

CFD aplicado al comportamiento de turbinas hidrocinéticas sin y con bioincrustación

CFD applied to the behavior of hydrokinetic turbines without and with biofouling

di Prátula, Horacio R.

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, GESE, Argentina.
hrdiprat@frbb.utn.edu.ar

Presentación: 09/2024

Malchiodi Eduardo Luis

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, GESE, Argentina.
eduardomalchio@gmail.com

Eduardo Guillermo

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, GESE, Argentina.
eguiller@frbb.utn.edu.ar

Carlos Pistonesi

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, GESE, Argentina.
cpistone@frbb.utn.edu.ar

Resumen

Esta publicación está orientada al análisis del orden en el proceso de investigación para lograr que el mismo nos conduzca a una condición óptima para aplicar CFD (Computational Fluid Dynamics) a la simulación del comportamiento de partes de turbinas hidro cinéticas (especialmente alabes) sumergidas en el mar y el efecto sobre la capa límite y los parámetros (torque, presión dinámica, velocidad, etc) del fluido ante la bioincrustación.

El efecto de la rugosidad o daños en los álabes afecta los parámetros en las turbinas hidro cinéticas (en eólicas también), ya que toda modificación alar afecta el C_p (coeficiente de potencia: factor determinante del sistema de producción energética de una turbina hidro cinética).

En nuestro caso y con el fin de predecir el efecto de las incrustaciones de percebes en el rendimiento de la hélice, se emplearán funciones de rugosidad de las incrustaciones de percebes obtenidas experimentalmente en nuestra zona costera (canal de acceso a Puerto Belgrano). No se recurrirá a los métodos habituales

El proceso de investigación se basa en la colocación de probetas y realizar un seguimiento con el uso del túnel de viento para modelizar y aplicar CFD, de modo que el modelo de simulación permita predecir el efecto de la bio-incrustación con seguimiento sobre las variables de diseño.

Palabras clave: Computational Fluid Dynamics (CFD), bio incrustación, hidro cinética, generación eléctrica.

Abstract

This publication is oriented to the analysis of the order in the research process to ensure that it leads us to an optimal condition to apply CFD (Computational Fluid Dynamics) to the simulation of the behavior of parts of hydrokinetic turbines (especially blades) submerged in the sea and the effect on the boundary layer and the parameters (torque, dynamic pressure, speed, etc.) of the fluid before biofouling.

The effect of roughness or damage to the blades affects the parameters in hydrokinetic turbines (in wind turbines as well), since any wing modification affects the C_p (power coefficient: determining factor of the energy production system of a hydrokinetic turbine).

In our case and in order to predict the effect of barnacle fouling on the performance of the propeller, roughness functions of barnacle fouling obtained experimentally in our coastal area (access channel to Puerto Belgrano) will be used.

The research process is based on the placement of specimens and monitoring with the use of the wind tunnel to model and apply CFD, so that the simulation model allows predicting the effect of biofouling with monitoring on the variables of design. Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), biofouling, hydrokinetic, electricity generation.

Introducción

El objetivo del documento es mostrar una metodología para determinar la función de rugosidad considerando la bio-incrustación sobre las palas (fundamentalmente) que modifican la energía de la capa límite afectando de este modo su perfil alar. En el modelo de función de rugosidad CFD (Soonseok Song et al 2019) se emplea un modelo de función de pared rugosa para simular la superficie de percebes de diferentes tamaños y densidad de cobertura. El estudio de validación se efectuó comparando las curvas de aguas abiertas de una hélice con una testigo denominada KP505 (Fujisawa, J et al. 2000). En nuestra investigación el modelo de función de rugosidad CFD surgirá de la aplicación de un túnel de viento midiendo los parámetros de un testigo sin y con diferentes niveles de bio-incrustación, (variación de presión, torque y velocidad de fluido) lo que permitirá emplear un modelo de función de rugosidad con mayor precisión al momento de aplicar CFD.

Este objetivo exige un conocimiento de la bio-incrustación en la zona y su influencia sobre una pala con el fin de evaluar, tanto teóricamente (CFD) como experimentalmente (túnel de viento), la modificación de las variables importantes de diseño. Una vez logrado el modelo se optimizará la conformación alar mediante CFD.

El procedimiento adoptado se fundamenta en que el sistema CFD (procedimiento computacional) presenta como inconveniente fundamental la transición de la capa límite (Figura 1a). Esto sucede, porque el mismo muestra buena exactitud para ángulos de ataque no muy elevados ya que la conformación de la capa límite permite buena precisión de análisis. Mientras que con ángulos de ataques más elevados el comportamiento de la capa límite muestra turbulencia ya que ésta es de menor energía y no se mantiene adherida al perfil.

Como el comportamiento del perfil queda definido por su capa límite, conocer cuando ésta pasa de laminar a turbulenta o saber cuándo la energía de la misma no es suficiente para mantenerse adherida al perfil, hace la diferencia entre un ensayo real con un análisis computacional, ya que la relación con ese discernimiento depende de parámetros difíciles de precisar.

De este modo la investigación en curso busca determinar la capa límite para una modelización adecuada alterando el orden de trabajo (Figura 1b) ya que nos preguntamos ¿Cómo afecta la rugosidad la capa límite y como el fluido se comporta en ella? La precisión en la zona proximal al punto de impacto (~25%) tiene que ser mayor (capa límite menor) que en la zona final del perfil (~25%) la capa límite es mayor. Luego, la modelización resultante de la aplicación del túnel de viento al perfil sin y con contaminación permitirá que el diseño mediante CFD sea óptimo. (no se incluyen en este documento procesos matemáticos extensos por no ser objetivo primordial del mismo, la intención es manifestar sintéticamente las razones de establecer un proceso de investigación diferente) (Figura 1a y Figura 1b).

Se sabe que la ecuación diferencial parcial que modela el flujo de fluido se atribuye a Navier y Stokes y que la misma es un equilibrio de fuerzas basado en la segunda ley de Newton, $F = \Sigma \text{fzas} = ma$. Luego, al analizar esa expresión, vemos que al modificarse la masa a medida que se genera la fuerza la fórmula simple es insuficiente y deberíamos considerar lo siguiente:

$$\vec{F} = \vec{V} \frac{dm}{dt} + m \frac{d\vec{V}}{dt} \text{ con } \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{a} \quad (\vec{F}, \vec{V} \text{ y } \vec{a} \text{ son vectores}) \quad (1)$$

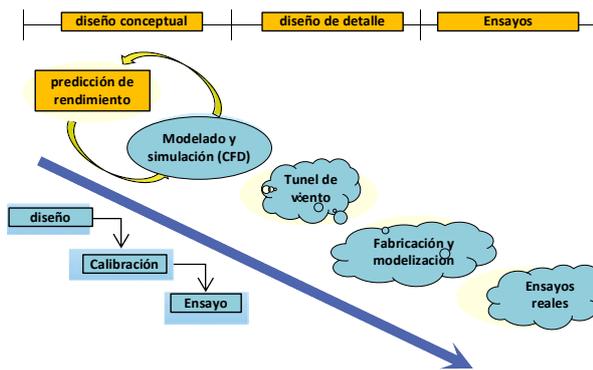


Figura 1a

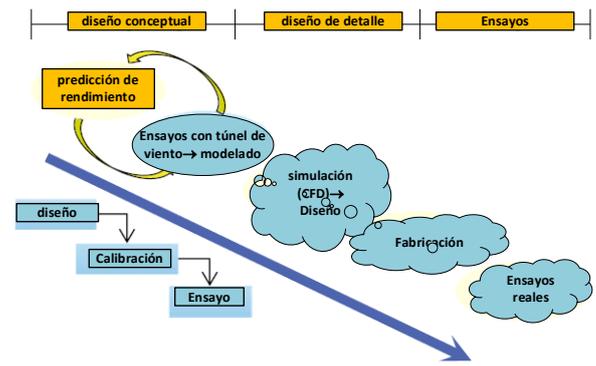


Figura 1b

Figura 1: El rol de las pruebas en el túnel de viento en el desarrollo de a) aeronaves que incluye el modelado de simulación [Weijun Zhu et al] b) desarrollo objetivo del presente trabajo.

Es así que, tomando como importante la distinción entre flujo viscoso y no viscoso, que considera o ignora la viscosidad, μ , también existe la distinción entre constante y densidad variable, ρ . También encontramos una distinción entre compresible e incompresible, pero esto generalmente se refiere a velocidades cercanas o superiores a la velocidad del sonido (es decir, velocidades Mach). No usaremos el término incompresible para significar densidad constante sino números de Mach bajos.

Es importante considerar entonces el número de Reynolds (cociente de las fuerzas de inercia y las fuerzas debidas a la viscosidad), ya que para número de Reynolds bajo ($Re < 2000$) la capa límite es gobernada por la acción de las fuerzas viscosas y en su interior el flujo es laminar. Mientras que para número de Reynolds elevado ($Re > 4000$) la capa límite es totalmente turbulenta.

Cuando se han efectuado estudios comparativos entre modelo y prototipo se ha encontrado evidencia de que la correspondencia de comportamiento es frecuentemente buena, fuera de las limitaciones esperadas, como lo atestigua el correcto funcionamiento de muchas estructuras diseñadas a partir de ensayos sobre modelos. Luego, la mayor dificultad surge del número de Reynolds.

Luego, el proceso de investigación seguirá los siguientes pasos:

1er Paso: colocar la probeta para que se contamine (Figura 4b) logrando muestras de bio-incrustación periódicas

2do Paso: determinar las variables que caracterizan una muestra (probeta) para medir en el túnel de viento con diseño conocido.

3er Paso: Las experimentaciones realizadas en el 2do paso en el túnel de viento, permitirán verificar los cambios producidos en las variables (presión dinámica, caudal, tensión de corte, velocidad del fluido, etc.) dando lugar al 4to paso.

4to Paso: Una vez conocidos los cambios producidos en el perfil alar original se obtendrá un modelo de rugosidad al que aplicar la simulación mediante Modelos de dinámica de fluidos (CFD).

Luego, establecido el modelo de función de rugosidad con el túnel de viento, mediante Modelos de Dinámica de Fluidos (CFD) se perfeccionará el perfil alar para una producción de energía óptimo en dispositivos hidro cinéticos tanto horizontales como verticales con palas rectas como helicoidales, usando el número Reynolds promediado (3D).

En muchos casos el método de análisis de ingeniería utilizado para investigar el desarrollo del fluido en la turbina con difusor se inicia aplicando el disco actuador (teoría del impulso del elemento de pala (BEM), (18..19) y posteriormente se efectúa una simulación de CFD para analizar modificaciones de diseño a la turbina hidro cinética.

En conclusión, los métodos simplificados (BEM), la simulación CFD y el túnel de viento aplicado a modelos a escala contribuyen a mejorar y optimizar resultados tendientes a la resolución de problemas de ingeniería. Sin embargo, se destaca que en la mayoría de los casos el túnel de viento se utiliza para una etapa posterior al diseño mientras que en éste caso se usa para determinar una función de rugosidad mejorando la aplicación de la simulación por computación. Como se observa, la bio incrustación modifica el perfil alar de tal modo que optimizar el resultado sería lograr prever la incidencia del fenómeno mediante, inclusión de materiales especiales o pinturas o adopción de perfiles adecuados.

Esto se logra realizando tareas simultáneas, tanto experimentales como por computación. Toda herramienta es valiosa en la búsqueda de una convergencia que permita resolver el problema de contaminación en el mar. Al mismo tiempo vemos que para la Ingeniería de diseño, el río presenta otras problemáticas, así como también, la contaminación en sistemas eólicos.

Como síntesis del problema debemos comprender que determinar si el flujo es laminar es importante, porque entonces se trata de un fluido predecible, eso determina una capa límite bien definida y con perfiles de velocidad, concentración y temperatura. Si analizamos la turbulencia apreciamos que es un movimiento impredecible, tanto espacial como temporal.

Luego, si se determina con precisión la capa límite y su zona de fluido laminar, el análisis matemático se desarrolla en una zona estable aún con rugosidad.

Desarrollo

Es interesante comparar tanto la determinación del recurso como el diseño de turbinas afectadas por dos fluidos (aire y agua) al mismo tiempo que se examinan comportamientos y contaminaciones de los perfiles alares.

En el proceso de investigación se analizó la medición del recurso eólico con el fin de comparar procesos operativos y hallar similitudes y diferencias tanto en los instrumentos para dicha experiencia como en su procesamiento (método de extrapolación temporal de los datos medidos) hasta la elección de la turbina eólica y la conexión a una red eléctrica.

El efecto del recurso eólico sobre el diseño y la operación de la turbina eólica se efectúa por el método del disco actuador BEM considerando un fluido laminar con bajo número de Reynolds. Eso permite el uso del túnel de viento y solo cuando se produce turbulencia (vórtices) debe verificarse por otros métodos. El estudio de la estela que modifica el aprovechamiento del recurso en otros molinos puede estudiarse mediante un túnel de viento (Leonardo P. Chamorro et al (2011), Wittwer, Adrián R), al igual que la incidencia de contaminación sobre la turbina.

Contaminación y Daños sobre Álabes

En la Figura 2 se muestran fotografías del aspecto que presentan los álabes contaminados tanto en energía eólica como hidrocínética.



Figura 2: Se observa en 4a) los efectos de Pitting, erosión, suciedad e impacto de rayo sobre la pala y en 4b) la bio-incrustación en álabes en la zona marítima.

Descripción del Proceso de Investigación

Se han verificado algunos estudios experimentales para examinar el efecto de la rugosidad en las características de las hélices, fundamentalmente en buques.

Algunos estudios proporcionan evidencia del efecto de rugosidad en el rendimiento de las hélices marinas, pero, relacionar los datos experimentales a escala del modelo con el efecto de rugosidad a escala real no es una tarea fácil debido a la característica única del efecto de rugosidad. Es decir, el tamaño de la rugosidad de la superficie no se puede aumentar ni reducir.

Si bien el efecto de la rugosidad en la fricción superficial se puede extrapolar utilizando el análisis de la ley de similitud de la capa límite, este método puede no ser apropiado para predecir el efecto de la rugosidad en el rendimiento de la hélice, que se ve muy afectado por el campo de presión, alrededor de las palas.

El análisis de la ley de similitud de la capa límite está limitado por el supuesto de gradiente de presión cero, es decir; este método no puede considerar los efectos tridimensionales e, inevitablemente, no puede discurrir adecuadamente el efecto de rugosidad en la distribución de presión en el campo de flujo alrededor de las palas, que domina el empuje y el par de la hélice.

Por esta razón, el efecto de la rugosidad sobre el rendimiento de la hélice a escala real aún no está bien establecido. Los autores (Atlar et al.(2002)) realizaron cálculos numéricos para determinar el efecto de la rugosidad en las características de la hélice en aguas abiertas, utilizando un modelo de hélice basado en una superficie de elevación combinado con una corrección empírica de la fricción superficial. Utilizaron un comparador de rugosidad de la hélice para representar la misma después de varios años de servicio. Otro autor (Mosaad (1986)) permitió trabajar con un coeficiente de arrastre de la sección de la pala debido a la rugosidad. Los trabajos se basaban en valores con una corrección empírica. El aumento del coeficiente de resistencia de la sección de la pala debido a la contaminación de la superficie se predijo basándose en el análisis de la ley de similitud de la capa límite.

Sin embargo, estos estudios todavía están limitados por el hecho de que el efecto de rugosidad en la hélice sólo se considera mediante el uso de coeficientes de arrastre de sección de pala aumentados, pero sería óptimo imitar el efecto de rugosidad en el campo de fluido alrededor de la hélice, ya que está estrechamente relacionado con la distribución de presión en la superficie de las mismas (Esta es la razón de la colocación en el túnel de viento del GESE de un sensor de presión dinámica y un dinamómetro para medir torque).

En consecuencia, se pudieron observar un efecto considerable de la rugosidad en el empuje, mientras que a partir de los resultados del cálculo se observaron aumentos significativos en el par.

El método de cálculo CFD aparece como una alternativa eficaz para superar las limitaciones antes mencionadas del análisis de la ley de similitud de la capa límite (Atlar M, (2018)). Sin embargo, es fundamental tener datos experimentales para aplicar el método computacional. Este procedimiento ofrece a los investigadores dos posibilidades de predicción; práctico y rápido extrapolación para la estimación del desempeño y el segundo es la posibilidad de utilizar el método CFD. Gracias a la posibilidad de utilizar el método CFD, las rugosidades superficiales detalladas pueden superar la dificultad del modelado. Este sistema se utiliza para evaluar los efectos de las pinturas de los barcos en caso de contaminación de la superficie.

Para predecir el efecto de la bio-incrustación en las características de las hélices marinas el uso del método CFD aún no se ha utilizado a gran escala, y en nuestra investigación las probetas planas no permitirían obtener muestras que cumplan con las condiciones que presentan las hélices en permanente giro como las de turbinas hidro cinéticas (figura 3)



Figura 3: Paneles de prueba estándar.

Es importante entender que la referencia (Soonseok Song et.al (2019)) nos orienta hacia un modelo CFD simulando la rugosidad mediante el empleo de una **función de rugosidad** y que, en nuestra opinión, la función de rugosidad debe surgir de la medición de variables en el túnel de viento (Figura 1b).

Luego, el objetivo es lograr un modelo y mejorar los paneles de prueba, ya que reconocemos que los mismos representan el dispositivo al que afectan. En nuestro proyecto de investigación se realizará en forma experimental a través de una probeta (Figura 4a) y la colocación de un correntógrafo (Figura 4b) en el lugar elegido (Figura 4c).

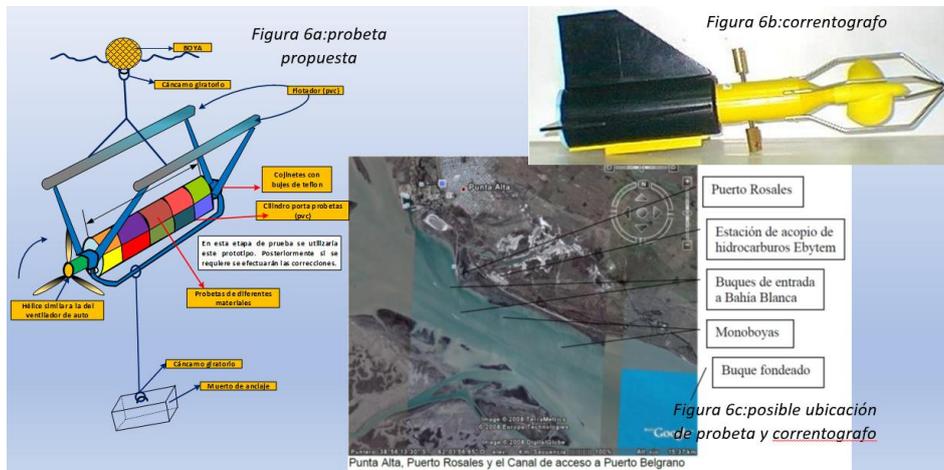


Figura 4: Paneles de prueba propuestos por la investigación en curso- ubicación y correntógrafo.

No obstante, algunas publicaciones utilizaron modelos de rugosidad propuestos por referencias (Soonseok Song et.al (2019), Fujisawa, J. et al (2000)), examinando cambios en las curvas de presión de agua abiertas de la hélice y el esfuerzo cortante en las mismas, las distribuciones de presión y velocidad, y las características de los vórtices de la hélice debido a las diferentes condiciones de incrustación. Este procedimiento coincide con la apreciación de colocar en el túnel de viento (número de Re bajo) un dispositivo de medición de presión dinámica y medir el esfuerzo cortante en el modelo).

Modelo de función de rugosidad

Las referencias analizadas obtienen la función de rugosidad a partir de analizar la superficie ya que se produce un aumento de la turbulencia y aumenta la tensión de corte de la pared y finalmente la fricción de la piel. También la rugosidad modifica el perfil de velocidad en la región de la ley logarítmica.

Por ejemplo, (Clauser, F. H 1954) realiza un desarrollo que muestra que la rugosidad afecta el perfil de velocidad (disminuye) en la región de la ley logarítmica. Esto lo denomina “función de rugosidad” = ΔU^+

Este perfil se expresa del siguiente modo:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \log y^+ + B - \Delta U^+ \dots\dots\dots [2]$$

La misma se expresa en función del número de Reynolds (Re) que se define como:

$$Re = \frac{\rho U_r}{\mu} \dots\dots\dots [3]$$

Establecida la función de rugosidad se puede utilizar en el análisis de la ley de similitud de la capa límite establecido por Granville en 1958-1987 o según la referencia (Demirel, Y. K) directamente integrado en un solucionador de CFD para predecir el efecto de la rugosidad sobre la resistencia a la fricción de un barco cubierto con la rugosidad dada.

Esta referencia especifica que los autores efectuaron una serie de pruebas de remolque utilizando placas planas cubiertas con material artificial. Las pruebas fueron diseñadas para permitir el examen de los efectos de la altura del percebe y cobertura porcentual sobre la resistencia y potencia efectiva de los buques.

Los coeficientes de arrastre y la función de rugosidad para placas planas fueron evaluadas. También se predijeron condiciones de resistencias de fricción de los barcos y se trazaron diagramas de resistencia utilizando las predicciones.

Como ejemplo de trabajos, la referencia (Soonseok et al (2019)), enfocó en forma experimental para obtener las funciones de rugosidad de percebes de diferentes tamaños y coberturas. Se digitalizaron diferentes tamaños de percebes reales, clasificados como pequeños, medianos y grandes según su tamaño, utilizando tecnología de escaneo 3D y se imprimieron en 3D en losetas de percebes artificiales. Posteriormente, los parches de percebes se pegaron a las placas planas diferenciando el área de cobertura y las placas se remolcaron a distintas velocidades.

La Tabla 1 compara las escalas de longitud de rugosidad para las condiciones de incrustación de diferentes tamaños de percebes y densidades de cobertura y la Figura 1 muestra las funciones de rugosidad obtenidas del experimento y la función de rugosidad calculada utilizando la Ecuación:

$$\Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(1+k^+) \dots\dots\dots [4]$$

TABLA 1 : ESCALAS DE LONGITUD DE RUGOSIDAD DE SUPERFICIES DE PRUEBA				
Condición de la superficie	Tipo de percebe	% de cobertura de superficie	k_G (µm)	h (mm)
B10%	Big	10 %	174	5
B20%	Big	20 %	489	5
M10%	Medium	10 %	84	2.5
M20%	Medium	20 %	165	2.5
M40%	Medium	40 %	388	2.5
M50%	Medium	50 %	460	2.5
S10%	Small	10 %	24	1.25
S20%	Small	20 %	63	1.25
S40%	Small	40 %	149	1.25
S50%	Small	50 %	194	1.25

Tabla 1: Escalas de longitud de rugosidad de superficies de prueba (Song et al. (2019))

Para la validación de la función de rugosidad en la función de pared en el modelo CFD, se realizaron simulaciones de placas planas a escala de modelo utilizando el enfoque de función de pared modificado y mostraron excelentes acuerdos al comparar los resultados de la simulación con los datos experimentales. En este estudio, se utilizó el mismo enfoque modificado de la función de la pared que (Song et al. (2019)) se utilizó para simular la rugosidad de la superficie de percebes de diferentes tamaños y coberturas.

No se transcribe en esta presentación el diagrama de flujo incluido en la referencia mencionada en el párrafo anterior. En el solucionador CFD, los dominios computacionales se discretizaron y resolvieron utilizando un método de volumen finito.

Aclaremos que “El método del volumen finito utiliza la forma integral de la ecuación de conservación como: El dominio de la solución se subdivide en un número finito de pequeños volúmenes de control (CV) mediante una cuadrícula que, a diferencia del método de diferencias finitas (FD), define la controlan los límites del volumen, no los nodos computacionales” referencia (Joel H. Ferziger (2020))

Finalmente, en la Tabla 2 y la siguiente Figura 5 referencia (Fujisawa, et al (2015)). El CFD el desarrollo se efectuó sobre un propulsor diseñado por el Instituto de Investigación de Ingeniería Naval y Oceánica de Corea (KRISO) para ser utilizado en el buque portacontenedores KRISO (KCS) y se denomina KP505.

Propeller Type	FPP	Ae/Ao	0.800
No. of Blades	5	Rotation	Right Hand
Diameter (m)	7.9	Hub ratio	0.18
P/D (mean)	0.950	Section	NACA66

Tabla 2: : Particularidades del propulsor KP505

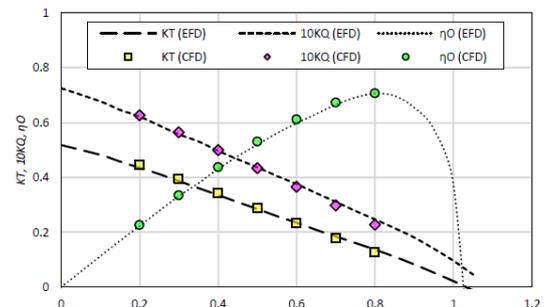


Figura 5 Comparación de las curvas aguas abiertas de la hélice que se obtuvieron del CFD y EFD actuales

El propulsor sería un perfil NACA 66 observándose en la Figura 5 las curvas aguas abiertas de la hélice que se obtuvieron del CFD y EFD (dinámica de fluidos experimental) actuales.

La comparación con los datos experimentales se realiza en términos del coeficiente de resistencia total C_t así como los coeficientes de empuje K_T y par K_Q . Estos se definen como (eficiencia del propulsor):

$$C_t = \frac{F_x}{0.5 \rho U^2 S_o} \dots\dots\dots [5]$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 (2R)^4} \dots\dots\dots [6]$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 (2R)^5} \dots\dots\dots [7]$$

donde F_x es la fuerza de sobretensión, “ T ” es el empuje y “ Q ” es el par. “ n ” es la frecuencia de rotación de la hélice y “ S_o ”, que es el área de la superficie mojada que se toma como $S_o = 0,1803 L_{pp}^2$ (L_{pp} es la eslora de proa a popa). Las discrepancias presentadas en estos coeficientes están relacionadas con el error relativo entre el valor calculado y el valor experimental.

En nuestro caso hemos invertido el método, primero usaremos EFD con el túnel de viento y posteriormente comprobaremos con CFD (Figura 1).

Conclusión

De acuerdo a nuestro planteo el problema es el uso inicial de EFD para llegar a un modelo de rugosidad a través de ensayos experimentales en un túnel de viento con medición de variables importantes como velocidad, presión dinámica y fuerza para determinar el modelo para el algoritmo de CFD.

Se pueden citar las referencias (O Pacot et al (2019), Arvin H. Fernando), dónde en la primera el modelo de un parque de turbinas hidro cinéticas que imita el efecto de las resistencias de las máquinas. Es evidente que la presión dinámica juega un papel importante. La importancia de este documento es que el modelo analiza la estela y como afecta a las demás turbinas y en la segunda se realizó una simulación numérica en un tanque determinando líneas de corriente, contorno, presión y se observó y evaluó la velocidad del agua del prototipo.

Finalmente, destacamos que para investigar el efecto de la incrustación de percebes locales y que afectan las características del rendimiento de la turbina hidro cinética, se realizarán simulaciones a escala real en aguas abiertas con condiciones de incrustación, sin avance ya que difiere de un buque y la probeta se ha diseñado con el fin de parecer una turbina colocada en el lugar. Enfatizamos el hecho de que nuestro esfuerzo se dirige a lograr la emulación de las incrustaciones en forma artificial para la modelización en el túnel de viento. Luego, las simulaciones se extenderán en el tiempo y finalmente podremos lograr un algoritmo que permitirá una elección de solución al problema para nuestra zona.

La probeta será colocada en la zona del ingreso al puerto Bahía Blanca. La ventaja de la zona es la posibilidad de medir con un correntógrafo y documentar variables fehacientemente en el lugar.

Referencias

- Soonseok Song, Yigit Kemal Demirel, Mehmet Atlar (2019). An Investigation into the effect of biofouling on full - scale propeller performance using CFD Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering OMAE2019 June 9-14, 2019, Glasgow, Scotland, UK
- Weijun Zhu, Dichen Li. (2024) Models for Wind Tunnel Tests Based on Additive Manufacturing Technology <https://doi.org/10.1007/978-981-99-5877-1> Springer
- Klaus Hufnagel (2022) Wind Tunnel Balances <https://doi.org/10.1007/978-3-030-97766-5> © The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2022 -Springer
- Esteban Ferrer • Adeline Montlaur Editors (2019). Recent Advances in CFD for Wind and Tidal Offshore Turbines - <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11887-7> -© Springer Nature Switzerland AG 2019 -
- Hencheck Albertha (2021). State-Of-The-Art Description Of CFD: Fundamentals To Applications Of Computational Fluid Dynamics (English Edition) Kindle Edition Amazon Services International LLC

- Zied Driss, Brahim Necib, Hao-Chun Zhang Editors (2018) CFD Techniques and Energy Applications <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70950-5> © Springer International Publishing AG 2018
- David C. Wilcox (2006) Turbulence Modeling for CFD Third edition copyright © 2006 by DCW Industries, Inc. ISBN 978-1-928729-08-2 (1-928729-08-8)
- Soonseok Song, Weichao Shi*, Yigit Kemal Demirel, Mehmet Atlar "The effect of biofouling on the tidal turbine performance" <https://www.researchgate.net/publication/334327026> 2019 Do Ligtelijn "Propeller Design Process" Maritime Research Institute Netherlands, Wageningen, The Netherlands Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering,
- Owen, D., Demirel, Y. K., Oguz, E., Tezdogan, T., & Incecik, A. (2018). Investigating the effect of biofouling on propeller characteristics using CFD. *Ocean Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.087>
- Atlar, M., Glover, E. J., Candries, M., Mutton, R. J., & Anderson, C. D. (2002). The effect of a foul release coating on propeller performance. Paper presented at the Marine Science and Technology for Environmental Sustainability, Newcastle upon Tyne, UK.
- Mosaad, M. A. A.-R. (1986). Marine propeller roughness penalties. (PhD), Newcastle University, Newcastle Upon Tyne.
- Atlar, M., Yeginbayeva, I. A., Turkmen, S., Demirel, Y. K., Carchen, A., Marino, A., & Williams, D. (2018). A Rational Approach to Predicting the Effect of Fouling Control Systems on "In-Service" Ship Performance. *GMO SHIPMAR*, 24(213), 5-36.
- Fujisawa, J., Ukon, Y., Kume, K., & Takeshi, H. (2000). Local Velocity Field Measurements around the KCS Model. Retrieved from Tokyo: <http://www.t2015.nmri.go.jp>
- Clauser, F. H. (1954). Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 21(2), 91-108. doi:10.2514/8.2938
- Demirel, Y. K., Uzun, D., Zhang, Y., Fang, H.-C., Day, A. H., & Turan, O. (2017). Effect of barnacle fouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 33(10), 819-834. doi:10.1080/08927014.2017.1373279
- Esteban Ferrer • Adeline Montlaur Editors "Recent Advances in CFD for Wind and Tidal Offshore Turbines" - Springer - 2019 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11887-7>
- P. Marsh, D. Ranmuthugala, I. Penesis, G. Thomas (2015) "Numerical investigation of the influence of blade helicity on the performance characteristics of vertical axis tidal turbines" *Renewable Energy* 81 926-935 *Renewable Energy* 81 (2015) 926e935
- Silva, P., Rio Vaz, D., Britto, V., Oliveira, T., Vaz, J., & Brasil Junior, (2018). A new approach for the design of di user-augmented hydro turbines using the blade element momentum. *Energy Conversion and Management* , 165 , 801814
- Nunes MM, Mendes RCF, Oliveira TF, Junior ACPB (2019) An experimental study on the diffuser-enhanced propeller hydrokinetic turbines. *Renew Energy* 133:840–848. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.056>
- Leonardo P. Chamorro and Fernando Porté-Agel "Turbulent Flow Inside and Above a Wind Farm: A Wind-Tunnel Study" *Energies* 2011, 4, 1916-1936; doi:10.3390/en4111916
- Wittwer, Adrián R.a, Dorado, Rodrigob, Loreda-Souza, Acir M.b, Zuñiga Inestroza, Manuel A.c "Evolución de la estela turbulenta del modelo de un aerogenerador de eje horizontal"
- Soonseok Song Yigit Kemal Demirel Mehmet Atlar "An investigation into the effect of biofouling on full-scale propeller performance using CFD" Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering OMAE2019 June 9-14, 2019, Glasgow, Scotland, UK
- Grigson, C. (1992). Drag losses of new ships caused by hull finish. *Journal of Ship Research*, 36, 182-196.
- Song, S., Demirel, Y. K., & Atlar, M. (2019). An investigation into the effect of biofouling on the ship hydrodynamic characteristics using CFD. *Ocean Engineering*, 175, 122-137.
- Yigit Kemal Demirel, Dogancan Uzun, Yansheng Zhang, Ho-Chun Fang, Alexander H. Day & Osman Turan Effect of barnacle fouling on ship resistance and powering ISSN: 0892-7014 (Print) 1029-2454 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/gbif20> 2017

Joel H. Ferziger Milovan Perić Robert L. Street Computational Methods for Fluid Dynamics Fourth Edition Springer
- 2020 - <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>

Menter, F. R. (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal, 32(8), 1598-1605.

Luo, J. Y., Issa, R. I., & Gosman, A. D. (1994). Prediction of impeller induced flows in mixing vessels using multiple frames of reference. Paper presented at the 8th European conference on mixing; INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS SYMPOSIUM SERIES, Cambridge.

Castro, A. M., Carrica, P. M., & Stern, F. (2011). Full scale self-propulsion computations using discretized propeller for the KRISO container ship KCS. Computers & Fluids, 51(1), 35-47.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.005>

O Pacot, D Pettinaroli, J Decaix and C Munch-Allign "Cost-effective CFD simulation to predict the performance of a hydrokinetic turbine farm" IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 405 (2019) 012037
doi:10.1088/1755-1315/405/1/012037

Arvin H. Fernando, Isidro Antonio Marfori, Dr. Aristotle Ubando, Dr. Ryan Rhay Vicerra "Torque Performance Analysis of a Hydrokinetic Turbine in a Tank Set-up using CFD"