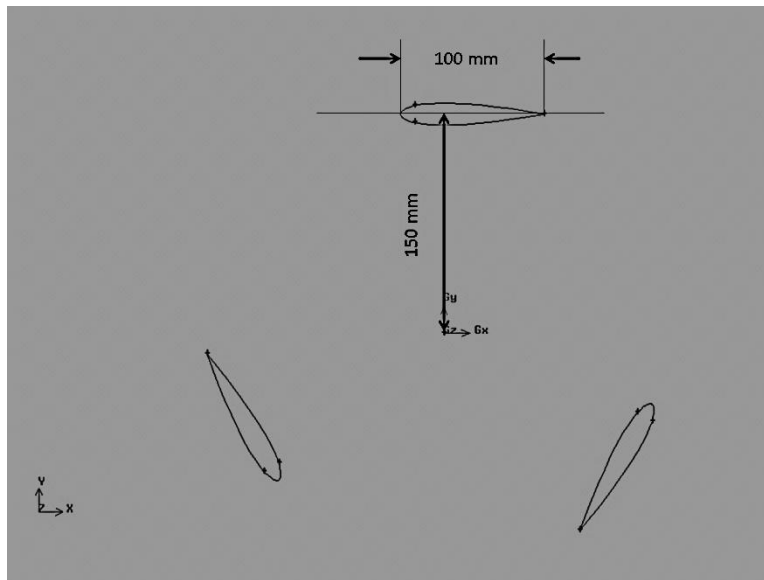


Figura 5. Dimensiones de la turbina helicoidal Gorlov. G_x y G_y son los ejes de coordenadas XY con origen de coordenadas en el centro de la turbina.

Con el programa de procesado de mallados Gambit 2.4 de *Fluent* se hizo la discretización del dominio; para ello, se emplearon mallas estructuradas en la zona estacionaria, mientras que en la zona del rotor de THG se utilizaron celdas tipo triangular. En la Figura 6 se observa el mallado del dominio computacional de la THG a simular para el ángulo α a 0°.

Modelo matemático y numérico

El análisis en CFD se realizó con el programa *Ansys Fluent*, el cual resolvió las ecuaciones que gobiernan el flujo usando la discretización del dominio de volúmenes finitos. El soporte teórico de ecuaciones para el análisis en CFD, se describe en ANSYS (2009). En todas las simulaciones para el modelado del flujo, las ecuaciones de continuidad (Ecuación 1) y de *momentum* (Ecuación 2), tanto escalares de turbulencia como de transporte, fueron resueltas usando el método simple con modalidad de solución (*solver*) tipo *Pressure-Based*. Al mismo tiempo, términos convectivos de la discretización espacial energía cinética turbulenta y razón de disipación turbulenta, así como presión y *momentum*, se discretizaron usando 2^{do}. orden aguas arriba de la turbina (ANSYS, 2009). En la zona de entrada de flujo al dominio computacional (*velocity inlet*) se fijó la velocidad de entrada de manera uniforme, mientras que en la salida (*pressure outlet*) se estableció la presión. De igual manera, para complementar las ecuaciones Navier-Stokes U-RANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*) como modelo de turbulencia, se tomó el *SST k- ω* , según las Ecuaciones 3 y 4:

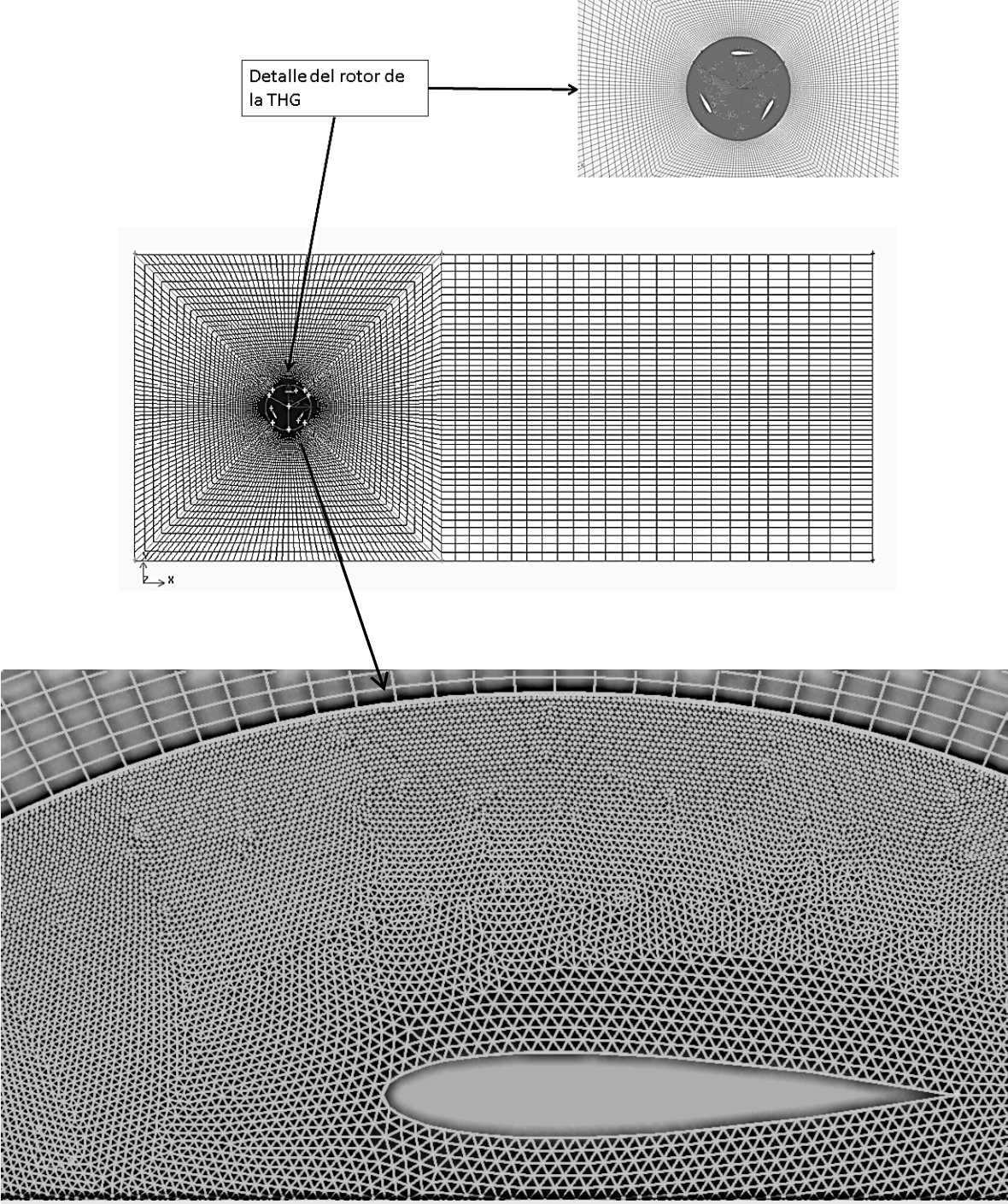


Figura 6. Muestra del mallado del dominio de la turbina helicoidal Gorlov (THG).

A continuación se presentan las Ecuaciones correspondientes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial (-\overline{\rho u_i' u_j'})}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \overline{G_k} - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

El programa *Ansys Fluent* resolvió las ecuaciones del modelo matemático para las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 de la turbina, considerando el régimen como transitorio y con simulaciones bajo la forma *sliding mesh*. En los trabajos de Satrio *et al.* (2018), Durrani *et al.* (2011) y de Lanzafame *et al.* (2014), pueden revisarse detalles del desarrollo en régimen transitorio y de las técnicas *sliding mesh*. Para efectos de las simulaciones los parámetros propios del régimen transitorio, TSS (*time step size*) y NTS (*number of time step*), se configuraron siguiendo las recomendaciones de Satrio *et al.* (2018). Además, considerando que en el estudio de Marturet *et al.* (2017) se obtuvo una longitud de $19D$ aguas abajo del dominio computacional de la THG como longitud que permite la menor perturbación del flujo que sale de la turbina, esta misma longitud del dominio de $19D$ se empleó en las simulaciones de esta investigación.

Resultados y Discusión

En la Figura 7 se presentan dos histogramas indicativos de la estabilidad de las variables presión y velocidad del campo de flujo de la THG, observándose una baja perturbación aguas abajo de la turbina y cuyo rotor está en la posición 0 m. En la Figura 7a se muestra la magnitud de la velocidad en la extensión del dominio computacional, donde a partir de la posición 2 m se localizan magnitudes del orden de 1,2 m/seg. En la Figura 7b se puede observar que mientras la presión total (presión estática + presión dinámica) se mantiene en el orden de $1,2 \cdot 10^3$ Pa; la zona del rotor de la turbina presenta mayores diferenciales de presión; por consiguiente, para esta investigación la longitud $19D$ fue suficiente como elemento de consideración frente a fenómenos de estela aguas abajo de la turbina, que podrían constituirse en fenómenos de perturbación del flujo en el rotor de THG.

En las Figuras 8a y 8b se observan los contornos de presión y velocidad en todo el dominio computacional de la THG, obtenidos a partir de las simulaciones, lo cual complementa los resultados mostrados en la Figura 7 para la estabilidad de las variables indicadas en el campo de flujo.

En la Figura 9 se presenta un estudio de sensibilidad del mallado del dominio computacional (Figura 6). Puede observarse la tendencia a la estabilidad del valor del torque de la THG frente a incrementos del número de nodos del dominio. Este estudio de sensibilidad se realizó para validar el modelo numérico aquí desarrollado en CFD. Los errores relativos del torque frente a la densificación del dominio oscilaron entre 8 y 4 %, de allí que la densificación del mallado del dominio presenta una perturbación despreciable de la variable torque obtenida en las simulaciones. Sobre la base de la economía del recurso computacional, la calidad del mallado, los tiempos de simulación y los dominios para las simulaciones, se densificaron alrededor de 65000 nodos. Así mismo, para la consideración de las iteraciones, se tomó como criterio de convergencia el control de los residuales, el cual se fijó en 10^{-3} .

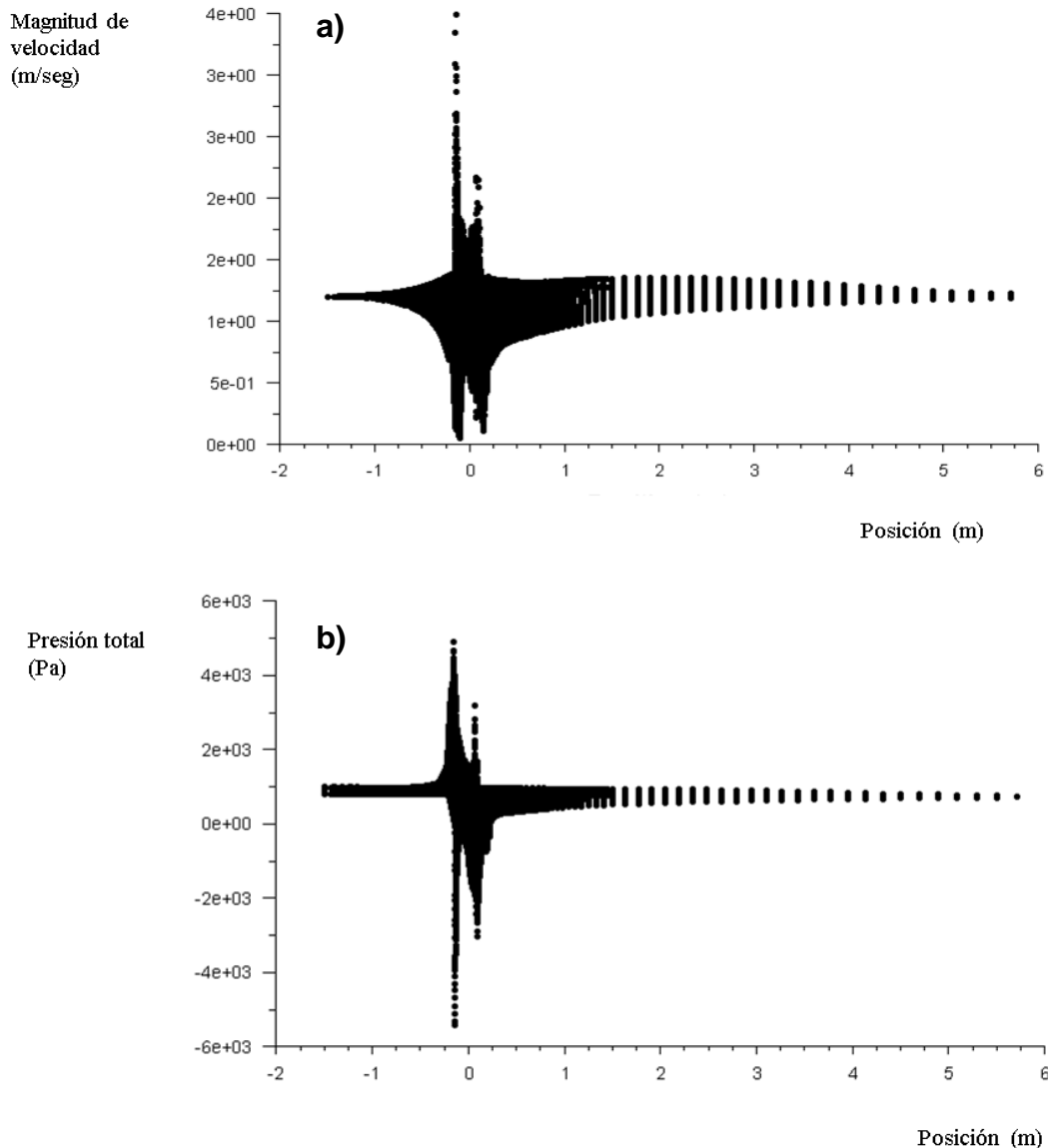


Figura 7. Estabilidad del campo de flujo en el dominio computacional de la turbina helicoidal Gorlov. a) Estabilidad de velocidad (m/seg), b) Estabilidad de presión (Pa), en el dominio de turbina helicoidal Gorlov.

En las Figuras 10a y 10b se muestran los resultados sobre la afectación de las variables asociadas a TSS y NTS en regímenes de estudios de turbinas, con aplicación de CFD. Se valoró el coeficiente de arrastre (C_d), el coeficiente de momento (C_m) y su progresión en el tiempo. C_m fue determinado por la Ecuación 5 (ANSYS, 2009):

$$C_m = \frac{\vec{M}_A}{1/2\rho v^2 AL} \quad (5)$$

Donde: \vec{M}_A es el momento total en la consideración de los efectos por presión y viscosos medido en el punto A, punto que coincide con el centro de la turbina, ρ es la densidad del agua, v la velocidad, A y L el área y la longitud, respectivamente, en la superficies de integración del sistema. De igual modo, C_d es función del número de Reynolds (Re) y del ángulo de ataque ($C_d = f(Re, \alpha)$). El programa *Ansys Fluent* también proporcionó resultados del coeficiente C_d . Tanto C_m como C_d se graficaron (Figura 10) contra el tiempo transcurrido (*flow-time*). Más detalles sobre las definiciones de C_d , C_m y *flow-time* (seg) pueden encontrarse en ANSYS (2009).

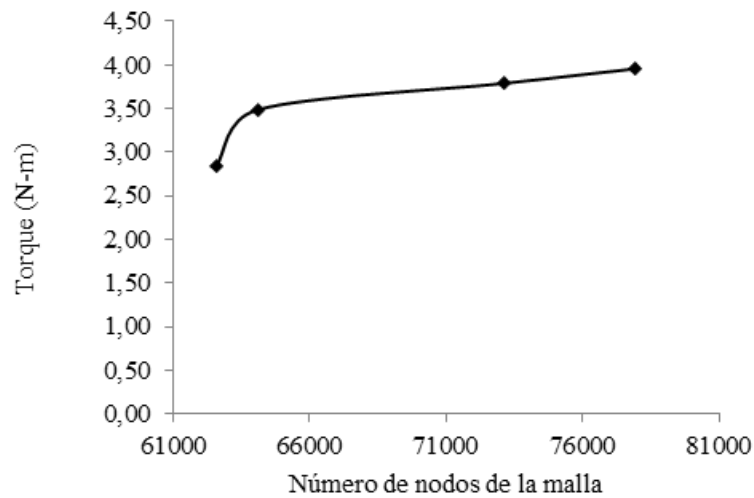


Figura 9. Sensibilidad del mallado del dominio computacional de la turbina helicoidal Gorlov.

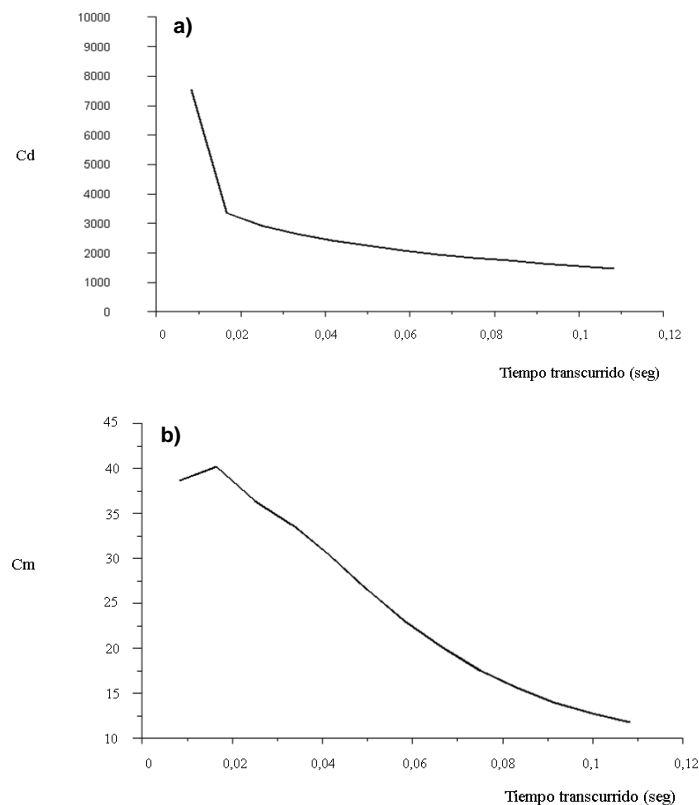


Figura 10. Análisis del tiempo sobre el régimen de flujo de la turbina helicoidal Gorlov. a) Coeficiente de arrastre, C_d ; b) Coeficiente de momento, C_m .

En la Figura 10a se observa que en la variable C_m se distingue un máximo debido al arranque de la turbina, para posteriormente alcanzar valores operacionales de funcionamiento. En este caso, el arranque coincidió con la velocidad angular del estudio; posteriormente, ambos coeficientes mostraron estabilidad respecto al tiempo, a medida que la turbina desarrolló velocidades de funcionamiento. Un comportamiento similar fue obtenido por Satrio *et al.*

(2018), en los que valores de coeficientes de potencia o rendimiento tienden a estabilizarse conforme se desarrolla el tiempo transcurrido.

La validación del modelo matemático y numérico se desarrolló con los datos experimentales aportados por Chettiar *et al.* (2015). Al respecto, en la Figura 11 se presentan los resultados obtenidos cuando la velocidad de flujo en la entrada del dominio fue de 1,2 m/seg. De esta manera, se obtuvieron diferencias entre los valores experimentales aportados por Chettiar *et al.* (2015) y los del modelo en CFD aquí desarrollado, del orden del 2 al 8 % (Figura 11), y que para efectos de esta investigación se consideran satisfactorios. Para el cálculo de estas diferencias entre el modelo experimental de Chettiar *et al.* (2015) y los de la simulación, se empleó la Ecuación 6, según Marturet (2019):

$$Error\ relativo = \frac{Torque_{CFD} - Torque_{exp}}{Torque_{exp}} \times 100\ \% \quad (6)$$

Donde: $Torque_{CFD}$ es el torque obtenido en las simulaciones CFD y $Torque_{exp}$ el torque del modelo experimental.

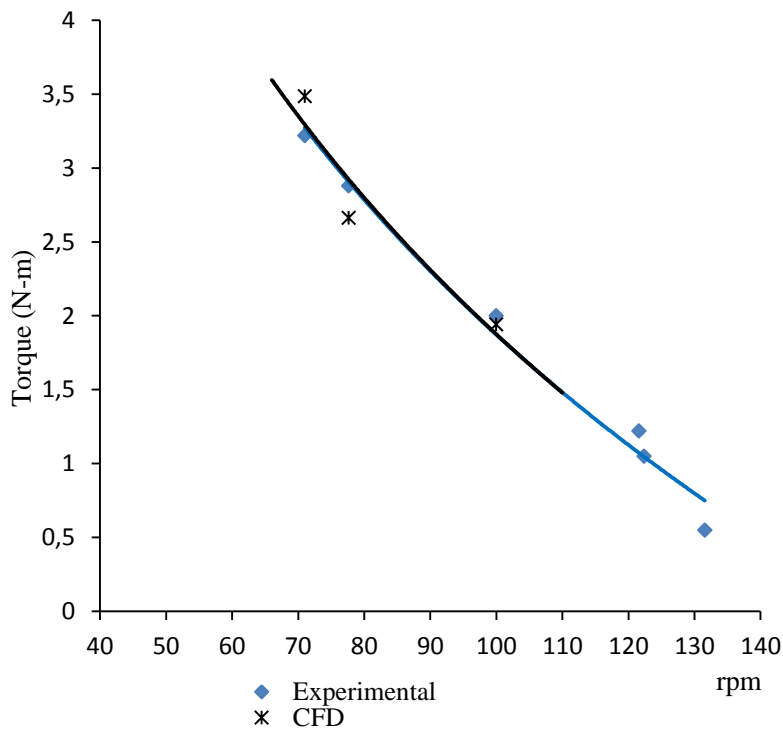


Figura 11. Comparación de torque experimental vs. CFD en la validación del modelo matemático y numérico para la turbina helicoidal Gorlov. Todos los datos corresponden a un flujo de 1,2 m/seg. Los datos experimentales fueron obtenidos de Chettiar *et al.* (2015). rpm: revoluciones por minuto de la turbina.

En la investigación de Saini y Saini (2019) se presenta una revisión detallada sobre mejoras y optimización de turbinas hidrocínicas. Su estudio contiene información relevante sobre modelos de turbulencia, métodos numéricos, parámetros y rango de estudios; así como valores óptimos de la geometría de las turbinas, con orientaciones sobre coeficientes de arrastre y sustentación. También, Jain y Saha (2019) abordaron fenómenos de flujo sobre la turbina, asociados a aspectos geométricos del álabe, como su relación entre la cuerda y el espesor. Estos desarrollos en CFD antes señalados estudian aspectos geométricos sobre el flujo y el rendimiento de turbinas, constituyendo algunas oportunidades de mejora del rendimiento: cambios en el perfil del álabe, cambios en el número de álabes, modificaciones en la relación de solidez, montaje de THG en grupos o tándem verticales y adicionar a la turbina componentes o accesorios para modificar condiciones del flujo. Los ensayos experimentales de THG aportados por Chettiar *et al.* (2015) indicaron un máximo rendimiento de la turbina de conformidad con la geometría por ellos estudiada, según la Tabla 1, para unas condiciones operacionales de 1,2 m/seg de flujo cuando la

turbina rota a 71 rpm, con lo cual, el valor del coeficiente de potencia C_p (Ecuación 6) para Chettiar *et al.* (2015) se corresponde con un valor máximo de 0,15; según:

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho u_0^3 A_t} \quad (7)$$

Donde: ω es la velocidad angular de la THG, u_0 la velocidad del flujo aguas arriba de la turbina, T el torque de turbina y A_t el área de sección transversal al flujo (Marturet, 2019).

Para efectos de cálculo del rendimiento de turbinas C_p , T es tomado de las simulaciones, u_0 es la velocidad de estudio en la entrada del dominio y A_t es el área transversal de flujo sobre la turbina, indicada en los experimentos de para Chettiar *et al.* (2015), y es el producto de su altura de 600 mm por diámetro de 300 mm. Seguidamente, para las condiciones operacionales de 1,2 m/seg y 71 rpm y un número de Reynolds sobre el álabe de $1,19 \cdot 10^5$, se procedió a posicionar los álabes del diseño propuesto Chettiar *et al.* (2015), en ángulos de $\pm 12^\circ$, $\pm 9^\circ$, $\pm 6^\circ$ y $\pm 3^\circ$, según la Figura 2, en el dominio computacional de la Figura 4. Los datos obtenidos de las simulaciones por el cambio de posición angular de los perfiles de álabes se muestran en la Tabla 2. Se puede notar que para ángulos de -6° , -9° y -12° los torques resultaron menores a cero en las condiciones de estudio, por lo que no se siguieron considerando; lo cual es a consecuencia de las condiciones del flujo, la posición del álabe y la velocidad angular de la turbina, que no son suficientes para generar un torque en ellas.

Tabla 2. Torque para las posiciones angulares del álabe de la turbina helicoidal Gorlov para un flujo de 1,2 m/seg y 71 rpm.

α	+12°	+9°	+6°	+3°	0°	-3°	-6°	-9°	-12°
Torque (N-m)	7,49	8,83	10,37	9,82	3,48	2,68	<0	<0	<0

En la Figura 12 se presenta el campo de presiones totales con álabes de 0 y 6°, mientras que la Figura 13 contiene el campo de velocidades para álabes a 0 y 6°. En todos los casos la velocidad de flujo de la simulación fue de 1,2 m/seg. Pueden notarse que si bien los rangos de presiones y velocidades tienden a aproximarse, la extensión dentro de la zona del rotor de mayores presiones y velocidades se hace más amplia para el caso del perfil de álabe a 6°. Sin embargo, para la THG con un ángulo de ataque de 6° los diferenciales de presión sobre el álabe (Figura 12b) se hacen más pronunciados. Siendo así que coeficientes de arrastre y sustentación así como del torque resultante son mayores en esa posición angular. De tal modo que, la potencia mecánica de turbina aumenta y con ella su rendimiento, en condiciones similares de flujo y velocidad de rotación cuando los álabes se posicionaron a 6°.

Por otra parte, en la Figura 14 se presentan las curvas de torque y rendimiento C_p comparativas de dos configuraciones angulares del álabe 3 y 6°, así como los datos experimentales de Chettiar *et al.* (2015). Las curvas características de la Figura 14 se graficaron con los datos de la Tabla 3, donde los datos de C_p se obtuvieron mediante la Ecuación 7. Los mayores valores de C_p se lograron con en el álabe posicionado a 6°, de tal manera que a partir de rendimientos del orden de 0,15 con cambios en la posición angular del álabe de la THG, se pueden alcanzar rendimientos del valor de 0,54, lo cual significa una mejora del rendimiento de la turbina helicoidal con este ángulo de ataque de los álabes de la THG.

Tabla 3. Resultados de simulaciones de la turbina helicoidal Gorlov en ángulos α de 0° y 6°.

Turbina con álabes a 0°			
	71 rpm	77 rpm	100 rpm
Torque (N-m)	3,485	2,662	1,942
C_p	0,166	0,139	0,131
Turbina con álabes a 6°			
Torque (N-m)	10,379	10,158	7,523
C_p	0,4970	0,531	0,507

C_p : coeficiente de potencia rendimiento, rpm: revoluciones por minuto de la turbina.

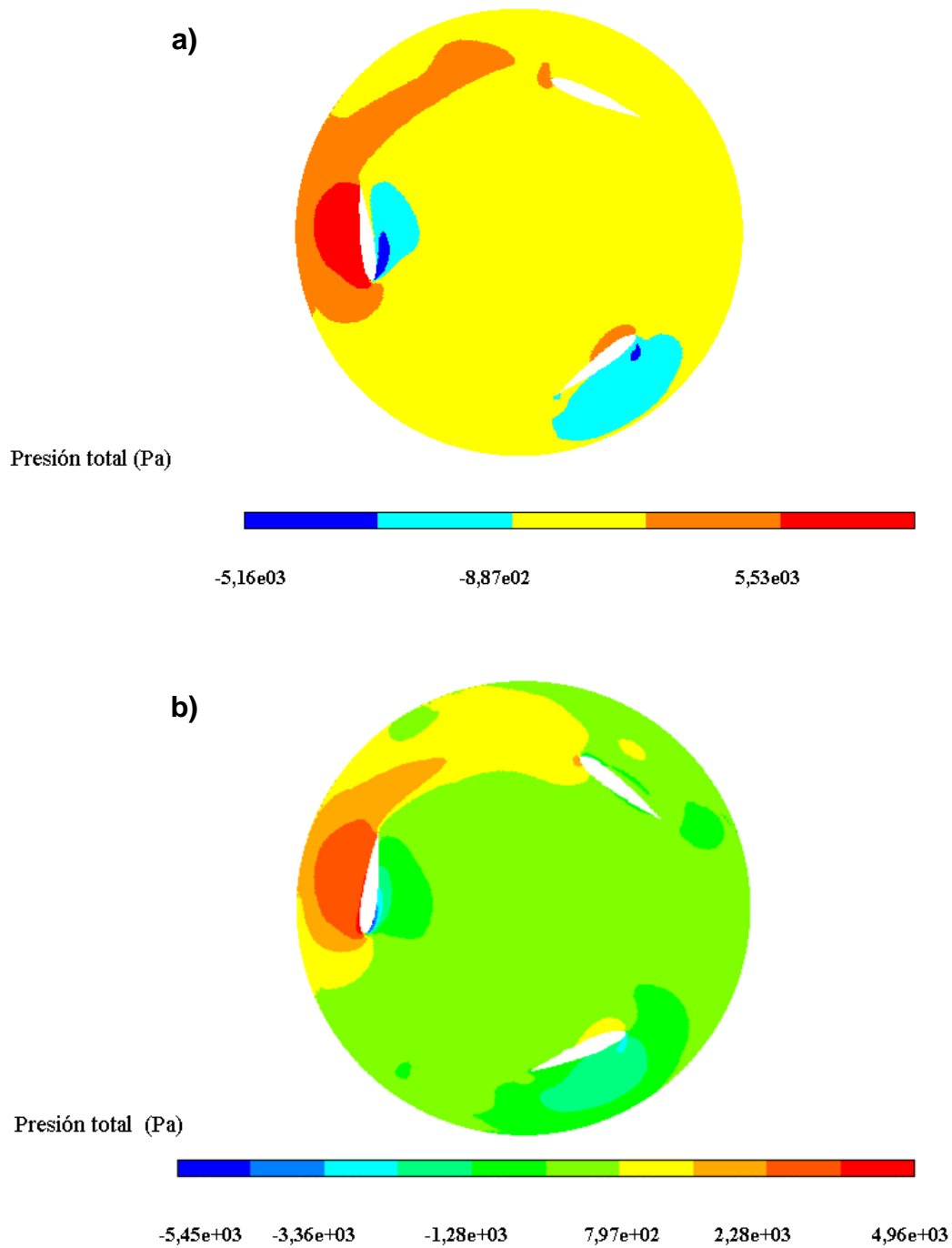


Figura 12. Campo de presiones sobre los álabes de la turbina helicoidal Gorlov.
a) Para 0° , b) Para 6° .

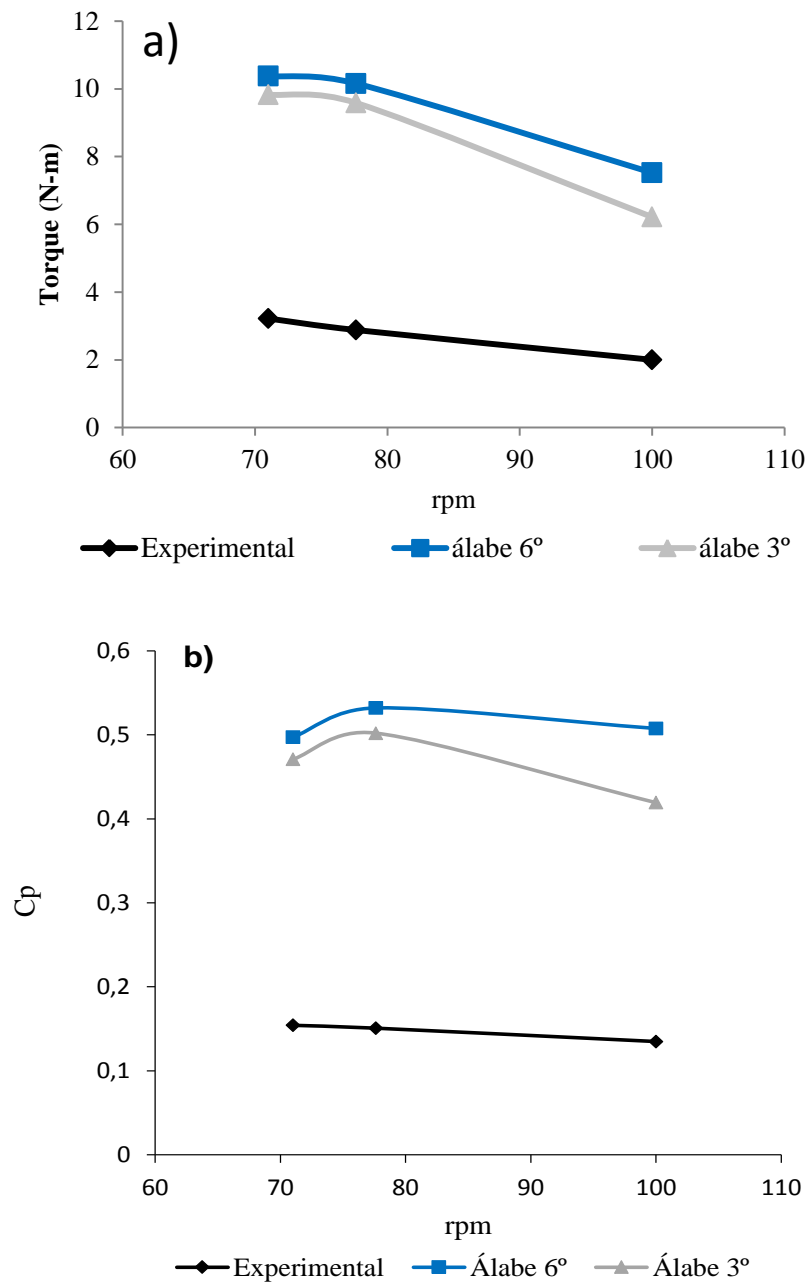


Figura 14. Curvas características de la turbina helicoidal Gorlov. a) Torque de turbinas, b) Coeficiente de potencia de turbinas. En todos los casos la velocidad de flujo fue de 1,2 m/seg. Los datos experimentales fueron obtenidos de Chettiar *et al.* (2015). C_p : coeficiente de potencia, rpm: revoluciones por minuto de la turbina.

Conclusiones

Esta investigación ha permitido estudiar la influencia de diferentes posiciones angulares de álabes sobre el coeficiente de potencia en turbinas helicoidales Gorlov. El desarrollo de un modelo matemático y numérico de ecuaciones U-RANS en conjunto con un modelo de turbulencia *SST k- ω* en régimen transitorio, proporcionó valores del torque de las posiciones angulares de los álabes en: ± 12 , ± 9 , ± 6 y $\pm 3^\circ$. También, el estudio para las condiciones de operación y flujo de la turbina indicó mayores rendimientos cuando los álabes están en la posición de 6° . Cambios en el ángulo de ataque inciden en el rendimiento de turbinas helicoidales Gorlov y se pueden considerar para mejorar el rendimiento de estas turbinas. En esta investigación se estableció que adicional a la velocidad del flujo incidente sobre la turbina, la posición angular del perfil de álabes también afecta su rendimiento. Como trabajo a futuro se podría considerar el escalamiento dimensional de este modelo de turbinas, así como también modificaciones del perfil de álabes, a los fines de determinar posibles mejoras en el rendimiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación en Tecnología, Educación y Comunicación (CITEC) de la Universidad Politécnica Territorial del Estado Bolívar, por su contribución en el desarrollo de esta investigación.

Referencias Bibliográficas

- ANSYS. (2009). *Ansys fluent 12.0. Theory guide*. Canonsburg: ANSYS Inc.
- Al-Dabbagh, M. A, Yuce, M. I. (2019). Numerical evaluation of helical hydrokinetic turbines with different solidities under different flow conditions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(8), 4001-4012.
- Barrera, E., Aguirre, F., Vargas, S., Martínez, E. D. (2018). Influencia del γ plus en el valor del esfuerzo cortante de pared a través simulaciones empleando dinámica computacional de fluidos. *Información Tecnológica*, 29(4), 291-302.
- Bachant, P., Wosnik, M. (2015). Performance measurements of cylindrical- and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency. *Renewable Energy*, 74, 318-325.
- Durrani, N., Hameed, H., Rahman H., Chaudhry, S. (2011). *A detailed aerodynamic design and analysis of a 2-D vertical axis wind turbine using sliding mesh in CFD*. 49th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition. Orlando: AIAA, 541.
- Jain S., Saha, U. K. (2019). On the influence of blade thickness-to-chord ratio on dynamic stall phenomenon in H-type Darrieus wind rotors. *International Journal of Energy Research*, 218, 113024.
- Lanzafame, R., Mauro, S., Messina, M. (2014). 2D CFD modeling of H-Darrieus wind turbines using a transition turbulence model. *Energy Procedia*, 45, 131-140.
- Marturet G., Gutiérrez E., Caraballo, S. (2017). Influencia de parámetros dimensionales en potenciales energéticos de turbinas hidrocineéticas Gorlov. *Novo Tékhne*, 3(2), 19-31.
- Marturet, G., Gutiérrez, E., Caraballo, S. (2017). Valoración de modelos de turbulencia en dominios computacionales para simulación de una turbina helicoidal. *Revista Científica UNET*, 28(1), 5-18.
- Marturet, G., Torres, C. (2012). Modelación numérica en flujo estable para una turbina Gorlov. *Avances en simulación computacional y modelado numérico*. XI Congreso CIMENICS: avances en simulación computacional y modelado numérico. La Asunción: Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1-6.
- Marturet, G., (2019). *Modelación fluidodinámica de turbinas Gorlov para la mejora de su rendimiento*. Tesis doctoral. Ciudad Guayana: Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UXEXPO).

Muratoğlu A., Demir, M. S. (2020). Investigating the effect of geometrical and dynamic parameters on the performance of Darrieus turbines: a numerical optimization approach via QBlade algorithm. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 413-426.


Pineda-Ortiz, J. C., Chica-Arrieta, E. L. (2020). Métodos numéricos para el desarrollo de una turbina hidrocínética tipo Gorlov. *Revista UIS Ingenierías*, 19(3), 187-206.

Saini, G., Saini, R. P. (2019). A review on technology, configurations, and performance of cross-flow hydrokinetic turbines. *International Journal of Energy Research*, 43(13), 6639-6679.

Satrio, D., Utama, I., Pria, K. A., Mukhtasor. (2018). The influence of time step setting on the CFD simulation result of vertical axis tidal current turbine. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 12(1), 3399-3409.

Talukdar, P. K., Kulkarni V., Das A. K., Dwivedy, S. A., Kakoty, S. K., Mahanta, P., Saha, U. K. (2017). *In-situ experiments to estimate the performance characteristics of a double-step helical-bladed hydrokinetic turbine*. Proceedings of the ASME 2017 Gas Turbine India Conference (GTINDIA 2017). Bangalore: American Society of Mechanical Engineers (ASME), 4572.

Yilmaz, A., Boer, O., Kirkpinar, A., Aktas, F., Turgut, O. (2019). *The effect of the number of turbine blade on Gorlov turbine performance*. Proceedings of 4th International Conference on Innovations and Emerging Trends in Mechanical Engineering (IETME 2019). Bangalore: Nagarjuna College of Engineering & Technology, P15.

Editor Asociado: *Francisco Manuel León Oviedo* 

Departamento de Tecnología y Diseño, Universidad de Los Andes (ULA)
Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Mérida, 5101, Venezuela



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen 46. Año 2023, Edición continua _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en septiembre 2023, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela***

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org