

Influencia de parámetros dimensionales en potenciales energéticos de turbinas hidrocinéticas Gorlov.

Marturet Pérez, Gustavo José, Gutiérrez , Edgar. y Caraballo, Simón.

Cita:

Marturet Pérez, Gustavo José, Gutiérrez , Edgar. y Caraballo, Simón (2017). *Influencia de parámetros dimensionales en potenciales energéticos de turbinas hidrocinéticas Gorlov*. *Novo Tékhne*, 3 (2), 19-31.

Dirección estable: <https://www.aacademica.org/gustavo.j.marturet.p/6>

ARK: <https://n2t.net/ark:/13683/pq4R/gYn>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons.
Para ver una copia de esta licencia, visite
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>.

Acta Académica es un proyecto académico sin fines de lucro enmarcado en la iniciativa de acceso abierto. Acta Académica fue creado para facilitar a investigadores de todo el mundo el compartir su producción académica. Para crear un perfil gratuitamente o acceder a otros trabajos visite: <https://www.aacademica.org>.

Influencia de parámetros dimensionales en potenciales energéticos de turbinas hidrocínéticas Gorlov

Influence of dimensional parameters in energy potentials of hydrokinetic turbine Gorlov

Gustavo J. Marturet P.1., Edgar de J. Gutiérrez A.2, Simón A. Caraballo F.3

1 Ing. MSc. Profesor Agregado del. Instituto Universitario de Tecnología del Estado Bolívar (IUTEB). Telf.: 0285 6340-339, e-mail: marturet@iuteb.edu.ve

2 Ing. MSc., Profesor Agregado. Universidad Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” (UNEXPO), e-mail: egutierrez@unexpo.edu.ve.

3 Ing. MSC., Ph.D. Profesor Agregado. Universidad Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” (UNEXPO), e-mail: scaraballo@unexpo.edu.ve

Recibido: 09/11/2017
Aprobado: 26/12/2017

Resumen

La energía hidráulica de ríos y corrientes marinas puede ser aprovechada mediante turbinas hidrocínéticas. La investigación aquí desarrollada, con aplicaciones del análisis numérico mediante dinámica de fluidos computacionales (CFD), presenta los efectos de los parámetros dimensionales: relación de solidez, diámetro y ángulo de paso helicoidal de una turbina hidrocínética tipo Gorlov en los potenciales energéticos de la turbina. Un estudio de convergencia para su verificación construye un modelo matemático fundamentado en las ecuaciones de continuidad y momentum, cuando el flujo incompresible y asumido como turbulento con apoyo del modelo de turbulencia tipo K- ϵ para el análisis numérico. El modelo construido permite determinar valores de potencia mecánica en el eje de la turbina y de coeficientes de potencia en diferentes velocidades de flujo y de RPM. Se presentan curvas características de la turbina Gorlov.

Palabras Claves: Turbina hidrocínética, CFD, modelo de turbulencia, curvas características.

Abstract

The hydraulic power of rivers and ocean currents can be exploited by hydrokinetic turbines. The research here, with applications in numerical analysis computational fluid dynamics (CFD), presents the effects of dimensional parameters: relation of solidity, diameter and helical pitch of a turbine hydrokinetic type Gorlov turbine energy potentials. A study of convergence for verification built a mathematical model based on equations of continuity and momentum, when flow incompressible and assumed as turbulent with support of turbulence K type model - ϵ for numerical analysis. The constructed model allows to determine values of mechanical power in the axis of the turbine and coefficients of power at different speeds of flow and RPM. The Gorlov turbine characteristic curves are presented.

Key words: Hydrokinetic turbine, CFD, turbulence model, characteristic curves.

1. Introducción

Las turbinas hidrocínéticas permiten el desarrollo de proyectos para energía eléctrica de generación distribuida y aislada con el aprovechamiento de los potenciales hidráulicos de ríos y las corrientes marinas. En lo particular, la turbina hidrocínética Gorlov (**THG**) se ha desarrollado en tecnologías aplicables para la conversión de la energía cinética de fluidos incompresibles en energía mecánica con la que posteriormente se motorizan generadores eléctricos. Estas turbinas helicoidales [1] son atravesadas por corrientes de flujo induciendo su rotación en función de la velocidad del fluido. Al respecto véase Figura 1.

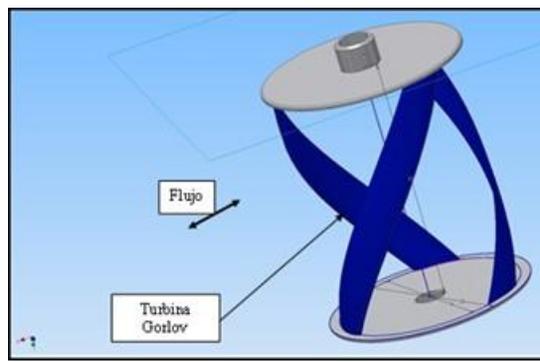


Figura 1: Turbina Gorlov.

Las necesidades de suplir el servicio eléctrico a comunidades aisladas de la red eléctrica nacional han movilizado esfuerzos para la conceptualización y modelización de prototipos de turbinas hidrocínéticas [2]. También mediante herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (**CFD**) se han realizado investigaciones para determinar: potencialidad energética, interacción fluido-estructura a los fines de construir bases cognoscitivas para el desarrollo de estas tecnologías. En ausencia de prototipos de turbinas hidrocínéticas construidas en la región Guayana. Al mismo tiempo se desconoce con fidelidad el comportamiento particular de las **THG** frente a las condiciones variables de servicio que revelen sus actuaciones globales en función de los parámetros operativos y de diseño. En el presente trabajo, apoyado por técnicas del análisis numérico en **CFD**, se construyen curvas características de **THG** para determinar la influencia de parámetros del diseño en las variables torque y coeficiente de potencia que la turbina es capaz de desarrollar. Tales

parámetros a estudiar incluyen: diámetro de turbina, relación de solidez y ángulo de paso helicoidal de **THG**.

2. Fundamentos teóricos

En los estudios para el diseño de turbinas hidrocínicas existe una tendencia en el uso de técnicas de simulación numérica para la predicción del campo de flujo en estas máquinas. Justifican la aplicación de simulación numérica asistida por software al ahorro importante de tiempos de desarrollo de ingeniería sobre las turbinas. En [3] se establecen un conjunto de curvas características de turbinas helicoidales. Sus experimentos determinan el torque y la eficiencia para diferentes configuraciones geométricas de turbinas helicoidales frente a flujos entre 0,6 y 1,4 m/s. Las variables estudiadas incluyen modificaciones en la relación de solidez, longitud de cuerda del álabe, ángulo de paso helicoidal, diámetro y altura de las turbinas. Mantienen constante el número de tres álabes en cada modificación geométrica. Sus resultados indican mayores eficiencias cuando la relación de solidez en la turbina es de 0,4 con ángulos de paso helicoidal de 60°. Aunque se logran mayores torques para ángulos de 43,7°.

[4] estudia tres configuraciones de turbinas helicoidales de álabes tipo NACA 0018. Su investigación indica mayores eficiencias en turbinas helicoidales con cuatro álabes en ángulos de 60° frente a turbinas de tres álabes con 43,7° de ángulo de paso helicoidal cuando en ambos casos la relación de solidez es de 0,3. Mientras que [5] caracterizan en un estudio con **CFD** y de tipo experimental, una turbina helicoidal con relación de solidez 0,3 y ángulo de paso helicoidal de 60° para dos tamaños de longitudes de cuerda de los álabes.

[6] presentan curvas características para la optimización de álabes de turbinas tipo Gorlov empleando técnicas **CFD**. También [7] elaboran un estudio para un diseño conceptual de una planta de potencia fundamentada en energía hidrocínica. Comparan dos turbinas, una de álabes rectos y otra del tipo helicoidal. La modelación indica mayores potenciales energéticos en la de tipo helicoidal. En [8] se comparan capacidades de auto arranque entre turbinas de álabes helicoidales y rectos.

[9] comparan mediciones de coeficientes de potencia, eficiencia y exergía para dos tipos de turbinas helicoidales frente a flujos entre 0,5 y 1,4 m/s. Sus modificaciones sólo mantienen fijo el tipo de álabe, NACA 0020. Sus resultados indican mayores coeficientes de potencias en turbinas helicoidales con relación de solidez de 0,14 y tres álabes con un ángulo de paso de 68,3°.

En [10] se desarrolla una investigación de tipo experimental para **THG** con diámetros de 0,5 y 0,6 m por 1,25 m alto con álabes de perfil tipo NACA 0020. En el estudio se miden valores de torque y velocidad angular en las turbinas y obtienen curvas características de coeficientes de potencia vs. relación de velocidades. Sus resultados muestran la incidencia del ángulo de paso helicoidal en la potencia de la turbina, mientras la relación de solidez afecta la eficiencia. Sus resultados arrojan una mejor eficiencia para una relación de velocidades de 0,134, mientras las turbinas muestran mayores potencias en ángulos de paso helicoidal de 135°. Sus experimentos aplican velocidades de flujo entre 0,6 y 1,6 m/s para velocidades angulares de turbina de hasta 170 RPM.

En las turbinas hidrocínicas se identifican un conjunto de parámetros de diseño, energía y rendimiento o eficiencias que pueden ser adimensionales y caracterizan potencialidades y dimensiones propias. La relación de velocidad λ se indica en la Ecuación (1), y representa la velocidad de rotación de la turbina en el álabe respecto a la velocidad del flujo en la corriente libre u_0 :

$$\lambda = \frac{\omega R}{u_0} \quad (1)$$

donde R es el radio de la turbina y ω la velocidad angular. Así mismo, el coeficiente de potencia C_p o eficiencia se indica en la Ecuación (2):

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

donde T es el torque de rotación de la turbina, A_t su área de sección transversal que viene dada por el producto de altura H de la turbina por su diámetro D según la Figura 2. El mismo pondera la potencia mecánica de la turbina respecto al potencial cinético incidente

sobre un área de sección transversal del mismo tamaño que la turbina. Por otra parte el coeficiente de torque C_T se expresa en términos de la Ecuación (3):

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho u_o^2 R A_t} \quad (3)$$

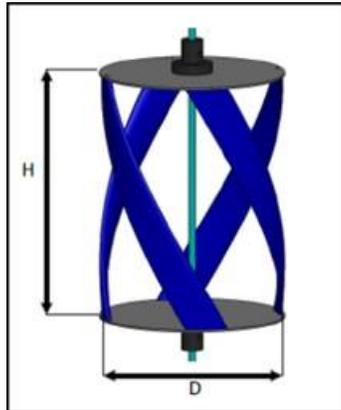


Figura. 2: Aspectos dimensionales de altura H y diámetro D de turbina helicoidal.

La relación de solidez σ expresa la proporción de los álabes de la turbina respecto a la circunferencia total de la misma, tal y como indica la Ecuación (4):

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

donde B es el número de álabes, C la longitud de la cuerda del álabe y D el diámetro de la turbina. El ángulo de paso helicoidal δ definido en la Ecuación (5) se refiere a la inclinación del álabe respecto a un plano horizontal, tal y como indica la Figura 3.

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

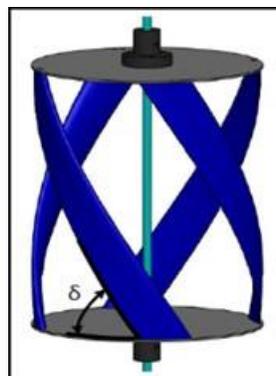


Figura 3: Ángulo de paso helicoidal δ de la turbina helicoidal.

3. Procedimiento Experimental en la Modelación Numérica

El dominio computacional para la **THG** se construye a partir un prototipo de diámetro D de 450 mm y altura H de 600 mm para un perfil de álabe tipo NACA 0020 de 75 mm de cuerda. Se modela una sección de fluido de $6D$ de ancho por $6H$ de alto y $19D$ de largo, con origen de coordenadas en el centro de la base de la turbina. Como fluido de trabajo simula el flujo de agua en condiciones de $998,2 \text{ kg/m}^3$ y una viscosidad de $0,001003 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$. El material de construcción para los álabes es de aluminio de densidad 2719 kg/m^3 . Los resultados de [11] indican prestaciones mecánicas apropiadas para el aluminio en turbinas Gorlov.

La turbina estará inscrita en una malla de volúmenes para un dominio tridimensional. En la modelación del flujo, sobre los álabes helicoidales de la Gorlov, se emplean mallas estructuradas para limitar la excesiva difusión numérica y reducir tiempos de cálculos computacionales. La zona de álabes se discretizará en celdas de elementos tetraédricos e híbridos para construir mallas híbridas de hasta $1,7 * 10^6$ nodos. Las mallas tienen calidades de hasta 0,862174. La cuantificación de la calidad de cada malla Q_{EVS} , se efectúa con base en la Ecuación (6).

$$Q_{EVS} = \frac{(S_{eq} - S)}{S_{eq}} \quad (6)$$

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 $Q_{EVS} = 0$ se describe un elemento equilátero ideal y si $Q_{EVS} = 1$ se describe un elemento completamente deformado [12].

La discretización en la construcción del dominio, a efectos del análisis numérico, se construirá con un mallado de volúmenes finitos empleando un computador con procesador Intel Core 5 (2,5 GHz y 8GB de RAM). El estudio se realiza bajo el enfoque de economía del recurso computacional y la minimización del error en la solución del análisis numérico en esta investigación en **CFD**. Al mismo tiempo, las fronteras del dominio son configuradas a efectos del análisis numérico tal y como se indica en la Figura. 4.

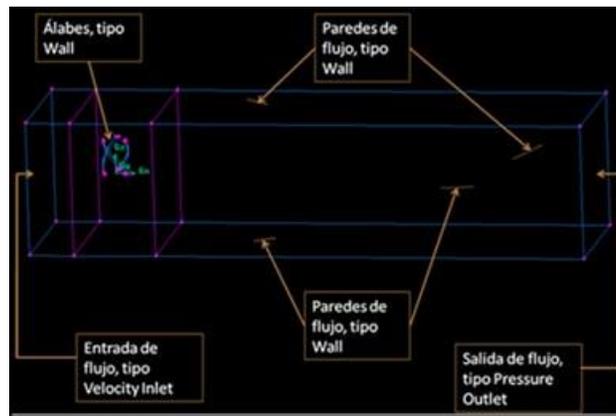


Figura 4: Configuración del dominio computacional de la THG.

Mediante un software de **CFD** se resuelven las ecuaciones que gobiernan el flujo usando la discretización del dominio de volúmenes finitos. Estas ecuaciones de gobierno del flujo: continuidad y momentum se tienen en (7) y (8) respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (8)$$

$$\text{Para: } -\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

donde k es la energía cinética turbulenta, y el término μ_t es la viscosidad de remolino o viscosidad turbulenta y que explica el transporte de cantidad de movimiento mediante remolinos turbulentos, u es un campo de velocidad y ρ es la densidad del fluido.

[13] elabora un estudio sobre modelos de turbulencia para turbinas Gorlov a partir de un proceso de convergencia en la densificación del mallado de dominios computacionales. El estudio determina el modelo de turbulencia *Standard k- ϵ* , el dominio computacional apropiado para el análisis numérico y selecciona un dominio computacional con una malla de volúmenes finitos de $9,2 * 10^5$ nodos para un campo de flujo de dimensiones 3D de ancho por 4D de alto por 19D de largo, una calidad de malla de 0,861517 atendiendo también a la economía del recurso computacional. Supone un régimen estable en la turbina

cuando el fluido se modela en 3D bajo un modelo de turbulencia tipo *Standard k- ϵ* [14] y cuyas ecuaciones vienen dadas por (9) y (10):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (10)$$

donde ϵ es tasa de disipación o disipación turbulenta, G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido a gradientes de velocidad, G_b , la generación de energía cinética turbulenta debida a la flotación, Y_M , representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la rata o proporción de dispersión global. También, los términos $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ y $C_{3\epsilon}$ son constantes, σ_k y σ_ϵ son los números de Prandtl para k y ϵ respectivamente.

Las simulaciones se efectúan a la velocidad de flujo y velocidad angular de estudio de la turbina. A su vez se fijan en todos los ensayos criterios residuales para la convergencia de las ecuaciones involucradas en 10^{-5} en los términos de [14]. Todas las simulaciones de las ecuaciones de continuidad y de momentum, escalares de turbulencia y transporte son resueltas usando el método SIMPLE con modalidad de solución tipo Pressure-Based tal y como señala [14]. Los términos convectivos de energía cinética turbulenta, razón de disipación turbulenta, presión y momentum, se resuelven usando la opción de discretización espacial de segundo orden aguas arriba de la turbina. Adicionalmente, los álabes rotan sobre su eje central a las revoluciones del estudio y el torque a determinar se hará en el origen de coordenadas situado en el centro de la THG.

[15] así como [16] sugieren la necesidad de la verificación del modelo matemático el cual incluye: ecuaciones de continuidad y momentum, modelo de turbulencia, dominio computacional y la configuración de fronteras del mismo. [17] y [18] emplean parámetros de velocidad de flujo y longitud del dominio como elementos para la verificación de la independencia del mallado de volúmenes finitos de la solución discretizada. Las Figuras 5 y 6 muestran el desarrollo del estudio de verificación para el modelo de turbulencia *Standard k- ϵ* .

4. Discusión y Resultados del Análisis Numérico

Para la investigación, en razón del dominio construido durante la verificación del modelo computacional, se modelizarán tres **THG** de diámetros D , para una altura constante de 600 mm y tres ángulos de paso helicoidal δ : 40°, 50° y 60°. En todos los casos estudiados se conserva el perfil del álabe tipo NACA 0020 de 75 mm de cuerda. Al mismo tiempo, se procura una consistencia en los casos de estudio para el número de nodos en la malla de volúmenes del dominio. La Figura 5 muestra curvas características de la turbina en diámetros de 300 mm, 450 mm y 500 mm y valores de σ en 0,238, 0,159 y 0,143. Obsérvese la tendencia al incremento de coeficientes de potencia C_p según la crece relación σ . A partir del valor de de torque T proporcionado por el software de **CFD** y las ecuaciones (1) y (2) se obtiene C_p vs λ . Se presenta el punto de máxima eficiencia cuando C_p es 0,0535, para un flujo de 3 m/s cuando la turbina gira a 200 RPM y posee 300 mm de diámetro. [19] indican similares resultados, el de mayores coeficientes de potencia a menores relaciones de velocidad λ .

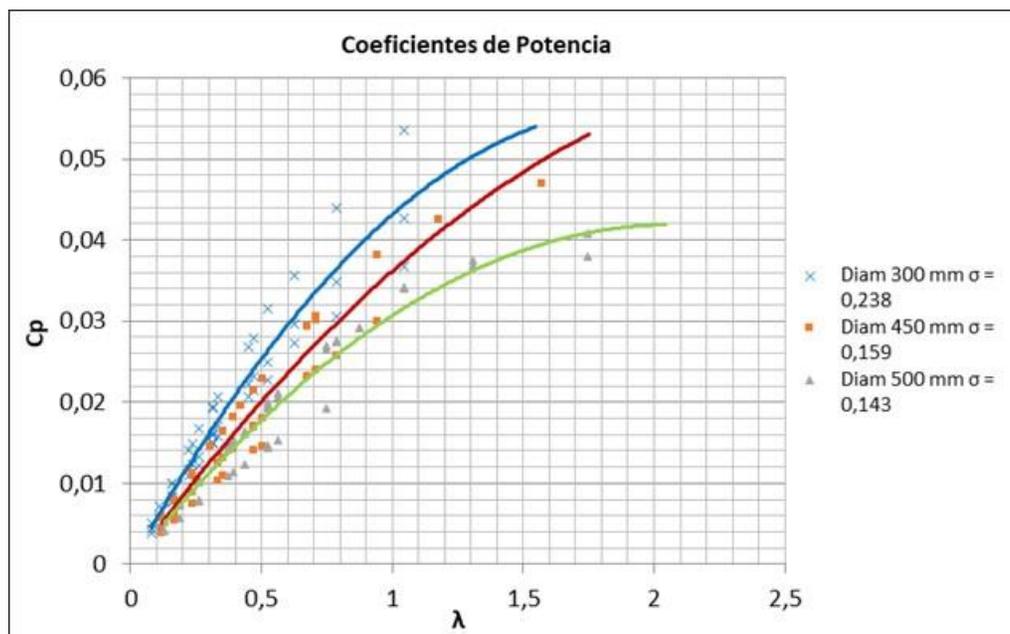


Figura 5: Coeficiente de potencia en diámetros 300, 450 y 500 mm de la THG.

Para la valoración del potencial energético de la turbina Gorlov se toma como referente la potencia ($T\omega$), con lo cual grafican las Figuras 6, 7 y 8.

Las Figura 6 presenta la curva característica de la THG de Potencia vs. RPM. El gráfico muestra el mayor valor de potencia en 823 W para 300 mm de diámetro cuando δ es 60° y σ es 0,238.

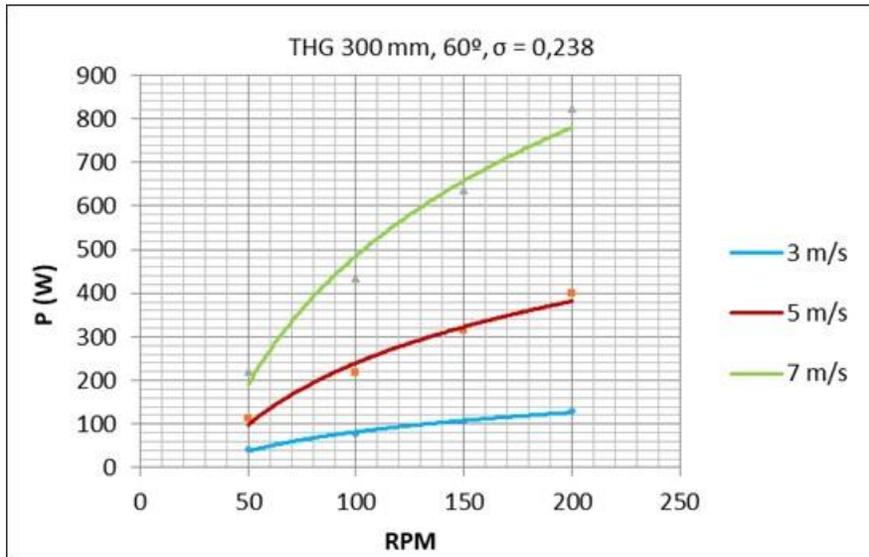


Figura 6: Potencia vs. RPM en 300 mm y δ de 60°

En la Figura 7 se presenta la caracterización de potencia de la THG si su diámetro es de 450 mm y σ es 0,159. Siendo δ de 50° el valor correspondiente al mayor valor de potencia de 1353 W obtenido en esta configuración.

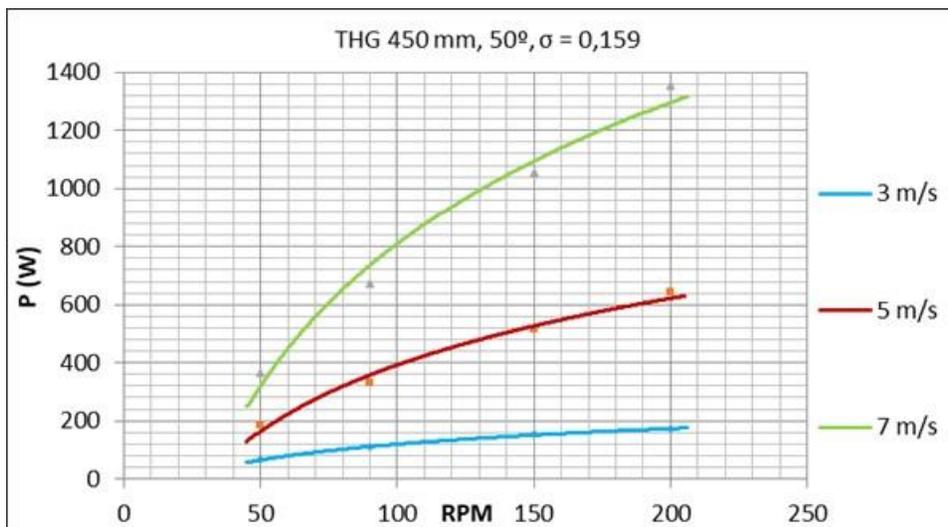


Figura 7: Potencia vs. RPM en 450 mm y δ de 50° .

La Figura 8 se muestra la caracterización de potencia de la THG para diámetros 500 mm y σ es 0,143. Para la cual δ es 50° en la que se obtiene mayor valor de potencia, 1382 W. En cualquiera de los casos de las Figuras 6, 7 y 8 la máxima potencia ocurre a mayores velocidades de flujo.

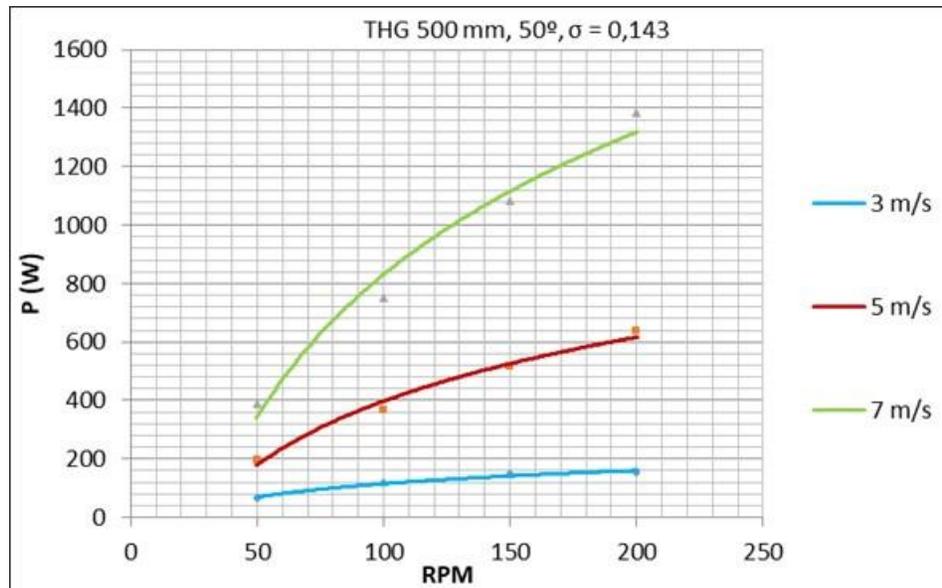


Figura 8: Potencia vs. RPM en 500 mm y δ de 50° .

En sus investigaciones experimentales [10] y [3] determinan los mayores torques de turbina cuando el ángulo δ es de 60° , incluso tal y como acá se presenta alrededor del punto de máxima eficiencia. Al mismo tiempo, la tendencia al incrementar la relación de solidez incide en mayores eficiencias para conversión de la energía cinética en energía mecánica, tal y como se muestra en la Figura 5.

5. Conclusiones y recomendaciones

En este estudio se construyeron curvas características de turbinas Gorlov bajo diferentes regímenes de operación en cuanto a velocidad de flujo y RPM. Los parámetros dimensionales para la construcción de turbinas helicoidales Gorlov: diámetro, relación de solidez y ángulo de paso helicoidal, inciden en potenciales energéticos de las turbinas. Las curvas características del turbina Gorlov modelizadas muestran que el aumento de la relación de solidez denota mejoras en la eficiencia o C_p de las turbinas. Se observó la

incidencia del ángulo de paso helicoidal en la turbulencia de la turbina. Los resultados mostraron que para un ángulo de paso es de 60° las turbinas Gorlov muestran mayores eficiencias de turbinas. Al mismo tiempo, aumento en el diámetro de la turbina de 300 mm a 500 mm revela mayores torques en el eje, sin embargo, disminuye su rendimiento o eficiencia en el proceso de conversión de la energía del fluido como lo indica el coeficiente de potencia de 0,0269. También, se mostró una mayor eficiencia de la turbina cuando su diámetro es de 300 mm de diámetro con un ángulo de paso helicoidal de 60° con lo que se obtiene un coeficiente de potencia de 0,0535. Estudios posteriores pueden efectuarse para bajas velocidades de flujo a fin de valorar la eficiencia de las turbinas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Estudios Energéticos (CEE), UNEXPO, Puerto Ordaz y al Centro de Investigación en Tecnología, Educación y Comunicación (CITEC), IUTEB, Ciudad Bolívar por su contribución en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- [1] Gorlov, A., “Development of the helical reaction hydraulic turbine. Final technical” report, July 1, 1996--June 30, 1998 (No. DOE/EE/15669--T1). Northeastern University Boston.
- [2] Mata, A., “Diseño de una turbina hidrocínética para la realización de pruebas en un canal de ensayos hidráulicos, por el Centro de Investigaciones Aplicadas (CIAP) de EDELCA”, Trabajo de Grado de Ingeniería Mecánica, UNEXPO, Puerto Ordaz, 2009.
- [3] Shiono, M., Suzuki, K., y Kiho, S., “Output characteristics of Darrieus water turbine with helical blades for tidal current generations”, *In Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kitakyushu, May., 2002.
- [4] Niblick, A., “Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System”, M.Sc. Thesis, University of Washington, 2012.
- [5] Polagye, B., Cavagnaro, R., Niblick, A., Hall, T., Thomson, J., y Aliseda, A., “Cross-flow turbine performance and wake characterization”, *In Proceedings of the 1st Marine Energy Technology Symposium*, Washington, DC, 2013.
- [6] Zaidi, M., Uddin, N., Adeel, A. y Ahmed, S., “Numerical Simulations of Hydrokinetic turbine for power generation”, *Proceedings of International Conference on Energy and Sustainability*, NED University of Engineering & Technology, Karachi, April, 2013.

- [7] Tsai, J. S., y Chen, F., 2014, “The conceptual design of a tidal power plant in Taiwan”, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2(2), 506-533, 2014.
- [8] Le, T. Q., Lee, K. S., Park, J. S., y Ko, J. H. , “Flow-driven rotor simulation of vertical axis tidal turbines: A comparison of helical and straight blades”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(2), 257-268, 2014.
- [9] Bachant, P. y Wosnik, M., “Performance measurements of cylindrical-and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency”, *Renewable Energy*, 74, 318-325, 2015.
- [10] Pongduang, S., Kayankannavee, C., y Tiaple, Y., “Experimental Investigation of Helical Tidal Turbine Characteristics with Different Twists”, *Energy Procedia*, 79, 409-414, 2015.
- [11] Serres, P., “Simulación tridimensional del flujo de fluidos en turbinas tipo Gorlov y diseño estructural”. Trabajo de Grado Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Puerto Ordaz, 2010.
- [12] GAMBIT 2.4, *User’s Guide. CFD preprocessor*. Fluent, Incorporated, 2007.
- [13] Marturet, G. “Valoración de modelos de turbulencia en dominios computacionales para simulación de una turbina helicoidal”, *Revista Científica UNET*, vol. 28, pp. 1-18, Enero, 2016.
- [14] ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*. ANSYS, 2009.
- [15] Oberkampf, W. L., y Trucano, T. G., “Verification and validation in computational fluid dynamics”, *Progress in Aerospace Sciences*, 38(3), 209-272, 2002.
- [16] Bachant, P. y Wosnik, M., “Modeling the near-wake of a vertical-axis cross-flow turbine with 2-D and 3-D RANS”, preprint arXiv:1604.02611, 2016.
- [17] Miller, V. B., “Dynamic Modeling and Environmental Analysis of Hydrokinetic Energy Extraction”, Doctoral dissertation, University of Pittsburgh, 2010.
- [18] Gebreslassie, M. G., “Simplified CFD modelling of tidal turbines for exploring arrays of devices”, Doctoral dissertation, University of Exeter, 2012.
- [19] Bachant, P. y Wosnik, M., “Experimental investigation of helical cross-flow axis hydrokinetic turbines, including effects of waves and turbulence”. In *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, January, 2011. (pp. 1895-1906)