



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Universidad de Valladolid

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

“Estudio de turbinas de eje vertical: Influencia del ángulo de Pitch en perfiles NACA 0020 con agua cómo fluido de trabajo y posible sistema de autoarranque para aerogeneradores mediante perfiles NACA 4518”

Autor:

Fernández Gómez, Mario

Tutor:

Parra-Santos, M^a Teresa

Palomar Trullén, Diego José

**Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Agradecimientos

A mis padres y a todas las personas
que me han ayudado y apoyado durante estos años,
haciendo que esta meta sea posible.

A mis tutores M^a Teresa y Diego,
porque gracias a su ayuda he conseguido
llevar a cabo este trabajo.



Índice

Capítulo 1: Introducción	1
1.1: Justificación	1
1.2: Antecedentes	3
1.3: Objetivos y Estructura	5
1.5: Características	6
1.5.1: Parámetros relativos a la geometría del Perfil	6
1.5.2: Parámetros derivados de la geometría de la Turbina	8
1.5.3: Parámetros Adimensionales	10
Capítulo 2: Estudio Del Perfil NACA4518	13
2.1: Modelo Físico	13
2.2: Modelo Numérico	14
2.3: Interpretación de resultados	16
Capítulo 3: Estudio del perfil NACA 0020	18
3.1: Modelo Físico	18
3.2: Modelo Numérico	19
3.3: Procedimiento Experimental	20
3.4: Análisis del Patrón de Flujo	24
3.4.1: Análisis de Contornos de Presión Estática	24
3.4.2 Análisis de Contornos de Velocidad	30
3.4.3: Análisis de Contornos de Energía Cinética Turbulenta	34
Capítulo 4: Estudio de la Influencia del Ángulo de Pitch -6° y -12° para el Perfil NACA 0020 .	35
4.1: Construcción del Modelo	35
4.1.1: Selección de la Malla	35
4.1.2: Modelo Geométrico y Parámetros Físicos	35
4.2: Procedimiento Experimental	36
4.3: Análisis del Patrón de Flujo	38
4.3.1: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=0^\circ$	38
4.3.2: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=60^\circ$	41
4.3.3: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=120^\circ$	41



Fernández Gómez, Mario

Trabajo de Fin de Grado

Junio, 2016



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Universidad de Valladolid

4.3.4: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=180^\circ$	44
4.3.5: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=240^\circ$	44
4.3.5: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=300^\circ$	47
Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros	48
5.1: Conclusiones	48
5.2: Trabajos Futuros	49
Referencias	50
Anexos.....	52

Capítulo 1: Introducción

1.1: Justificación

Ante el marco socioeconómico actual se hace necesario un mejor aprovechamiento de los recursos y la búsqueda de la sostenibilidad y la eficiencia en la producción de energía, siendo la energía eléctrica la de mayor importancia en la actualidad. Por ello se hace patente la necesidad de desarrollo e investigación en energías renovables, ya que suponen una fuente de energía limpia e inagotable, al contrario que la generación de energía eléctrica mediante combustibles fósiles, que provocan enormes emisiones de gases de efecto invernadero y se basa en recursos agotables; o la producción de energía eléctrica mediante energía nuclear, que genera enormes problemas a la hora del tratamiento y la gestión de los residuos generados.

Este estudio se va a centrar en la energía eólica, marina o fluvial para la generación de energía eléctrica, siendo esta fuente de energía renovable la tercera en importancia en el territorio nacional durante 2015, tras la nuclear y la térmica, a pesar de que no se instaló nueva potencia respecto a años anteriores. El total de la potencia instalada era de 22.988 MW el día 31 de diciembre de 2015, suponiendo un total de energía generada de 47.704 GWh, siendo este valor el correspondiente a un 19,4% del total de la demanda eléctrica durante el último año [AEE, 2015].

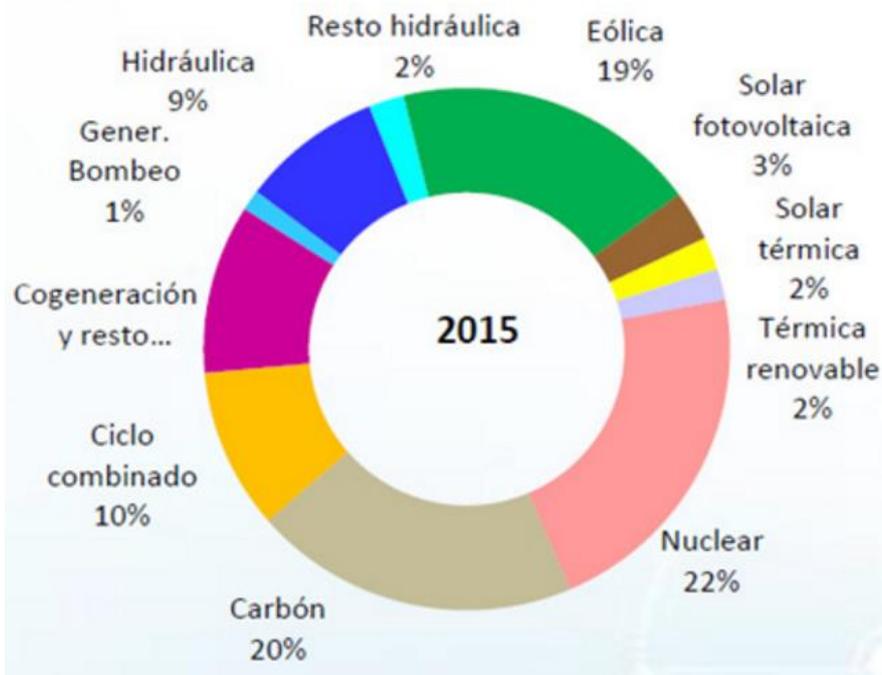


Figura 1.1: Cobertura de la demanda de energía eléctrica en territorio nacional durante el año 2015 [AEE, 2015]

En la actualidad la tendencia de la investigación se basa en las granjas de generadores "offshore", es decir, fuera de la costa, dónde se espera conseguir una potencia de más de 4 MW en los primeros aerogeneradores que se instalen en territorio nacional, lo que superaría a lo obtenido actualmente en las granjas eólicas del interior [TWENERGY, 2015].

Otra vía de investigación, que es en la que se enfoca este estudio, es la generación eléctrica de media potencia y minicentral, siendo éstas enfocadas al consumo doméstico y autoabastecimiento ya que poseen una mayor facilidad de instalación frente a los aerogeneradores convencionales de eje horizontal. Esta fuente de energía posee la ventaja de que no necesita de grandes velocidades del fluido para obtenerse grandes velocidades de giro, lo que hace posible que sea más versátil, siendo también aplicable a corrientes de agua. Otra de las ventajas que hacen interesante este método de generación es que no necesita ser orientado según la dirección del fluido.

El mayor problema de estas turbinas es, junto con el menor rendimiento respecto de las convencionales, los problemas de autoarranque, materia que se tratará en este estudio, en el Capítulo 2. En este apartado cabe exponer la “Ley de Betz”, que expresa que sólo puede extraerse un máximo de un $16/27$ (59,3%) de la energía contenida en una corriente de aire o agua mediante un aerogenerador o turbina hidráulica.

Durante este estudio se van emplear turbinas de eje vertical de tipo H-Darrieus. A continuación, en la Figura 1.2 se representan los diferentes tipos de turbinas según la forma y posición de sus álabes.

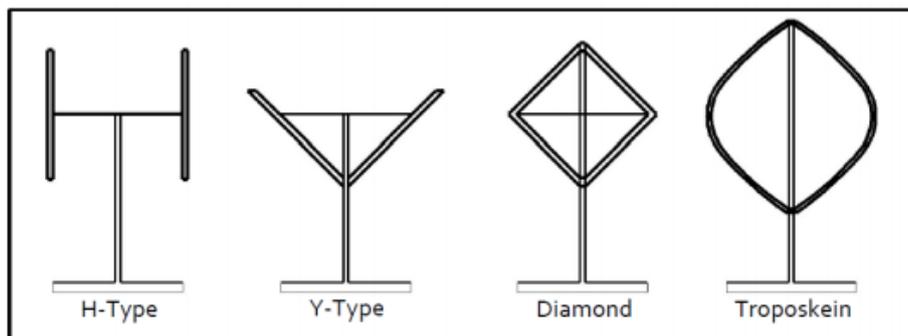


Figura 1.2: Diferentes configuraciones de turbinas Darrieus, según su geometría. [Cáceres, 2014]

Otro tipo de turbina de eje vertical son las tipo Savonius, de las que se recoge un ejemplo a continuación en la Figura 1.3.

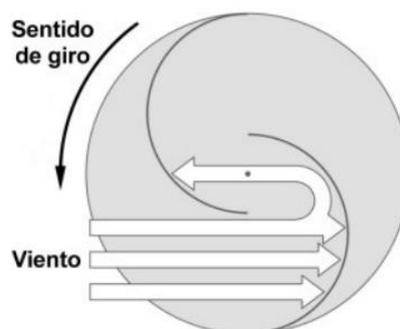


Figura 1.3: Ejemplo de funcionamiento de turbina Savonius. [Franquesa, 2008]



1.2: Antecedentes

Este estudio toma como punto de partida una serie de proyectos y artículos que se incluyen a continuación:

[Lanzafame-2014] realiza un estudio en 2D mediante herramientas CFD de turbinas H-Darrieus con perfiles NACA 4518 y NACA 0015 mediante varios modelos de turbulencia (K- ω y Transition SST) empleando una Intensidad Turbulenta de 0,1%, y una velocidad del aire, en el caso del perfil NACA 4518, de 8 m/s. El objetivo de este estudio era evaluar el rendimiento del rotor y el diseño del soporte del rotor. También se quería comprobar la correcta construcción del modelo, para ello se comparó con estudios experimentales, obteniendo como resultado que el modelo más fiel se obtenía empleando el modelo de turbulencia Transition SST, ya que el K- ω suponía una sobreestimación de los resultados.

[González-2014] realiza un estudio comprobando la influencia de la solidez en perfiles asimétricos NACA 2425 en un aerogenerador a escala, mediante herramientas CFD, obteniendo como resultado que, al disminuir el grado de solidez, el punto de diseño se desplaza hacia la derecha (mayores TSR), aumentando el rango de funcionamiento, aunque el rendimiento disminuye. También incluye un estudio acústico del aerogenerador, con el fin de evaluar el impacto de su implantación en áreas urbanas. El resultado obtenido no fue del todo concluyente ya que se tuvieron problemas en la simulación. Otro apartado que estudia es la influencia de la no simetría sobre los perfiles, de modo que compara un perfil NACA 2425 con otro perfil NACA 0025, obteniendo como resultado que, para valores de solidez cercanos a la unidad, la influencia de la no simetría es prácticamente nula.

[Gupta-2010] estudia mediante herramientas CFD un rotor H-Darrieus de 3 perfiles, estando estos perfiles caracterizados por tener torsión en la parte final del perfil, realizando ese estudio para diferentes velocidades del aire, con el fin de evaluar la influencia del ángulo de ataque comparándose posteriormente con resultados experimentales, obteniendo que los resultados numéricos se adaptaban bastante bien a lo obtenido experimentalmente. El resultado obtenido fue que el autoarranque se producía para una torsión trasera de 30°, para una posición del álabe de 90° o más, y una velocidad del viento de 9 m/s.

[Martínez-2012] analiza mediante herramientas CFD las diferencias de comportamiento entre un perfil NACA 0015 y otro FX63-137 para diferentes ángulos de incidencia con una velocidad del viento de 20 y 18,75 m/s respectivamente. Para el perfil NACA se estudiaron los ángulos de incidencia comprendidos entre 0° y 16°, y para el perfil FX63-137, los ángulos comprendidos entre -8° y 18°, con un paso de 2° en ambos casos. Se empleó un algoritmo de resolución K- ϵ . Se obtuvo que el error cometido en el cálculo del coeficiente de sustentación era menor del 10%.

[Cáceres-2014] realiza como proyecto de fin de carrera un estudio y modelado de una turbina de eje vertical a pequeña escala, con perfiles NACA 0018, sobre la que analiza el patrón de flujo para diferentes valores de TSR a una velocidad del viento de 7 m/s, comparándolos con un perfil alar rectangular, obteniendo como resultado que el perfil alar ofrece un menor rendimiento debido a su geometría poco aerodinámica. Se encontró un hecho a destacar dentro del perfil rectangular, y es que ofrece una mayor estabilidad de coeficiente de momento, al contrario que la turbina compuesta por el perfil NACA, lo que supone la necesidad de una mayor robustez del poste que la sostiene.

[Regidor-2014] realizó como proyecto de fin de carrera un estudio sobre la influencia del ángulo de pitch en una turbina eólica de eje vertical (VAWT) a escala, con perfiles simétricos NACA 0015 mediante herramientas CFD, a través de un modelo de turbulencia K- ϵ Realizable. En uno de los



apartados de su trabajo comparó la influencia del modelo de turbulencia sobre la solución, empleando modelos K-K_L- ω , Transition SST y Re-Stress, obteniendo como resultado que el modelo más fiable a la hora de validar los resultados es el correspondiente al Transition SST. Otro apartado estudia la influencia de los brazos que sostienen los álabes en el modelo, mediante un modelo con brazos, y otro sin ellos, obteniendo que el máximo coeficiente de par es muy similar, pero en el modelo con brazos ocurre a una TSR mayor. En cuanto a la influencia del ángulo de Pitch, estudia los valores de 0°, -6° y -10°, obteniendo una mejora de un 70% para ambos ángulos, así como un mayor rango de funcionamiento. Los resultados obtenidos son para aire como fluido de trabajo, incidiendo sobre los álabes a una velocidad de 7 m/s.

[Parra-2014] realiza un estudio numérico sobre turbinas eólicas de eje vertical comprobando la influencia del tipo de modelo (2D o 3D) sobre una turbina de eje vertical con perfiles NACA 0012; y realiza estudios sobre perfiles NACA 0025, 2425 y 7425 para comprobar la influencia de la simetría o no simetría de los perfiles. La velocidad del viento empleada fue de 7 m/s, y como algoritmo de resolución empleo el SIMPLE y en esquema de resolución exponencial, empleando un modelo de turbulencia K- ϵ realizable. Comprobó que existe una notoria variabilidad en los resultados cuando se trabaja con modelos 2D o 3D. En cuanto al estudio sobre la no simetría, obtuvo como resultado que se obtenían peores resultados con perfiles no simétricos que con simétricos, pero los no simétricos ofrecían un mejor comportamiento ante el autoarranque.

[Esteban-2014] realizó un estudio numérico mediante herramientas CFD en el cual comprobó la influencia de la solidez en turbinas eólicas de eje vertical, con perfiles NACA 0025, y una velocidad del viento de 7 m/s, empleando un modelo de turbulencia K- ϵ Realizable, con una intensidad turbulenta del 10%, y un diámetro hidráulico de 0,1432 m. También incluye un estudio acústico para comprobar su influencia sonora a la hora de ser instalado en zonas urbanas, obteniendo que los resultados de ruido son excesivamente altos a la hora de ser percibidos por el oído humano, aunque los resultados obtenidos no fueron del todo concluyentes. En cuanto al estudio de la influencia del grado de solidez, emplea los valores de solidez de 1,047; 0,5 y 0,3, obteniendo que, al reducirse la solidez, el rango de funcionamiento aumenta, aunque el rendimiento se ve disminuido.

[Gómez-2015] estudió la influencia del ángulo de Pitch en aerogeneradores a escala, compuestos por perfiles NACA 4518 mediante herramientas CFD. Emplea una velocidad de 7m/s y un modelo de turbulencia K- ϵ Realizable con una intensidad turbulenta de 7 % y un diámetro hidráulico de 0,14 m. Compara los ángulos de pitch -6° y 6°, obteniendo que para el ángulo de pitch positivo se obtiene un rendimiento de hasta un 23,2 % en un rango de operación de TSR comprendido entre 0,53 y 1,9; y para el negativo se obtiene un rendimiento negativo en todo su rango de operación.

[Bianchini-2015] estudia la optimización, mediante herramientas CFD del ángulo de Pitch para turbinas eólicas Darrieus, mediante un modelo de turbulencia K- ω SST, con una velocidad del viento de 8 m/s. Los resultados obtenidos son que el ángulo de pitch positivo es ventajoso aplicado a bajas velocidades de viento y solideces medias-altas. A altas velocidades del viento, la influencia del ángulo de pitch es prácticamente nula.

[Mohamed-2015] realiza estudios para turbinas Darrieus a bajas velocidades de viento, 5 m/s, sobre las que ensaya perfiles S1046, comparándolo con un gran número de perfiles, de diferentes denominaciones (DU, FFA, LS, NACA, S, FX, A-Airfoil), estudiando la influencia de la forma en perfiles tipo NACA 63-XXX, NACA 0015 y LS(1)-0413 y estudiando numerosos ángulos de pitch para perfiles LS(1)-0413. El modelo de turbulencia empleado es el K- ϵ Realizable, comparándolo con los resultados obtenidos mediante un modelo K- ω SST, seleccionando



finalmente este último como modelo de turbulencia, ya que supone un mejor tratamiento en las zonas cercanas a la pared. El resultado obtenido en cuanto a los ángulos de Pitch negativos se refiere, es que, para algunos de Pitch negativos, se reduce tanto el rango de funcionamiento como el rendimiento obtenido.

[El-Samanoudy-2010] realiza modelos a escala de turbinas eólicas de eje vertical para perfiles NACA 0024, 4420 y 4520, estudiando la influencia del ángulo de Pitch, el número de perfiles que componen el aerogenerador y el grado de solidez del mismo. Para la realización del estudio se empleó una velocidad del viento de 8 m/s. El resultado obtenido relativo al ángulo de pitch es que el óptimo es el de 10°, decreciendo los rendimientos al aumentar o disminuir este valor, cumpliéndose esta tendencia para las diferentes formas de los perfiles. En el estudio relativo al número de perfiles, se concluyó que el máximo rendimiento se obtiene con 4 perfiles, con dos se tiene una gran caída de rendimiento, mientras que con 3, la caída de rendimiento es bastante pequeña. En cuanto al estudio de la solidez, obtuvo que al reducir el radio (aumentar la solidez) se reduce tanto el rendimiento como el rango de operación. En cuanto a la influencia de la simetría se obtuvo mejor rendimiento para perfiles NACA 0024 frente a los no simétricos, mientras que entre el NACA 4420 y el NACA 4520 no hay apenas diferencia.

[SANDIA-2014] realiza un modelo a escala real mediante perfiles NACA 0020, con el que se va a trabajar, ya que incluye resultados experimentales de la curva C_p -TSR. Trabaja con una velocidad del fluido (agua) de 1 m/s. Obtiene como resultado que el coeficiente de arrastre aumenta monótonamente conforme aumenta la TSR. Al calcular la curva característica obtiene que el máximo rendimiento se da a una TSR de 1,7 aproximadamente, y toma un valor de algo más que un 25%.

1.3: Objetivos y Estructura

Este estudio se divide en dos partes. Por un lado, se va a estudiar un modelo de un aerogenerador a tamaño real, compuesto por perfiles NACA 4518 (Capítulo 2), y por otro lado se va a estudiar la influencia del ángulo de Pitch sobre una turbina hidráulica a tamaño real compuesta por perfiles NACA 0020 (Capítulos 3 y 4). Ambos estudios se realizarán numéricamente mediante la herramienta de CFD Fluent v.6.3.26 desarrollado por Ansys.

En el Capítulo 1 se va a realizar una introducción teórica del estudio en cuestión a fin de facilitar la comprensión de los estudios, ya que contienen abundantes conceptos que han de ser previamente definidos y comentados, así como una pequeña introducción con el fin de situar al lector en el contexto de las turbinas de eje vertical con el fin de hacer más interesante y ameno la lectura del estudio en cuestión.

Los objetivos conjuntos de ambos estudios son:

- Generación de un modelo numérico adecuado con el fin de conseguir rigor y exactitud en la obtención de los resultados, prestando especial atención a la convergencia, y sin descuidar el tamaño de la malla empleada, ya que se podría incurrir en un elevado coste computacional que no representaría ninguna ventaja a la hora de tratar los resultados y ralentizaría el proceso de obtención de resultados, por lo que se ha de conseguir un compromiso aceptable entre coste computacional y exactitud de resultados.
- Una vez se tenga el modelo adecuado se capturará la curva característica de cada una de las turbinas con el fin de obtener el rango de funcionamiento y su comportamiento.

Los objetivos correspondientes al modelo construido mediante los perfiles NACA 0020 son:

- Estudio del patrón de flujo obtenido, con el fin de entender el ciclo completo de funcionamiento en el punto de diseño de la turbina (Capítulo 3).
- Estudio de la influencia de los ángulos de Pitch de -6° y -12° para la turbina estudiada en el Capítulo 3. Para ello se estudiará el patrón de flujo obtenido en cada una de las 3 situaciones, viendo de este modo las diferencias en el comportamiento del fluido para entender las diferencias de comportamiento en cada una de las tres situaciones (Capítulo 4).

Finalmente habrá un último capítulo que se destinará a conclusiones y futuros estudios que se podrán realizar a partir de este, con el fin de seguir investigando y mejorando esta tecnología.

1.5: Características

Con el fin de facilitar la comprensión de este estudio a continuación se van a definir los parámetros físicos y geométricos que se han empleado. Se van a dividir en tres grupos, que serán: parámetros relativos a la geometría del perfil, parámetros derivados de la geometría de la turbina, y parámetros adimensionales.

1.5.1: Parámetros relativos a la geometría del Perfil

En este apartado se va a explicar la geometría correspondiente al perfil aerodinámico. La Figura 1.4 representa esta serie de parámetros.

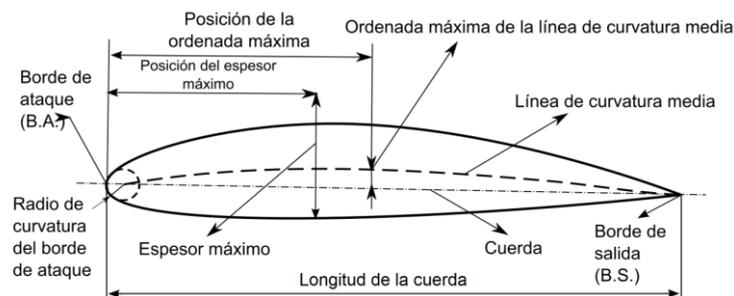


Figura 1.4: Geometría de un perfil aerodinámico. [Wikipedia]

- **Borde de ataque:** Zona del perfil aerodinámico sobre la que incide el fluido.
- **Borde de salida:** Zona trasera del perfil. Es la zona por la que el fluido abandona el álabe.
- **Cuerda (c):** Longitud de la línea recta que une los bordes de ataque y salida del perfil. Esta longitud define las características del perfil.
- **Línea de curvatura media o línea media:** Línea que equidista de las dos caras del perfil a lo largo de la cuerda. En caso de ser un perfil simétrico esta coincidirá con la cuerda.



- **Ordenada máxima:** Cota máxima de distancia entre la cuerda y la línea media del perfil. Se mide perpendicularmente a la cuerda.
- **Posición de ordenada máxima:** Distancia longitudinal entre el borde de ataque y la posición de ordenada máxima del perfil.
- **Espesor máximo:** Zona del perfil donde se produce la mayor separación entre la cara superior e inferior del perfil
- **Posición de máximo espesor:** Distancia longitudinal entre el borde de ataque y la posición de espesor máximo del perfil.

Una vez se ha definido la geometría del perfil, se va a proceder a explicar e identificar los perfiles NACA según su nomenclatura:

- La primera cifra representa el tamaño de la ordenada máxima, expresado según el porcentaje de longitud de la cuerda que supone.
- La segunda cifra representa, en décimas, la posición de la ordenada máxima respecto de la longitud total de la cuerda
- Las dos últimas cifras representan como tanto por ciento el espesor máximo del perfil, según la longitud total de la cuerda.

En el caso del estudio se va a trabajar con dos perfiles diferentes, un NACA 0020 y un NACA 4518, siendo sus características:

- **NACA 0020:**
 - Perfil simétrico, ya que sus dos primeros dígitos son cero, por lo que se entiende que la ordenada máxima es nula, y por tanto, la línea media coincide con la cuerda.
 - El espesor máximo corresponde a un 20% de la longitud de la cuerda.
- **NACA 4518:**
 - Perfil asimétrico, en el que el valor de la ordenada máxima es un 4% de la longitud de la cuerda, y esta se produce a un 50% de la longitud de la misma.
 - El espesor máximo corresponde a un 18% de la longitud de la cuerda.

Otros parámetros relativos al álabe, aunque son dependientes de la dirección de incidencia del fluido sobre él, son el intradós y el extradós, según sean zonas de máxima presión, y por tanto mínima velocidad, o viceversa.

- **Extradós:** Zona de menor presión, y, por tanto, mayor velocidad.
- **Intradós:** Zona de mayor presión, y, por tanto, menor velocidad.

La figura 1.5 recoge una representación de esta situación, con el fin de aportar mayor claridad a la explicación.



Figura 1.5: Representación del Intradós y el Extradós de un perfil aerodinámico [DPACOLOMBIA]

1.5.2: Parámetros derivados de la geometría de la Turbina

A continuación, se va a definir el origen de ángulos, con el fin de aportar mayor claridad posteriormente a la explicación del patrón de flujo, ya que se hace referencia constantemente a la posición angular de los perfiles. El sistema de referencia de ángulos se representa en la Figura 1.6.

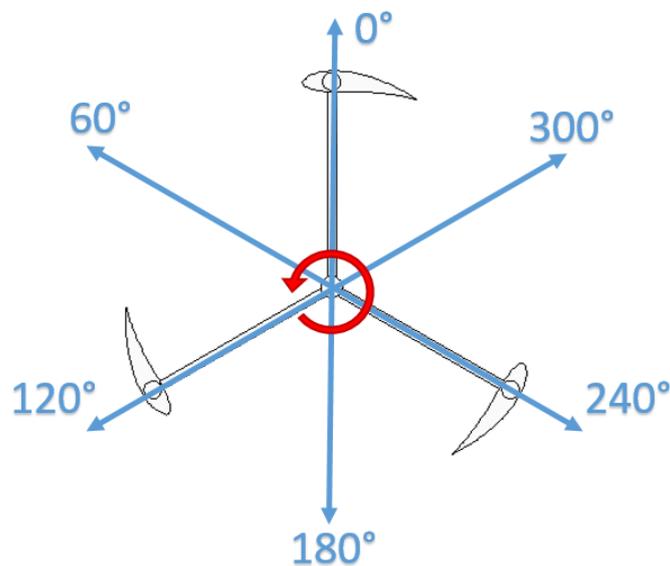


Figura 1.6: Origen de ángulos

El resto de parámetros derivados de la geometría de la turbina se definen a continuación:

Universidad de Valladolid

- **Radio de giro (r):** Distancia definida entre la trayectoria de los perfiles y el centro del rotor.
- **Número de álabes (Z):** Número de perfiles que componen la turbina. En el modelo, al igual que en la Figura 1.4 es 3.
- **Envergadura del perfil (b):** Longitud del perfil en la dirección Z del rotor.
- **Área (A):** Proyección sobre el plano XY del cilindro tangente al rodete. Se define según la ecuación 1.1.

$$A = 2 \cdot r \cdot b \quad (1.1)$$

- **Grado de Solidez (σ):** Se define como la densidad de perfiles en el interior del área de la turbina, es decir el tanto por uno de área ocupada por perfiles. Viene definido por la ecuación 1.2:

$$\sigma = \frac{z \cdot c \cdot b}{2 \cdot r \cdot b} \quad (1.2)$$

siendo c la longitud de la cuerda del perfil.

- **Diámetro Hidráulico (D_h):** Diámetro del círculo que circunscribe la turbina. Este parámetro se empleará a la hora de definir el modelo de turbulencia.
- **Ángulo de Pitch:** Ángulo comprendido entre la dirección de la cuerda y la dirección de incidencia del flujo en la posición del álabe correspondiente a 0° . La Figura 1.7 muestra un ángulo de Pitch negativo, siendo precisamente esta circunstancia la que se estudiará durante el Capítulo 2 (Influencia del ángulo de Pitch -6° y -12° para perfiles NACA 0020).

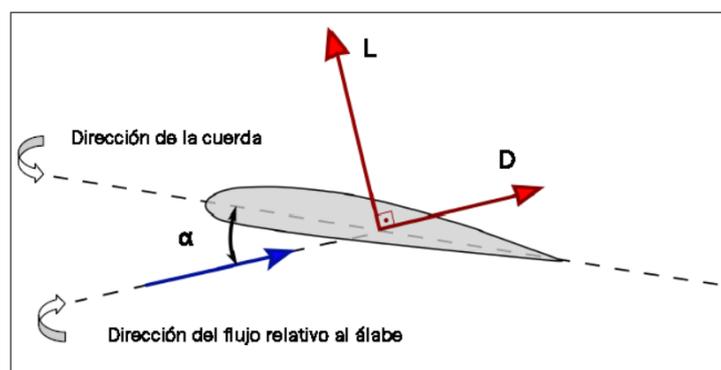


Figura 1.7: Representación del ángulo de pitch para la posición del álabe de 0° .

En la Figura 1.7 también se representan los vectores correspondientes a las fuerzas de arrastre (D) y sustentación (L), que se definirán a continuación, y así se enlazarán con el apartado correspondiente a parámetros adimensionales, ya que la mayoría se derivan de estas fuerzas.

La **Fuerza de Sustentación (L o F_L)** viene definida según la ecuación 1.3

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (1.3)$$

Y es la fuerza que se produce perpendicularmente a la dirección de incidencia del flujo. Esta es la fuerza que hace que las turbinas de eje vertical giren.

La **Fuerza de Arrastre (D o F_D)** viene definida según la ecuación 1.4

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (1.4)$$

Y es la fuerza que se produce longitudinalmente, según la dirección de incidencia del fluido sobre el perfil, y es la responsable de la resistencia al avance que ejerce la corriente de aire sobre el álabes.

A continuación, se definirán los parámetros adimensionales C_L y C_D , correspondientes a los coeficientes de sustentación y arrastre respectivamente, así como otros parámetros adimensionales empleados durante el estudio.

1.5.3: Parámetros Adimensionales

Los parámetros adimensionales correspondientes a los coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) se pueden calcular tanto numéricamente como experimentalmente, y suelen estar recogidos en tablas del tipo que recogen las Figuras 1.8 y 1.9:

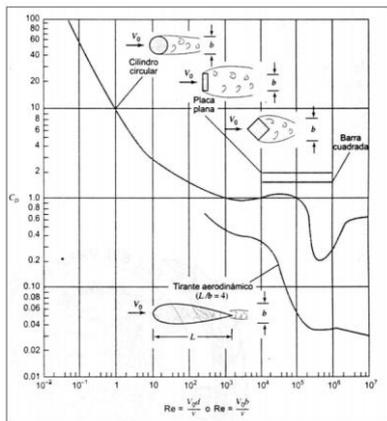


Figura 1.8: Tabla de Valores del coeficiente de arrastre C_D

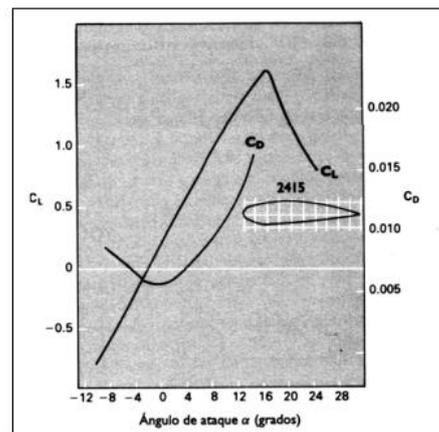


Figura 1.9: Tabla de valores para el coeficiente de arrastre C_D y sustentación C_L según el ángulo de ataque del fluido para un perfil NACA 2415

Cómo se puede apreciar en la Figura 1.9, los coeficientes de arrastre y sustentación variarán en función del ángulo de incidencia del fluido, debiendo tener en cuenta que en este estudio el ángulo de incidencia variará en función de la posición angular en cada instante de tiempo, por ello se hace necesario el estudio de diferentes inclinaciones (ángulos de Pitch) de los perfiles, con el fin de encontrar posibles mejoras de funcionamiento, situación que se tratará en el Capítulo 3.

Los dos parámetros adimensionales más importantes con los que se ha trabajado en este estudio son el coeficiente de momento, y el coeficiente de potencia, ya que dan información sobre el rendimiento de la turbina.

El coeficiente de potencia será el que se representará en las curvas características de la turbina, frente a la TSR "Tip Speed Ratio", parámetro adimensional que se definirá seguidamente.

El **coeficiente de potencia C_p** da información sobre la relación entre la potencia desarrollada por la turbina (P_t) en determinadas condiciones de funcionamiento, frente a la potencia teórica disponible en dichas condiciones en una corriente de aire, es decir, expresa el rendimiento de la turbina. Viene definido por la Ecuación 1.5.

$$C_p = \frac{2 \cdot P_t}{\rho \cdot A \cdot v^3} \quad (1.5)$$

La **potencia teórica disponible** viene definida por la ecuación 1.6.

$$P_{Disponible} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1.6)$$

Estando a su vez relacionado con la **energía cinética disponible** en una corriente de aire correspondiente a un periodo de tiempo, como se ve en la ecuación 1.7.

$$E_{Cinética Disponible} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (1.7)$$

La Figura 1.10 representa los parámetros recogidos en las ecuaciones 1.6 y 1.7.

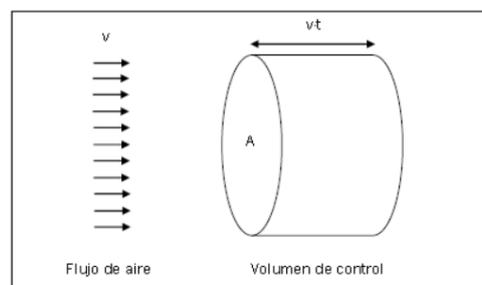


Figura 1.10: Representación esquemática para la deducción de la energía cinética y la potencia de una masa de viento [Gómez, 2015]



El otro parámetro adimensional con el que se ha trabajado en el **coeficiente de momento C_m** , siendo este el resultado obtenido de simular el modelo en el software Fluent. Este coeficiente tiene el mismo significado que el de potencia, pero en este caso está referenciado al momento producido respecto del eje del generador. Viene definido por la Ecuación 1.8

$$C_m = \frac{2 \cdot M_t}{\rho \cdot A \cdot v^2 \cdot r} \quad (1.8)$$

El parámetro que se va a definir a continuación es el anteriormente mencionado “*Tip Speed Ratio*” o TSR que relaciona la velocidad del fluido con la velocidad de rotación de la turbina, definiéndose este como la relación entre la máxima velocidad lineal del perfil entre la velocidad del fluido. Su expresión se recoge en la Ecuación 1.9.

$$TSR = \frac{\omega \cdot r}{v} \quad (1.9)$$

El “*Tip Speed Ratio*” también es un parámetro que relaciona el coeficiente de potencia con el coeficiente de momento a través de la Ecuación 1.10

$$TSR = \frac{C_p}{C_m} \quad (1.10)$$

El último parámetro adimensional que se ha empleado ha sido el Número de Reynolds, siendo meramente a título informativo con el fin de comprobar el orden de magnitud que alcanzaba, utilizándose un Reynolds máximo (Ecuación 1.11), uno mínimo (Ecuación 1.12), y uno medio (Ecuación 1.13).

$$Re_{M\acute{a}x} = \frac{2 \cdot r \cdot \rho \cdot (v + \omega \cdot r)}{\mu} \quad (1.11)$$

$$Re_{M\acute{i}n} = \frac{2 \cdot r \cdot \rho \cdot (v - \omega \cdot r)}{\mu} \quad (1.12)$$

$$Re_{Med} = \frac{2 \cdot r \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad (1.13)$$

Capítulo 2: Estudio Del Perfil NACA4518

2.1: Modelo Físico

En esta etapa del estudio se ha procedido a estudiar un perfil NACA4518 (asimétrico). La forma de dicho perfil se presenta a continuación (Figura 2.1), siendo las coordenadas de los puntos representados las que se adjuntan en la Tabla 2.1.

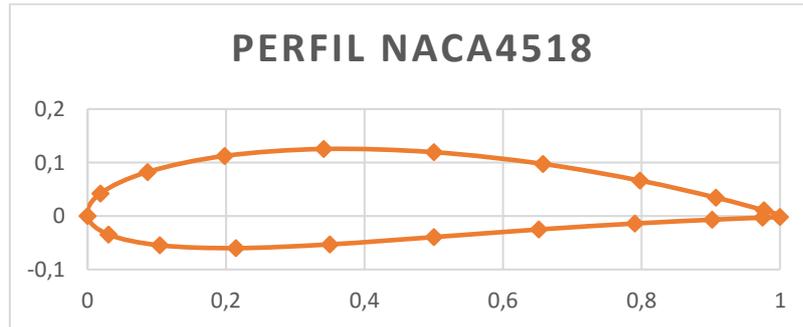


Figura 2.1: Geometría del perfil asimétrico NACA4518

TABLA 2.1: Coordenadas de los puntos del perfil NACA 4518

Perfil NACA4518	
X	Y
1,000299	0,001866
0,976576	0,010704
0,907188	0,034518
0,797671	0,066361
0,657539	0,097482
0,5	0,11941
0,341079	0,125433
0,198002	0,112371
0,086624	0,082322
0,018629	0,042218
0	0
0,030315	-0,03458
0,104359	-0,05468
0,214213	-0,06001
0,349904	-0,05307
0,5	-0,03941
0,651478	-0,02512
0,790114	-0,014
0,901829	-0,00688
0,974481	-0,00306
0,999701	-0,00187

Los parámetros geométricos del aerogenerador que se va a estudiar se recogen a continuación en la Tabla 2.2.

TABLA 2.2: *Parámetros geométricos del aerogenerador.*

Parámetros Geométricos Estudio NACA4518	Álabes	3
	Radio (m)	0,3
	Cuerda (m)	0,1
	Envergadura (m)	0,7
	Área (m ²)	0,21
	Solidez	0,5

2.2: Modelo Numérico

A continuación, se adjunta una imagen (Figura 2.2) del sistema resultante con el que se trabajará en Fluent.

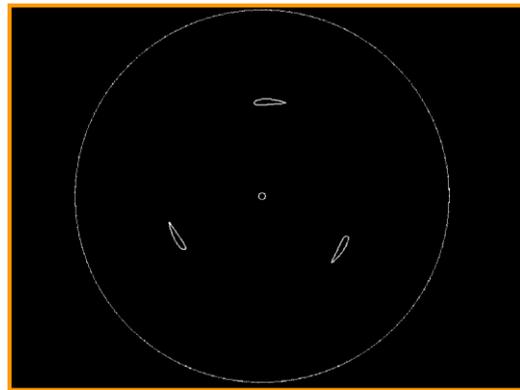


Figura 2.2: *Modelo Implementado para Fluent*

Para la realización de este estudio se han empleado dos mallas diferentes. Una primera con unas 50.000 celdas aproximadamente (Figura 2.3); y otra de unas 164.000 celdas (Figuras 2.4). Sobre ambas se realizaron refinados sobre los contornos de los álabes (Figura 2.5 y 2.6), estudiando de este modo la influencia de número de celdas sobre el C_p obtenido en cada caso, así como del $Wall Y^+$.

Los parámetros físicos correspondientes al fluido de trabajo (Aire) para este modelo son los que se recogen en la Tabla 2.3.

TABLA 2.3: *Parámetros físicos del modelo*

Parámetros Físicos Estudio NACA4518	V. Viento (m/s)	7
	Densidad (20º) (Kg/m ³)	1,21
	Viscosidad (20º) ($\mu Pa \cdot s$)	$1,79 \cdot 10^{-5}$
	Reynolds (Medio)	$2,85 \cdot 10^5$

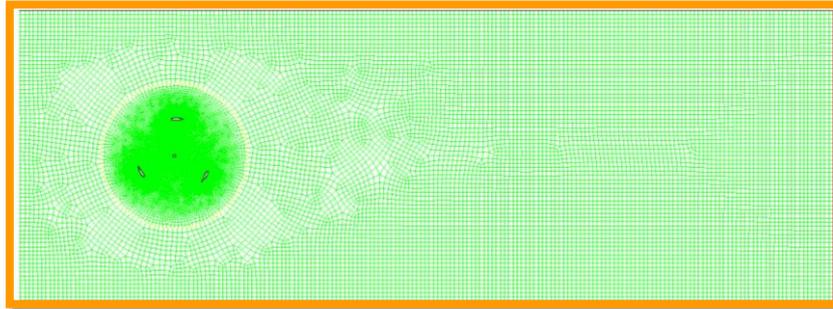


Figura 2.3: Malla de 50.000 celdas

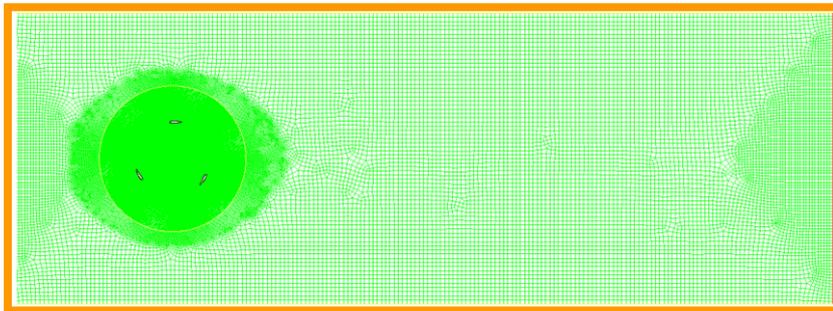


Figura 2.4: Malla de 164.000 celdas

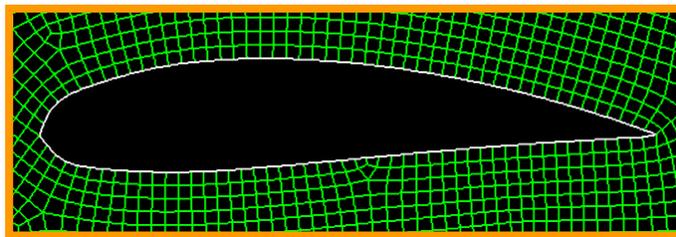


Figura 2.5: Aspecto de la malla alrededor del perfil previo al refinado por contornos

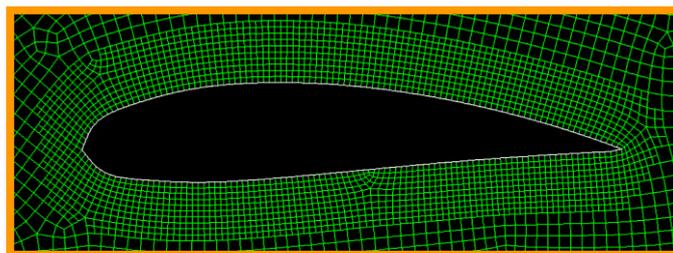


Figura 2.6: Aspecto de la malla alrededor del perfil tras el refinado por contornos.

2.3: Interpretación de resultados

Para la primera malla se capturó la curva de TSR-Cp, es decir, la curva característica de aerogenerador, y posteriormente se comparó con la que se obtuvo al realizar un primer refinado (R-1) sobre el mallado inicial, obteniéndose que para muy bajas TSR (TSR=0) el aerogenerador funcionaba, lo que es una gran ventaja, debido a que este tipo de dispositivos suelen tener problemas de autoarranque (Figura 2.7). Esta figura 2.7 también incluye dos líneas (Poly. (Cp) y Poly. (Cp-R-1)) que representan una aproximación a los resultados experimentales mediante polinomios de grado 2.

Otro detalle a tener en cuenta sobre este estudio es que, aunque lo habitual en este tipo de ensayos es que la solución no converja ante bajas TSR, en este caso, a pesar de presentar oscilaciones numéricas, los resultados obtenidos presentan un aspecto de gráfica sinusoidal (Figura 2.8).

Una vez se capturaron ambas curvas se procedió a trabajar con un mallado más potente, ya que en el mallado inicial, al refinar, habían mejorado los resultados; lo que invitaba a pensar que con la nueva malla continuaría esa tendencia.

En un primer ensayo así fue, pero al realizar sucesivos refinados el rendimiento comenzó a caer enormemente, por lo que este modelo no se tendrá en cuenta como posible generador de energía, si no como posible dispositivo de autoarranque para un elemento de mayores prestaciones.

A continuación, se adjuntan las gráficas correspondientes al Cp frente al número de celdas (Figura 2.9), para las diferentes mallas con las que se ha trabajado

Decir que los valores de TSR empleados para las comparaciones son los correspondientes al máximo de la curva característica del aerogenerador, es decir TSR=0,3.

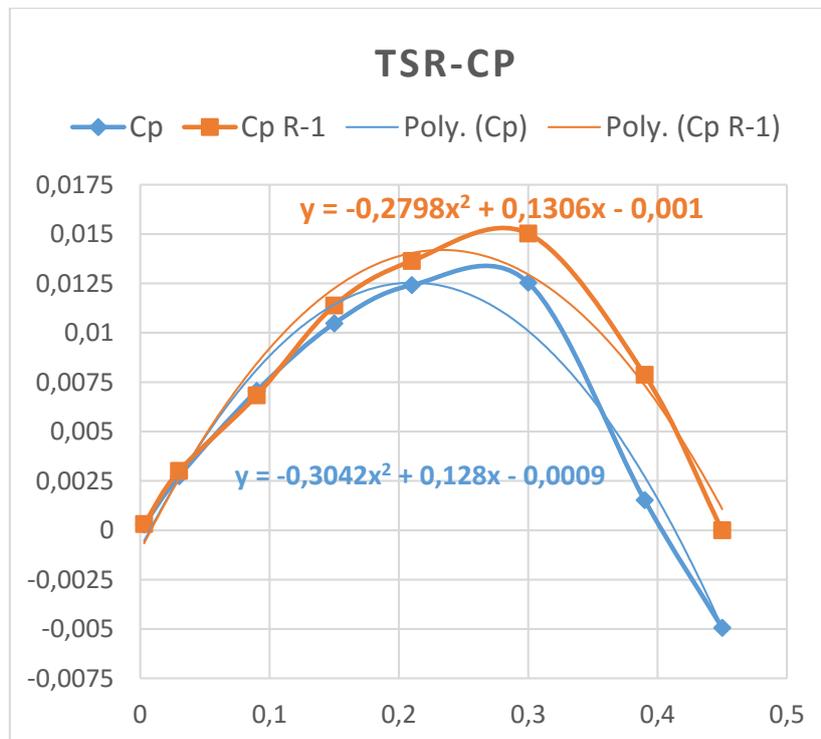


Figura 2.7: Curvas características para el mallado inicial y para el primer refinado (R-1)

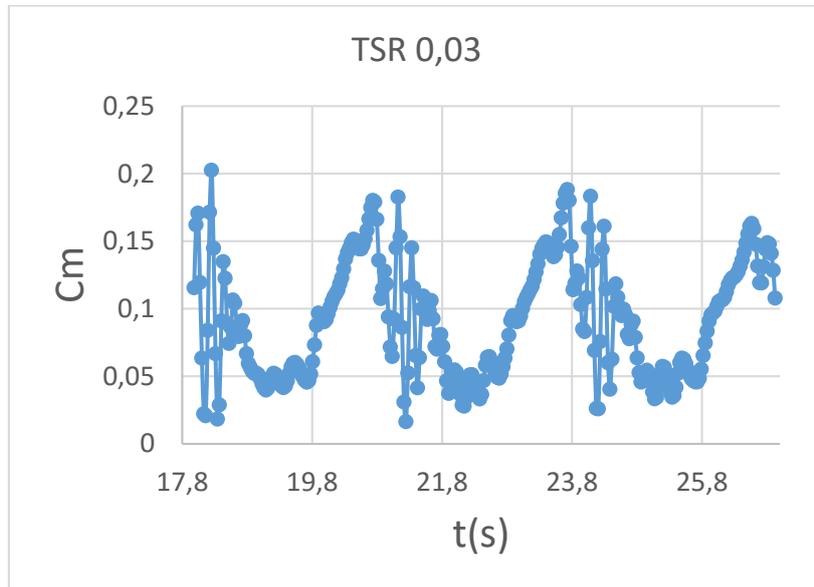


Figura 2.8: Convergencia de resultados a bajas TSR (0,03).

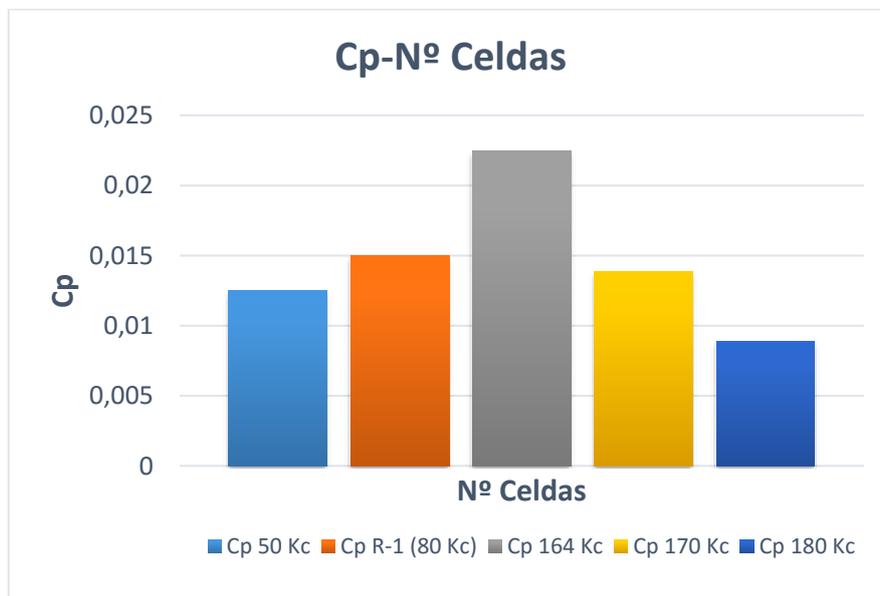


Figura 2.9: Influencia del número de celdas sobre al Cp para ambas mallas.

Capítulo 3: Estudio del perfil NACA 0020

3.1: Modelo Físico

Es este capítulo se va a realizar el estudio de una turbina hidráulica de eje vertical. El perfil utilizado en este ensayo será un perfil simétrico NACA0020 (Figura 3.1). Para la realización de este estudio se va a partir de una malla, generada mediante GAMBIT, de 139.020 celdas.

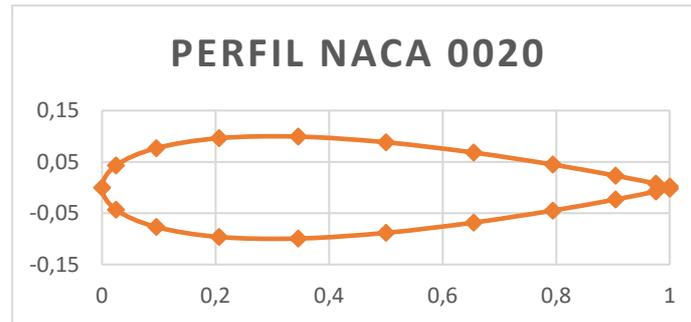


Figura 3.1: Geometría del perfil simétrico NACA0020

Las coordenadas correspondientes a los puntos representados en la Figura 3.1 se recogen a continuación en la Tabla 3.1. Son las coordenadas estandarizadas para un perfil de 1 metro de cuerda. El modelo final será escalado al tamaño de la turbina a estudiar.

TABLA 3.1: Coordenadas del perfil NACA 0020

Perfil NACA 0020	
x	y
1	0,0021
0,975528	0,007737
0,904509	0,023191
0,793893	0,044842
0,654509	0,068196
0,5	0,088234
0,345492	0,099291
0,206107	0,09619
0,095492	0,076748
0,024472	0,043156
0	0
0,024472	-0,04316
0,095492	-0,07675
0,206107	-0,09619
0,345492	-0,09929
0,5	-0,08823
0,654509	-0,0682
0,793893	-0,04484
0,904509	-0,02319
0,975528	-0,00774
1	-0,0021

Los parámetros geométricos de esta turbina son los que se presentan en la Tabla 3.2. Estos parámetros serán los utilizados a la hora de introducir los “*Reference Values*” en Fluent.

TABLA 3.2: *Parámetros Geométricos de la Turbina:*

Parámetros Geométricos	Álabes	3
	Radio (m)	0,5
	Cuerda (m)	0,136135682
	Envergadura (m)	1
	Área (m ²)	0,408407045
	Solidez	0,408407

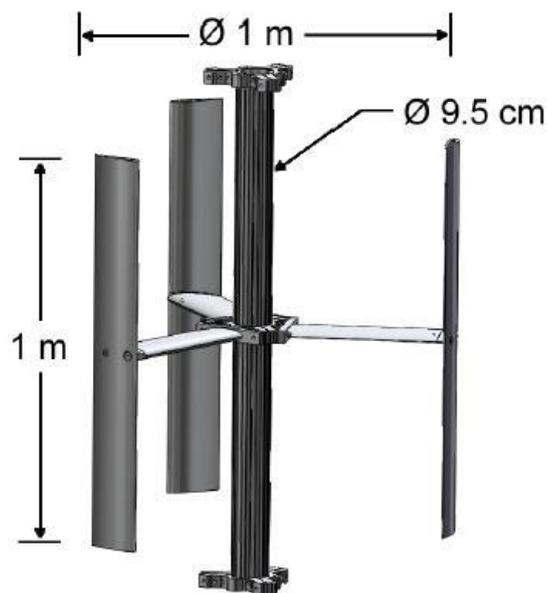


Figura 3.2: *Modelo de la turbina ensayada. [SANDIA, 2014]*

3.2: Modelo Numérico

A la hora de realizar el modelo en Fluent, una vez se ha leído la malla y se han definido las “*interfaces*”, se eligió el agua como fluido de trabajo (cargado directamente desde la biblioteca de Fluent). El siguiente paso fue cambiar las “*Boundary Conditions*” (*Condiciones de Contorno*), de modo que en las zonas en las que había fluido se definió como agua (Zona Ambiente y Zona Rotor). En este apartado también se introdujo la velocidad del fluido (Entrada: Velocidad 1 m/s; Intensidad turbulenta 10% y Diámetro Hidráulico 0,1m).

Para introducir el valor de presión de operación (“*Operating Pressure*”) se introdujo la presión absoluta correspondiente a 1 metro de profundidad en el apartado “*Operating Conditions*”, siendo el valor 111.125 Pa, en $x=8\text{ m}$, es decir, próxima a la salida del dominio computacional (punto más alejado del rotor).

Los parámetros físicos correspondientes al modelo con el que se ha trabajado se recogen en la siguiente tabla (Tabla 3.3):

TABLA 3.3: Parámetros físicos del modelo.

Parámetros Físicos	V. Agua (m/s)	1
	Densidad (Kg/m ³)	1000
	Viscosidad (μPa·s)	$1,10 \cdot 10^{-3}$
	Reynolds (Medio)	$9,07 \cdot 10^5$
	Intensidad Turbulenta (%)	10
	Diámetro Hidráulico (m)	0,1

3.3: Procedimiento Experimental

Para la obtención de los resultados se emplearon 300 pasos de tiempo o “Time Steps” por vuelta, simulando 1.200 Time Steps hasta conseguir una solución suficientemente fiable, es decir, que el aspecto de la gráfica de salida del Coeficiente de Par (Cm) sea periódico, como se puede apreciar en la Figura 3.3.

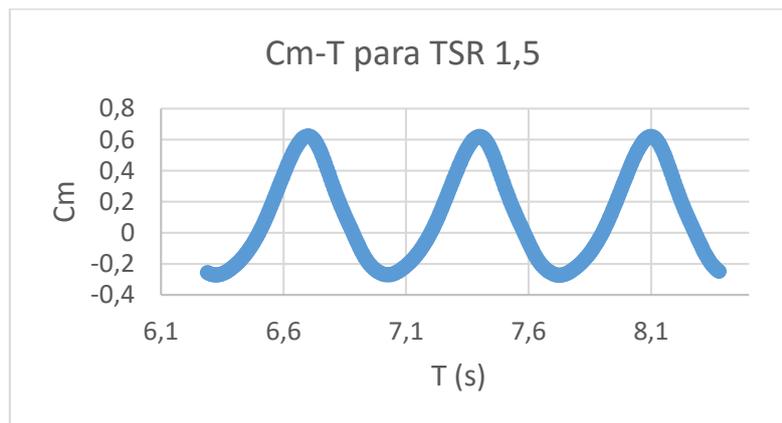


Figura 3.3: Ejemplo de Convergencia de Solución (Gráfica Periódica en 4ª Vuelta)

La ecuación que se ha empleado para calcular el ΔT con el que se ha trabajado, dependiendo de los “Time Steps” empleados es la 2.1:

$$\Delta T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega \cdot N. de Time Steps} \quad 2.1$$

Siendo la velocidad de giro (ω) la calculada según la Ecuación 2.2:

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{V_{\infty}} \quad 2.2$$

Se realizaron sucesivos refinados, a fin de observar la influencia sobre los resultados obtenidos. Las simulaciones se comenzaron a realizar para una TSR de 2, ya que se disponía de la curva experimental de esta turbina [SANDIA, 2014].

Los refinados siempre se realizaron por contornos, al igual que en el Capítulo 2, con el fin de mejorar el tratamiento en la pared del fluido (reducir los y^+), de modo que se realizó un primer refinado en las 7 primeras celdas de alrededor del álabe, obteniendo de este modo una malla de 157.290 celdas, a la que se llamará R-1. El segundo refinado que se realizó fue sobre las 5

Universidad de Valladolid

primeras celdas de alrededor del perfil, sobre el mallado R-1, obteniendo de este modo una malla de 183.030 celdas, que se ha llamado R-2.

A continuación, la Tabla 3.4 recoge información relativa a los 3 mallados anteriormente nombrados.

TABLA 3.4: Tabla resumen de las características de los diferentes mallados

MALLA	Nº de Celdas	y^+ Máximo	y^+ Mínimo
Inicial	139.020	185	7
R-1	157.290	100	3
R-2	183.030	60	1

Ahora, en la Figura 3.4, se va a mostrar la evolución del mallado mediante los diferentes refinados por contornos.

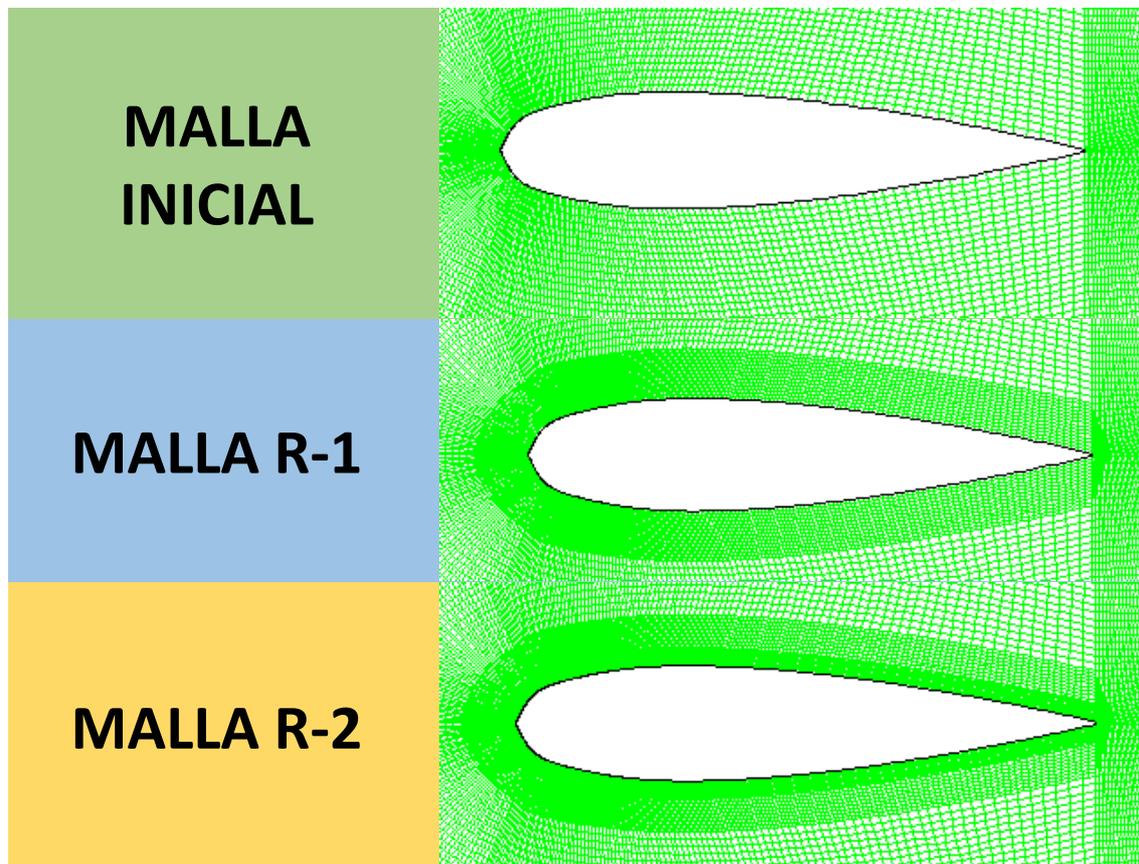


Figura 3.4: Detalle de la Evolución del Mallado en torno a los Perfiles

Se realizó un tercer refinado, pero éste no producía ninguna ventaja, ya que los resultados eran muy similares a los obtenidos con R-2, pero suponía un coste computacional mucho mayor, por lo que esta malla se desechó, seleccionándose como malla de trabajo R-2. En la Gráfica 3.2 se puede apreciar la evolución de los resultados para las mallas Inicial, R-1, y R-2.

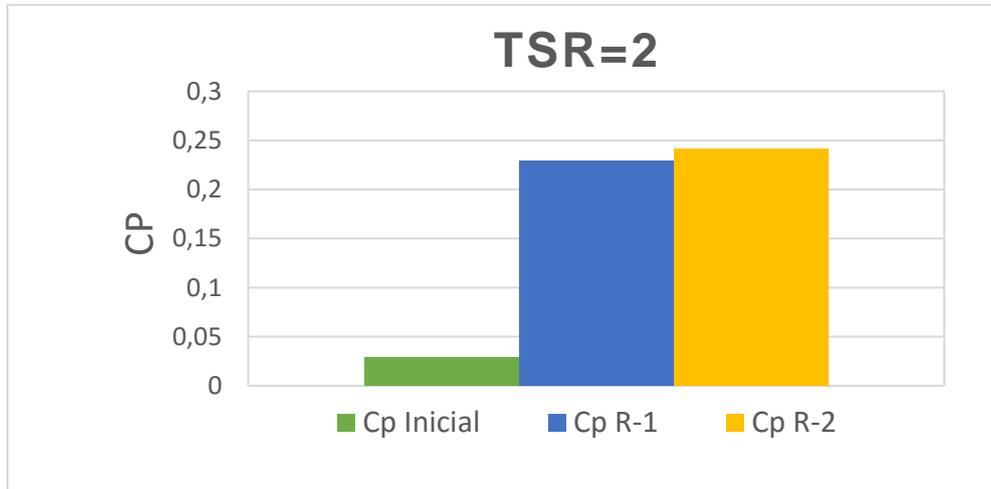


Figura 3.5: Variación del C_p con los diferentes Mallados para el punto de Diseño $TSR=2$

Aparentemente no hay mucha diferencia entre el resultado arrojado por la malla R-1 y la malla R-2, pero el tratamiento en la zona cercana a la pared es bastante mejor para la malla R-2, como se puede comprobar en las Figuras 3.6 y 3.7, ya que los y^+ son mucho menores para la malla R-2, de modo que esta malla arrojará unos resultados más fiables a la hora de capturar la curva completa de la turbina.

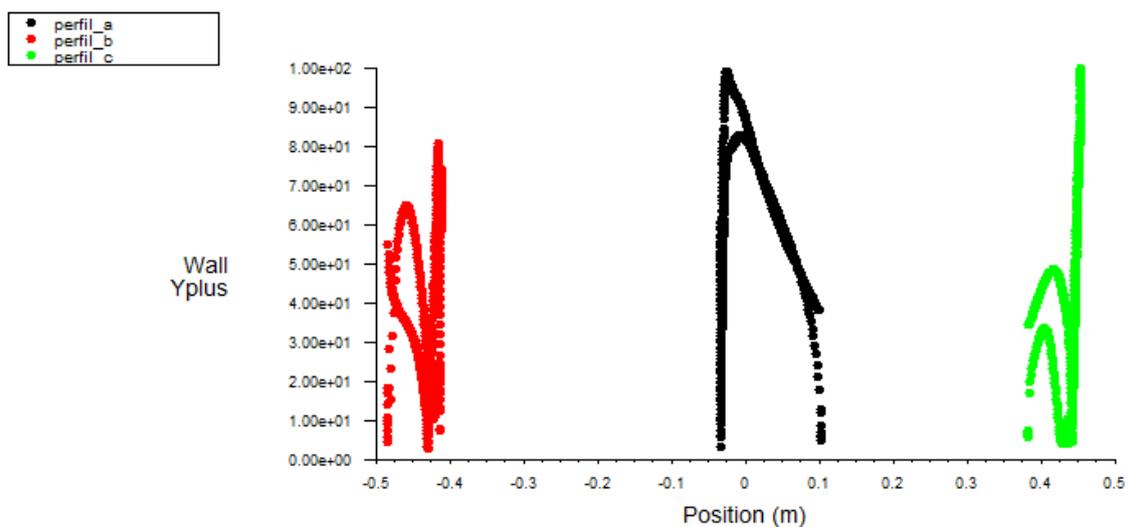


Figura 3.6: y^+ Para Malla R-1.

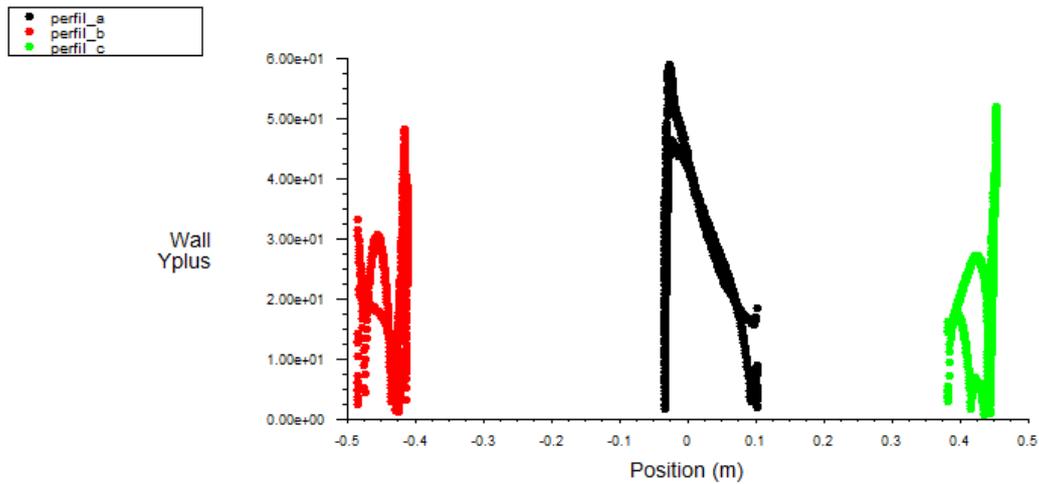


Figura 3.7: y^+ Para Malla R-2.

A continuación, se capturó la curva completa para el mallado R-2, y se comparó con la experimental [SANDIA, 2014], obteniendo unos resultados bastante coherentes, ya que, sobre los resultados numéricos se realizó una regresión lineal y se obtuvo una curva polinómica de grado 3 que se adaptaba muy aceptablemente a los resultados experimentales, como se puede observar en la Figura 3.8.

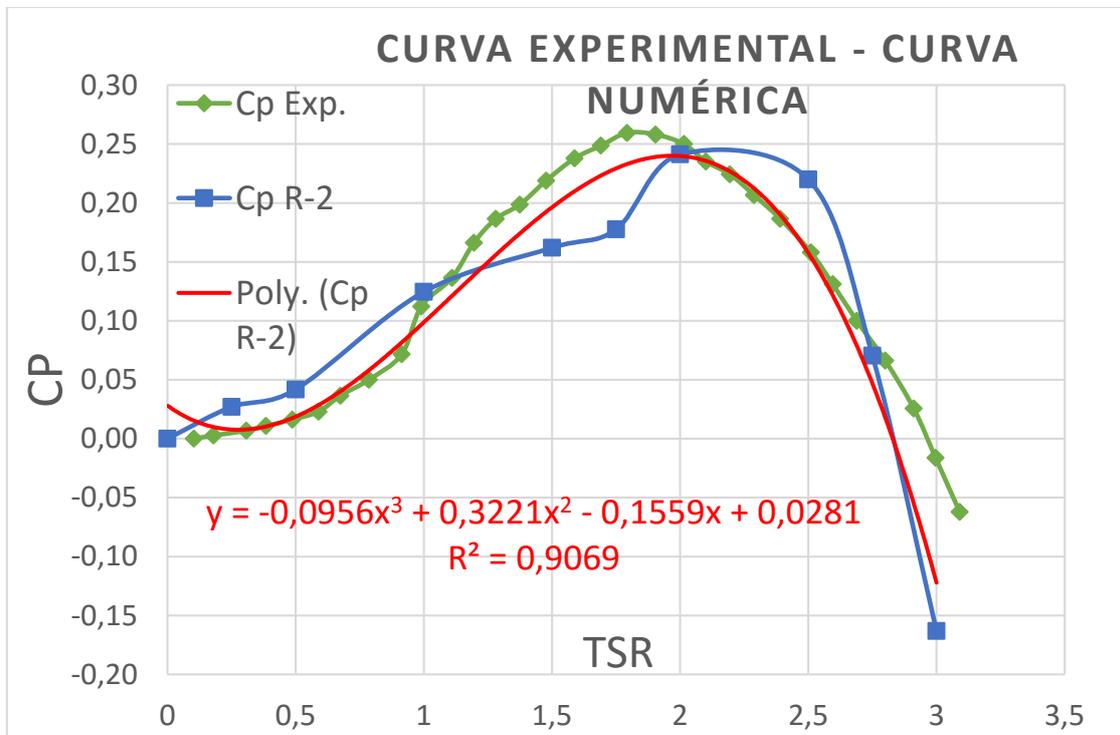


Figura 3.8: Representación de Curva Experimental Frente a Curva Numérica



En la Tabla 3.5 se adjunta un resumen de los datos más relevantes correspondientes a la Figura 3.8, correspondientes a los datos obtenidos numéricamente, y su comparación con los datos experimentales [SANDIA, 2014].

Tabla 3.5: Resumen de datos y comparación con resultados experimentales [SANDIA, 2014]

TSR	ω	ΔT	Cm Numérico	Cp Numérico	Cp Experimental	% Error
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,250	0,500	0,042	0,108	0,027	0,005	470,638
0,500	1,000	0,021	0,083	0,042	0,016	157,421
1,000	2,000	0,010	0,125	0,125	0,112	11,069
1,500	3,000	0,007	0,108	0,162	0,219	26,014
1,750	3,500	0,006	0,101	0,178	0,254	30,119
2,000	4,000	0,005	0,121	0,241	0,250	3,510
2,500	5,000	0,004	0,088	0,220	0,158	39,123
2,750	5,500	0,004	0,026	0,070	0,116	39,028
3,000	6,000	0,003	-0,054	-0,163	-0,016	906,221

3.4: Análisis del Patrón de Flujo

El siguiente paso será analizar el patrón de flujo obtenido en los ensayos, para diferentes posiciones del perfil ($\alpha=0^\circ$; $\alpha=15^\circ$; $\alpha=30^\circ$; $\alpha=45^\circ$; $\alpha=60^\circ$; $\alpha=75^\circ$; $\alpha=90^\circ$ y $\alpha=105^\circ$), analizando de este modo las variables del fluido, por lo que se entenderá de una forma más clara qué comportamiento tiene el fluido al pasar a través de la turbina.

El patrón de flujo se analizará para el punto óptimo de funcionamiento de la turbina (TSR=2), correspondiente a una velocidad de rotación de 4 rad/s ($\omega=4\text{rad/s}$), siendo las variables que se van a estudiar: Contornos de Presión Estática, de Velocidad y de Energía Cinética Turbulenta, por considerarse suficientemente representativas.

3.4.1: Análisis de Contornos de Presión Estática

El rango de valores que se va a emplear para analizar esta variable en el campo fluido irá desde -655 Pa. hasta 905 Pa., ya que permite analizar con claridad el patrón de flujo. Los contornos obtenidos son los correspondientes a las Figura 3.9 a 3.16.

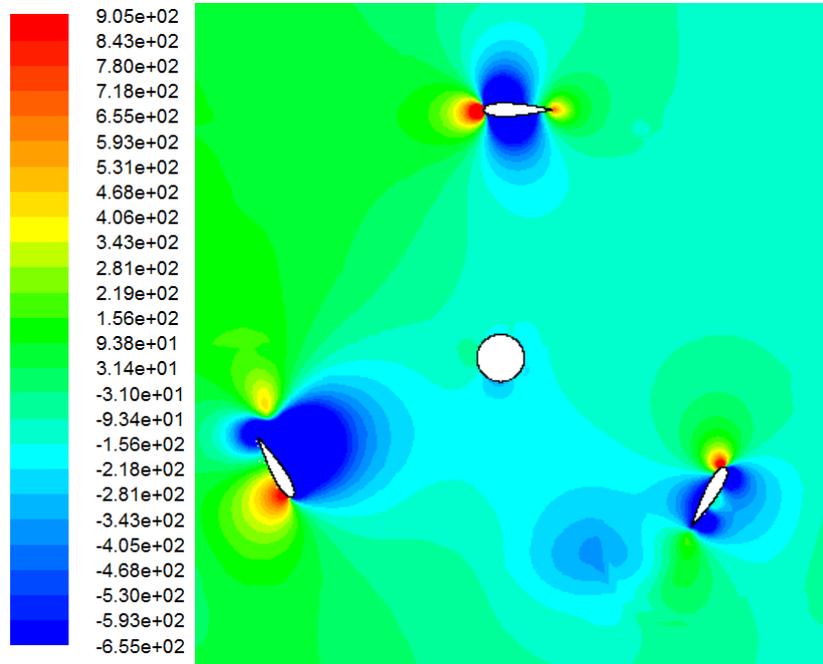


Figura 3.9: Contornos de Presión Estática para $\alpha=0^\circ$

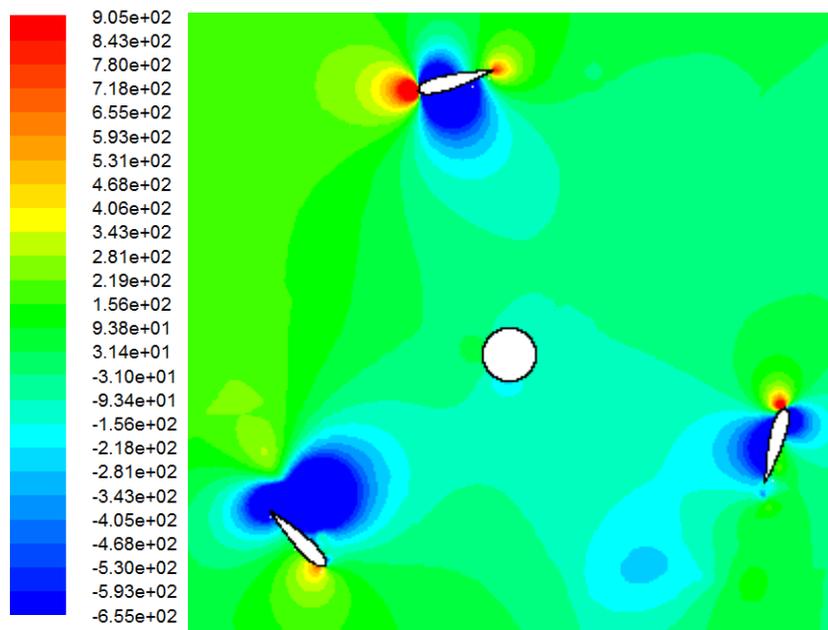


Figura 3.10: Contornos de Presión Estática para $\alpha=15^\circ$

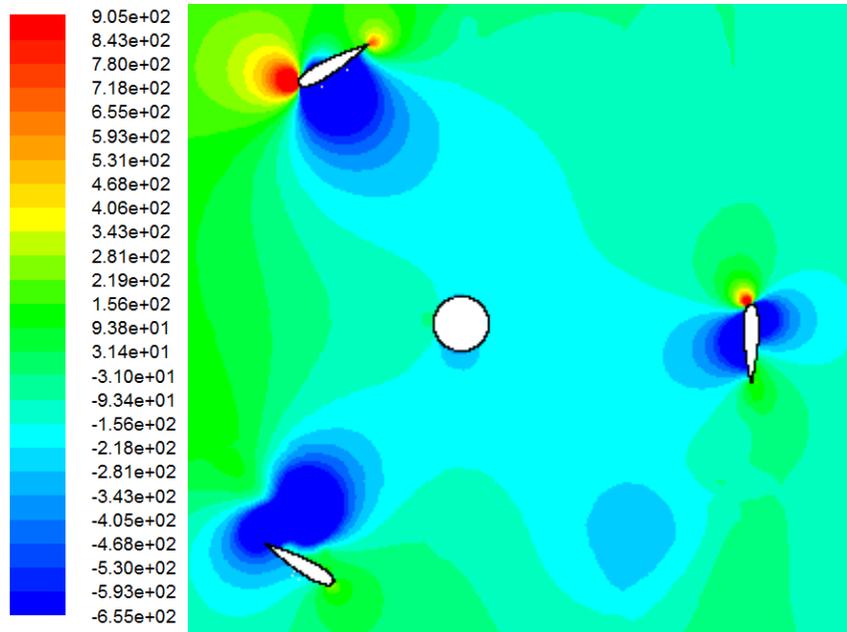


Figura 3.11: Contornos de Presión Estática para $\alpha=30^\circ$

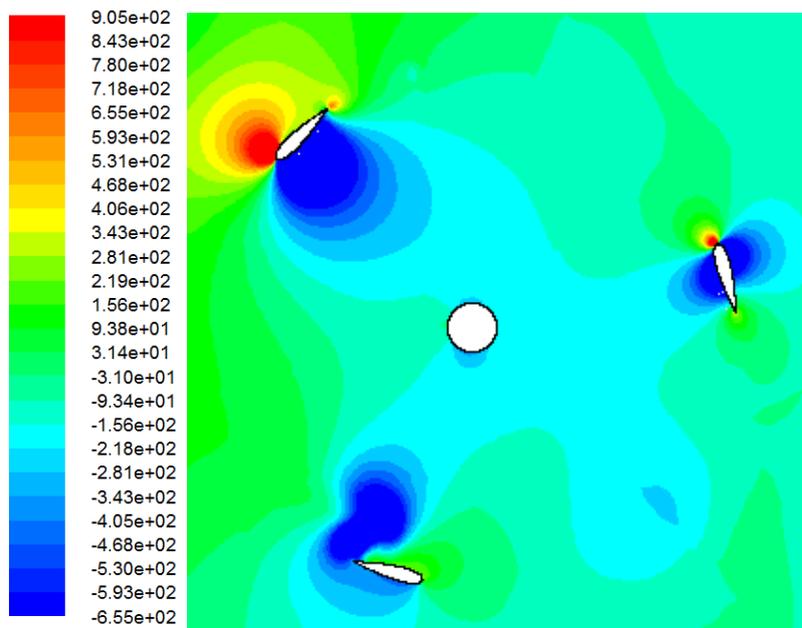


Figura 3.12: Contornos de Presión Estática para $\alpha=45^\circ$

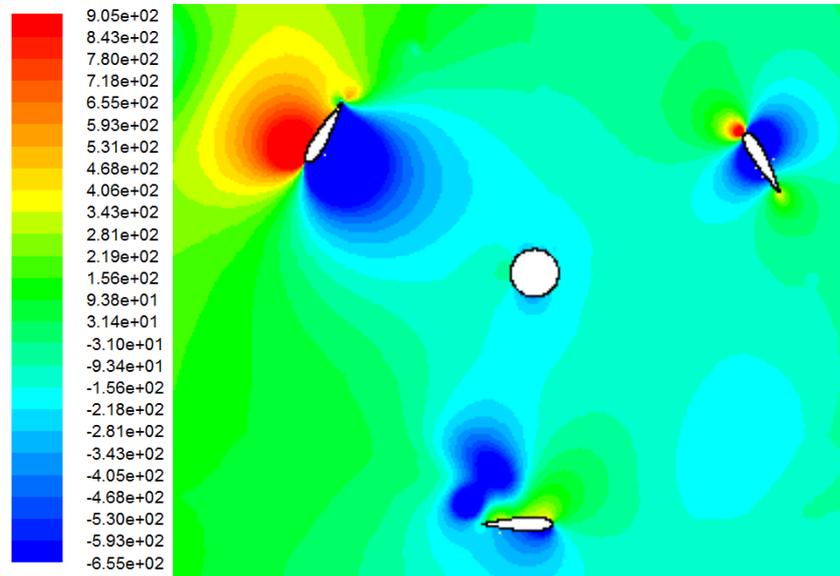


Figura 3.13: Contornos de Presión Estática para $\alpha=60^\circ$

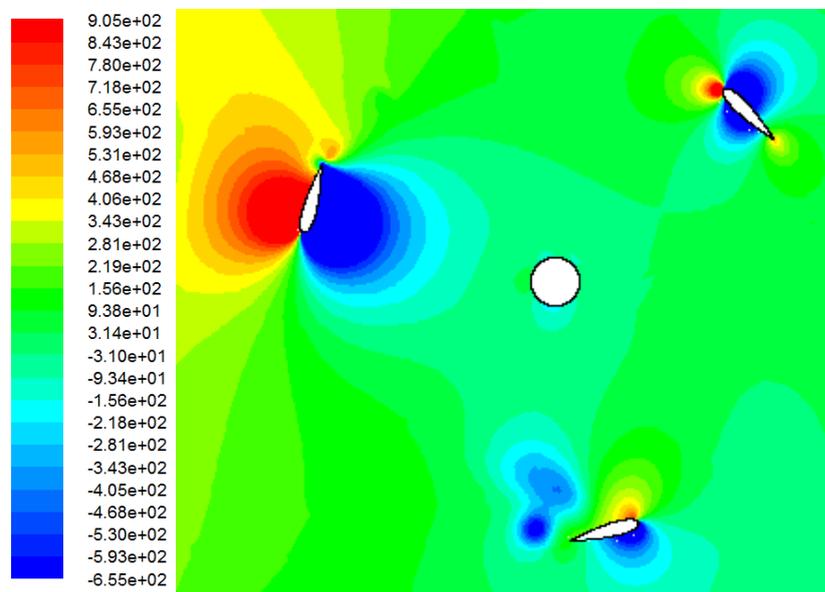


Figura 3.14: Contornos de Presión Estática para $\alpha=75^\circ$

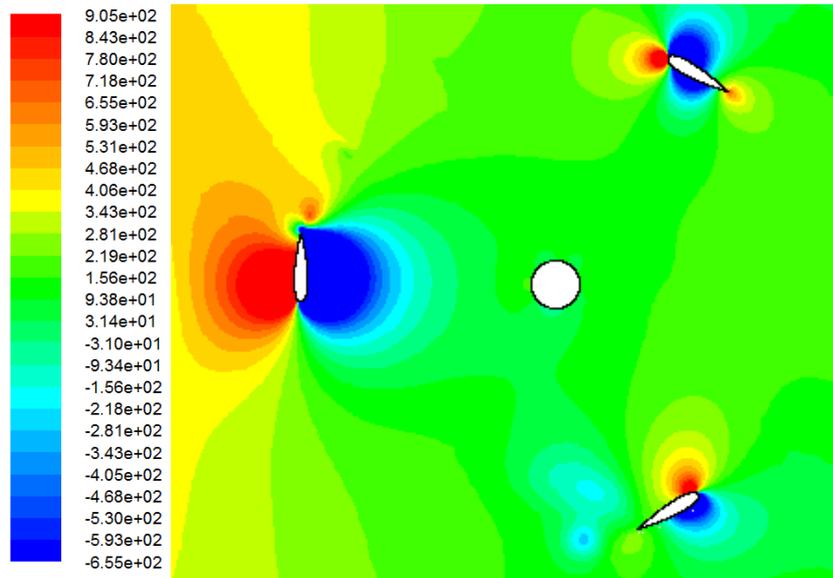


Figura 3.15: Contornos de Presión Estática para $\alpha=90^\circ$

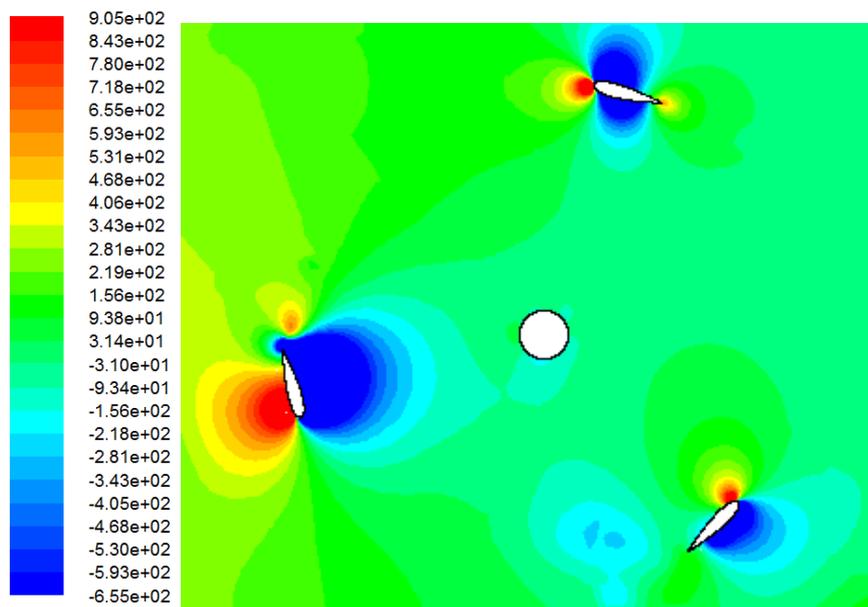


Figura 3.16: Contornos de Presión Estática para $\alpha=105^\circ$

En la Figura 3.9 se observa cómo la zona aguas arriba del rotor tiene una presión mayor (del orden de unos 156 Pa), mientras que la zona aguas abajo tiene una presión del orden de -265 Pa, ambas respecto de la presión de referencia (111.125 Pa). Esto es debido a la energía que ha extraído la turbina del fluido, por lo que se puede decir que el salto de presión en la turbina es, aproximadamente, del orden de 420 Pa.

Universidad de Valladolid

Si se observa la zona del fluido más próxima a los álabes, se puede observar que hay zonas de alta presión (Zonas Rojas) y zonas de baja presión (Zonas Azules), en las zonas azules puede que se hayan formado torbellinos consecuencia del desprendimiento de la capa límite, en especial a partir de la zona de posición de 165° en la Figura 3.12, donde parece que se comienza a desprender dichos torbellinos. Esto se analizará más adelante cuando se estudien los contornos de velocidad.

En la Figura 3.13 se puede observar, a parte de los fenómenos que se han comentado anteriormente, que, en torno al álabe que se encuentra en la posición correspondiente a 60° , hay una gran diferencia de presiones entre el intradós (zona interior del perfil) y el extradós (zona exterior del perfil), esta diferencia de presiones provocará una fuerza sobre el álabe, produciendo a su vez un momento respecto del rotor, haciendo, de este modo, que la turbina gire.

La evolución de la situación anteriormente comentada se puede apreciar desde la posición de 0° en la Figura 3.9, hasta la de 90° , en la Figura 3.15, cómo la diferencia de presiones en entre las superficies del álabe empieza siendo nula, y va aumentando progresivamente hasta alcanzar su máximo en la posición correspondiente a este último valor citado.

Una vez el perfil sobrepasa la zona de máxima diferencia de presiones, esta comienza de nuevo a descender hasta la posición de 180° , representada en la Figura 3.13, desde la cual no se produce a penas diferencia de presiones entre ambas caras, lo que significa que las posiciones no serán favorables, aunque tampoco desfavorables.

Lo que sí se puede apreciar en las zonas de posición mayores de 180° es una zona de remanso en la cabeza del perfil, ya que se encuentra un punto de máxima presión, por lo que deberá ser de mínima velocidad.

En la Tabla 3.6 se realiza un análisis de las zonas correspondientes al álabe, según sean de baja presión (Extradós), o de alta presión (Intradós), dependiendo de la posición angular que ocupen en cada instante, de modo que se verá qué zonas serán favorables y qué zonas serán desfavorables.

La tabla se ha coloreado según las posiciones sean favorables (Verde), o desfavorables (Rojo). Cómo se puede comprobar, hay más posiciones favorables para el giro que desfavorables, lo que supone una ventaja a la hora de generar electricidad, ya que se podrá obtener un mayor rendimiento.

Tabla 3.6: Análisis de Intradós o extradós según la posición en cada instante del Álabe

POSICIÓN	INTRADÓS	EXTRADÓS
30°	Exterior	Interior
45°	Exterior	Interior
60°	Exterior	Interior
75°	Exterior	Interior
90°	Exterior	Interior
105°	Exterior	Interior
120°	Exterior	Interior
195°	Interior	Exterior
210°	Interior	Exterior
225°	Interior	Exterior

3.4.2 Análisis de Contornos de Velocidad

Al analizar los contornos de velocidad se deberá prestar atención a los contornos de presión, ya que de este modo se podrá localizar los torbellinos, coincidiendo estos con mínimos de presión y máximos de velocidad.

Para el análisis de la velocidad se ha empleado un rango de entre 0 y 2 m/s, siendo el resultado obtenido el que se recoge en la Figuras 3.17 a 3.24 para las posiciones entre $\alpha=0^\circ$, y $\alpha=105^\circ$ respectivamente.

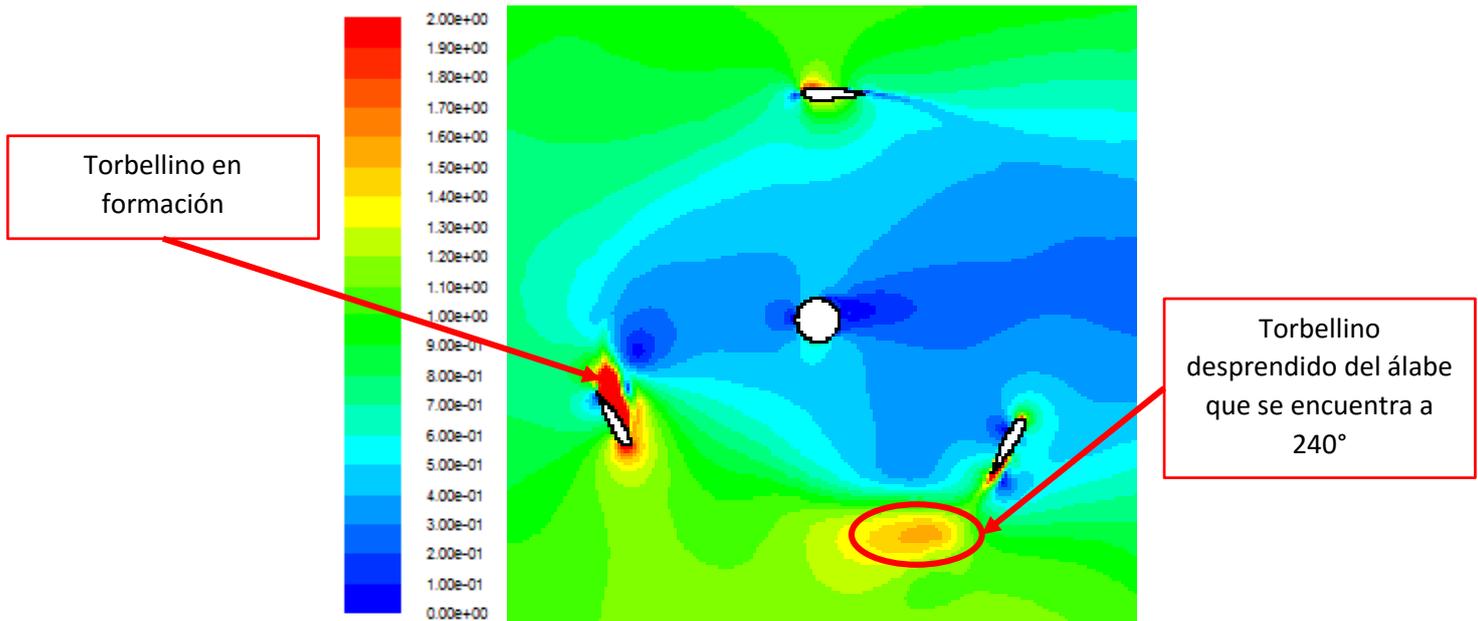


Figura 3.17: Contornos de velocidad para $\alpha=0^\circ$

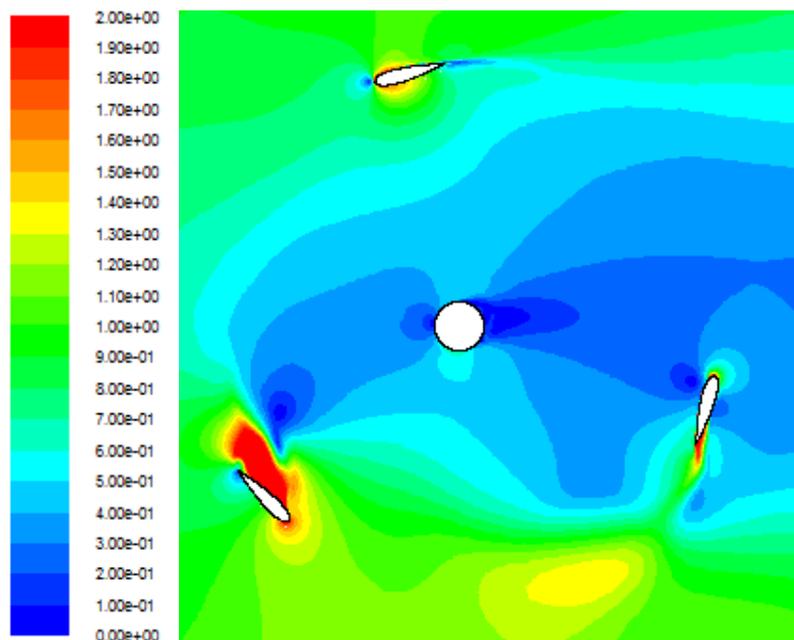


Figura 3.18: Contornos de velocidad para $\alpha=15^\circ$

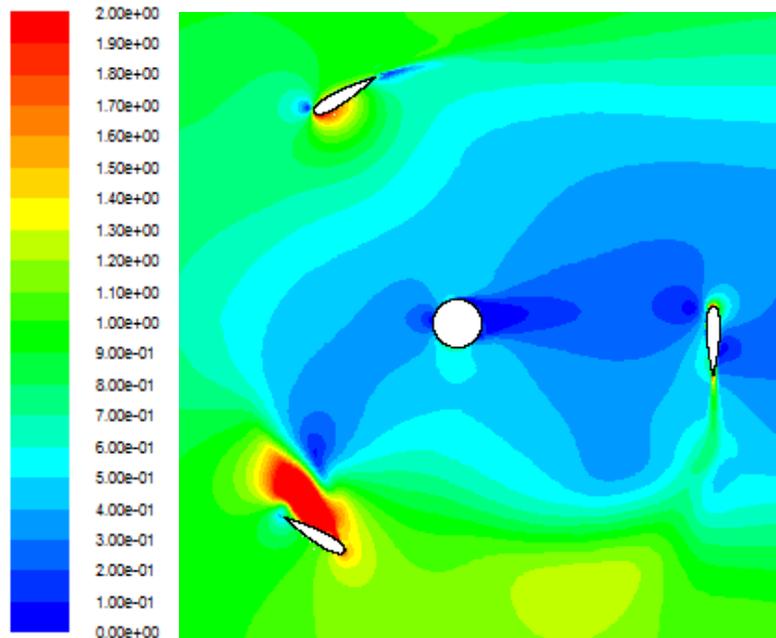


Figura 3.19: Contornos de velocidad para $\alpha=30^\circ$

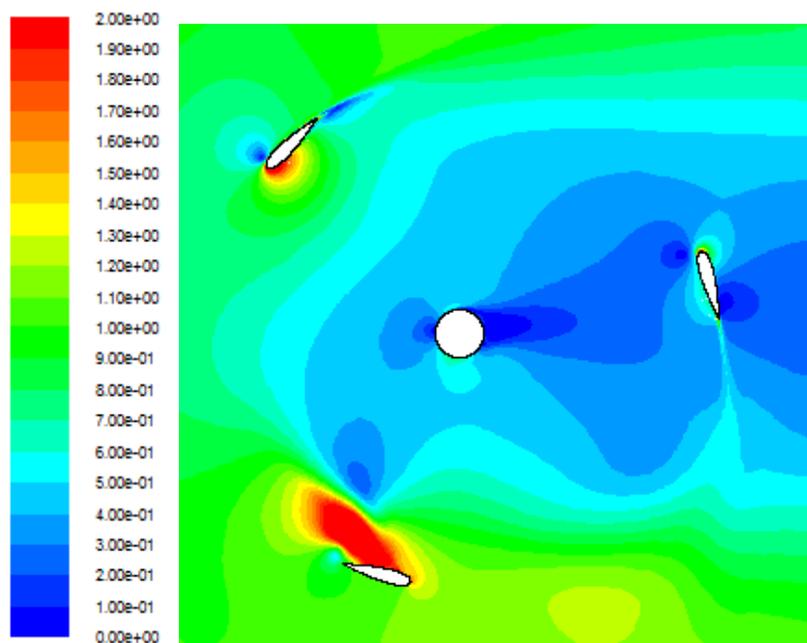
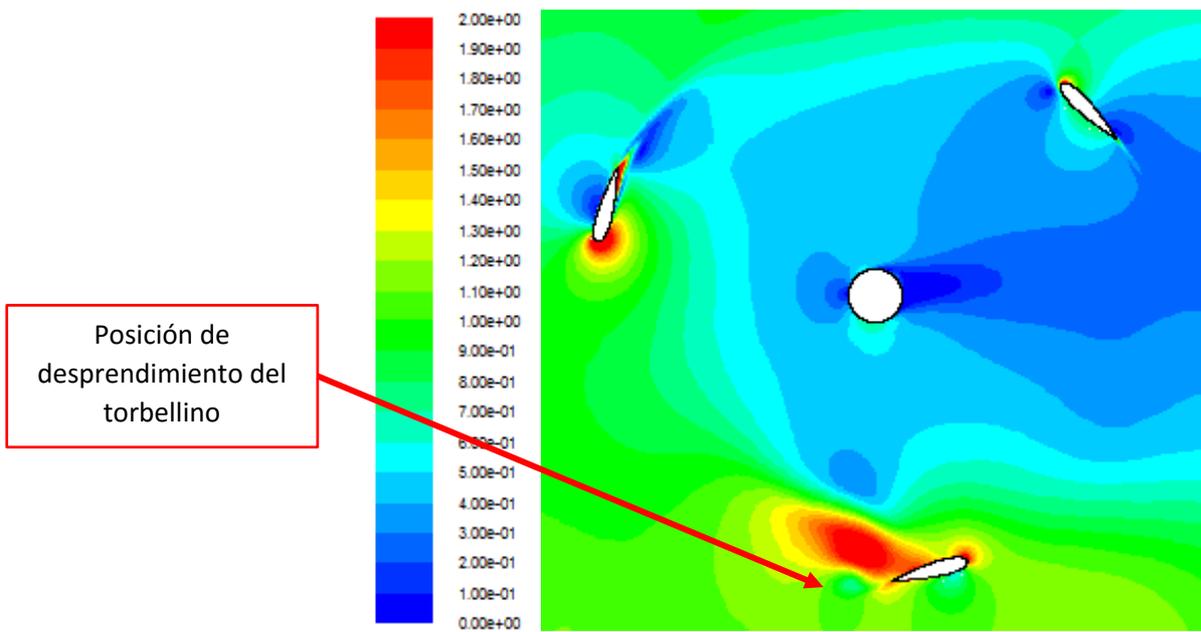
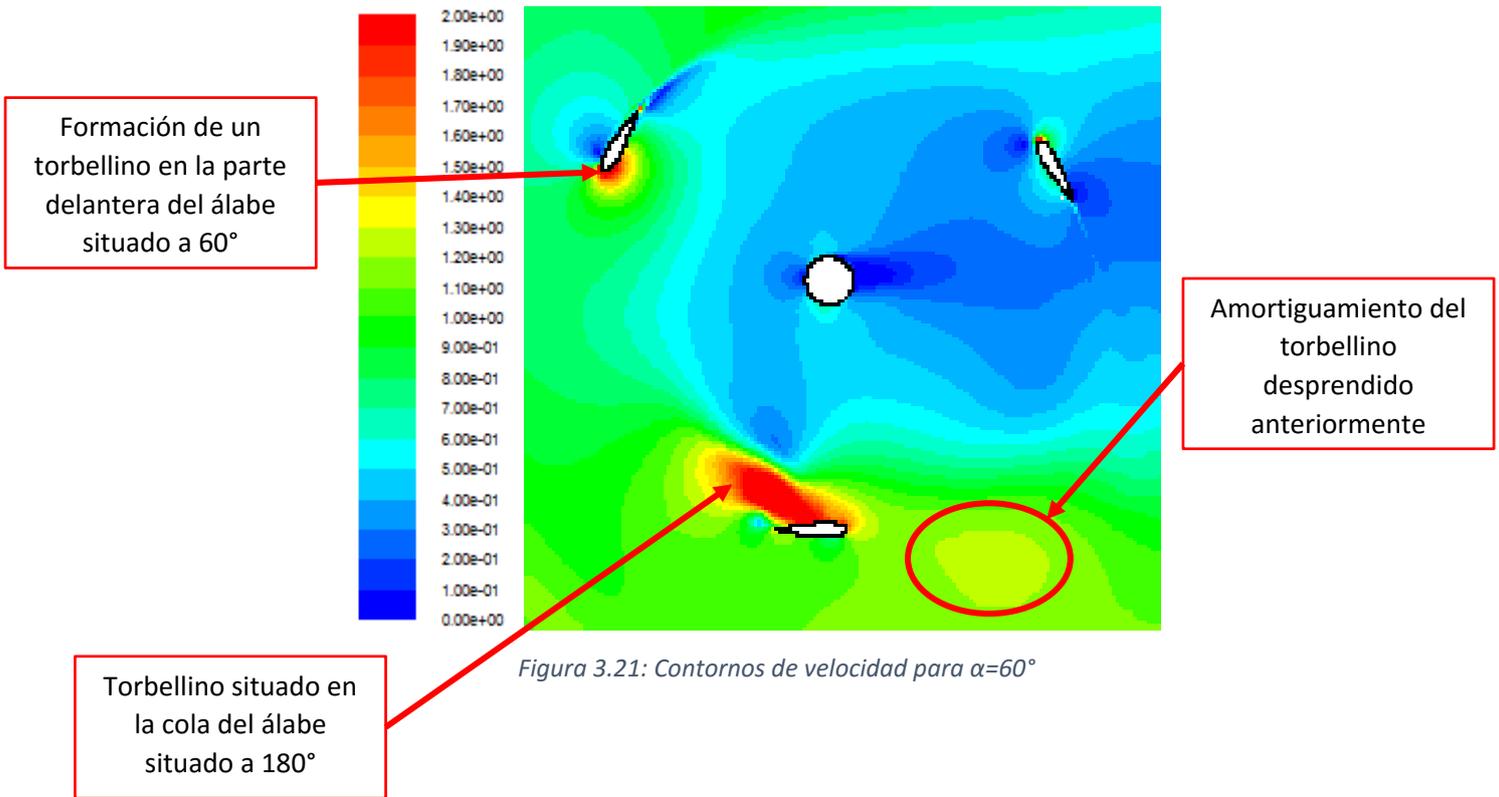


Figura 3.20: Contornos de velocidad para $\alpha=45^\circ$



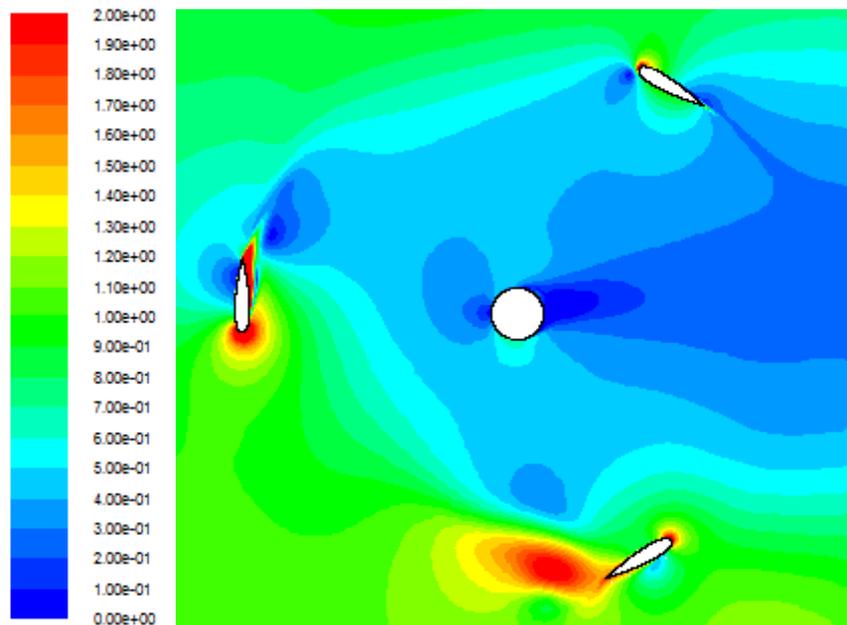


Figura 3.23: Contornos de velocidad para $\alpha=90^\circ$

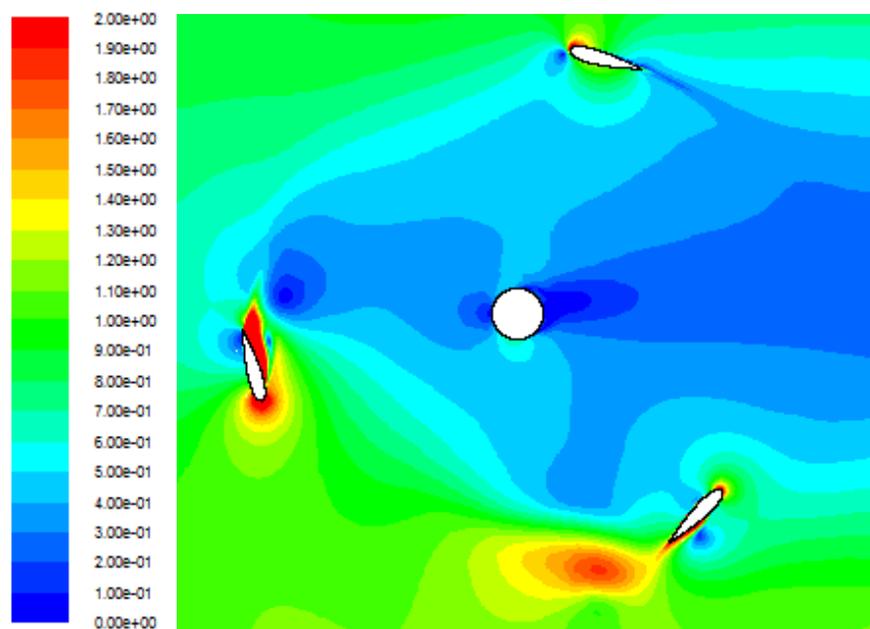


Figura 3.24: Contornos de velocidad para $\alpha=105^\circ$

En la figura 3.17 se aprecia una zona de máxima velocidad, que concuerda con una zona de mínima presión si se observa la Figura 3.9, por lo que en ese punto habrá un torbellino, que se desprende del álabe que se encuentra a 240° .

También, en la Figura 3.17 se aprecia un punto de remanso en la cabeza del álabe que se encuentra a 0° .

A partir de 60° comienza a formarse un torbellino sobre el álabe que se encuentra en dicha posición, de modo que desde ese punto y hasta la posición de 180° ese torbellino aumenta su tamaño y se desliza por la pared interna del álabe, cómo se puede apreciar desde la Figura 3.31 a la 3.32, hasta que se desprende en la posición 195° y una vez desprendido se amortigua en el campo fluido según se parecía en las Figuras 3.23 a 3.24.

3.4.3: Análisis de Contornos de Energía Cinética Turbulenta

A continuación, se va a realizar el análisis de contornos de Energía Cinética Turbulenta, para lo cual se ha empleado un rango de entre $0,01$ y $3,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Mediante este análisis se dará una mayor consistencia al análisis realizado en los dos puntos anteriores, ya que se aprecian las estelas de cada álabe con total claridad

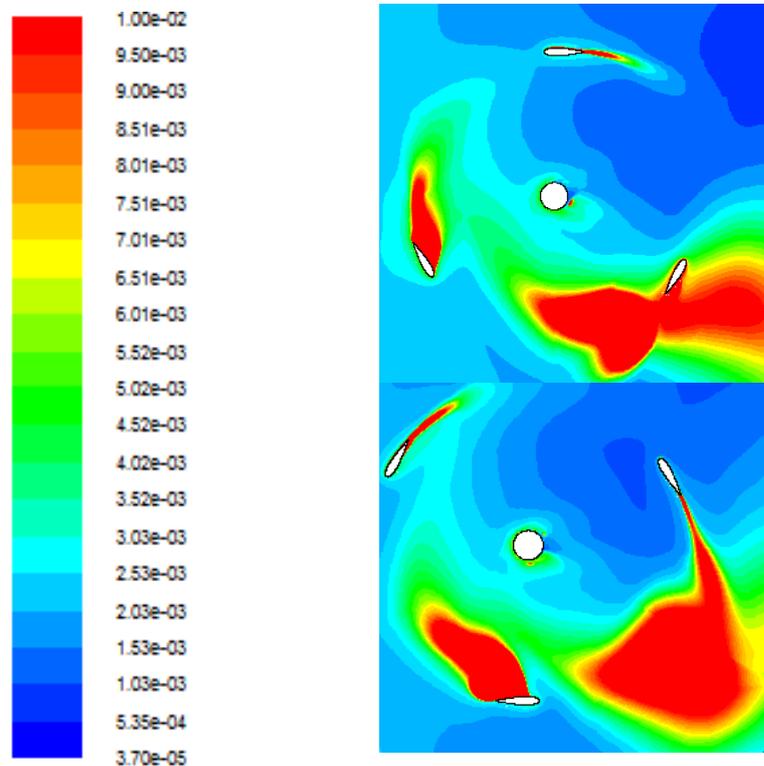


Figura 3.25: Contornos de Energía Cinética Turbulenta para $\alpha=0^\circ$ (Sup.) y $\alpha=60^\circ$ (Inf.)

Si se analiza la Figura 3.25 se puede apreciar que la zona que posee mayor energía cinética turbulenta dentro del campo fluido del rotor se encuentra en el área comprendida entre las posiciones de 120° y 300° , correspondiéndose con las zonas anteriormente explicadas de formación y desprendimiento de torbellinos, siendo la zona de mayor energía la correspondiente a la zona de desprendimiento de los torbellinos (entre 180° y 300°), por lo que será la zona de mayor disipación turbulenta dentro del campo fluido del sistema.

Capítulo 4: Estudio de la Influencia del Ángulo de Pitch -6° y -12° para el Perfil NACA 0020

4.1: Construcción del Modelo

4.1.1: Selección de la Malla

Para la realización de este estudio se ha partido de una malla de 148.450 celdas, generada mediante Gambit. Esta malla es la correspondiente al modelo con ángulo de Pitch de valor -12° . Sobre esta malla se han realizado diversos refinados, con el fin de conseguir una solución de mayores garantías. Para ello se realizó en primer lugar un refinado por contornos sobre 7 celdas del contorno del perfil, dando como resultado una malla de 158.257 celdas, sin ofrecer ninguna ventaja respecto de la malla de partida, y aumentando el coste computacional del modelo. Por ello, sobre esta última malla, se realizó un nuevo refinado, esta vez sobre las últimas 5 celdas del contorno de álabe, dando lugar de este modo a una malla de 171.664 celdas, que, como en el caso anterior, no ofrecía ninguna ventaja y aumentaba el coste computacional del modelo. Por estas razones ambas mallas refinadas fueron desechadas, utilizando como malla de estudio la malla inicial procedente de Gambit, de 148.450 celdas. Para la malla correspondiente al modelo con ángulo de Pitch -6° , el procedimiento que se siguió fue el mismo, obteniéndose un comportamiento similar, por lo que se tomó como malla de estudio la inicial de 146.006 celdas.

4.1.2: Modelo Geométrico y Parámetros Físicos

En cuanto al modelo geométrico y los parámetros físicos del sistema, se trata del mismo modelo empleado en el Capítulo 3, es decir, la construcción del mismo es análoga, tanto a la hora de definir las “*interfaces*”, como a la hora de definir las condiciones de referencia y de operación, así como a la hora de definir los valores de referencia. Para aportar mayor claridad se recogen tanto los parámetros físicos como los geométricos en las Tablas 4.1 y 4.2.

TABLA 4.1: Parámetros Geométricos del Modelo

Parámetros Geométricos	Álabes	3
	Radio (m)	0,5
	Cuerda (m)	0,136135682
	Envergadura (m)	1
	Área (m ²)	0,408407045
	Solidez	0,408407

TABLA 4.2: Parámetros Físicos del Modelo

Parámetros Físicos	V. Agua (m/s)	1
	Densidad (Kg/m ³)	1000
	Viscosidad ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)	$1,10\cdot 10^{-3}$
	Reynolds (Medio)	$9,07\cdot 10^5$

En este apartado cabe recordar que la presión de referencia es la correspondiente a 1 metro de profundidad, siendo el valor de “*Operating Pressure*” de 111.125 Pa., situada al final del dominio computacional, en $x=8$ m.

4.2: Procedimiento Experimental

Para la realización de las simulaciones se han empleado 300 “time steps” por vuelta, simulándose en todo caso un mínimo de 4 vueltas, llegando en alguna de las simulaciones a los 2.400 “time steps”, es decir, 8 vueltas, con el fin de conseguir unos resultados verdaderamente fiables.

En cuanto a la convergencia de los resultados, se puede decir que ha sido correcta, ya que en todas las simulaciones se han alcanzado gráficas de tipo periódico, que, a pesar de tener ligeras variaciones entre sus máximos (Figura 4.1), la forma que adoptaba la gráfica en cada vuelta era la misma (Figura 4.2).



Figura 4.1: Convergencia de solución en la última vuelta de la simulación.

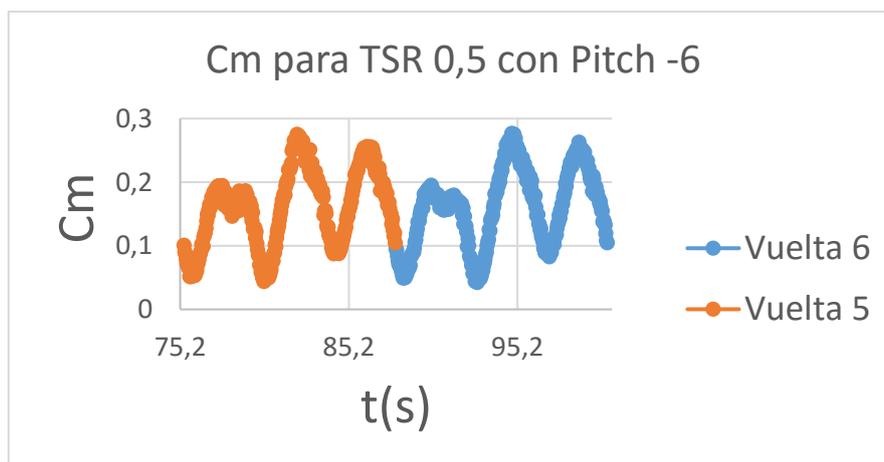


Figura 4.2: Convergencia de la solución en las dos últimas vueltas de la simulación

Una vez se comprobó la convergencia de los resultados, se continuó capturando los puntos de la curva de la turbina, obteniéndose que el rendimiento caía enormemente, tanto para $Pitch\ -6$ como para -12 , siendo mayor la caída de rendimiento para este último modelo (Gráfica 4.3), por lo que no se considerará una mejora, sino todo lo contrario, el empleo de ángulos de $Pitch$ menores de -6° en generadores eléctricos de este tipo. En la Tabla 4.3 se recogen los principales parámetros a la hora de comparar los diferentes valores del ángulo de $Pitch$.

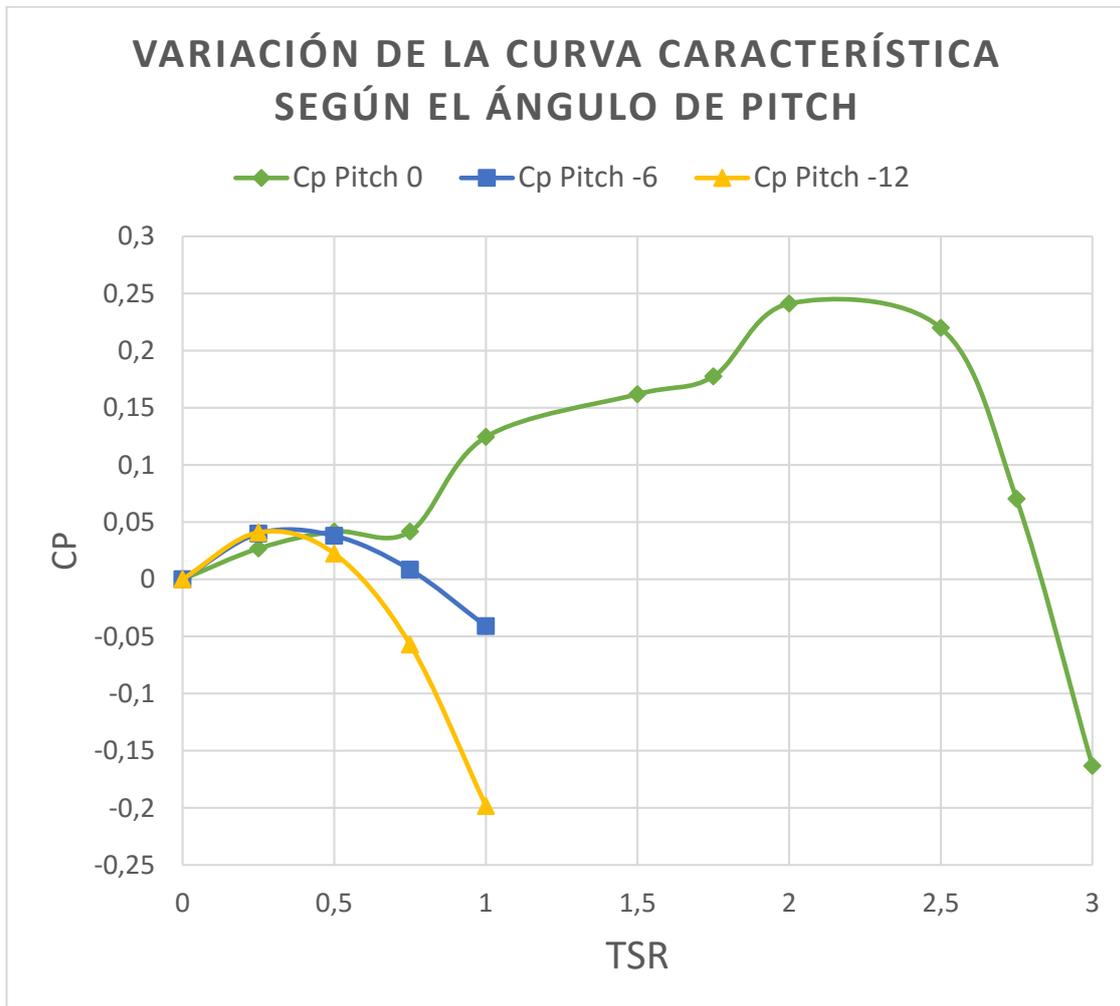


Figura 4.3: Variación de la Curva Característica para Ángulos de Pitch de -6° y -12°

TABLA 4.3: Datos a contrastar para los diferentes valores del ángulo de Pitch

Pitch ($^\circ$)	TSR Diseño (-)	ω (rad/s)	Δt (s)	C_m (-)	C_p (-)	Rango TSR (-)
0	2	4	0,005235988	0,120612317	0,241224633	0 \approx 2,8
-6	0,25	0,5	0,041887902	0,159986886	0,039996721	0 \approx 0,75
-12	0,25	0,5	0,041887902	0,163707643	0,040926911	0 \approx 0,6



4.3: Análisis del Patrón de Flujo

Una vez se tienen los resultados de las simulaciones, se va a proceder a comparar los patrones de flujo correspondientes a los ángulos de pitch con el modelo inicial del Capítulo 3, a fin de observar y analizar los fenómenos que se producen en el campo fluido que suponen esta caída de rendimiento.

Esta comparación de resultados se realizará para el punto de diseño en las diferentes turbinas, es decir, una TSR de 2 para el modelo inicial (Pitch 0°), una TSR de 0,25 para pitch -6° y -12° .

Esta comparación se va a realizar mediante los vectores de velocidad, de este modo se podrá analizar cómo varía el patrón de flujo en las diferentes posiciones (0° , 60° , 120° , 180° y 240°) para los tres modelos.

A su vez, con el fin de aportar mayor cantidad de información y comparar las diferentes situaciones con la mayor fidelidad posible, se van a colorear los vectores de velocidad según los valores de la presión en cada punto según el rango empleado en el Capítulo 3 (-655 Pa y 905 Pa).

Los vectores, en ese caso darán una estimación del orden de magnitud de la velocidad en cada zona, siendo, de este modo, una representación cualitativa, ya que no ofrece la posibilidad de conocer el valor exacto de la velocidad del fluido en cada punto, aunque si posibilita la comparación entre las diferentes figuras, ya que la escala empleada en ellas es la misma.

De este modo se podrá localizar y analizar las diferentes zonas de recirculación, así como su posición de dependiendo de la inclinación del perfil, es decir, del ángulo de Pitch.

4.3.1: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=0^\circ$

A continuación, en la Figura 4.5 se adjuntan los vectores correspondientes a la posición de 0° para los diferentes ángulos de Pitch, siendo la Figura 4.5.a) la correspondiente a Pitch 0° , la Figura 4.5.b) la que hace referencia al perfil con Pitch -6° , y la Figura 4.5.c), la de la situación de Pitch -12° .

La escala que aparece a la izquierda, en la Figura 4.5, es la correspondiente a los valores de presión, según el rango anteriormente explicado.

Cómo se puede observar en el caso de la Figura 4.5.a), la capa límite se mantiene adherida a lo largo de todo el perfil, sin producirse su desprendimiento hasta el final del mismo.

Ahora, si se presta atención a la Figura 4.5.b), se observa que se produce un desprendimiento de capa límite en la parte superior del perfil, motivando, de este modo, una recirculación sobre esta zona.

Si se observa la Figura 4.5.c), se puede apreciar como el desprendimiento de capa límite se produce del mismo modo, en la parte superior del perfil, provocando una zona de recirculación mucho mayor que en el caso anterior.

Desde un punto de vista de conjunto, y tras haberse analizado los tres apartados (a, b y c) por separado, se puede afirmar que, cuanto menor es el ángulo, antes se produce el desprendimiento de capa límite, provocando, de este modo, una mayor zona de recirculación, y que este fenómeno es desfavorable cuando se emplea en la generación de energía.

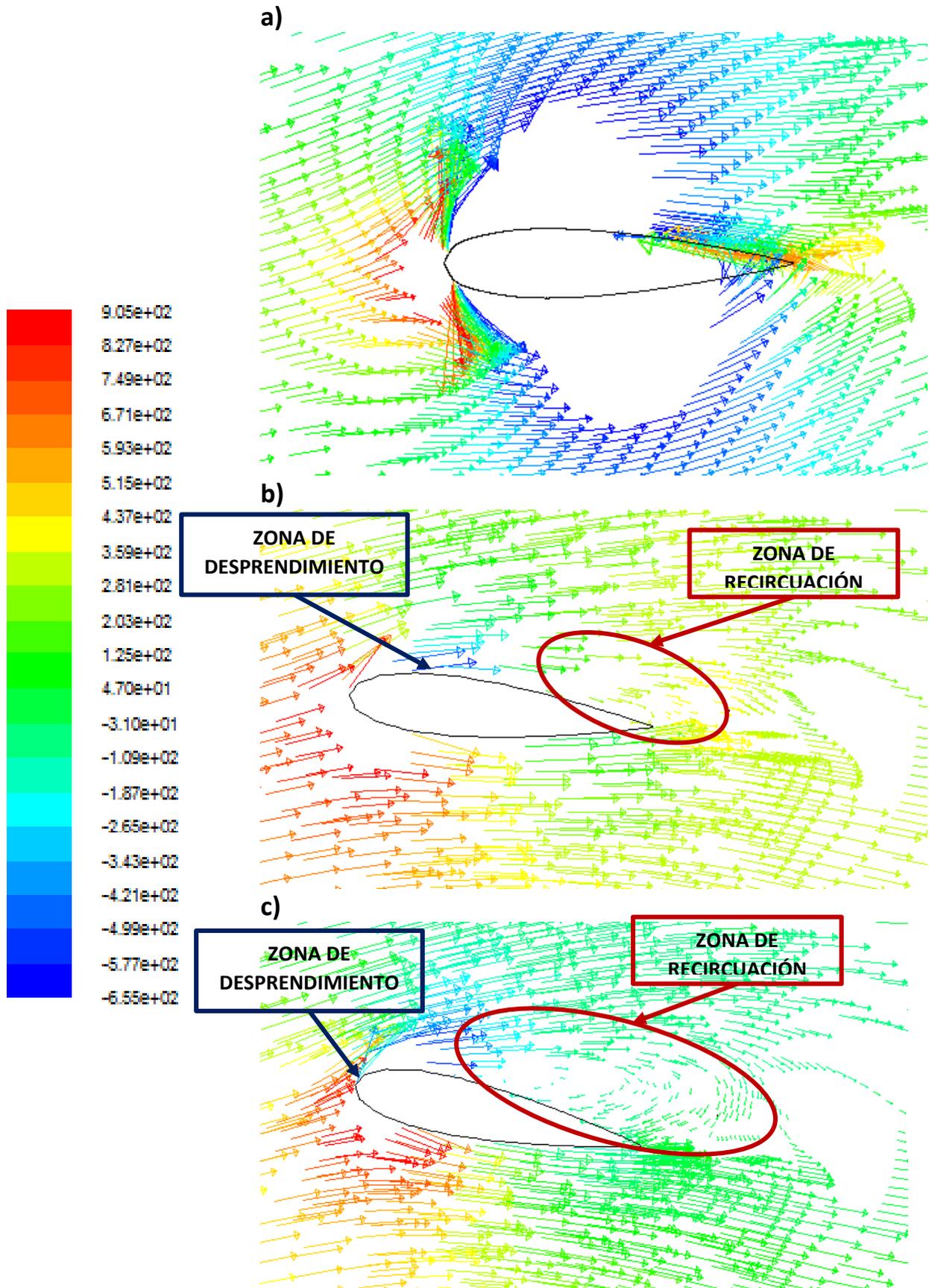


Figura 4.5: Vectores de velocidad, coloreados por presiones, para posición 0°

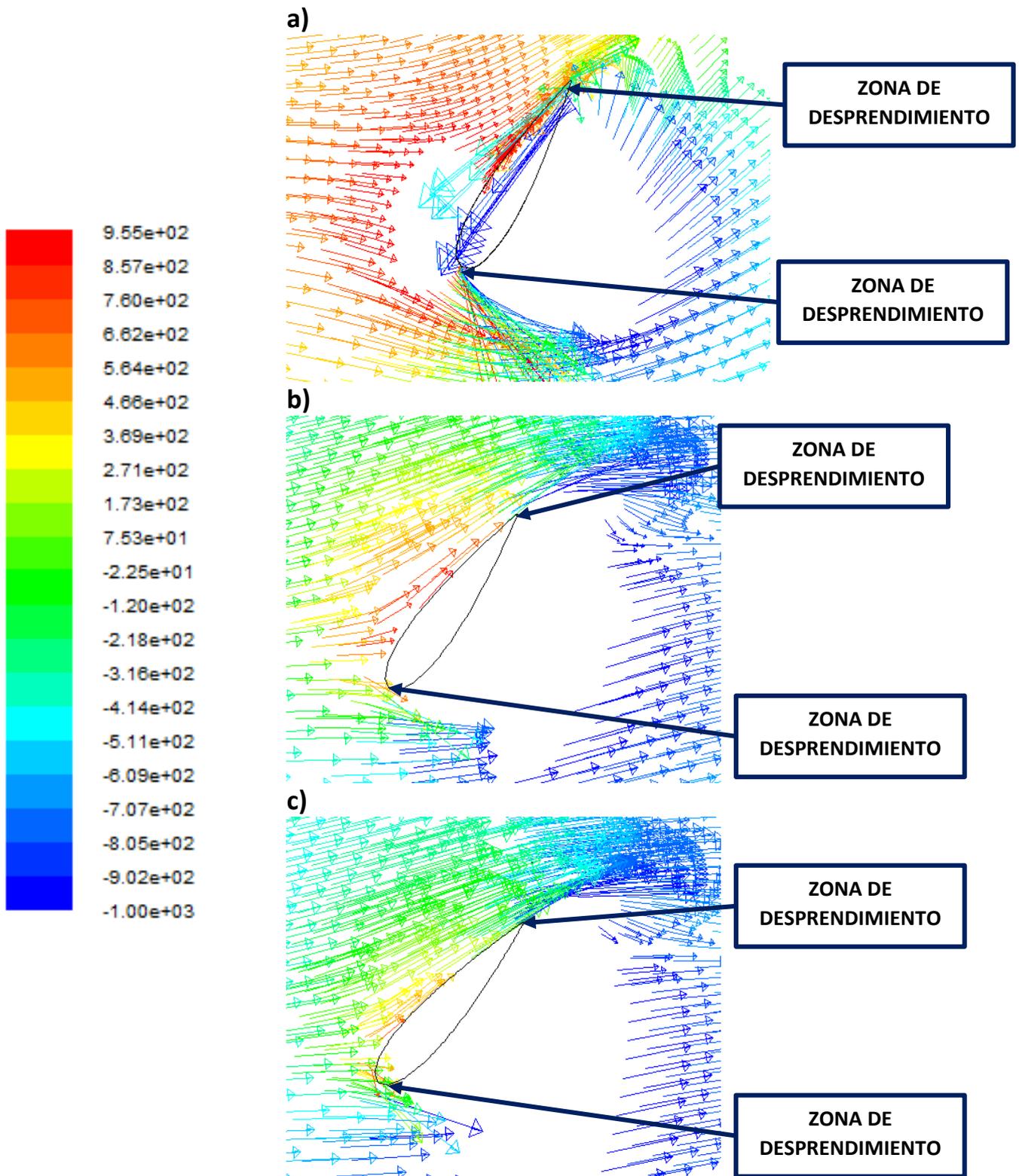


Figura 4.6: Vectores de velocidad, coloreados por presiones, para posición 60°

4.3.2: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=60^\circ$

En la Figura 4.6 se muestran los vectores de velocidad, coloreados por zonas según la presión, para la posición del álabe de 60° . Para la interpretación de estos resultados se ha optado por cambiar el rango, ya que el empleado anteriormente no arrojaba unos buenos resultados para pos ángulos de Pitch negativos, en este caso, se ha empleado un rango de entre -1000 y 905 Pa.

En las tres imágenes (a, b y c) se aprecian zonas de desprendimiento, una en la cabeza del álabe, y otra en la cola, siendo la superficie sobre la que incide el fluido el extradós, ya que es dónde se alcanza mayor presión en el perfil.

Si se presta atención a las áreas coloreadas por presiones, se observa que la mayor diferencia de presiones se alcanza en la situación a, correspondiente al ángulo de Pitch de 0° , por lo que será la situación en la que el fluido ejercerá una mayor fuerza sobre el perfil, por lo que estaremos ante la situación más favorable a la hora de extraer energía del campo fluido.

En cambio, si se presta atención a las situaciones b y c, se aprecia que, a menor ángulo de Pitch, menor diferencia de presiones, por lo que sería interesante cómo estudio futuro sacar las tendencias de comportamiento con ángulos de pitch mayores.

4.3.3: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=120^\circ$

A continuación, se van a analizar los vectores de velocidad, coloreados por presiones, para la posición de 120° . Para ello se ha vuelto a variar el rango de presiones, con el fin de ofrecer una mayor claridad en el análisis. En este caso se ha empleado un rango que va desde -1.400 Pa. hasta 905 Pa.

En la figura que se adjunta a continuación (Figura 4.7) se representan los tres casos 0° , -6° , 12° ; correspondiéndose con las figuras 4.7.a, 4.7.b, y 4.7.c, respectivamente.

Si se analizan conjuntamente se puede ver que todas ellas poseen una zona de desprendimiento en la cabeza del álabe, y otra zona de recirculación en la cola, siendo en este caso probablemente más favorable las situaciones correspondientes a los ángulos de pitch negativos ya que la zona de recirculación es mucho menor que en el caso a), y la diferencia de presiones entre el intradós y el extradós es mayor para ángulos de Pitch negativos, produciéndose una mayor fuerza sobre el álabe en esta situación.

En cualquier caso, este dato no se deberá tener en cuenta como una ventaja del ángulo de Pitch negativo, ya que la velocidad de giro obtenida es mucho menor (0,5 rad/s frente a 4 rad/s), de modo que la energía que se podrá obtener con el álabe de ángulo de Pitch 0° será mucho mayor.

La situación del torbellino en la cola del álabe concuerda con lo analizado en el Capítulo 3, dónde se explicó cómo el torbellino se formaba e iba progresivamente deslizándose por el intradós del perfil, hasta que se desprendía de este, siendo esta situación un instante de tiempo posterior al mostrado en la Figura 4.7.a), ya que en este momento el torbellino aún abarca más de la mitad del intradós del perfil.

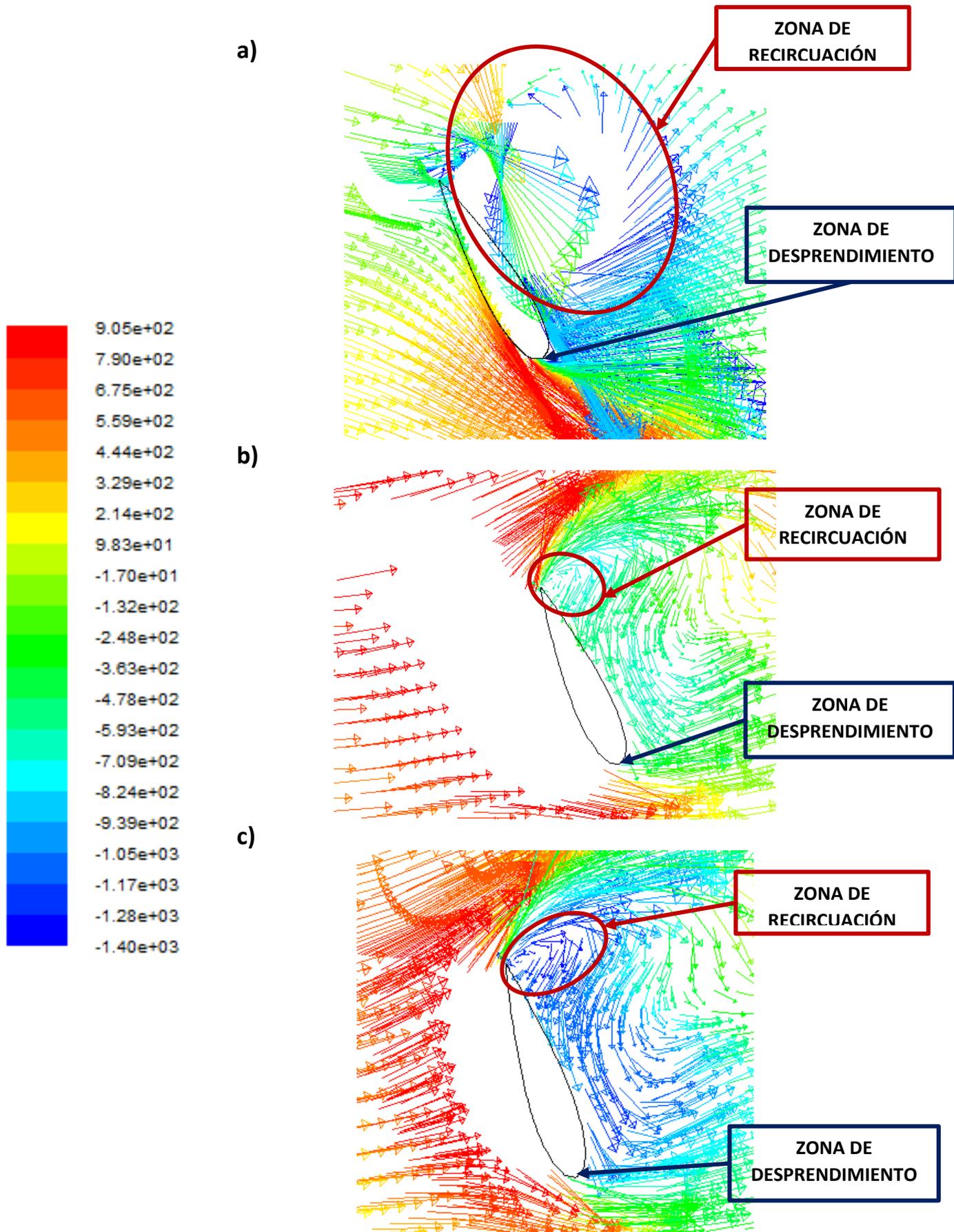


Figura 4.7: Vectores de velocidad, coloreados por presiones, para posición 120°

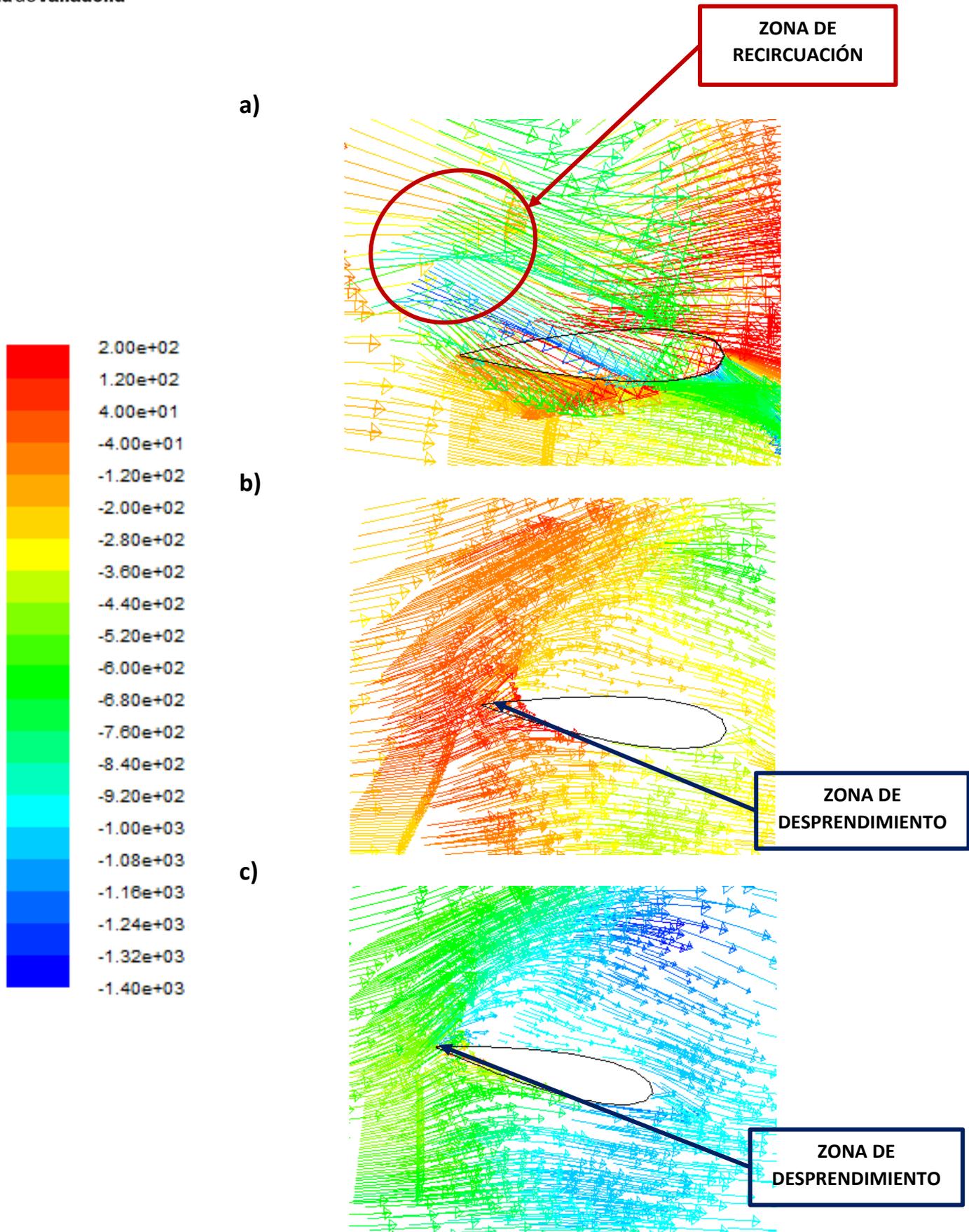


Figura 4.8: Vectores de velocidad, coloreados por presiones, para posición 180°



4.3.4: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=180^\circ$

Se va a proceder a analizar los vectores de velocidad, coloreados por presiones, representados en la Figura 4.8, para la posición del perfil en el ángulo de 180° . Para ello, en este caso, se ha empleado un rango de presiones diferente, siendo este el comprendido entre -1.400 y 200 Pa. Las diferentes subfiguras (a, b y c) se corresponderán los ángulos de 0° , -6° y -12° respectivamente.

Si se presta atención a la Figura 4.8.a), se puede apreciar una zona de recirculación en la cola del perfil, siendo esta la misma que se apreciaba en la Figura 4.7.a), habiéndose deslizado por la cara del álabe, y en este punto, estando a punto de desprenderse por completo, concordando esto con lo anteriormente analizado en el Capítulo 3.

Por el contrario, si se presta atención a las otras dos subfiguras (Figura 4.8.b y 4.8.c) se puede apreciar una zona de desprendimiento, motivada por la inclinación de la cuerda del perfil, que hace que la capa límite no se pueda adherir en la zona superior y se desprenda tras incidir sobre la cola del álabe. Como se puede apreciar, el desprendimiento de capa límite es mayor en la Figura 4.8.c) que en la Figura 4.8.b), ya que en el primero la inclinación de la cuerda es mayor, es decir, el ángulo de Pitch es menor, lo que provoca un mayor desprendimiento. En esta posición sería interesante estudiar el ángulo de Pitch positivo, ya que podría darse el caso de que esta posición sea favorable, y el fluido provoque un empuje sobre el perfil.

4.3.5: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=240^\circ$

Ahora se van a comentar los vectores de velocidad, coloreados por presiones, representados en la Figura 4.9, correspondientes a la posición de álabe de 240° . En esta ocasión se ha empleado un rango de valores de presión comprendido entre -655 y 1.200 Pa. Las subfiguras a, b y c siguen el mismo orden de las anteriores, siendo 0° , -6° y -12° respectivamente.

En la Figura 4.9.a se aprecia una zona de desprendimiento en la cabeza de álabe, junto con un punto de remanso (zona de mayor presión y velocidad 0 m/s). Los vectores de velocidad rojos más grandes se deben a las zonas de adherencia sobre el perfil, ya que este gira a 4 rad/s, siendo su velocidad lineal de 2 m/s ($R=0,5$), y la velocidad del fluido es, aproximadamente de 1 m/s o menor.

En las subfiguras 4.9.b y 4.9.c se aprecia una zona de desprendimiento, en la cola del perfil, y dos de recirculación, una en la cola y otra en la cabeza siendo éstas bastante grandes, por lo que se producirá una gran disipación de energía en forma de turbulencia, pero cómo se produce aguas debajo de la turbina, esta no tendrá influencia sobre el comportamiento del generador, a no ser que se sitúe otro, aguas debajo de este.

También se aprecia que hay una diferencia de presiones bastante grande entre el intradós y el extradós del perfil, lo que motivará una fuerza sobre el perfil, siendo esta posición favorable para ángulos de pitch negativos pequeños, ya que la situación correspondiente al pitch de -6° es más favorable que la de -12° , alcanzándose una mayor diferencia de presión, aunque el fluido incide con una inclinación diferente en cada uno de los perfiles, por lo que la descomposición de la fuerza resultante en fuerza de arrastre y fuerza de sustentación variará en ambos perfiles, pudiendo ser un trabajo futuro el estudio de la influencia del Pitch en la diferencia de presiones y en el ángulo de incidencia, buscando un compromiso entre ambos, que de cómo resultado la máxima fuerza de arrastre.

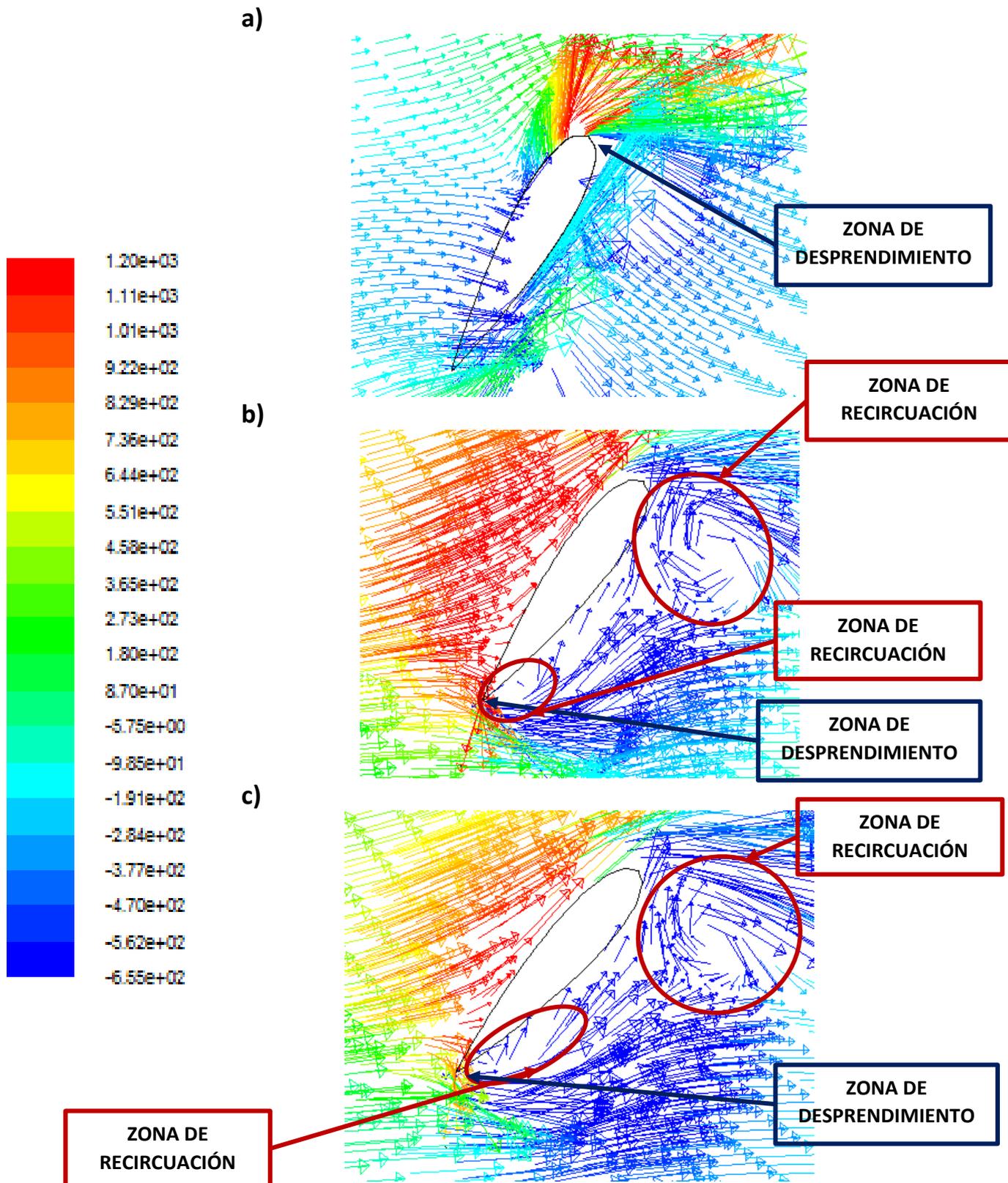


Figura 4.9: Vectores de velocidad, coloreados por presiones, para posición 240°

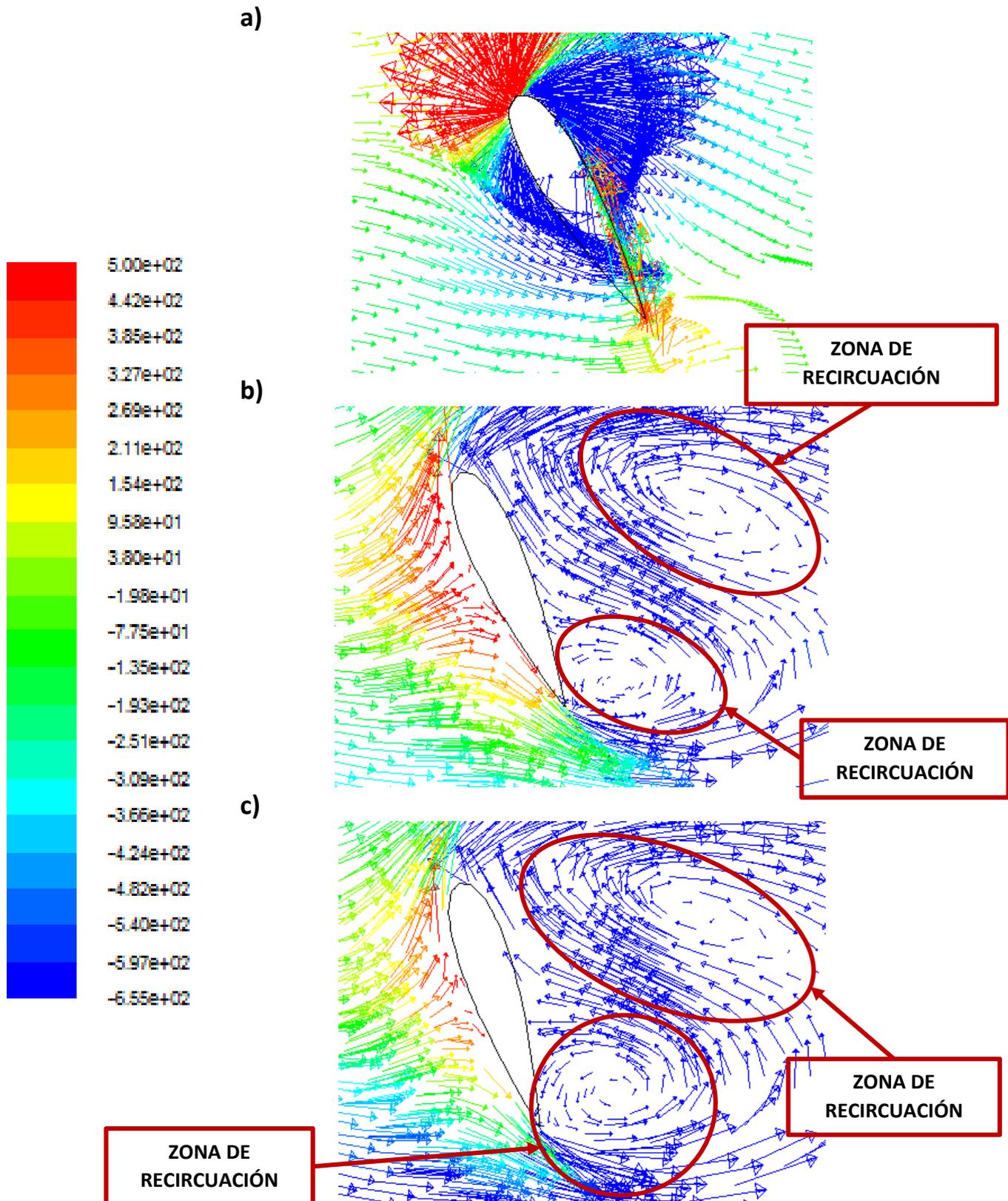


Figura 4.10: Vectores de velocidad, coloreados por presiones, para posición 300°



4.3.5: Vectores de velocidad para la posición $\alpha=300^\circ$

La Figura 4.10 representa los vectores de velocidad, coloreados por presiones, para la posición de 300° , siendo las figuras a, b y c las correspondientes a los ángulos de Pitch 0° , -6° y -12° respectivamente. En este caso se ha empleado un rango de presiones de entre -655 y 200 Pa.

En la Figura 4.9.a) se puede apreciar cómo el fluido permanece adherido por ambas caras del perfil, no existiendo diferencias de presiones entre sus caras, pero sí entre su cabeza y su cola, de modo que es de esperar que haya un punto de remanso en la zona de mayor presión (la cabeza). Por estas razones se puede decir que esta posición no es ni favorable ni desfavorable, ya que ni produce pérdidas, ni aparecen fuerzas que favorezcan el giro de la turbina.

En las figuras 4.10.b y 4.10.c aparecen don zonas de recirculación bastante grande, suponiendo una gran disipación de energía en forma de turbulencia, que tendrá los mismos efectos que se comentaron sobre las figuras 4.9.b y 4.9.c.

En este caso, al igual que el anteriormente mencionado, aparece una diferencia de presiones entre en intradós y el extradós del perfil, pero en este caso en mucho menor, y debido al ángulo de incidencia del fluido, que es prácticamente normal a la cuerda del perfil, no se producirá fuerza de arrastre, sólo de sustentación, por lo que no favorecerá el giro, y producirá una fuerza que debe de ser soportada tanto por el brazo del álabe, cómo por el poste que lo sostiene.



Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se van a comentar las conclusiones extraídas de los estudios expuestos en los capítulos previos, y se comprobará si se han cumplido los objetivos que se expusieron en el Capítulo 1.

Posteriormente, y tras haber extraído las conclusiones, se procederá a exponer una serie de trabajos y estudios futuros que se podrán realizar a partir de este, con el fin de ahondar en el estudio de este tipo de turbias, ya que, cómo se vio en la introducción del Capítulo 1, se hace patente la necesidad de investigación en este campo.

5.1: Conclusiones

A continuación, se van a exponer y desarrollar las conclusiones derivadas de los estudios realizados.

- Como primer objetivo se expuso la necesidad de generar un modelo numérico adecuado, que se adaptase con la mayor exactitud posible a los resultados experimentales de los que se disponía, y teniendo siempre rigor experimental a la hora de realizar las simulaciones y generar los resultados, pudiéndose decir que se ha conseguido notablemente, ya que en todos los ensayos realizados se ha respetado y alcanzado la convergencia de resultados esperada según se expuso en los capítulos 2, 3 y 4.
- También se puede decir que los resultados numéricos del Capítulo 3 se adaptaban relativamente bien a los resultados experimentales que se tenían, ya que ambas curvas características eran bastante similares, pudiéndose emplear la ecuación obtenida como medio de cálculo para obtener tendencias y ordenes de magnitud de variables relativas a la turbina hidráulica que se ha estudiado.
- Por todo esto se puede decir que la calidad del modelo numérico con el que se ha trabajado es bastante alta, ya que no sólo funciona bien a la hora de generar resultados, sino que, además, estos resultados obtenidos son de calidad, adaptándose con relativa exactitud a los obtenidos experimentalmente.
- En cuanto a las conclusiones relativas al Capítulo 2 se puede decir que este tipo de aerogenerador no podrá ser utilizado como elemento de generación de energía, ya que el rendimiento que ofrece es bastante reducido, pudiendo obtenerse un mejor rendimiento con otro tipo de perfil, o con otros parámetros geométricos, aunque el resultado que se ha obtenido debe ser tenido en cuenta ya que es un sistema de autoarranque válido, pudiendo resultar este sistema de ayuda ante las dificultades de autoarranque que poseen muchas de estas turbinas.



- Para el Capítulo 3, tras haberse obtenido la curva característica y haberse analizado el patrón de flujo se puede decir que, en su punto de funcionamiento esta turbina hidráulica tiene un rendimiento aceptable, por lo que podría ser instalada como posible método de generación de energía, habiéndose visto que, para dicho punto de funcionamiento se tienen muy pocas posiciones desfavorables, lo que supone una ventaja a la hora de generar energía.
- En el Capítulo 4, al analizar la influencia del ángulo de Pitch de -6° y -12° sobre la turbina hidráulica, se obtuvo que el rendimiento cae enormemente, por lo que no se considerará como mejora, no siendo recomendable su aplicación en esta turbina.

5.2: Trabajos Futuros

Este estudio puede tomarse como punto de partida para nuevos estudios que darán una mayor consistencia y fiabilidad al funcionamiento de estas turbinas, siendo necesaria la continuidad de esta rama de investigación con el fin de tener un mejor conocimiento de las características y puntos fuertes y débiles de estos dispositivos, con el fin de optimizar su funcionamiento de cara a obtener el mayor rendimiento posible, y atendiendo a las características de cada zona en la que se vayan a instalar, obtenido, de este modo, un compromiso entre las características del entorno y las del dispositivo, que permitirá la optimización en la generación de energía.

Algunos de los estudios que se pueden realizar a partir de este proyecto son:

- Estudio de diferentes características geométricas (ángulo de Pitch, solidez) para el aerogenerador NACA 4518 para comprobar las tendencias de variación de su rendimiento, comprobando si este perfil es útil a la hora de generar energía.
- Para el modelo de turbina hidráulica con perfiles NACA 0020, realizar un modelo de cavitación, para comprobar si en las zonas de baja presión se alcanza dicho fenómeno, ya que este puede ser perjudicial para el dispositivo, produciendo un descaste sobre los perfiles que podría tener una influencia negativa sobre el rendimiento de la turbina.
- En cuanto a los ángulos de Pitch sobre la turbina, analizar ángulos de Pitch negativos de en torno a -3° , y comprobar su influencia, ya que para ángulos menores se ha demostrado que no suponen mejora.
- Para el mismo modelo, se podrá estudiar la influencia de los ángulos de Pitch positivos, ya que en el análisis del patrón de flujo dejaba entrever que el rendimiento podría mejorar para este tipo de ángulos.
- Probar y estudiar la posible implantación de un ángulo de Pitch variable, que, en cada instante de tiempo adopte la posición más favorable de modo que en todo momento se produzca una optimización del rendimiento.



Referencias

- [Lanzafame-2014]**, Rosario Lanzafame, Stefano Mauro, Michele Messina. "2D CFD Modelling of a H-Darrieus Wind Turbines using a Transition Turbulence Model". Energy Procedia 45 (2014)131-140.
- [Martinez-2012]**, Víctor M. Martínez Fernández. "Cálculo Computacional de Perfiles Aerodinámicos en Aeroturbina". PFC Universidad de Zaragoza 2012.
- [Cáceres-2014]**, Sergio Alfonso Cáceres Luque. "Estudio y Modelamiento de una turbina Eólica de Eje Vertical de Pequeña Escala". Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile 2014.
- [Regidor-2014]**, Regidor Sánchez, María. "Influencia del ángulo de Pitch en una VAWT con perfiles NACA 0015 aplicando modelos de turbulencia para números de Reynolds moderados mediante CFD". TFG UVa 2014.
- [Esteban-2014]**, Miguel Esteban Fernández. "Estudio Numérico de la Influencia de la solidez en Aerogeneradores H-Darrieus con perfiles NACA 0025". PFC UVa 2014.
- [González-2014]**, Fernando González Díez. "Análisis CFD de Aerogeneradores H-Darrieus. Influencia de la solidez en perfiles asimétricos NACA". PFC UVa 2014.
- [Gómez-2015]**, Gómez García, Víctor. "Estudio computacional de una turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con perfiles NACA 4518". TFG UVa 2015.
- [Parra-2014]**, Teresa Parra-Santos, Armando Gallegos-Muñoz, Miguel A. Rodríguez-Beneite, Cristóbal Uzarraga Rodríguez, Francisco Castro-Ruiz. "Numerical Modelling of Vertical Axis Wind Turbines". FEDSM 2014-21356.
- [El-Samanoudy-2010]**, M. El-Samanoudy, A.A.E. Ghorab, SH. Z. Youssef. "Effect of some design parameters on the performance of a Giromill vertical axis wind turbine". Ain Shams Engineerin Journal (2010) 1, 85 95.
- [Gupta-2010]**, R. Gupta, Agnimitra Biswas. "Computational fluid dynamics analysis of a twisted three bladed H-Darrieus rotor". Journal of Renewable and Sustainable Energy 2, 043111 (2010).
- [Bianchini-2015]**, Alessandro Bianchini, Giovanni Ferrara, Lorenzo Ferrari. "Pitch Optimization in Small-size Darrieus Wind Turbines". Energy Procedia 81 (2015) 122-132.
- [Mohamed-2015]**, M.H. Mohamed, A.M. Ali, A.A. Hafiz. "CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter". Engineering Science and Tecnology, an International Journal 18 (2015) 1 13.
- [SANDIA-2014]**, V.S. Neary, A.A. Fontaine, P. Bachant, B. Gunawan, M. Wosnik, C. Michelen, R.J. Meyer. W. A. Stranka. "US Department of Energy (DOE) National Lab Activities in Marine Hydrokinetics: Scaled Model Testing of DOE Reference Turbines". Sandia National Laboratories 2014.



[Franquesa 2014], Manuel Franquesa Voneschen. “Cómo construir un generador eólico con un barril de petróleo de 200 litros para producir energía sin el contenido del mismo”. La Veritat 2008.

Páginas web:

<http://www.aeeolica.org> (Fecha de última visita 01/06/2016)

<http://www.wenergy.com> (Fecha de última visita 01/06/2016)

<http://www.ecosources.info> (Fecha de última visita 01/06/2016)

<http://www.reuk.co.uk> (Fecha de última visita 01/06/2016)

<http://www.turbinesinfo.com> (Fecha de última visita 01/06/2016)

<http://www.thebackshed.com> (Fecha de última visita 01/06/2016)

<http://www.dpacolombia.8k.com> (Fecha de última visita 01/06/2016)



Anexos

A continuación, se va a introducir un resumen de los parámetros y condiciones que se han implementado en Fluent, ya que es probable que se necesite trabajar con las mismas condiciones en trabajos futuros, sirviendo este anexo cómo apoyo para realizar el modelo:

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



Universidad de Valladolid

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

Condition

Value

Material Name

water-liquid

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)

5

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/m2) 0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m2) 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
Condition
Value
-----
-----
-----
-----
Material Name
water-liquid
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 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

```



Universidad de Valladolid

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



Universidad de Valladolid

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)	1
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 (m2/s2)	1



```

Specific Dissipation Rate (1/s)      1
Turbulent Intensity (%)              0.099999994
Turbulent Length Scale (m)          1
Hydraulic Diameter (m)              0.1
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



Universidad de Valladolid

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



Universidad de Valladolid

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



Universidad de Valladolid

```
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          First Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy  First Order Upwind
Specific Dissipation Rate  First 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
Minimum Spec. Dissipation Rate  1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio  100000
```

Material Properties

Material: water-liquid (fluid)

```
Property          Units    Method    Value (s)
-----
Density           kg/m3    constant  998.2
Cp (Specific Heat)  j/kg-k    constant  4182
Thermal Conductivity  w/m-k    constant  0.6
Viscosity         kg/m-s    constant  0.001003
Molecular Weight    kg/kgmol  constant  18.0152
L-J Characteristic Length  angstrom  constant  0
```



L-J Energy Parameter	k	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f
Material: air (fluid)			
Property	Units	Method	Value (s)

Density	kg/m ³	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

