



Influencia del tipo de alabe en el desempeño hidrodinámico de una turbina tipo Darrieus

Influence of type praise in the performance of a turbine type fluid Darrieus

Diana P. Meneses S.¹

Omar D. López M.²

Santiago Laín B.³

Fecha de envío: mayo de 2013

Fecha de recepción: mayo de 2013

Fecha de aceptación: octubre de 2013

Resumen:

El estudio de turbinas de eje vertical ha cobrado gran interés en los últimos años debido a su gran potencial. Herramientas de análisis alternativas a la experimentación, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), están siendo utilizadas para el entendimiento del problema. Este artículo muestra y discute los resultados del estudio computacional paramétrico del perfil alar de los alabes en una turbina Darrieus tipo H. Se evaluó la influencia de dos parámetros del perfil: espesor y curvatura en el desempeño hidrodinámico, estimado por medio de CFD. Se diseñó un experimento factorial 3^2 en el cual cada factor tiene tres niveles: espesor (6, 12 y 15) y simetría/asimetría (00XX, 24XX y 44XX). Las nueve simulaciones finales fueron realizadas en el *software* comercial Fluent, mientras que la malla fue parametrizada en el *software* comercial Gridgen. El desempeño hidrodinámico de la turbina se evaluó mediante el análisis de tres coeficientes adimensionales: coeficiente de momento (C_m), coeficiente de fuerza tangencial (C_t) y coeficiente de fuerza radial (C_n). Los resultados numéricos muestran una gran influencia del espesor del perfil en C_m y C_t , mientras que la asimetría del perfil tiene influencia en C_n , la cual puede ser relevante desde el punto de vista de diseño a fatiga de la turbina.

1 Ing. mecánica, Universidad de los Andes (Colombia) MSc. (c) en Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes (Colombia). Correo electrónico: dp.meneses60@uniandes.edu.co

2 Ing. mecánico, Universidad Industrial de Santander (Colombia), MSc. en Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes (Colombia), Ph.D. en Filosofía, University of Texas at Austin (Estados Unidos). Correo electrónico: od.lopez20@uniandes.edu.co

3 Ciencias Físicas, Universidad de Zaragoza (España), Ph.D. en Mecánica de Fluidos, Universidad de Zaragoza (España). Correo electrónico: slain@uao.edu.co

Palabras clave:

Dinámica de fluidos computacionales, hidrodinámica, turbina de eje vertical, turbina tipo Darrieus

Abstract:

The study of vertical axis turbines has gained great interest in recent years for its great potential. Computational fluid dynamics (CFD) is an alternative analysis tool that is being used for the understanding of the problem. This paper presents and discusses the results of the computational parametric study of the airfoil of the blades in a turbine Darrieus type H. We assessed the influence of two parameters: thickness and curvature on the hydrodynamic performance estimated by CFD. We designed a factorial experiment 3^2 , in which each factor had 3 levels, thickness (6, 12 and 15) and symmetry / asymmetry (00XX, 24XX and 44XX). The 9 final simulations were performed in the commercial software Fluent, while the mesh was parameterized in the commercial software Gridgen. The hydrodynamic performance of the turbine was evaluated by analyzing three nondimensional coefficients: Coefficient of moment (C_m), tangential force coefficient (C_t) and radial force coefficient (C_n). Numerical results show a strong influence of the thickness on C_m and C_t , while the asymmetry of the profile influences on C_n , which can be relevant from the point of view of design fatigue of the turbine.

Keywords:

Computational fluid dynamics, hydrodynamics, turbine vertical axis Darrieus type turbine

1. Introducción

La turbina tipo Darrieus es el modelo más popular de las turbinas de eje vertical. Recibe su nombre por el ingeniero francés Georges Jean

Marie Darrieus, quien patentó dicho diseño en 1931. La turbina fue producida por la compañía estadounidense FloWind. Se caracteriza por tener palas en forma de C, que se unen al eje en los dos extremos y tiene una curva diseñada para alcanzar el máximo rendimiento. Normalmente se construye con dos o tres palas. El rotor no puede arrancar solo, por lo que es necesario usar un sistema de arranque secundario, después de que el movimiento inicia se mantiene gracias a la aerodinámica de las palas. La patente de Darrieus incluía también turbinas con palas verticales (figura 1), que son una modificación de la Darrieus original, también conocida como Giromill, en la cual las palas son orientadas mecánicamente para poder ajustar el ángulo de ataque.

Figura. 1. Vista lateral y superior de una turbina Giromill



Fuente: [1].

Las turbinas de eje vertical tipo Giromill tienen un gran potencial en la producción de energías alternativas, para lo cual es necesario entender las variables más relevantes que influyen en el desempeño. Una de ellas es el flujo alrededor de estas turbinas. La dinámica de fluidos computacional (CFD) constituye una herramienta alternativa a la experimentación que permite el entendimiento de la dinámica del flujo alrededor de estos dispositivos. Esta se reflejaría en un potencial impacto sobre la mejora en el desempeño de las turbinas

verticales. Lain et ál. [2], por ejemplo, realizaron el estudio computacional bidimensional de una turbina de eje vertical de tres palas, con perfil alar NACA0025, y encontraron resultados satisfactorios en los coeficientes de potencia y torque, bastante cercanos a los experimentales reportados por Dai y Lam [3].

El modelo de turbulencia k-w SST fue el utilizado, dado su buen desempeño en este tipo de aplicaciones. Por otra parte, Howell *et al.* [4] realizaron un estudio experimental-computacional de la aerodinámica y rendimiento de una turbina de eje vertical a pequeña escala. De esa experiencia obtuvieron dos conclusiones importantes: experimentalmente, se pudo observar que la rugosidad en el acabado superficial de las palas tiene efectos significativos en el rendimiento y, computacionalmente, se encontró que las predicciones del modelo 3D son significativamente menores que en el 2D, por la presencia de vórtices de punta. En el caso de turbinas hidráulicas de eje vertical, Nabavi [5] desarrolló un estudio computacional del desempeño de una turbina tipo Darrieus de tres palas, la cual era introducida en un ducto para acelerar el flujo libre, y encontró grandes ventajas en esta configuración.

Este artículo muestra los resultados de un estudio paramétrico de la influencia de la geometría del perfil en el desempeño de una turbina vertical de tres palas en condiciones de operación similares a las utilizadas por Lain y otros [2]. Dos aspectos geométricos del perfil (espesor y simetría) son evaluados computacionalmente en tres niveles diferentes, es decir, un experimento factorial 3^2 fue implementado. Los resultados numéricos muestran claramente la influencia de estos parámetros en las variables de desempeño más importantes de la turbina.

2. Metodología

2.1. Parámetros

Para realizar el estudio de la hidrodinámica de la turbina se seleccionaron tres coeficientes adimensionales: coeficiente de momento (C_m), coeficiente de fuerza tangencial (C_t) y coeficiente de fuerza normal (C_n).

C_m es el número adimensional que está relacionado con el torque aerodinámico. Es el torque que hace girar el rotor como respuesta a la fuerza que ejerce el fluido sobre las palas. La ecuación (1) muestra su definición, donde ρ es la densidad del fluido, A_{ref} es el área frontal de la turbina 2RH (H es la envergadura), V es la velocidad de la corriente incidente y R es el radio de la turbina.

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho.V^2.RA_{ref}} \quad (1)$$

C_t (ecuación 2) es el número adimensional referente a la componente de la fuerza resultante sobre el perfil, proyectada en la dirección de la cuerda (F_t). Dicha fuerza es de importancia en este estudio ya que permite entender en qué posición durante el giro dicha fuerza está impulsando la turbina. Es de esperarse que tenga una alta correlación con el torque resultante.

$$C_t = \frac{F_t}{\frac{1}{2}\rho.V^2.RA_{ref}} \quad (2)$$

C_n (ecuación 3) es el número adimensional asociado a la componente de la fuerza resultante sobre el perfil, proyectada en la dirección radial de la turbina (F_n), es decir, ortogonal a la fuerza tangencial. Esta fuerza es importante en el diseño de la turbina porque representa la carga sobre el eje, la cual al ser periódica puede ser causal de daño por fatiga.

$$C_t = \frac{F_n}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 R A_{ref}} \quad (3)$$

Existe una relación para la velocidad lineal y angular que se denomina *tip speed ratio* (ecuación 4). En el estudio se estableció un valor fijo de $\lambda = 1,745$. Con este y con la velocidad angular $\omega = 6,28$ rad/s se obtiene la velocidad del flujo libre $V = 1,62$ m/s.

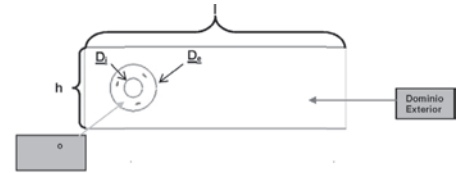
$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (4)$$

El parámetro adimensional, número de Reynolds con base en la cuerda del perfil y la velocidad de flujo libre, se mantiene fijo durante el experimento; su valor es de $Re = 2 \times 10^5$.

2.2. Dominio computacional

El dominio computacional se divide en dos: móvil y exterior. El dominio móvil es el anillo en el cual están contenidas las palas, y rotará con una velocidad angular específica. El dominio exterior corresponde al dominio lejano a la turbina y es fijo. Existe una frontera que separa los dos dominios, denominada interface. Esta frontera permite la continuidad de fluido en cada paso de tiempo de la simulación. La figura 2 muestra un esquema del dominio computacional utilizado; también se indican las diferentes zonas y dimensiones principales utilizadas (tabla 1).

Figura 2. Especificación de parámetros malla



Fuente: elaboración propia.

2.3. Diseño experimental

Se realizó un diseño experimental (DOE) factorial 3^2 ; es decir, fue necesario realizar nueve simulaciones usando el software Ansys-Fluent v.13. Los parámetros que se variaron en este DOE y sus niveles fueron:

- Simetría o asimetría: para simetría se usaron perfiles NACA 00XX y para asimetría 24XX y 44XX. Los dígitos indican la combadura del perfil (para más detalle se puede consultar la nomenclatura NACA de cuatro dígitos en [6]).
- Espesor: se utilizaron espesores correspondientes a 6, 12 y 15 % de la longitud de la cuerda. Las figuras 3 y 4 muestran seis de los nueve diferentes perfiles utilizados.

2.4. Generación de malla

El dominio computacional se enmalla desde los perfiles hacia el dominio exterior. Se inicia generando una malla hiperbólica alrededor del perfil, lo cual se hace con el fin de capturar los gradientes de velocidad en la dirección normal. Esta área es la de mayor relevancia. Para

Tabla 1. Parámetros fijos del experimento

Parámetro turbina		Parámetro dominio	
Radio turbina (R)	0,45 m	Diámetro externo dominio rotacional (De)	2,8 * R
Área de referencia (Aref)	0,63 m	Diámetro interno dominio rotacional (Di)	1,1 * R
Longitud palas	0,7 m	Ancho dominio externo (h)	5 * R
Cuerda	132,75 mm	Largo dominio externo (l)	8 * R
Número palas	3		

Figura 3. Perfiles alares naca 00XX

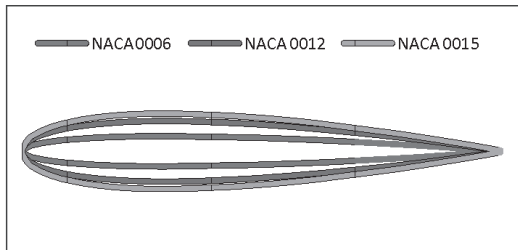
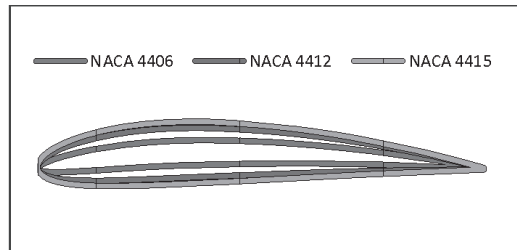


Figura 4. Perfiles alares naca 44XX.



esta parte del dominio se utilizan elementos cuadriláteros, es decir, es una malla estructurada. Luego se procede a enmallar el dominio rotacional, el cual se realiza con elementos triangulares, asegurando que la transición entre la malla estructurada y la no estructurada sea lo más suave posible. Finalmente, se enmalla el dominio exterior, asegurándose con ello una transición suave en la interface.

La figura 5 muestra la malla final utilizada, la cual contiene aproximadamente 70000 elementos, obtenidos a partir de un análisis de convergencia. A pesar de no ser una malla fina, es considerada una malla de tamaño medio, la cual entrega resultados confiables a un costo computacional moderado.

2.5. Condiciones de frontera y modelos utilizados

La figura 6 muestra las diferentes condiciones de frontera establecidas para el dominio computacional.

I. Velocity inlet: es el flujo que ingresa con una velocidad de 1,62 m/s.

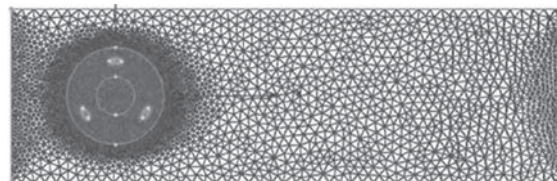
II. Slip walls: superficies horizontales del dominio exterior a las cuales se les asigna un movimiento de translación relativo a los elementos de la malla adyacentes, con velocidad de 1,62 m/s.

III. Pressure outlet: condición de frontera para el flujo del final del dominio exterior, con un valor igual a la presión atmosférica.

IV. Wall: velocidad cero (no deslizamiento), relativa a los elementos adyacentes para las fronteras que definen los perfiles de la turbina.

Se asume un flujo incompresible, newtoniano y turbulento (ecuaciones de Navier-Stokes). El modelo de turbulencia seleccionado para las simulaciones fue el $k-\omega$ SST [7]. La elección se realizó con base en trabajos previos. La simulación de la rotación de la turbina se

Figura 5. Especificación de parámetros de la malla



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Condiciones de frontera para la simulación



Fuente: elaboración propia.

lleva a cabo usando la técnica de *sliding mesh* aplicada al dominio rotacional.

3. Análisis de resultados

3.1. Análisis del experimento

Luego de obtener los resultados, es de vital importancia poder analizar la influencia de los factores estudiados sobre variables medidas. Este proceso de análisis debe realizarse con un fundamento teórico que permita tener una certeza de las afirmaciones que se realicen en torno a estos. Entonces, surge el concepto de diseño de experimentos, que consiste en el análisis estadístico de resultados obtenidos mediante un conjunto de pruebas diseñadas. Con dicho análisis se pueden generar conclusiones válidas y objetivas. Para el análisis se utilizó el *software* Minitab 15, en el cual se puede configurar el tipo de diseño que se desea y se obtienen las gráficas de comportamiento.

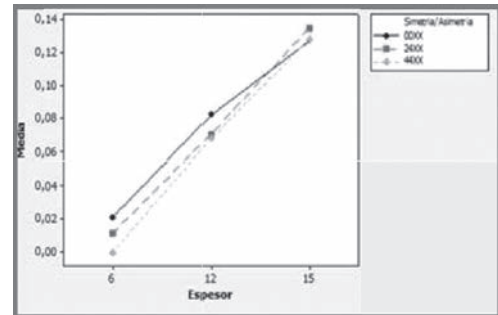
3.2. Resultados cuantitativos

3.2.1. Coeficiente de momento (C_m)

El coeficiente de momento fue hallado en el eje de la turbina. La evolución en el tiempo de este coeficiente es cíclica, como era de esperarse por la naturaleza del movimiento, por lo que es necesario comparar el valor medio de dicha onda para cada uno de los perfiles. El análisis experimental permitió obtener la figura 7, la cual muestra el comportamiento de C_m bajo la influencia de las dos características que se están evaluando; también se obtuvo la figura 8, que muestran el efecto individual que cada característica tiene sobre C_m .

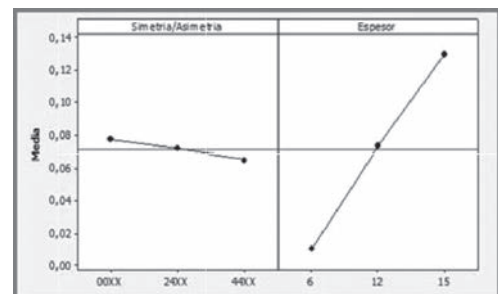
Se evidencia que el espesor es el parámetro que más influye en el coeficiente de momento, es decir, es el que produce la mayor variación en dicho coeficiente. Se desea que el coeficiente de momento promedio sea el mayor posible. Los perfiles que cumplen esta

Figura 7. Gráfica de interacción de simetría/asimetría y espesor sobre coeficiente de momento



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Gráfica de efectos individuales sobre coeficiente de momento



Fuente: elaboración propia.

condición son los de espesor igual o superior al 15% de la cuerda del perfil. También se evaluó un perfil de 25% de espesor, pero los cambios en C_m prácticamente son insignificantes para ese aumento de espesor.

3.2.2. Coeficiente de fuerza tangencial (C_t)

El coeficiente de fuerza tangencial tiene un comportamiento periódico. Se logró establecer que es el mismo en cada pala, solamente que desfasado. Por esta razón se realizó la superposición de las tres palas y se obtuvo el coeficiente total. Las figuras 9 y 10 muestran el comportamiento global e individual para el caso de C_t .

Figura 9. Gráfica de interacción de simetría/asimetría sobre coeficiente de arrastre

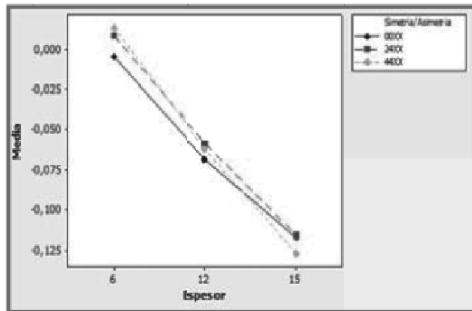
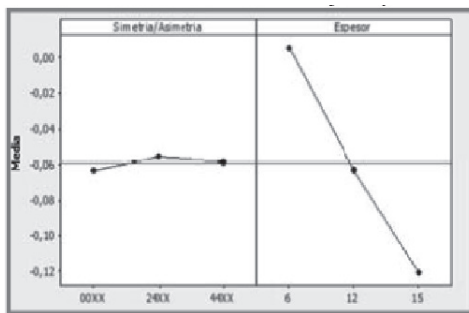


Figura 10. Gráfica de efectos individuales sobre coeficiente de arrastre



Fuente: elaboración propia

Nuevamente, se observa que el espesor es el parámetro que influye en el coeficiente de fuerza tangencial, es decir, es el que produce la mayor variación en dicho coeficiente. Se desea que el coeficiente de fuerza tangencial total sea lo más negativo posible, ya que esto implica que la fuerza tangencial está actuando como fuerza propulsora sobre el perfil. Entonces, se concluye que los perfiles que cumplen esta condición son los de espesor 15% de la longitud de la cuerda.

3.2.3. Coeficiente de fuerza normal (Cn)

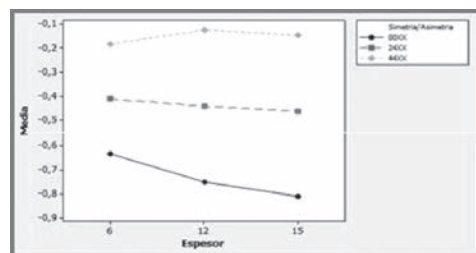
El coeficiente de fuerza normal calculado tiene un comportamiento periódico. Se pudo establecer que es el mismo en cada pala, solamente que desfasado, razón por la cual se realizó la superposición de las tres palas.

En las figuras 11 y 12 se observa que la simetría/asimetría es el parámetro que influye, es decir, es el que produce la mayor variación en C_n . Por los resultados obtenidos para el coeficiente de momento y fuerza tangencial, se tomó la decisión de elegir un perfil espesor 15.

4. Discusión y conclusiones

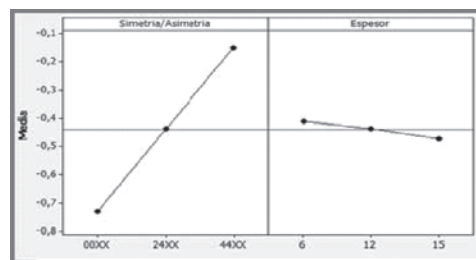
En la elección del perfil existe otro factor de gran importancia: la inercia, ya que esta va a determinar los transitorios. Por esta razón fue necesario evaluar dicho parámetro para los perfiles que se están estudiando. El análisis que se quería realizar con la inercia era ver el cambio porcentual que había cuando se cambiaba el espesor para una misma curvatura, esto con el fin de determinar si al igual que

Figura 11. Gráfica de interacción de simetría/asimetría y espesor sobre coeficiente de sustentación



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Gráfica de efectos individuales sobre coeficiente de sustentación



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Comparación de factores estudiado para curvatura 00XX

	Inercia [g/mm ²]		C _t		C _m		C _n	
NACA 0006	1,203E+09		-0,634		0,021		-0,005	
NACA 0012	2,406E+09	100,06%	-0,751	18,37%	0,082	288,84%	-0,069	194,17%
NACA 0015	3,011E+09	25,13%	-0,810	7,92%	0,128	54,62%	-0,117	70,98%

Tabla 3. Comparación de factores estudiado para espesor 15

	Inercia [g/mm ²]		C _t		C _m		C _n	
NACA 0015	3,011E+09		-0,810		0,128		-0,117	
NACA 2415	3,040E+09	0,97 %	-0,462	57,07%	0,135	5,53%	-0,116	-1,17%
NACA 4415	3,070E+09	1,00 %	-0,147	31,77%	0,128	-5,04%	-0,127	9,56%

Fuente:

para los otros parámetros, el espesor 15 era el que permitía un mejor desempeño a la turbina.

En la tabla 2 se observan los porcentajes de variación en los resultados obtenidos para cada perfil. En color rojo se observan los cambios negativos, según los criterios establecidos para la selección del perfil, y en verde los cambios positivos. Se aprecia un incremento de la inercia (negativo) con una porcentaje de incremento máximo del 100,06%, el cual si se contrasta con el coeficiente de fuerza tangencial, que presenta una variación positiva máxima del 1194,17%, es diez veces menor, por lo que se concluye que el aumento en el coeficiente de fuerza tangencial es más significativo que el incremento en inercia y, por lo tanto, que los perfiles de espesor 15 son los que mejores resultados entregan. Después de elegir el espesor 15, se decidió realizar una tabla con los resultados obtenidos para los tres perfiles con este espesor. Ello con el fin de seleccionar el perfil que mejor desempeño diera a la turbina.

Para la selección del perfil se establecieron criterios sobre los resultados esperados. Estos

criterios son importantes para elegir entre los tres perfiles de espesor 15 que se estudiaron; los criterios en mención son los siguientes:

- El valor del coeficiente de momento es alto.
- El valor del coeficiente de fuerza tangencial es el más negativo posible.
- El valor del coeficiente de fuerza normal es cercano a cero.

En la tabla 3 se observa que la variación de la inercia entre perfiles con curvatura diferente e igual espesor no es significativa, por lo que la elección se hará con base en los otros resultados. Se observa que el perfil NACA 4415 presenta el C_t más negativo y el C_n más próximo a cero; además, tiene un C_m grande. Por lo tanto, se elige dicho perfil como el adecuado para tener mejor eficiencia en la turbina.

Referencias

- [1] J. Antezana, "Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical [en línea], sep. 2004, disponible: <http://www.uv.es/~navasqui/OtrosAerogeneradores/Aerogen-vertical.pdf>.

- [2] S. Lain y C. Osorio, "Simulation and evaluation of a straight-bladed Darrieus-type cross flow marine turbine", *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 69, no. 12, pp. 906-12, dic. 2010.
- [3] Y. Dai Y. y W. Lam, "Numerical study of a straight-bladed Darrieus-type tidal turbine", *ICE-Energy*, .vol. 162, no. 2, pp. 67-76, may. 2009.
- [4] R. Howell, N. Qin, J. Edwards y N. Durrani, "Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine",. *Journal of Renewable Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 412-22, feb. 2010.
- [5] Y. Nabavi, "Numerical study of the duct shape effect on the performance of a ducted vertical axis tidal turbine", Msc Thesis, The University of British Columbia, 2008.
- [6] I. Abbott y A. Von Doenhoff, *Theory of wing sections, including a summary of airfoil data*, Nueva York: Dover Publications.
- [7] W. Malalasekera y H. Versteeg, *An introduction to computational fluid dynamics*, Longman Scientific & Technical, 1995.