



Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia

ISSN: 0254-0770

revistatecnica@fing.luz.edu.ve

Universidad del Zulia

República Bolivariana de Venezuela

Gustavo José Marturet Pérez; Gustavo Elías Marturet García; Carlos Francisco Torres Monzón

Análisis CFD en Régimen Transitorio para la Determinación de Cavitación en Turbinas Helicoidales Gorlov

Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, vol. 45, núm. 2, 2022, pp. 84-99

Universidad del Zulia

Maracaibo, República Bolivariana de Venezuela

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=605780379002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante

Infraestructura abierta no comercial propiedad de la academia

Análisis CFD en Régimen Transitorio para la Determinación de Cavitación en Turbinas Helicoidales Gorlov

Gustavo José Marturet Pérez^{1*}, Gustavo Elías Marturet García², Carlos Francisco Torres Monzón³.

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

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

³Departamento de Ciencias Térmicas, Universidad de Los Andes (ULA), Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Mérida 5101, Venezuela.

*Autor de correspondencia: marturetg@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v45n2a02>

Recepción: 03 de mayo 2021 | Aceptación: 10 de enero de 2022 | Publicación: 01 de mayo de 2022

Resumen

Las turbinas helicoidales Gorlov pueden emplearse para generar energía eléctrica, aprovechando el flujo de fluidos. Por su funcionamiento, en algunos casos, estas turbinas presentan fenómenos de cavitación que erosionan su estructura. En el presente artículo se expone una estrategia para determinar la cavitación, en condiciones operacionales de turbinas helicoidales tipo Gorlov. Fundamentado en el número de cavitación o número de Thoma, se determinó el coeficiente de presión sobre los álabes de la turbina. El análisis se apoyó en técnicas computacionales. Las ecuaciones gobernantes del flujo junto al modelo de turbulencia SST k- ω bajo simulaciones en régimen transitorio, fueron resueltas al determinarse el punto de funcionamiento de la turbina y establecerse el número de cavitación. Esta estrategia sirvió para determinar el número de cavitación y, con los resultados de las simulaciones, se determinó que la turbina modelada presenta fenómenos de cavitación en las condiciones de flujo y operación estudiadas.

Palabras clave: cavitación; dinámica de fluidos computacionales; turbinas helicoidales Gorlov; turbulencia.

CFD Analysis in Transient Regime to the Determination of Cavitation in Gorlov Helical Turbines

Abstract

The Gorlov helical turbines can be used to generate electric energy by making use of the flow of fluids. Because of its operation in some cases, this turbines show phenomenon of cavitation that erodes their structure. This article exposes a strategy to determine the cavitation in operational conditions of Gorlov helical turbines. Based on the cavitation number or Thoma number, the coefficient of pressure on the turbine blades is determined. The analysis is supported on computational techniques. The governing equations of the flow together with the SST k- ω turbulence model under transient regime simulations were solved by determining the operating point of the turbine and establishing the cavitation number. This strategy allowed to determinate the cavitation number and with the results of the simulations it was determinated that the modeled turbine shows cavitation phenomena in the conditions of flow and operation studied.

Key words: cavitation; computational fluids dynamic; Gorlov helical turbines; turbulence.

Análise CFD em Regime Transitório para Determinação da Cavitação em Turbinas Helicoidais Gorlov

Resumo

As turbinas helicoidais Gorlov podem ser usadas para gerar energia elétrica, aproveitando o fluxo de fluido. Devido ao seu funcionamento, em alguns casos, essas turbinas apresentam fenômenos de cavitação que erodem sua estrutura. Este artigo apresenta uma estratégia para determinar a cavitação, sob condições operacionais de turbinas helicoidais do tipo Gorlov. Com base no número de cavitação ou número de Thoma, foi determinado o coeficiente de pressão nas pás da turbina. A análise foi apoiada por técnicas computacionais. As equações governantes do escoamento juntamente com o modelo de turbulência SST $k-\omega$ sob simulações em regime transitório foram resolvidas determinando o ponto de operação da turbina e estabelecendo o número de cavitação. Essa estratégia serviu para determinar o número de cavitação e, com os resultados das simulações, determinou-se que a turbina modelada apresenta fenômenos de cavitação nas condições de vazão e operação estudadas.

Palavras-chave: cavitação; dinâmica de fluidos computacional; turbinas helicoidais Gorlov; turbulência.

Introducción

El hombre en la necesidad de proveerse de energía, ya sea con fines de protección del ambiente y/o para aquellas comunidades que no disfrutan de energía eléctrica por su lejanía con centros y redes de distribución eléctrica, ha desarrollado tecnologías de turbinas hidrocínicas. Estas turbinas convierten el potencial cinético de ríos y mares en energía mecánica la cual posteriormente puede transformarse en energía eléctrica (Marturet, 2019).

Los desarrollos en tecnologías hidrocínicas, han estudiado casos particulares de las turbinas helicoidales tipo Gorlov (THG). En tal sentido, el trabajo de Marturet (2019) analiza el rendimiento de THG cuando se modifican parámetros geométricos del álabe y del rotor, apoyándose en técnicas de la dinámica de fluidos computacionales (CFD) para mejorar el rendimiento de la turbina. En la Figura 1 se muestran algunos modelos de turbinas hidrocínicas.

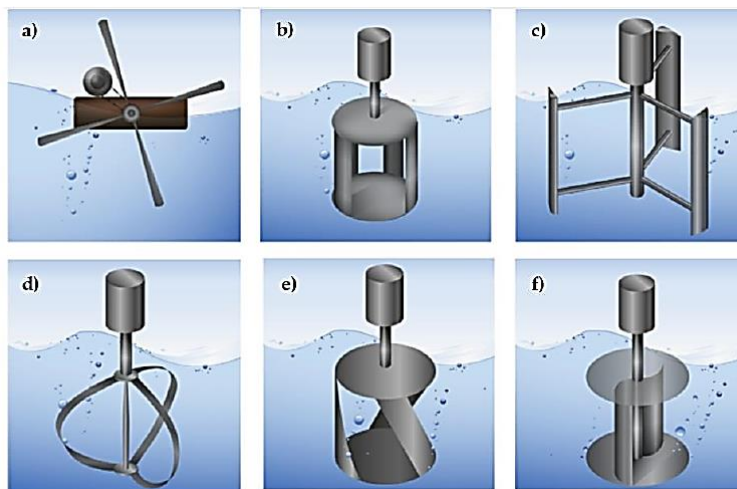


Figura 1. Turbinas hidrocínicas (Marturet, 2019). a) De eje axial (horizontal), b) Darrieus jaula de ardilla, c) H-Darrieus, d) Darrieus, e) Helicoidal Gorlov, f) Savonius.

En el estudio de Pineda-Ortiz y Chica-Arrieta (2020) se analizan tendencias sobre los diferentes métodos numéricos para el diseño, análisis y optimización de THG; mientras que Acevedo *et al.* (2018) elaboran un análisis de modelización de turbinas hidrocínicas tipo Darrieus, para la determinación de curvas características de

rendimiento con aplicación de CFD. Por otra parte, en la investigación de Marturet (2012), se presentan comportamientos operacionales de THG, representados en curvas características. También, es de revisión fundamental en investigaciones sobre turbinas hidrocínéticas, el trabajo de Shiono *et al.* (2002), en el que se construyen curvas características cuando comparan diferentes tipos de álabes.

Tratándose de análisis de eficiencias de turbinas de flujo libre, como también se denomina a las turbinas hidrocínéticas, es indispensable el trabajo de Gorban *et al.* (2000), en donde se determina la relación entre rendimiento, ángulo de paso y flujo a través de la turbina a partir de la adecuación sobre la concepción del área de paso del flujo mismo. El análisis de Niblick (2012) desarrolla una investigación experimental y en CFD de THG, comparando coeficientes de rendimiento de diferentes configuraciones geométricas de turbinas. Presenta consideraciones sobre parámetros geométricos de turbinas, vectores de velocidad y vectores de fuerza sobre álabes. Como trabajo a futuro plantea estudios para predecir mejoras del rendimiento de turbina, tomando en cuenta aspectos geométricos como la relación de solidez y el ángulo de paso helicoidal, y la relación de velocidad, entre otros.

La investigación de Molina *et al.* (2018) trata sobre fenómenos de turbulencia y de estelas de flujos, y su incidencia en la potencia de turbinas Darrieus; mediante la experimentación en túneles de viento y análisis en CFD, bajo condiciones de flujo turbulento y régimen transitorio, estudian la vorticidad y fenómenos de recuperación de flujo para mejorar el rendimiento de la turbina. Recomiendan desarrollar pruebas del rotor de turbina a diferentes números de Reynolds, relaciones de velocidad y relación con los álabes. Aspectos sobre estudios en CFD de turbinas hidrocínéticas bajo régimen transitorio, régimen de turbulencia para dichos estudios, consideraciones para análisis bajo técnicas de mallas deslizantes (*sliding mesh*), son tratados en las investigaciones de Satrio *et al.* (2018), Durrani *et al.* (2011) y Lanzafame *et al.* Messina (2014).

Las THG se diseñan para lograr su máximo rendimiento. Como estas turbinas operan en las proximidades de la superficie libre del agua, la cavitación es una consideración a tomar en su diseño (Nedyalkov y Wosnik, 2013). El fenómeno de cavitación se presenta cuando la presión sobre cualquier parte de la turbina, es menor que la presión de evaporación dando paso a la formación de burbujas. La acción de las corrientes de flujo, remolinos y vórtices, transporta las burbujas a zonas de mayor presión, en donde se condensan los vapores y las burbujas colapsan repentinamente, por lo que el líquido circundante tiende a llenar estas cavidades. Esta formación de cavidades y altas presiones ocurre mientras la turbina está operando, fenómeno se repite cíclicamente. Cuando el proceso de cavitación se da en las cercanías de los álabes genera su corrosión, altas tensiones locales, fallos por fatiga del material, así como también la disminución del rendimiento de la turbina. De allí que es deseable evitar la aparición del fenómeno de cavitación en turbinas hidrocínéticas (Nedyalkov y Wosnik, 2013).

La investigación de da Silva *et al.* (2015) presenta una aproximación matemática en la prevención de la cavitación, a partir de la modificación de la cuerda del álabe de la turbina. Por su parte, Murray (2017) valida una herramienta de código abierto para predecir el rendimiento de las turbinas hidrocínéticas y el inicio de cavitación en sus álabes. Un estudio publicado por Saini y Saini (2019), contiene una revisión de tecnologías de turbinas hidrocínéticas, en el mismo se exploran los métodos de selección, mejora del rendimiento y optimización del diseño, señalando que la cavitación es un problema que ocurre relativamente a altas velocidades de rotación, conduce a la separación del flujo y aumenta el tamaño de sus vórtices. Finalmente, en la Tabla 1 se ofrece una revisión de aspectos relevantes sobre los elementos teóricos de esta investigación.

En el presente trabajo se analizó una estrategia para la determinación de condiciones de cavitación, en turbinas helicoidales tipo Gorlov de álabes simétricos tipo NACA0015. Con la modelación y simulación de THG se determinaron fenómenos de cavitación en condiciones operacionales de flujo y rotación de la turbina. El estudio fundamentado en la CFD establece un dominio computacional bidimensional (2D) para un diseño particular de una turbina, en el que, apoyado en programa de simulación, se construyen curvas características de la turbina modelada. Determinado el punto de funcionamiento o máximo rendimiento de la THG, también se analizaron condiciones de cavitación para esa condición operacional. La investigación se apoya en técnicas de *sliding mesh*, bajo condiciones de régimen transitorio. Una vez construido y validado el modelo matemático de las ecuaciones de gobierno del flujo y régimen de turbulencia, se examinó el coeficiente de presión sobre el rotor de la turbina y el criterio de cavitación. Con este último, se estableció la existencia o no de condiciones de cavitación para el punto de funcionamiento de la turbina. Las revisiones investigaciones detallan su enfoque en la relación cavitación y su efecto en aspectos vibracionales y de fatiga sobre la estructura de las turbinas, sin abordar las implicaciones de la velocidad de flujo y de rotación (Tabla 1).

Tabla 1. Sumario de estudios de turbinas helicoidales Gorlov.

Metodología	Sobre método numérico/programa	Parámetro estudiado	Objetivo del estudio	Referencia
Numérico	Modelo de turbulencia <i>Standard k-ε</i> . ANSYS FLUENT	Perfil del álabes, relación de solidez. NACA 0020. Velocidad de flujo y de rotación. Dominios 3D	Mejora de rendimiento	Marturet (2019)
Estado del arte	Análisis de métodos numéricos en investigaciones	Marcos conceptuales.	Revisión de diferentes métodos numéricos	Pineda-Ortiz Chica-Arrieta (2020)
Numérico	Modelo de doble disco y múltiples tubos de corriente, MATLAB, modelo de turbulencia $k-\omega$, ANSYS FLUENT, ANSYS ICEM	Coefficiente de potencia, relación de solidez	Curvas características	Acevedo <i>et al.</i> (2018)
Numérico	Modelo de turbulencia <i>Standard k-ε</i> , estudio de convergencia, independencia del mallado, ANSYS GAMBIT, ANSYS FLUENT	Velocidad de flujo y de rotación. NACA 0020, relación de solidez. Dominios 2D	Curvas características	Marturet (2012)
Experimental		Relación de solidez, ángulo de paso helicoidal	Curva características.	Shiono <i>et al.</i> (2002)
Numérico	Modelo GGS, modelo de flujo de Kirchhoff	Límite de Betz, ángulos de paso	Rendimientos.	Gorban <i>et al.</i> (2000)
Experimental/numérico	Modelo del elemento del álabes, FORTRAN, PIV, CACTUS	NACA 0018, 3 y 4 álabes, relación de solidez, ángulo de paso, longitud de cuerda, punto de montaje	Factibilidad de micro turbina	Niblick (2012)
Experimental/numérico	Modelo de turbulencia $k-\omega$ SST, ANSYS FLUENT, Túnel de viento	Potencia, relación de aspecto	Análisis de flujo y estelas de flujo	Molina <i>et al.</i> (2018)
Numérico	Modelo de turbulencia SST $k-\omega$, FLUENT	TSS y NTS	Efecto de TSS y NTS en curvas de potencia	Satrio <i>et al.</i> (2018)
Numérico	Modelo de turbulencia <i>Standard k-ε</i> , modelo de turbulencia RNG y modelo de turbulencia <i>Realizable k-ε</i>	NACA 0022	Configuración de casos de estudio en CFD de turbinas y determinación de rendimientos	Durrani <i>et al.</i> (2011)
Numérico	Modelo <i>Transition SST</i> , ANSYS FLUENT	Coefficientes de sustentación y arrastre. Compara dos rotores de turbinas	Estrategias de estudios en 2D de turbinas bajo CFD	Lanzafame <i>et al.</i> (2014)
Experimental		Coefficientes de sustentación y arrastre, cavitación, PIV, perfiles de álabes, presiones, túnel de cavitación	Compara perfiles de álabes en cavitación	Nedyalkov y Wosnik (2013)
Numérico	Teoría BEM, ANSYS CFX	Velocidad, diámetro, longitud de cuerda de álabes, coeficiente de potencia	Mejora de rendimientos considerando cavitación	Silva <i>et al.</i> (2015)
Experimental/numérico	Teoría BEM, AeroDyn	Túnel de cavitación, relación de solidez, coeficiente de potencia	Predicción de la cavitación	Murray (2017)
Estado del arte	Análisis de métodos numéricos en investigaciones	Análisis conceptual y comparativo de aspectos CFD en turbinas	Revisión de tecnologías, rendimientos y configuraciones	Saini y Saini (2019)

ANSYS FLUENT: programa para análisis de fluidos, MATLAB: programa para simulaciones y cálculos en Ingeniería, ANSYS ICEM: programa de construcción de mallas para simulaciones de ingeniería, ANSYS GAMBIT: programa de construcción de mallas para simulaciones de ingeniería, BEM: *blade element momentum*, modelo GCS: modelo para flujo curvilíneo, FORTRAN: programa para cálculos en ingeniería, PIV: velocímetro de imágenes de partículas, CACTUS: programa para análisis de fluidos, SST: *Shear-stress transport*, RNG: *renormalization-group*, ANSYS CFX: programa para análisis de fluidos, AeroDyn: programa para análisis de flujo sobre álabes, NACA: *National Advisory Committee Aeronautics*, TSS: *time step size*, NTS: *number of time step*, 2D: espacio bidimensional, 3D: espacio tridimensional, Xfoil: programa para la construcción de perfiles de álabes.

Materiales y Métodos

Parámetros del diseño de turbinas helicoidales tipo Gorlov

En turbinas hidrocínéticas se tiene una serie de parámetros de diseño, energía y rendimiento adimensionales, que caracterizan sus potencialidades y dimensiones geométricas. Seguidamente se indican un conjunto de ecuaciones para el análisis de THG tal y como se presentan en el trabajo de Marturet (2019):

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \rho A_t u_o^3 \quad (1)$$

Donde: $P_{m\acute{a}x}$ es la potencia máxima disponible en el fluido, A_t el área de sección transversal al flujo a través del rotor de la turbina ($D \cdot H$) según la Figura 2, y u_o la velocidad del flujo en la corriente libre.

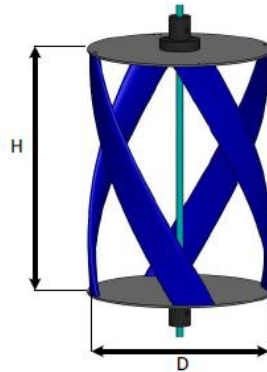


Figura 2. Parámetros dimensionales para el área de sección transversal (A_t) de la turbina helicoidal tipo Gorlov. H: altura D: diámetro.

La relación de velocidad, λ , representa la velocidad de rotación del álabes de la turbina respecto a la velocidad del flujo en la corriente libre, u_o . Es común también referirse a esta velocidad como velocidad en la punta del álabes:

$$\lambda = \frac{\omega R}{u_o} \quad (2)$$

Donde: R es el radio de la turbina y ω su velocidad de rotación. El coeficiente de potencia, C_{pot} , o rendimiento, definido en la Ecuación 3, determina la potencia mecánica de la turbina respecto al potencial cinético incidente sobre un área de sección transversal del mismo tamaño que la turbina:

$$C_{pot} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2} \rho u_o^3 A_t} \quad (3)$$

Donde: T es el torque de rotación de la turbina, ρ la densidad del agua y A_t término definido en la Ecuación 1.

La relación de solidez, σ , expresa la proporción de los álabes de la turbina respecto a la circunferencia total de la misma, según la Ecuación 4:

$$\sigma = \frac{BC}{\pi D} \quad (4)$$

Donde: B es el número de álabes y C la longitud de la cuerda del álabes.

El ángulo de paso helicoidal, δ , se refiere a la inclinación del álabes respecto a un plano horizontal, y está definido por la Ecuación 5:

$$\tan^{-1} \delta = \frac{BH}{\pi D} \quad (5)$$

En la Figura 3 se muestra el ángulo de paso helicoidal y en la Tabla 2 los parámetros dimensionales de la turbina a modelar en esta investigación.



Figura 3. Ángulo de paso helicoidal δ en la turbina helicoidal tipo Gorlov

Tabla 2. Geometría del diseño de la turbina helicoidal tipo Gorlov de estudio.

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

Las desarrollos de Shinomiya *et al.* (2015) y Silva *et al.* (2017) presentan una metodología fundamentada en el coeficiente de presión mínima, como criterio para establecer el límite de cavitación alrededor de álabes de turbinas hidrocínéticas. Es clásica la designación del número de cavitación, Nc , en términos de la Ecuación 6:

$$Nc = \frac{p_{atm} + \rho gh - p_v}{\frac{1}{2} \rho W^2} \quad (6)$$

Donde: p_{atm} es la presión atmosférica, h es la distancia de la turbina a la superficie libre del agua, g es la aceleración gravitacional, p_v es la presión de vapor y W la velocidad relativa del álabe. El número Nc es también conocido factor de cavitación o número de cavitación de Thoma.

Kumar y Saini (2010) plantean Nc en términos no de presión sino de alturas piezométricas en turbinas hidráulicas. La investigación muestra la afectación de la eficiencia (rendimiento), conforme crece el factor de cavitación de Thoma. La cavitación ocurre cuando el mínimo coeficiente de presión local, Cp , es menor que Nc . Así, Cp , viene dado por:

$$Cp = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho W^2} \quad (7)$$

Donde: p es la presión local en el perfil del álabe, p_0 es la presión de referencia aguas arriba del rotor y viene dada por el término: $p_{atm} + \rho gh$. De tal manera que, el coeficiente de presión puede emplearse como criterio de cavitación, si:

$$Nc + Cp_{min} \geq 0 \quad (8)$$

En el desarrollo de Islam *et al.* (2008) se hace una amplia discusión de fuerzas y velocidades sobre perfiles de álabes, y su incidencia en el rendimiento de turbinas. Componentes vectoriales de fuerzas-velocidades cambian de dirección, sentido y magnitud, conforme el álabe rota en la turbina. También Molland *et al.* (2004) proyectaron investigaciones experimentales y de modelización de cavitación sobre diferentes tipos de álabes para turbinas marinas, valorando sus coeficientes de sustentación, arrastre y presión sin la consideración de la rotación de los álabes y comparando coeficientes de sustentación contra el número Nc como criterio para el análisis.

Dada la dificultad de determinar la velocidad relativa, W , del perfil del alabe, en lo particular cuando adicional al flujo del fluido sobre el álabe éste también rota, Shinomiya *et al.* (2015) y Silva *et al.* (2017) establecen la velocidad de cavitación, V_{cav} , como criterio para posteriormente estimar W , tal como sigue en la Ecuación 9:

$$V_{cav} = \sqrt{\frac{p_{atm} + \rho gh - p_v}{-\frac{1}{2}\rho C p_{min}}} \quad (9)$$

De igual manera, se acompaña V_{cav} con la expresión para W , según la Ecuación 10:

$$W = (1 - f_s) V_{cav} \quad (10)$$

Donde: f_s es un factor de seguridad según: $0 \leq f_s \leq 1$, de tal forma que $W \geq V_{cav}$; de acuerdo con Silva *et al.* (2017). Para esta investigación, se tomó el valor f_s de 5 %.

Sobre las velocidades del flujo para el análisis de cavitación, Bianchini *et al.* (2015) indican estudios en CFD y ecuaciones de Navier-Stokes U-RANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*), con velocidades de 1,23 y 2,5 m/seg para dominios computacionales en rotación.

Modelo matemático y numérico

Para el estudio de turbomaquinarias se han consolidado importantes avances, como las herramientas en CFD, en especial cuando la experimentación con modelos físicos se hace costosa. Modelos de turbulencia, estudio de fenómenos de capa límite, discretización en modelos matemáticos, soluciones numéricas, estudios de convergencia y estudio del error en soluciones computacionales aplicados todos a la mecánica de fluidos, han sido desarrollados por Wilcox (1993), Pope (2000), Durbin y Medic (2007) y Ferziger y Perić (2002). Al mismo tiempo, Hirsch (2007) propuso un prototipo virtual como elemento metodológico para el desarrollo de estudios en CFD, y en lo particular para el flujo sobre álabes, tal y como se plantea en esta investigación. En la Figura 4 se presenta un proceso de modelación y simulación para el estudio de la cavitación en THG.

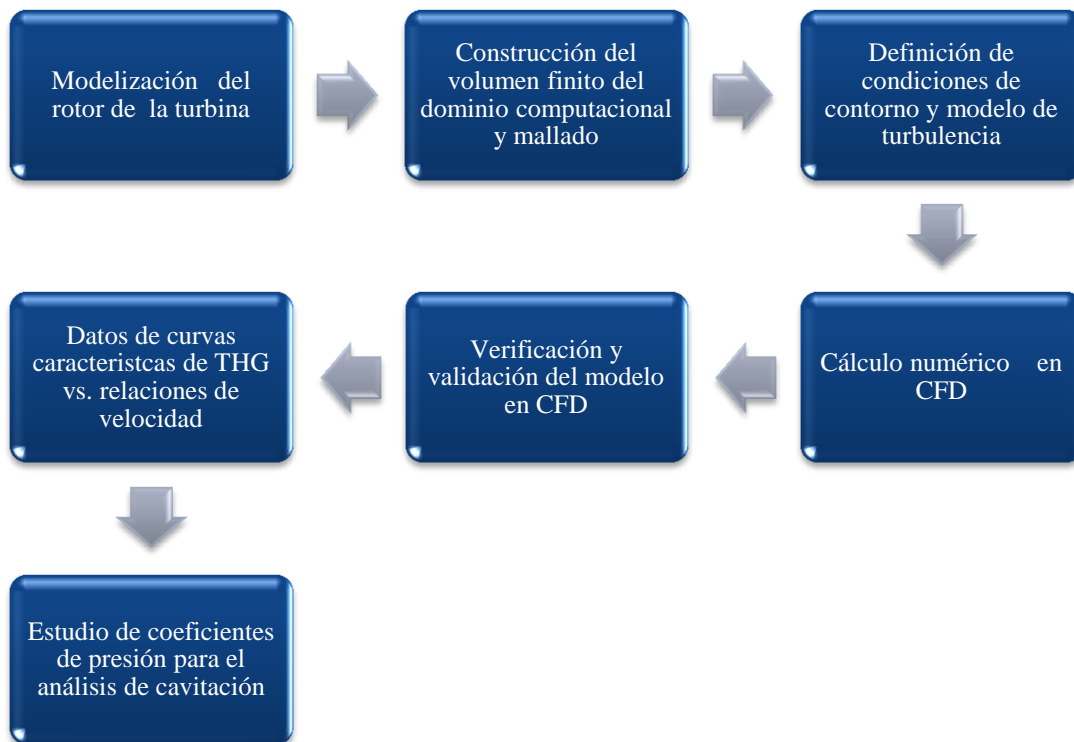


Figura 4. Modelación y simulación para el estudio de la cavitación en turbinas helicoidales tipo Gorlov (THG). CFD: dinámica de fluidos computacionales.

Las especificaciones técnicas del computador para la simulación en 2D y análisis en CFD fueron: i5-4670K 3,4 GHz, 32 Gb RAM. El dominio computacional en 2D de la turbina junto a la configuración de condiciones de borde y de paredes del dominio se presenta en la Figura 5, distinguiéndose la parte estacionaria y la de rotación en el rotor de la THG, acorde con técnicas CFD *sliding mesh* (ANSYS, 2009). También se observa en la Figura 5 la configuración de paredes del dominio *velocity inlet*, *pressure outlet* y *symmetry* siendo estas designaciones propias de modelaciones en CFD (ANSYS, 2009).

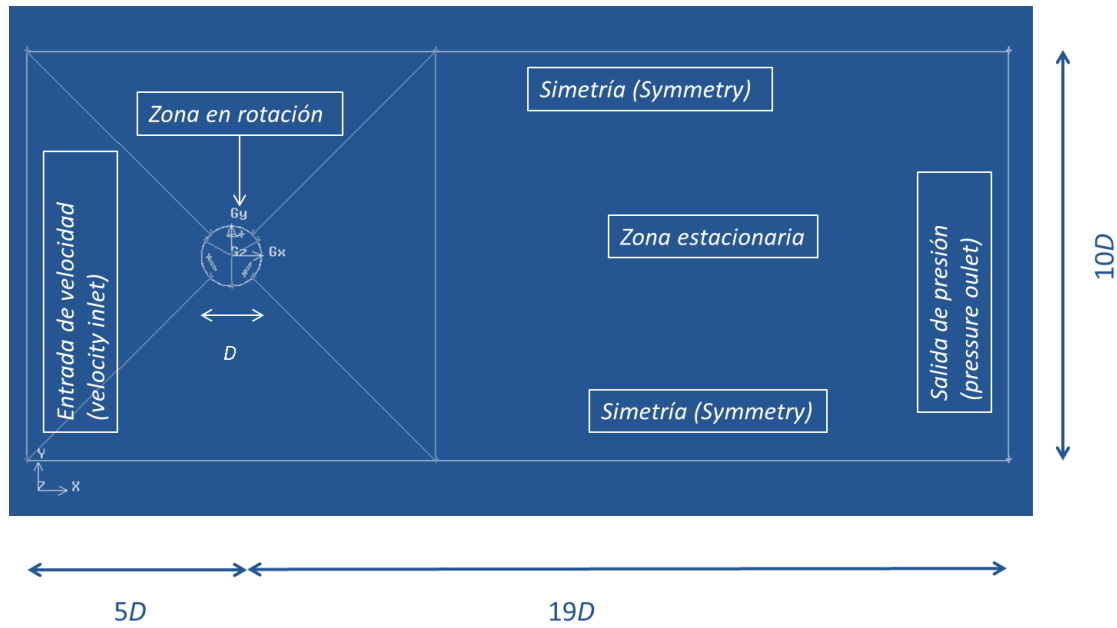


Figura 5. Dominio computacional con base en el diámetro d de la turbina helicoidal tipo Gorlov y configuración de condiciones de borde del dominio.

El dominio computacional fue de $24 D \times 10 D$ (Figura 5) para D en 300 mm, el cual se constituye en un modelo de volumen finito (Ferziger y Perić, 2002), tal y como se muestra en la Figura 6. Sobre la pertinencia del dominio computacional de la Figura 5 y soportes para determinación, puede consultarse a Marturet (2012). En la Tabla 3 se presentan los parámetros del fluido para la consideración de la cavitación en la THG.

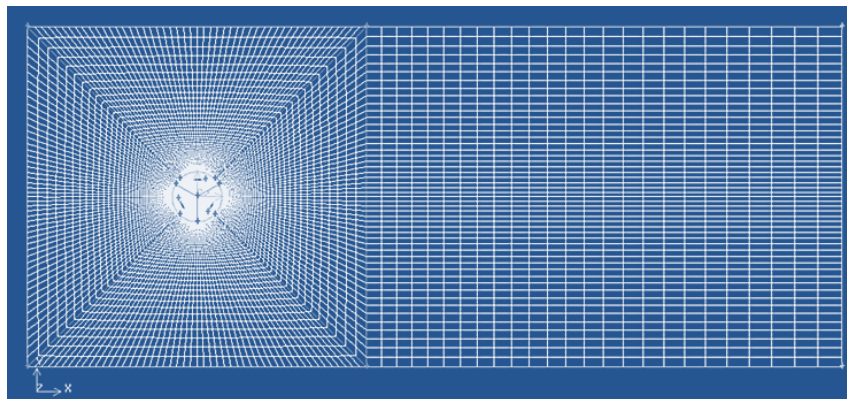


Figura 6. Mallado del dominio computacional $24 D \times 10 D$ de la turbina helicoidal tipo Gorlov.

Tabla 3. Parámetros del fluido sobre la turbina helicoidal tipo Gorlov.

Designación	Valor
Agua para densidad, ρ	998,2 kg/m ³
Altura de inmersión, h	1,5 m
Viscosidad dinámica, μ	0,001003 kg/m-seg
Presión atmosférica, p_{atm}	1x10 ⁵ Pa
Presión de vapor, p_v	3,17x10 ³ Pa
Aceleración gravitacional, g	9,81 m/seg ²
Factor de seguridad, f_s	5 %

Para el mallado del dominio se emplearon mallas de tipo estructuradas con celdas de tipo cuadriláteros en la zona de estacionaria y en la zona del rotor de THG se empleó celdas del tipo triangular. Se aplicaron técnicas de mallado del dominio computacional mediante el uso del programa GAMBIT (GAMBIT 2.4., 2004) y se construyeron mallas híbridas de unos 65000 nodos. Más detalles sobre densificación del mallado del dominio, pueden observarse en la siguiente sección. La determinación de la calidad de la malla del dominio, se hizo con fundamento en la Ecuación 11, cuyo valor fue proporcionado por el programa de mallado (GAMBIT 2.4., 2004).

$$Q_{EVS} = \frac{(S_{eq} - S)}{S_{eq}} \quad (11)$$

Donde: S es el área del elemento de malla, S_{eq} es el área máxima de la celda equilátera que circunscribe el radio idéntico al elemento de malla. De tal manera que $0 \leq Q_{EVS} \leq 1$. Si $Q_{EVS} = 0$ describe un elemento equilátero ideal y $Q_{EVS} = 1$ describe un elemento deformado completamente. Valores de Q_{EVS} entre 0,25 y 0,85 son de calidad aceptable (GAMBIT 2.4., 2004).

De igual manera, valoraciones sobre el mallado del dominio en sus álabes, se expresaron en términos de la distancia adimensional a la pared, Y^+ , cuyo valor está dado por la Ecuación 12:

$$Y^+ = \frac{\sqrt{\tau_{\omega}}}{\nu} Y \quad (12)$$

Donde: τ_{ω} , ρ , ν e Y son el esfuerzo de corte en la pared del álabe, la densidad del fluido, viscosidad cinemática del fluido y la distancia al centro de la primera celda normal a la pared respectivamente.

El valor de Y^+ expresa la precisión en el grado de acercamiento de la cuantificación de fenómenos inherentes a la capa límite turbulenta y su desarrollo en presencia de esfuerzos turbulentos (Durbin y Medic, 2007). De igual manera, expresa el grado de densificación de la malla de volumen finito en las proximidades de las paredes del dominio para la precisión de resultados en CFD y consecuentemente se relaciona con los tiempos de simulación computacional empleados. En Blazek (2015) puede encontrarse un análisis sobre condiciones de borde del dominio, configuraciones de paredes (*wall*) y tratamiento numérico sobre las mismas, y que se aplican en esta investigación.

Para el cálculo numérico en el análisis fluidodinámico de la THG el programa FLUENT de ANSYS (ANSYS, 2011) resuelve las ecuaciones de gobierno del flujo, usando la discretización del dominio de volúmenes finitos (Figura 6), según el desarrollo en la Figura 4. Como modelo de turbulencia se empleó el *SST k- ω* (Wilcox, 1993), teniendo por fundamento las investigaciones de Satrio *et al.* (2018) y Chettiar *et al.* (2015). Las simulaciones de ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y los escalares de turbulencia y transporte se resolvieron usando el método PISO (ANSYS, 2009).

Los términos convectivos de la discretización espacial energía cinética turbulenta y razón de disipación turbulenta, cantidad de movimiento, se determinan usando un esquema de segundo orden aguas arriba. La ecuación de presión se configura en la modalidad *standard*. Para la zona de entrada de flujo al dominio computacional (*velocity inlet*), se fija la velocidad de entrada de manera uniforme, mientras que en la de salida (*pressure outlet*) se fija la presión. Los álabes rotan sobre su eje central a las revoluciones del estudio, y el torque a determinar se hace en las coordenadas 0,0 de la zona de rotación del dominio (Figura 5), correspondiente al centro de la THG.

La modelación numérica con aplicación del programa FLUENT de ANSYS (ANSYS, 2011), se hizo suponiendo un régimen de trabajo transitorio en la turbina, cuando el fluido se modelaba en 2D con aplicación de técnicas *sliding mesh*. Las ecuaciones de continuidad (Ecuación 13) y cantidad de movimiento (Ecuación 14), bajo forma de U-RANS, junto a las de turbulencia en su forma *SST k- ω* (Ecuaciones 15 y 16), se presentan teniendo por fundamento los aspectos señalados por Wilcox (1993) y ANSYS (2009), según:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial(-\overline{\rho u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \widetilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (16)$$

Resultados y Discusión

Con soporte en el programa FLUENT de ANSYS 14.0, se hicieron las simulaciones con el modelo de volúmenes finitos del dominio computacional (Figuras 5 y 6), no sin antes elaborar las mallas con el programa GAMBIT. El mallado de paredes del dominio indicó valores de $Y^+ > 19$, con lo cual no se hizo necesario incluir la corrección para bajos números de Reynolds en el modelo de turbulencia, según ANSYS (2009) y ANSYS (2011), en los que se incluyen consideraciones sobre el manejo de Y^+ , configuración de paredes y condiciones de borde en modelos de turbulencia SST k- ω .

A fines de lograr la convergencia, estabilidad y exactitud durante las simulaciones del modelo numérico, se elaboró un análisis de sensibilidad o independencia del mallado. En la Figura 7 se presenta parte del análisis de sensibilidad, en el que se muestran las perturbaciones en el campo de flujo en el dominio. Nótese la estabilidad del campo de velocidades y de presión aguas abajo de la turbina, por consiguiente, el mallado y con él la solución numérica, se hacen independientes de la distancia D .

Sobre la base del estudio de Oberkampf y Trucano (2002), se incluye en la Figura 8, información que complementa el análisis de sensibilidad del mallado. Para esta investigación se siguió la metodología planteada por dichos autores, en el uso de errores relativos para realizar estudios de sensibilidad del mallado, que conforman la verificación del modelo matemático de las Ecuaciones 13, 14, 15 y 16. Se observa la tendencia a la estabilidad del valor del torque de la THG, frente a incrementos del número de nodos del dominio (Figura 8). Los errores relativos del torque frente a la densificación del dominio, oscilan entre 8 y 4 % para dominios de más de 71.000 nodos y que en adelante se tomaron para este desarrollo.

En atención a la Figura 4, se desarrolló la validación del modelo matemático y numérico (Figura 8b), para lo cual se emplearon los datos experimentales de Chettiar *et al.* (2015). Se encontraron diferencias entre valores experimentales de Chettiar *et al.* (2015) y del análisis en CFD del orden del 2 al 8 %, que a los fines de esta investigación, se consideran conformes. Como soporte a esta investigación, se indica seguidamente la Ecuación 17:

$$Error\ relativo = \frac{Torque_{CFD} - Torque_{exp}}{Torque_{exp}} \times 100 \% \quad (17)$$

Finalmente, el dominio computacional presentado en la Figura 6, se constituyó de unos 73.000 nodos, cuando la malla fue de calidad 0,580953. De igual manera, en el desarrollo de Riglin *et al.* (2016), su análisis de convergencia, empleó como método de comparación el error relativo del mallado para diferentes dominios computacionales, considerando valores de potencia de turbinas, y consecuentemente seleccionaron los dominios con valores menores al 9% de error relativo para su estudio en CFD. Más detalles sobre el estudio de independencia del mallado, modelos de turbulencia, modelos de pared y validación de datos CFD que soportan esta investigación, pueden revisarse en los estudios de Marturet (2019) y Chettiar *et al.* (2015).

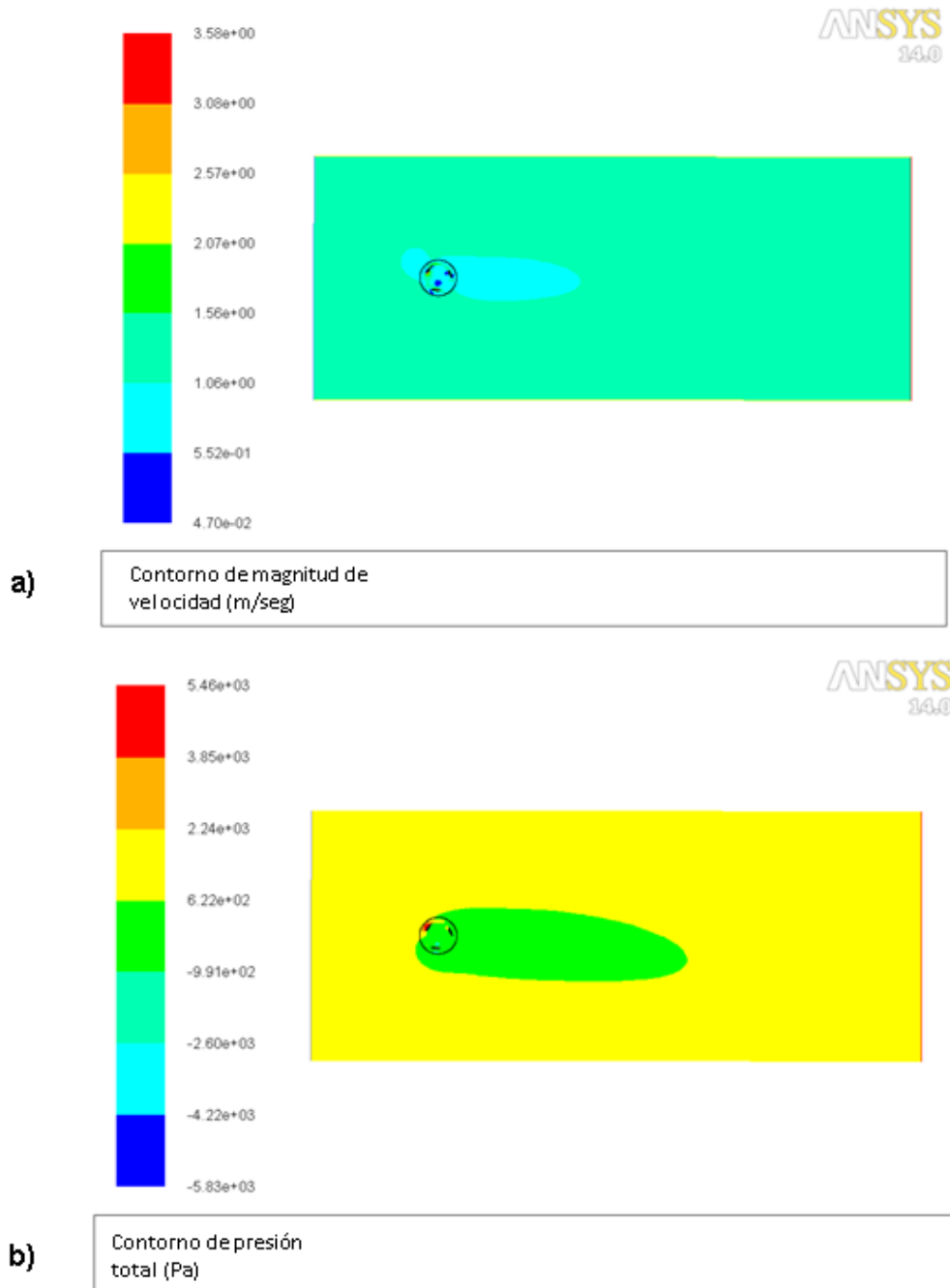


Figura 7. Campos de flujo de la turbina helicoidal tipo Gorlov. a) Velocidad, b) Presión.

En la Figura 9 se presentan las curvas características de la THG. Obsérvese el valor de C_{pot} de 0,4 como máximo rendimiento alcanzado para condiciones de flujo de 1,2; 3 y 5 m/seg y velocidades angulares de 71, 77 y 100 rpm. El punto corresponde al punto de funcionamiento o de máxima eficiencia operacional de flujo 1,2 m/seg sobre la turbina cuando gira a 77,63 rpm.

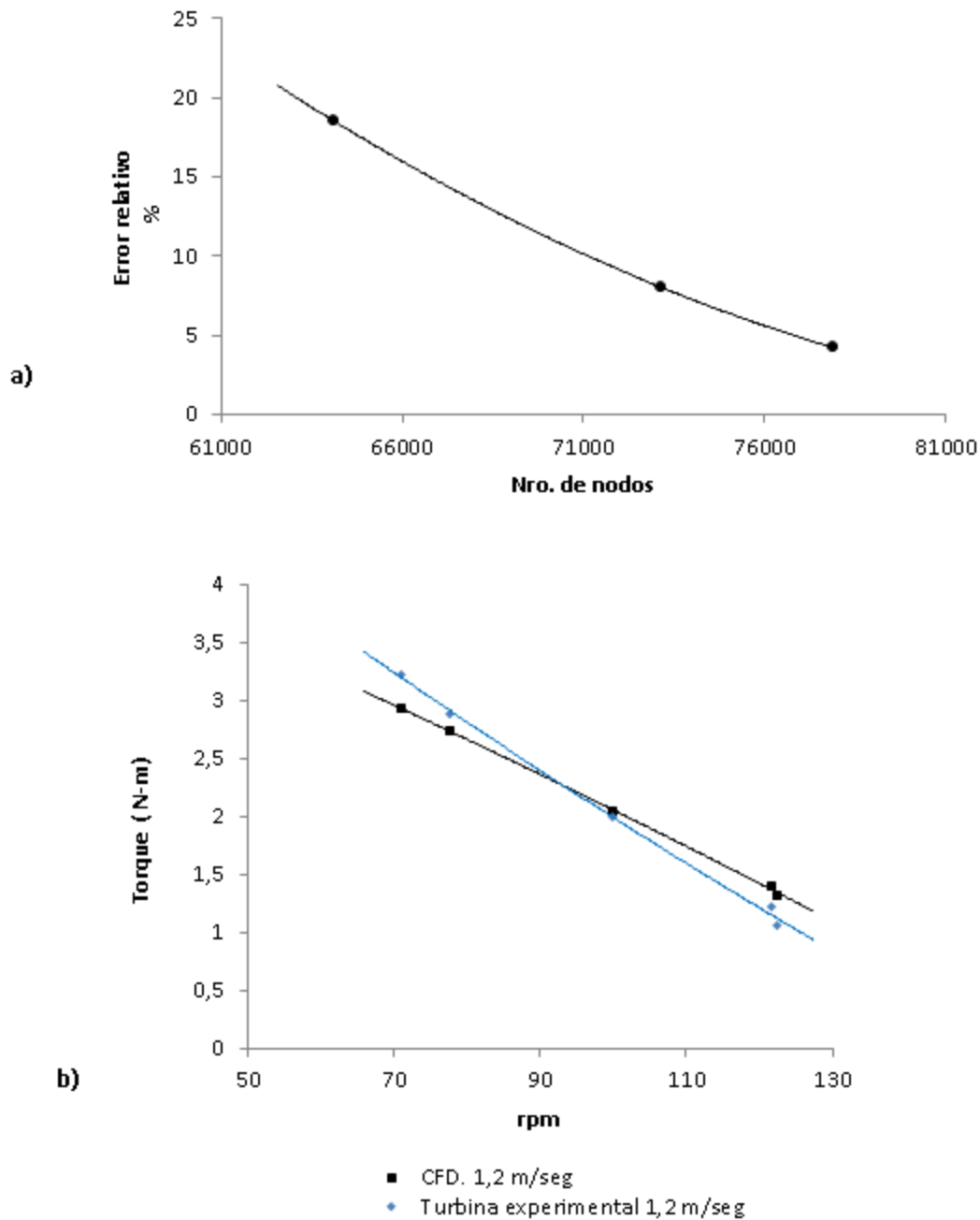


Figura 8. Sensibilidad del mallado y validación del modelo matemático numérico. a) Error relativo en la densificación del dominio de la THG, b) Validación en dinámica de fluidos computacionales (CFD). La turbina experimental corresponde a los datos de Chettiar *et al.* (2015).

En la Figura 10 se muestran detalles de velocidad y presión en la zona del rotor de la THG. Con aplicación del programa FLUENT de ANSYS 14.0, se determinó el coeficiente de presión sobre los álabes del rotor de la THG.

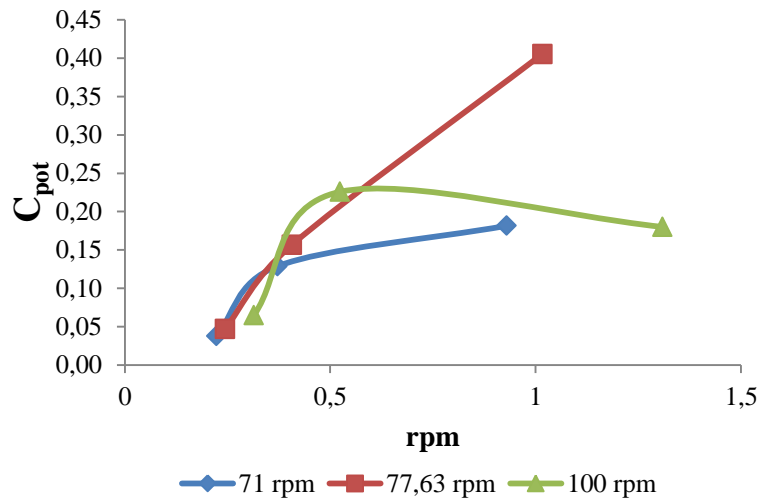


Figura 9. Curvas características de la turbina helicoidal tipo Gorlov. C_{pot} : coeficiente de potencia.

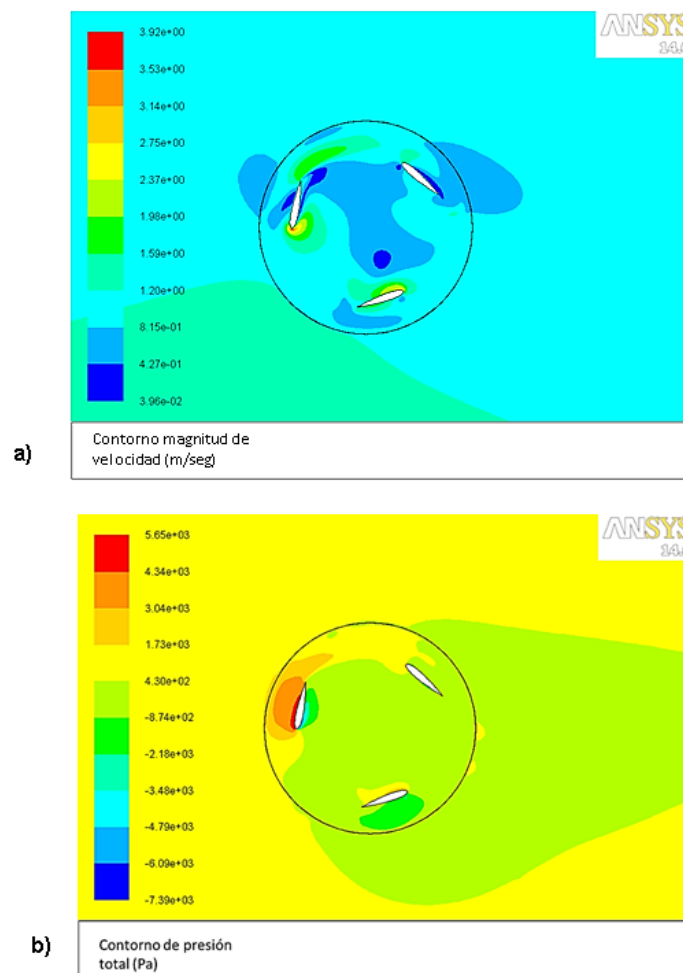


Figura 10. Detalle del flujo en rotor de la turbina helicoidal tipo Gorlov. a) Contorno de magnitud de velocidad, b) Contorno de presión.

El coeficiente de presión para el punto de funcionamiento de la THG, se incluye en la Figura 11. Nótese que el valor de coeficiente de presión es $-2,07 \times 10^4$. Efectuando los cálculos para V_{cav} , W y Nc , con fundamento en $Cp_{mín}$ y la Ecuación 8, se obtuvieron zonas de flujo sobre la THG con presencia de fenómenos de cavitación. Al respecto, en la Figura 11b puede observarse el frente del álabe en rotación, con un coeficiente de presión de $-2,07 \times 10^4$, donde ocurre el fenómeno de cavitación. Nótese que zonas de baja presión ocurren en el borde de ataque de los álabes de la THG (Figura 11).

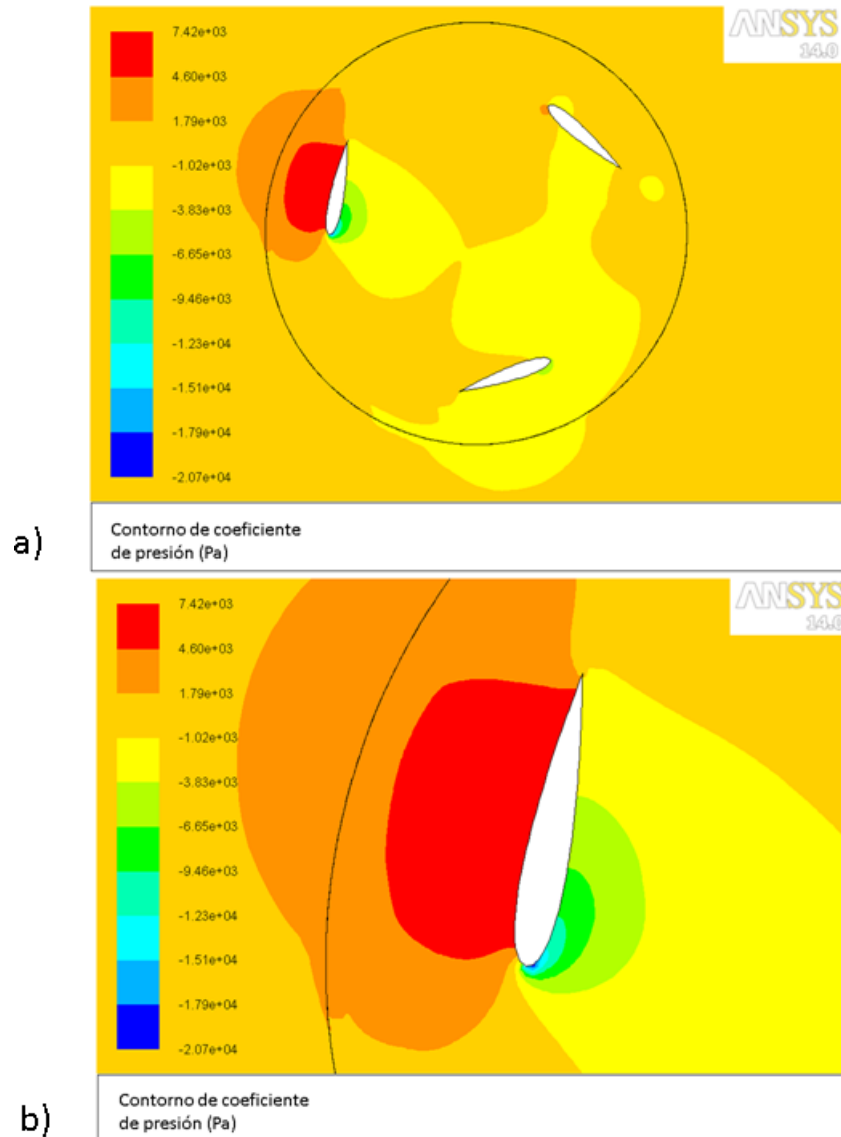


Figura 11. Coeficientes de presión en el rotor de la turbina helicoidal tipo Gorlov. a) En rotor, b) Sobre su álabe NACA 0015.

Conclusiones

Esta investigación ha permitido analizar una estrategia para la determinación de condiciones de cavitación en turbinas helicoidales tipo Gorlov. A partir de un dominio computacional bidimensional, que contiene una turbina helicoidal tipo Gorlov de 300 mm de diámetro y 600 mm de alto con tres álabes tipo NACA 0015, se han construido curvas características de la turbina. El desarrollo de un modelo matemático y numérico de ecuaciones U-RANS, en conjunto con un modelo de turbulencia *SST k- ω* configurado en régimen transitorio, permitió obtener coeficientes de presión en un rango operacional. El punto de funcionamiento de 1,2 m/seg y 77,63 rpm se correspondió con el

máximo rendimiento de 0,4. Apoyado en técnicas computacionales de la CFD para la turbina, se logró establecer su coeficiente de presión del orden de $-2,07 \times 10^4$, que resulta menor que el número de Thoma o número de cavitación. En consecuencia, sobre la turbina se tienen zonas con presencia de cavitación para el régimen operacional estudiado de máxima eficiencia, para un flujo de 1,2 m/seg sobre la turbina cuando gira a 77,63 rpm. En tal sentido, estudios posteriores deben realizarse a fin de establecer regímenes de operación que permitan la ausencia o minimización del fenómeno de cavitación en la turbina.

A futuro, se plantea la necesidad de estudiar cambios en el perfil del álabe para mejorar su rendimiento frente a los fenómenos de cavitación encontrados. La estrategia aquí planteada permitirá determinar la presencia de fenómenos de cavitación y efectuar las correcciones a que dé lugar, en la búsqueda de mejores rendimientos.

Referencias Bibliográficas

- Acevedo P. C., Villamizar, Y., Rolon H. A. (2018). Generalidades y aporte al estudio de las turbinas tipo Darrieus. *Respuestas*, 23(S1), 14-18.
- ANSYS, I. (2009). *ANSYS FLUENT 12.0. Theory guide*. ANSYS.
- ANSYS, I. (2011). *ANSYS FLUENT 14.0. User's guide*. ANSYS.
- Bianchini, A., Ferrara, G., Ferrari, L. (2015). Design guidelines for H-Darrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield. *Energy Conversion and Management*, 89, 690-707.
- Blazek, J. (2015). *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Kiglington: Elsevier.
- Chettiar, N., S. Narayan, S., Goundar, J. N., Deo, A. (2015). Design of a Gorlov turbine for marine current energy extraction. *Applied Mechanics and Materials*, 772, 556-560.
- da Silva, P. A. S. F., Shinomiya, L. D., de Oliveira, T. F., Vaz, J. R. P., Mesquita, A. L. A., Junior, A. C. P. B. (2015). Design of hydrokinetic turbine blades considering cavitation. *Energy Procedia*, 75, 277-282.
- Durbin, P., Medic, G. (2007). *Fluid dynamics with a computational perspective*. New York: Cambridge University Press.
- 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 2011-541, 541.
- Ferziger, J. H., Perić, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics*. 3rd ed. New York: Springer.
- GAMBIT 2.4. (2004). *User's guide. CFD preprocessor*. Fluent, Incorporated.
- Gorban, A. N., Gorlov, A. M., Silantyev, V. M. (2000). Limits of the turbine efficiency for free fluid flow. *Journal of Energy Resources Technology*, 123(4), 311-317.
- Hirsch, C. (2007). *Numerical computation of internal and external: The fundamental of computational fluid dynamics*. 2nd ed. London: Jhon Wiley & Sons.
- Islam, M., Ting, D., Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1087-1109.
- Kumar, P., Saini, R. P. (2010). Study of cavitation in hydro turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 374-383.
- Lanzafame, R., R., S. 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. (2012). *Simulación fluidodinámica de un modelo de turbina hidrocínética tipo Gorlov*. Tesis de maestría. Puerto Ordaz: UNEXPO.
- Marturet, G. (2019). *Modelación fluidodinámica de turbinas Gorlov para la mejora de su rendimiento*. Tesis doctoral. Puerto Ordaz: UNEXPO.

- Molina, A. C., Massai, T., Balduzzi, F., Bianchini, A., Ferrara, G., De Troyer, T., Bartoli, G. (2018). Combined experimental and numerical study on the near wake of a Darrieus VAWT under turbulent flows. *Journal of Physics*, 1037(7), 072052.
- Molland, A. F., Bahaj, A. S., Chaplin, J. R., Batten, W. M. J. (2004). Measurements and predictions of forces, pressures and cavitation on 2-D sections suitable for marine current turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 218(2), 127-138.
- Murray, R. (2017). *Predicting cavitation on marine and hydrokinetic turbine blades with AeroDyn V15. 04*. No. NREL/TP-5000-68398. Golden, CO. United States: National Renewable Energy Lab. (NREL).
- Nedyalkov, I., Wosnik, M. (2013). *Cavitation investigation of hydrofoils for marine hydrokinetic turbines*. Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Nevada: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 1-11.
- Niblick, A. L. (2012). *Experimental and analytical study of helical cross-flow turbines for a tidal micropower generation system*. Master's thesis. Washington: University of Washington.
- 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.
- Pope, S. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge: University Press.
- Riglin, J., Daskiran, C., Jonas, J., Schleicher, W. C., Oztekin, A. (2016). Hydrokinetic turbine array characteristics for river applications and spatially restricted flows. *Renewable Energy*, 97, 274-283.
- 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., K. A. 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.
- Satrio, D., Utama, I., Pria, K. A., y 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.
- Shinomiya, L. D., Vaz, J. R. P., Mesquita, A. L. A., de Oliveira, T. F., Brasil Jr, A. C. P., Silva, P. A. S. F. (2015). An approach for the optimum hydrodynamic design of hydrokinetic turbine blades. *Revista de Engenharia Térmica*, 14(2), 43-46.
- Shiono, M., Suzuki, K., Kiho, S. (2002). *Output characteristics of Darrieus water turbine with helical blades for tidal current generations*. The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu: International Society of Offshore and Polar Engineers, 859-864.
- Silva, P. A. S. F., Shinomiya, L. D., de Oliveira, T. F., Vaz, J. R. P., Mesquita, A. L. A., Junior, A. C. P. B. (2017). Analysis of cavitation for the optimized design of hydrokinetic turbines using BEM. *Applied Energy*, 185, 1281-1291.
- Oberkampf, W. L., Trucano, T. G. (2002). Verification and validation in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 38(3), 209-272.
- Wilcox, D. (1993). *Turbulence modeling for CFD*. La Cañada, California: DCW Industries.