

ANÁLISIS PARAMÉTRICO MEDIANTE CFD DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE UN ÁLABE DE TURBINA PARA CONDICIONES DE BAJA VELOCIDAD

Autor 1[*] (Francisco Gracia Fernández), Autor 2[] (Eduardo Álvarez Álvarez,
Antonio José Gutiérrez Trashorras)**

[*] Alumno; [] Tutor(es)**

UO254139@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

En el presente artículo se muestran los resultados obtenidos en la simulación numérica de un perfil elíptico de turbina para una velocidad de corriente de agua y ante distintos ángulos de ataque al mismo. La simulación se realiza con un software CFD cubriendo una gama de ángulos de ataque del flujo y dos espesores de álabe del 9% y el 18% de la cuerda. El modelo de turbulencia utilizado ha sido el Spalart-Allmaras. Se hace un estudio del comportamiento del flujo alrededor del álabe y de los coeficientes de sustentación y arrastre para ambos espesores.

La formación de la burbuja de desprendimiento difiere en el ángulo de ataque del flujo para cada espesor. Los máximos valores de sustentación alcanzados son distintos, siendo mayor para el que presenta mayor espesor, así como igualmente, experimenta mayores valores de arrastre. Los ángulos críticos para cada espesor son distintos, siendo de 11 grados para el de menor espesor y de 13 grados para el espesor mayor.

ABSTRACT

In this article is shown the results which have been got in the numerical simulation of an elliptic airfoil. The simulation has been realized with a CFD software in a range of angles of attack of the flow and two thickness of 9% and 18% of the chord. The

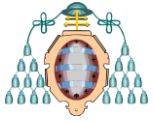
turbulence model used was Spalart-Allmaras. it is done a research of the behavior of the flow around the airfoil and as well, it is done a research of the lift and drag coefficients for both thickness.

The formation of separation bubble is different for each thickness. The maximum values of lift and drag are different, being bigger for the thickness of 18% of the chord. The critical angles are different for each thickness, being of 11 degrees for the thickness of 9% of the chord and 13 degrees for the thickness of 18%

INTRODUCCIÓN

El presente artículo realiza el estudio de un álabe de perfil elíptico en 2-d para condiciones de baja velocidad y con distintos ángulos de ataque del flujo. Dicho estudio se realiza gracias al uso de un software CFD (dinámica de fluidos computacional) que permite resolver las ecuaciones de Navier-stokes con una modelización de la turbulencia gracias al promediado de las tensiones de reynolds (RANS).

El estudio de las geometrías elípticas supone un pequeño paso adelante en busca de los límites que presentan los códigos de simulación numérica. Estas son secciones simétricas cuya geometría es conocida en función del espesor (figura 1). No obstante, a diferencia de los perfiles parabólicos que también son simétricos, la pendiente de los



elípticos cuenta con dos singularidades que se corresponden con el borde de ataque y el de salida. De esta manera, en dichos puntos la pendiente se vuelve infinita, lo que puede acarrear problemas tanto a la hora de caracterizar el flujo en estas zonas como en reproducir su geometría.

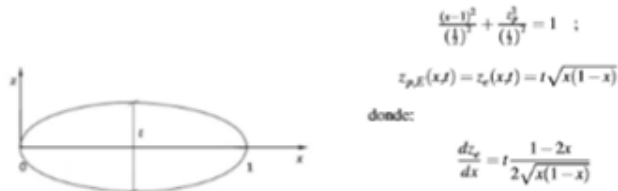


Figura 1. Geometría de una elipse.

Los álabes elípticos se pueden considerar como un ala que cuando experimenta un movimiento relativo respecto al fluido en movimiento sufre una fuerza, en este caso hidrodinámica, perpendicular a la velocidad y que es denominada fuerza de sustentación (L) (Lastra, 2014).

Aunque estos perfiles han sido poco estudiados, presentan la característica de que son capaces de experimentar sustentación en ambos sentidos de giro (horario y anti-horario) gracias a su simetría respecto al eje longitudinal. Sin embargo, el hecho de que no presenten filo en el borde de salida y de que tengan una ausencia de curvatura, hacen que el máximo coeficiente de sustentación (C_L) que son capaces de alcanzar sea menor y que su coeficiente de arrastre (C_d) aumente con respecto a otros tipos de perfiles, ya que la propia sustentación induce un arrastre.

El ángulo de ataque es uno de los parámetros con más influencia sobre el C_L , de forma que la sustentación del álabes aumenta a medida que este aumenta, hasta un determinado ángulo (denominado ángulo crítico), que puede variar en función de la geometría y de la velocidad del fluido, donde la sustentación alcanza su máximo. Una vez se sobrepasa este citado ángulo se produce la entrada en pérdida (Stall) ya que la capa límite turbulenta se desprende cada vez más cerca del borde de ataque.

La figura 2 muestra un álabes elíptico con las dimensiones principales y en 3 dimensiones.

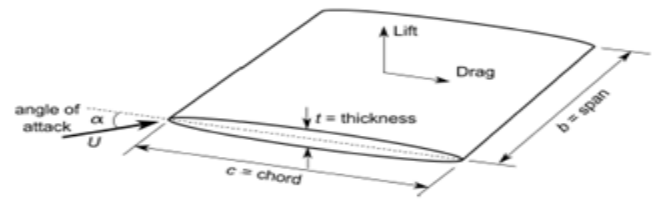


Figura 2. Álabes elíptico en 3-D. (Lastra, 2014)

Una de las peculiaridades de este tipo de perfiles es que, bajo la influencia de un gradiente de presiones adverso en la cara de succión puede producirse un desprendimiento de la capa límite en una zona muy cercana al borde de ataque, para ángulos de ataque del flujo no muy elevados. Cuando esto sucede una capa límite turbulenta podría aparecer dando lugar a un desprendimiento en burbuja, con una zona de circulación de flujo de vórtice inverso (figura 3). La zona interior de la burbuja denominada "Dead Air region" es característica de la separación de flujo laminar (Lastra, 2014).

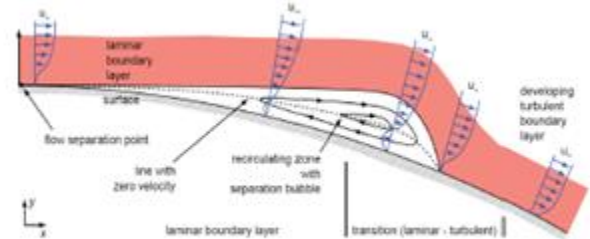
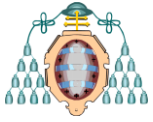


Figura 3. Desprendimiento en burbuja sobre el álabes. (Lastra, 2014)

El objetivo de este estudio es conocer mejor el comportamiento de este tipo de álabes en condiciones de baja velocidad, cuando varía el ángulo de ataque y su espesor relativo a la longitud de la cuerda. Para así arrojar más luz sobre su funcionamiento y facilitar su uso en aquellas aplicaciones en las que sea necesario.

MÉTODO TRABAJO

Las simulaciones numéricas han sido realizadas con el código comercial ANSYS®, en su módulo FLUENT®. Este código resuelve las ecuaciones de Navier-stoke (Ec.1 y 2), en este caso para el agua (fluido incompresible), por un método de volúmenes finitos. En la actualidad es uno de los códigos de CFD más extendidos y permite utilizar



una amplia gama de modelos de turbulencia, tantos basados en la ley de capa logarítmica (métodos k-épsilon y rsm) como bicapa (Spalart-Allmaras y k-omega) (E. Blanco, 2005).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Ec.1}$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \Delta \bar{u}_i - \frac{\partial \rho \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad \text{Ec.2}$$

El modelo utilizado fue el Spalart-Allmaras de una ecuación, ya que este modelo bicapa es uno de los métodos RANS que mayor precisión genera cuando se trata de caracterizar el desprendimiento de la capa límite turbulenta. Aunque puede fallar en predecir el desprendimiento en burbuja en la cara de succión cercana al borde de ataque (A. Benazza, 2005).

- *Geometría y dimensiones*

La geometría se realizó en dos dimensiones, formada por dos partes. Una primera consta de un contorno, a modo de canal de experiencia hidrodinámica, y una geometría circular concéntrica al centro del álabe (figura 4). Las distancias estipuladas desde los ejes a cada uno de los bordes de la geometría en función de la longitud de cuerda del álabe (c), fueron: 11,5c para el arco de circunferencia, 12,5c para los bordes superior e inferior y 21c para el borde trasero de la geometría.

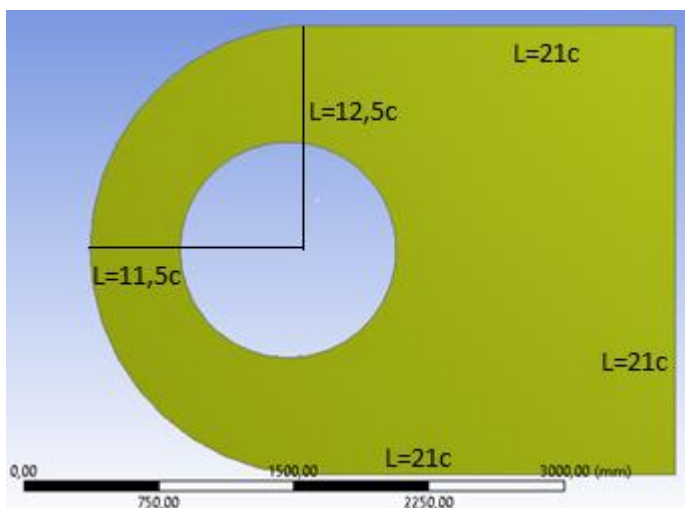


Figura 4. Contorno y primera geometría circular.

La segunda parte está formada por el propio álabe y una segunda geometría circular, nuevamente, concéntrica al centro del mismo y con las mismas dimensiones que la anterior (figura 5).

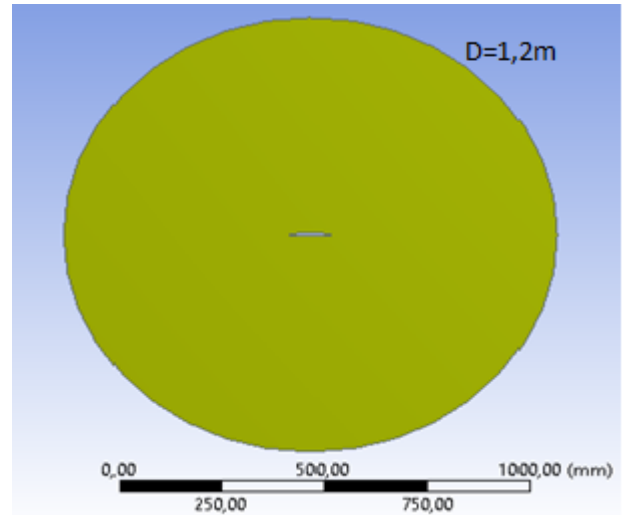
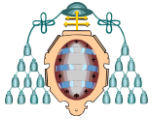


Figura 5. Álabe y segunda geometría circular.

Las dimensiones del álabe fueron de 0,1 m de cuerda y dos espesores del 9% y el 18% de la misma respectivamente. Las dos geometrías circulares poseen un diámetro de 1,2 m, suficientemente separadas del centro del álabe para así evitar que cuando la malla interna gire, con respecto al centro del álabe, este se vea afectado por la aceleración de coriolis pudiendo afectar a los resultados obtenidos.

- *Mallado*

La parte más importante de la simulación es sin duda la realización del mallado. De esta manera, se hicieron tres tipos de mallado distintos, como se observa en las figuras 6, 7, 8; y cuyas dimensiones vienen dadas en la tabla 1. El mallado de la parte más externa (Boundary Luar) de la geometría, consta de cuadriláteros con unas dimensiones que hacen que esta malla sea más gruesa, ya que en dicha zona se necesita una precisión menor. El mallado de la parte interna (Rotating Region) consta de dos tipos de mallado; el primero y más externo al álabe está formado por cuadriláteros de un tamaño del orden de 10 veces menor que los anteriores, el segundo es el denominado mallado de turbulencia (o capas de cebolla). Este último



permite simular la turbulencia y el desprendimiento de la capa límite (figura 9). El mallado es rectangular con un aumento de espesor desde la capa más cercana al álabe hasta la capa final. El espesor de dicha primera capa fue seleccionado siguiendo el criterio denominado y^+ que para el método Spalart-Allmaras debe de tener un valor próximo a uno.

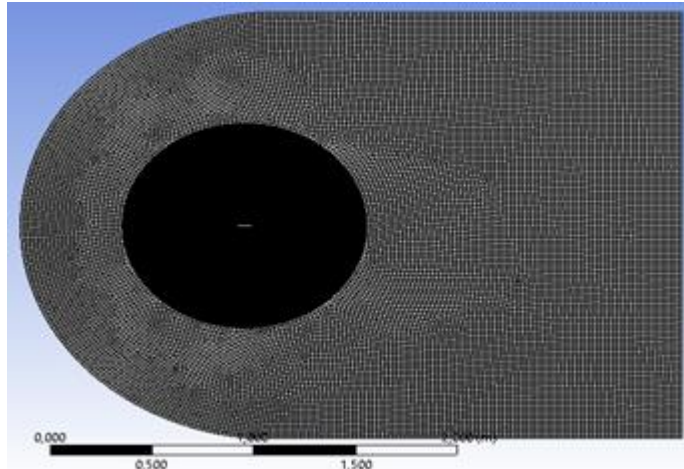


Figura 6. Detalle general del mallado.



Figura 7. Mallado de la parte interior.

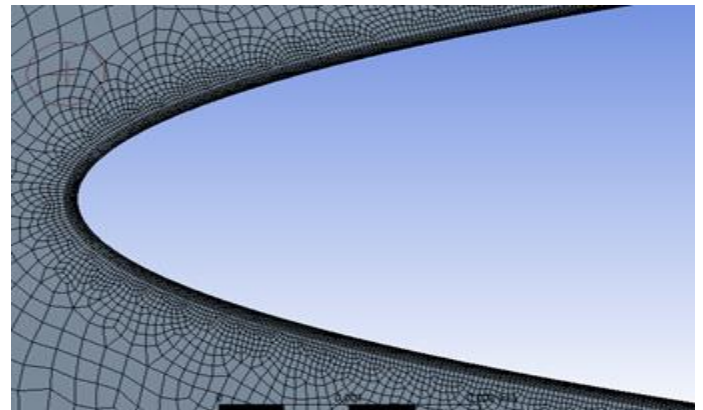


Figura 8. Vista del mallado alrededor del álabe.

Zona de mallado	Tipo	Dimensiones
Boundary Luar	Cuadriláteros	2E-02
Rotating Region	Cuadriláteros	2E-03
Turbulencia	Espesor primera capa	2E-05
	Ancho primer elemento	2,5E-05

Tabla 1. Dimensiones y tipo de mallado.

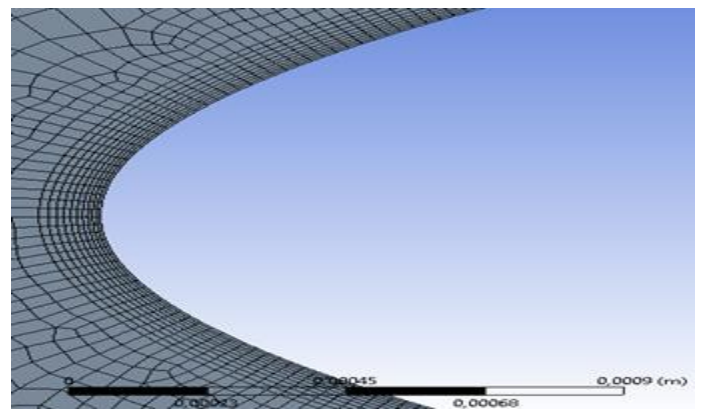
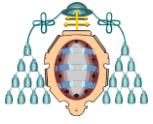


Figura 9. Mallado de turbulencia.



- **FLUENT®**

En el propio módulo FLUENT® se estableció una interfaz formada por las dos geometrías circulares anteriormente descritas, con el fin de que el programa resolviera cada uno de los ángulos de ataque del flujo "paso a paso". La velocidad de giro establecida para la zona interior fue de 1 revolución por hora, lo suficientemente baja para hacer una simulación de todos los ángulos de ataque como si el álabe fuera estático. Por otra parte, cabe mencionar que durante toda la simulación el flujo libre se desplazó en el sentido positivo de las x, ya que al realizar la interfaz lo que realmente giraba era el álabe y la geometría interior.

La declaración de las distintas zonas de la geometría fue: velocidad de entrada (Velocity inlet) para el arco de circunferencia, simetría (Symmetry) para los bordes superior e inferior, salida de presión (Pressure outlet) para el borde trasero, y álabe para la geometría alar.

Los criterios de convergencia para los residuos de las variables fueron inferiores a 1e-05 para conseguir una correcta convergencia de la solución y asegurar una correcta caracterización del comportamiento del flujo sobre el álabe. La simulación se realizó para una velocidad de 0,5 m/s, es decir, para un número de Reynolds laminar ($Re < 10^5$) (Ec.3)

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \text{Ec.3}$$

Como antes se ha mencionado, debido a la peculiaridad del desprendimiento en burbuja, estos métodos pueden cometer errores a la hora de calcular los coeficientes de sustentación (C_i), arrastre (C_d); Así como caracterizar el fenómeno de comportamiento del flujo en determinados ángulos de ataque. Por ello, en todos los ángulos donde la caracterización de dicho fenómeno no fue la adecuada, se realizó una simulación individual de cada ángulo a fin de obtener una mayor precisión de los valores de estos coeficientes. Para realizar esta simulación se utilizó un paso temporal muy bajo (entre 0,004 y 0,008 segundos) en modo no estacionario, pero con el álabe en una posición fija. Para el cálculo del tamaño del paso temporal (Δt) se utilizó el número de Strouhal ($St = 0,1-0,2$), ya que la simulación se hizo con un flujo libre. Con

esto se consigue mejorar la convergencia de la solución y lograr una mejoría en la caracterización de su comportamiento.

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad \text{Ec.4}$$

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad \text{Ec.5}$$

$$St = \frac{f l}{v} = \frac{l}{\Delta t v} \quad \text{Ec.6}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como antes se ha mencionado, se realiza el estudio de un álabe elíptico para dos espesores distinto (del 9 y el 18 % de la cuerda) y una longitud de cuerda de 0,1 m para varios ángulos de ataque del flujo libre. De esta forma, se estudió la estela producida por el álabe, el desprendimiento de la capa límite, el desprendimiento en burbuja, y los coeficientes de sustentación y arrastre. También se hace una observación de lo que sucede cuando el flujo libre incide de forma perpendicular al eje longitudinal del álabe, para así conocer porque este tipo de turbinas dan problemas en el arranque para 90 grados de ángulo de ataque del flujo.

- *Ángulo de ataque del flujo de 1 grado*

Las siguientes imágenes (figuras 10, 11 y 12) muestran el comportamiento del flujo para el álabe con espesor de 9% de la cuerda en el borde de ataque y en el de salida, así como su estela.

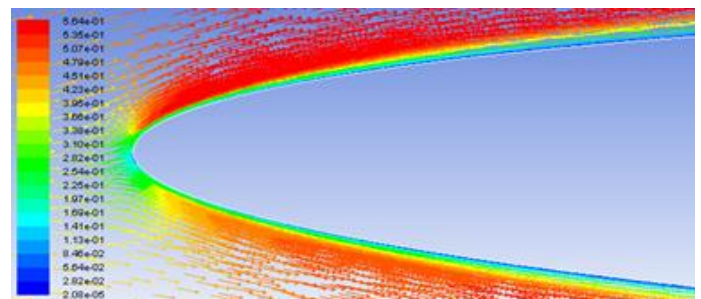


Figura 10. Borde de ataque para 1 grado y espesor del 9% de la cuerda.

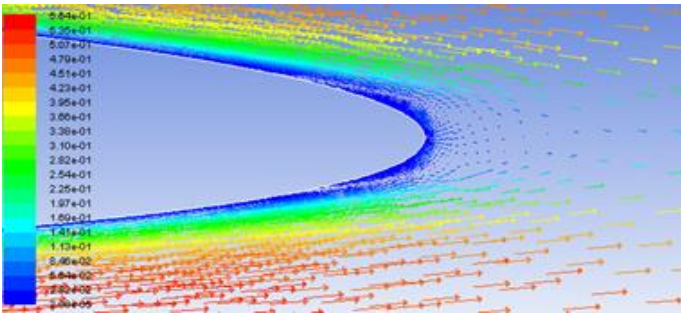
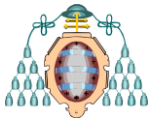


Figura 11. Borde de salida para 1 grado y espesor del 9% de la cuerda.

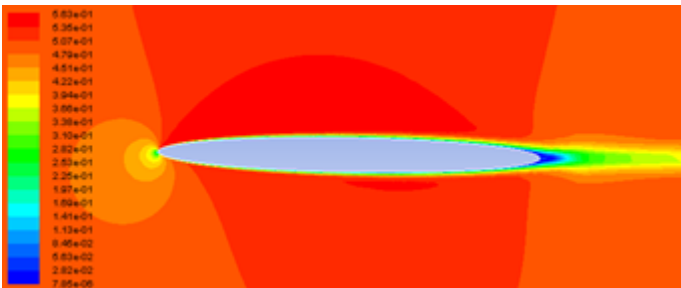


Figura 12. Estela para 1 grado y espesor del 9% de la cuerda.

Como se puede observar, para este ángulo de ataque no se aprecia la existencia de la burbuja de desprendimiento (borde de ataque). Sin embargo, se puede ver el que punto de estancamiento (mínima velocidad y máxima presión) se localiza en el punto medio del borde de ataque, pero ligeramente desplazado hacia la zona de presión (parte inferior del álabe).

En cuanto a lo que se refiere al borde de salida no se aprecia desprendimiento de la capa límite, ya que el efecto predominante es la recirculación del flujo tanto en la zona de succión como de presión debido a la formación de remolinos cuando el flujo abandona el borde de salida.

En la estela (figura 12) se aprecia una reducción de velocidad de flujo a la salida del álabe, pero en una zona muy compacta, y como este se va acelerando a medida que se distancia del borde de salida; ya que entre más se aleja más influenciado se ve por la acción del flujo libre.

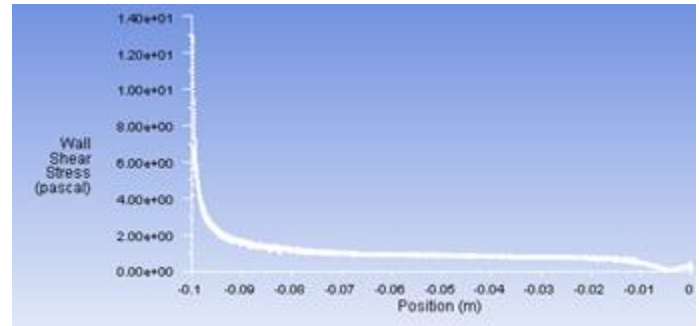


Figura 13. Tensión de cizalladura para 1 grado y espesor del 9% de la cuerda.

La figura 13 muestra la cizalladura para dicho ángulo de ataque. No se aprecia una diferencia de los valores de tensión entre la cara de succión y presión al final del álabe; esto es debido a que no hay desprendimiento de la capa límite turbulenta.

Las figuras 14,15 y 16 muestran, nuevamente, el borde de ataque, de salida y la estela, pero para un espesor del 18% de la cuerda.

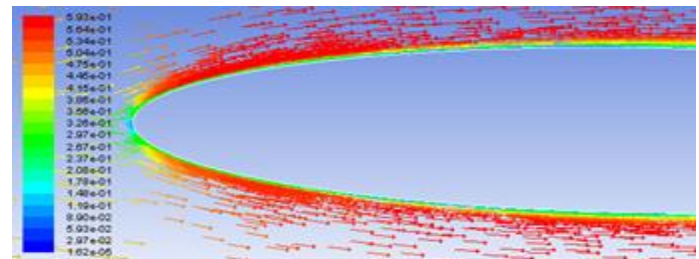


Figura 14. Borde de ataque para 1 grado y espesor del 18% de la cuerda.

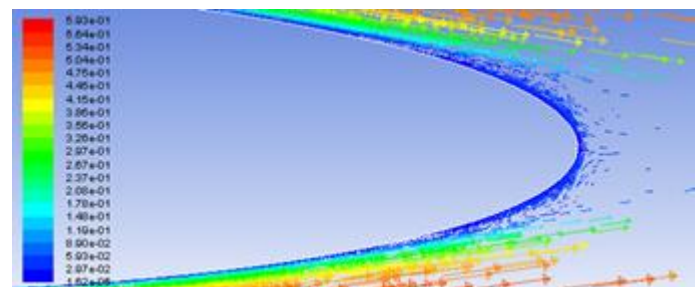


Figura 15. Borde de salida para 1 grado y espesor del 18% de la cuerda.

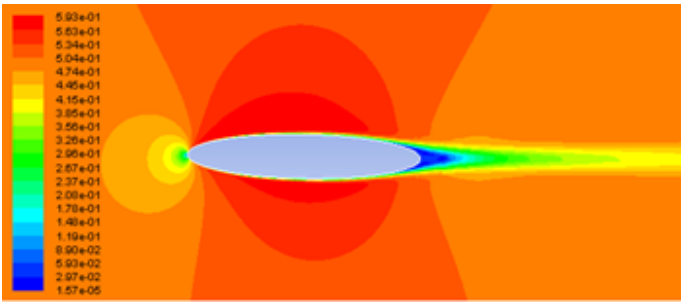
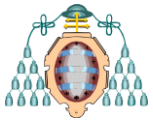


Figura 16. Estela para 1 grado y espesor del 18% de la cuerda.

Para el álabe de espesor del 18% de la cuerda, en cuanto a lo que se refiere al borde de ataque, de salida y la estela formada, no se aprecia prácticamente ninguna diferencia con el anteriormente analizado. Una peculiaridad podría ser que el ancho de estela a la salida del borde de ataque es mayor, lo cual es lógico, ya que ambos espesores presentan un ancho de estela en este ángulo de ataque muy similar a su magnitud de espesor.

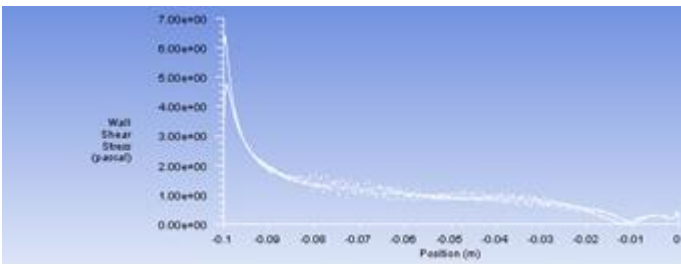


Figura 17. Tensión de cizalladura para 1 grado y espesor del 18% de la cuerda.

En la figura 17 se observa la cizalladura para el espesor de 18% de la cuerda. Se observa una recirculación del flujo a la salida en la cara de presión y un ligero desprendimiento de la capa límite en la cara de succión situado a $-0,0125$ m.

- *Ángulo de ataque del flujo de 5 grados*

Para un ángulo de ataque de 5 grados y un espesor de álabe de 9% de la cuerda se forma la bola de desprendimiento (figuras 18 y 19). Como antes se dijo, debido al desprendimiento de la capa límite laminar en una zona cercana al borde de ataque. Este fenómeno no tiene lugar para el álabe de espesor del 18% de la cuerda (figura 20). Probablemente debido a un mayor redondeo del mismo en dicho borde.

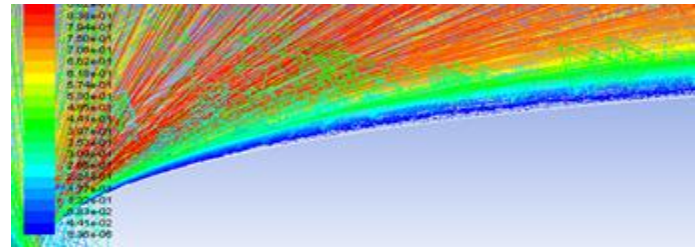


Figura 18. Desprendimiento en burbuja para 5 grados y espesor del 9% de la cuerda.

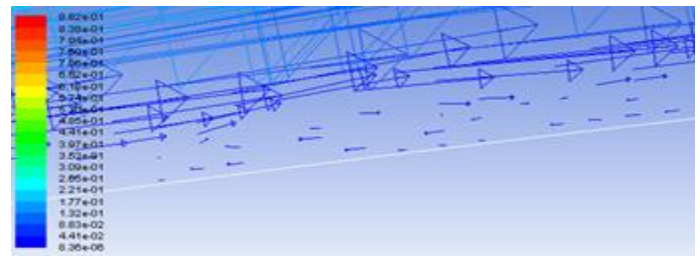


Figura 19. Detalle del desprendimiento en burbuja para 5 grados y espesor del 9% de la cuerda.

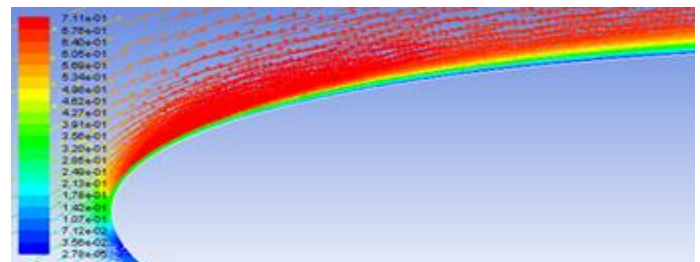


Figura 20. Borde de ataque para 5 grados y espesor del 18% de la cuerda.

Las figuras 21 y 22 muestran la tensión de cizalladura a lo largo del álabe para los espesores del 9% y el 18% de la cuerda respectivamente.

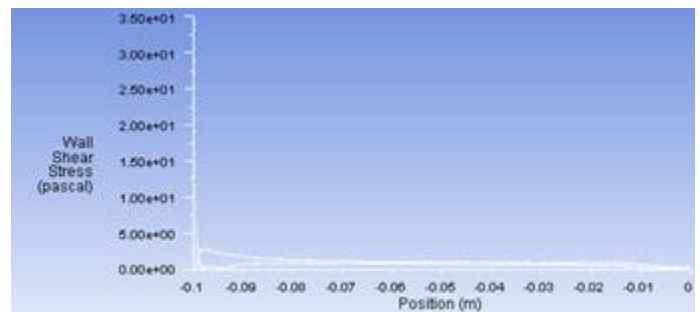


Figura 21. Tensión de cizalladura para 5 grados y espesor del 9% de la cuerda.

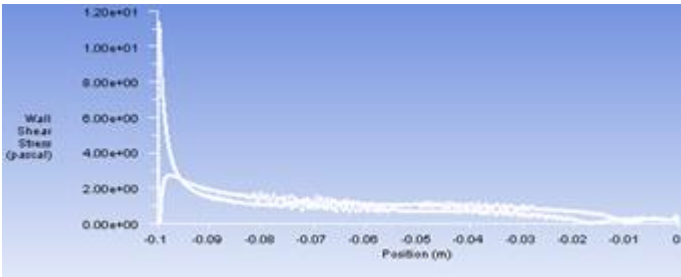
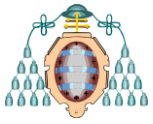


Figura 22. Tensión de cizalladura para 5 grados y espesor del 18% de la cuerda.

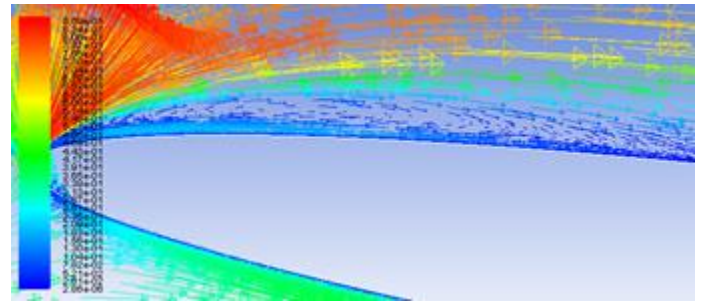


Figura 24. Desprendimiento en burbuja para 8 grados y espesor del 9% de la cuerda.

En la figura 21 se aprecia la formación de la bola de desprendimiento aproximadamente en -0,0975m. Para el espesor del 18% de la cuerda se ve como el desprendimiento de la capa límite turbulenta se ha alejado del borde de salida con respecto al ángulo de ataque de 1 grado (donde prácticamente no se aprecia). Situándose en -0,02 m de distancia. Esto indica que, como antes se mencionó, el desprendimiento de la capa límite turbulenta se va produciendo a una distancia más cercana al borde de ataque a medida que el ángulo de ataque del flujo aumenta.

En lo que se refiere a la estela, las figuras 25 y 26 muestran dicho fenómeno para ambos espesores del álabe.

Cabe destacar como para el espesor del 9% de la cuerda en el punto -0,0925 m se da una reunión de la capa límite, ya turbulenta, con la superficie de la zona de succión del álabe. Esto ocurre porque, aunque los flujos turbulentos no se autosustentan si intercambian momento con el flujo libre, lo que hace que sean capaces de vencer el gradiente de presiones que se da en dicha cara produciéndose un "reattachment".

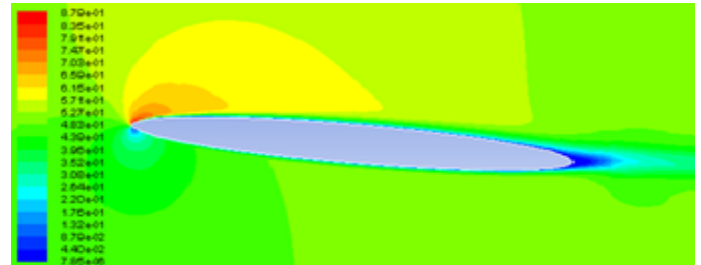


Figura 25. Estela para 5 grados y espesor del 9% de la cuerda.

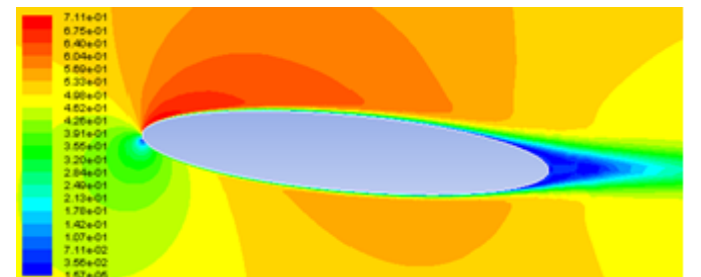


Figura 26. Estela para 5 grados y espesor del 18% de la cuerda.

Como se puede apreciar en las figuras 23 y 24 las dimensiones del desprendimiento en bola van aumentando con el ángulo de ataque del flujo, hasta un determinado ángulo en el cual esta desaparece.

En ambas figuras se aprecia que las zonas de velocidad reducida son muy similares a la que se dan en el ángulo de ataque de 1 grado. Sin embargo, la longitud de la estela es relativamente mayor. De nuevo a medida que el flujo se aleja del borde de salida va aumentando su velocidad debido a una mayor influencia del flujo libre.

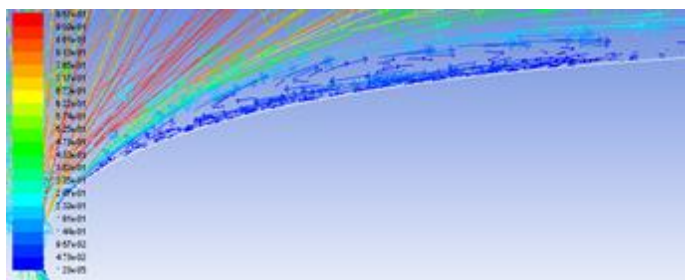
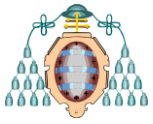


Figura 23. Desprendimiento en burbuja para 6 grados y espesor del 9% de la cuerda.

- **Ángulo crítico (máxima sustentación)**

El ángulo crítico es aquel en el que la sustentación del álabe alcanza su máximo valor. Cuando esto sucede el desprendimiento de la capa límite



turbulenta se sitúa aproximadamente a la mitad de la cara de succión del álabe. Una vez se sobrepasa este denominado ángulo el álabe comienza a entrar en pérdida (Stall), disminuyendo su coeficiente de sustentación y aumentando su coeficiente arrastre con el aumento del ángulo.

Para el álabe con espesor de 9% de la cuerda el ángulo crítico se da en 11 grados del ángulo de ataque del flujo. Sin embargo, para el álabe con espesor de 18% de la cuerda el ángulo crítico se da en 13 grados del ángulo de ataque del flujo.

En la figura 27, se aprecia el desprendimiento de la capa límite turbulenta para el álabe con espesor del 18% de la cuerda. La capa límite se desprende hacia la mitad del álabe. Cabe destacar la existencia de una zona de desprendimiento en burbuja (figura 28) para este ángulo.

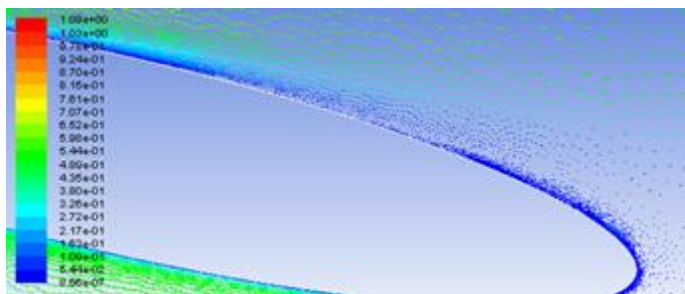


Figura 27. Desprendimiento de capa límite para 13 grados y espesor de 18% de la cuerda.

En lo que se refiere a la estela (figura 29) se ve que el ancho de la misma ha aumentado con respecto a ángulos de ataque menores. Esto se debe a que el desprendimiento de la capa límite turbulenta se aleja cada vez más del borde de salida. Además, la zona de velocidades reducidas es mucho mayor que para el ángulo de 5 grados y la zona de fluido que ocupa la estela necesita mucha más separación del borde de salida para acelerarse.

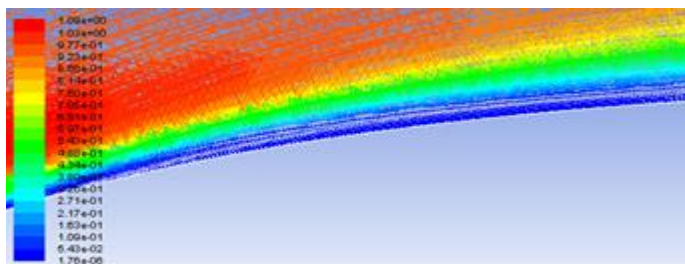


Figura 28. Desprendimiento en burbuja para 13 grados y espesor de 18% de la cuerda.

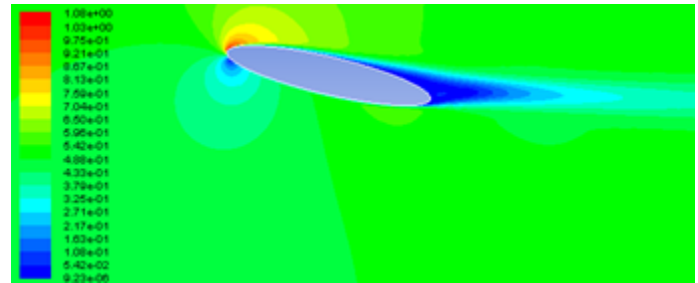


Figura 29. Estela para 13 grados y espesor del 18% de la cuerda.

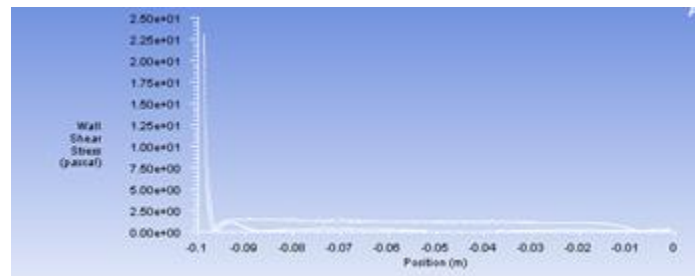


Figura 30. Tensión de cizalladura para 13 grados y espesor del 18% de la cuerda.

Como se observa en la figura 30, el desprendimiento en burbuja va desde -0,0975 m hasta -0.0825 m. El desprendimiento de la capa límite comienza aproximadamente -0.045m. Si el ángulo de ataque sigue aumentando, el desprendimiento de la capa límite turbulenta se irá desplazando hacia el borde de ataque, hasta llegar prácticamente a desprenderse en zonas muy cercanas a él.

Sucede una peculiaridad a la hora de representar el comportamiento del flujo para el álabe con espesor de 9% de la cuerda y es que, en la figura 31 parece que hay un desprendimiento de la capa límite desde el borde de ataque, esto no es cierto. Lo que sucede es que el final del desprendimiento en burbuja se acerca mucho a la mitad del álabe por la cara de succión y el desprendimiento de la capa límite, igualmente, se aproxima en gran medida a esa misma zona; de forma que el "reattachment" o reunión se debería de dar en una zona muy pequeña entre el fin del desprendimiento en burbuja y el inicio del desprendimiento de la capa límite turbulenta. El método utilizado no ha sido capaz de caracterizar este fenómeno. Sin embargo, sí que es capaz de calcular el coeficiente de sustentación y de arrastre con unos valores aceptables.

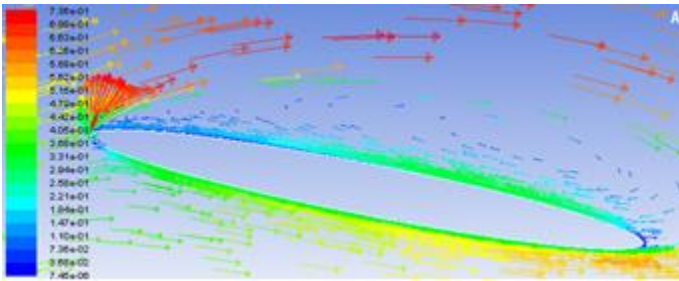


Figura 31. Comportamiento del flujo para 11 grados y espesor del 9% de la cuerda.

- *Ángulo de ataque del flujo de 12 grados*

A diferencia de lo que ocurre para el espesor del 9% de la cuerda, el desprendimiento en bola para el álabe con el 18% de la misma, aparece con un ángulo de ataque del flujo de 12 grados. Es decir, con este espesor el flujo necesita atacar la superficie con un ángulo mayor para que se produzca el desprendimiento de la capa límite laminar en zonas cercanas al borde de ataque. Como antes se dijo, debido probablemente a que su borde de ataque es más redondeado.

Además, como se acaba de indicar en el punto anterior, el álabe de estas dimensiones aún no ha llegado a su ángulo crítico; mientras que el de menor espesor ya está experimentando la entrada en pérdida.

Las figuras 32 y 33 muestran la bola para dicho álabe con espesor del 18% de la cuerda.

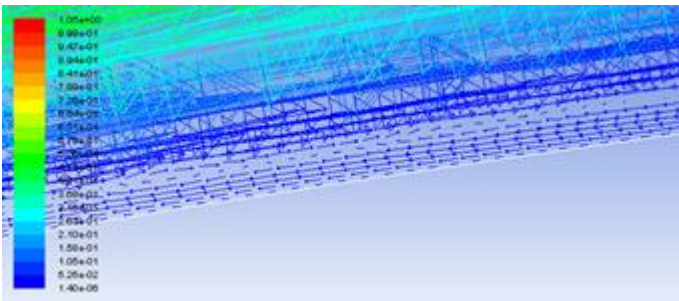


Figura 32. Detalle del desprendimiento en burbuja para 12 grados y espesor del 18% de la cuerda.

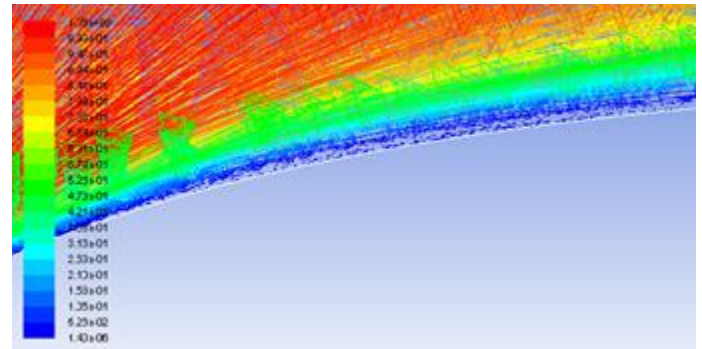


Figura 33. Desprendimiento en burbuja. para 12 grados y espesor del 18% de la cuerda.

El desprendimiento en bola comienza aproximadamente en $-0,0975\text{m}$ y desaparece hacia $-0,0875\text{ m}$ (figura 34), ligeramente menor que la que se da para 13 grados y con una menor zona de acción. El desprendimiento de la capa límite turbulenta se da en -0.035 m , produciéndose a partir de ahí la recirculación del flujo.

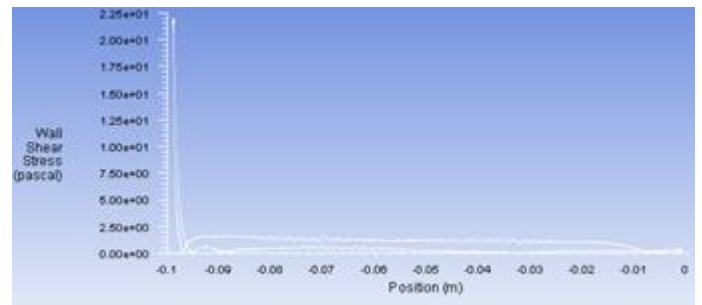


Figura 34. Tensión de cizalladura para 12 grados y espesor del 18% de la cuerda.

- *Ángulo de ataque del flujo de 90 grados*

Cuando un álabe es atacado por un flujo perpendicular a su eje longitudinal (90 grados) se podría decir que este pierde su condición de álabe, dar la máxima sustentación con el mínimo arrastre, y se convierte en un "muro". Para este ángulo de ataque el coeficiente de sustentación (C_l) se hace mínimo (prácticamente despreciable) y su arrastre (C_d) se maximiza.

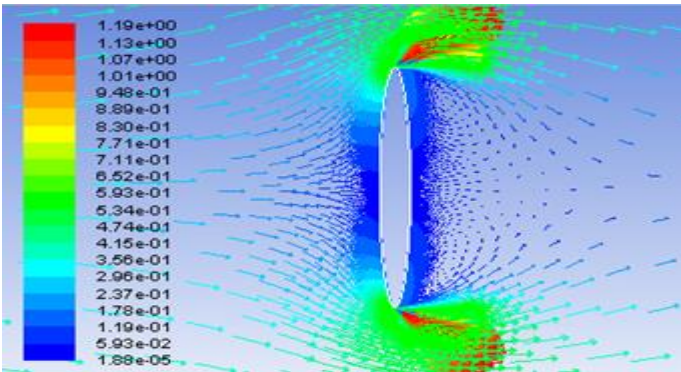


Figura 35. Comportamiento del flujo para 90 grados y espesor del 9% de la cuerda.

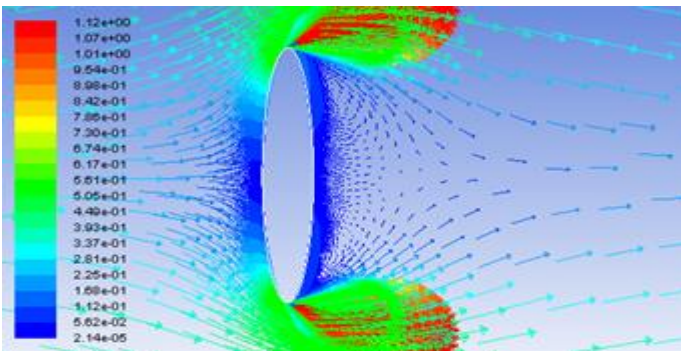


Figura 36. Comportamiento del flujo para 90 grados y espesor del 18% de la cuerda.

En las figuras 35 y 36 se aprecia una gran zona de turbulencias en la cara de succión del álabes. El flujo no es capaz de seguir el contorno de los álabes, desprendiéndose en zonas cercanas al borde de ataque y salida por la cara de presión. Se da una gran zona de remolinos, con una recirculación de flujo de velocidad reducida, que se desplaza en sentido horario desde el borde ataque del álabes al centro del mismo y en sentido antihorario desde el borde de salida del álabes al centro de este.

La velocidad tanto en las zonas cercanas al borde de ataque como de salida aumentan dando lugar a una zona de bajas presiones situada en dichos puntos (figuras 37 y 38) Debido a esa zona de bajas presiones la sustentación que experimentan ambos álabes es prácticamente nula (0,0005 para el espesor del 9% de la cuerda y 0,001 para el espesor del 18% de la cuerda), ya que esta es perpendicular al flujo libre, y por tanto en este caso, paralelas a los ejes longitudinales de los mismos.

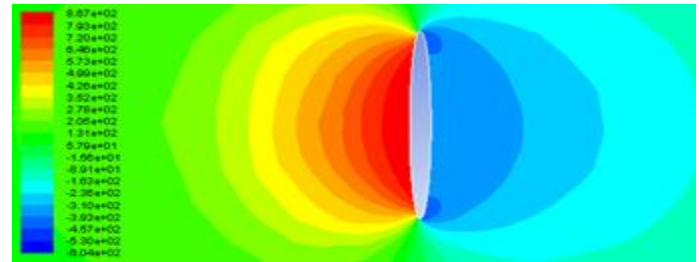


Figura 37. Presión estática para 90 grados y espesor del 9% de la cuerda.

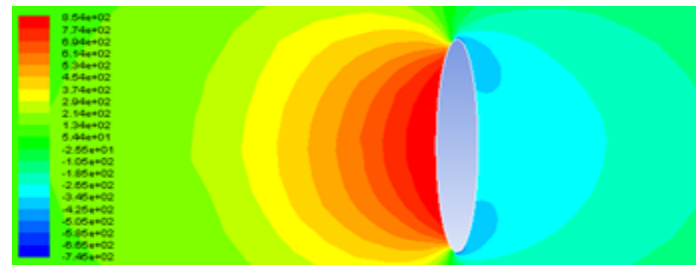


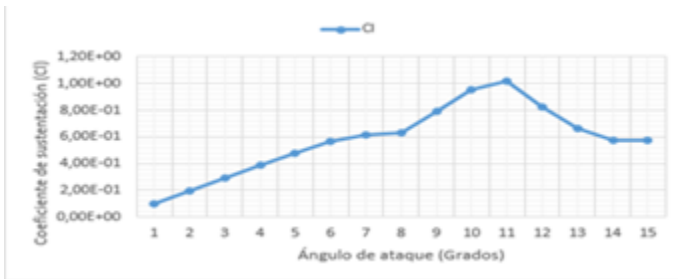
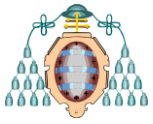
Figura 38. Presión estática para 90 grados y espesor del 18% de la cuerda.

Por otro lado, como se puede observar en las figuras, las presiones sobre la cara de presión de los álabes son muy elevadas. Esta origina que el arrastre en esta posición sea muy grande (0,95 para el espesor del 9% de la cuerda y 0,98 para el espesor del 18% de la cuerda), haciendo que el rendimiento de una supuesta turbina disminuya en gran medida.

- *Coefficientes de sustentación (C_l) y arrastre (C_d)*

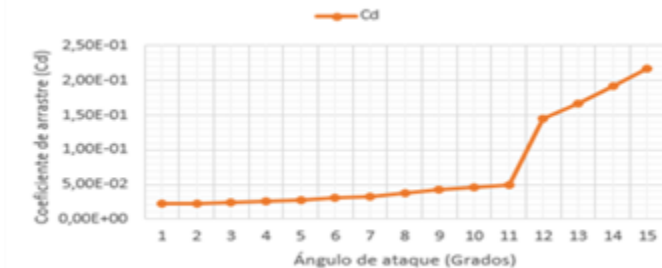
Los coeficientes de sustentación Y arrastre para ambos espesores se muestran en las siguientes gráficas.

Como se puede observar en la gráfica 1, el coeficiente de sustentación para el espesor del 9% de la cuerda experimenta una rápida subida hasta los 11 grados (ángulo crítico). A Partir de este punto comienza la entrada en pérdida, y entre más aumente el ángulo de ataque menor será la sustentación.



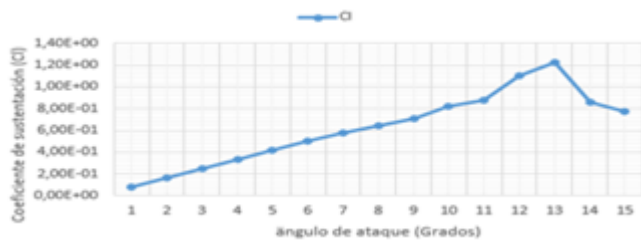
Gráfica 1. Coeficiente de sustentación para el espesor del 9% de la cuerda.

En cuanto al coeficiente de arrastre (gráfica 2) permanece prácticamente constante hasta el ángulo crítico, donde experimenta un rápido crecimiento a medida que aumenta el ángulo de ataque.



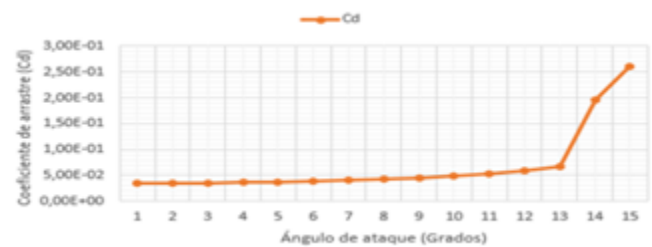
Gráfica 2. Coeficiente de arrastre para el espesor del 9% de la cuerda.

Para el álabe con espesor del 18% de la cuerda (gráfica 3) el ángulo crítico se sitúa en 13 grados, como antes se mencionó. Al igual que el otro espesor, una vez sobrepasa el ángulo crítico se produce una notable caída de la sustentación.



Gráfica 3. Coeficiente de sustentación para espesor del 18% de la cuerda.

El coeficiente de arrastre para el espesor del 18% de la cuerda es ligeramente superior en todos los ángulos de ataque al del 9%, excepto para los ángulos de 12 y 13 grados donde este último ya ha entrado en pérdida.



Gráfica 4. Coeficiente de arrastre para el espesor de 18% de la cuerda.

CONCLUSIONES

La formación de la burbuja se da en ángulos más pequeños para el espesor del 9% de la cuerda que para el de 18%. Esto se debe a que este último, al presentar un borde de ataque más redondeado, genera más dificultad al desprendimiento de la capa límite laminar.

El espesor del 18% de la cuerda genera mayores coeficientes de sustentación que el espesor del 9% de la cuerda. Sin embargo, también experimenta mayores coeficientes de arrastre.

Los problemas en el arranque que presentan este tipo de turbinas para ángulos de 0 grados, es porque en dichos ángulos el álabe no presenta sustentación (Lastra, 2014). Un fenómeno muy parecido ocurre en 90 grados de ataque del flujo.

NOMENCLATURA

L: Fuerza de sustentación (N).

D: Fuerza de arrastre (N).

C_l : Coeficiente de sustentación.

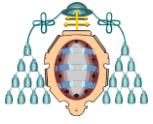
C_d : Coeficiente de arrastre.

ρ : Densidad del agua ($998 \frac{kg}{m^3}$).

μ : Viscosidad dinámica ($0,001 Pas$).

A: Área (m^2).

v: Velocidad de flujo libre ($\frac{m}{s}$).



f: frecuencia (Hz)

l: Espesor del álabe (m)

Δt : Tamaño del paso temporal (s).

St: Número de Strouhal.

Re: Número de Reynolds.

c: Longitud de la cuerda (m)

Engineering and Management (pág. 4). Portalegre: @becedario.

[6] Lastra, M. R. (May of 2014). Elliptic Airfoil Aerodynamics in a Developed PIV Facility. *Doctoral Thesis*.

[7] O.MARXEN, M. L. (2003). A Combined Experimental/Numerical Study of Unsteady Phenomena in a Laminar Separation Bubble. *Flow, Turbulence and Combustion*, 133-146.

[8] RAMESH, S. S. (2007). Laminar separation bubbles: Dynamics and control. *Sadhana Vol. 32, Parts 1 & 2*, 103-109.

[9] Sengupta, M.-S. K. (2005). Unsteady Viscous Flow over Elliptic Cylinders. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 877-886.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la ayuda y el apoyo recibido por el tutor en la elaboración del proyecto, así como a los miembros del área de mecánica de fluidos, con mención especial a Eduardo Blanco, de la Universidad de Oviedo por la información recibida en la cuestión de estudio.

REFERENCIAS

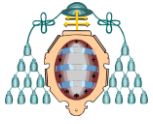
[1] A. Benazza, E. B. (2007). 2D Detached-Eddy Simulation Around Elliptic Airfoil at High Reynolds Number. *Journal of Applied Sciences*, 547-552.

[2] A. Benazza, E. J. (2005). Turbulence Models in Symmetric Airfoil Simulation. *1º International Congress of Energy and Environment Engineering and Management* (pág. 6). Portalegre: @becedario.

[3] Abdel, B. (14th April of 2007). Modelisation Numerique Des Profils Aerodynamiques Symetriques. *Thèse de Doctorat d'Etat en Génie Mécanique Spécialité: Energétique*.

[4] Chang, D.-H. K.-W. (2010). Unsteady boundary layer for a pitching airfoil at low Reynolds numbers. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 429-440.

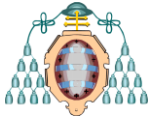
[5] E. Blanco, J. F. (2005). Simulación numérica de los perfiles de aerogenerador S822 y S825. *1º International Congress of Energy and Environment*



UNIVERSIDAD DE OVIEDO
EP de Ingeniería de Gijón
ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo

Máster Universitario en
Ingeniería Energética
Curso 2015-16

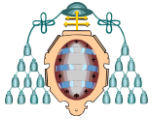




UNIVERSIDAD DE OVIEDO
EP de Ingeniería de Gijón
ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo

Máster Universitario en
Ingeniería Energética
Curso 2015-16

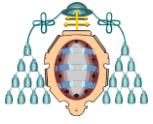




UNIVERSIDAD DE OVIEDO
EP de Ingeniería de Gijón
ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo

Máster Universitario en
Ingeniería Energética
Curso 2015-16

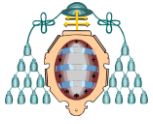




UNIVERSIDAD DE OVIEDO
EP de Ingeniería de Gijón
ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo

Máster Universitario en
Ingeniería Energética
Curso 2015-16

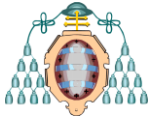




UNIVERSIDAD DE OVIEDO
EP de Ingeniería de Gijón
ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo

Máster Universitario en
Ingeniería Energética
Curso 2015-16

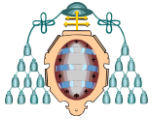




UNIVERSIDAD DE OVIEDO
EP de Ingeniería de Gijón
ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo

Máster Universitario en
Ingeniería Energética
Curso 2015-16





UNIVERSIDAD DE OVIEDO
EP de Ingeniería de Gijón
ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo

Máster Universitario en
Ingeniería Energética
Curso 2015-16

