



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Estudio computacional de una turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con perfiles NACA 4518

Autor:

Gómez García, Víctor

Tutores:

**Rodríguez Beneite, Miguel Ángel
Parra Santos, María Teresa
Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Valladolid, septiembre de 2015.

Agradecimiento

A mi familia y a todas esas
personas que me han
apoyado.

A María Teresa por ser una
fuente de motivación y
ayuda constante.

Resumen

Este Trabajo Fin de Grado desarrolla el estudio de una turbina eólica de eje vertical H-Darrieus equipada con perfiles NACA 4518. Partiendo de un repaso de la situación actual en la que se encuentra la energía eólica se introducen las leyes físicas que caracterizan el aprovechamiento de esta energía.

Se realiza la construcción de un modelo matemático 2D de la turbina y, haciendo uso de la Mecánica de Fluidos Computacional con el software *Fluent.Inc*, se establecen las configuraciones y condiciones para simular el funcionamiento real de la misma.

A partir de los resultados obtenidos se construyen las curvas características que definen el comportamiento del aerogenerador y se analiza el patrón de flujo al que se ve sometido.

Por último se realiza un estudio paramétrico, variando la inclinación de los álabes o ángulo de pitch, para comprobar su influencia en el funcionamiento de la turbina.

Palabras clave: Energía eólica, VAWT, H-Darrieus, CFD, ángulo de pitch.

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Justificación.....	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.4. Estructura de la memoria.....	4
Capítulo 2. Construcción del modelo.....	5
2.1. Energía y potencia eólica.....	5
2.2. Modelo físico.....	6
2.2.1. Parámetros geométricos.....	11
2.2.2. Parámetros adimensionales.....	11
2.3. Modelo numérico.....	12
2.3.1. Dominio computacional.....	13
2.3.2. Condiciones de contorno.....	15
2.3.3. Propiedades del fluido.....	17
2.3.4. Algoritmo de resolución.....	18
2.3.4.1. Control de la solución.....	18
2.3.4.2. Modelo de turbulencia.....	18
2.3.4.3. Resolución temporal y periodicidad.....	19
2.3.4.4. Monitores.....	20
2.3.5. Diseño de experimentos.....	21
Capítulo 3. Análisis de resultados.....	23
3.1. Periodicidad y convergencia de los resultados.....	23
3.2. Curvas características.....	24
3.2.1. Construcción de las curvas características.....	24
3.2.2. Curva característica C_m -TSR.....	28
3.2.3. Curva característica C_p -TSR.....	29
3.3. Patrón de flujo en condiciones de diseño.....	30

3.3.1. Posiciones favorables, desfavorables y comportamiento de los álabes.	31
3.3.2. Contornos de presión.....	34
3.3.3. Contornos de velocidad.	37
3.3.4. Campo de velocidades.....	38
3.3.5. Turbulencia.....	41
3.3.6. Estelas.	42
Capítulo 4. Estudio paramétrico, influencia del ángulo de pitch.....	45
4.1. Modelo con ángulo de pitch de +6 grados.....	45
4.2. Análisis y comparación de los resultados.....	47
4.2.1. Periodicidad y convergencia de los resultados.....	47
4.2.2. Curvas características.	48
4.2.3. Patrón de flujo.	51
4.2.3.1. Posiciones favorables y desfavorables.	51
4.2.3.2. Contornos y distribuciones de presión.....	51
4.2.3.3. Campo de velocidades.....	56
4.2.3.4. Turbulencia	59
4.3. Conclusiones sobre la influencia del ángulo de pitch	60
Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros.....	61
5.1. Conclusiones.	61
5.2. Trabajos futuros.	62
Bibliografía.	63
Anexo 1.....	65

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Justificación.

La energía juega un papel clave en el marco socio económico en el que actualmente se encuentra la humanidad. Con un nivel tecnológico continuamente creciente y en expansión hacia un mayor porcentaje de la población mundial, la producción de energía debe adaptarse a la demanda exigida, pero también a unas condiciones impuestas para asegurar la sostenibilidad de la producción y del planeta a largo plazo. Esto lleva a la necesidad de un aprovechamiento inteligente de los recursos que se presentan.

La energía eléctrica es la forma de energía más ampliamente utilizada debido a su facilidad y eficiencia en el transporte, conversión y uso en las actividades humanas. Sin embargo, la energía eléctrica es una forma secundaria de energía, obtenida a partir de alguna otra forma primaria, como el carbón, el petróleo, el gas natural, la energía nuclear o las energías renovables. Son las energías renovables, virtualmente inagotables, las que con su progreso y desarrollo van a jugar un papel determinante en la sostenibilidad de la energía.

Este trabajo se desarrolla en el ámbito de la energía eólica. La energía eólica se basa en el aprovechamiento la energía cinética de las masas de aire en movimiento dentro de la atmosfera, éstas se desplazan desde zonas de alta presión a zonas de baja, con velocidades proporcionales al gradiente de presión. La energía eólica proviene primariamente de la energía contenida en la radiación solar que provoca un calentamiento no uniforme de la superficie terrestre.

La energía eólica se encuentra en creciente evolución a nivel mundial con una potencia instalada que asciende año a año, como muestra la figura 1.1.

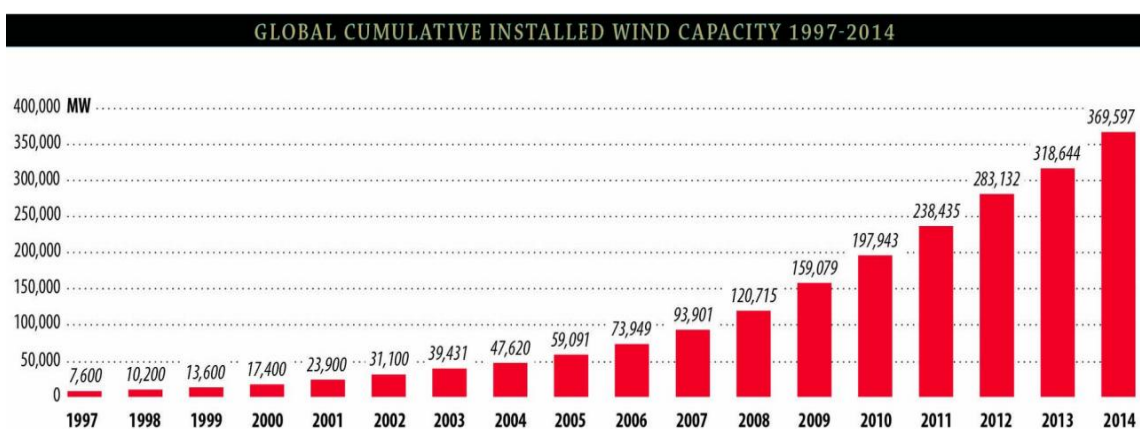


Fig. 1.1: Potencia eólica global instala acumulada entre 1997 y 2014.

[GWEC]

China, Estados Unidos, Alemania y España son los primeros productores mundiales de energía eólica al cerrar el año 2014 [GWEC, 2015].

En España la potencia eólica instalada a 31 de diciembre de 2014 es de 22804 MW, lo que supone un 22,3 % del total instalado [REE]. La cobertura de la producción eólica sobre la total desde enero de 2014 hasta julio de 2015 ha sido del 20,3 %, solo por detrás de la energía nuclear en el periodo señalado y situándose como primera fuente de generación en algunos meses del periodo. [REE].

Como muestran los datos [GWEC, 2015], [EWEA, 2015],[REE], la energía eólica es ya una de las principales fuentes de energía primaria en España y en el resto del mundo. Cada vez son más los emplazamientos propicios para la instalación de granjas eólicas de grandes potencias que ya se están explotando con el empleo de grandes aerogeneradores de eje horizontal (HAWT). Es ahora cuando empiezan a tener mayor importancia las instalaciones de pequeñas potencias. Es aquí donde las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) tienen ventajas sobre las HAWT debido a su menor coste y capacidad de aprovechar la energía a una velocidad de viento menor. Sin embargo, también cuentan con algún inconveniente, como se ve en los posteriores capítulos, y que deben superar para empezar a ser una competencia directa con las fuentes de energía primarias.

En la siguiente figura 1.2 se muestra un ejemplo de una turbina eólica de eje vertical VAWT H-Darrieus y una HAWT tripala.



Fig. 1.2: Ejemplos de turbinas eólicas de eje horizontal (izquierda) y de eje vertical (derecha).

[Doylecfd.com] [Ewwind.com]

En este Trabajo Fin de Grado se desarrolla el estudio de las turbinas eólicas de eje vertical VAWT, del tipo H-Darrieus con perfiles NACA 4518.

1.2. Antecedentes.

El departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid sigue una línea de investigación sobre el estudio de aerogeneradores que comenzó en el año 2010. El presente trabajo parte de una serie de estudios desarrollados desde entonces:

- ❖ [Vega, 2012] en su Trabajo Fin de Máster desarrolla un modelo número de un aerogenerador H-Darrieus NACA 0012 de tres aspas para predecir su comportamiento mediante el empleo de la Mecánica de Fluidos Computacional.
- ❖ [Ramos, 2013] desarrolla una herramienta CAD para la construcción de modelos geométricos de aerogeneradores de eje vertical Darrieus tipo-H, consiguiendo un mallado semiautomático usando diferentes perfiles de la familia NACA de 4 dígitos.
- ❖ [González, 2014] estudia la influencia de la solidez en VAWT H-Darrieus con perfiles asimétricos NACA 2425.
- ❖ [Esteban, 2014] estudia la influencia de la solidez en aerogeneradores H-Darrieus con perfiles simétricos NACA 0025.
- ❖ [Revilla, 2014] desarrolla un análisis CFD bidimensional y tridimensional de un aerogenerador H-Darrieus con perfiles NACA 0025 para su comparación.
- ❖ [Regidor, 2015] estudia la influencia de la inclusión de los brazos de soporte de los álabes y la utilización de diferentes modelos de turbulencia en aerogeneradores Darrieus tipo-H con perfiles simétricos NACA 0015.

Fuera del departamento la documentación que ha sido utilizada como base para la realización de este trabajo ha sido la siguiente:

- ❖ [Biswas, 2010] lleva a cabo el estudio de un rotor H-Darrieus con perfiles NACA 0012 modificados, mediante *Fluent*.Inc v6.2 y túnel de viento.
- ❖ [Lanzafame, 2013] desarrolla el estudio computacional y experimental de una turbina eólica de eje horizontal HAWT de 3 palas. La comparación de los resultados de este estudio, en concreto de las curvas características obtenidas, con los resultados de estudios sobre VAWT reflejan las diferencias entre ambos tipos de turbinas.
- ❖ [Lanzafame, 2014], con el desarrollo del estudio numérico y experimental de modelos de aerogenerador H-Darrieus con perfiles NACA 0015 y 4518 utilizando un modelo de turbulencia k-omega SST, con resultados numéricos que consiguen un buen acuerdo con los experimentales.
- ❖ [Xin, 2015] muestra los principales métodos de investigación en VAWT y sus aplicaciones.
- ❖ [Young-Tae, 2015] desarrolla el estudio de una VAWT de quinientos vatios.

1.3. Objetivos.

En este Trabajo Fin de Grado se pretende desarrollar la construcción y simulación de un modelo 2D de turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con tres perfiles equiespaciados NACA 4518 (asimétricos) mediante la Mecánica de Fluidos Computacional y utilizando el software *Fluent Inc. v6.3.26*.

Entre los principales objetivos se encuentran los siguientes:

- ❖ La realización de un modelo numérico que permita realizar las simulaciones íntegramente con un ordenador personal obteniendo unos resultados válidos sin comprometer en exceso el coste computacional. El factor más influyente en este apartado es conseguir una buena velocidad de convergencia de los resultados.
- ❖ Construir las curvas característica que definen el comportamiento en servicio del aerogenerador.
- ❖ Estudiar el patrón de flujo al que está sometido el aerogenerador y en especial alrededor de los álabes.
- ❖ Comprobar la influencia del ángulo de pitch en el comportamiento de la turbina.

1.4. Estructura de la memoria.

La memoria se presenta estructurada en 5 capítulos:

- ❖ Capítulo 1. Introducción. En el que se expone la importancia y justificación del trabajo, los antecedentes de los cuales parte la investigación y los objetivos que se pretenden alcanzar.
- ❖ Capítulo 2. Construcción del modelo. Este capítulo se inicia con la explicación del modelo y funcionamiento físicos del aerogenerador y posteriormente se desarrolla la construcción del modelo matemático, con las configuraciones establecidas para realizar las simulaciones mediante CFD.
- ❖ Capítulo 3. Análisis de resultados. Donde se presentan los resultados obtenidos de la simulación mediante CFD. Se construyen las curvas características que definen el aerogenerador y se analiza el patrón de flujo al que se ve sometido.
- ❖ Capítulo 4. Estudio paramétrico, influencia del ángulo de pitch. En el que se comparan los resultados ofrecidos por la simulación de la misma turbina de los capítulos anteriores al variar el ángulo de pitch de los álabes.
- ❖ Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros. Donde se exponen las conclusiones del estudio y se proponen recomendaciones para trabajos futuros extraídas de los puntos fuertes y débiles del modelo.

Capítulo 2. Construcción del modelo.

En este capítulo se presenta el desarrollo de la construcción del modelo 2D de un aerogenerador H-Darrieus con perfiles NACA 4518. Sobre él se va a realizar un trabajo de simulación mediante mecánica de fluidos computacional, CFD.

2.1. Energía y potencia eólica.

La energía eólica se basa en aprovechar la energía cinética de las masas de aire en movimiento dentro la atmosfera. Para captar esta energía se debe emplear un elemento sólido que reste energía cinética al aire y la aproveche para generar su propio movimiento.

La energía cinética que posee una masa de aire (figura 2.1) de densidad ρ_a con una velocidad uniforme v que atraviesa una sección de área A durante un tiempo t es:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot v^3 \cdot t \quad (2.1)$$

Por tanto, la potencia disponible en una masa de aire de tales características resulta:

$$P_{disponible} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot v^3 \quad (2.2)$$

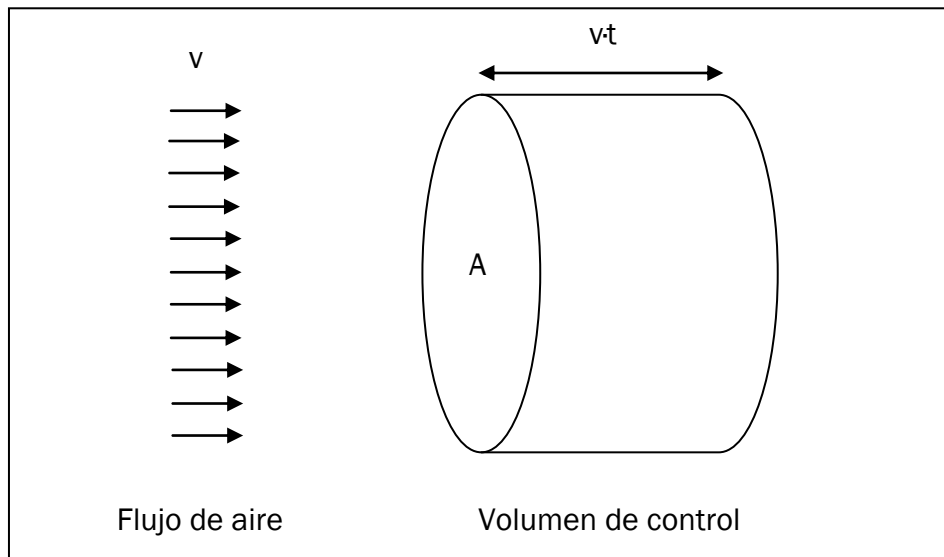


Fig. 2.1: Representación esquemática para la deducción de la energía cinética y potencia de una masa de viento

Esta potencia, como se observa, depende cúbicamente de la velocidad del viento, siendo el factor más determinante.

Como ejemplo, en la figura 2.2 se representa la potencia disponible en una masa de aire de densidad estándar $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$, que atraviesa un área $A = 10 \text{ m}^2$, en función de su velocidad.

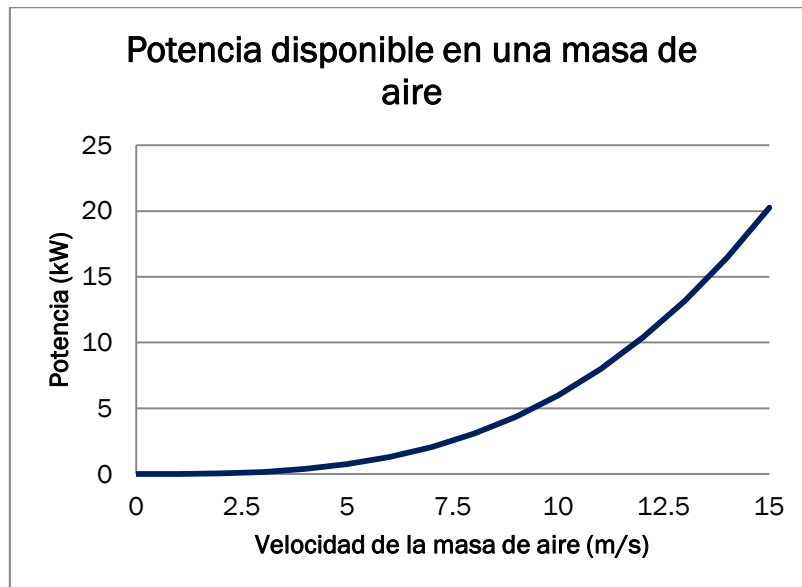


Fig. 2.2: Potencia disponible en una masa de aire de densidad de 1,2 kilogramos por metro cúbico en función de su velocidad, para una sección de paso de 10 metros cuadrados.

Se aprecia como para una velocidad del viento de 7 metros por segundo, la potencia disponible es aproximadamente de 2 kilovatios, y para una velocidad de 10 metros por segundo, la potencia disponible asciende hasta los 6 kilovatios.

Sin embargo una turbina eólica no es capaz de aprovechar toda la potencia disponible ya que nunca podría llevar la corriente de aire hasta el remanso por no cumplir el balance de masa. La eficiencia máxima teórica de una turbina eólica ideal es de $16/27$ (59,3%). Fue deducida por el físico Alemán Albert Betz en 1919 y aparece desarrollada en [Mathew-2006]

Actualmente el principal uso de la energía eólica reside en su transformación en energía eléctrica, la fuente de energía más fácilmente aprovechable en la actualidad. Para ello, la energía eólica se transforma en energía mecánica, mediante una turbina eólica y a su vez la energía mecánica se transforma en energía eléctrica mediante un generador o alternador.

2.2. Modelo físico.

Existen gran variedad de tipos diferentes de turbinas eólicas, tanto de eje horizontal como vertical.

Las VAWT (turbina eólica de eje vertical) presentan una serie de ventajas como mayor simplicidad estructural por poder situar tanto el generador como la transmisión en la base y no en altura como los HAWT (turbinas eólicas de eje horizontal) y la nula necesidad de sistema de orientación. Sin embargo, cuentan con desventajas como un rendimiento menor, en general, debido a que el momento generado en su eje presenta posiciones favorables y desfavorables y, en algunos casos, la incapacidad de un arranque autónomo, con la necesidad de una fuente de energía extra para empezar a girar.

En este estudio se desarrolla la simulación mediante CFD (Mecánica de fluidos computacional) de una VAWT de tipo H-Darrieus (figura 2.3), con perfiles NACA 4518. Se trata de una turbina formada por 3 álabes separados angularmente 120° y distanciados mediante brazos del eje, al que transmiten el momento desarrollado. Es un modelo de turbina de pequeño tamaño, cuyo fin no es la producción en masa sino su uso en zonas aisladas o de producción puntual.



Fig. 2.3: Ejemplo de aerogenerador de eje vertical tipo H-Darrieus, situado en la Antártida [[Wikipedia.org](https://es.wikipedia.org)]

Para extraer la máxima energía, las secciones de las palas de la turbina están diseñadas con forma de perfil aerodinámico o perfil alar (figura 2.4), cuyas partes fundamentales son las siguientes:

- Borde de ataque: Punto más avanzado del perfil, zona de incidencia del aire.
- Borde de salida: Punto más retrasado del perfil, zona de salida del aire.

- **Cuerda:** Línea recta de unión entre el borde de ataque y de salida, cuya longitud caracteriza el perfil.
- **Línea media:** Línea equidistante entre los dos bordes del perfil, si el perfil es simétrico esta línea es una recta.
- **Ordenada máxima de la línea media:** Es la distancia máxima entre la línea media y la cuerda del perfil, en dirección perpendicular a la cuerda.
- **Posición de la ordenada máxima:** Distancia desde el borde de ataque al punto de ordenada máxima de la línea media.
- **Espesor máximo:** Máxima distancia entre los bordes del perfil, medida en dirección perpendicular a la cuerda.
- **Posición de espesor máximo:** Distancia desde el borde de ataque al punto de espesor máximo.

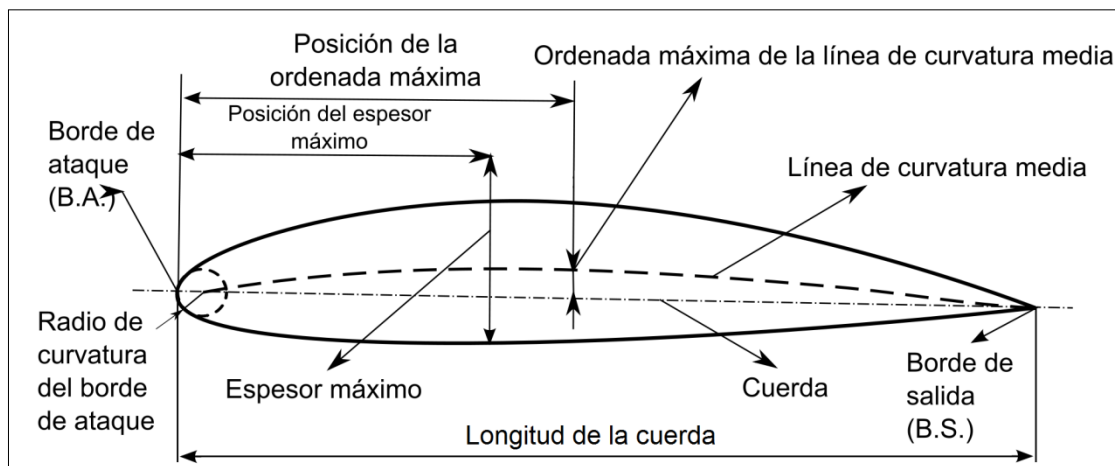


Fig. 2.4: Características y nomenclatura de un perfil aerodinámico. [[Wikipedia.org](https://es.wikipedia.org)].

Los perfiles más utilizados son los normalizados **NACA** (Comité Consejero Nacional para la Aeronáutica) en su especificación de 4 dígitos:

- El primer dígito expresa la ordenada máxima de la línea media como porcentaje de la longitud de la cuerda, en perfiles simétricos es cero.
- El segundo expresa la posición de la ordenada máxima de la línea media, en decimas.
- Los dos últimos expresan el espesor máximo como porcentaje de la longitud de la cuerda.

El modelo estudiado, **NACA 4518**, se trata de un perfil asimétrico, con un espesor máximo de un 18% de la cuerda, una ordenada máxima de la línea media de un 4% de cuerda a un 50% de la longitud de la misma.

Cuando una corriente de aire uniforme incide sobre un álabe de perfil aerodinámico, ésta, ve modificado su patrón de flujo. El flujo debe pasar por encima y por debajo de la sección del álabe y, debido a la curvatura del mismo, se

desarrollan zonas de mayor velocidad y menor presión, donde el flujo debe recorrer una mayor distancia, y zonas de menor velocidad y mayor presión, donde el flujo recorre una menor distancia, de acuerdo con el principio de Bernoulli.

La cara del álabe donde existe una mayor velocidad y una menor presión se conoce como extradós. La cara opuesta se conoce como intradós.

Esta diferencia de presiones alrededor del álabe provoca que se generen un par de fuerzas, conocidas como fuerzas de sustentación L y de arrastre D (figura 2.5). Estas vienen definidas en función de la sección del álabe, A , en dirección del flujo, la densidad del aire ρ_a , la velocidad del flujo de aire v y los respectivos coeficientes de sustentación C_L y arrastre C_D .

$$L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot v^2 \quad (2.3)$$

$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot v^2 \quad (2.4)$$

Los coeficientes de sustentación y de arrastre se pueden determinar tanto experimental como numéricamente. Éstos se ven muy influenciados por el ángulo que forma la dirección del flujo con la dirección de la cuerda del perfil, conocido como ángulo de pitch, α .

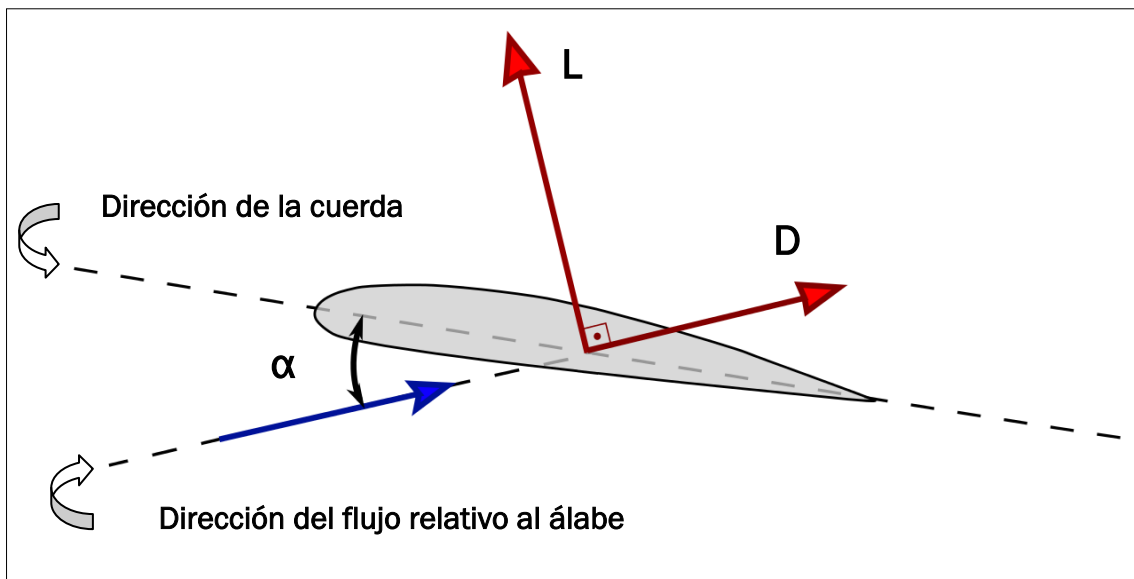


Fig. 2.5: Fuerzas de sustentación y arrastre en un perfil aerodinámico con ángulo de pitch negativo

Dentro de la turbina del modelo estudiado, se introduce la complicación debida a que ésta, cuando está en funcionamiento, se encuentran realizando un movimiento de rotación. Esto provoca que la velocidad y dirección relativas del flujo de aire que incide sobre cada álabe varíen en cada instante, variando también el ángulo de pitch y las fuerzas provocadas.

El momento que ejercen dichas fuerzas de sustentación y arrastre de cada álabe sobre el eje de la turbina es el que provoca su movimiento y capacidad de producción de potencia. Este momento, como se verá en los resultados del capítulo 3 varía de forma periódica, pasando por posiciones angulares donde se alcanza un máximo instantáneo, posiciones más favorables, y posiciones angulares donde el momento alcanza un mínimo instantáneo, posiciones más desfavorables.

En la figura 2.6 se observa, para una turbina de 4 álabes en una posición angular dada, las velocidades relativas del flujo en cada álabe y las fuerzas producidas. Se representa también el sistema de referencia utilizado en lo sucesivo. El centro del sistema de coordenadas está situado en el eje del rotor y el sentido de giro positivo de los álabes es el antihorario, con el origen del giro en el eje Y positivo.

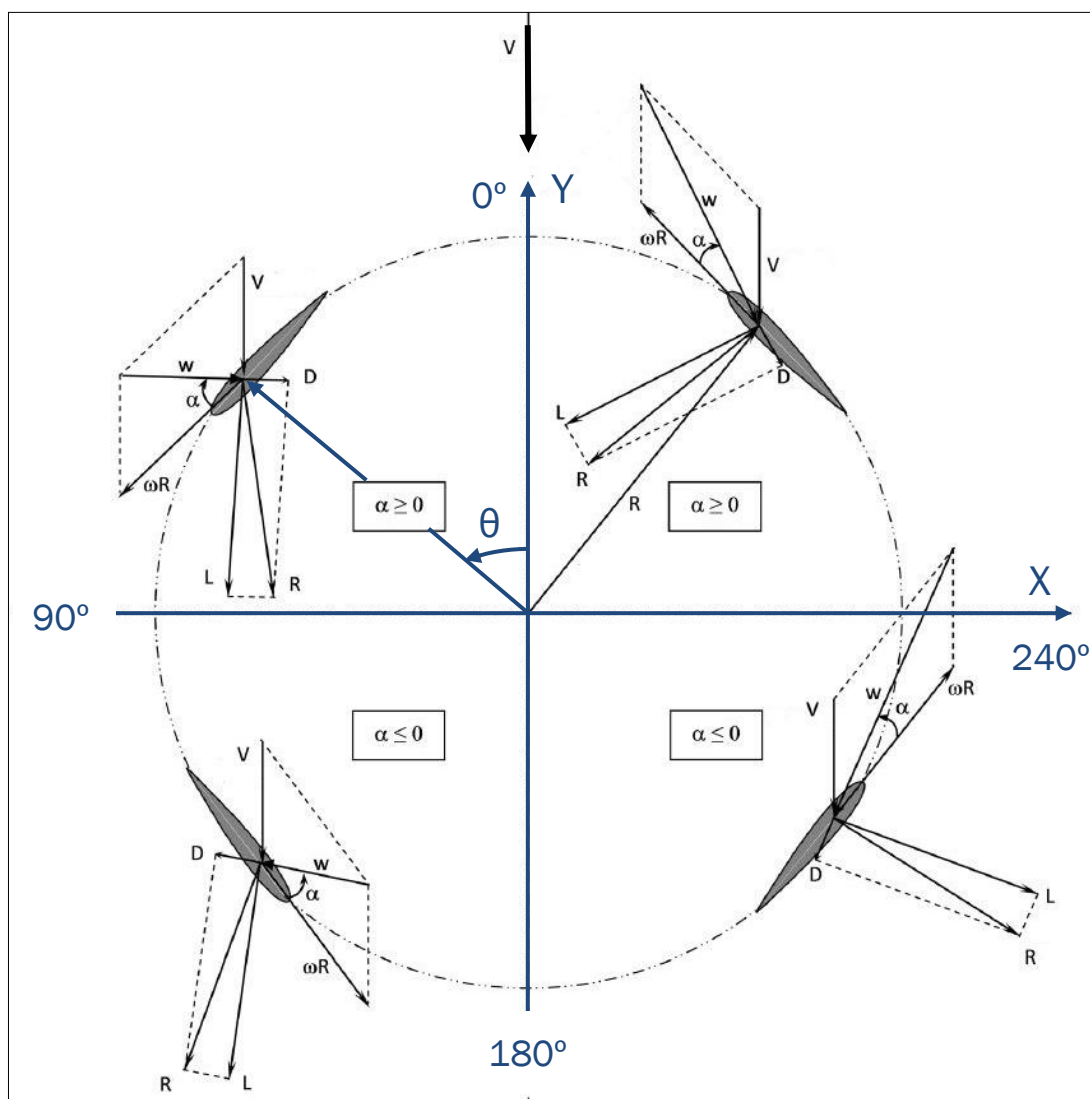


Fig. 2.6: Plano de rotación de una VAWT H-Darrieus de 4 álabes. Velocidades relativas y fuerzas de sustentación y arrastre en cada álabe para una posición angular dada. [Brusca, 2014, p. 335].

Nótese, aunque la velocidad de aire incidente del modelo estudiado es según la dirección X positiva, en la figura es según la dirección Y negativa

2.2.1. Parámetros geométricos.

Se emplea un modelo 2D debido a su menor coste computacional y por arrojar resultados aceptables, aunque con sobreestimaciones que pueden llegar al 32% respecto a un análisis 3D [Salman, 2015]

Los parámetros geométricos del modelo estudiado son los presentados en la tabla 2.1. Se trata de un modelo a escala respecto a una turbina real, que permite poder realizar una validación experimental en túnel de viento en un trabajo futuro.

Según [Lanzafame, 2014], para la resolución computacional, el tamaño del modelo debe ser lo suficientemente grande para reproducir correctamente el flujo real a través de los álabes, pero lo suficientemente pequeño para que el tiempo de resolución no sea excesivo.

Tabla 2.1: Parámetros geométricos NACA4518 (2D)

Z (número de álabes)	3
c (cuerda)	0,05 m
R (radio)	0,07 m
b (ancho o espesor)	0,375 m
A (área transversal)	0,05625 m ²
D _H (diámetro hidráulico)	0,14 m
σ (solidez)	1,07
α (ángulo de pitch, posición 0°)	-6°

El ancho b es la longitud de los álabes en la dirección del eje de la turbina.

El área transversal A es el correspondiente a la sección ocupada por los tres álabes en la dirección del flujo.

$$A = 3 \cdot c \cdot b \quad (2.5)$$

El diámetro hidráulico D_H se define como el mínimo cilindro que contiene a la turbina.

$$D_H = 2 \cdot R \quad (2.6)$$

2.2.2. Parámetros adimensionales.

Se utilizan parámetros adimensionales para definir algunas de las características y condiciones de funcionamiento de las turbina eólicas.

La solidez σ expresa el cociente entre el área ocupada por las palas, área sólida, y el área transversal del rotor, área de paso del flujo de aire.

$$\sigma = \frac{Z \cdot c \cdot b}{2 \cdot R \cdot b} \quad (2.7)$$

En la ecuación (2.2) se expresa la potencia disponible en un flujo de aire. Para expresar el rendimiento de la turbina eólica se establece un coeficiente de potencia C_p que expresa la relación entre la potencia desarrollada por la turbina P_t , en unas condiciones dadas, y la potencia teórica disponible en esas condiciones.

$$C_p = \frac{2 \cdot P_t}{\rho_A \cdot A \cdot v^3} \quad (2.8)$$

Este coeficiente de potencia C_p depende de múltiples factores, tanto de la geometría de los perfiles, su rugosidad, ángulo de pitch, solidez, etc. Es un trabajo de optimización lograr maximizar el coeficiente de potencia variando cada uno de los parámetros influyentes para un amplio rango de velocidades de viento. En el capítulo 4 se realizará el estudio paramétrico de la turbina estudiada para un ángulo de pitch de +6°.

Se establece también un coeficiente de momento C_m , de significado análogo al coeficiente de potencia, pero para el caso del momento en el eje de la turbina M_t .

$$C_m = \frac{2 \cdot M_t}{\rho_A \cdot A \cdot v^2 \cdot R} \quad (2.9)$$

Para que se tenga información tanto de la velocidad del flujo de aire como de la velocidad de rotación de la turbina en un único parámetro adimensional se define el tip speed ratio, TSR ó λ , como el cociente entre la velocidad de la punta de las palas y la velocidad del flujo de aire sin perturbar.

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (2.10)$$

Con ω en rad/s.

Además, el tip speed ratio relaciona el coeficiente de potencia y el de par.

$$TSR = \frac{C_p}{C_m} \quad (2.11)$$

2.3. Modelo numérico.

La simulación CFD se desarrolla mediante el software informático *Fluent.inc* v6.3.26. Este software se basa en el método de volúmenes finitos FVM, el cual permite resolver de forma numérica y aproximada un problema regido por ecuaciones diferenciales parciales, en este caso las ecuaciones de Navier-Stokes [Crespo, 2006], [Sánchez, 2004]. Para ello se discretiza el espacio continuo en un

número elevado de subespacios, llamados volúmenes finitos o celdas, y el sistema de ecuaciones diferenciales que gobierna el conjunto se convierte en un sistema de ecuaciones lineales algebraicas para cada volumen. Se pasa por tanto de un problema de cálculo diferencial a uno de algebra lineal. Cuanto mayor sea el número de volúmenes en los que se discretiza el problema más aproximada será la solución ofrecida por el método de volúmenes finitos.

2.3.1. Dominio computacional.

Para la discretización del espacio y la construcción de la malla se emplea el software *Gambit* y el *Journal* elaborado por [Ramos, 2013] en el que está programada la creación de la malla a través de los parámetros geométricos.

La malla utilizada cuenta con 82000 celdas y presenta dos zonas diferenciadas (figura 2.7).

- La zona 1 (ambiente) presenta un mallado fijo, se modela con una baja densidad de celdas, con un total de 2500, debido a que es la zona más alejada de los álabes y la que menos influencia tiene sobre la turbina. Se extiende en mayor medida aguas abajo para apreciar la estela generada por los álabes.
- La zona 2 (rotor) cuenta con un mallado móvil, con un movimiento de rotación antihorario en dirección del eje del rotor. Su densidad de celdas es alta, con un total de 79500, debido a que es la zona en contacto con los álabes y la que mayores gradientes va a soportar.

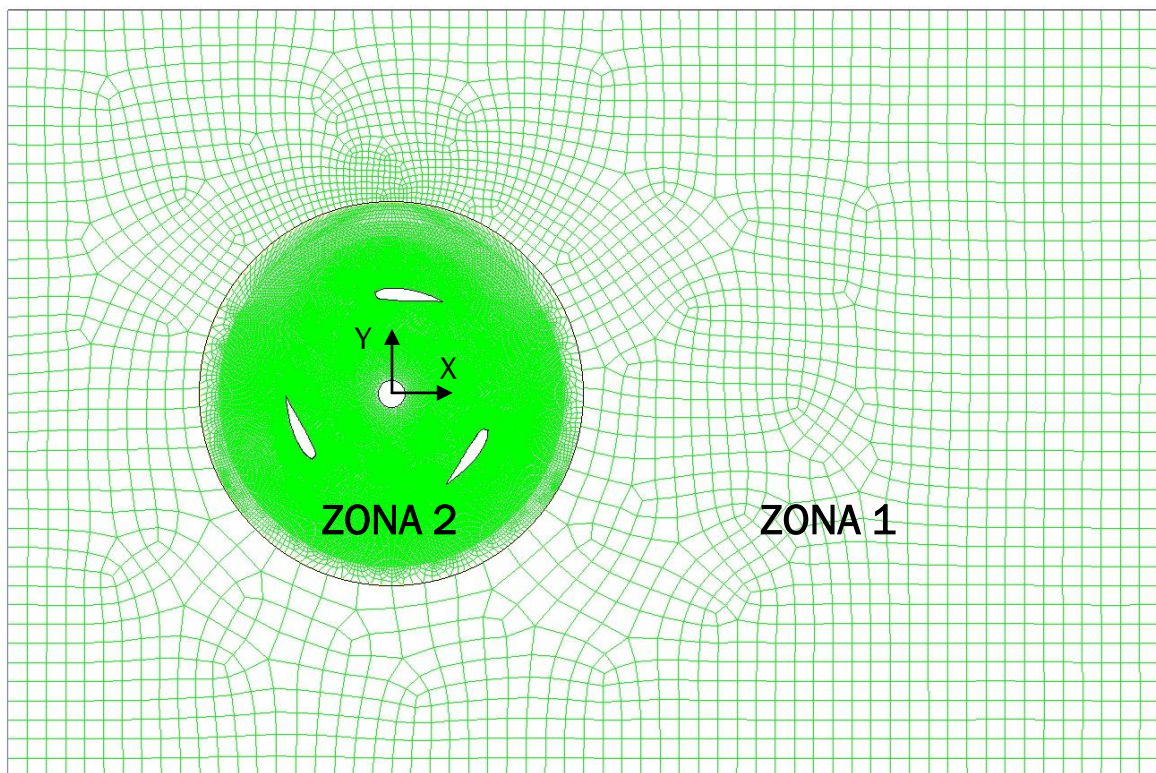


Fig. 2.7: Malla del modelo, con dos zonas diferenciadas.

El dominio espacial del modelo abarca los siguientes intervalos:

- Coordenada $X \in [-0,28, 0,56]$ metros
- Coordenada $Y \in [-0,28, 0,28]$ metros.

En las figura 2.8 y 2.9 se muestran vistas en detalle del mallado en la zona del rotor y en la proximidad de los álabes.

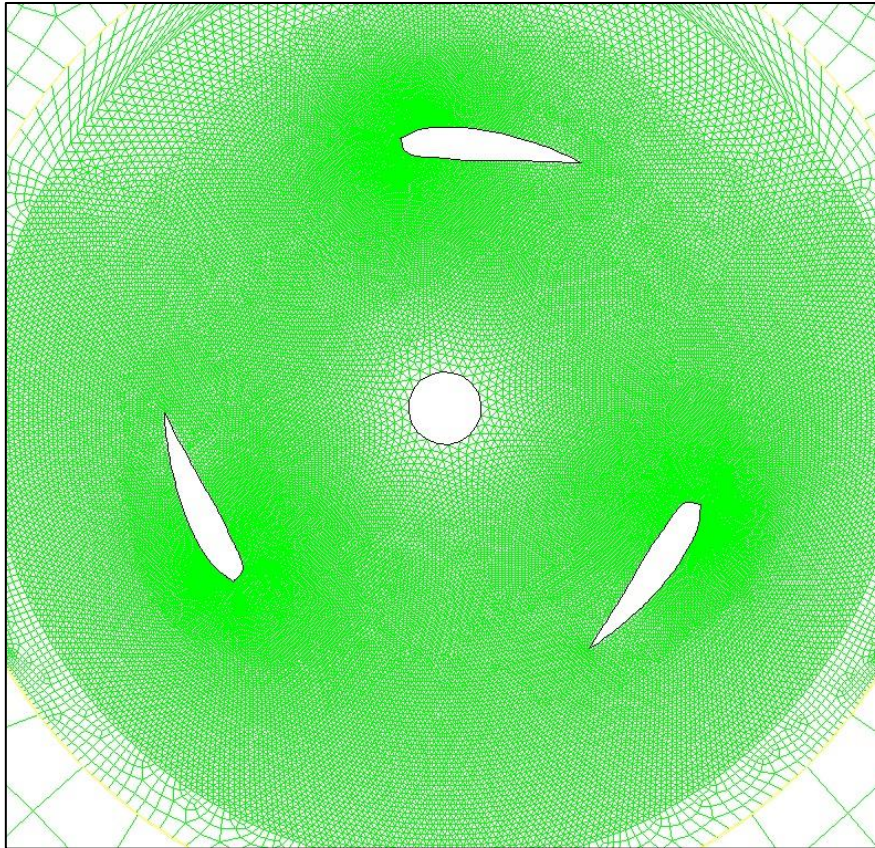


Fig. 2.8: Detalle de mallado en zona 2 (rotor).

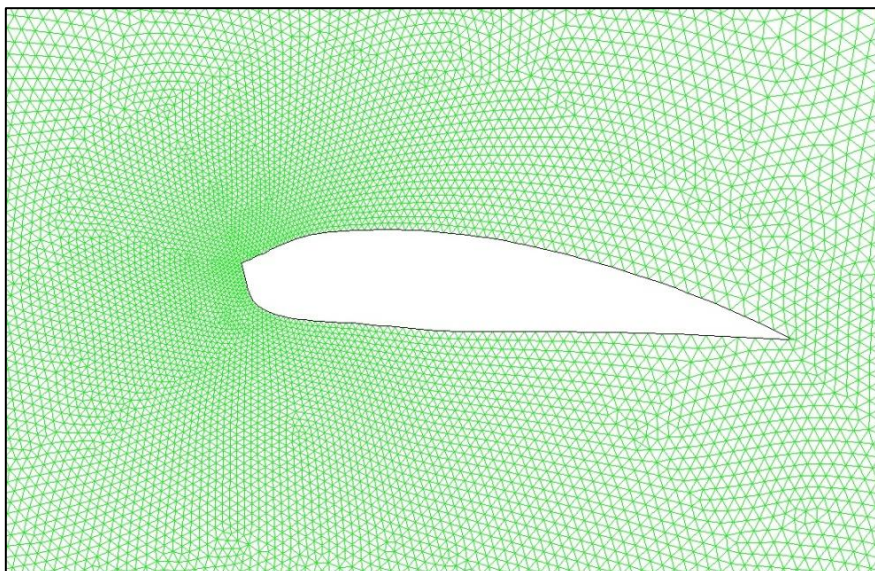


Fig. 2.9: Detalle de mallado alrededor del álabe.

2.3.2. Condiciones de contorno.

Para la resolución de las ecuaciones en derivadas parciales de Navier-Stokes es necesario imponer una serie de condiciones de contorno al dominio espacial del problema. En la tabla 2.2, junto con la figura 2.10, se muestran las condiciones de contorno impuestas al dominio espacial del modelo numérico del aerogenerador con perfiles NACA 4518.

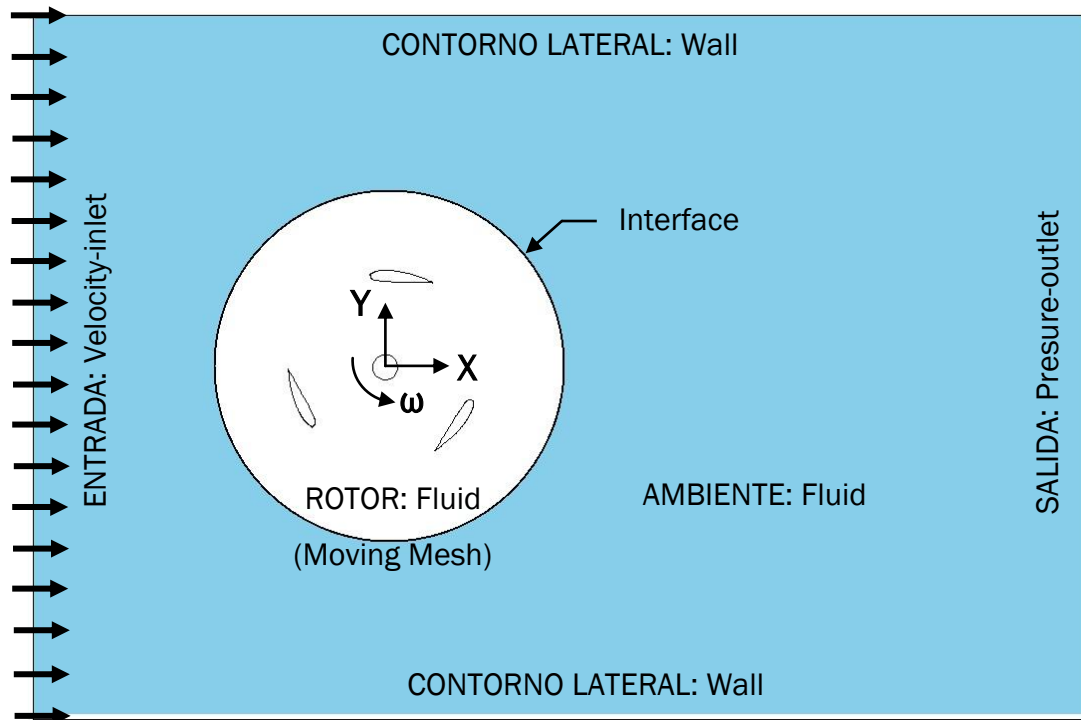


Fig. 2.10: Esquema de las condiciones de contorno del modelo

Tabla 2.2: Condiciones de contorno del modelo. NACA4518 (2D)

Entrada	<p>Velocity-inlet.</p> <p>Velocity Specification Method: Normal to Boundary</p> <p>Velocidad: 7 m/s</p> <p>Turbulence: Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter</p> <p>Intensidad turbulenta: 7,5 %</p> <p>Diámetro Hidráulico: 0,14 m</p>
Salida	<p>Pressure-outlet.</p> <p>Presión manométrica: 0 Pa</p> <p>Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary</p> <p>Turbulence: Specification Method: K and Omega</p> <p>Energía cinética turbulenta: 1 m²/s²</p>

	Ratio de disipación: 1 s⁻¹
Contornos laterales, eje rotor y perfiles	Wall. Stationary Wall Altura de rugosidad: 0 m Coefficiente de rozamiento del material: 0,5
Ambiente	Fluid. Air Motion Type: Stationary
Rotor	Fluid. Air Motion Type: Moving Mesh Rotational velocity: ω rad/s
Interfase	Interface. Ambiente-Rotor Rotor-Ambiente

Las condiciones de contorno se establecen para reproducir de la forma más fiel posible el funcionamiento del aerogenerador en condiciones reales, o de túnel de viento.

Los brazos de unión entre los álabes y el eje del rotor se han omitido del modelo ya que, aunque son influyentes en el resultado 2D [Regidor, 2015], representan solamente una pequeña porción del ancho, b , del aerogenerador tridimensional.

La velocidad a la entrada, aun establecida en 7 m/s, gracias al trabajo con parámetro adimensionales, en este caso TSR, se va a poder extraer información de los resultados para cualquier velocidad de viento.

La intensidad de turbulencia a la entrada se ha establecido en 7,5 % por ser un valor típico de la magnitud para una corriente de aire exterior en la atmosfera, situada entre un 5 % y un 15 %. Se puede ver la influencia de este parámetro en [Chamoso, 2015].

En la salida se impone la condición de presión manométrica 0 Pa, al estar la zona de salida lo suficientemente alejada de la influencia del aerogenerador los valores de turbulencia se dejan por defecto, ya que solo influirían en el caso de flujo reverso, que no se manifiesta en este problema.

Los perfiles de los álabes y el eje del rotor se modelan como paredes sin deslizamiento y estacionarias respecto a su zona de trabajo. Son las distribuciones de presiones y esfuerzos cortantes sobre los perfiles las que generan las fuerzas que a su vez generan el momento sobre el eje del rotor.

En los contornos laterales se impone también la condición de pared sin deslizamiento por querer recrear las condiciones de túnel de viento.

A la zona 1, ambiente, se le asigna la condición de fluido, aire. Se especifica que la malla en la zona es fija.

A la zona 2, rotor, al igual que al ambiente, se le asigna la condición de fluido, aire. En este caso se especifica que la malla es móvil, con un movimiento de rotación de velocidad angular ω , especificada en cada simulación. El centro de rotación es el eje del rotor, $X = 0$ e $Y = 0$.

Por último, para la continuidad del campo fluido entre ambas zonas, fija y móvil, se establece la condición *Interface* entre ambas. Aún así, se ve en los resultados que la interfase es una zona donde se van a producir grandes errores de cálculo.

2.3.3. Propiedades del fluido.

El fluido de trabajo es aire, con las propiedades de referencia indicadas en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Propiedades de referencia del fluido de trabajo.

Densidad	1,225 kg/m ³
Viscosidad	1,7894 ·10 ⁻⁵ kg/m·s
Presión	101325 Pa
Temperatura	288,16 K
R	287 J/kg·K
γ	1,4

La velocidad del sonido en las condiciones de trabajo resulta:

$$a = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P}{\rho}} = 340,3 \text{ m/s} \quad (2.12)$$

Para que se considere flujo incompresible, el número de Mach debe ser inferior a 0,3. Si se toma como referencia la velocidad del aire a la entrada, se obtiene un número de Mach:

$$M = \frac{v}{a} = \frac{7 \text{ m/s}}{340,4 \text{ m/s}} = 0,021 \ll 0,3 \quad (2.13)$$

Se considera, por tanto, el fluido de trabajo incompresible. La densidad se considera constante en todo momento.

2.3.4. Algoritmo de resolución.

Como se ha visto en el apartado anterior, se trabaja con un fluido incompresible. Esto implica que la ecuación de la energía se puede desacoplar de la ecuación de cantidad de movimiento y de la ecuación de continuidad. La resolución de la ecuación de la energía no es necesaria. En este caso el algoritmo de resolución recomendado y el que se utiliza es el basado en la presión, *Pressure Based*.

Se especifica que el problema es transitorio en el tiempo y se establece un esquema implícito de primer orden de resolución temporal. Existe una periodicidad en los resultados cada vez que la turbina pasa por la misma posición al realizar su movimiento, esto es, cada 120° de giro para un número de álabes $z=3$, equiespaciados.

El método de cálculo para la interpolación del gradiente elegido es el *Green-Gauss Cell Based*.

2.3.4.1. Control de la solución.

En este apartado se establecen los esquemas de resolución. Estos influyen en la estabilidad y precisión de los resultados.

Según [Lanzafame, 2014] los esquemas de resolución de segundo orden conducen a mejores resultados, ya que reducen considerablemente los errores de interpolación y difusión numérica. Los esquemas de resolución utilizados para la simulación del aerogenerador NACA 4518 son los mostrados en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Esquemas de resolución utilizados.

Acoplamiento velocidad-presión	SIMPLE
Discretizaciones	Algoritmo
Presión	Standard
Momento	Second Order Upwind
Energía cinética turbulenta	Second Order Upwind
Disipación turbulenta	Second Order Upwind

2.3.4.2. Modelo de turbulencia.

Para caracterizar el movimiento de un fluido se emplea el número de Reynolds (Re). Éste es un parámetro adimensional que refleja la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos. Un número Re alto refleja un flujo turbulento y pone de manifiesto la dominancia de las fuerzas convectivas sobre las viscosas. Un número Re bajo representa un flujo laminar y en este caso

son las fuerzas viscosas las dominantes sobre las convectivas, que pueden ser despreciadas.

Para el caso de turbinas eólicas el número de Reynolds se obtiene según (2.14) [McKay, 2005].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot TSR \cdot c}{\mu} = \frac{\rho \cdot \omega \cdot R \cdot c}{\mu} \quad (2.14)$$

Siendo μ la viscosidad absoluta del aire en las condiciones de trabajo.

Para el caso del aerogenerador NACA 4518 estudiado, el número de Reynolds esta comprendido en el intervalo (12000, 45000) para su rango de funcionamiento, considerándose normalmente el límite de transición entre flujo laminar y turbulento, en aerodinámica, $5 \cdot 10^5$.

En general las VAWT traban a bajos números de Reynolds, sin embargo el flujo no es uniforme ni estacionario, sobre todo en la zona del rotor, donde se van a producir torbellinos y altas vorticidades debido a la inestabilidad de la capa límite en los perfiles. Como se verá en el capítulo 3, en muchas situaciones la capa límite sobre los perfiles va a estar desprendida.

Por todo esto, un modelo de transición turbulenta va a conducir a una predicción más realista del comportamiento aerodinámico en las superficies de sustentación y por tanto a una mejor predicción del rendimiento de la turbina.

El modelo de turbulencia utilizado es el k-omega SST de transición turbulenta, utilizado también por [Lanzafame, 2014].

2.3.4.3. Resolución temporal y periodicidad.

La resolución se realiza mediante la discretización temporal del problema, al ser éste transitorio. Cada vuelta completa del aerogenerador se ha dividido en 300 pasos de tiempo, esto es, un progreso de $1,2^\circ$. Se define un periodo de tiempo, Time Step (ts [s]), para el cual, el aerogenerador pasa de una posición a la siguiente, cuando gira a una velocidad ω .

$$ts [s] = \frac{2 \cdot \pi / \omega}{300} \quad (2.15)$$

En cada uno de los *Time Step* el aerogenerador se encuentra en una posición diferente. Para cada *Time Step* se realizan un máximo de 20 iteraciones de simulación para la resolución del problema en cada una de las posiciones por las que pasa la turbina.

El aerogenerador inicialmente se encuentra con uno de los álabes en la posición $\theta=0^\circ$ (ver sistema de coordenadas en fig. 2.6), tal y como muestra la fig. 2.10. Al ser lanzada la simulación para una velocidad de rotación de la turbina ω , se realizan iteraciones para cada *Time Step* y se van generando los resultados para

cada posición de la turbina. Los resultados van convergiendo a medida que avanza la simulación y al ser un problema transitorio, se consideran estables cuando se alcanza la periodicidad y la diferencia de los mismos entre una vuelta y la anterior es despreciable.

La convergencia obtenida en los resultados de las simulaciones realizadas ha sido rápida en todos los casos, necesitando únicamente 3 vueltas, o 900 ts , para alcanzar valores estables. Estos resultados se muestran en el capítulo 3.

Nota: Las simulaciones se han realizado en Fluent.inc V6.3.26 con un ordenador doméstico equipado con CPU Intel Core i5 750 de 4 núcleos @ 3,2 GHz y 4,00 GB memoria RAM. El tiempo medio de cada simulación ha sido aproximadamente de 1,5 horas.

2.3.4.4. Monitores.

Para la caracterización del funcionamiento de un aerogenerador se utilizan las curvas C_m -TSR y C_p -TSR.

Las simulaciones se han realizado variando la velocidad de giro ω del rotor, para obtener información en todo el rango de trabajo como turbina del aerogenerador, esto es, todo el rango de TSR para el cual C_m y C_p son positivos.

Los monitores son variables obtenidas en cada iteración que aportan información sobre la simulación y los resultados. Los monitores utilizados para este estudio son los de residuales, para comprobar la convergencia, y los de fuerza, para obtener el coeficiente de momento C_m .

Los residuales son el error relativo entre dos iteraciones consecutivas para cada una de las variables que se están calculando y determinan si la simulación converge correctamente. En problemas transitorios como el presentado los residuales, como todas las variables, no alcanzan un valor estable, sino que varían tras cada iteración. Sin embargo, la convergencia de estos problemas transitorios se consigue si los residuales alcanzan un valor determinado y no lo superan. En este caso el criterio impuesto que los residuales no superen 10^{-3} para que la simulación pueda considerarse como correcta.

Los monitores de fuerza permiten obtener los coeficientes de arrastre, sustentación y momento a partir de la integración de la presión y el esfuerzo cortante en cada perfil. Para este estudio vamos a trabajar con el coeficiente de momento C_m sobre el eje del rotor, que se calcula para cada posición del aerogenerador, lo que va a aportar información de las posiciones más favorables y desfavorables que se producen, así como su valor medio. Estos resultados son presentados en el capítulo 3.

2.3.5. Diseño de experimentos.

Las simulaciones se han realizado para abarcar todo el rango de funcionamiento como turbina del aerogenerador y obtener las curvas características C_p y C_m en función del TSR . Para ello se varía la velocidad de giro del rotor en cada simulación para hacer variar el TSR , ya que la velocidad del flujo de aire se mantiene siempre en 7 m/s, como se indica en el apartado 2.3.2.

En la tabla 2.5 se indica todas las velocidades angulares ensayadas, el TSR correspondiente según la ecuación (2.10) y el ts asociado según la ecuación (2.14).

Tabla 2.5: Valores de operación para las simulaciones realizadas

Velocidad de giro del rotor (ω [rad/s])	Tip Speed Ratio (TSR [])	Time Step (ts [s])
50	0,5	0,0004189
55	0,55	0,0003808
60	0,6	0,0003491
65	0,65	0,0003222
70	0,7	0,0002992
75	0,75	0,0002793
80	0,8	0,0002618
85	0,85	0,0002464
90	0,9	0,0002327
95	0,95	0,0002205
100	1	0,0002094
105	1,05	0,0001995
110	1,1	0,0001904
115	1,15	0,0001821
120	1,2	0,0001745
125	1,25	0,0001676
130	1,3	0,0001611
135	1,35	0,0001551
140	1,4	0,0001496
145	1,45	0,0001444
150	1,5	0,0001396
155	1,55	0,0001351
160	1,6	0,0001309
165	1,65	0,0001269
170	1,7	0,0001232
175	1,75	0,0001197
180	1,8	0,0001164
185	1,85	0,0001132
190	1,9	0,0001102

Capítulo 3. Análisis de resultados.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación mediante CFD del modelo 2D del aerogenerador H-Darrieus con perfiles NACA 4518 y solidez unidad, presentado en el capítulo anterior.

3.1. Periodicidad y convergencia de los resultados.

Como se comenta en el apartado 2.3.4.3 del capítulo 2, los resultados obtenidos han de alcanzar la convergencia y estabilidad. Como se trata de un problema transitorio y periódico, los resultados, en este caso, han de alcanzar la periodicidad y mantenerse en rangos estables.

Para comprobar la periodicidad de los resultados se tiene en cuenta el valor del coeficiente de momento C_m , monitorizado para cada *time step* durante la simulación. En la figura 3.1 se representa este parámetro para varios valores del TSR.

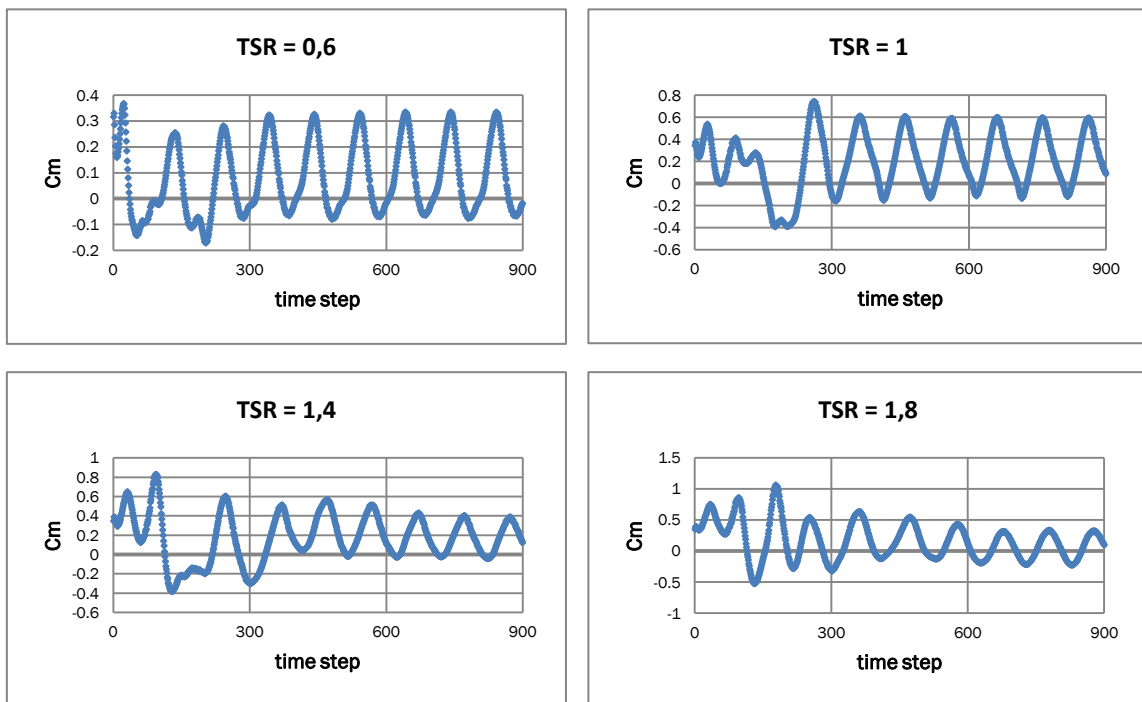


Fig. 3.1: Coeficiente de momento C_m para cada ts y diferentes TSR.

Cada vuelta completa del aerogenerador abarca 300 ts, la primera vuelta está contenida en el intervalo [1, 300], la segunda en [301, 600] y la tercera en [601, 900].

En las gráficas de la figura 3.1 se aprecia que para la primera vuelta, los valores obtenidos presentan grandes desviaciones en todos los casos. Sin embargo, a partir de la segunda vuelta los valores alcanzan periodicidades claras, y es en la tercera vuelta cuando los valores se estabilizan en unos rangos determinados.

Los resultados de la tercera vuelta ofrecen una periodicidad correcta. La desviación del C_m medio para la tercera vuelta con respecto a la anterior en el rango de TSR comprendido entre 0,6 y 1,15 es menor del 5% y en el rango de TSRE [0,65, 1] no supera el 1%. Para TSR altas, la periodicidad alcanza rangos estables más lentamente que para bajas.

Un ejemplo de los monitores de residuales de continuidad, x-velocity, y-velocity, k y ω obtenidos se muestran en la figura 3.2.

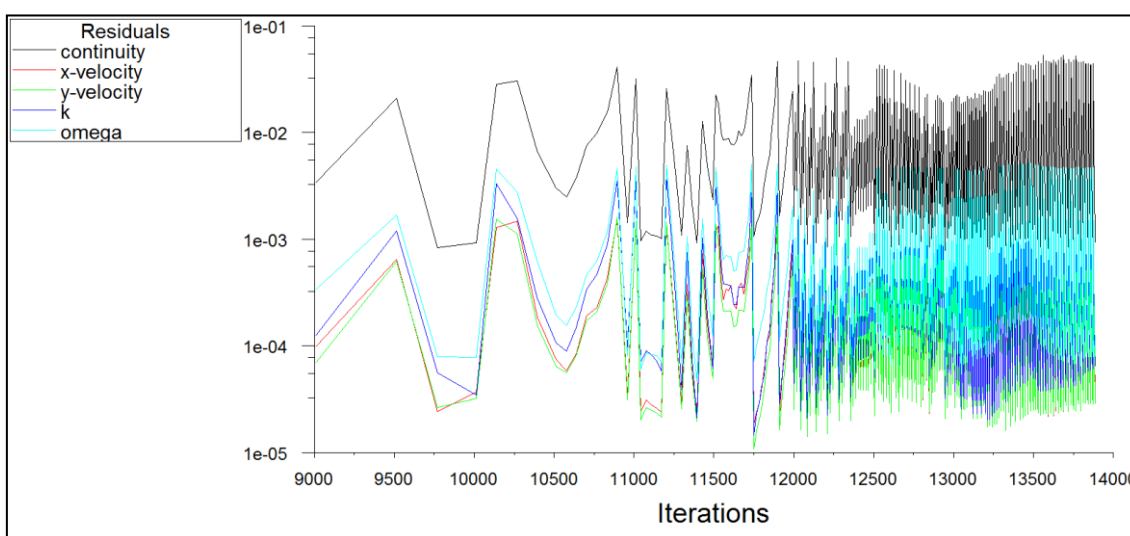


Fig. 3.2: Evolución de los residuales durante la simulación para TSR = 1.

Se observa como todos los residuales permanecen con una tendencia estable, dentro de su variabilidad, cumpliendo con los criterios adoptados en el apartado 2.3.4.4 del capítulo 2.

3.2. Curvas características.

Las curvas características de los coeficientes de par y potencia C_m -TSR y C_p -TSR definen el comportamiento de los aerogeneradores. Es importante que, junto con un buen rendimiento, el aerogenerador cuente con un amplio rango de trabajo. Esto implica que va a poder funcionar como generador de potencia para unas condiciones de velocidad del viento y de giro más diversas.

3.2.1. Construcción de las curvas características.

Las curvas características se construyen punto por punto, simulando para cada uno, unas condiciones específicas de TSR.

Los primeros valores de TSR simulados, introducidos variando la velocidad de giro del rotor ω , se eligen por experiencia, sabiendo que estos modelos de aerogenerador presentan su rango positivo en torno a un $TSR = 1$. A partir de aquí se simulan valores adyacentes de TSR hasta englobar todo el rango de trabajo con coeficientes positivos.

Para cada simulación se obtienen los valores del coeficiente de momento instantáneo, para cada *time step* o *posición del rotor*. En la figura 3.3 se muestran estos valores graficados para un $TSR = 0,85$.

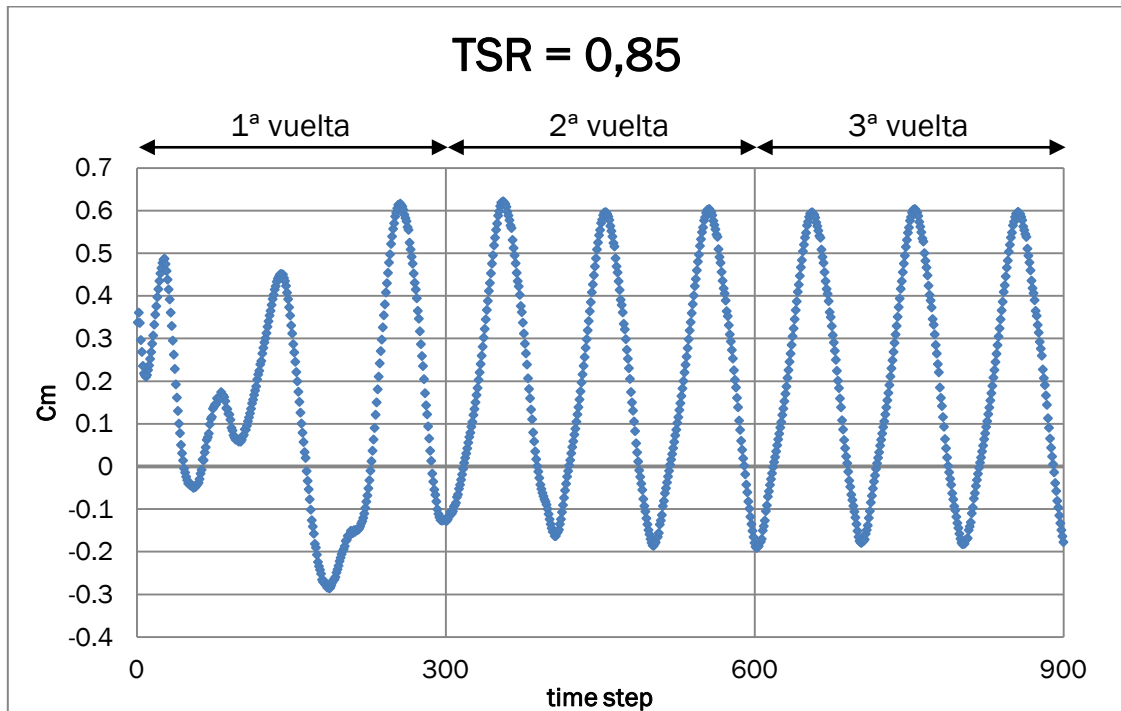


Fig. 3.3: Evolución del coeficiente de momento instantáneo C_m durante la simulación completa para $TSR = 0,85$.

Como se ha visto en el apartado anterior es la última vuelta la que aporta los resultados válidos. Por tanto, se procede aislando los resultados de la última vuelta en cada caso y trabajando con ellos únicamente.

El coeficiente de momento medio se calcula como la media aritmética de los resultados de la última vuelta y es el valor obtenido el que forma el punto con el que se va a construir la curva característica global.

$$C_{m\text{ medio}} = \frac{\sum_{\text{ultima vuelta}} C_{m\text{ instantaneo}}}{\text{numero de datos en la ultima vuelta}} = \frac{\sum_{ts=601}^{ts=900} C_{m\text{ instantaneo}}}{300} \quad (3.1)$$

En la figura 3.4 se muestran gráficamente los resultados del cálculo del coeficiente de momento medio para el caso de $TSR = 0,85$.

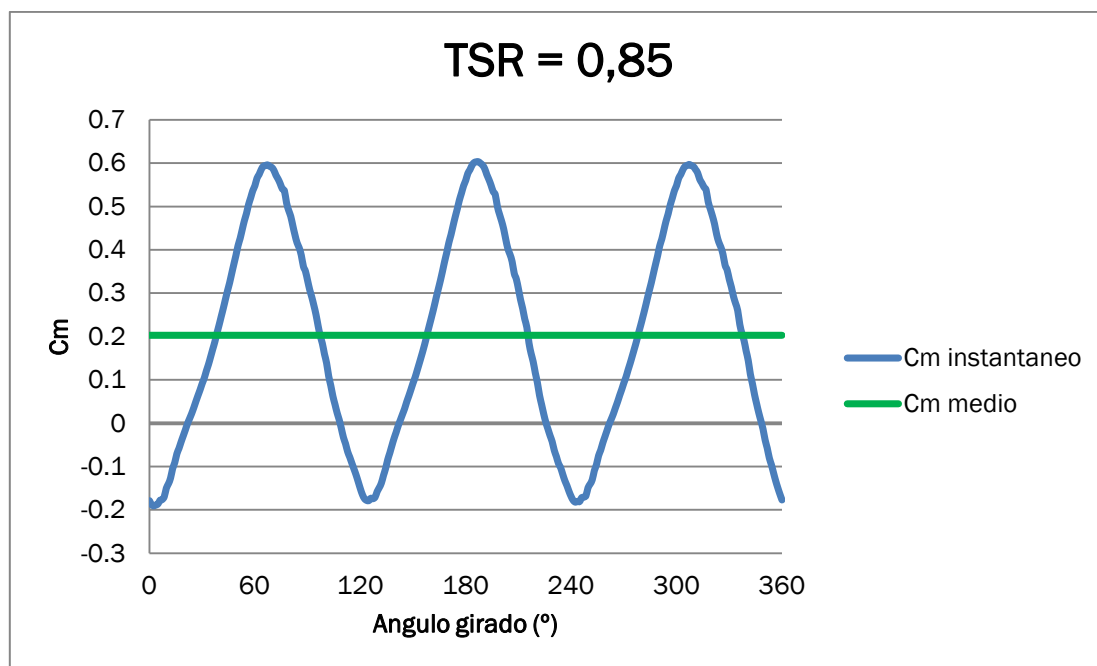


Fig. 3.4: Coeficiente de momento instantáneo y medio en función del ángulo girado para la última vuelta simulada del caso TSR = 0,85.

En la gráfica se observa que, aún resultando el coeficiente de momento medio positivo, a lo largo del giro del aerogenerador existen posiciones para las que el coeficiente de momento, y por tanto el momento sobre el eje (2.9), es negativo. Este fenómeno es común para las VAWT y sucede para todos los casos de TSR simulados en el rango de trabajo del aerogenerador estudiado. Para que este fenómeno no suponga un problema se ha de trabajar sobre el momento de inercia de las partes rotantes, ya que en las posiciones de momento negativo tiene que existir suficiente energía cinética de rotación como para que la turbina sea capaz de alcanzar de nuevo posiciones de momento positivo y que la velocidad no varíe excesivamente.

Un correcto momento de inercia del aerogenerador reduce las variaciones de velocidad angular del mismo, dado que éste sufre momentos variables, reduciendo por tanto aceleraciones que resultan perjudiciales para la durabilidad de las partes.

La construcción de la curva característica de coeficiente de potencia en función del TSR resulta inmediata si se aplica la ecuación 2.11, ya que el coeficiente de potencia es igual al coeficiente de momento multiplicado por el TSR.

El procedimiento explicado en este apartado se ha realizado para un total de 29 simulaciones, con valores de TSR que abarcan todo el rango de trabajo del modelo 2D del aerogenerador H-Darrieus con perfiles NACA 4518. En la siguiente tabla 3.1 se muestran todos los resultados obtenidos.

Tabla 3.1: Valores del coeficiente de momento y potencia medios obtenidos en las simulaciones.

Velocidad de giro del rotor (ω [rad/s])	Tip Speed Ratio (TSR [])	Coeficiente de momento medio (C_m [])	Coeficiente de potencia medio (C_p [])
50	0,5	-0,0343	-0,0171
55	0,55	0,0451	0,0248
60	0,6	0,0946	0,0568
65	0,65	0,1144	0,0744
70	0,7	0,1321	0,0924
75	0,75	0,1526	0,1144
80	0,8	0,1787	0,1429
85	0,85	0,2030	0,1725
90	0,9	0,2202	0,1982
95	0,95	0,2282	0,2168
100	1	0,2323	0,2323
105	1,05	0,2170	0,2279
110	1,1	0,1641	0,1805
115	1,15	0,1512	0,1739
120	1,2	0,1602	0,1922
125	1,25	0,1707	0,2133
130	1,3	0,1586	0,2062
135	1,35	0,1703	0,2299
140	1,4	0,1650	0,2311
145	1,45	0,1488	0,2157
150	1,5	0,1408	0,2112
155	1,55	0,1235	0,1914
160	1,6	0,1169	0,1870
165	1,65	0,0952	0,1571
170	1,7	0,0878	0,1492
175	1,75	0,0722	0,1263
180	1,8	0,0517	0,0931
185	1,85	0,0192	0,0355
190	1,9	0,0025	0,0048

3.2.2. Curva característica C_m -TSR.

En la siguiente figura 3.5 se representa gráficamente el coeficiente de momento medio C_m en función del TSR.

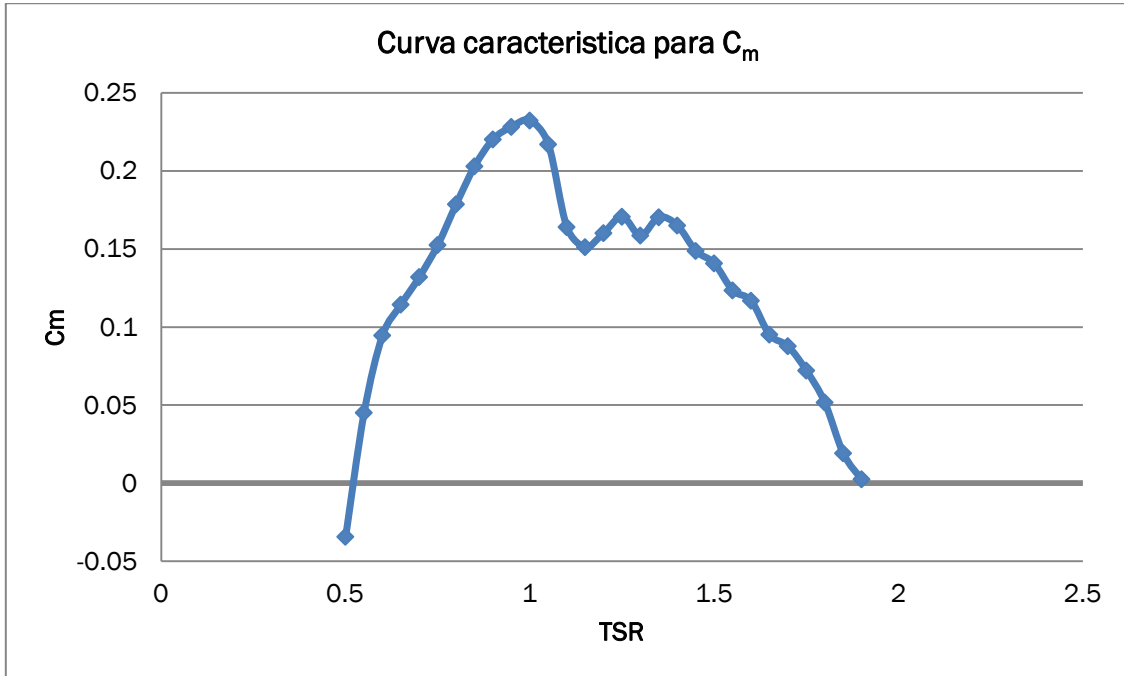


Fig. 3.5: Curva característica para el coeficiente de momento medio. H-Darrieus, perfiles NACA 4518, modelo 2D $k-\omega$ SST, solidez $\sigma = 1,07$, ángulo de pitch $\alpha = -6^\circ$.

El rango de trabajo para el que la turbina es capaz de producir un momento positivo sobre su eje se da desde un TSR = 0,53 hasta TSR = 1,9. El máximo coeficiente de momento se localiza en TSR = 1.

De esta curva se puede extraer toda la información relativa al par o momento en el eje de la turbina. A partir de la expresión del coeficiente de momento (2.9) se tiene:

$$M_t = C_m \cdot \frac{\rho_a \cdot A \cdot v^2 \cdot R}{2} \quad (3.2)$$

Una vez dimensionada la turbina para su modelo real, conocidos los valores de la densidad del aire ρ_a y la velocidad del viento v se puede obtener el momento generado a partir de (3.2) y la figura 3.5, siendo la velocidad de giro que maximiza este momento:

$$\omega_{momento\ max} = \frac{v \cdot TSR_{max\ C_m}}{R} = \frac{v \cdot 1}{R} \quad (3.3)$$

Normalmente se realiza el trabajo de ingeniería inversa. Se establece en primer lugar el momento que se desea generar con ella y, a partir de ahí, conociendo de antemano información relativa a la velocidad media del viento en el punto de

instalación, se aplicaría un factor de escala al modelo de estudio que cumpliera con las exigencias de momento.

En la figura 3.5 se aprecia uno de los problemas comunes en este tipo de aerogeneradores de eje vertical, el autoarranque. Cuando la velocidad de rotación es baja o cero, el TSR también lo es (2.10), y en esa zona de TSR bajos la curva característica presenta valores negativos, con lo que no puede proporcionar la energía para aumentar la velocidad de rotación del rotor y empezar a funcionar. Una forma de solucionar este problema, sin la necesidad de recurrir a fuentes de energía externas, es el acoplamiento de otro aerogenerador en el mismo eje que sí sea capaz de aprovechar la energía del viento en condiciones de arranque. El tipo de aerogenerador de eje vertical que podría usarse de auxiliar para tal fin es el Savonius, que sí es capaz de producir energía en bajas TSR. Una vez efectuado el arranque el aerogenerador tipo Savonius se podría desacoplar o funcionar en serie con el Darrieus.

3.2.3. Curva característica C_p -TSR.

En la siguiente figura 3.6 se representa gráficamente el coeficiente de potencia medio C_p en función del TSR.

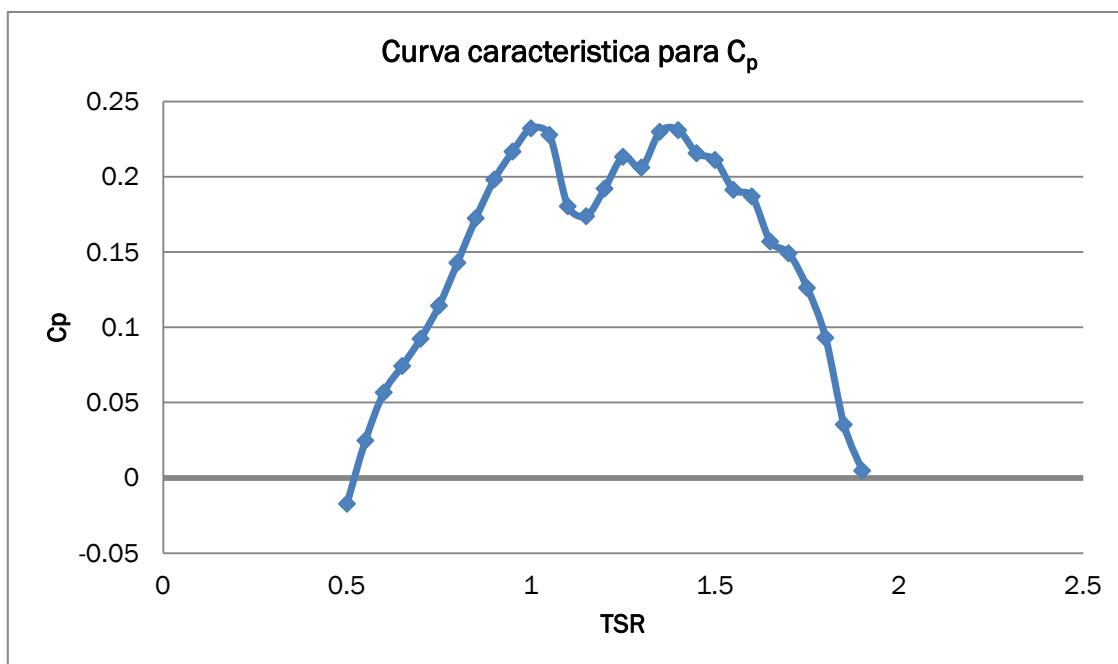


Fig. 3.6: Curva característica para el coeficiente de potencia. H-Darrieus, perfiles NACA 4518, modelo 2D $k-\omega$ SST, solidez $\sigma = 1,07$, ángulo de pitch $\alpha = -6^\circ$.

La curva representada en la figura 3.6 es la más importante y representativa en un aerogenerador. Expresa el rendimiento del mismo en la producción de potencia y el rango de velocidades en la que es capaz de generar. De ella se puede extraer toda

la información relativa a la potencia que se genera en función de las condiciones de operación.

A partir de las expresiones (2.2) y (2.8) se deduce que la potencia generada es igual a la potencia de la masa de aire que atraviesa la sección del aerogenerador multiplicada por el coeficiente de potencia del mismo.

$$P_{generada} = C_p \cdot P_{disponible} = C_p \cdot \frac{\rho_a \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (3.4)$$

El punto de diseño del aerogenerador se corresponde con un valor de TSR = 1, consiguiendo un rendimiento del 23,2 %. Presenta otro máximo local en TSR = 1,4 en el que rendimiento es del 23,1 %, muy cercano al punto de diseño.

En cuanto al rango de funcionamiento, se observa, al igual que ocurre en la curva característica de momento del apartado anterior, que el intervalo para el cual se extrae energía del viento abarca desde TSR = 0,53 hasta TSR = 1,9, aceptable para este tipo de aerogeneradores. Un amplio rango de trabajo es beneficioso ya que, para una velocidad del viento dada, se tendrá una mayor amplitud de velocidades de giro a las que se es capaz de generar energía. O viceversa, para una velocidad angular dada, habrá mayor rango de velocidades de viento donde se es capaz de generar energía.

Al igual que en apartado anterior la velocidad de giro que maximiza la potencia generada es la siguiente.

$$\omega_{potencia\ generada\ max} = \frac{v \cdot TSR_{max\ C_p}}{R} = \frac{v \cdot 1}{R} \quad (3.5)$$

Para el dimensionado de la turbina, con unas exigencias de potencia dadas, se procedería estudiando la información atmosférica del punto de instalación de la turbina con información de velocidad media anual del viento. Esta información es recogida normalmente por instituciones en cada país, por ejemplo en España el [Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE](#) ofrece mapas eólicos detallados para cada región. A partir de esta información y la expresión (3.4) se procede a aplicar un factor de escala al modelo de estudio para dimensionar el modelo real que cumpla con las exigencias requeridas.

3.3. Patrón de flujo en condiciones de diseño.

En este apartado se estudia el comportamiento fluidodinámico del aire que atraviesa la turbina en el modelo simulado para las condiciones de diseño obtenidas en el apartado anterior, TSR = 1. Se analizan en las posiciones favorables y desfavorables: los contornos de presión, contornos de velocidad, campo de velocidades, turbulencia y por último la estela generada aguas abajo del aerogenerador.

Se debe tener en cuenta que el problema es transitorio y el campo fluido varía en cada instante aunque de forma periódica.

Todos resultados mostrados en este apartado son los de la última vuelta simulada, en la que la periodicidad es mayor.

3.3.1. Posiciones favorables, desfavorables y comportamiento de los álabes

Como se ha comentado, el comportamiento de la turbina varía para cada posición del rotor, presentando posiciones en las que es capaz de extraer más energía y posiciones en las que menos. En la siguiente figura 3.7 se ha representado como varía el coeficiente de potencia instantáneo (eje radial) a lo largo de un giro de la turbina (eje acimutal).

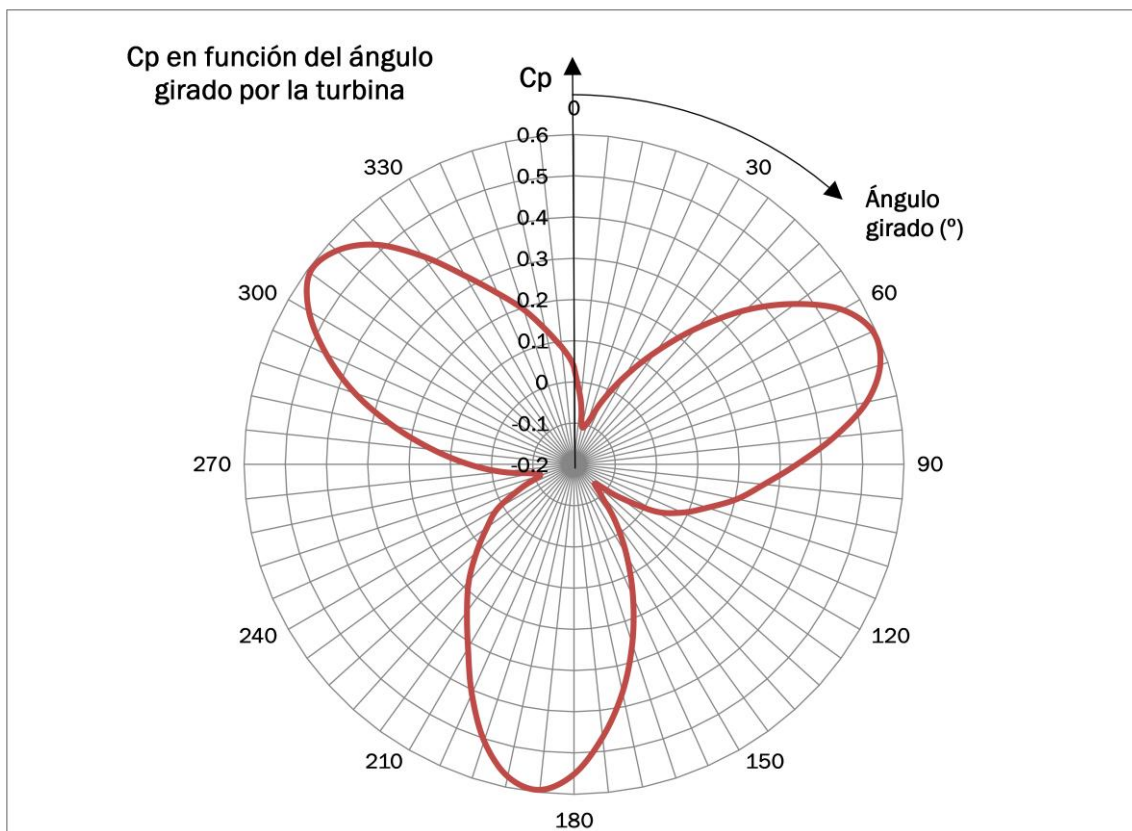


Fig. 3.7: Representación de la evolución del coeficiente de potencia instantáneo durante un giro completo de la turbina. Condiciones de diseño $TSR = 1$.

Las posiciones de máxima extracción de potencia se dan aproximadamente a 60°, 180° y 300°. Las posiciones más desfavorables se dan a 0°, 120° y 240°. Como las palas están separadas uniformemente 120° entre sí unas de otras, las posiciones favorables y desfavorables se reducen a 2, son las mostradas en la figura 3.8. Estas dos posiciones son para las que se analiza en los posteriores apartados el comportamiento del aire que atraviesa el aerogenerador.

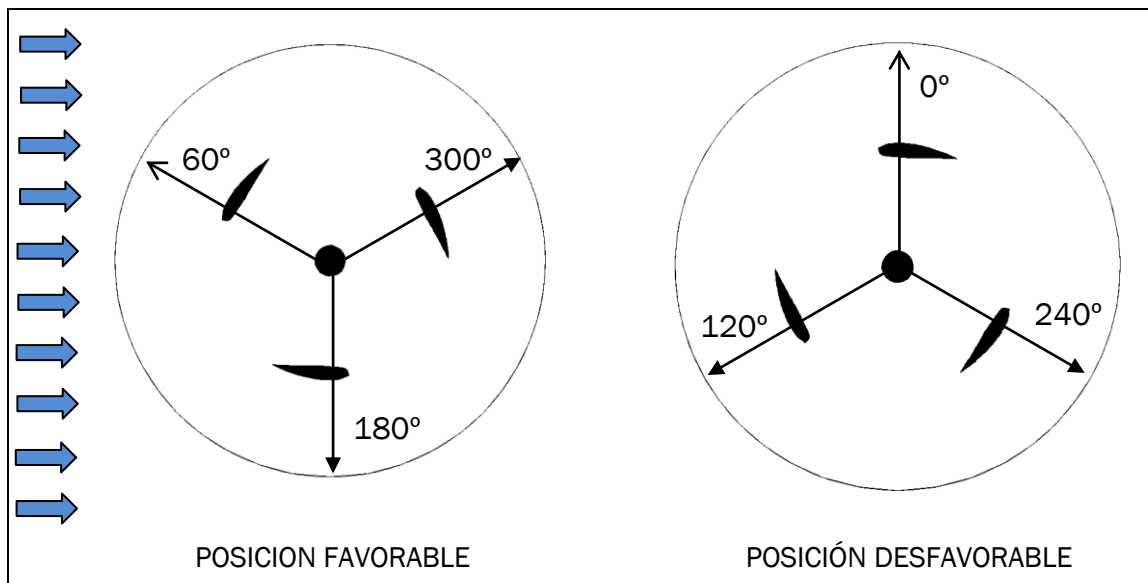


Fig. 3.8: Posición favorable y desfavorable.

Esta diferencia de comportamiento en función de la posición de los álabes es debida a que en cada una de las posiciones las condiciones fluidodinámicas que se presentan son diferentes, siendo la variable más influyente la presión que soporta cada una de las caras de los perfiles.

En las siguientes figuras 3.9 y 3.10 se muestran las presiones en las caras de los perfiles para cada uno de los 3 álabes en las posiciones favorable y desfavorable. El eje de abscisas muestra la coordenada X del modelo. En la posición favorable el perfil a 60° se encuentra en $X < 0$ y el perfil a 300° en $X > 0$. En la posición desfavorable el perfil 120° se sitúa en $X < 0$ y el perfil a 240° en $X > 0$.

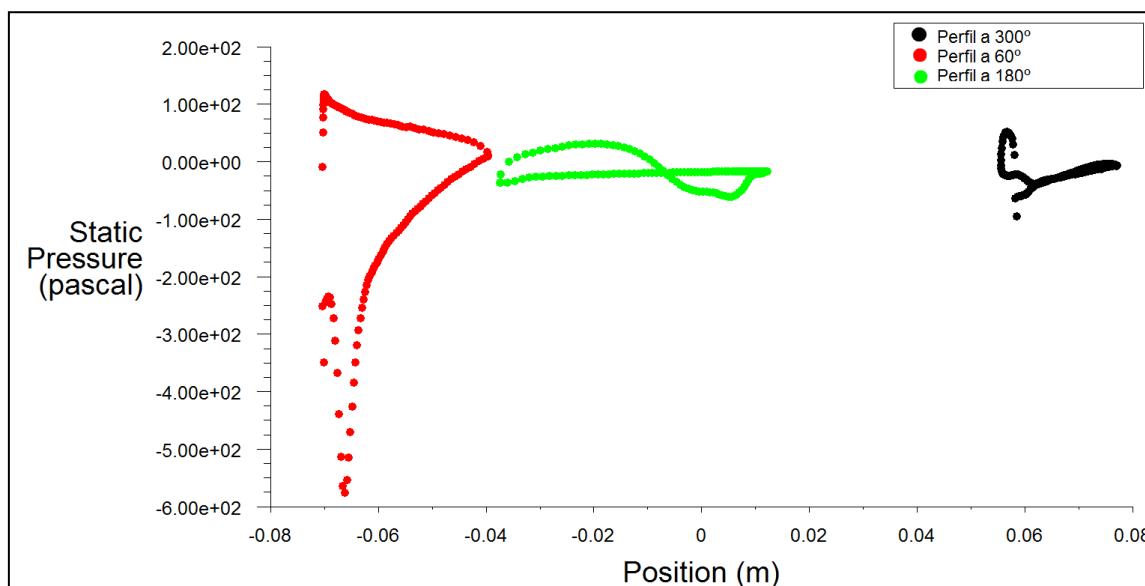


Fig. 3.9: Distribución de presiones en las caras de los perfiles para la posición favorable.

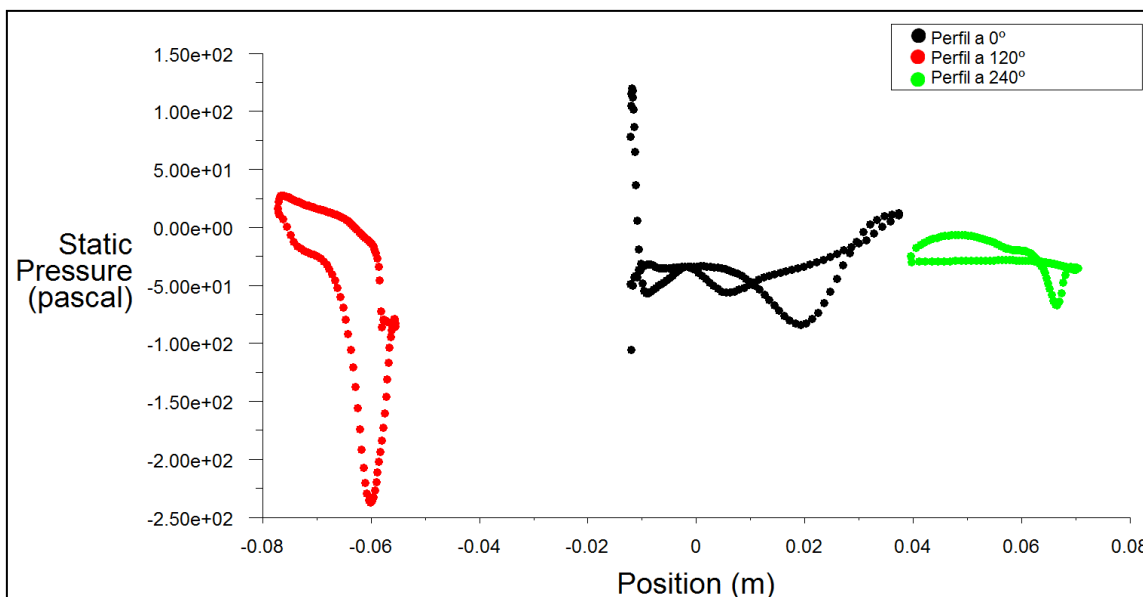


Fig. 3.10: Distribución de presiones en las caras de los perfiles para la posición desfavorable.

Cada cara de los perfiles puede actuar tanto de extradós como de intradós, dependiendo de la posición en la que se encuentre. El extradós se define como la cara del perfil que soporta una menor presión y mayor velocidad, el intradós es la cara opuesta, que soporta mayor presión y menor velocidad. En la siguiente tabla 3.2 aparece recogido como actúa cada cara para las posiciones significativas. Ésta se ha construido a partir de los datos de las figuras 3.9 y 3.10 junto con las representaciones del contorno de presión presentadas en el siguiente apartado.

Tabla 3.2: Actuación de las caras de los perfiles como extradós e intradós para las posiciones significativas.

Posición	Cara interior	Cara exterior
0°	Intradós	Extradós
60°	Extradós	Intradós
120°	Extradós	Intradós
180°	-	-
240°	-	-
300°	-	-

Las caras marcadas con guion no presentan una actuación clara, la diferencia de presión entre caras no es suficientemente significativa.

Una alta diferencia de presiones entre las caras del perfil es indicativo de la formación de estela, presencia de torbellino en el borde de salida del perfil.

3.3.2. Contornos de presión.

En este apartado se muestran los contornos de presión representados a partir de las herramientas de post-proceso que ofrece Fluent® v.6.3.36.

En todas las representaciones de contornos de presión se ha utilizado el mismo rango de presiones, de -300 Pa de mínima a 100 Pa de máxima, para permitir fáciles comparaciones. Las presiones representadas son manométricas.

Posición favorable.

La figura 3.11 muestra los contornos de presión para la posición favorable en todo el dominio espacial del modelo.

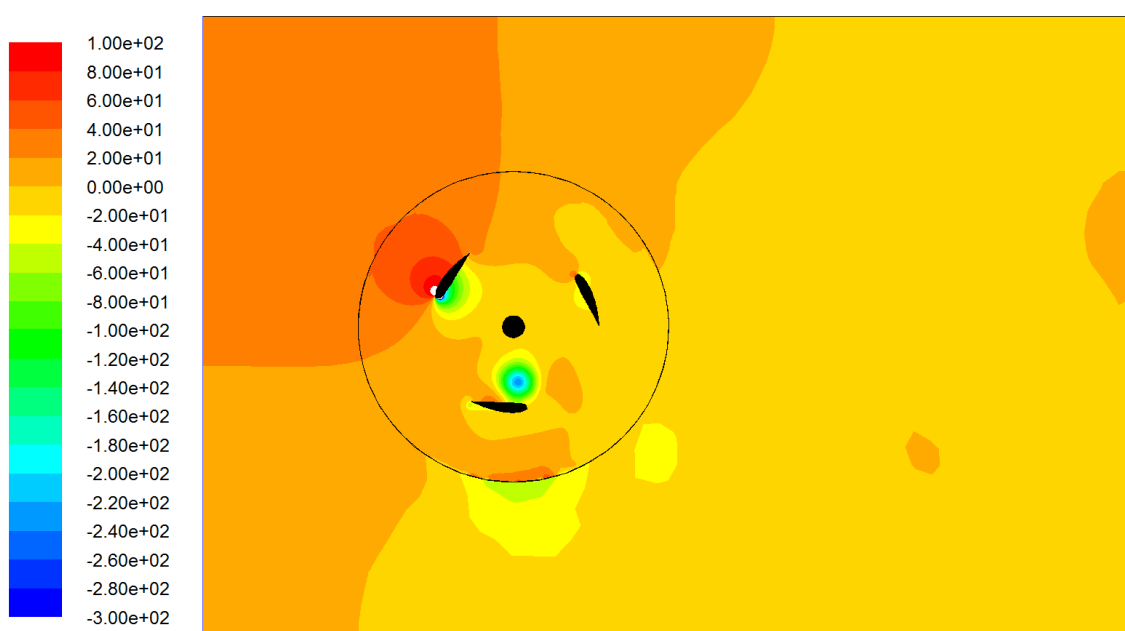


Fig. 3.11: Representación de los contornos de presión para la posición favorable. H-Darrieus, perfiles NACA 4518, modelo 2D $k-\omega$ SST, solidez $\sigma = 1,07$, ángulo de pitch $\alpha = -6^\circ$. Escala: Presión manométrica en Pascales.

En todas las representaciones de este tipo los tonos rojos corresponden con los valores más altos y los azules con los más bajos. Las zonas coloreadas de blanco presentan un valor fuera de rango. Si la zona blanca está rodeada de rojo se trata de una zona de con valor máximo, si está rodeada de azul, se trata de una zona de valor mínimo.

Se observa que la presión aguas arriba del rotor es mayor que aguas abajo, como es de esperar. Los mayores gradientes de presión se producen en el rotor, en las proximidades de los álabes debido a la interacción del fluido con los perfiles de los mismos.

Los mínimos locales de presión están relacionados en muchas ocasiones con la presencia de torbellinos.

En la siguiente figura 3.12 se representan en detalle los contornos de presión alrededor de cada uno de los álabes.

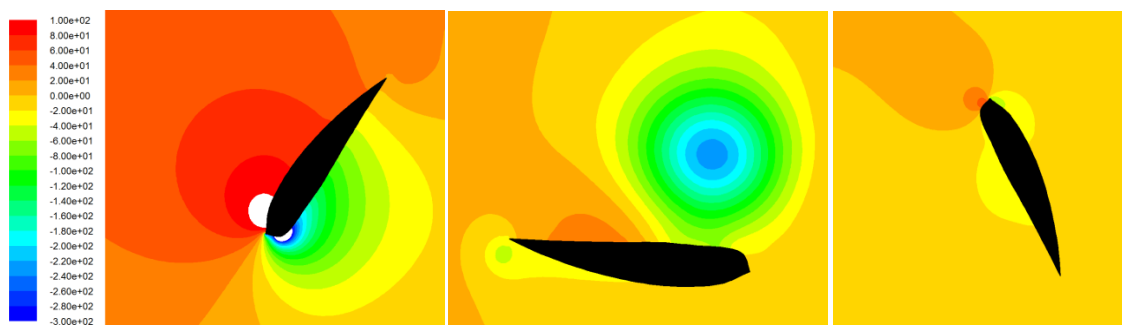


Fig. 3.12: Representación de los contornos de presión para la posición favorable. Detalle de los perfiles para las posiciones 60°, 180°, 300° de izquierda de derecha. Escala: Presión manométrica en Pascales.

Las vistas en detalle de los contornos de presión de la figura 3.12 añaden información a las distribuciones de presión a lo largo de las caras de los perfiles mostradas en la figura 3.9.

Las máximas presiones en la superficie del perfil marcan la posición del punto de remanso, en el que la velocidad es nula, como se ve en el apartado 3.3.4. La posición del mismo depende de la dirección relativa que lleva el flujo al incidir con cada álabe.

El álabe en la posición de 60° es el que mayores diferencias de presión sufre entre sus caras interna y externa, lo que provoca una elevada fuerza de sustentación que genera un momento positivo en el eje del rotor. Es en las proximidades de la zona de ataque del álabe donde se sitúan las mayores diferencias de presión. Se llega a alcanzar en la cara externa 117 Pa y en la interna -575 Pa, que suponen un máximo y mínimo local. A lo largo de la longitud del álabe las presiones van bajando en la cara exterior y subiendo en la interior llegando al borde de salida del álabe con una presión similar, en torno a 9 Pa.

El álabe en la posición de 180° no presenta una diferencia de presiones tan acusada. En la cara exterior la presión se mantiene en torno a los -20 Pa salvo en la zona próxima al borde de salida que baja hasta los -36 y se presenta un mínimo local de pequeña magnitud. En la primera mitad la cara interior la presión es negativa con hasta -60 Pa debido a la presencia de un mínimo local de presión de -240 Pa separado del perfil hacia el eje del rotor. En la segunda mitad de la cara interior la presión se hace positiva alcanzando los 31 Pa. Esto provoca un momento torsor en el álabe que se transmite al eje en forma de momento positivo.

El álabe en la posición de 300° sufre unas diferencias de presión muy bajas entre sus caras. Se destaca la presencia de un máximo local de presión de pequeña magnitud, 50 Pa, al inicio de la cara inferior, que provoca una fuerza de arrastre que penaliza al momento positivo en el eje del rotor.

Posición desfavorable.

La figura 3.13 muestra los contornos de presión para la posición desfavorable en todo el dominio espacial del modelo.

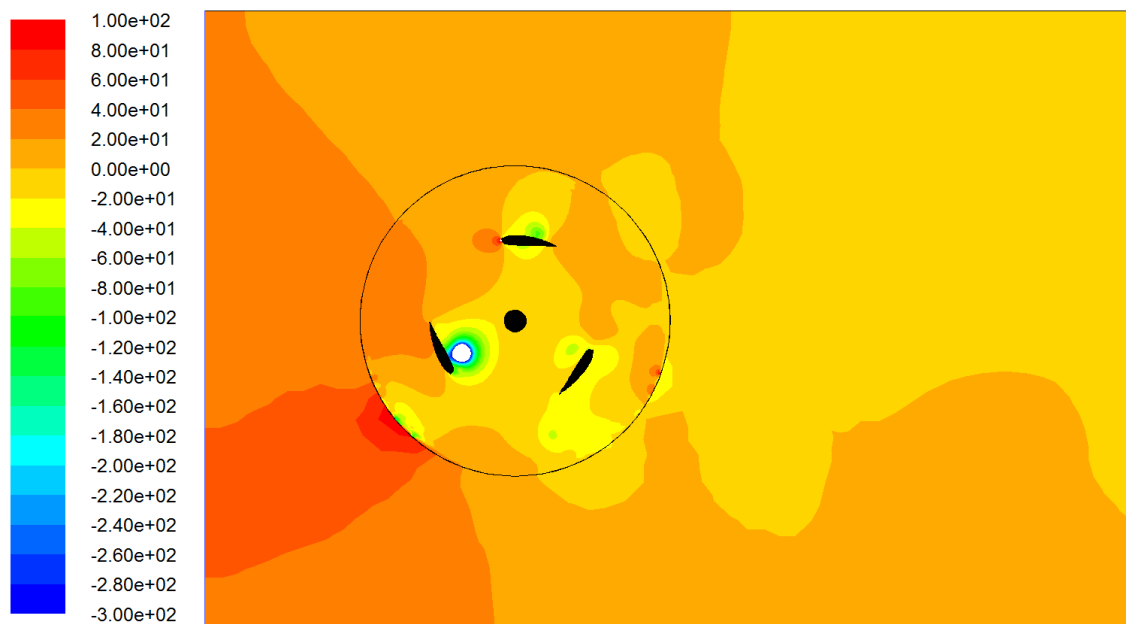


Fig. 3.13: Representación de los contornos de presión para la posición desfavorable. H-Darrieus, perfiles NACA 4518, modelo 2D $k-\omega$ SST, solidez $\sigma = 1,07$, ángulo de pitch $\alpha = -6^\circ$. Escala: Presión manométrica en Pascales.

Al igual que en el caso favorable, se produce una menor presión aguas abajo del rotor y mayor aguas arriba. Sin embargo, existen diferencias entre las dos posiciones en la zona del ambiente y es que en esta posición desfavorable se presentan zonas de mayor presión aguas abajo que en el caso de la posición más favorable.

Las mayores diferencias se encuentran en la zona del rotor, donde cada uno de los álabes está sometido a condiciones de presión diferentes que en el caso favorable.

En la siguiente figura 3.14 se representan en detalle los contornos de presión alrededor de cada uno de los álabes.

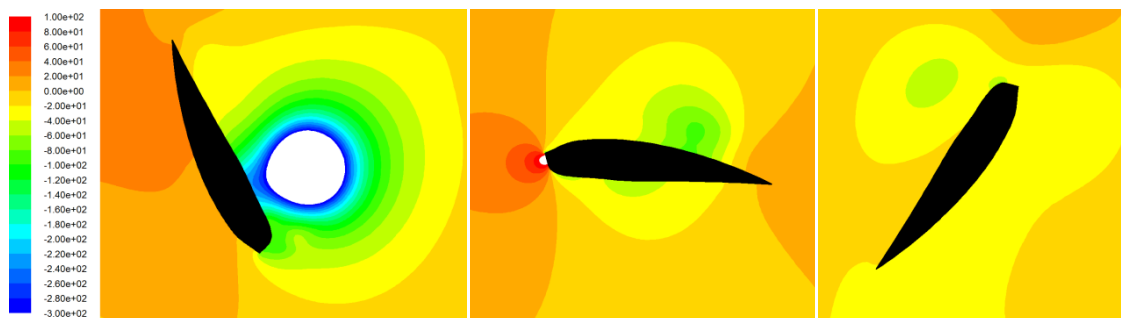


Fig. 3.14: Representación de los contornos de presión para la posición desfavorable. Detalle de los perfiles para las posiciones 120° , 0° , 240° de izquierda a derecha. Escala: Presión manométrica en Pascales.

Las vistas en detalle de los contornos de presión de la figura 3.14 añaden información a las distribuciones de presión a lo largo de las caras de los perfiles mostradas en la figura 3.10.

El álabe en la posición de 120° presenta una diferencia clara de presiones entre sus caras, actuando la interna como extradós. Se observa un mínimo local de gran magnitud próximo a la zona de ataque de la cara interna pero separado del perfil que alcanza una presión de -620 Pa. En la cara interior la presión es negativa con un mínimo de -237 Pa cerca del borde de ataque. A medida que se avanza hacia el borde de salida la presión va aumentando hasta alcanzar los 0 Pa en el borde de salida. En la cara externa la presión se va incrementando desde el borde de ataque con 0 Pa hasta el borde de salida con 27 Pa. Esta diferencia de presiones entre sus cara provoca una fuerza de sustentación como en el caso del álabe en la posición de 60° , pero de menor magnitud, debido a la menor diferencia de presiones, ver figura 3.9 y 3.10.

El álabe en la posición de 0° destaca por contar con un máximo local de presión en el borde de ataque del mismo de 119 Pa, que va a producir una fuerza de arrastre perjudicial para el movimiento de la turbina. La diferencia de presiones entre las caras es pequeña aunque presenta un mínimo local de presión en la segunda mitad de la cara exterior de -87 Pa.

El álabe en la posición de 240° sufre una diferencia de presiones entre las caras cambiante, como en el caso del álabe a 180° . La presión cerca del borde de ataque es mayor en la cara exterior y cerca del borde de salida es mayor en la interior. Esta situación provoca un momento torsor sobre el álabe que favorece el movimiento de la turbina, pero en menor medida que el caso a 180° .

3.3.3. Contornos de velocidad.

En la siguiente figura 3.15 se representan los contornos de velocidad en la zona del rotor para las dos posiciones de máximo y mínimo rendimiento. El rango de velocidades es el mismo para ambas posiciones y abarca desde 0 hasta 26 m/s.

Los contornos de velocidad complementan la información aportada por los contornos de presión al estudiar el comportamiento de fluido en el entorno de los álabes. Las zonas alrededor de los perfiles donde mayor es la presión menor es la velocidad, y por el contrario, las zonas de menor presión presentan una velocidad del fluido mayor. En los torbellinos, sin embargo, donde la presión forma un mínimo local, la velocidad es alta alrededor del mismo, en cambio, en su centro la velocidad resulta nula, ya que el núcleo del torbellino se comporta como un sólido con rotación fija. En la figura 3.15 se observan claramente los torbellinos formados en las proximidades de los álabes a 120° , 180° y 240° , con zonas amarillas y rojas de alta velocidad alrededor y en el centro una azules de velocidad nula. Se trata en realidad de un único torbellino que se forma cuando el álabe está situado en torno a 90° y se va desarrollando y trasladando junto con el rotor.

Se es capaz de visualizar por donde incide el flujo de aire relativo a cada perfil ya que se forma un punto de remanso de color azul oscuro, donde la velocidad es nula y la presión máxima.

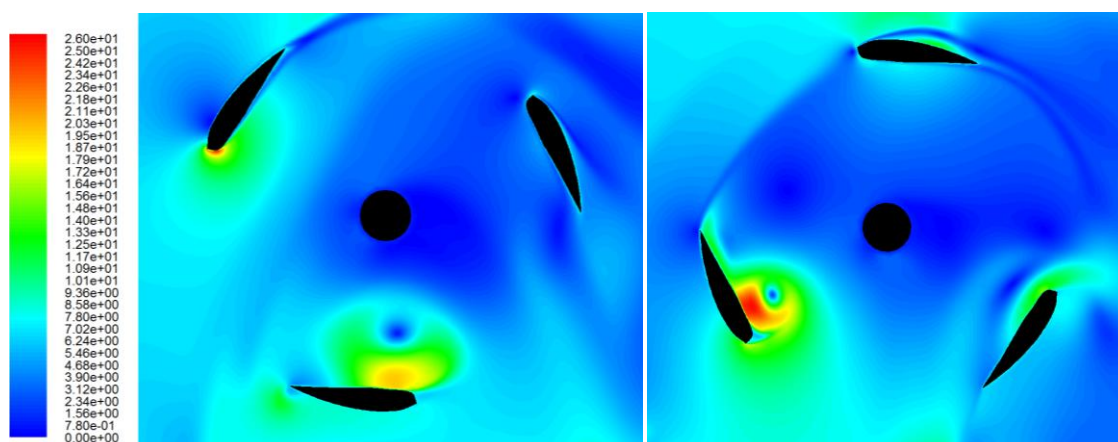


Fig. 3.15: Representación de los contornos de velocidad en la zona del rotor. Izquierda posición favorable y derecha posición desfavorable. Escala: Velocidad en metros por segundo.

3.3.4. Campo de velocidades.

El campo de velocidades se representa con vectores que indican la dirección que siguen las partículas fluidas en cada punto. En cuanto al módulo de la velocidad, además de estar representado por la longitud de las flechas, se representa en la escala de color de 0 a 25 m/s como la usada en el anterior apartado.

En la figura 3.16 se muestra el campo de velocidades en el rotor para la posición de máximo y mínimo rendimiento.

En la figura 3.17 se muestra en detalle el campo de velocidades en las proximidades de los alabes.

Estas representaciones permiten ver de una forma clara el comportamiento del aire en el rodete y en las proximidades de los perfiles. Además permite detectar fácilmente recirculaciones y desprendimientos de la capa límite.

En la figura 3.16 se observa como se produce la entrada del flujo de aire a la zona del rodete y como se ve influenciado por la acción de los álabes. El movimiento del aire se ve afectado por la presión en cada punto. Por ejemplo en el torbellino formado junto al perfil a 120° gran parte del flujo que abandona el álabe por el borde de ataque en este caso vuelve a recircular en una rotación antihoraria por la influencia del mínimo local de presión del torbellino.

Se aprecia, aunque de una forma menos clara, como el flujo que abandona el rodete de la posición favorable presenta una velocidad de menor magnitud que en el caso desfavorable, por la menor densidad y longitud de los vectores velocidad.

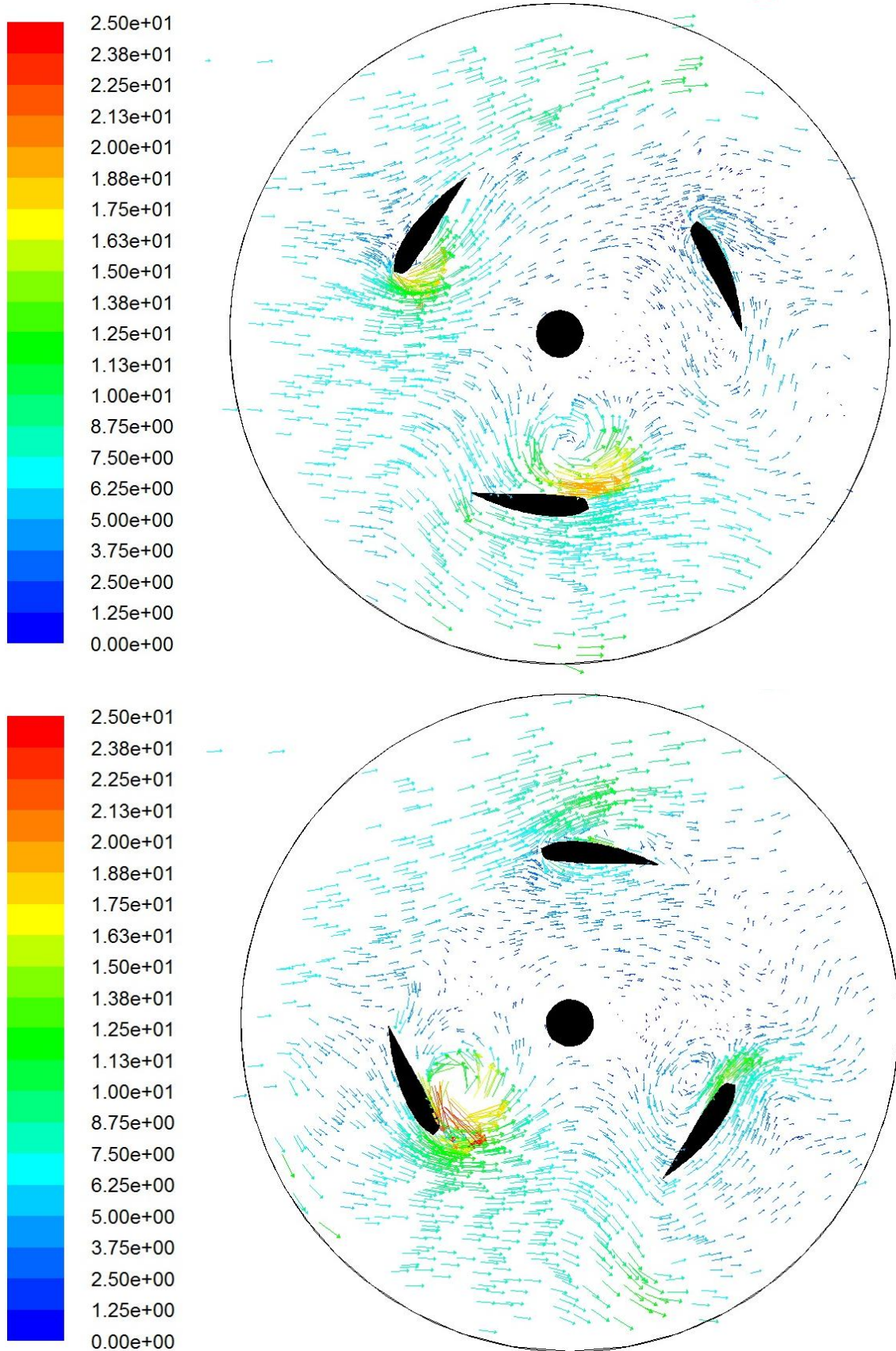


Fig. 3.16: Representación del campo de velocidad en la zona del rotor. Arriba, posición favorable. Abajo, posición desfavorable. Escala: Velocidad en metros por segundo.

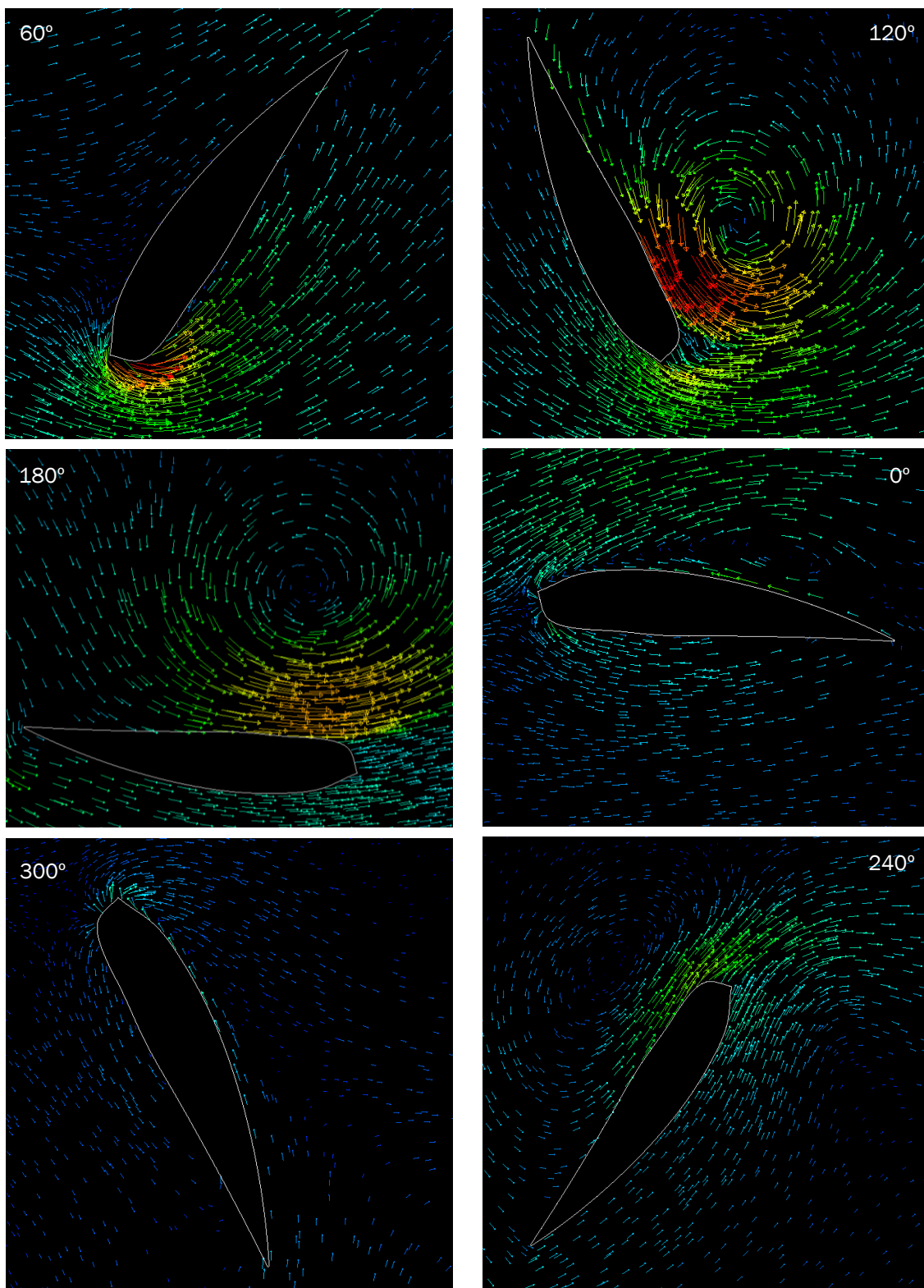


Fig. 3.17: Representación del campo de velocidad detallada en los alabes.
Columna izquierda: Posición favorable, con álabes a 60°, 180° y 300°.
Columna derecha: Posición desfavorable, con álabes a 120°, 0° y 240°
Escala: No representada, misma escala que en figura 3.16.

En las vistas detalladas del campo de velocidades alrededor de los perfiles se observa en primer lugar como incide sobre ellos el flujo relativo de aire, formándose puntos de remanso. En los casos de álabe a 0° , 60° y 300° el flujo incide por la zona del borde de ataque y los puntos de remanso están bien definidos. Los álabes a 120° , 180° y 240° sufren la incidencia del flujo de aire por la zona del borde de salida del perfil y los puntos de remanso no están tan bien definidos. Esto se observa también en la figura 3.15.

En el álabe a 0° , en el que el flujo de aire incide directamente por el borde de ataque se observa el desprendimiento de la capa límite en la cara exterior y la formación de un torbellino en la misma cara exterior cerca del borde de salida.

En el perfil a 60° el flujo incide por la cara exterior y el punto de remanso se forma en la cara exterior, próximo al borde de ataque. A partir del punto de remanso el aire avanza por la cara exterior hacia el borde de salida y hacia el borde de ataque. En el borde de ataque la velocidad llega a ser máxima y el aire continúa por la cara interior por el borde interior sin llegar a desprenderse la capa límite.

La situación en el álabe a 300° es similar a la de 0° , aunque el punto de remanso se forma en la cara interior y no se llega a un desprendimiento tan marcado de la capa límite como en el caso de 0° .

En los perfiles a 120° , 180° y 240° se observa la circulación del aire en los torbellinos formados junto a sus caras interiores. En estos puntos de recirculación el movimiento de rotación del fluido es como sólido rígido.

Se llega a la conclusión, tras ver los resultados de los apartados 3.3.2, 3.3.3 y 3.3.4, de que los centros de los torbellinos cumplen con las condiciones de mínima presión y velocidad nula.

3.3.5. Turbulencia.

En la figura 3.18 se representa el contorno de energía cinética turbulenta en la zona del rotor para las 2 posiciones, favorable y desfavorable. La escala se ha establecido igual para las dos posiciones, de 0 a $12 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Se observa como la turbulencia es alta en las zonas donde se presentan torbellinos. Se llega a la conclusión de que éstos son perjudiciales ya que la turbulencia implica disipación de energía. La energía disipada por turbulencia, en comparación con la energía no aprovechada por el rotor, tiene una connotación negativa añadida ya que es energía que ha perdido el fluido a la salida del aerogenerador y en el caso de estar montado formado un parque eólico, influye negativamente en el resto de aerogeneradores aguas abajo.

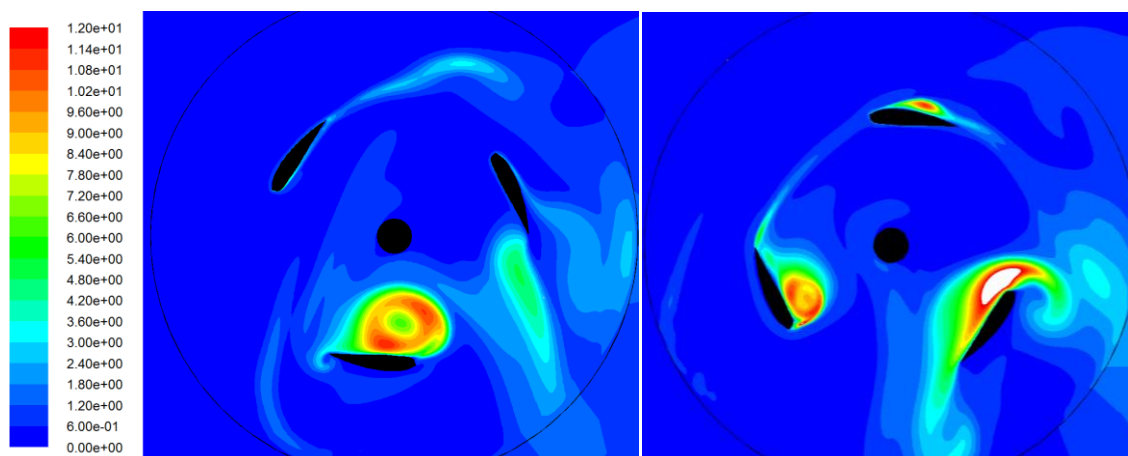


Fig. 3.18: Representación de los contornos de energía cinética turbulenta en el rotor del modelo. Izquierda, posición favorable. Derecha, posición desfavorable. Escala: Energía cinética turbulenta k [m^2/s^2].

En la posición desfavorable se aprecian varias zonas con alto régimen turbulento, sobre todo en las zonas de torbellinos que se presentan en los alabes a 120° y 240° . En el perfil a 0° aparece una zona de turbulencia debida al desprendimiento de la capa límite en la cara exterior.

Comparando la situación de la posición desfavorable con la favorable se ve que en esta última se forma una única zona de alta turbulencia en el perfil a 180° . Llama la atención como el perfil más favorable, el de 0° , que sufre un mayor diferencia de presiones sufre entre sus caras y provoca una fuerza de sustentación mayor, es el que presenta la mínima turbulencia entre todas las posiciones.

3.3.6. Estelas.

En este apartado se muestran las condiciones del flujo de aire tras abandonar la zona del rotor.

Los torbellinos generados en la zona del rotor lo abandonan, desplazándose aguas abajo formando una estela de torbellinos que se van disipando conforme pasa el tiempo.

En las siguientes figuras 3.19 y 3.20 se representan los contornos de turbulencia y de velocidad, respectivamente, para todo el dominio espacial del modelo.

En la figura 3.19 se aprecia la estela de torbellinos aguas abajo del rotor. La estela de torbellinos esta dividida en dos, una superior y otra inferior. Se aprecia la evolución de los torbellinos a lo largo del tiempo.

En la figura 3.20 se muestra como varían los contornos de velocidad en la estela generada. En el centro de la estela, que se encuentra aguas debajo de el área de trabajo de los alabes, el aire presenta menor velocidad, pero en cotas más alejadas la velocidad es mayor.

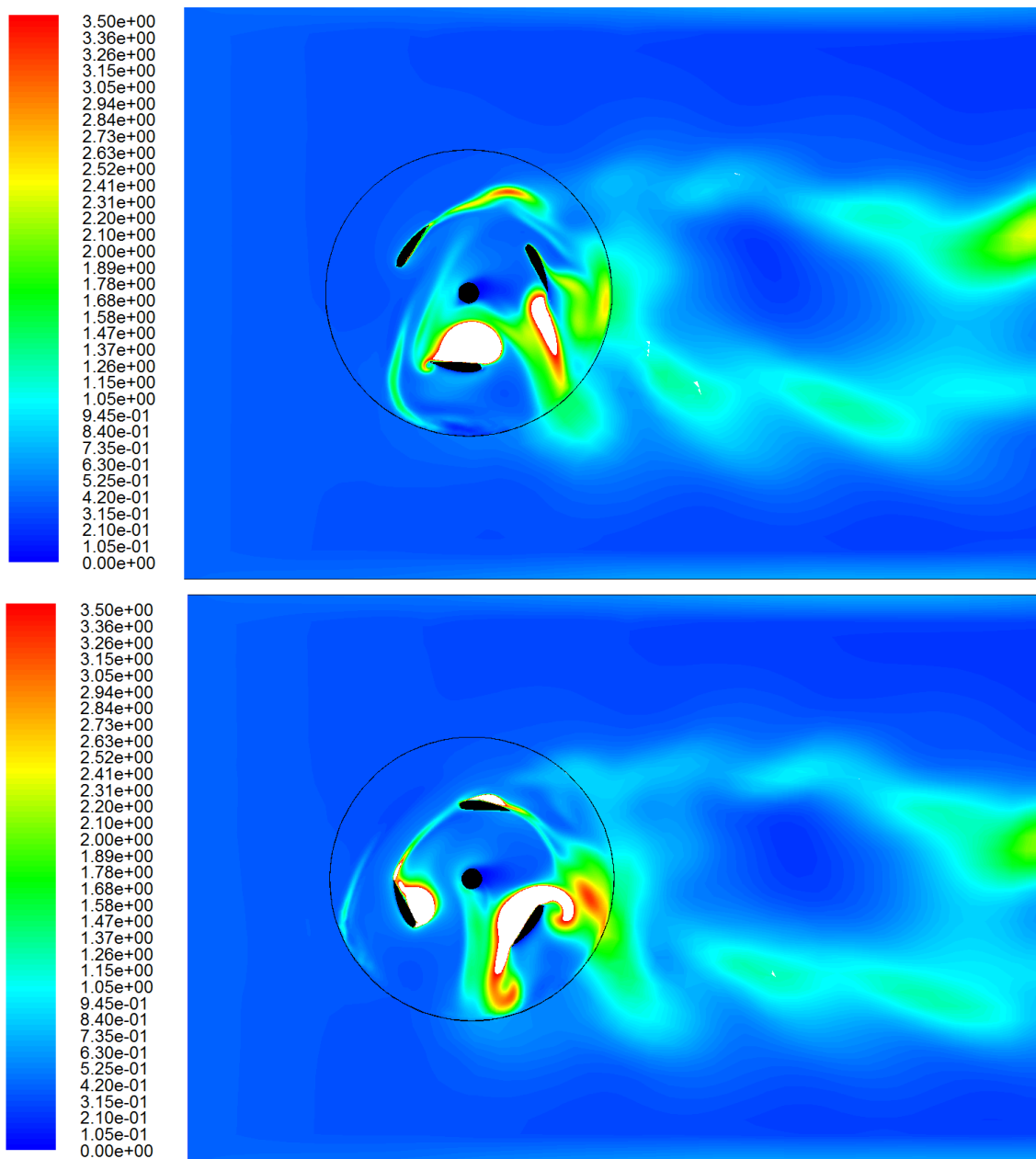


Fig. 3.19: Representación de los contornos de energía cinética turbulenta. Arriba, posición favorable. Abajo, posición desfavorable. Escala: Energía cinética turbulenta k [m^2/s^2].

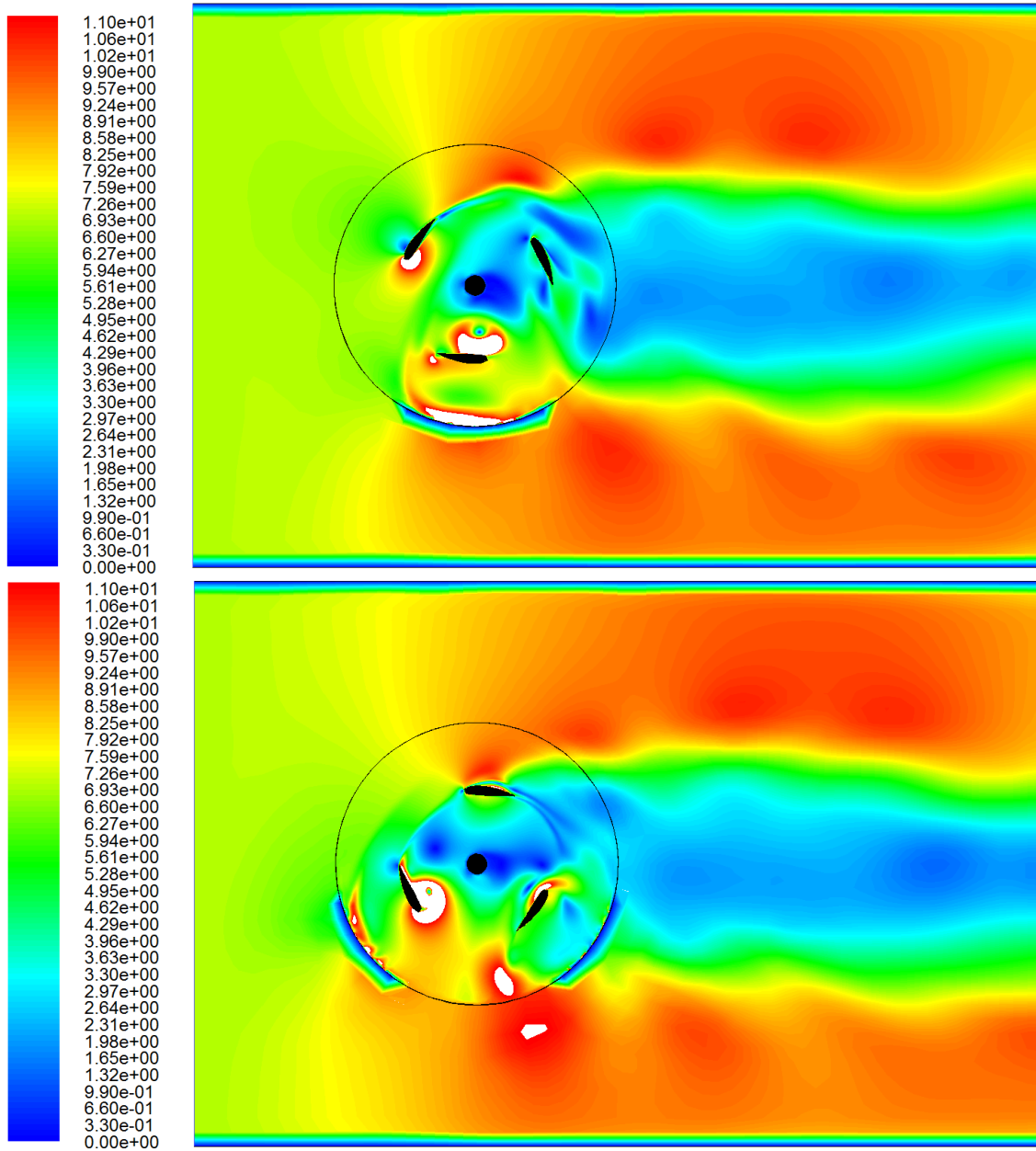


Fig. 3.20: Representación de los contornos velocidad. Arriba, posición favorable. Abajo, posición desfavorable. Escala: Velocidad en metros por segundo.

Capítulo 4. Estudio paramétrico, influencia del ángulo de pitch.

En este capítulo se presenta el desarrollo del estudio paramétrico de la turbina eólica H-Darrieus con perfiles NACA 4518 variando únicamente el ángulo de pitch. Se realizará la comparación entre las curvas características así como los patrones de flujo.

4.1. Modelo con ángulo de pitch de +6 grados.

El ángulo de pitch es el ángulo formado entre la dirección de la cuerda del álabe y la dirección del flujo de aire que incide sobre el mismo. Este ángulo, como se ha visto, varía para cada posición del rotor, sin embargo, se toma como referencia para definir la turbina el ángulo formado entre la dirección de la cuerda del perfil a 0° y la dirección del flujo de aire sin perturbar, en este caso la dirección X.

En la siguiente figura 4.1 se muestra la diferencia entre el modelo con ángulo de pitch $\alpha = -6^\circ$ estudiado hasta ahora y este nuevo modelo con $\alpha = +6^\circ$.

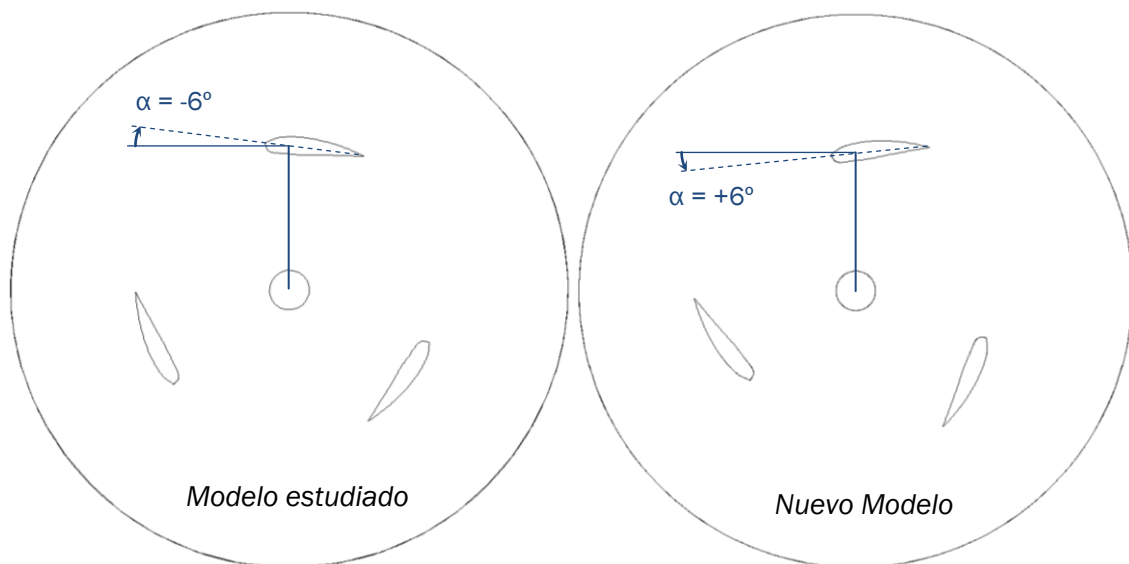


Fig. 4.1: Esquema del modelo con ángulo de pitch -6° (izquierda) y $+6^\circ$ (derecha).

La construcción del modelo numérico se efectúa de la misma manera que la realizada en el capítulo 2, siendo todos los parámetros y configuraciones idénticas, pero cambiando la malla del modelo para contar con un ángulo de pitch de $+6^\circ$ en los álabes.

Para la construcción de la malla se emplea el software *Gambit* con el *Journal* elaborado por [Ramos, 2013].

En las siguientes figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se representa la malla que forma todo el dominio espacial, la que conforma el rotor y una vista en detalle del mallado alrededor del álabe, respectivamente.

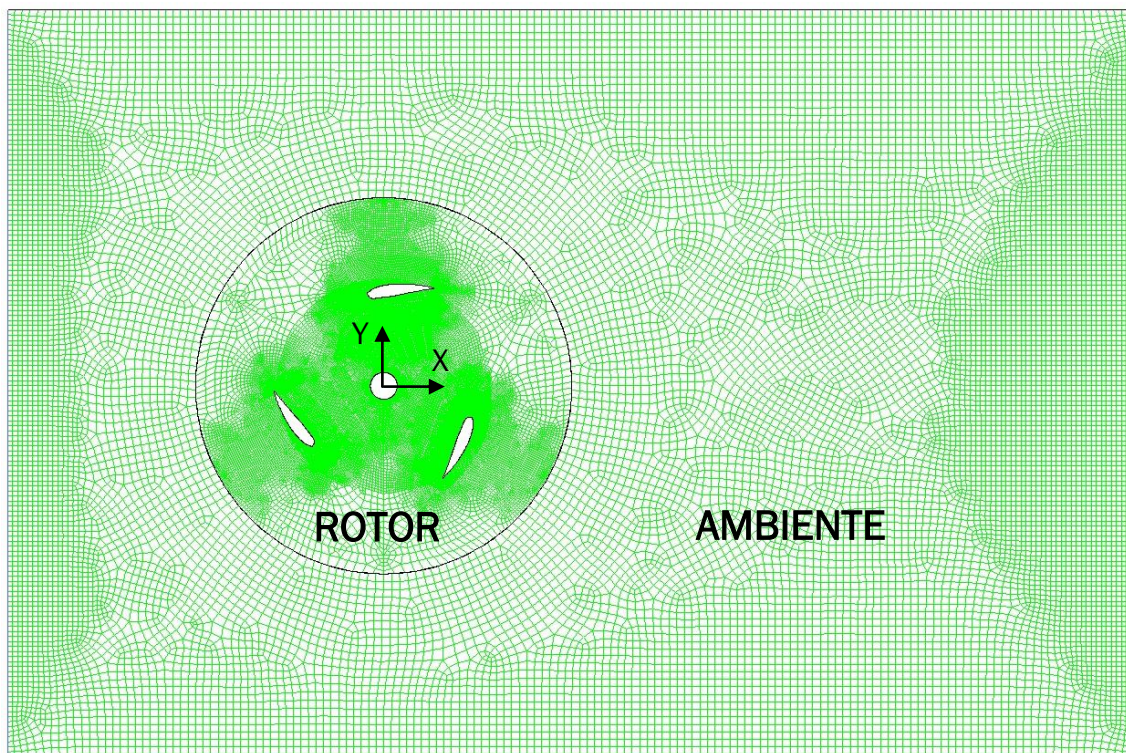


Fig. 4.2: Malla del modelo 2D del VAWT H-Darrieus con perfiles NACA4518 a $+6^\circ$. Se indican las dos zonas diferenciadas.

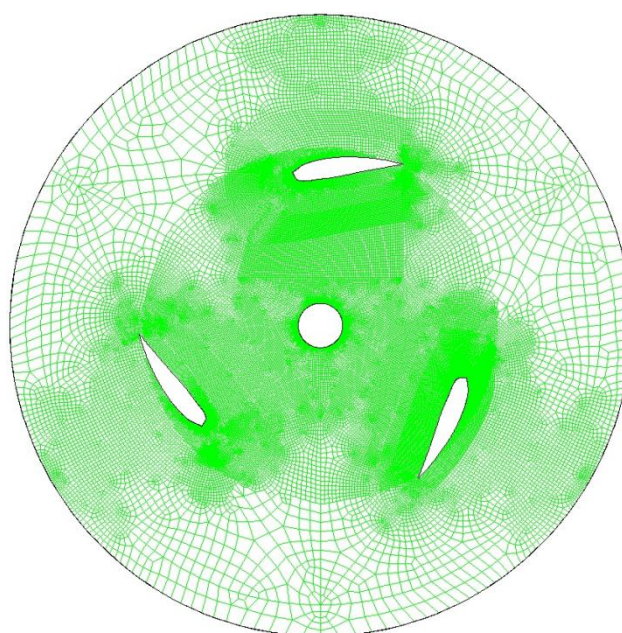


Fig. 4.3: Detalle del mallado en la zona del rotor. Modelo 2D del VAWT H-Darrieus con perfiles NACA4518 a $+6^\circ$.

El número de celdas total es de 82000 al igual que en el modelo anterior, con 66000 en la zona del rotor y 16000 en la zona ambiente.

En este caso, la malla presenta una disposición diferente comparada con la malla del modelo estudiado hasta ahora. Ésta cuenta con más resolución en la zona ambiente y menos en las zonas del rotor más alejadas de los álabes.

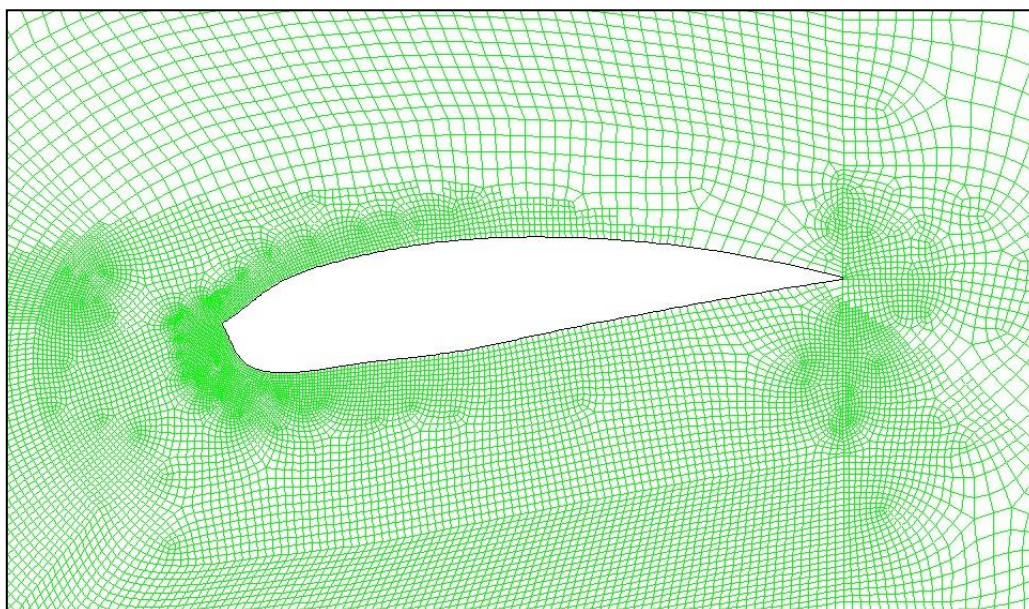


Fig. 4.4: Detalle del mallado alrededor del álabes. Modelo 2D del VAWT H-Darrieus con perfiles NACA4518 a $+6^\circ$.

4.2. Análisis y comparación de los resultados.

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones del nuevo modelo 2D de aerogenerador H-Darrieus con perfiles NACA 4518 y un ángulo de pitch de $+6^\circ$. Estos resultados son comparados con los obtenidos en el capítulo 3 para conocer la influencia del ángulo de pitch en los mismos.

4.2.1. Periodicidad y convergencia de los resultados.

La periodicidad del nuevo modelo se alcanza rápidamente como en el modelo anterior sin embargo los resultados instantáneos toman valores más erráticos en muchos de los casos.

Al igual que en el anterior modelo, a medida que aumenta el TSR, la periodicidad alcanza rangos estables más lentamente. En especial para valores superiores a $TSR = 1,3$.

En la figura 4.5 se muestran los resultados del coeficiente de momento instantáneo para varios TSR diferentes.

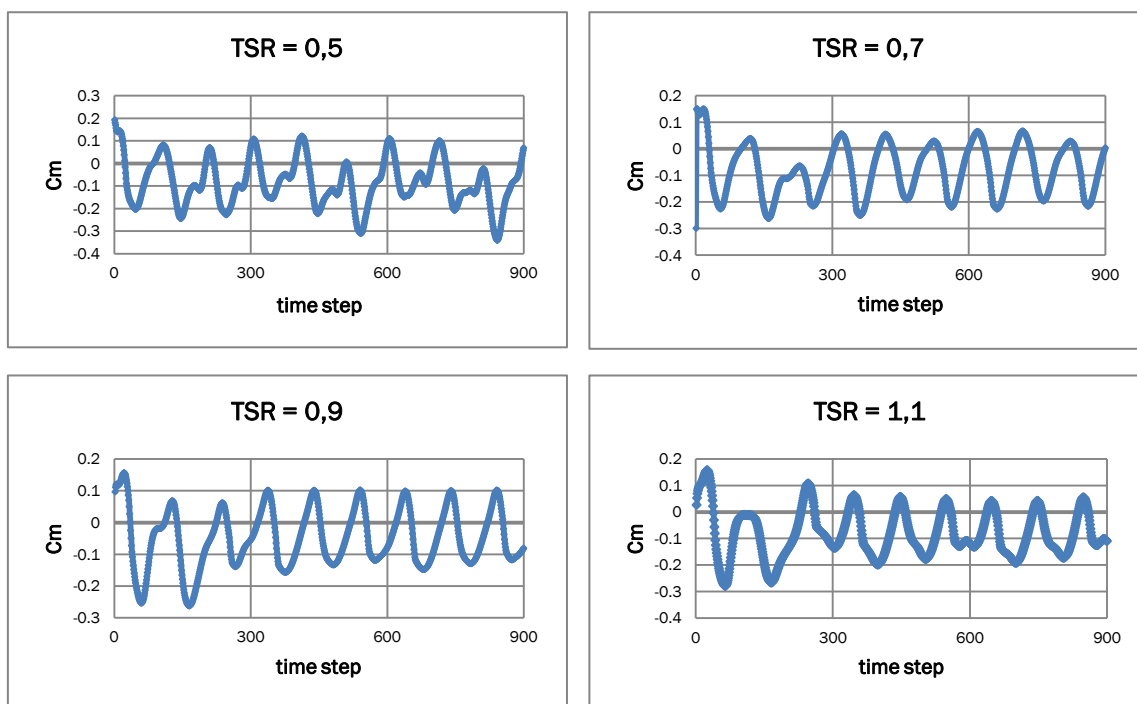


Fig. 4.5: Coeficiente de momento C_m para cada time step y diferentes TSR. Modelo 2D VAWT H-Darrieus con perfiles NACA 4518 a $+6^\circ$.

Por el otro lado, para bajas velocidades de giro, TSR menores de 0,5 los resultados instantáneos de C_m presentan un comportamiento más errático, con posiciones favorables y desfavorables poco definidas. El número de Reynolds es proporcional al TSR (2.14), con lo que a bajas TSR es posible que el modelo de turbulencia empleado no trabaje adecuadamente.

4.2.2. Curvas características.

Los resultados de los coeficientes de momento y potencia medios para el nuevo modelo se presentan en la siguiente tabla 4.1.

Tabla 4.1: Valores del coeficiente de momento y potencia medios obtenidos en las simulaciones con ángulo de pitch $+6^\circ$.

Velocidad de giro del rotor (ω [rad/s])	Tip Speed Ratio (TSR [])	Coeficiente de momento medio (C_m [])	Coeficiente de potencia medio (C_p [])
50	0,5	-0,0902	-0,0451
70	0,7	-0,0678	-0,0475
90	0,9	-0,0382	-0,0344
110	1,1	-0,0848	-0,0933
130	1,3	-0,2198	-0,2858
150	1,5	-0,3895	-0,5842
170	1,7	-0,4871	-0,8281

En las siguientes figuras 4.6 y 4.7 se representan gráficamente las curvas características del nuevo modelo con ángulo de pitch $+6^\circ$ y se compara con el modelo de ángulo de pitch -6° .

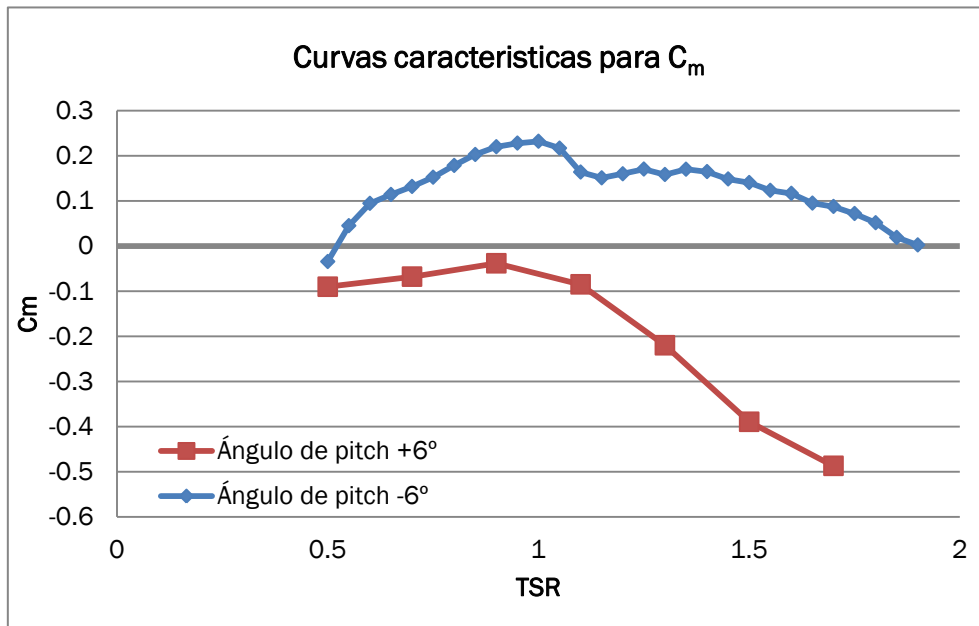


Fig. 4.6: Comparación de las curvas características para el coeficiente de momento medio C_m en función del TSR. Modelo 2D VAWT H-Darrieus con perfiles NACA 4518 con ángulos de pitch a $+6^\circ$ y -6° .

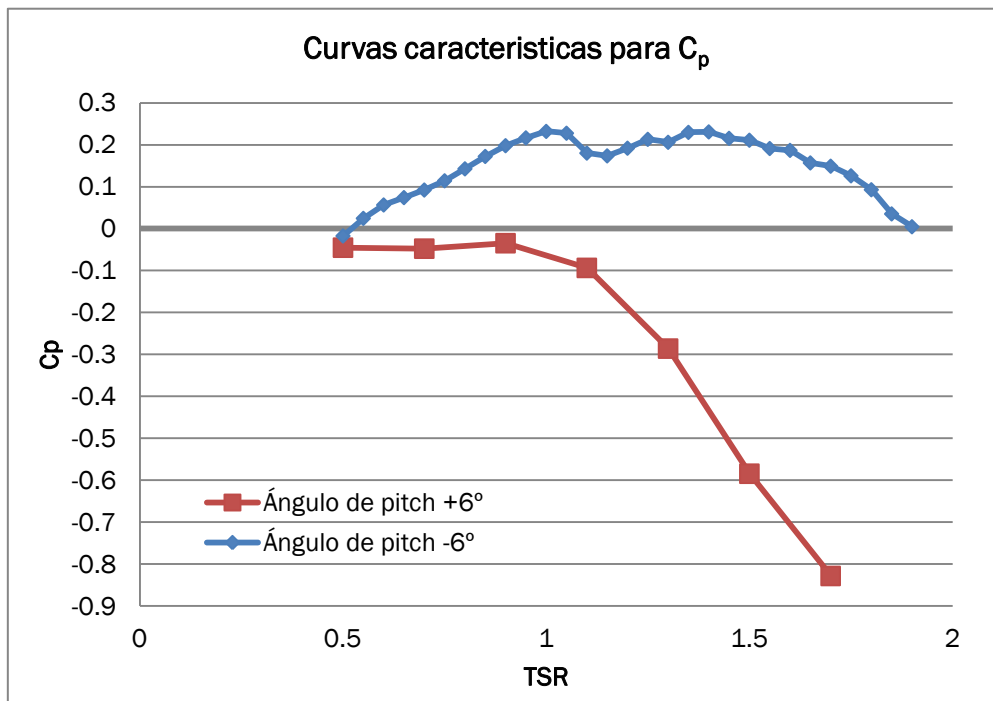


Fig. 4.6: Comparación de las curvas características para el coeficiente de potencia medio C_p en función del TSR. Modelo 2D VAWT H-Darrieus con perfiles NACA 4518 con ángulos de pitch $+6^\circ$ y -6° .

Se observa como el nuevo modelo presenta valores negativos en todos los casos de TSR simulados. Esto significa que no es apto para el funcionamiento como aerogenerador, pues no es capaz de extraer energía del viento.

El comportamiento aerodinámico de los álabes a la hora de captar la energía del viento se ha visto afectado muy negativamente al pasar de un ángulo de pitch de -6° a $+6^\circ$

Aun así existen semejanzas entre ambos modelos como los puntos de máximo rendimiento, situado en el nuevo modelo en $TSR = 0,9$ y en el anterior a $TSR = 1$. Además, las zonas de crecimiento y decrecimiento de las curvas se producen en los mismos rangos de TSR.

Cabe destacar como a partir de un $TSR = 1,3$ las curvas características del nuevo modelo decrecen muy bruscamente.

Un coeficiente de momento negativo indica que el momento en el eje de la turbina en las condiciones de operación también es negativo, según (3.2), yendo en contra del movimiento del eje y provocando su frenado.

Un coeficiente de potencia negativo indica que para que sea posible el movimiento de la turbina en las condiciones dadas se ha de aportar potencia externamente a la misma. En la figura 4.7 se representa un diagrama que muestra cómo discurre el flujo de potencias en una turbina eólica de rendimiento positivo. Para el caso de un rendimiento negativo, la potencia en el eje tendría sentido contrario, entrando al sistema en vez de abandonándolo. Esta potencia de entrada en el eje provoca un aumento de la potencia disponible en el fluido. Este funcionamiento es el característico de un ventilador.

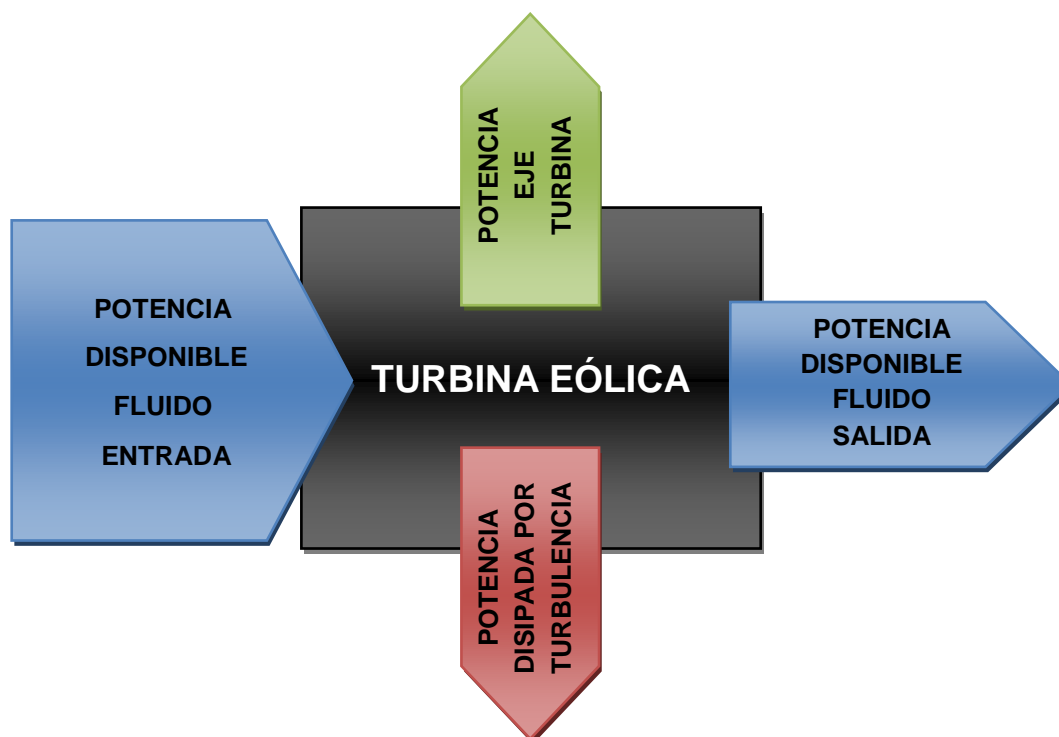


Fig. 4.7: Diagrama esquematizado del flujo de potencias que tiene lugar en una turbina eólica con un rendimiento positivo.

4.2.3. Patrón de flujo.

En este apartado se analiza el comportamiento fluidodinámico del aire que atraviesa la turbina en el nuevo modelo y se compara respecto al modelo anterior. Para ambos casos se ha seleccionado un $TSR = 1$.

4.2.3.1. Posiciones favorables y desfavorables.

En la figura 4.8 se representa el C_p instantáneo (eje radial) a lo largo de una vuelta completa del rotor (eje acimutal) para ambos modelos. Se aprecia que ambos alcanzan las posiciones más favorables y desfavorables en posiciones próximas, adelantada unos 10° la turbina del nuevo modelo pero ambas con una posición máxima en torno a los 60° .

Se adoptan las mismas posiciones, favorable y desfavorable, de la figura 3.8.

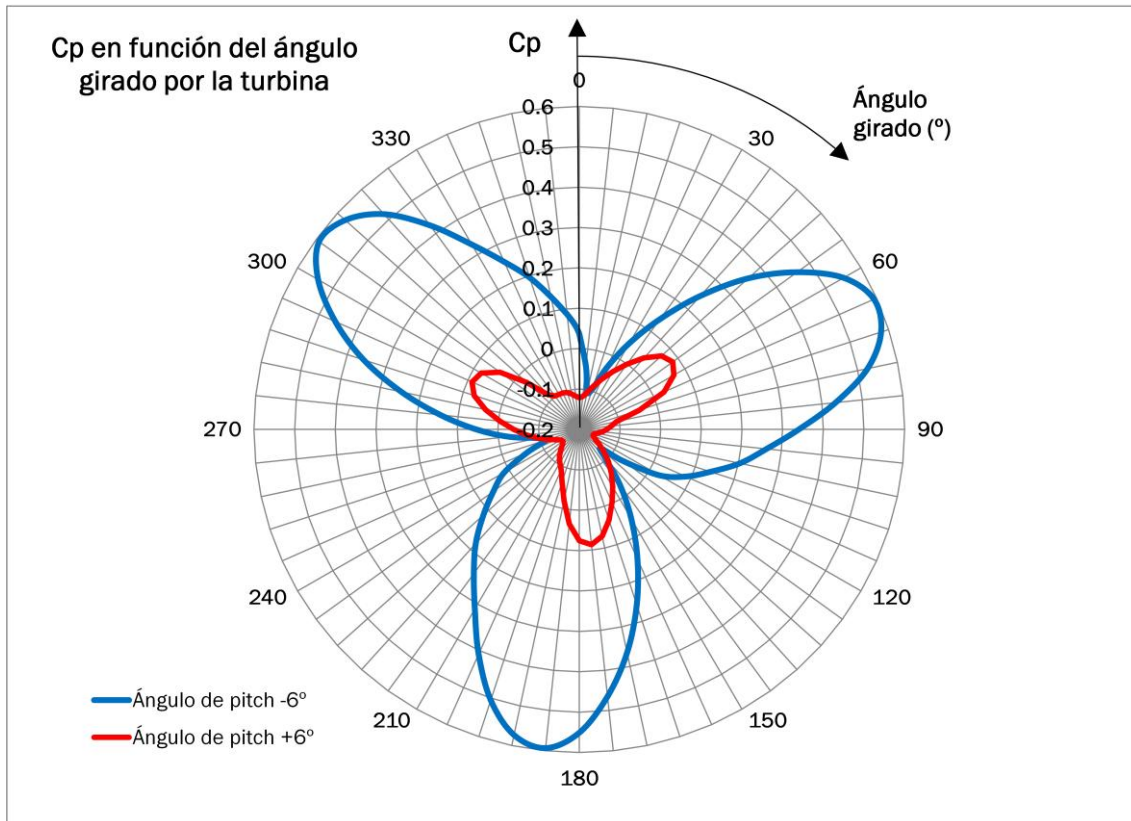


Fig. 4.8: Representación de la evolución del coeficiente de potencia instantáneo durante un giro completo de la turbina. $TSR = 1$.

4.2.3.2. Contornos y distribuciones de presión

Posición favorable.

En esta posición el rendimiento instantáneo es del 55% en el modelo con ángulo de pitch $\alpha = -6^\circ$ y del 8% en el nuevo modelo con $\alpha = +6^\circ$.

En la figura 4.9 se representan las distribuciones de presión que soportan las caras de los perfiles de ambos modelos.

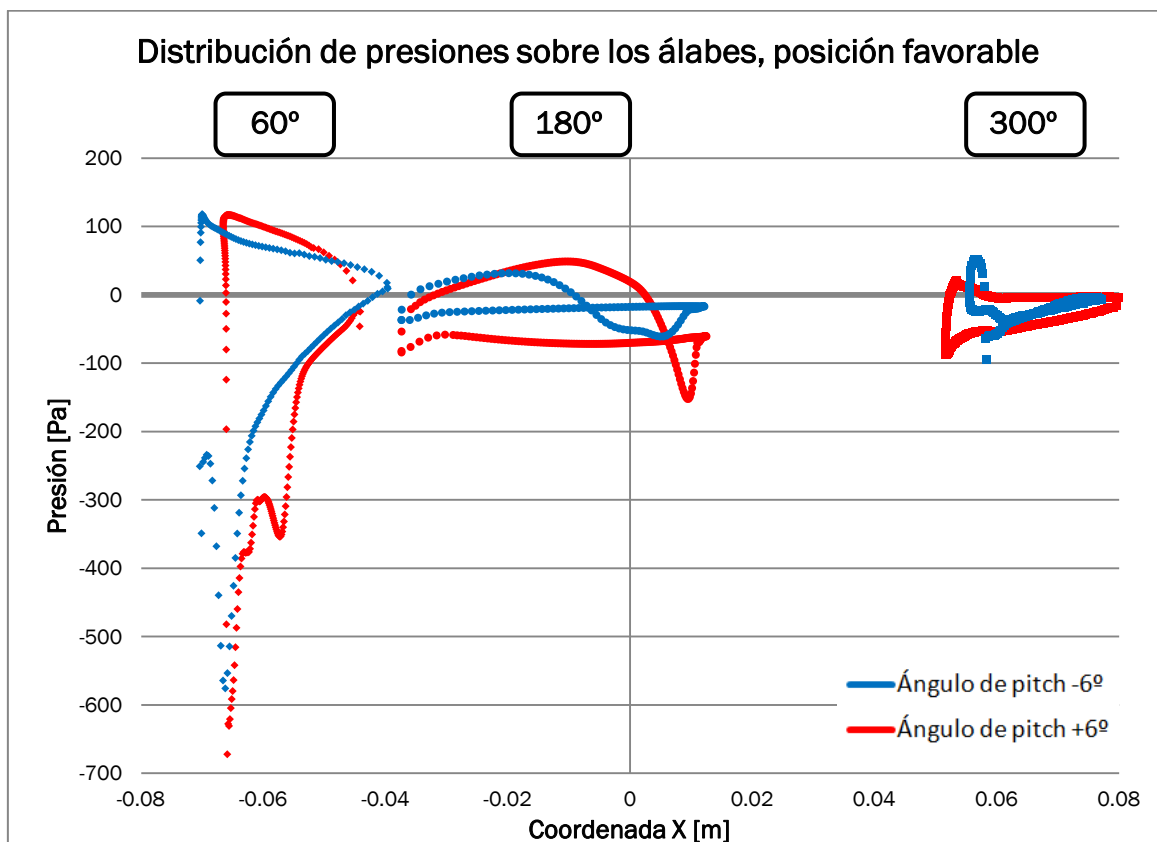


Fig. 4.9: Distribución de presiones sobre cada perfil en la posición favorable. En rojo el modelo con ángulo de pitch +6° y en azul el modelo a -6°.

Las distribuciones de presiones en los alabes muestran un comportamiento muy similar en los dos modelos. Las diferencias de presión entre las caras de los perfiles en el nuevo modelo son superiores, incluso, lo cual parece ir en contra de los rendimientos obtenidos, pues unas diferencias de presión superiores suponen unas fuerzas resultantes en los álabes superiores. Sin embargo, es la dirección de esas fuerzas la que juega un papel clave, pues puede significar la diferencia entre generar un momento positivo en el eje del rotor o uno negativo. Además, mayor diferencia de presiones entre las caras supone torbellinos de punta de mayor circulación que disipan más energía.

Cabe destacar una diferencia en la cara interior del perfil a 60° en la que en el nuevo modelo aparece un mínimo local que en el modelo anterior no aparece. Esto es debido a un desprendimiento de la capa límite que no sucede en el anterior modelo estudiado, como se ve en el apartado 4.2.3.3 y 4.2.3.4.

En las figuras 4.10 se representan los contornos de presión en la zona del rotor para los dos modelos. El rango de presiones representado es de -300 Pa de mínima a 100 Pa de máxima. Presión manométrica.

La mayor diferencia se observa en el mínimo local de presión en la cara interna del álabe a 60° que aparece en el nuevo modelo.

El cambio en la inclinación de los álabes hace que las fuerzas aerodinámicas generadas varíen sus direcciones penalizando al nuevo modelo.

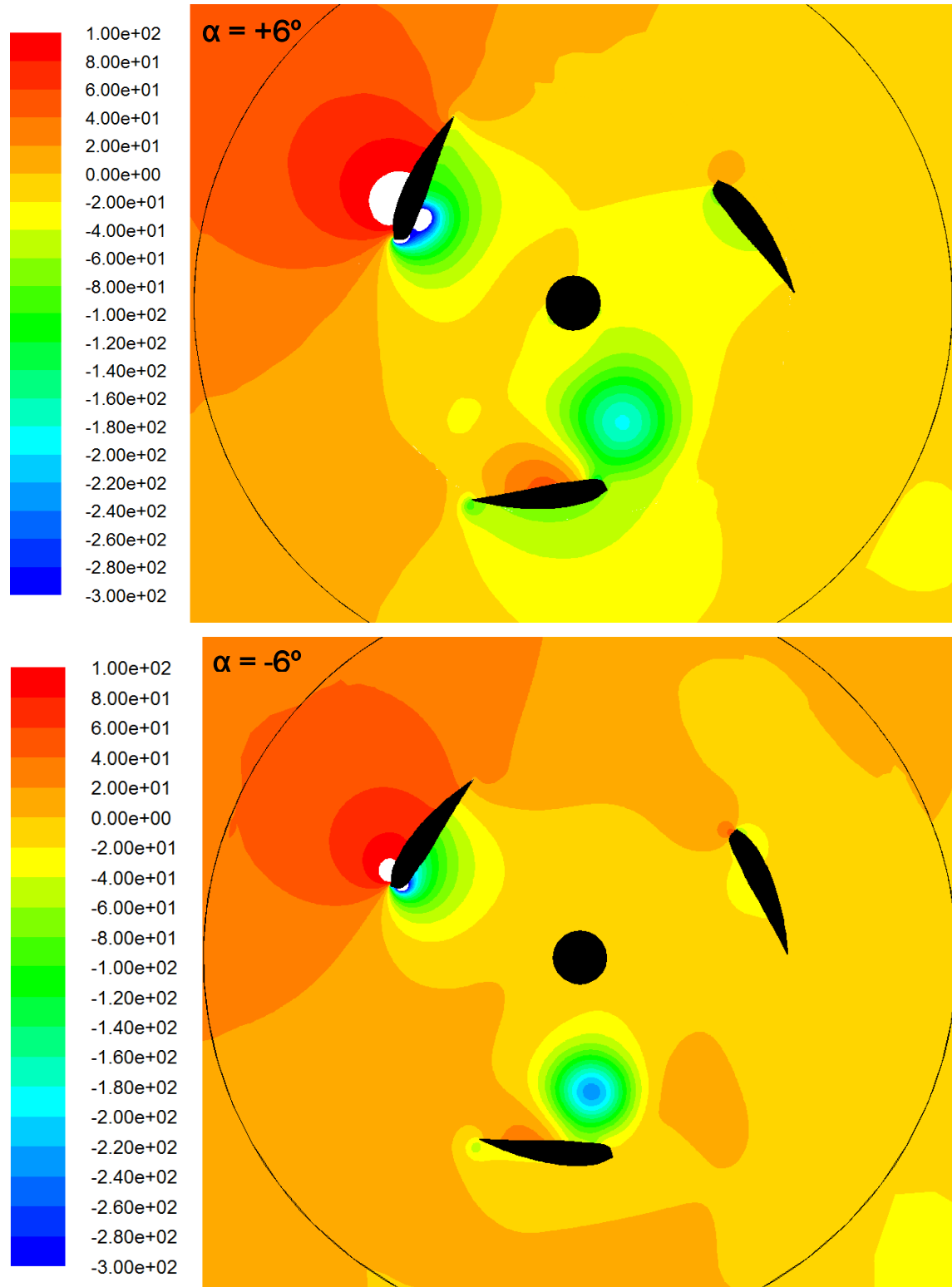


Fig. 4.10: Representación de los contornos de presión en la zona del rotor. Arriba, modelo con $\alpha = +6^\circ$. Abajo, modelo con $\alpha = -6^\circ$. Posición favorable.

Escala: Presión manométrica en Pascales.

Posición desfavorable.

El coeficiente de potencia instantáneo, en esta posición, es para el modelo con ángulo de pitch -6° del 5% y para el modelo con $+6^\circ$ del -12%.

En la figura 4.11 se representan las distribuciones de presión que soportan las caras de los perfiles de ambos modelos.

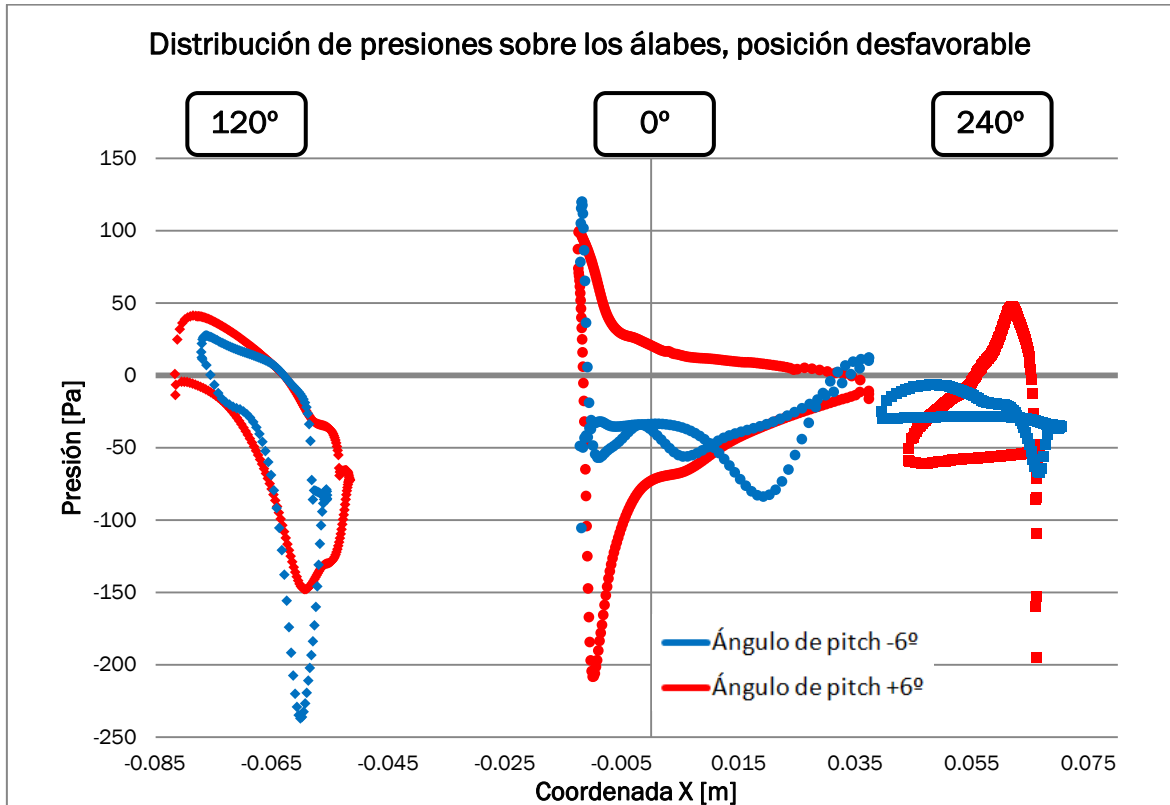


Fig. 4.11: Distribución de presiones sobre cada perfil en la posición favorable. En rojo el modelo con ángulo de pitch $+6^\circ$ y en azul el modelo a -6° .

El álabe a 120° presenta unas presiones en sus caras muy similares en los dos modelos. El modelo con $\alpha = -6^\circ$ cuenta con una presión mínima menor debido a que el torbellino, localizado por un mínimo local de presión, próximo al perfil está más cercano en dicho modelo, como se muestra en la figura 4.12.

El perfil a 0° actúa de manera diferente. En el modelo anteriormente estudiado la cara exterior actúa de extradós y en ella se produce un desprendimiento de la capa límite. Sin embargo en el nuevo modelo, de $\alpha = +6^\circ$, es la cara interior la que actúa como extradós.

En la zona del álabe a 240° es destacable como en el modelo con $\alpha = -6^\circ$ existe un mínimo de presión cercano a la cara interna, provocado por la presencia de un torbellino. En el nuevo modelo con $\alpha = +6^\circ$ este mínimo de presión no aparece. En su lugar se presenta una máximo de presión que se corresponde con el punto de remanso del álabe. Los mínimos de presión localizados tras la cara externa del

perfil, tanto en el borde de ataque como de salida, son de mayor magnitud en el nuevo modelo.

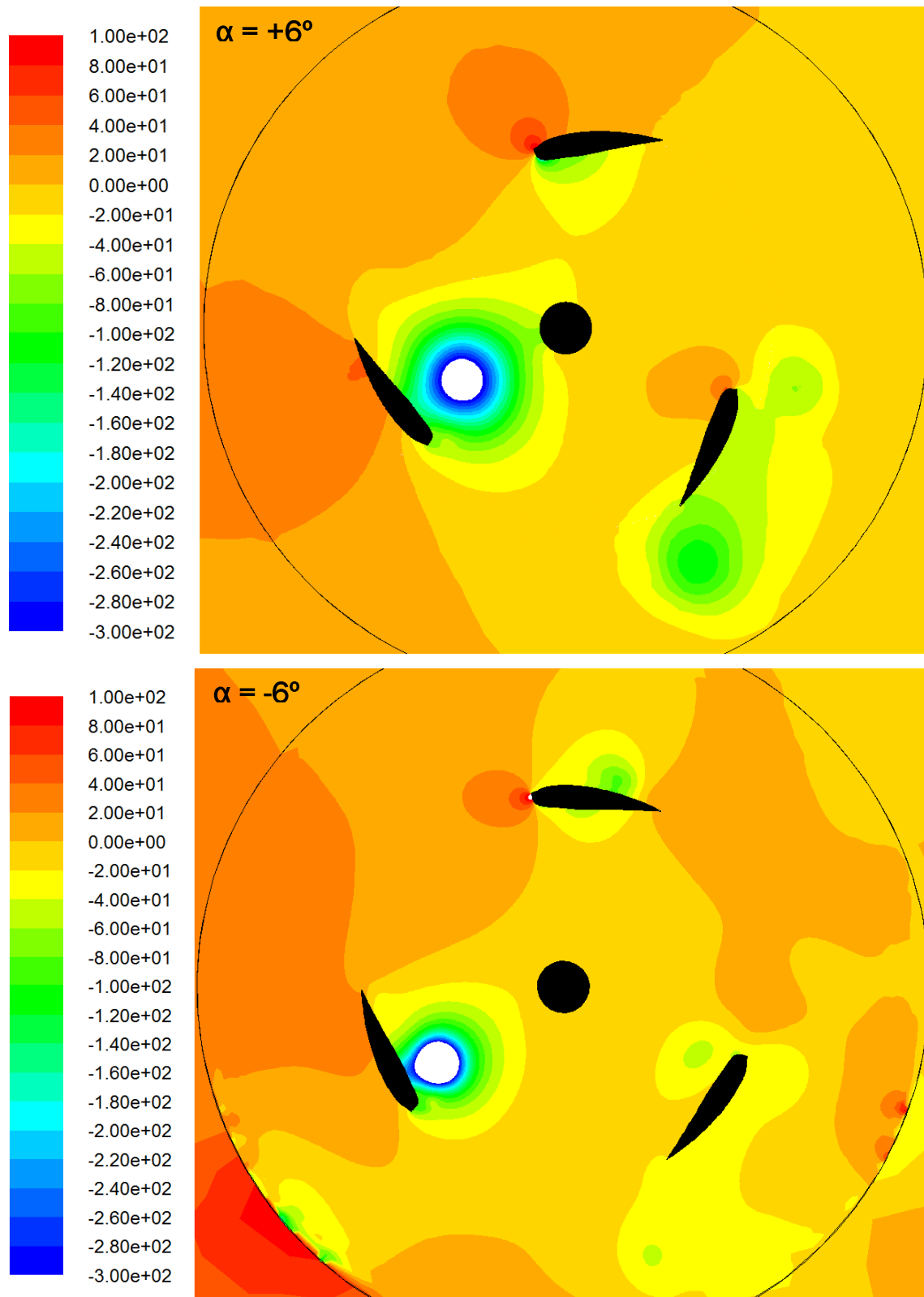


Fig. 4.12: Representación de los contornos de presión en la zona del rotor. Arriba, modelo con $\alpha = +6^\circ$. Abajo, modelo con $\alpha = -6^\circ$. Posición desfavorable.

Escala: Presión manométrica en Pascales.

La actuación de las caras de los perfiles en cada posición significativa aparece recogida en la siguiente tabla 3.2.

Tabla 3.2: Actuación de las caras de los perfiles como extradós e intradós para las posiciones significativas.

<i>Posición</i>	PITCH +6°		PITCH -6°	
0°	Extradós	Intradós	Intradós	Extradós
60°	Extradós	Intradós	Extradós	Intradós
120°	Extradós	Intradós	Extradós	Intradós
180°	Intradós	Extradós	-	-
240°	Intradós	Extradós	-	-
300°	Extradós	Intradós	-	-
	<i>Cara interior</i>	<i>Cara exterior</i>	<i>Cara interior</i>	<i>Cara exterior</i>

Las caras marcadas con guion no presentan una actuación clara, la diferencia de presión entre caras no es suficientemente significativa.

4.2.3.3. Campo de velocidades.

El campo de velocidades permite detectar las diferencias de los dos modelos en cuanto la dirección y velocidad del flujo que atraviesa la turbina, siendo especialmente importante el flujo alrededor de los álabes. También permite detectar las diferencias en dadas en las zonas de recirculación o torbellinos y puntos donde se producen desprendimientos de la capa límite.

La escala de velocidad en las representaciones abarca un rango desde los 0 hasta los 25 metros por segundo.

Posición favorable.

En la figura 4.13 se representa el campo de velocidades en la zona del rotor.

Una de las mayores diferencias entre los modelos se da en el álabe situado a 60°, que es el que goza de mayores diferencias de presión. En el nuevo modelo se produce el desprendimiento de la capa límite en el inicio de la cara interior. En el modelo con $\alpha = -6^\circ$ la capa límite permanece adherida a lo largo de todo el perfil.

El torbellino localizado cerca del álabe a 180° está más alejado del mismo en el nuevo modelo aunque las magnitudes de velocidad generadas a su alrededor son similares en ambos casos. La velocidad del fluido en la cara exterior del perfil es mayor en el nuevo modelo.

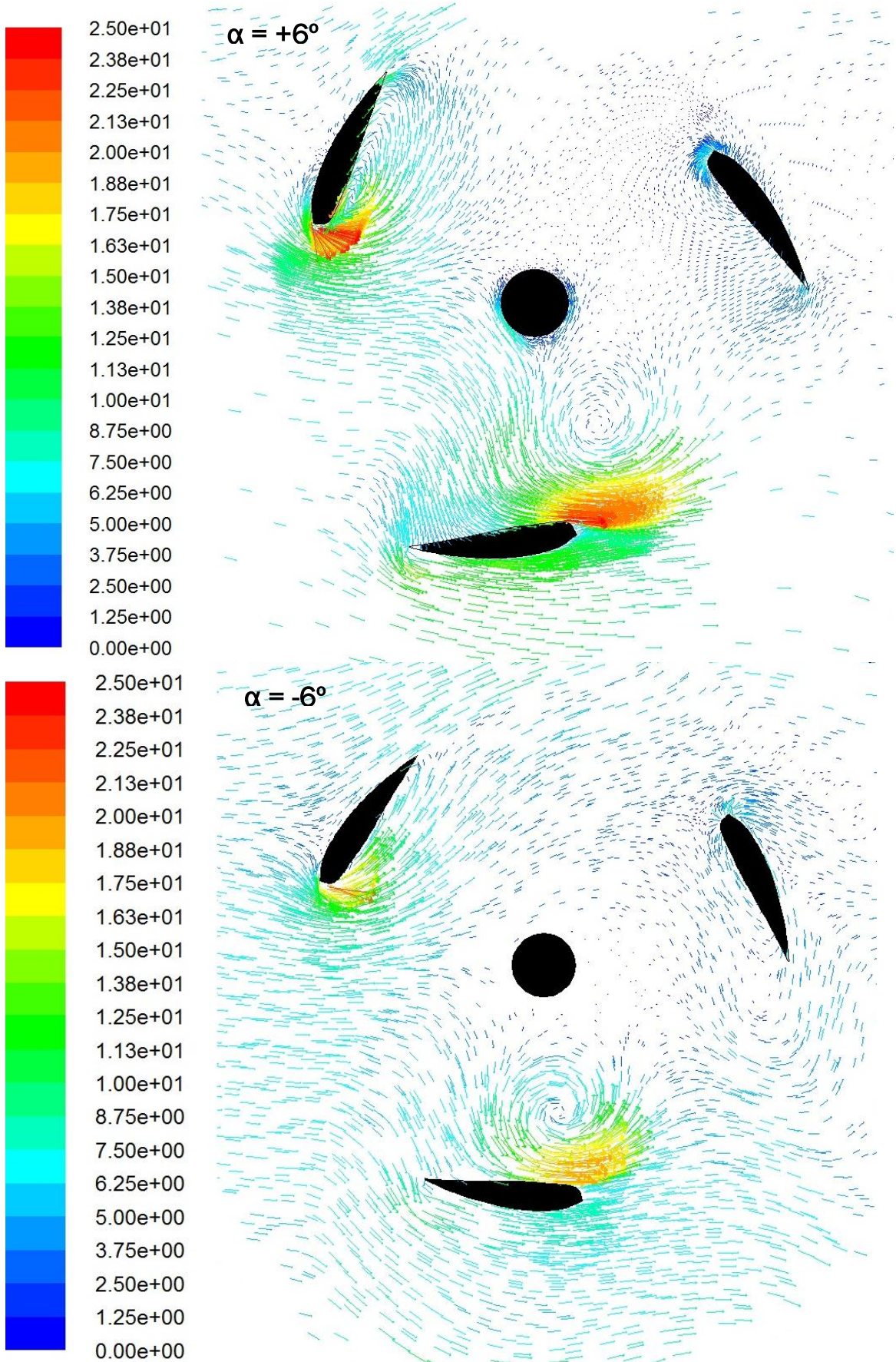


Fig. 4.13: Representación del campo de velocidades en la zona del rotor. Arriba, modelo con $\alpha = +6^\circ$. Abajo, modelo con $\alpha = -6^\circ$. Posición favorable. Escala: Velocidad en metros por segundo.

Posición desfavorable.

En la figura 4.14 se representa el campo de velocidades en la zona del rotor.

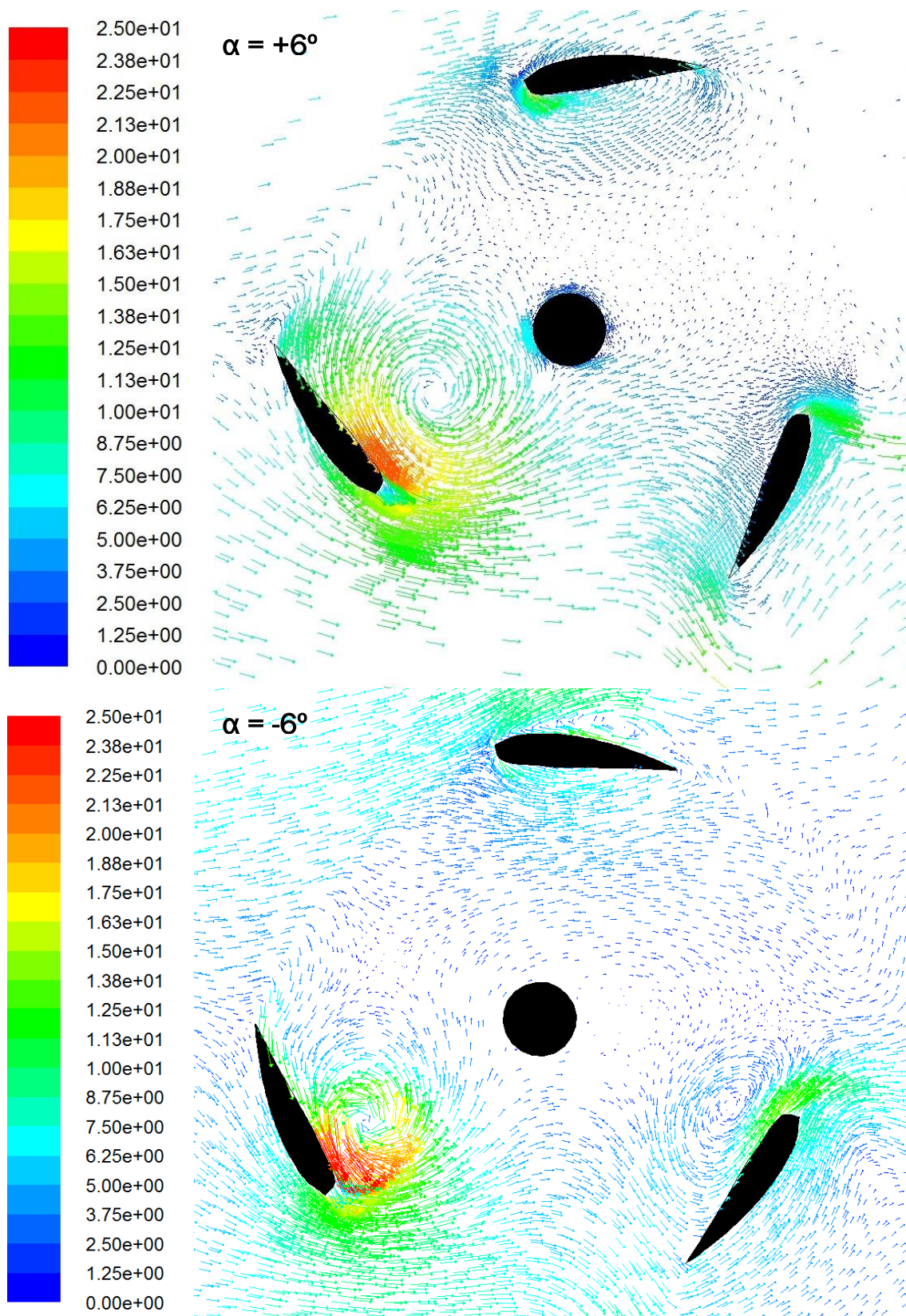


Fig. 4.14: Representación del campo de velocidades en la zona del rotor. Arriba, modelo con $\alpha = +6^\circ$. Abajo, modelo con $\alpha = -6^\circ$. Posición desfavorable. Escala: Velocidad en metros por segundo.

Se observa como el perfil situado a 0° invierte la actuación de sus caras de un modelo a otro. En el modelo con $\alpha = -6^\circ$ se ve como la cara externa actúa de extradós, llegándose a desprender la capa límite. En el nuevo modelo con $\alpha = +6^\circ$ la diferencia de inclinación hace que se forme el punto de remanso en la cara exterior, donde se dan velocidades menores. Es la cara interior la que actúa de extradós y la capa límite permanece adherida al perfil.

Otra diferencia destacable se presenta en torno al álabe a 240° . En el modelo con $\alpha = -6^\circ$ se observa la presencia de un torbellino próximo a la cara interior del perfil. En el nuevo modelo con $\alpha = -6^\circ$, sin embargo, el torbellino se encuentra más allá del borde de ataque del perfil, abandonando el rotor. El flujo incide en este álabe por la cara interior creando ahí la zona de remanso y la cara exterior es la que cuenta con una presión significativamente menor.

4.2.3.4. Turbulencia

Las representaciones de los contornos de energía cinética turbulenta permiten localizar dónde se producen desprendimientos de la capa límite en los perfiles aerodinámicos así como la localización de los torbellinos ya formados.

La escala de energía cinética turbulenta (k) abarca desde 0 hasta $12 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Posición favorable.

En esta posición, figura 4.15, se distingue en el nuevo modelo la zona turbulenta en la cara interior del álabe a 60° debida al desprendimiento de la capa límite que no sucede en el anterior modelo. También destaca el nivel de turbulencia del torbellino situado junto al álabe a 180° , de menor magnitud en el nuevo modelo.

En el borde de salida del perfil a 300° en el modelo con $\alpha = -6^\circ$ se produce una zona de alta turbulencia. En el nuevo modelo esa zona turbulenta no se presenta debido a que el flujo que abandona el alabe a 300° por la cara interior no confluye tan directamente con el que abandona el torbellino cercano al perfil a 180° .

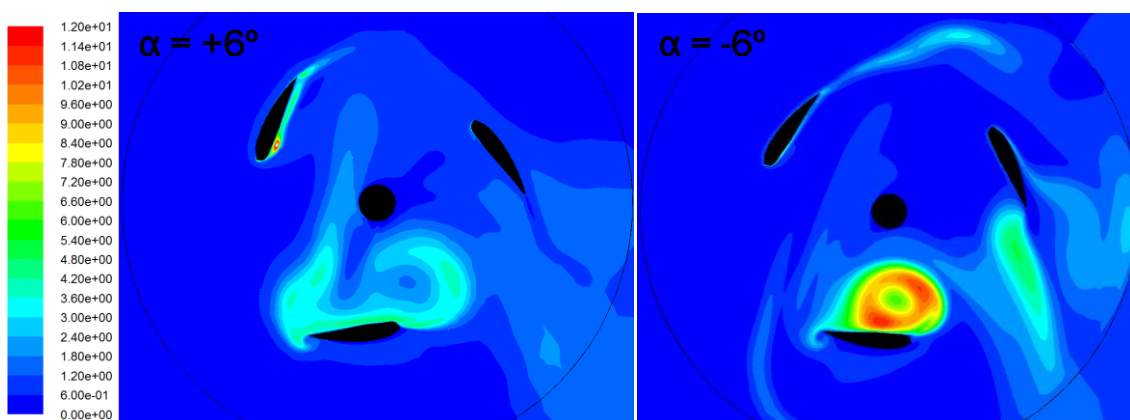


Fig. 4.15: Contornos de energía cinética turbulenta en el rotor para los dos modelos estudiados. Posición favorable. Escala: Energía cinética turbulenta k [m^2/s^2].

Posición desfavorable.

En la posición desfavorable, figura 4.16, también se aprecia que los torbellinos del nuevo modelo con $\alpha = +6^\circ$ presentan un nivel de turbulencia menor.

Destaca también como el álabe en la posición 0° del nuevo modelo mantiene adherida la capa límite en todo el perfil y sin embargo el modelo con $\alpha = -6^\circ$ presenta un desprendimiento de la capa límite en su cara exterior.

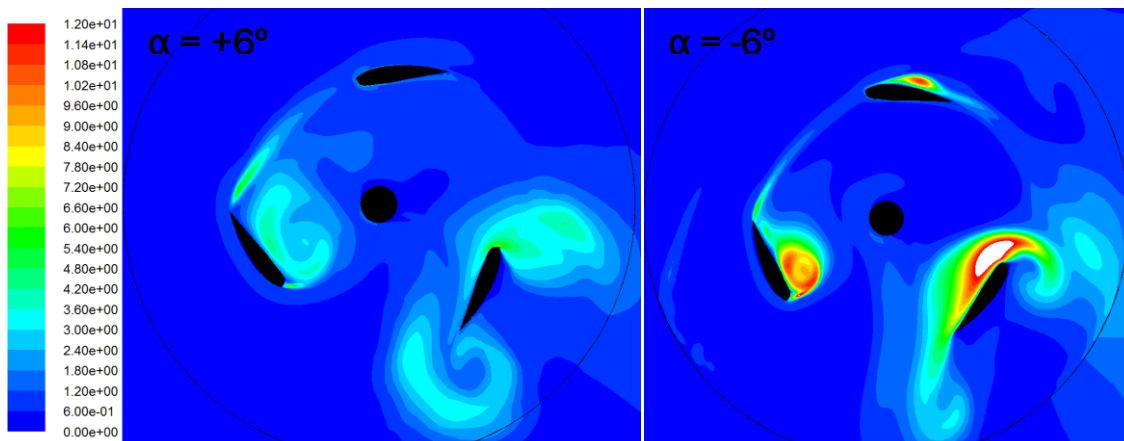


Fig. 4.16: Contornos de energía cinética turbulenta en el rotor para los dos modelos estudiados. Posición desfavorable. Escala: Energía cinética turbulenta k [m^2/s^2].

4.3. Conclusiones sobre la influencia del ángulo de pitch

En los casos estudiados la diferencia de comportamiento de la turbina debida a la variación en el ángulo de pitch ha sido muy significativa. El paso de un ángulo de pitch -6° a $+6^\circ$ ha supuesto que la turbina pase de tener un rendimiento positivo de hasta 23.2% y un rango de funcionamiento de TSRE [0,53, 1,9] a presentar un rendimiento negativo en todo el intervalo de TSRE [0,5, 1,7].

Aunque las diferencias de presión entre las caras de los álabes para las posiciones estudiadas han sido similares en muchos casos, la diferente inclinación de los álabes provoca que las fuerzas aerodinámicas generadas en los mismos produzcan un momento en el eje del rotor muy diferente entre ambos modelos.

Las diferencias presentadas en el comportamiento fluidodinámico del aire que atraviesa la turbina también son significativas. En algunas de las posiciones de los álabes, las caras han invertido su actuación como extradós e intradós. En el modelo con $\alpha = +6^\circ$ se producen desprendimientos de la capa límite en puntos donde en el modelo con $\alpha = -6^\circ$ no se producen, y viceversa.

El flujo incidente sobre los perfiles tiene mayor nivel de energía cinética turbulenta para pitch $+6^\circ$.

Sin embargo, es necesario para un trabajo futuro estudiar cambios de menor magnitud en el ángulo de pitch para comprobar las tendencias que se producen. El cambio de pitch de 12° ha provocado diferencias de comportamiento muy bruscas.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros.

5.1. Conclusiones.

En este Trabajo Fin de Grado se ha desarrollado la construcción y simulación de un modelo 2D de turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con tres perfiles equiespaciados NACA 4518 (asimétricos) y grado de solidez $\sigma = 1,07$. Mediante la Mecánica de Fluidos Computacional y utilizando el software *Fluent Inc. v6.3.26* se ha podido analizar el comportamiento aerodinámico del aerogenerador.

La totalidad del trabajo de computación se ha llevado a cabo con un único ordenador personal por lo que se ha cuidado de que el tiempo de las simulaciones hasta la convergencia de los resultados fuera aceptable. Es por ello que las mallas utilizadas cuentan con alrededor de 80000 celdas, una resolución que permite obtener resultados válidos sin comprometer en exceso el coste computacional.

El movimiento de la turbina ha sido modelado utilizando la característica *moving mesh* en la zona del rotor del modelo, resultando un problema transitorio en el tiempo. Las configuraciones del modelo matemático se han establecido teniendo en cuenta la bibliografía consultada. Se ha utilizado un algoritmo de resolución basado en la presión con un esquema *SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)* para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes. El modelo de turbulencia empleado ha sido el *k- ω SST*. Se ha seleccionado este modelo de turbulencia por los buenos resultados obtenidos por [Lanzafame, 2014], validados experimentalmente y con un modelo de turbina similar a la de este trabajo.

Partiendo de las bases físicas que caracterizan la energía eólica se llega a la primera conclusión básica, relativa a la potencia generada por un aerogenerador. Ésta depende cúbicamente de la velocidad del viento por lo que la información e historial meteorológico es el aspecto más importante a la hora de proyectar y situar una instalación de energía eólica.

De la simulación del modelo con ángulo de pitch -6° se obtienen las siguientes conclusiones:

- ❖ El modelo matemático adoptado y sus configuraciones es capaz de conseguir una rápida convergencia, siendo éste uno de los problemas más importantes en trabajos de simulación con turbinas similares. Utilizando 900 *time steps* y tres vueltas del rotor se consiguen desviaciones de coeficiente de par instantáneo menores al 1% entre la última vuelta simulada y la anterior para un rango de TSR entre 0,65 y 1.
- ❖ El momento generado varía periódicamente presentando posiciones favorables y desfavorables. En el modelo estudiado la posición favorable se presenta cuando uno de los perfiles se sitúa a $\theta = 60^\circ$ y la desfavorable cuando se sitúa a $\theta = 0^\circ$. El motivo por el que existen posiciones favorables y

desfavorables se debe a las diferentes condiciones fluidodinámicas del aire alrededor de los álabes para cada posición. En la posición favorable las distribuciones de presión alrededor de los perfiles generan unas fuerzas aerodinámicas que hacen máximo el momento instantáneo. En la posición desfavorable las condiciones de trabajo de los álabes se ven afectadas negativamente por las estelas de torbellinos generadas por los álabes que los preceden y provocan que las fuerzas aerodinámicas producidas generen un momento instantáneo mínimo en el eje del rotor.

- ❖ Uno de los grandes inconvenientes se presenta en el autoarranque. Los resultados obtenidos en el modelo estudiado muestran que los coeficientes de par y de potencia medios se hacen negativos para bajos valores de TSR.
- ❖ El rendimiento en las condiciones de diseño de la turbina es del 23,2 % y el rango de trabajo abarca un $TSR \in [0,53, 1,9]$.

Las conclusiones del estudio paramétrico que resulta de la variación del ángulo de pitch de -6° a $+6^\circ$ son las siguientes:

- ❖ El paso de un ángulo de pitch -6° a $+6^\circ$ hace cambiar drásticamente el comportamiento del aerogenerador, pasando a trabajar como ventilador, con un coeficiente de potencia negativo, en todo el rango de TSR simulados.
- ❖ La comparación entre el patrón de flujo de ambos modelos muestra que la distribución de presiones a las que están sometidos los álabes de ambos modelos es similar en magnitud. Se llega a la conclusión de que el factor más determinante en este cambio de comportamiento es debido a la variación de dirección en las fuerzas aerodinámicas generadas en los álabes debido a la diferente inclinación de los mismos al cambiar el ángulo de pitch.

5.2. Trabajos futuros.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, las limitaciones y las debilidades se proponen esta serie de trabajos futuros:

- ❖ Realizar un estudio paramétrico con menores diferencias entre los ángulos de pitch a fin de comprobar tendencias.
- ❖ Realizar un modelo físico del aerogenerador para ensayar en túnel de viento a fin de poder comparar y validar los resultados numéricos.
- ❖ Realizar un post-procesado que permita obtener la magnitud y dirección de la fuerza aerodinámica producida en cada perfil y para cada posición.
- ❖ Probar el funcionamiento y los resultados arrojados por el algoritmo de resolución PISO.
- ❖ Realizar un post-procesado que permita caracterizar las pérdidas por disipación turbulenta producidas para así construir el balance neto de energías en el sistema.

Bibliografía.

- ❖ [BIPM, 2006] BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, OFICINA INTERNACIONAL DE PESAS Y MEDIDAS (2006). *El Sistema Internacional de Unidades*. 8ª edición, 2ª edición en español.
- ❖ [Biswas, 2010] BISWAS, A. GUPTA, R (2010). *Computational fluid dynamics analysis of a twisted three-bladed H-Darrieus rotor*. Journal of Renewable and Sustainable Energy 2, 043111, (2010).
- ❖ [Brusca, 2014] BRUSCA, S. LANZAFAME, R. MESSINA, M (2014). *Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance*. Int J Energy Environ Eng 5 (2014), p. 333-340.
- ❖ [Chamoso, 2015] CHAMOSO CASCÓN, E (2015). *Modelado numérico de un aerogenerador tipo H-Darrieus usando perfiles NACA 0015 con ángulo de pitch de menos 6 grados*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid.
- ❖ [Crespo, 2006] CRESPO MARTÍNEZ, A (2006). *Mecánica de Fluidos*. Madrid: Thomson Editores Spain.
- ❖ [Esteban, 2014] ESTEBAN FERNÁNDEZ, M (2014). *Estudio numérico de la influencia de la solidez en aerogeneradores H-Darrieus con perfiles NACA 0025*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Valladolid.
- ❖ [EWEA, 2015] THE EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (2015). *Wind in power 2014 European statistics*.
- ❖ [González, 2014] GONZÁLEZ DIEZ, F (2014). *Análisis CFD de aerogeneradores H-Darrieus*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Valladolid.
- ❖ [GWEC, 2015] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (2015). *Global Wind Statistics 2014*.
- ❖ [Lanzafame, 2013] LANZAFAME, R. MAURO, S. MESSINA, M (2013). *Wind turbine CFD modeling using a correlation-based transitional model*. Renewable Energy 52 (2013), p. 31-39.
- ❖ [Lanzafame, 2014] LANZAFAME, R. MAURO, S. MESSINA, M (2014). *2D CFD Modeling of H-Darrieus Wind Turbines using a Transition Turbulence Model*. Energy Procedia 45 (2014), p. 131-140.
- ❖ [Mathew, 2006] MATHEW, S (2006). *Wind Energy. Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. The Netherlands: Springer Science+Business Media.
- ❖ [McKay, 2005] MCKAY, D. DECOSTE, J. ROBINSON, B. WHITEHEAD, S, STEPHEN, W (2005). *Vertical Axis Wind Turbine*. Design project, Department of Mechanical Engineering, Dalhousie University.

- ❖ [Ramos, 2013] RAMOS SERNA, R (2013). *Desarrollo y explotación de una herramienta CAD para la optimización del diseño de un aerogenerador Darrieus tipo H*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Valladolid.
- ❖ [REE] RED ELECTRICA DE ESPAÑA. *Notas de prensa*.
<<http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2014/12/Avance-informe-sistema-electrico-la-demanda-de-energia-electrica-desciende-un-02-en-el-2014>> [Consulta: 20 de agosto de 2015]
<<http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2014/12/la-demanda-de-energia-electrica-desciende-un-26-en-diciembre>> [Consulta: 20 de agosto de 2015]
<<http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2015/07/la-demanda-de-energia-electrica-aumenta-un-5-4-en-julio>> [Consulta: 20 de agosto de 2015]
- ❖ [Regidor, 2015] REGIDOR SANCHES, M (2015). *Influencia del ángulo de Pitch en una VAWT con perfiles NACA 0015 aplicando modelos de turbulencia para números de Reynolds moderados mediante CFD*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid.
- ❖ [Revilla, 2014] REVILLA DE LOZAR, J (2014). *Análisis CFD bidimensional y tridimensional de turbinas de viento tipo H-Darrieus con perfiles NACA 0025. Metodología para establecer las condiciones operativas*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid.
- ❖ [Salman-2015] M. SALMAN SIDDIQUI, NAVEED DURRANI, IMRAN AKHTAR (2015). *Quantification of the effects of geometric approximations on the performance of a vertical axis wind turbine*. *Renewable Energy* 74 (2015), p. 661-670.
- ❖ [Sánchez, 2004] SÁNCHEZ VÁZQUEZ, J (2004). *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Sevilla.
- ❖ [Vega, 2012] VEGA ANGULO, C (2012). *Elaboración de un modelo basado en CFD para predecir el comportamiento de un Aerogenerador de Eje Vertical*. Trabajo Fin de Master, Universidad de Valladolid.
- ❖ [Xin, 2015] XIN, J. GAOYUAN, Z. KEJUN, G. WENBIN, J (2015). *Darrieus vertical axis wind turbine: Basic research methods*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (2015), p. 212-225.
- ❖ [Young-Tae, 2015] YOUNG-TAE, L. HEE-CHANG, L (2015). *Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine*. *Renewable Energy* 83 (2015), p. 407-415.

Anexo 1.

FLUENT

Version: 2d, pbns, sstkw, unsteady (2d, pressure-based, SST k-omega, unsteady)

Release: 6.3.26

Title:

Models

Model	Settings
Space	2D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	k-omega turbulence model
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones

name	id	type
rotor	2	fluid
ambiente	3	fluid
wall-18	18	wall
wall-17	17	wall
interfase_ar	4	interface
interfase_ra	5	interface
salida	6	pressure-outlet
entrada	7	velocity-inlet

pared_inferior	8	wall
pared_superior	9	wall
perfil_c	10	wall
perfil_b	11	wall
perfil_a	12	wall
eje	13	wall
default-interior	15	interior
default-interior:001	1	interior

Boundary Conditions

rotor	
Value	Condition

Material Name	air
Specify source terms?	no
Source	Terms
((mass) (x-momentum) (y-momentum) (k) (omega))	
Specify fixed values?	no
Fixed	Values
((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (omega (inactive . #f) (constant . 0) (profile)))	
Motion Type	2
X-velocity of Zone (m/s)	0
Y-velocity of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rad/s)	100
X-Origin of Rotation-Axis (m)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (m)	0
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	yes
Porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	0

Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

ambiente

value	Condition	

--		
	Material Name	air
	Specify source terms?	no
	Source Terms	()
	Specify fixed values?	no
	Fixed Values	()
	Motion Type	0
	X-Velocity Of Zone (m/s)	0
	Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
	Rotation speed (rad/s)	0
	X-Origin of Rotation-Axis (m)	0
	Y-Origin of Rotation-Axis (m)	0
	Deactivated Thread	no
	Laminar zone?	no
	Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	yes
	Porous zone?	no
	X-Component of Direction-1 Vector	1
	Y-Component of Direction-1 Vector	0
	Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
	Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	0
	Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	0
	Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
	Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
	Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
	C0 Coefficient for Power-Law	0
	C1 Coefficient for Power-Law	0
	Porosity	1

wall-18

Condition	Value

Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of wall Translation (m/s)	0
Y-Component of wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

wall-17

Condition	Value

Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of wall Translation	1
Y-Component of wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of wall Translation (m/s)	0
Y-Component of wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0

Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

interfase_ar

Condition	Value

interfase_ra

Condition	Value

salida

Condition	Value

Gauge Pressure (pascal)	0
Backflow Direction Specification Method	1
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Y-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Z-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Turbulent Specification Method	0
Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	1
Backflow Specific Dissipation Rate (1/s)	1
Backflow Turbulent Intensity (%)	0.1
Backflow Turbulent Length Scale (m)	1
Backflow Hydraulic Diameter (m)	1
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no
Specify targeted mass flow rate	no
Targeted mass flow (kg/s)	1

entrada

Condition	Value
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude (m/s)	7
X-velocity (m/s)	0
Y-velocity (m/s)	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Y-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Z-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Angular velocity (rad/s)	0
Turbulent Specification Method	3
Turbulent Kinetic Energy (m ² /s ²)	1
Specific Dissipation Rate (1/s)	1
Turbulent Intensity (%)	0.074999996
Turbulent Length Scale (m)	1
Hydraulic Diameter (m)	0.14
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

pared_inferior

Condition	Value
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of wall Translation	1
Y-Component of wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of wall Translation (m/s)	0
Y-Component of wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (m)	0

Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

pared_superior

Condition	value

Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

perfil_c

Condition	value

Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1

Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

perfil_b

Condition	Value

wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

perfil_a

Condition	Value

wall Motion	0

Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

eje

Condition	Value
-----	-----
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

default-interior

Condition	Value

default-interior:001

Condition	Value

Solver Controls

Equations

Equation	Solved

Flow	yes
Turbulence	yes

Numerics

Numeric	Enabled

Absolute Velocity Formulation	yes

Unsteady Calculation Parameters

Time Step (s)	0.00020944
Max. Iterations Per Time Step	20

Relaxation

Variable	Relaxation Factor

Pressure	0.30000001
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.69999999

Turbulent Kinetic Energy	0.80000001
Specific Dissipation Rate	0.80000001
Turbulent Viscosity	1

Linear Solver

Reduction Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Tolerance
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Specific Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7

Pressure-velocity Coupling

Parameter	Value
Type	SIMPLE

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14

Anexo 1.

Minimum Spec. Dissipation Rate 1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio 100000

Material Properties

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)

Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)

Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4