

ESTUDIO DEL EFECTO DE WINGLETS EN TURBINAS HIDROKINÉTICAS CONFINADAS POR CANALES DE RIEGO

STUDY ON THE EFFECT OF WINGLETS IN HYDROKINETIC TURBINES BOUNDED BY IRRIGATION CHANNELS

Nicolás G. Tripp^a, Nicolás Caputo Pesce^a, Mauro Grioni^{a,b} y Dante Bragoni^a

^aGrupo de Investigación Hidráulica Computacional Aplicada, Instituto de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Parque General San Martín S/N, 5000 Mendoza, Argentina, nicolas.tripp@ingenieria.uncuyo.edu.ar,

<http://ingenieria.uncuyo.edu.ar/grupo-de-investigacion-hidraulica-computacional-aplicada>

^bCONICET

Palabras clave: Winglets, Turbina hidrocínética, Energía renovable.

Resumen. Las turbinas hidrocínéticas (THC) son dispositivos que extraen energía cinética de una corriente de agua y la transforman en energía eléctrica. En aplicaciones marinas las THC operan en condiciones similares a las de un medio infinito. En contraste, las THC introducidas en canales de riego operan en proximidad con la geometría del canal. A su vez, las dimensiones del canal y el tirante fijan el diámetro máximo del rotor que se puede introducir, limitando la potencia máxima aprovechable. Las extensiones de puntera o "winglets" permiten reducir los vórtices de puntera que se generan en las palas de las turbinas y aumentan el área efectiva que barre el rotor. En este trabajo se presenta un modelo de mecánica de fluidos computacional que aproxima el campo de velocidades de una THC inmersa en un medio confinado. Con el modelo se realizan simulaciones de una THC diseñada por el Grupo de Investigación Hidráulica Computacional Aplicada y la misma THC mejorada con winglets. En particular se compara el torque obtenido en ambos casos y se discuten las diferencias obtenidas en ambos campos de velocidades.

Keywords: Winglets, Hydrokinetic turbine, Renewable energy.

Abstract. Hydrokinetic turbines (HKT) are devices that transform part of the mechanical energy of water streams into electrical energy. Marine HKT operate in near infinite medium conditions. In contrast, HKT deployed at irrigation channels operate under boundary proximity. Moreover, the channel dimensions and surface head set a maximum allowable rotor diameter, which in turn limits the maximum power that can be harvested. The rotor tip extensions or "winglets" are rotor blade enhancements that reduce the blade tip vortex and increase the effective blade swept area. In this paper a computational fluid mechanics model is presented that approximates the velocity field around a HKT in a bounded medium. Simulations are carried out for a HKT, designed by the Grupo de Investigación Hidráulica Computacional Aplicada, and the same HKT enhanced with winglets. In particular, the torque obtained in both cases is compared and the differences in the velocity fields are discussed.

1. INTRODUCCIÓN

La turbina hidrocinética es un aprovechamiento de energía renovable relativamente moderno. Aún no existe un consenso sobre cuál es el formato más eficiente desde el punto de vista económico y actualmente representa un foco de investigación y desarrollo en varios países como EEUU (Lehmann et al., 2017), China (Liu et al., 2017) e Irán (Radfar et al., 2017). En aplicaciones marinas las THC operan en condiciones similares a las de un medio infinito. En contraste, las THC introducidas en canales de riego operan en proximidad con la geometría del canal. A su vez, las dimensiones del canal y el tirante fijan el diámetro máximo del rotor que se puede introducir, limitando la potencia máxima aprovechable. Kolekar y Banerjee (2015) estudiaron el efecto de la proximidad con la superficie libre y el fondo del mar. En su estudio determinaron que el bloqueo producido por la estela de la turbina puede ser beneficioso bajo ciertas condiciones de operación. También determinaron que la proximidad con el lecho marino es perjudicial para la conversión de energía. Riglin et al. (2015) y Yan et al. (2017) determinaron que el número de Froude afecta notablemente la eficiencia de la THC y que flujos críticos y supercríticos producen deformaciones de la superficie libre.

Por otra parte, las extensiones de puntera o "winglets" permiten reducir los vórtices de puntera que se generan en las palas de las turbinas y permiten convertir una cantidad de energía equivalente a la que convertiría una pala de mayor radio. Song et al. (2012) estudiaron el efecto de los winglets en una THC de 100kW inmersa en el mar y determinaron un aumento en la eficiencia del 4,84 %.

En el presente trabajo se estudia el efecto de winglets en una THC diseñada por el GIHCA. La turbina original fue diseñada para operar con un ángulo de ataque nulo de modo que se prevenga la producción de cavitación. Esta condición de operación permite que el desprendimiento de la capa límite se retrase hasta el borde de fuga. Con respecto al winglet, el mismo se diseñó desplazando la punta de la pala en la dirección axial, manteniendo la distancia radial. En la Fig. 1 se presenta una comparación entre las turbinas modeladas. Ambas turbinas se modelan bajo condiciones de confinamiento y flujo subcrítico.

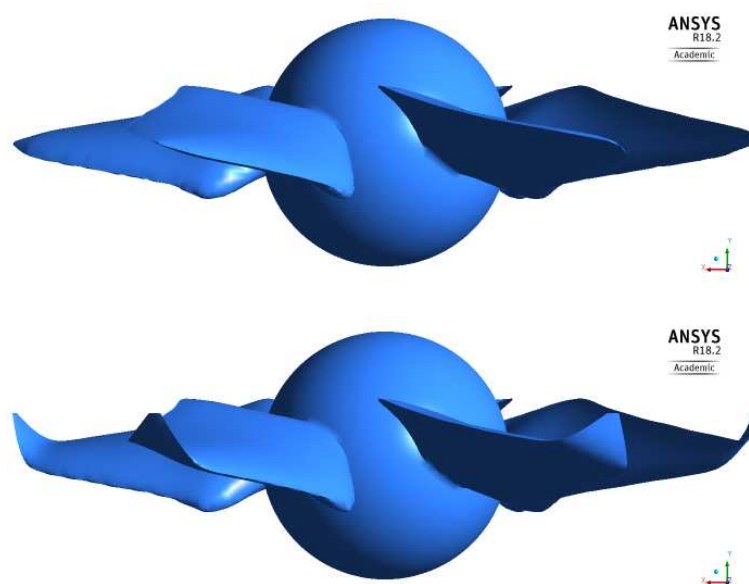


Figura 1: Rodetes modelados. Arriba original, Abajo modificado por winglets

2. ECUACIONES DE GOBIERNO

El modelo físico representa un flujo incompresible, isotérmico, viscoso y turbulento. Se asume que el desplazamiento vertical de la superficie libre es despreciable. El dominio considerado es un paralelepípedo con un ancho de 8[m], una altura de 2,2[m] y una extensión de 25[m]. El dominio se divide en un subdominio denominado *estático* y otro denominado *rotante* donde se aloja la turbina. Un diagrama esquemático del dominio representado y de las condiciones de contorno empleadas en este trabajo son resumidas en la Fig. 2.

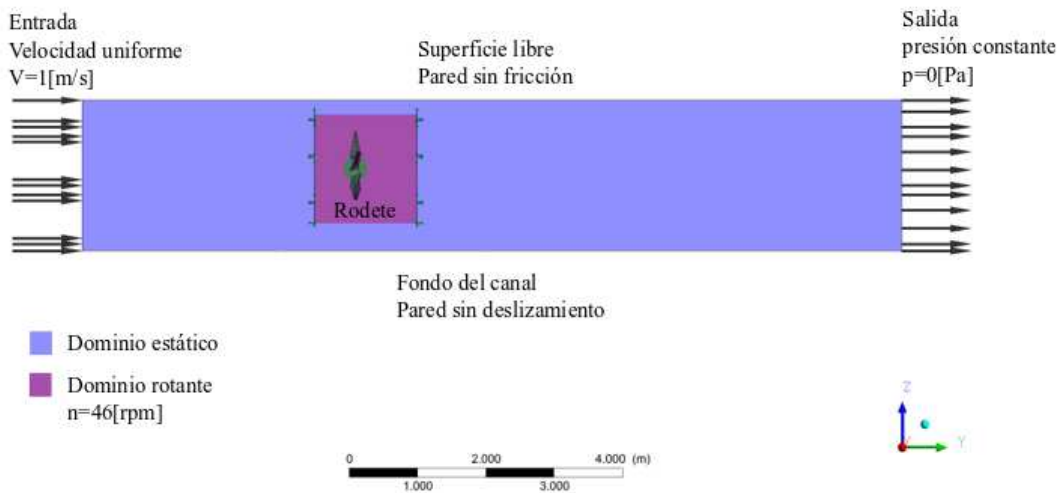


Figura 2: Modelo matemático.

El conjunto de ecuaciones a resolver son las ecuaciones de Navier-Stokes (1) y la ecuación de continuidad (2) promediadas en el tiempo, más las ecuaciones que surgen del modelo de turbulencia utilizado.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del fluido, U_j es la componente media de la velocidad en la dirección j , p es la presión, μ es la viscosidad y $\overline{u_i u_j}$ es la covarianza de las fluctuaciones de la velocidad. A fin de lograr el cierre de las Ec. (1) y (2), los términos asociados a la turbulencia deben ser modelados. La hipótesis de Boussinesq plantea la siguiente relación:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

donde μ_t es la viscosidad turbulenta, k es la energía cinética turbulenta y δ_{ij} es el delta de Kronecker. El modelo $k - \epsilon$ asume que la viscosidad de la turbulencia está relacionada con la energía cinética turbulenta k y la disipación ϵ a través de la relación:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

donde C_μ es una constante adimensional.

Los valores de k y ϵ provienen directamente de las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de turbulencia.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \epsilon + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

donde los valores de los coeficientes del modelo empleados son los estándar $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\epsilon = 1,30$, $C_{1\epsilon} = 1,45$, $C_{2\epsilon} = 1,92$.

2.1. Condiciones de borde

En la entrada del dominio se aplica una velocidad uniforme de 1[m/s] que corresponde a un flujo subcrítico. A la salida del dominio se consideró una expansión libre, i.e. presión relativa nula. En cuanto a las paredes del canal y la turbina se consideró la condición de no-deslizamiento, i.e. la velocidad es nula sobre la pared. Finalmente en la superficie libre se consideró un deslizamiento libre, i.e. velocidad normal nula.

3. ESQUEMA NUMÉRICO

Las ecuaciones (1) a (6) se resuelven numéricamente mediante el uso del código comercial Ansys CFX 18.2 (ANSYS, 2017b). Para discretizar los términos convectivos se utiliza el esquema híbrido *High Resolution* según el número de Pecklet (ANSYS, 2017a). El conjunto de ecuaciones se linealiza y se resuelve en forma iterativa (ANSYS, 2017b). El subconjunto de Ec. (1) a (4) linealizadas se resuelve en forma acoplada con un método LU acelerado por una estrategia multigrilla algebraica propuesta por Menter et al. (2004). Para representar la rotación de la turbina se empleó el método de múltiples sistemas de referencia (*MRF* en inglés) con la condición de rotor congelado (*frozen rotor* en inglés). Como criterio de convergencia se eligió que los residuales normalizados sean menores a 1E-6.

3.1. DOMINIO COMPUTACIONAL

Las mallas utilizadas en este trabajo se crearon por medio del software ANSYS Meshing. Un ejemplo de la estrategia de mallado empleada se puede ver en las Fig. 3 y 4 donde se presenta la malla de elementos más grandes. El número de y^+ se mantuvo entre 30 y 500.

Para obtener resultados numéricos confiables se realizó un estudio de independencia del mallado. Se programaron tres discretizaciones con la misma metodología de mallado y tamaños de elementos diferentes. Se observaron resultados globales como la fuerza de arrastre y la potencia hidráulica en el eje. También se relevaron perfiles de velocidad axial aguas abajo del rodete a distancias de 1, 2, 4 y 10[m]. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1 y en la Fig. 5. En base a los resultados se eligió la discretización de 2.740.206 elementos.

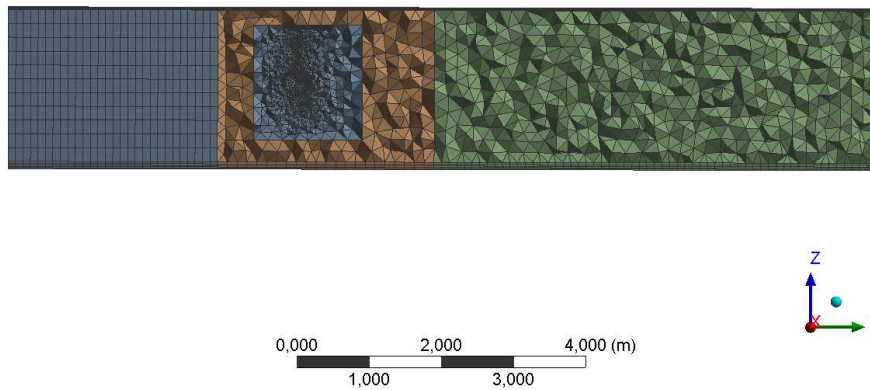


Figura 3: Corte longitudinal del Mallado.

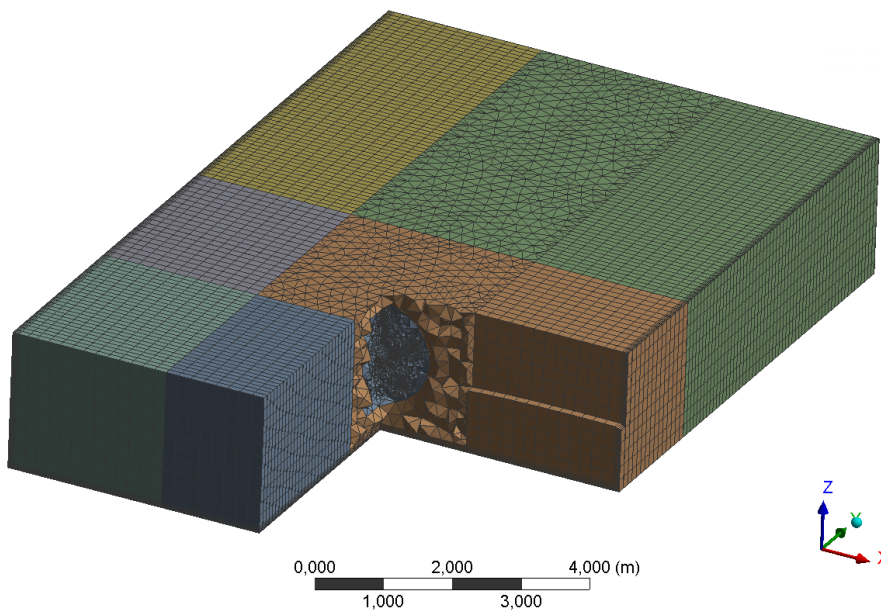


Figura 4: Vista isométrica del mallado.

Identificación de Malla	Elementos	Arrastre [N]	Diferencia relativa [%]	Potencia [W]	Diferencia relativa [%]
Malla1	266.584	344,026	—	105,129	—
Malla2	1.195.399	363,24	5,6	153,553	46
Malla3	2.740.206	364.451	0,3	167,967	9,4

Tabla 1: Resultados de independencia del mallado.

4. RESULTADOS

En la Tabla 2 se presenta un resumen del desempeño de ambas turbinas. Como se puede observar, el rodete con winglet genera un mayor arrastre que para el caso del rodete original (10,7 %). Con respecto a la potencia obtenida en el eje del rodete se observa un aumento del 15,8 % en la configuración con winglet. A continuación se presentan distintas visualizaciones

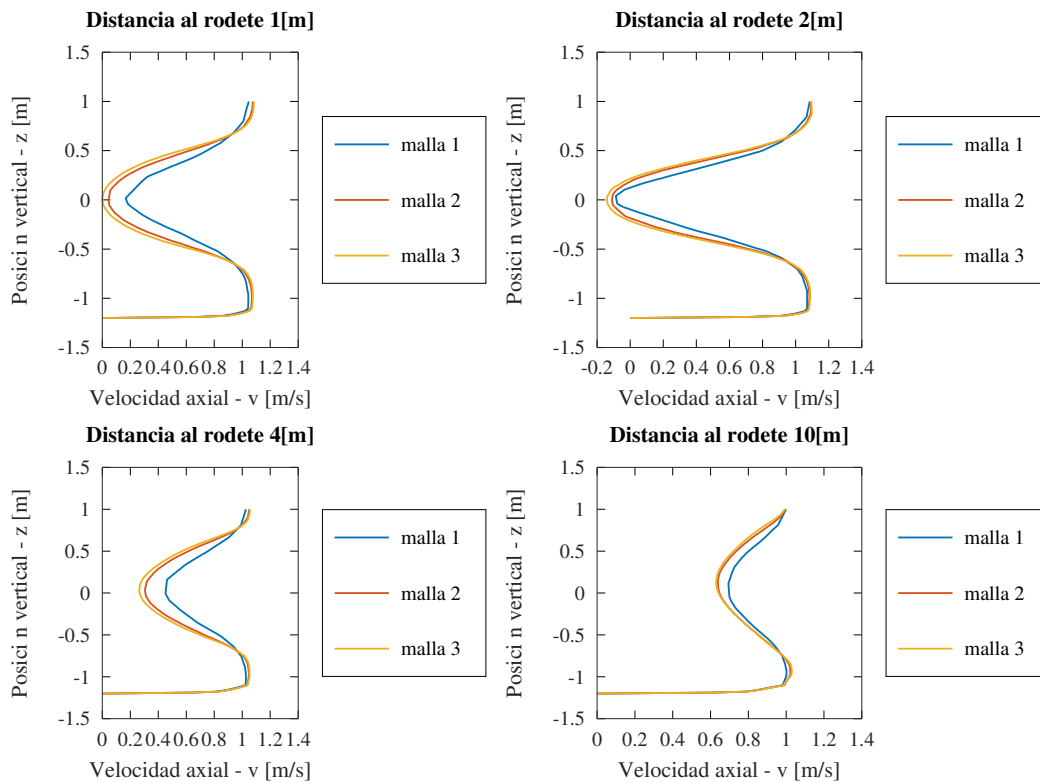


Figura 5: Convergencia perfiles de velocidad para rodete base.

de los resultados obtenidos en ambos modelos.

Modelo	Arrastre [N]	Diferencia relativa [%]	Potencia [W]	Diferencia relativa [%]
Original	364,451	—	167,967	—
Con winglets	403,531	10,7	194,512	15.8

Tabla 2: Comparación global de ambas turbinas.

En la Fig. 6 se comparan los campos de energía cinética turbulenta y las líneas de corriente de cada estela. Se observa un incremento en la vorticidad dentro de la estela producida por la turbina modificada. Además se observa un incremento de la producción de energía cinética turbulenta en la punta de los winglets.

En la Fig. 7 se comparan los campos de velocidad axial. Comparando los resultados de ambas turbinas no se observan diferencias significativas por la presencia del winglet.

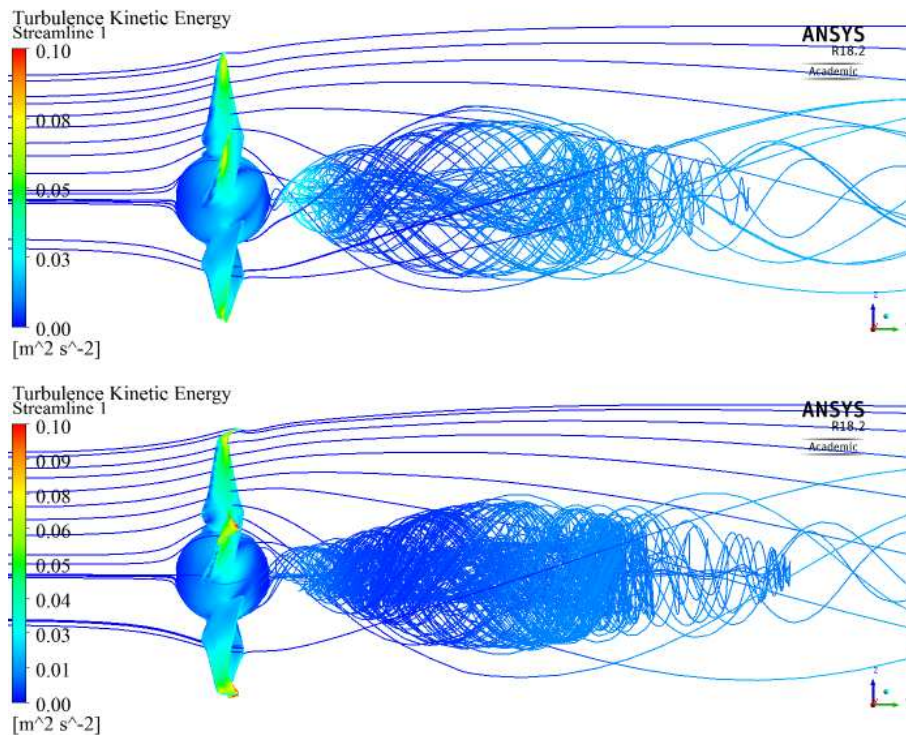
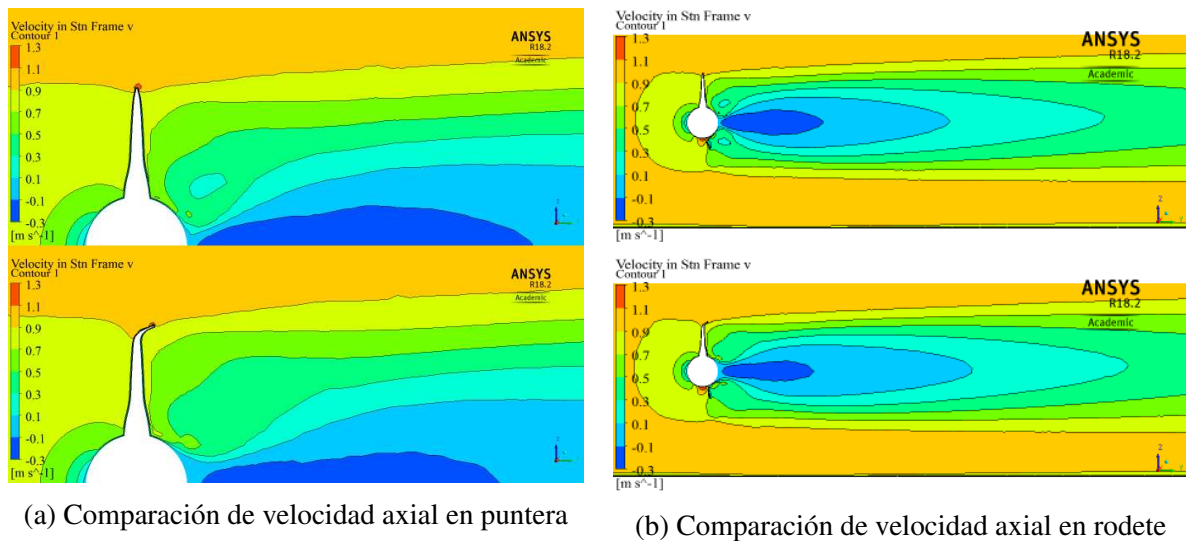


Figura 6: Estelas y energía cinética turbulenta. Arriba original, Abajo modificada.

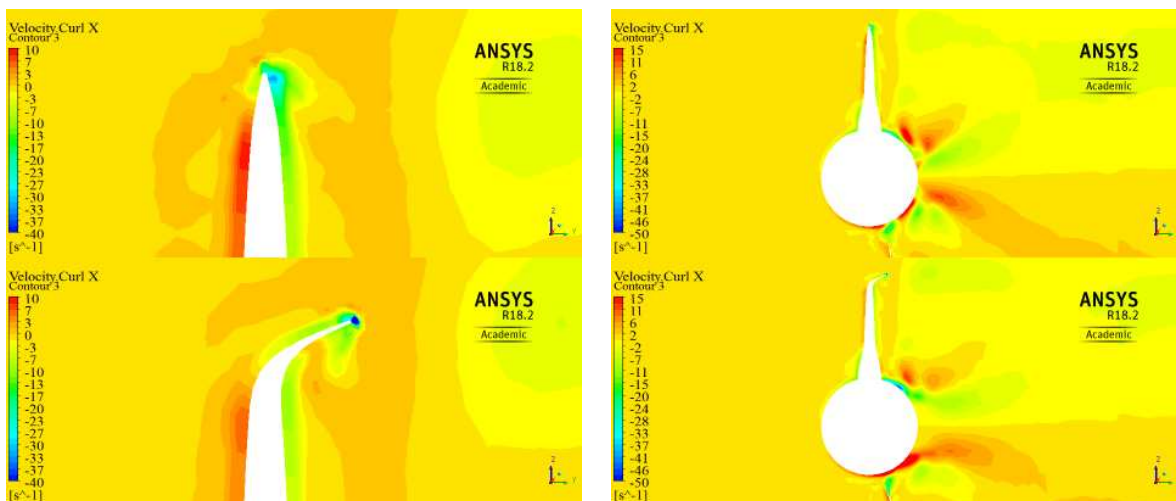


(a) Comparación de velocidad axial en puntera

(b) Comparación de velocidad axial en rodete

Figura 7: Velocidad axial. Arriba original, Abajo modificada.

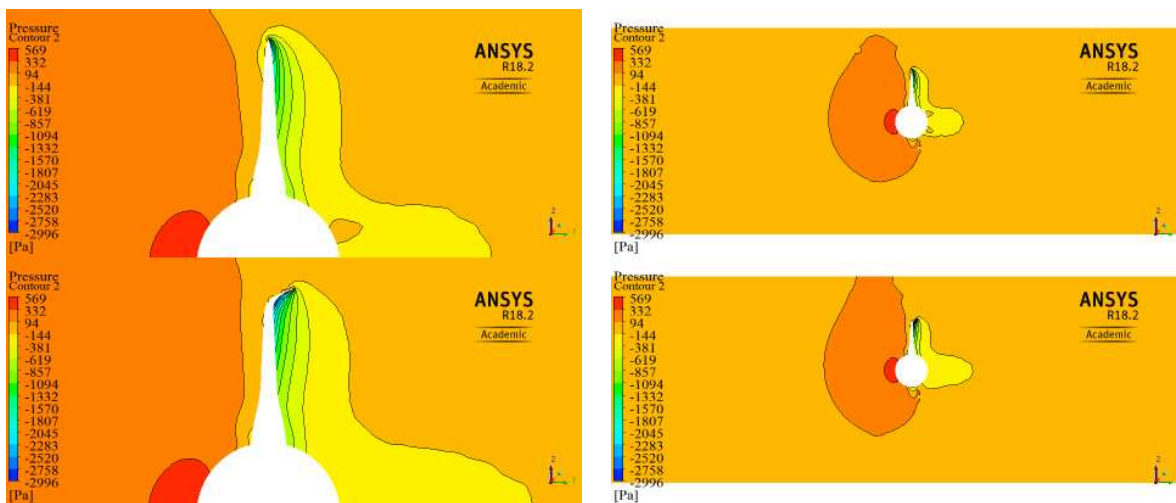
En la Fig. 8 se comparan las distribuciones de la componente x (normal al plano de visualización) de la vorticidad. En la Fig. 8a se observa que la vorticidad se concentra en la proximidad de la punta del winglet e incrementa su valor respecto al caso original. En la Fig. 8b se observan zonas de vorticidad más uniformes alrededor de la turbina modificada.



(a) Comparación de vorticidad en puntera (b) Comparación de vorticidad en rodete

Figura 8: Vorticidad. Arriba original, Abajo modificada.

En la Fig. 9 se comparan los campos de presión alrededor de las turbinas. En la Fig. 9a se observa un desplazamiento radial de la zona de mínima presión.



(a) Comparación de presión en puntera (b) Comparación de presión en rodete

Figura 9: Presión. Arriba original, Abajo modificada.

Finalmente en la Fig. 10 se presenta la presión ejercida por el fluido contra la pared que representa la superficie libre. Si bien se observa un aumento de la presión relativa delante de la turbina y una succión detrás, los valores confirman que el desplazamiento es despreciable respecto a la altura total.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió el efecto de winglets en una THC, diseñada por el GIHCA, bajo condiciones de confinamiento y flujo subcrítico. Se resolvieron numéricamente dos modelos que describen el flujo alrededor de una turbina de referencia y otra modificada con winglets.

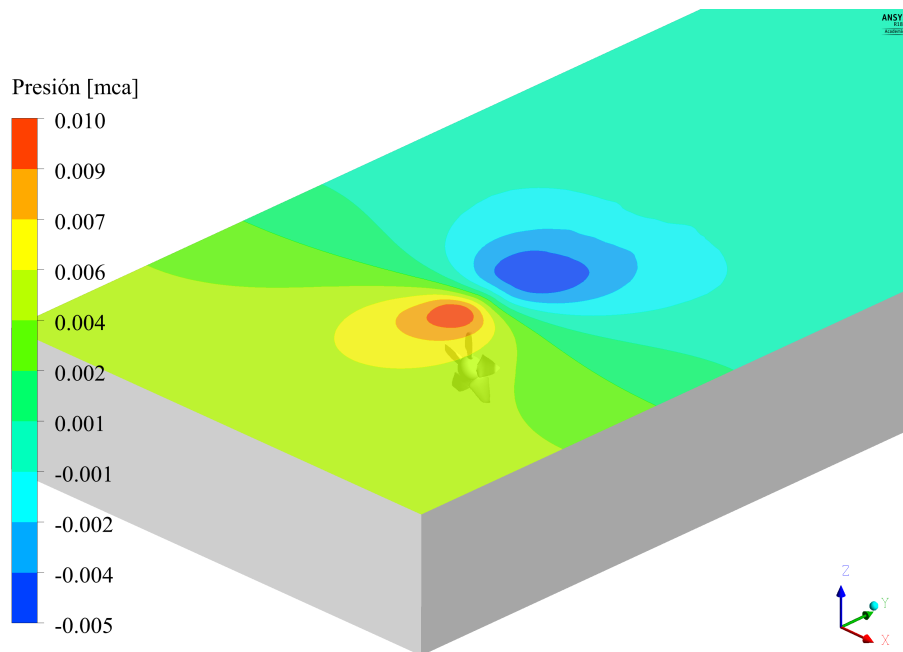


Figura 10: Presión en superficie libre.

Se observó un incremento de la vorticidad alrededor de la punta del winglet y en el interior de la estela detrás de la turbina. Globalmente se observó un incremento del arrastre (10,7 %) y de la potencia hidráulica (15,8 %) transformada por la turbina modificada con winglets. Se verificó la hipótesis de despreciar el desplazamiento vertical de la superficie libre. El aumento de potencia obtenido es considerablemente mayor al reportado por Song et al. (2012). Como causas posibles de la diferencia se pueden mencionar la solidez de ambas turbinas, los perfiles y el ángulo de ataque de operación y el confinamiento producido por el canal. Estas diferencias se estudiarán en trabajos futuros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación por el financiamiento otorgado al proyecto de vinculación tecnológica “ALABES TURBINA HIDROKINETICA” por medio de la Resolución RESOL-2017-5157-APN-SECPU#ME, y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo por brindar los recursos necesarios para la presente investigación.

REFERENCIAS

- ANSYS C. Cfx-solver modeling guide, release 18.2.2. 2017a.
- ANSYS C. Cfx-solver theory guide, release 18.2.2. 2017b.
- Kolekar N. y Banerjee A. Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects. *Applied Energy*, 148:121 – 133, 2015. ISSN 0306-2619. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.052>.
- Lehmann M., Karimpour F., Goudey C.A., Jacobson P.T., y Alam M.R. Ocean wave energy in the united states: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74:1300 – 1313, 2017. ISSN 1364-0321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.101>.

- Liu Y., Li Y., He F., y Wang H. Comparison study of tidal stream and wave energy technology development between china and some western countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76:701 – 716, 2017. ISSN 1364-0321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.049>.
- Menter F., Galpin P., Esch T., Kuntz M., y Berner C. Cfd simulations of aerodynamic flows with a pressure-based method. En *Proceedings of the 24TH International Congress of the Aeronautical Sciences*. 2004. ISBN 0-9533991-6-8.
- Radfar S., Panahi R., Javaherchi T., Filom S., y Mazyaki A.R. A comprehensive insight into tidal stream energy farms in iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79:323 – 338, 2017. ISSN 1364-0321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.037>.
- Riglin J., Schleicher W.C., Liu I.H., y Oztekin A. Characterization of a micro-hydrokinetic turbine in close proximity to the free surface. *Ocean Engineering*, 110:270 – 280, 2015. ISSN 0029-8018. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.026>.
- Song M., Kim M.C., Do I.R., Rhee S.H., Lee J.H., y Hyun B.S. Numerical and experimental investigation on the performance of three newly designed 100 kw-class tidal current turbines. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(3):241 – 255, 2012. ISSN 2092-6782. doi:<https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0093>.
- Yan J., Deng X., Korobenko A., y Bazilevs Y. Free-surface flow modeling and simulation of horizontal-axis tidal-stream turbines. *Computers & Fluids*, 158:157 – 166, 2017. ISSN 0045-7930. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.06.016>. Large-eddy and direct numerical simulations of oceanic and atmospheric flows.