



EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN PERFIL AERODINÁMICO BAJO LA ACUMULACIÓN DEL HIELO MEDIANTE SIMULACIONES CFD

Daniel Bodenlle Toral*, Pedro García Regodeseves** y Adrián Pandal Blanco**
[*] Alumno; [**] Tutor(es)

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Los perfiles utilizados en las palas de los aerogeneradores tienen un gran efecto sobre el comportamiento aerodinámico. La incorporación en los métodos de ingeniería de los efectos tridimensionales y de rotación obtenidos mediante simulaciones numéricas ha permitido mejorar sustancialmente el diseño de las palas. Un avance más en la mejora de los modelos es la modificación del estado de la superficie del perfil por efectos ambientales. La presencia de erosión, suciedad o nieve en el borde de ataque reduce el comportamiento aerodinámico de los perfiles. Por tanto, incorporar sus efectos mejoraría las predicciones. Sin embargo, la implementación de estos efectos en modelos numéricos es compleja. En este trabajo, solo se tendrá en cuenta el efecto de la acumulación de hielo/nieve. El estudio se realiza sobre la turbina de eje horizontal NREL PHASE VI con el perfil S809. La teoría BEM se aplica para realizar simulaciones numéricas 2D precisas en primer lugar, de un perfil limpio (sin modificar) y después de un perfil acrecentado. Este último se construye mediante la modificación del perfil según las indicaciones de la herramienta Icing de ANSYS Fluent. Las simulaciones se realizan bajo el modelo matemático con ecuaciones RANS mediante el modelo de turbulencia SST $k-\omega$, que predice adecuadamente el comportamiento de la capa límite. Los resultados de CFD se evalúan en diferentes secciones del perfil y se comparan con las predicciones de otros autores en términos de coeficientes aerodinámicos. Las simulaciones predicen un aumento en el coeficiente de arrastre ($C_D +33\%$), y una disminución en el coeficiente de

sustentación ($C_L -9\%$). La presencia de acumulación de hielo afecta en el rendimiento aerodinámico a lo largo de todo el tramo de la pala, siendo ligeramente más pronunciada hacia la base de la pala. Este trabajo presenta una nueva metodología de ingeniería capaz de predecir con precisión el rendimiento de un perfil aerodinámico bajo la acumulación del hielo con un coste computacional reducido.

ABSTRACT

The profiles used in wind turbine blades have a great effect on aerodynamic behavior. The incorporation in engineering methods of the three-dimensional and rotation effects obtained through numerical simulations has allowed to substantially improve the design of the blades. A further advance in the improvement of the models is the modification of the surface state of the profile due to environmental effects. The presence of erosion, dirt or snow on the leading edge reduces the aerodynamic behavior of the profiles. Therefore, incorporating its effects would improve predictions. However, the implementation of these effects in numerical models is complex. In this work, only the effect of the ice / snow accretion will be taken into account. The study is made using the NREL PHASE VI experimental horizontal-axis turbine with the S809 profile. The BEM theory is applied in order to conduct accurate 2D numerical simulations firstly, of a clean profile (unmodified) and afterwards of accreted profile. The latter is constructed by the modification of the profile in advance, following indications of the Icing ANSYS Fluent tool. Simulations are conducted under a RANS numerical



approach by means of an SST $k-\omega$ model, which properly predicts boundary layer behavior. CFD results are evaluated at different sections of the profile and compared against predictions from other authors in term of aerodynamic coefficients. The simulations consistently predict an increase in the drag coefficient ($C_D +33\%$), and a decrease in the lift coefficient ($C_L -9\%$). The presence of ice accretion affects the airfoil performance along the whole blade span, being slightly more pronounced towards the root of the blade. This work presents a new engineering methodology able to accurately predict airfoil performance under ice accretion at a reduced computational cost.

INTRODUCCIÓN

La energía eólica es una de las fuentes renovables con mayor potencia instalada y producida en el mundo. Actualmente aporta aproximadamente un 20% de la electricidad consumida. Su crecimiento ha sido exponencial desde comienzos de siglo. No solo se ha aumentado el número de parques eólicos, sino también los estudios para mejorar el comportamiento de las turbinas eólicas [1].

Los países del norte de Europa presentan un gran porcentaje de energía eólica, llegando en muchos casos a producir más de la mitad de la electricidad consumida. Las condiciones climatológicas de estos países afectan al funcionamiento de los aerogeneradores. Entre las causas destaca la acumulación del hielo que causa un descenso en el rendimiento aerodinámico debido a un cambio en la geometría de la pala, un aumento en las cargas estáticas y dinámicas a las que está sometida la pala y una aceleración en la fatiga del material por la vibración causada por el desprendimiento del hielo. Se estima que las pérdidas anuales en 2010 debidas a la acumulación de hielo fueron de alrededor del 20% de la producción de energía anual [2].

Dado que la producción eólica ocupa cada vez un porcentaje mayor dentro de la generación eléctrica es interesante estudiar los diferentes comportamientos en función de la acumulación del hielo. Para realizar estos estudios se pueden llevar a cabo en laboratorios donde se experimenta con la pala a escala reducida para analizar su comportamiento con los datos experimentales. Sin

embargo, los ensayos en túnel de viento conllevan mucho tiempo y coste. Por ello se utiliza como alternativa las simulaciones CFD, que mediante métodos numéricos y algoritmos intentan predecir el comportamiento del aire alrededor de la pala. Al emplear técnicas CFD se pueden analizar diferentes tipos de geometrías a menor coste, y proporcionar información como paso previo a los datos experimentales obtenidos en el laboratorio.

Al tratarse de un tema de interés creciente, muchos autores han llevado a cabo investigaciones. Fu y Farzaneh [2] investigaron la acumulación de hielo sobre una pala en 3D, las principales conclusiones fueron que la mayoría del hielo se acumula sobre el borde de ataque y este disminuye según se acerca a la base. Palacios [3] se centró en investigar esta acumulación de hielo con ensayos experimentales con los cuales obtuvo que la mayor acumulación se produce en el borde de ataque de la pala y esa acumulación es mayor si aumenta la velocidad angular de la pala.

En relación con la acumulación de hielo Biancolini [4] investigó las variaciones que se pueden realizar sobre la malla de los perfiles acrecentados para optimizar el flujo de trabajo y conseguir unos resultados de calidad con menos coste computacional.

Hudecz et al. [1] analizaron el comportamiento de los coeficientes de arrastre y de sustentación en túnel de viento y mediante CFD para contrastar los resultados. Obtuvieron unos resultados similares en ambos casos y extrajeron como conclusiones que debido a la acumulación de hielo el coeficiente de sustentación disminuyó y el coeficiente de arrastre aumentó. Esta reducción en la sustentación implica una pérdida en la producción de energía. También centrados en los coeficientes de sustentación y arrastre, Kollár y Santos [5] investigaron la variación de estos coeficientes en función de la acumulación del hielo, concluyeron que tras hora y media en condiciones de llovizna helada el ratio "lift to drag" (el cociente entre el coeficiente de sustentación y el de arrastre) era la mitad que en condiciones normales y tras dos horas era solo un tercio, reduciendo el rendimiento de la producción. También se destaca que la acumulación del hielo depende de forma sustancial del tiempo al que la pala esté sometida a esas condiciones, cuanto más tiempo mayor será la acumulación del hielo.



El enfoque de este trabajo se centra en analizar el comportamiento de los coeficientes de la turbina eólica "NREL Phase VI" con el perfil S809 limpio y una vez se ha depositado hielo sobre él. Estudiando el perfil en distintas posiciones radiales de la pala para observar las diferencias del comportamiento en función del hielo acumulado en cada zona.

Este trabajo propone una nueva metodología para predecir el comportamiento aerodinámico de los perfiles acrecentados por hielo, basada en la combinación de simulaciones 2D junto con la teoría BEM. Y predecir la forma del hielo en los perfiles con la herramienta Icing Fluent para analizar el rendimiento con esas acumulaciones. Para validar el método se simulan los resultados de Fu y Farzaneh [2].

METODOLOGIA

En este trabajo se utilizan técnicas CFD para determinar el comportamiento del flujo alrededor de perfiles aerodinámicos. Aunque tenga un mayor coste computacional es una herramienta ampliamente utilizada para intentar predecir el rendimiento aerodinámico de los perfiles de las turbinas eólicas.

Modelo aerogenerador NREL

El aerogenerador "NREL Phase VI" [6] es una turbina eólica de eje horizontal. La geometría de la pala y el perfil que la forma, el S809, están disponibles en las referencias [7] y [8]. La Figura 2 muestra la turbina NREL, la geometría de la pala y el perfil que la forma.

Los perfiles de la pala en distintas posiciones radiales son analizados para poder comparar los resultados de la acumulación del hielo con los mostrados por Fu y Farzaneh [2].

Configuración de las simulaciones

El comportamiento aerodinámico de la pala del "NREL Phase VI" se ha estudiado en cuatro posiciones radiales: R=2m (r/R=0.361); R=3m (r/R=0.543); R=4m (r/R=0.723) y R=5m (r/R=0.904). La Tabla 1 indica la cuerda y el ángulo de torsión (β) correspondiente a las cuatro posiciones radiales.

Tabla 1- Datos de las posiciones radiales a lo largo de la pala.

r (m)	r/R	Cuerda (m)	Torsión ($^{\circ}$)
2	0.361	0.661	7.559
3	0.543	0.56	1.676
4	0.723	0.459	-0.346
5	0.904	0.358	-1.775

La Figura 1 muestra la distribución de la cuerda y del ángulo de torsión en función de la posición radial.

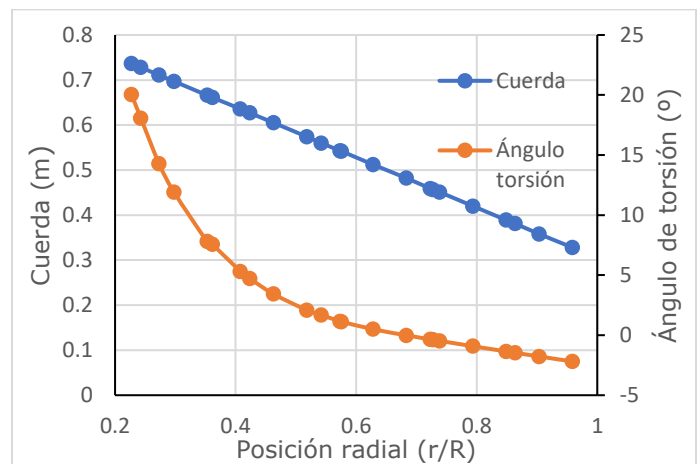


Figura 1- Tamaño de la cuerda y ángulo de torsión en función de la posición radial a lo largo de la pala.

Las condiciones de las simulaciones han sido de 7 m/s de velocidad del viento y de 7.5 rad/s de velocidad de rotación.

Modelo matemático

Las simulaciones se llevaron a cabo mediante las ecuaciones RANS (1) y (2) para flujo incompresible con el modelo de turbulencia SST k- ω (Shear-Stress Transport). Las ecuaciones de gobierno se resolvieron con el código comercial "Ansys Fluent" mediante el Método de volúmenes finitos (FVM):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \cdot \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

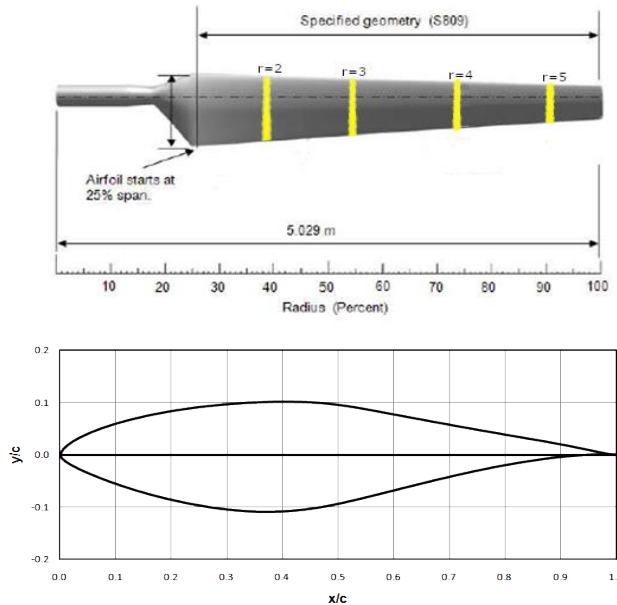


Figura 2- Turbina NREL Phase VI (izquierda), pala de la turbina (derecha superior) y perfil S809 que forma la pala (derecha inferior) [7].

El tratamiento de la turbulencia complementa a las ecuaciones RANS para resolver las ecuaciones, en este trabajo se utilizó el SST $k-\omega$ porque es un modelo híbrido que combina $k-\omega$ cerca de la pared y $k-\epsilon$ en la parte exterior de la capa límite cuando el flujo es totalmente turbulento, también cuenta con una formulación de viscosidad turbulenta modificada para tener en cuenta los efectos de transporte del esfuerzo de cortadura turbulento principal.

La selección del modelo de turbulencia depende del problema específico, ningún modelo de turbulencia es adecuado para todas las condiciones, por ello se requiere de un análisis para determinar el mejor en cada caso. Este análisis va muy ligado con el parámetro Y^+ y la transición de la capa límite cerca de las paredes.

Se realizó un estudio utilizando el modelo SST $k-\omega$ y se comparó con uno de la familia $k-\epsilon$, en este caso, el Realizable $k-D$ (RKE) con Tratamiento de pared mejorada (EWT). Las simulaciones para comparar ambos modelos de turbulencia se llevaron a cabo sobre el perfil NACA 2412 por contar con más bibliografía disponible para contrastar los resultados [9]. Se obtuvo que el modelo de turbulencia SST $k-\omega$ mejoró la precisión cerca de la pared, en acuerdo con estudios previos [10], que indican que para las turbinas eólicas el

modelo SST $k-\omega$ predice mejor el comportamiento que el grupo de los $k-\epsilon$. Por lo tanto, dicho modelo de turbulencia fue el empleado para todas las simulaciones con el perfil S809.

Se utilizó el algoritmo basado en la presión para resolver las ecuaciones RANS para flujo incompresible. El acoplamiento de la presión y la velocidad se resolvió por el esquema SIMPLEC

En cuanto a la discretización espacial se utilizaron esquemas de segundo orden para la presión, el momento, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación específica. El gradiente en cada celda se determinó con el algoritmo "Green-Gauss Cell-Based". La discretización temporal fue estacionaria en todas las simulaciones salvo en las que se simulaba la acumulación del hielo con "Icing".

Dominio computacional

El dominio computacional es la región del espacio donde se estudia el comportamiento del flujo. La elección de un buen dominio es esencial, ya que si es demasiado pequeño afecta al desarrollo normal del flujo y si es demasiado grande se incrementa demasiado el coste computacional. Para determinar las dimensiones del dominio se recurrió a un estudio anterior de



perfiles aerodinámicos con resultados contrastados [10].

El dominio computacional es un rectángulo de $21c$ de largo y $25c$ de alto cuya entrada es un semicírculo que cierra el rectángulo y que está $11.5c$ separado del perfil. Siendo c la cuerda del perfil. El tamaño del dominio computacional fue escogido para asegurar que no había interferencias entre las condiciones de contorno y el flujo alrededor del perfil. Se dejó una distancia de más de $10c$ desde la entrada hasta el perfil. Y una distancia de $21c$ con la salida del flujo, para que la estela se pudiera desarrollar con normalidad. En cuanto a la altura se dejó una distancia de $12.5c$ con la entrada superior e inferior. El dominio computacional se muestra en la Figura 3.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno empleadas fueron: (1) Entrada del flujo ("Velocity inlet") en la línea semicircular y en las líneas superior e inferior del rectángulo; (2) Pared no deslizante en el perfil y (3) Presión uniforme en la salida ("Pressure outlet").

Estrategia de mado

La información de estudios previos para el perfil S809 es más escasa que para otros perfiles, lo que dificulta la labor de contrastar la calidad de la malla, por ello se escogió el NACA 2412 para probar y diseñar una buena malla con resultados contrastados, y posteriormente trasladar esa malla al S809 [11].

Se generó una malla estructurada de forma manual en todo el dominio, prestando especial atención a la zona cercana a las paredes del perfil para crear una adecuada capa límite.

Esta malla se traslada al perfil S809 siendo necesario una pequeña adaptación para las celdas cercanas a las paredes del perfil.

La malla final cuenta con 60060 celdas. La Figura 3 muestra la malla, las dimensiones del dominio y las condiciones de contorno, así como una vista detalle de la malla en las zonas cercanas al perfil.

En cuanto a los perfiles acrecentados se utilizó la misma malla, pero fue necesaria la adaptación en la parte delantera donde la geometría se ve

modificada por el hielo. Esta adaptación consistió en un mallado más fino en las zonas donde había ángulos muy agudos, ya que las celdas anteriores no eran capaces de adaptarse bien a la geometría y se perdía precisión en la capa límite.

Para que la capa límite se adaptara mejor al perfil se hizo una división a partir de un tercio de la cuerda para que la malla pudiera ser más recta en la zona central del perfil.

Teoría BEM

La teoría del momento del elemento de pala (BEM) es muy utilizada para predecir el rendimiento aerodinámico de las turbinas eólicas de eje horizontal y aumentar la precisión del cálculo [12].

Es un método iterativo para hallar el factor de inducción axial (a) y el factor de inducción tangencial (a'). Consiste en hallar el ángulo de ataque para obtener los coeficientes aerodinámicos (C_L y C_D), corregir las fórmulas con el factor de F de Prandtl y despejar a y a' de (3) y (4) respectivamente:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \cdot F \cdot \sin(\varphi)^2}{\sigma \cdot C_x} + 1} \quad (3)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cdot F \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)}{\sigma \cdot C_t} - 1} \quad (4)$$

Para cada paso iterativo es necesario hallar C_L y C_D los cuales varían en función del número de Reynolds y del ángulo de ataque, estos datos para poder completar el BEM fueron extraídos de [7].

La Figura 4 muestra un esquema con los triángulos de velocidad en el plano del rotor, los ángulos con los que inciden y las fuerzas generadas en el perfil.

Se calcularon todas las posiciones radiales mostradas en [7], para poder analizar la variación a lo largo de toda la pala y poder verificar los resultados con más precisión

La Tabla 2 muestra los factores de inducción axial y tangencial y el ángulo de ataque para cada posición radial.

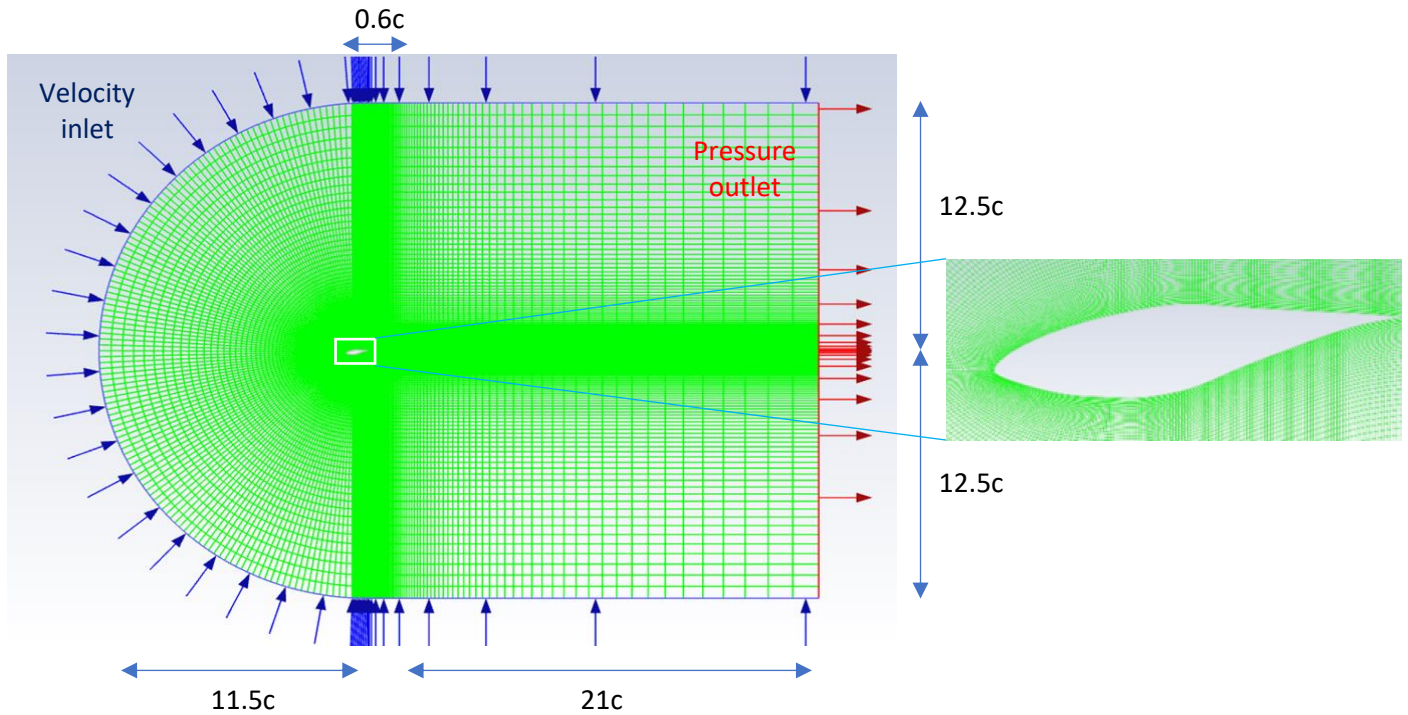


Figura 3- Dimensiones del dominio computacional y condiciones de contorno. Malla en las zonas cercanas al perfil.

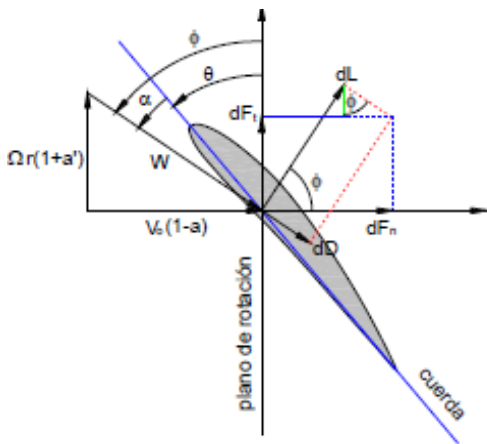


Figura 4- Componentes de la velocidad relativa en el plano del rotor de un perfil [13].

Para verificar los resultados del método BEM se compararon con dos estudios anteriores. Los factores de inducción se ratificaron con [14]. Y los valores de C_L y C_D de cada posición radial se verificaron con [7].

La Figura 5 muestra la gráfica de los coeficientes aerodinámicos en función del ángulo de ataque obtenidos con el método BEM.

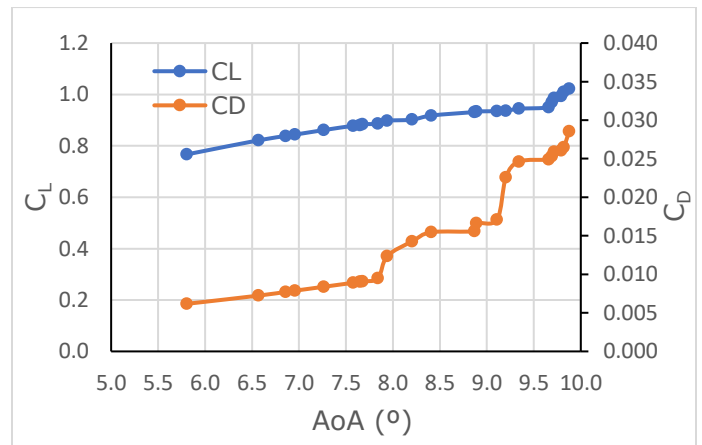


Figura 5- Coeficientes aerodinámicos en función del ángulo de ataque obtenidos con el método BEM.

Las ecuaciones para relacionar los coeficientes aerodinámicos con las fuerzas son (5) y (6):

$$F_L = C_l \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \quad (5)$$

$$F_D = C_d \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \quad (6)$$

Donde F_L es la fuerza de sustentación y F_D es la fuerza de arrastre, ρ es la densidad del aire, V es la velocidad relativa del viento (m/s), A es el área



del perfil que al ser 2D es la cuerda por espesor unitario y φ es el ángulo que forma la corriente con el plano de rotación.

Tabla 2- Resultados del método BEM según la posición. Se indica el ángulo de ataque, el factor de inducción axial y el tangencial.

r/R	AoA (°)	a	a'
0.227	7.841	0.14471	0.06191
0.243	8.205	0.14851	0.05538
0.273	9.202	0.15708	0.04524
0.298	9.694	0.16051	0.03832
0.353	9.876	0.18637	0.03101
0.362	9.718	0.18501	0.02946
0.408	9.820	0.18975	0.02343
0.424	9.793	0.19081	0.02180
0.463	9.659	0.19393	0.01842
0.518	9.342	0.19807	0.01496
0.542	9.109	0.20029	0.01410
0.573	8.890	0.20284	0.01278
0.576	8.869	0.20315	0.01269
0.628	8.409	0.20642	0.01091
0.683	7.939	0.21070	0.00948
0.723	7.677	0.21213	0.00851
0.727	7.649	0.21257	0.00842
0.739	7.577	0.21361	0.00819
0.794	7.264	0.22024	0.00725
0.849	6.956	0.23364	0.00662
0.864	6.859	0.23968	0.00652
0.904	6.571	0.26188	0.00638
0.959	5.808	0.33612	0.00691

Icing Fluent

Se utilizó la herramienta ANSYS Fluent Icing para simular el comportamiento del hielo y obtener la forma con la que se adhiere al perfil.

Se parte de los resultados del flujo alrededor del perfil limpio como base y el "Icing" predice el comportamiento de las gotas ("Droplets") sobre el perfil y la acumulación del hielo.

Para las "Droplets" los modelos de "Monodispersed distribution" y "Langmuir-D

Distribution" son los más utilizados, difieren en la forma de calcular la distribución de las gotas a lo largo del perfil. Se obtuvo que el modelo de "Monodispersed distribution" proporcionaba unos buenos resultados sin un tiempo de cálculo excesivo.

En cuanto al hielo, los dos modelos disponibles son "Fluent Icing Ice Accretion" y "Multi-shot Ice accretion", el segundo está especializado para geometrías más complejas y se basa en el desplazamiento de la malla lo que aumenta sustancialmente el tiempo de cálculo. Para el caso de este trabajo el primer modelo aporta la precisión suficiente para predecir la acumulación del hielo en los perfiles.

Dentro del modelo de "Fluent Icing Ice Accretion" existen varios submodelos para simular la acumulación de hielo, los dos más empleados son "Glaze" y "Rime", tras analizar los resultados se escoge "Glaze" por presentar mayor precisión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se llevaron a cabo simulaciones del perfil limpio y del perfil acrecentado hallado con "Icing" para las cuatro posiciones radiales indicadas y así poder analizar las diferencias en los contornos de velocidad y presión. Y también analizar los coeficientes aerodinámicos (C_L y C_D) y el coeficiente de presión (C_p) a lo largo del perfil para verificar los resultados.

Los contornos del hielo hallados con "Icing" se comparan con los resultados de Fu y Farzaneh [2]. Para ello también se llevaron a cabo las simulaciones de sus perfiles acrecentados.

Perfiles limpios

La Figura 6 muestra los contornos de velocidad (izquierda) y presión (derecha) para cada una de las posiciones radiales con los perfiles limpios.

Las distribuciones de velocidad y presión cambian en cada posición radial, pero se puede diferenciar un comportamiento similar en todos los casos.

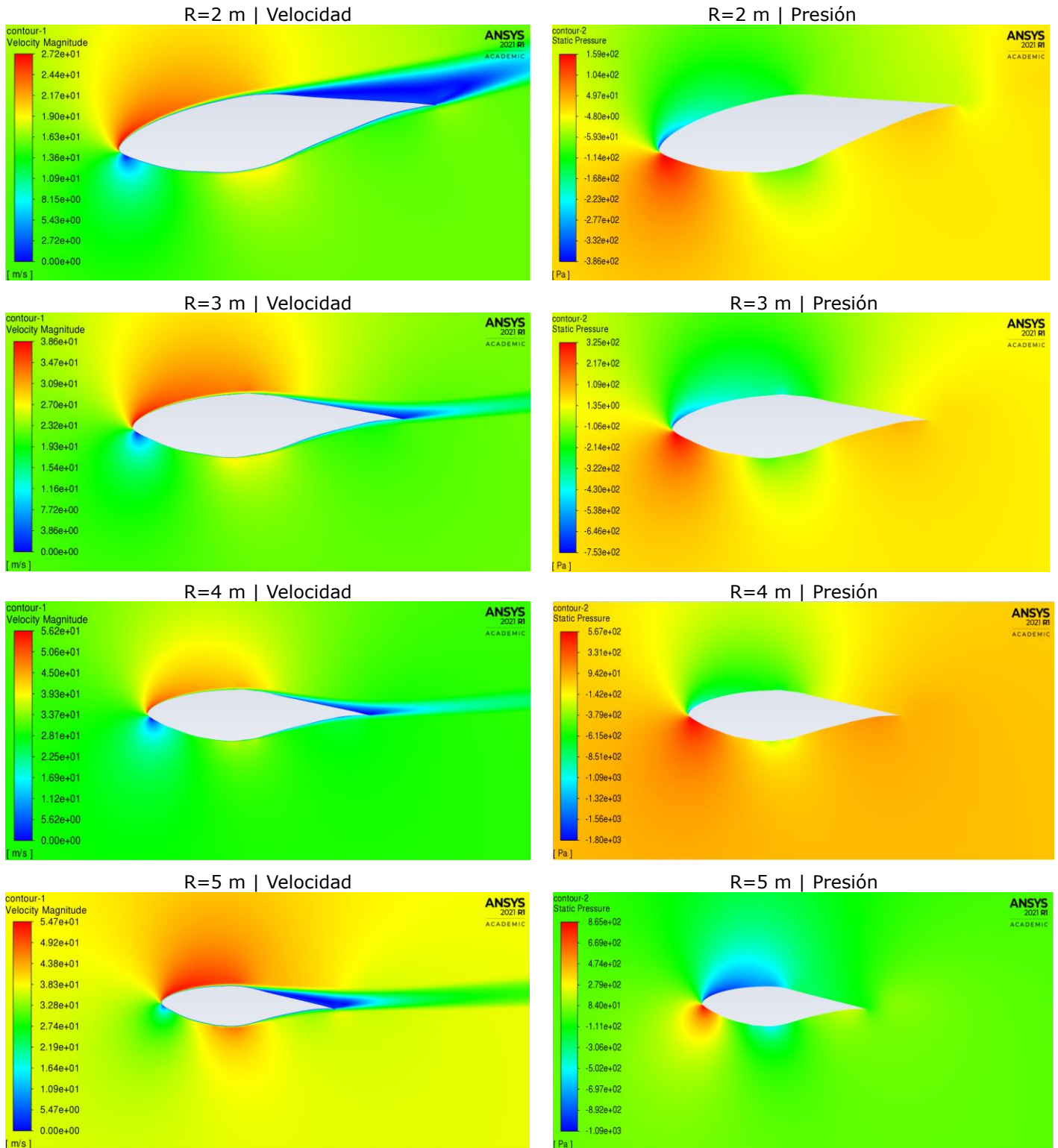


Figura 6- Contornos de velocidad (izquierda) y presión (derecha) de los perfiles limpios.



En la parte superior del borde de ataque las líneas de corriente del flujo se juntan debido a la inclinación del ángulo del ataque, lo que produce un aumento en la velocidad y una disminución en la presión, debido a que la presión total debe permanecer constante, luego si aumenta la presión dinámica, la presión estática disminuye. Tras pasar la primera mitad del extradós (Parte superior del perfil) las líneas de corriente se separan por la geometría del perfil lo que produce una disminución en la velocidad y la recuperación de la presión hasta la atmosférica que se mantiene hasta el borde de salida. La velocidad disminuye en el perfil porque las líneas de corriente no son capaces de seguir la curva en la geometría y se separan del perfil.

En la parte inferior del borde de ataque, las líneas de corriente divergen por la geometría del perfil lo que disminuye la velocidad del flujo y corresponde con un aumento en la presión, se forma el llamado punto de estancamiento, donde la presión es máxima y la velocidad nula. A medida que avanza por el intradós (Parte inferior del perfil) la velocidad se va recuperando porque las líneas de corriente se vuelven a juntar hasta que en la mitad se llega al máximo local de velocidad que coincide con la curva del perfil, donde hay una depresión. A partir de este punto las líneas de corriente no siguen la geometría del perfil, al igual que en el extradós, y la velocidad disminuye lo que hace que la presión se recupere hasta la atmosférica y se mantenga hasta el borde de salida.

Perfiles "Icing"

Tras estudiar el comportamiento del flujo alrededor de los perfiles limpios se analiza la acumulación del hielo y después el comportamiento del flujo. Para ello, primero se simula la acreción del hielo en el perfil mediante "Fluent Icing" y después se analiza el comportamiento del flujo alrededor de estos perfiles con hielo.

Para llevar a cabo las simulaciones del "Icing" se extraen las condiciones del estudio de Fu y Farzaneh [2]. Temperatura del aire -10°C ; LWC 1 g/m^3 ; MVD de la gota $20\text{ }\mu\text{m}$, densidad del hielo 300 Kg/m^3 y la aspereza de la pared del perfil ("High Roughness for Icing") 0.0005 m .

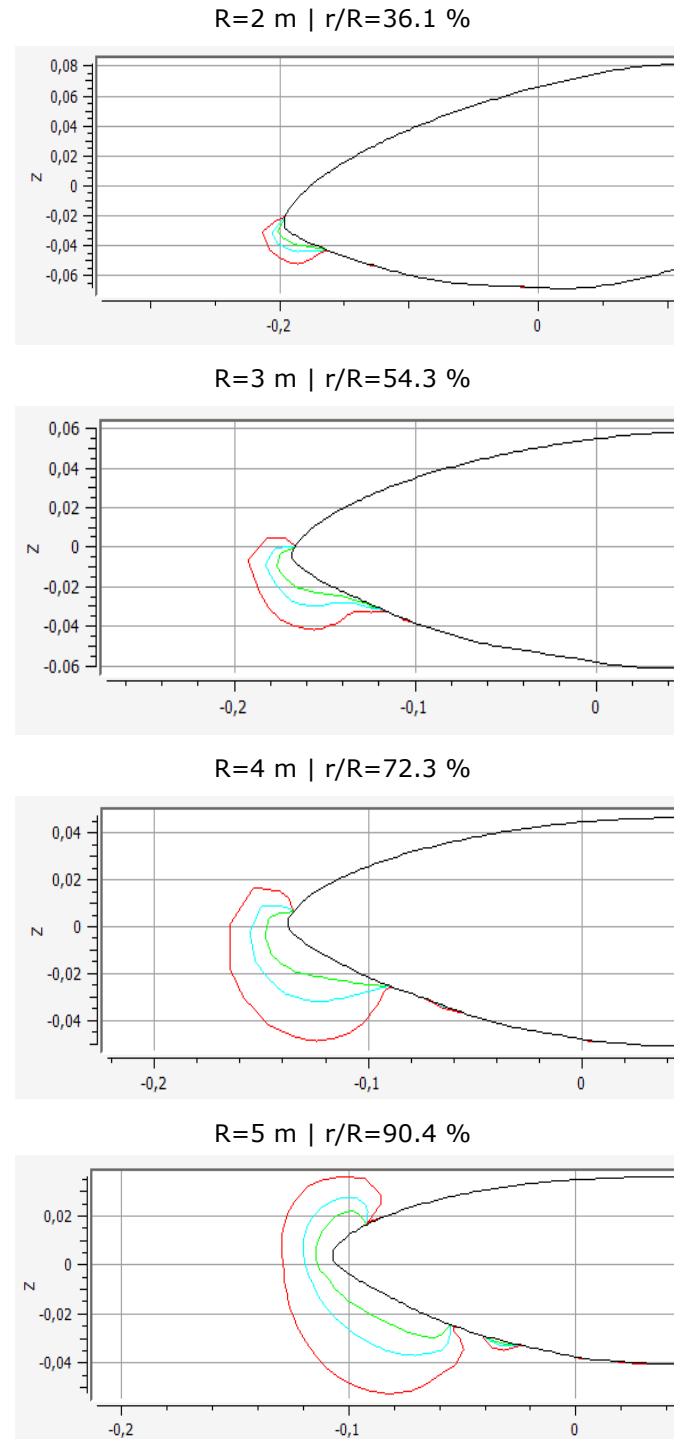


Figura 7- Acumulaciones de hielo sobre el perfil para 400 sg (Verde), 900 sg (Azul) y 2000 sg (Rojo).



Cabe destacar que pese a utilizar las mismas condiciones, Fu y Farzaneh [2] simulan la acumulación del hielo con ecuaciones propias. Mientras que en este trabajo se simula la dispersión de las gotas con el modelo "Monodispersed calculation" y la acumulación del hielo con "Fluent Icing Ice Accretion" con el modelo "Glaze".

La función de "Fluent Icing" solo es válida para mallas 3D, es por ello por lo que todos los perfiles se han extruido 0.1 m

A la hora de simular la acumulación del hielo el tiempo es muy parámetro clave ya que el volumen acumulado depende de él. Para observar la variación con el tiempo se han simulado tres casos: 400 s, 900 s y 2000 s. La Figura 7 muestra los contornos 2D de los perfiles con las acumulaciones de hielo a los tres tiempos indicados.

Las posiciones radiales cercana a la base tienen menor acumulación de hielo que las alejadas, es por ello por lo que la cantidad de hielo acumulada es menor en $r=2$ m y a medida que se aleja de la base va creciendo hasta $r=5$ m que es donde se produce la mayor acumulación.

Dentro de la forma de los contornos del hielo se puede observar que la acumulación se crea en la parte inferior del borde de ataque. Esa acumulación aumenta a medida que se acerca a la punta de la pala y va ocupando mayor superficie de la parte inferior.

En cuanto al tiempo se puede apreciar que a medida que aumenta el tiempo de la simulación aumenta la cantidad de hielo depositado.

Una vez que se obtuvieron los perfiles acrecentados con hielo con "Icing" se simularon para poder comparar los resultados con los perfiles limpios y contrastarlos con los resultados de los perfiles acrecentados. Para ello se volvieron a crear mallas 2D a partir de los contornos del "Icing".

La Figura 8 muestra los contornos de velocidad (izquierda) y presión (derecha) para cada una de las posiciones radiales con los perfiles acrecentados obtenidos con "Icing".

Se puede observar que a medida que se avanza hacia la punta la acumulación de hielo es mayor, por tanto, las mayores diferencias se encuentran en $r=5$ m, y las menores en $r=2$ m. Es importante destacar que hay una menor diferencia en cuanto a la geometría por el hielo cerca de la base, pero en esta zona el ángulo de ataque es mayor por lo que

las variaciones en los coeficientes adimensionales son mayores.

Lo que más destaca es que se produce un punto de acumulación en la parte superior donde la velocidad es máxima y la presión es mínima, haciendo que la velocidad tras ese punto en el extradós no sea tan grande como en los casos sin hielo. En cuanto a la parte inferior la forma del hielo crea zonas de velocidad nula, lo que crea varios puntos de estancamiento.

Debido a que hay menos salto de presión porque la depresión en el extradós no es tan pequeña, la fuerza de sustentación será menor, luego se espera una disminución en el C_L .

En cuanto al arrastre, el hielo supone una modificación en la geometría y hace que el borde de ataque sea mayor, lo que aumenta el arrastre porque hay más fricción con el aire. Luego se espera un aumento en el C_D .

Perfiles acrecentados

Los resultados de la acumulación del hielo con "Icing" se comparan con el estudio anterior de Fu y Farzaneh [2]. La Figura 9 muestra los contornos de velocidad (izquierda) y presión (derecha) para cada una de las posiciones radiales con los perfiles acrecentados.

La acumulación del hielo coincide con el "Icing" porque según se acerca a la punta de la pala la acumulación es mayor. Pero el contorno de esta acumulación es diferente, posiblemente debido a los cambios en la metodología. Fu y Farzaneh utilizaron ecuaciones propias y el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, mientras que en este trabajo se utilizó el modelo de "Icing" de "Fluent" y el modelo de turbulencia SST $k-\omega$. Las acumulaciones que obtuvieron son muy horizontales y se acumulan desde la parte delantera del borde de ataque con esquinas muy pronunciadas, mientras que las acumulaciones de este trabajo empiezan en el borde de ataque, pero se junta mayor cantidad hacia la parte inferior siguiendo el perfil.

La forma general de los contornos es similar al caso del "Icing", en el extradós se produce una disminución de la presión debido a un aumento de la velocidad y en el intradós se produce un aumento de la presión debido a la disminución de la velocidad.

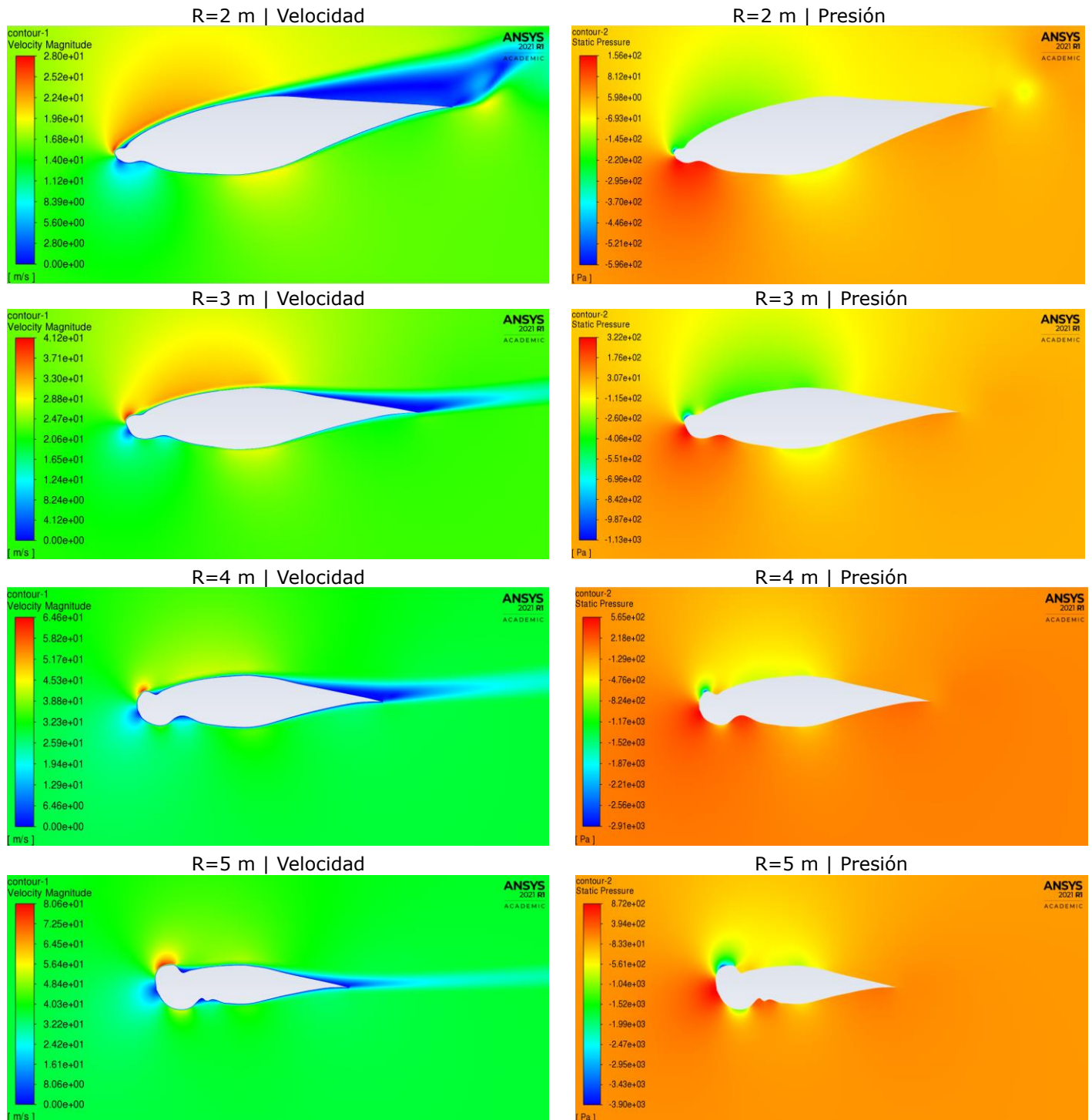


Figura 8- Contornos de velocidad (izquierda) y presión (derecha) de los perfiles con "Icing"

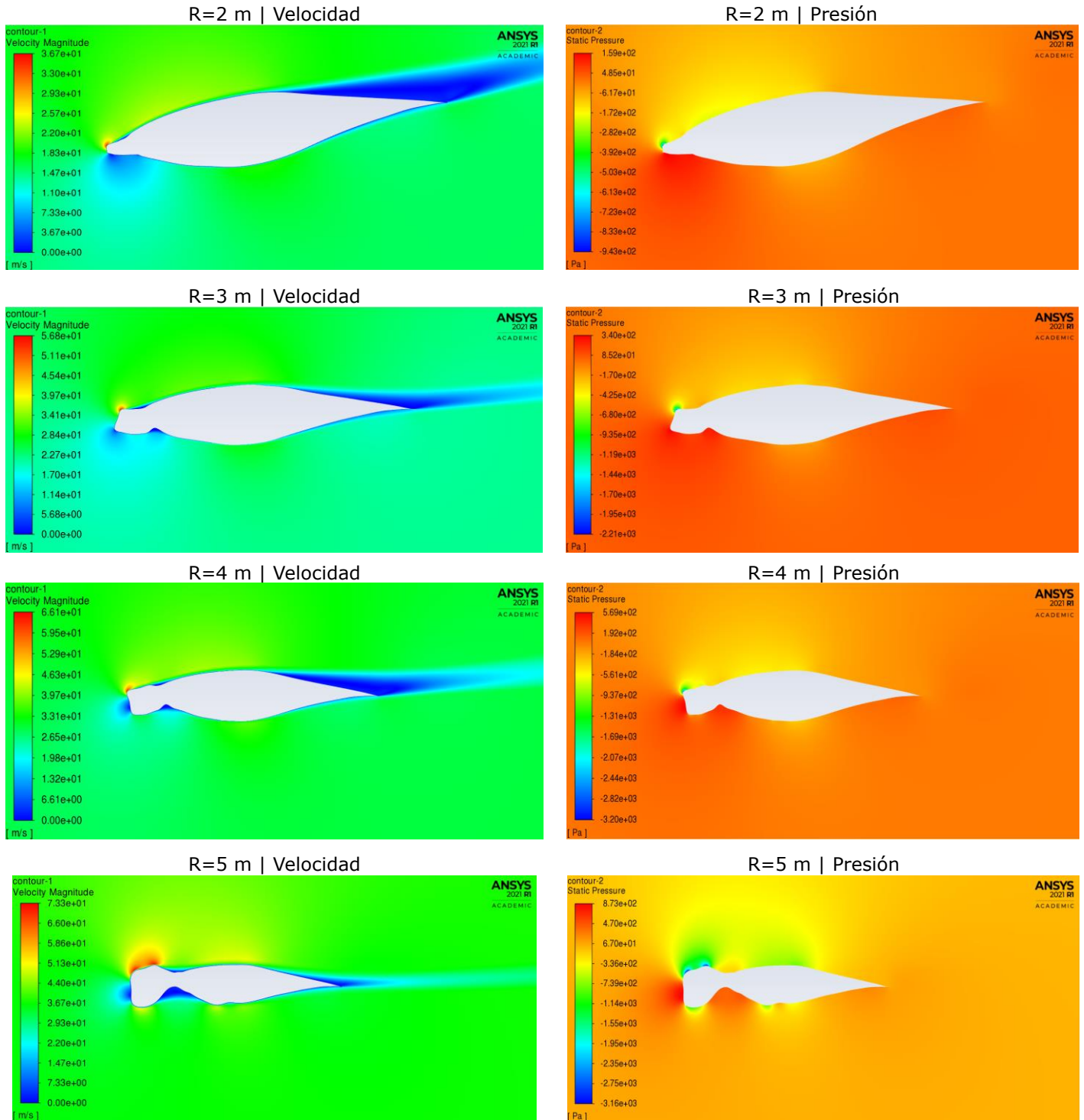


Figura 9- Contornos de velocidad (izquierda) y presión (derecha) de los perfiles acrocentados.

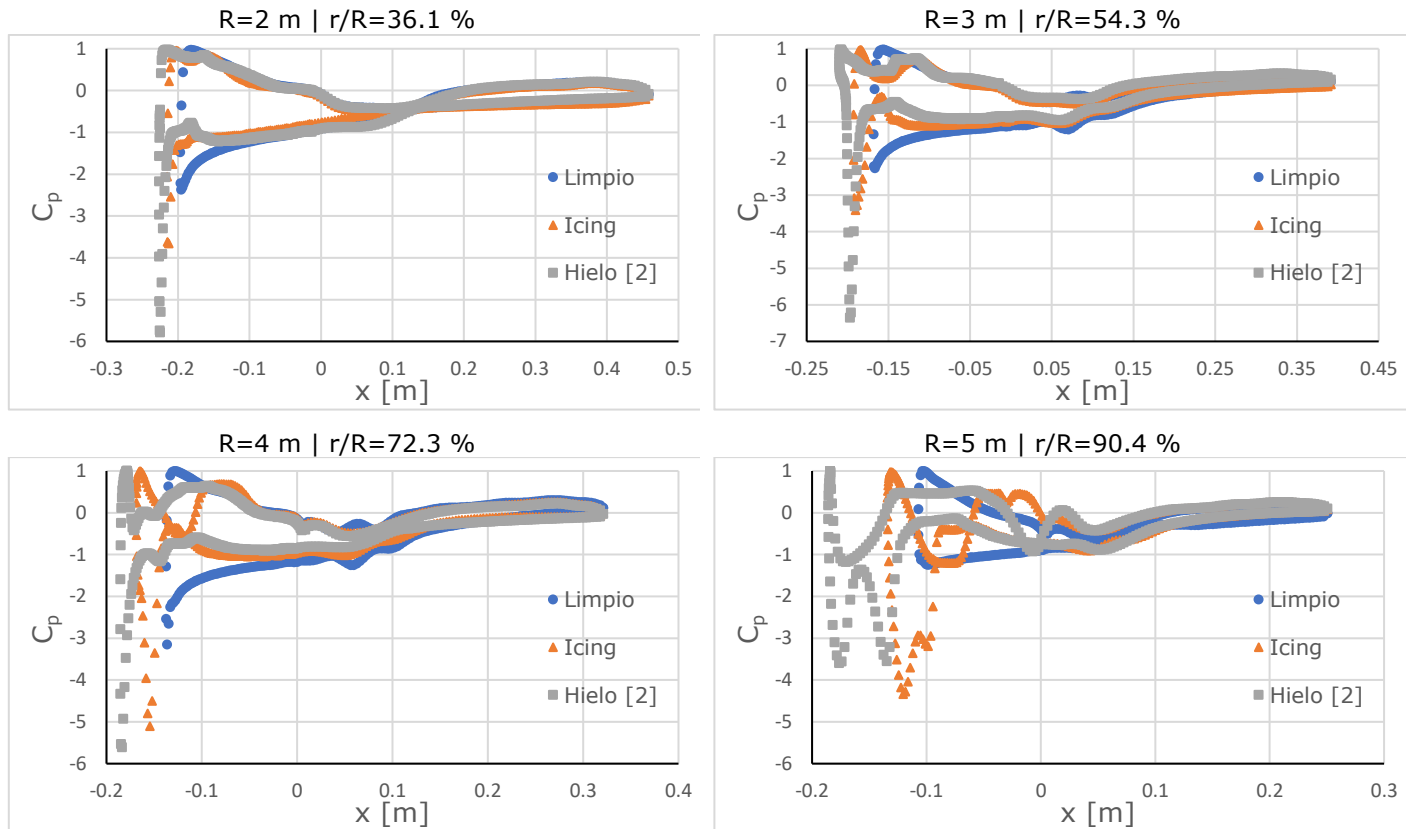


Figura 10- Coeficientes de presión a lo largo de los perfiles en las distintas posiciones radiales.

Debido a la presencia del hielo en el borde de ataque el punto donde la velocidad es máxima y la presión nula se traslada a la punta superior del hielo, lo que modifica la depresión que se produce en el extradós, comportamiento similar al caso de los perfiles acrecentados.

A causa de esta acumulación de hielo se produce una zona de estancamiento al comienzo del intradós, ya que las líneas de corriente no llegan hasta esa zona y la presión es máxima.

Como consecuencia de los cambios en el gradiente de presión se espera una disminución de C_L , ya que se pierde fuerza de sustentación por el cambio de presiones en el extradós en referencia con los perfiles limpios. Y debido a la modificación de la geometría del borde de ataque se espera un aumento en el C_D porque presenta un mayor arrastre que los perfiles limpios.

La Figura 10 muestra los coeficientes de presión (C_p) a lo largo de los perfiles en las cuatro posiciones radiales para los tres casos simulados. Se puede ver que tienen un comportamiento similar en los tres casos, pero en los perfiles con "Icing"

(Naranja) y acrecentados [2] (Gris) hay una mayor variación en la parte delantera respecto al perfil limpio (Azul). Esto es debido al hielo, que se acumula principalmente en el borde de ataque y cambia las distribuciones de presión.

El C_p se determina en todos los puntos del perfil para cada uno de los casos según la fórmula (7):

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2} \quad (7)$$

Comparación C_L y C_D

Tras haber comparado los contornos de velocidad y presión se procede a comparar los coeficientes aerodinámicos C_L y C_D .

En este trabajo se obtuvieron resultados de estos coeficientes con: La teoría BEM según los datos de [7], los perfiles limpios, los perfiles con "Icing" y los perfiles acrecentados de [2].

Tanto C_L como C_D aumentan a medida que aumenta el ángulo de ataque y no se llega a la zona



de desprendimiento donde el C_L baja drásticamente, que para este perfil se encuentra entorno a los 15° , [15].

La Figura 11 muestra la comparativa del C_L y la Figura 12 muestra la comparativa del C_D . Los resultados de los perfiles limpios (Azul) son muy similares a los del método BEM (Gris). Y los resultados de los perfiles con "Icing" (Amarillo) y acrecentados (Naranja) son muy similares y presentan el comportamiento esperado indicado por los contornos, el C_L disminuye porque hay una menor diferencia de presión entre el intradós y el extradós, y el C_D aumenta porque el perfil presenta mayor arrastre debido al cambio en la geometría de la parte delantera. Los cambios con los perfiles del "Icing" son un poco menores debido a que la forma de la acumulación del hielo no es tan pronunciada como la de los perfiles acrecentados y sigue de una manera más uniforme la línea del perfil.

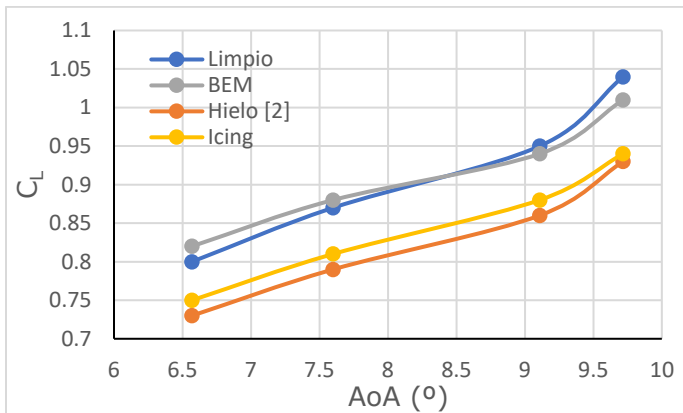


Figura 11- Comparativa del C_L en función del ángulo de ataque.

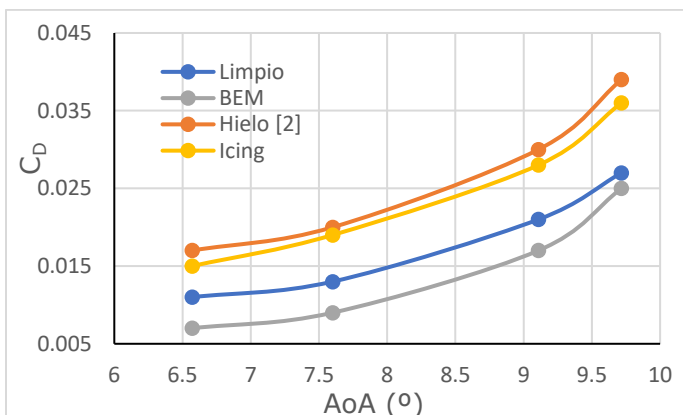


Figura 12- Comparativa del C_D en función del ángulo de ataque.

Comparando las diferencias de los perfiles limpios con los perfiles obtenidos con "Icing" se puede extraer que el C_L disminuye entorno a un 9% y que el C_D aumenta un 33%. Estos porcentajes representan la media de todas las posiciones radiales, pero la variación es muy parecida en todas porque a medida que se acerca a la punta de la pala la acumulación de hielo es mayor, pero compensa con la disminución en el ángulo de ataque.

CONCLUSIONES

La pala de la turbina de eje horizontal "NREL PHASE VI" se ha modelado en distintas posiciones radiales ($R=2$ m $r/R=0.361$; $R=3$ m $r/R=0.543$; $R=4$ m $r/R=0.723$; $R=5$ m $r/R=0.904$) para estudiar el comportamiento aerodinámico de sus perfiles. Simulando en rendimiento aerodinámico en condiciones normales y tras la acreción del hielo. Las simulaciones se han llevado a cabo con las ecuaciones RANS complementadas con el modelo de turbulencia SST $k-\omega$. Aparte de este modelo matemático se utilizó el método BEM para aumentar la precisión de los resultados, y la herramienta "Fluent Icing" para predecir la acumulación de hielo sobre el perfil.

Se realizó una validación completa del modelo numérico contrastando los resultados. Para ello se llevaron a cabo las simulaciones del perfil limpio complementadas con el método BEM para corregir la velocidad y tener en cuenta los efectos de la rotación de las palas. Sus resultados se compararon con los datos experimentales previos de [7] y [14] para ratificar la metodología empleada.

Tras verificar el método con perfiles limpios se estudia la acumulación del hielo a lo largo de la pala mediante la herramienta "Icing". Se obtienen las acreciones de hielo en las distintas posiciones radiales variando el tiempo de las simulaciones para observar las diferencias entre ellas. Se determina que el tiempo de la simulación es un parámetro clave para determinar la acumulación del hielo.

Una vez obtenidos los perfiles acrecentados, se modelan para poder simularlos y estudiar el rendimiento aerodinámico una vez acumulado el hielo. El mismo modelo matemático utilizado para los perfiles limpios fue el utilizado para los



acrecentados. Para validar sus resultados se compararon con los datos obtenidos en [2].

Analizando los resultados se puede determinar que debido a la acreción del hielo se produce una modificación en el rendimiento aerodinámico de los perfiles, con un aumento en el coeficiente de arrastre (C_D +33%) y una disminución en el coeficiente de sustentación (C_L -9%). Estas variaciones fluctúan levemente en función de la posición de la pala siendo mayores cerca de la base.

NOMENCLATURA

Símbolos

c	Cuerda del perfil
C_p	Coficiente de presión
F	Factor de corrección de Prandt
P_∞	Presión estática en la entrada del dominio
R	Radio de la pala
r	Posición radial
V	Velocidad absoluta del flujo
U	Velocidad circunferencial
W	Velocidad relativa
$Y+$	Distancia adimensional normal a la pared

Símbolos griegos

α	Ángulo de ataque
β	Ángulo de torsión
φ	Ángulo entre corriente y plano de rotación
θ	Ángulo de calado

Acrónimos

AoA	Angle of Attack
BEM	Blade Element Momentum
CFD	Computational Fluid Dynamics
EWT	Enhanced Wall Treatment
FVM	Finite Volume Method
LWC	Liquid water content
MVD	Median volumetric diameter
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent
SST	Shear Stress Transport
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes

REFERENCIAS

[1] A. Hudecz, H. Koss, y M. O. L. Hansen, «Ice Accretion on Wind Turbine Blades», p. 9, 2013.

[2] P. Fu y M. Farzaneh, «A CFD approach for modeling the rime-ice accretion process on a horizontal-axis wind turbine», *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 98, n.º 4-5, pp. 181-188, abr. 2010, doi: 10.1016/j.jweia.2009.10.014.

[3] D. J. L. Palacios, «Task A-1.13: Experimental Measurement of Ice Accretion and Shedding of Rotating Airfoils», p. 37, 2010.

[4] M. Biancolini, «An Efficient Approach to Simulating Ice Accretion on 2D», p. 6, 2013.

[5] L. E. Kollár y F. O. S. Santos, «Consideration of Icing in the Design of Wind Turbine Blade Sections», p. 6, 2019.

[6] «NREL Phase VI», [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62544.pdf>

[7] M. M. Hand *et al.*, «Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns», NREL/TP-500-29955, 15000240, dic. 2001. doi: 10.2172/15000240.

[8] «Airfoil Tools, S809». [En línea]. Disponible en: <http://http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s809-nr>

[9] K. Oukassou, S. E. Mouhsine, A. E. Hajjaji, y B. Kharbouch, «Comparison of the power, lift and drag coefficients of wind turbine blade from aerodynamics characteristics of Naca0012 and Naca2412», *Procedia Manuf.*, vol. 32, pp. 983-990, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.312.

[10] «Research onFlows for NACA 2412 Airfoil using Computational Fluid Dynamics Method», *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 9, n.º 1, pp. 5450-5456, oct. 2019, doi: 10.35940/ijeat.A3085.109119.

[11] Q. Wang *et al.*, «Simulation and analysis of wind turbine ice accretion under yaw condition via an Improved Multi-Shot Icing Computational Model», *Renew. Energy*, vol. 162, pp. 1854-1873, dic. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.107.

[12] J. Mourits, «BEM theory and CFD for Wind Turbine Aerodynamics», p. 73.

[13] C. C. Fernández y C. S. Morros, «Diseño Aerodinámico Optimizado de un Aerogenerador de Eje Horizontal», p. 16.

[14] H. Yang, «Prediction of the wind turbine performance by using BEM with airfoil data extracted from CFD», *Renew. Energy*, p. 9, 2014.

[15] C. Zhu, Y. Qiu, y T. Wang, «Dynamic stall of the wind turbine airfoil and blade undergoing pitch oscillations: A comparative study», *Energy*, vol. 222, p. 120004, may 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120004