



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

---

**Universidad de Valladolid**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Análisis CFD sobre la influencia del pitch en  
hidrogeneradores de eje vertical H-Darrieus con  
perfiles simétricos NACA 0020**

**Autor**

Arturo González Arnáiz

**Tutores**

Teresa Parra Santos

**Departamento de  
Ingeniería Energética  
y Fluidomecánica**

Valladolid, junio 2017



**Gracias a mis padres por posibilitarme una educación universitaria, y permitirme perseguir mis sueños.**

**Especial mención, a aquellos que me enseñaron, apoyaron, y guiaron en este pasó de la vida, que supone la universidad.**

**Gracias a los componentes de este grupo de trabajo por el buen desarrollo del mismo.**



## Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado, consistirá en un análisis mediante CFD, de una turbina mareomotriz, de eje vertical con 3 álabes y perfiles tipo NACA 0020. El objetivo del análisis es, la comprobación sobre la influencia del pitch en el modelo, para así, obtener el punto de funcionamiento óptimo. Para tal propósito en primer lugar, se pretenderá obtener un método de trabajo sistemático que permita obtener simulaciones verídicas. El fin del trabajo es aportar un poco más al desarrollo de las energías renovables.

## Palabras claves

Turbina Mareomotriz, H-Darrieus, Pitch variable, CFD, Renovable.

## Abstract

The final degree project, will consist in a CFD analysis, of a tidal turbine, of a vertical axis, with 3 foils with profiles type NACA 0020. The objective of the analysis is testing about the influence of the pitch in the model, and then, find the point of better performance. For this purpose first, it will be obtained a systematic way to work, and give for correct the simulations. The purpose of the project, is supporting the development of the removable energies.

## Keywords

Tidal turbine, H-Darrieus, Variable Pitch, CFD, Removable.



## Índice

Resumen.....	5
Palabras claves .....	5
Abstract .....	5
Keywords.....	5
Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1. Energía mareomotriz en la actualidad .....	10
1.2. Tipos de generadores.....	11
1.2.1. Turbinas Mareomotrices de Eje Horizontal (HATT) .....	11
1.2.2. Turbinas Mareomotrices de Eje Vertical (VATT) .....	12
1.3. Estado del Arte .....	13
1.4. Objetivos .....	14
1.5. Estructura de la memoria.....	14
Capítulo 2. Modelo Físico y Computacional.....	17
2.1. Modelo Físico .....	17
2.1.1. Parámetros físicos geométricos .....	18
2.1.2. Perfil NACA .....	19
2.2. Parámetros adimensionales.....	21
2.2.1. Grado de Solidez, $\sigma$ .....	21
2.2.2. Tip Speed Ratio, TSR.....	21
2.2.3. Coeficiente de par, $C_m$ .....	22
2.2.4. Coeficiente de potencia, $C_p$ .....	22
2.3. Modelo numérico.....	22
2.3.1. Condiciones de contorno .....	23
2.3.2. Discretización espacial .....	25
2.3.3. Características del fluido .....	25
2.3.4. Variación del número de celdas.....	26
2.3.5. Modelo computacional .....	30
Capítulo 3. Análisis de los resultados.....	33
3.1. Validez de los resultados.....	33
3.2. Modelo base inicial .....	34
3.2.1. Obtención de la curva de par y potencia de la turbina .....	34
3.2.2. Curva característica .....	36
3.2.3. Contornos y diagramas.....	39
Capítulo 4. Influencia del Ángulo de Pitch .....	47
4.1. Resultados numéricos .....	47



4.1.1.	Curvas de potencia .....	47
4.1.2.	Coeficiente de potencia frente al ángulo .....	49
4.2.	Análisis del patrón de flujo.....	50
4.2.1.	Contornos de presión del análisis paramétrico.....	51
4.2.2.	Contornos de vorticidad del análisis paramétrico .....	52
4.2.3.	Contornos de velocidad del análisis paramétrico .....	54
Capítulo 5.	Conclusiones y trabajos futuros.....	59
5.1.	Conclusiones del estudio.....	59
5.2.	Investigaciones futuras .....	60
Referencias.....		61
Anexo .....		63
	Sumario de los parámetros del modelo de Fluent para permitir su reproducción .....	63

## Capítulo 1. Introducción

El ser humano siempre ha empleado los recursos existentes a su alrededor para satisfacer sus necesidades. En un primer lugar valiéndose del calor del fuego para calentarse y cocinar los alimentos, empleando animales como instrumento de fuerza para facilitar el trabajo humano, y más adelante con el uso de norias aprovechando la corriente de los ríos para originar el movimiento de un eje.

Son muchos los ejemplos por los cuales la humanidad ha buscado en la naturaleza los medios para la obtención de energía y potencia, y el sentido en el que avanza la misma no hace pensar que esta tendencia vaya a cambiar su rumbo. En este mundo, la energía eléctrica es imprescindible para el desarrollo de la vida. Son muchas las formas de extracción de energía eléctrica.

### Capacidad Instalada del grupo Iberdrola (MW)

La capacidad instalada se sitúa en 47.324 MW.

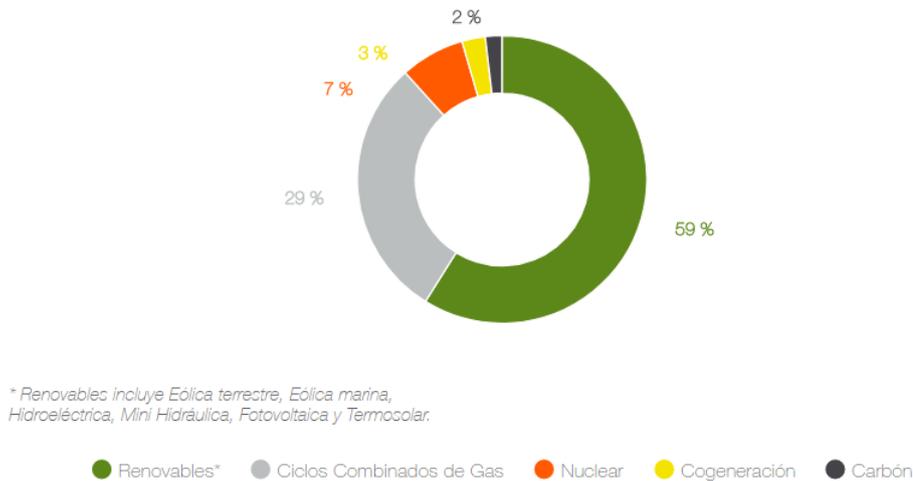


Figura 1-1 Origen porcentual en función del tipo de producción de energía [Iberdrola, 2017]

Como ilustra el gráfico de la figura 1-1, alrededor del 41% de la producción de energía es propia de las llamadas energías no renovables, todas ellas basadas los distintos tipos de recursos fósiles. Mientras que 59% se basa en el aprovechamiento directo de las energías que la naturaleza pone a disposición, de forma ilimitada, las energías renovables.

La problemática surge hace unos años, cuando los recursos fósiles, que en un primer momento abundaban en la naturaleza, comienzan a escasear. Al mismo tiempo, con el cambio de mentalidad del ser humano, cada vez se agudiza más la preocupación sobre los efectos negativos, que la combustión de los recursos fósiles, produce sobre la tierra.

Todo ello hace pensar que con los años la única alternativa, es un mundo basado en tecnologías energéticas “limpias”, y se habla de limpias, puesto que no existe sistema de generación energética que no tenga algún tipo de impacto en el medio ambiente y de eficacia total. Todo se traduce en coste, pero bien es cierto que las posibilidades son enormes, y existen métodos diversos cuyo impacto en el entorno es diferente. Como refleja la figura 1-1, los últimos datos son esperanzadores, pero aun así, los datos de la producción neta no se encuentran a la altura de la potencia instalada. Es por ello, el deber del desarrollo de estas tecnologías para lograr satisfacer el consumo y a la vez garantizar un futuro sostenible.

### 1.1. Energía mareomotriz en la actualidad

La energía mareomotriz es un tipo de energía renovable basada en el aprovechamiento de las corrientes marinas tanto en mar abierto, como en las costas, valiéndose de la variación del nivel del agua debido a las mareas.

La energía obtenida a partir de los generadores colocados en las corrientes acuáticas, se podría clasificar como una generación intermedia entre la eólica y la hidráulica. Esta comparte semejanzas con ambos grupos, por un lado se vale de las corrientes inducidas por los movimientos naturales del agua, como ocurría para las eólicas con las de viento. Por otro lado al valerse de agua para su propósito, la clasificación dentro de las hidráulicas es obvia, pero por su lado en lugar de utilizar la energía potencial del agua para su propósito, emplea únicamente la energía cinética. Por ello los hidrogeneradores o turbinas mareomotrices, no entran en competencia directa con ninguno de los grupos citados, y es por ello un procedimiento idóneo para la explotación del recurso que supone.

Su campo de aplicación es el propio de las mareas, cursos de ríos o en alta mar con grandes corrientes. Es importante diferenciar que para cada aplicación las dimensiones, así como la geometría de las turbinas, variarán para adecuarse de forma óptima al flujo energético puesto a disposición. Es por ello que se podrán encontrar desde grandes turbinas de eje horizontal para flujo libre, como pequeñas turbinas más propias de la energía hidráulica, para flujo guiado en el que se cree una diferencia de energía potencial a causa de la marea.

Particularizando para España, la producción de energía mareomotriz es prácticamente despreciable frente a otros tipos de energía. Por ejemplo, en comparación con la energía eólica, con la que en gran medida se encuentra relacionada, la potencia instalada a lo largo de la Península es de alrededor de los 23 GW (2016), esto supone que la potencia eólica en España, supone alrededor del 31.4% sobre la total. Por su parte, la energía mareomotriz, apenas llega a decena de MW, siendo su aportación despreciable.



Figura 1-2 Potencia energética por longitud de costa, en España [SMI Energía Renovables, 2011]

El potencial de España para el desarrollo de la energía marina es enorme, debido a la geometría de la Península, y las islas de las que dispone, existen un total de aproximadamente 3500 km de costa, lo cual se traduce en unos 20 GW. Considerando que la costa Cantábrica y Atlántica, presentan una gran actividad marina, estos puntos son los más interesantes para la implantación de las turbinas. Es por ello que las comunidades autónomas de esas regiones se encuentren investigando su aplicación, pero aun el estudio se encuentra en fase experimental.

Otro de los frentes abiertos es el llamado “Proyecto Magallanes” un prototipo de un artefacto flotante que dispone de hidrogenadores sumergidos, que se pretende implantar a lo largo de la costa gallega.

## 1.2. Tipos de generadores

Debido a la semejanza geométrica evidente entre los aerogeneradores y las turbinas marinas, se puede generalizar, a la hora de atender a la clasificación en función del tipo de geometría. En primer lugar, ateniendo al sentido de la disposición del eje de giro se pueden diferenciar 2 tipos de generadores principales, ver figura 1-3, los modelos representados en la figura, se refieren a aerogeneradores:

### 1.2.1. Turbinas Mareomotrices de Eje Horizontal (HATT)

Los generadores de eje horizontal, son los más implantados y desarrollados en el mundo eólico por el momento. Su presencia está muy extendida por los parques eólicos, a causa de su mayor desarrollo trabajan en intervalos de mayor potencia.

Se caracterizan por la elevada altura a consecuencia de la longitud de los álabes, y por requerir que el generador o alternador, deba situarse en la cabeza del mismo, dificultándose las labores de reparación y mantenimiento a consecuencia de la altura.

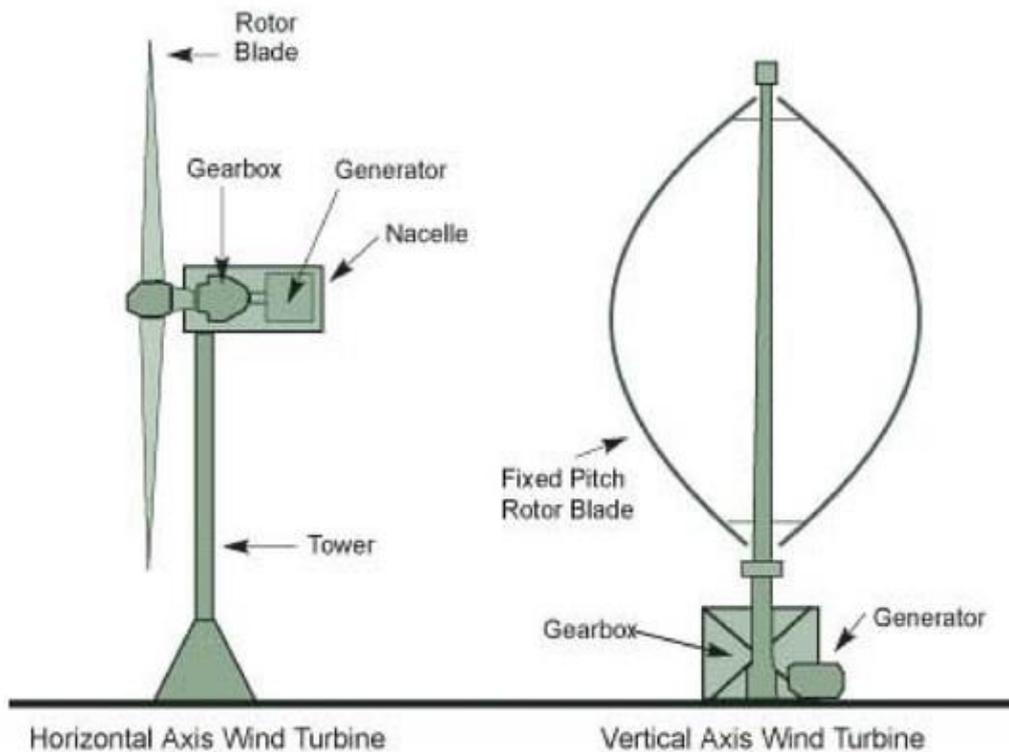


Figura 1-3 Tipos de aerogeneradores ateniendo al sentido del eje de giro [Pinterest]

### 1.2.2. Turbinas Mareomotrices de Eje Vertical (VATT)

Su implantación en el entorno eólico, está caracterizada por la aplicación para baja potencia, y reducido tamaño, a causa de ello, el desarrollo sufrido ha sido mucho menor en comparación con las horizontales. Sin embargo, para aplicaciones marinas, a causa del alto flujo energético puesto a disposición del generador, lo cual a la par de crear grandes generaciones de potencia en comparación con la aplicación eólica, también genera altas tensiones estructurales del material en cuanto a las fuerzas soportadas, hace idóneo un menor tamaño de turbina, es por ello que la implantación es mayor en este entorno. Esto es a causa de las limitaciones en cuanto a rendimiento a causa de la geometría.

Existen muchas configuraciones en cuanto a la forma de los álabes, como denota la figura 1-4.

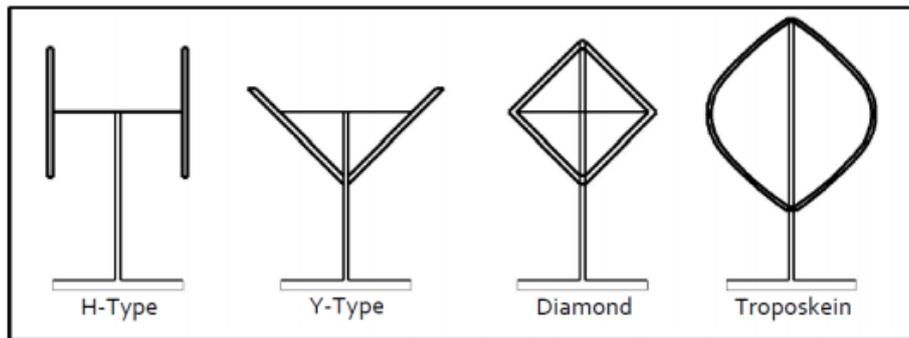


Figura 1-4 Tipos de geometría en turbinas Darrieus de eje vertical [Cáceres, 2014]

Uno de los puntos fuertes de su diseño se encuentra en la situación del generador, a nivel del suelo.

El modelo a desarrollar en este proyecto que se presenta, constará de una turbina del tipo H-Darrieus, dotado con 3 álabes verticales, de dimensiones reducidas y con aplicación en corrientes acuáticas, como pueden ser las de ríos. Por su modesto tamaño, su aplicación está destinada para la generación de baja potencia de alrededor de 0.2 kW La posible aplicación de sustento para poblaciones rurales apartadas.

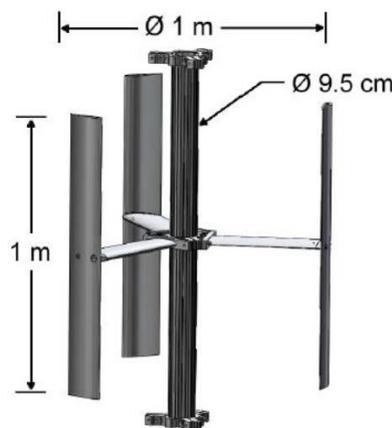


Figura 1-5 Modelo de turbina empleado en los experimentos [SANDIA, 2014]

Pese a que con el tiempo se ha ido viendo que la tecnología de eje horizontal se encuentra más desarrollada, existen claras ventajas competitivas al hablar del eje vertical, sea tanto el entorno eólico como en el acuático:

- **No requieren de mecanismos de orientación:** a consecuencia de la geometría simétrica respecto de los planos verticales. La producción de potencia instantánea es variable a lo largo del recorrido del álabe en su recorrido alrededor del eje, sin embargo, está es independiente de la dirección del flujo.
- **Coste reducido:** la menor complejidad en cuanto la geometría de los álabes, la menor sollicitación estructural, la carencia de mecanismo de orientación, y su fabricación sencilla minimizan el coste comparado con el HAWT.
- **Impacto ambiental:** el tamaño es mejor y por lo tanto no requiere de grandes superficies para su instalación, al mismo tiempo que el ruido derivado de su funcionamiento es menor al no forzar tanto los rodamientos y estar más equilibrado.
- **Mantenimiento:** como se ha advertido, la ventaja en cuanto a la situación del mecanismo de reducción de velocidad y el alternador es clara, al no situarse el mismo a demasiada altura.

Al mismo tiempo también cabe citar las carencias del diseño que han llevado a que su desarrollo se haya visto ralentizado:

- **Rendimiento:** principal culpable del pequeño desarrollo, en comparación con el HAWT, que ha sufrido esta tecnología.
- **Par variable:** el par y por lo tanto al potencia no es constante como en el caso del HAWT, sino que a medida que la geometría avanza por las diversas posiciones que ocupa, el coeficiente de par se modifica, dando como resultado un valor mínimo culpable en parte de la siguiente desventaja.
- **Problemas de autoarranque:** Uno de los puntos flacos del diseño de eje vertical se basa en el problema de su funcionamiento autónomo, requiriendo en algunos casos de mecanismos para iniciar el movimiento.

Por estas razones el estudio que se presenta, va a centrarse en actuar sobre los parámetros, como son el problema del rendimiento y de autoarranque. En el caso de que se consigan resolver, unidas a las ventajas de las que ya disponen, se podrá hablar de la implantación total de las turbinas de eje vertical.

### 1.3. Estado del Arte

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

[Zhang, 2012] publica el trabajo *“The hydrodynamic characteristics of free variable pitch vertical axis tidal turbine”*. Con la intención de la comparación entre diferentes modelos con ángulos de pitch fijos y variables, este estudio, demostró: la buena capacidad de arranque de los segundos; unas condiciones de ángulo de ataque óptimas, posibilitan una menor interferencia en cuanto a la estelas de los álabes, minimizando la interferencia; y el buen dimensionamiento de los ángulos límites de la misma permite una mayor producción de potencia.

[Jing, 2013] en su trabajo *“Experimental research on tidal current vertical axis turbine with variable-pitch blades”*. El estudio tuvo por objetivo el estudio experimental de las turbinas de eje vertical, tan necesario para verificar los resultados numéricos como los de este trabajo. En el estudio se estudió la influencia de la variación de múltiples parámetros, como son la solidez, pitch, número de álabes o excentricidad.

[Marsh, 2014] realiza el trabajo *“Three-dimensional numerical simulations of straight-bladed vertical axis tidal turbines investigation power output, torque ripple and mounting forces”*. Se centró en el efecto provocado sobre la salida de potencia, la fluctuación del par y la fuerza en los elementos de montaje, por el resto de parámetros. El estudio basado en un modelo de 3D, concluyó que la variabilidad de la potencia en función del tipo de elementos constructivos era determinante (50%). Así como que la relación entre la fuerzas en los elementos de montaje era directamente proporcionales al coeficiente de velocidad, TSR, y que la fluctuación del par era máxima para las condiciones de potencia máxima, es decir en el punto de diseño.

[Marsh, 2015] en su trabajo, *“The influence of turbulence model and two and three-dimensional domain selection on the simulated performance characteristics of vertical axis tidal turbines”*. Realizaron un estudio sobre la variación que produce en turbinas de eje vertical submarinas la variabilidad del modelo (2D y 3D) así como del modelo de turbulencia elegido, concluyendo que de cara a la economía computacional y al rango para el cual la solución converge, el modelo de 2D, sin componentes estructurales, gana ventajosamente. Por otro lado de cara a la precisión en comparación con resultados experimentales, es el modelo 3D con turbulencia tipo  $k-\omega$  SST, la más adecuada.

#### 1.4. Objetivos

Los objetivos del trabajo de fin de grado son:

- De una forma rigurosa, llevar a cabo un estudio bidimensional, sin elementos constructivos de un modelo de turbina marina de eje vertical, del tipo H-Darrieus, obteniendo resultados con suficiente grado de convergencia y periodicidad.
- Obtener las curvas de potencia frente al coeficiente de velocidad, TRS, para los diferentes modelos geométricos. La importancia de estas gráficas es vital para predecir su rango de funcionamiento y la capacidad de aprovechamiento energético, de la turbina.
- Establecer una concordancia entre el rendimiento y los distintos fenómenos observables en el flujo, como son: formación y desprendimiento de torbellinos, estelas o interferencias del flujo.
- A partir del estudio paramétrico a la hora de modificar el pitch, obtener conclusiones, valiosas para el desarrollo de este tipo de energía renovable en el mundo energético.

#### 1.5. Estructura de la memoria

A modo de índice justificado, a continuación se presentan los contenidos de los que constará cada capítulo de esta memoria:

- **Capítulo 1 – Introducción:** se procede a introducir al lector al mundo energético basado en el aprovechamiento de los flujos, así como, se relatan algunos antecedentes para dar una dimensión del punto de investigación actual.
- **Capítulo 2 – Modelo:** mediante una descripción rigurosa tanto del modelo geométrico físico, como del modelo numérico, empleado para las simulaciones. Se introduce la nomenclatura empleada para las posteriores justificaciones.
- **Capítulo 3 – Análisis de los resultados:** se explican los pasos seguidos a la hora de llevar a cabo el proceso de verificación en términos de convergencia, y se realiza un análisis de los contornos de las variables, para interpretar el patrón de flujo. A partir de ahí, todas las simulaciones se basaran en este procedimiento.
- **Capítulo 4 – Análisis paramétrico:** mediante la modificación del pitch del álabe, se exponen en referencia a un modelo de referencia, las principales diferencias en

términos de patrón de flujo y rendimientos, de todas las simulaciones llevadas a cabo.

- **Capítulo 5 – Conclusiones y Trabajos futuros:** a modo de síntesis, se realiza un resumen de todo lo anterior, procurando dar respuesta al objetivo del trabajo, y por último, se citan las líneas para futuras investigaciones.



## Capítulo 2. Modelo Físico y Computacional

### 2.1. Modelo Físico

La turbina marina del tipo H-Darrieus con álabes verticales sin torsión, es un tipo de *Vertical Axis Tidal Turbine*, de pequeño tamaño, ideado para el aprovechamiento de corrientes de agua de baja velocidad, de entre 1 a 3 m/s, en corrientes abiertas con un diseño sencillo y por ello económico.

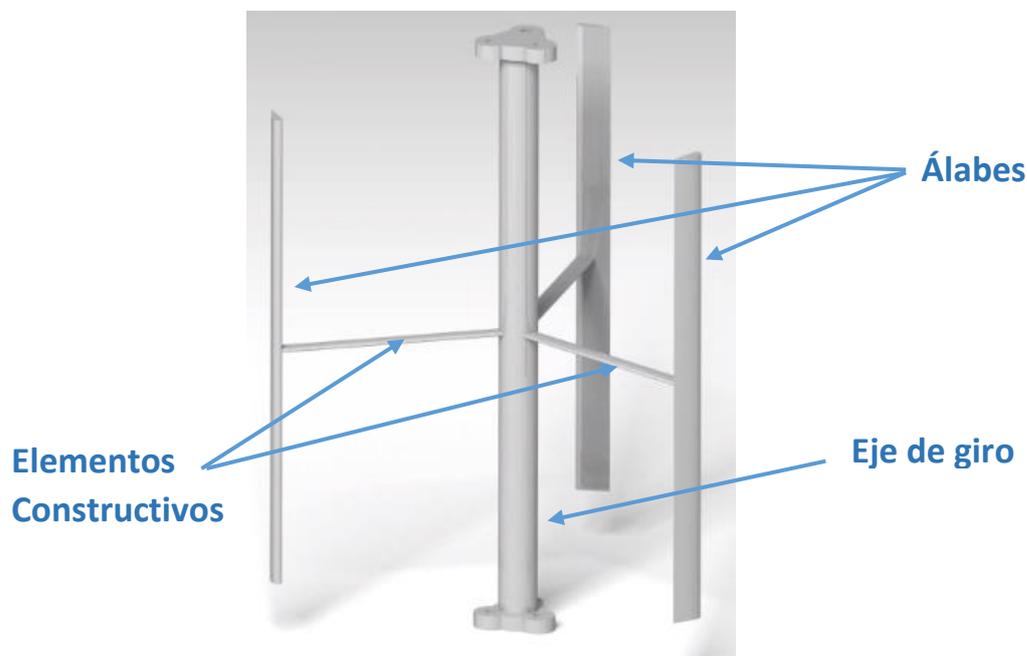


Figura 2-1 Principales componentes de la turbina de eje vertical

El modelo simplificado se implementará en una corriente de agua a 1 m/s de velocidad, semejante a la que se puede encontrar a lo largo de ríos y mares. A consecuencia de la baja velocidad, se trabajará con Reynolds de valores bajos, y al mismo tiempo al tratarse de agua, el fluido es incompresible.

Para la adecuación del trabajo y el estudio a realizar en comparación con el nivel de un Trabajo de Fin de Grado, se proceden a realizar ciertas simplificaciones que ayudarán a reducir el coste computacional que requieren las simulaciones.

- **Modelo bidimensional:** Al tratarse de álabes sin torsión, completamente verticales, y a una cierta profundidad, en la que las propiedades del agua es constante a lo largo de la coordenada vertical, Z. El modelo en 2D reproduce con suficiente fiabilidad el funcionamiento de una turbina marina del tipo H-Darrieus. Asimismo como evidencia el estudio [Marsh, 2015], habrá que tener en cuenta la sobreestimación sobre el coeficiente de potencia obtenido en las simulaciones, a consecuencia de despreciar las fuerza longitudinal en el eje, así como, las turbulencia y flujos tridimensionales.
- **Eliminación de elementos constructivos:** consecuente con la simplificación del modelo 3D se eliminan los elementos auxiliares de sujeción de los álabes, como son el eje, y los brazos de unión entre éstos. Todos ellos generan una modificación del flujo que deriva en turbulencia, la cual empeora el comportamiento de la turbina

marina. Esta nueva sobreestimación también habrá que tenerla en cuenta de cara a la interpretación de los resultados.

### 2.1.1. Parámetros físicos geométricos

A modo de hacer más claro la siguiente parte de análisis e interpretación, se van a definir los distintos parámetros relativos a la geometría del generador, así como los que permiten cuantificar la eficacia del mismo.

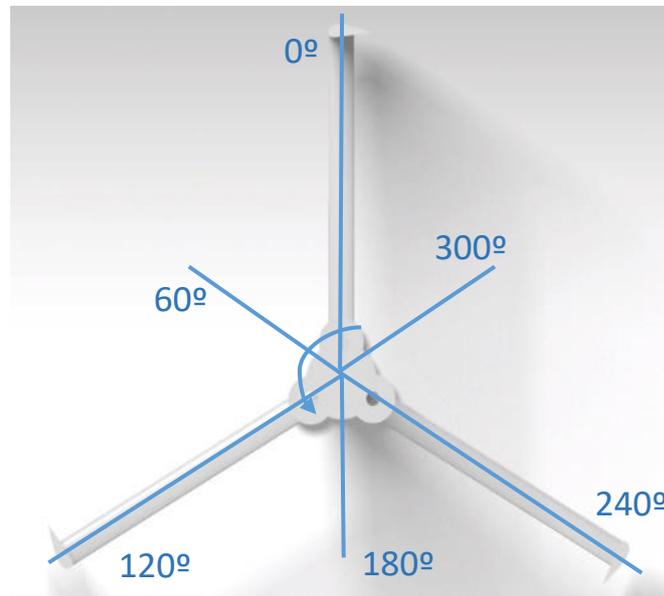


Figura 2-2 Designación de los distintos ángulos, y sentido de giro del rotor

- **Radio de giro, R (m):** Distancia desde el centro de giro hasta el centro de los álabes circundantes.
- **Número de álabes, z:** Cantidad de álabes alrededor del eje, por lo general repartidos de forma equidistante e equiangular.
- **Envergadura del modelo, b (m):** Distancia según la coordenada vertical, Z entre en inicio y el final el álabe
- **Área del rotor, A (m<sup>2</sup>):** Resultado del producto de las dimensiones designadas, en la dirección del flujo.

$$A = 2 \cdot R \cdot b \quad (2.1)$$

- **Pitch (°):** Ángulo formado por la cuerda de los álabes en referencia con la dirección tangencial en el recorrido circular alrededor del eje, correspondiente al 0°. El sentido de los ángulos positivos corresponderán cuando la cola del álabe se aleja del eje, y los negativos para el caso opuesto. Este parámetro será de vital importancia la hora de realizar el estudio, puesto que en capítulo 4, se estudiará, cómo se modifica el comportamiento del modelo al variar este parámetro.
- **Diámetro Hidráulico, Dh (m):** Diámetro del círculo que contiene al generador, es de utilidad a la hora de elegir el modelo de turbulencia.

A modo de recoger el valor de todos los parámetros designados se muestran recogidos en la tabla 2-1.

Tabla 2-1 Valores de los parámetros físicos geométricos

<b>Radio de giro (m)</b>	0.5
<b>Número de álabes</b>	3
<b>Envergadura (m)</b>	1
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	1
<b>Pitch (°)</b>	-5, 0, +5
<b>Diámetro Hidráulico (m)</b>	1

2.1.2. Perfil NACA

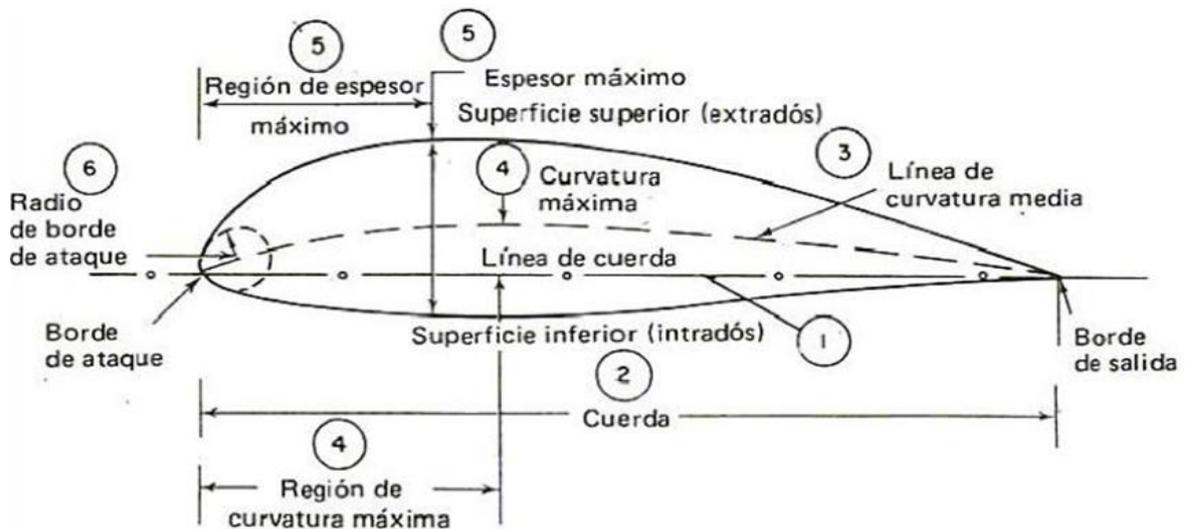


Figura 2-3 Nomenclatura de los diversos términos al designar un perfil [Despegamos]

- **Borde de ataque:** Zona más adelantada del perfil, la corriente del fluido incidirá en él, en primera instancia.
- **Borde de salida:** Zona más atrasada del perfil. Puesto que interesa que el flujo a través del perfil se perturbe lo menos posible para evita la turbulencia y minimizar las fuerzas arrastre, la forma del borde de salida es afilado. Su estrechamiento es paulatino para evitar así el desprendimiento de la capa límite, fenómeno origen de la turbulencia.
- **Cuerda:** Longitud mínima existente entre la el borde de ataque y el de salida.
- **Línea de curvatura media:** Semejante a la cuerda, nace en el borde de ataque y muere en el de salida, pero su trayectoria se define por equidistar entre las caras laterales del perfil, y por ello definir la forma del perfil.
- **Máximo espesor:** Zona del perfil donde la distancia entre las caras laterales es máxima.
- **Máxima curvatura:** Zona donde la línea de curvatura media y la cuerda distan con mayor valor.
- **Extradós e Intradós:** Son zonas del perfil situadas en las caras laterales del mismo, cuya definición varía en función del sentido de la fuerza de sustentación. El extradós se asocia con la zona de bajas presiones y por lo tanto alta velocidad, mientras que el intradós con las de altas presiones, bajas velocidades. Por ello, a modo de

ejemplo, en el caso de una sustentación positiva, vertical y hacia arriba, el extradós se encontrara en la parte superior o exterior, y el intradós en la inferior o interior.

A la hora de hablar de perfiles tipo NACA, *National Advisory Committee for Aeronautics*, existe una nomenclatura para definir mediante un sistema de dígitos las principales características geométricas del perfil:

- **Primer dígito:** Valor adimensional de curvatura máxima en referencia con la cuerda. Se emplea el dígito de las unidades del valor porcentual.
- **Segundo dígito:** Distancia adimensionalizada en relación a la cuerda donde se encuentra la zona de curvatura máxima medida desde el borde de ataque. Se emplea el dígito de las decenas del valor porcentual.

En el caso de que los dos primeros dígitos sean 0, hablaremos de un perfil simétrico.

- **Tercer y cuarto dígitos:** Valor porcentual para el espesor máximo respecto a la cuerda. Se emplean sendos dígitos del valor porcentual.

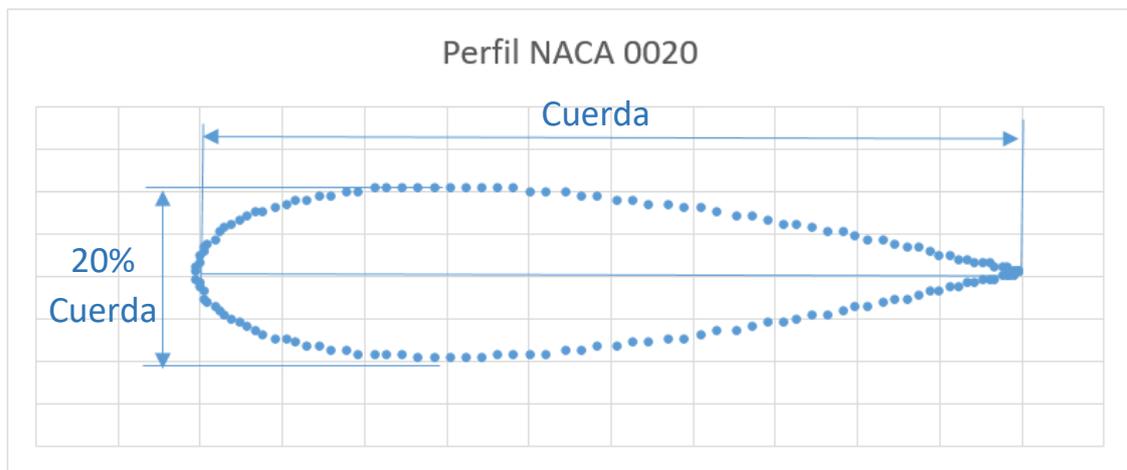


Figura 2-4 Perfil NACA 0020 empleado de 14 cm de cuerda

Por ello el perfil NACA 0020, se trata de un perfil simétrico, de longitud de cuerda igual a 14 cm y un espesor máximo de un 20% de la cuerda, es decir 2.8 cm.

En el recorrido del flujo a través del álabe, se induce una fuerza sobre el mismo, esta fuerza será función de las propiedades del fluido, así como de la geometría del perfil. En función de la dirección de la misma, se pueden distinguir dos tipos:

- **La fuerza de arrastre**, de componente longitudinal, está relacionada con la resistencia al avance del álabe por el espacio fluido, tiene la dirección del flujo en el borde de ataque, y siempre se opone al movimiento.
- **La fuerza de sustentación**, de componente transversal, su sentido es función del ángulo relativo entre el flujo y la cuerda, así como de la geometría del perfil. Es la responsable de producir el giro de la turbina alrededor del eje de giro.

Ambas componentes presentan una adimensionalización dando lugar al coeficiente de arrastre ( $C_d$ ), y al de sustentación ( $C_l$ ). Estos coeficientes son función del ángulo relativo entre el flujo y la cuerda como se citó anteriormente. Su definición es la fuerza ejercida en cada dirección, partida de la máxima que se podría haber obtenido para las condiciones de flujo existentes. La

combinación de ambos, da lugar a la definición del coeficiente de par, presentado a continuación.

## 2.2. Parámetros adimensionales

A la hora de trabajar con los resultados obtenidos, se hace necesario disponer de una serie de parámetros adimensionales, que permiten llevar a cabo la labor de análisis adecuadamente. Para ello en primer lugar es de vital importancia entender el significado de los mismos:

### 2.2.1. Grado de Solidez, $\sigma$

Se define cómo la densidad de perfiles en el interior del área de la turbina, es decir el porcentaje de área ocupada por perfiles.

$$\sigma = \frac{z \cdot c \cdot b}{2 \cdot r \cdot b} \quad (2.2)$$

- c: Cuerda del perfil (m)

### 2.2.2. Tip Speed Ratio, TSR

Es el parámetro encargado de adimensionalizar la velocidad, se define como la velocidad de punta de la turbina marina, entre la velocidad de la corriente. Como se manifiesta en la figura 2-5, en su recorrido a través del eje, la velocidad relativa de la corriente de fluido con respecto al álabe, es variable. Es por ello, que la TSR permite hacer una simplificación de la variabilidad de la velocidad relativa en función de las componentes de la misma.

$$TSR = \frac{\omega \cdot r}{v} \quad (2.3)$$

-  $\omega$ : Velocidad angular del rotor (rad/s)

- v: Velocidad de la corriente de agua (m/s)

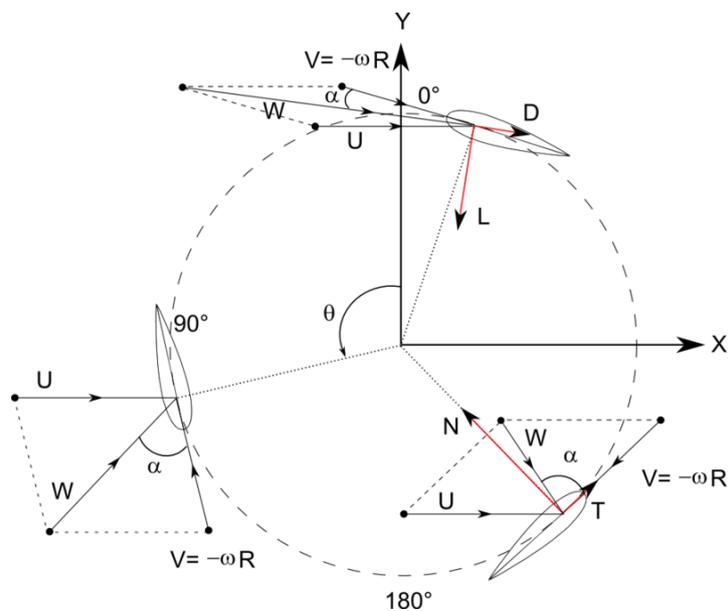


Figura 2-5 Velocidades relativas entre el flujo y los álabes [Wikipedia]

### 2.2.3. Coeficiente de par, $C_m$

Por definición en referencia con lo citado sobre las fuerzas, el coeficiente de par se define como el resultado de adimensionalizar el par que se extrae de una determinada corriente en referencia con el máximo que se podría haber obtenido.

$$C_m = \frac{2T}{\rho v^2 AR} \quad (2.4)$$

- T: Par en el eje del generador (Nm)
- $\rho$ : Densidad del fluido de trabajo ( $\text{kg/m}^3$ )
- A: Área de referencia ( $\text{m}^2$ ). Se corresponde con el área proyectada del rotor definida con anterioridad en el apartado 2.1.1
- R: Radio de giro de los álabes respecto del eje. (m)

### 2.2.4. Coeficiente de potencia, $C_p$

De forma similar al anterior, el coeficiente de potencia se define como el resultado de adimensionalizar la potencia que se extrae de una determinada corriente en referencia con la potencia de la corriente fluida.

Existen dos formas de obtenerlo, la primera ateniéndose a la definición, y otra a través de su relación frente a los coeficientes adimensionales TSR y  $C_m$ :

$$C_p = \frac{2P}{\rho v^3 A} = TSR \cdot C_m \quad (2.5)$$

- P: Potencia en el eje del generador (W)

Es un coeficiente de vital importancia a la hora de valorar la efectividad de aprovechamiento energético del modelo en términos hidrodinámicos. Por ello se suele entender, como el rendimiento entre la corriente y la salida de potencia al eje.

De acuerdo con la literatura existe un límite para el coeficiente de potencia cuando se habla de la transformación de la energía cinética de una corriente, a la de un eje. Este límite denominado, límite de Betz con un valor de 0.593, permite asociar para unas condiciones dadas, una referencia respecto del aprovechamiento energético óptimo o ideal.

## 2.3. Modelo numérico

En este apartado se establecerán las diversas definiciones propias del modelo, con el que se ha trabajado, de cara a las simulaciones numéricas. Pese a la semejanza con el modelo real, existen ciertas particularidades que posibilitan el estudio de cualquier flujo mediante CFD, que son del todo necesarias para obtener datos numéricos precisos.

A continuación, se presentan todas aquellas premisas tenidas en cuenta a lo largo del estudio, que no se plantearon en el apartado del modelo físico.

### 2.3.1. Condiciones de contorno

El espacio de trabajo a partir del cual se han practicado las diversas simulaciones es el mostrado en la Figura 2-6, las dimensiones del mismo son: 4 m de ancho y 11.5 m de largo, el rotor se sitúa a 2.5 m de la entrada, y simétricamente respecto de la dirección del eje x.

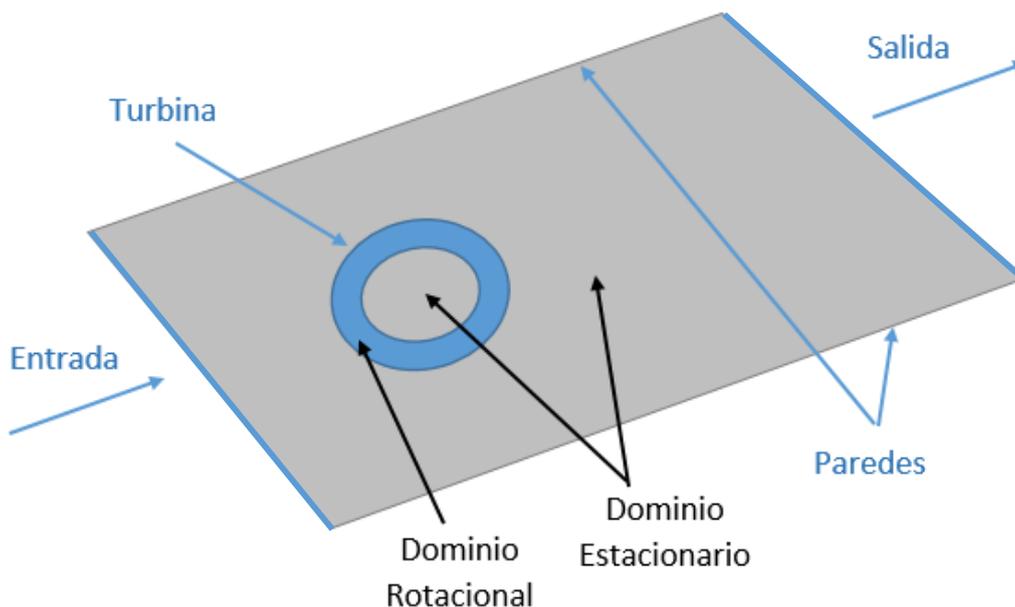


Figura 2-6 Ilustración del espacio numérico y condiciones de contorno

Las distintas condiciones de contorno impuestas en el modelo, identificadas en la Figura 2-5 son:

- **Entrada:** corresponde a la zona donde se produce la entrada propiamente dicha, del flujo. La dirección del flujo es justamente la indicada por la flecha de entrada, y por lo tanto perpendicular a la línea que la define, la velocidad de entrada es de 1m/s y el fluido de trabajo agua, como ya se indicó al inicio del capítulo. En cuanto a la intensidad turbulenta y el diámetro hidráulico los valores son del 10% y 1 m correspondientemente.
- **Salida:** todo el flujo que entró por la entrada, deberá salir por la salida, por ello en esta zona, opuesta a la primera, el área de paso es constante para evitar aceleraciones del fluido. En cuanto a la dirección del flujo en la salida, no se puede suponer totalmente perpendicular a la línea de salida como ocurriría en la entrada, puesto que el rotor ha modificado las componentes de la velocidad, y ha inducido de componente de vorticidad al flujo, lo que implica la presencia de torbellinos y por lo tanto las posibles recirculaciones del flujo a través de la salida, fenómeno conocido como Flujo Reverso. Aún así, se suponen que la salida se encuentra situada suficientemente alejada del rotor como para suponer condiciones estables del flujo, y no tener que prestar consideraciones adicionales a la salida.
- **Paredes:** poseen la condición de simetría respecto al eje x, en el entorno de sus límites, ésto implica entre otras cosas que las componentes de los distintos

parámetros del fluido, como es la velocidad, en la dirección perpendicular a dicho límite es nulo. Este fenómeno se conoce como condición de Von Neumann.

- **Rotor o turbina:** en el modelo numérico se ha optado por una mera representación de los álabes, sin tener en cuenta el resto de elementos del rotor. En una representación más realista, se distinguen tres zonas diferenciadas, éstas son: el eje, los elementos constructivos y los álabes. En cuanto al modelo, los álabes se encuentran dispuestos de forma trisimétrica alrededor del ficticio eje situado en el dentro del círculo de giro. La condición de contorno para los álabes es la del flujo impedido a través del límite, es decir como un elemento sólido, para ello la opción de *Fluent* elegida, es *Wall*. La rugosidad se deja por defecto.

Mientras que los contornos citados, suponen límites del espacio, los siguientes comportan áreas donde se imponen unas determinadas condiciones para el paso del fluido en cuestión. Por ello para ambos dominios se opta por la opción *Fluid*, y fluido de trabajo agua.

- **Dominio Rotacional:** esta parte de la malla posee movimiento relativo respecto del resto del dominio. Para ello mediante la opción *Moving Mesh*, se dota de una determinada velocidad de rotación alrededor del centro giro o eje del rotor, a la corona circular que compone este dominio. La velocidad angular, designada por medio de  $\omega$ , es variable y se designara en función de los requerimientos de la simulación, modificación con ello el TSR.
- **Dominio Estacionario:** se pueden identificar dos partes dentro del mismo, el del interior de la corona circular o dominio rotacional, y el de fuera del mismo. Ambas zonas comparten las mismas características, la malla no presenta movimiento alguno, comando *Stationary*.

Cabe destacar que el paso del fluido a través de los distintos dominios se produce sin modificación alguna de las propiedades fluidas, es decir, pese a que la malla presente un movimiento de rotación, cuando el fluido entra en este dominio no se induce dicho movimiento al flujo, este prosigue sin perturbar por el espacio, hasta que se encuentra con los álabes en movimiento. Este comportamiento se ilustra en la figura 2-7

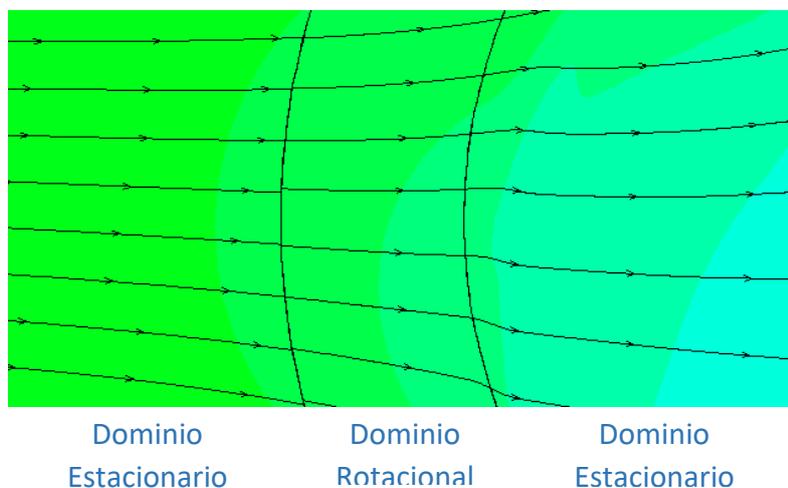


Figura 2-7 Líneas de corriente al atravesar los distintos dominios del modelo

### 2.3.2. Discretización espacial

Mediante la figura 2-8, se puede visualizar la malla a nivel de rotor, distinguiendo las zonas identificadas en el apartado anterior 2.3.1, sobre las condiciones de contorno. A la par de las diversas características citadas de estas zonas, también cabe mencionar la diferencia de la densidad entre el número de celdas existentes, y el espacio o área de la malla. Como se puede comprobar, las zonas móviles formadas por los álabes y la corona circular, presentan una gran densidad, a causa de la cantidad de fenómenos interesantes posibles de identificar en la trayectoria de los álabes. Por el contrario la densidad es menor en el interior de la corona, en lo que se denomina eje, y mucho menor en el entorno exterior al rotor, puesto que los fenómenos observables en estas zonas serán función directa de los producidos en las otras por los fenómenos de separación de capas límite, corrientes secundarias, etc.

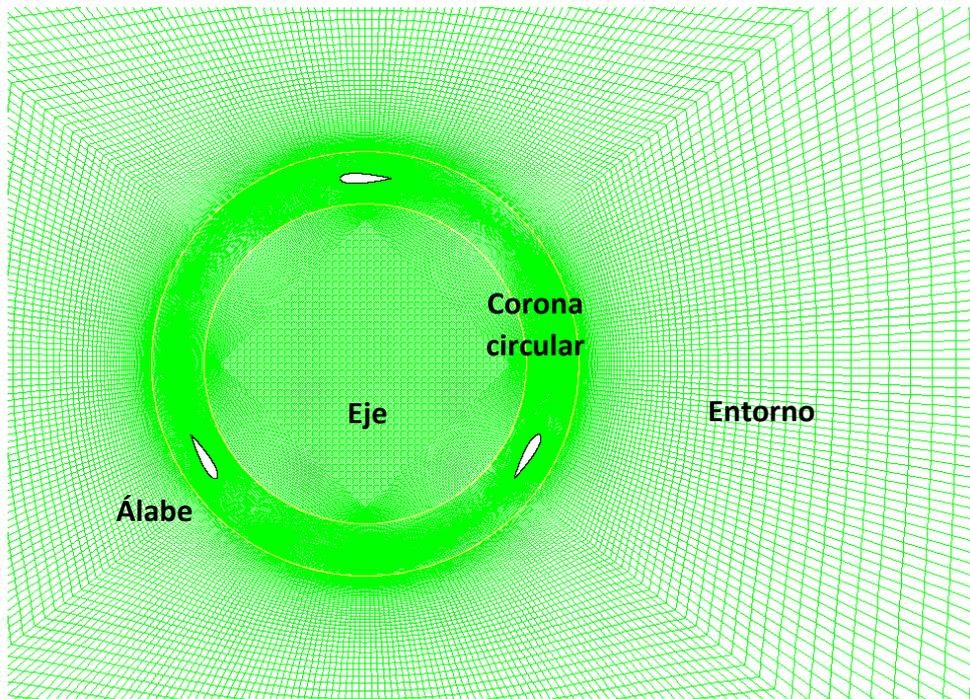


Figura 2-8 Malla para el modelo rotor completo de 176915 celdas

### 2.3.3. Características del fluido

Como ya se ha citado en múltiples ocasiones anteriormente, el fluido de trabajo es agua. El flujo se produce de izquierda a derecha, entrando perpendicularmente a la línea de entrada. Puesto que el estudio experimental de referencia, se reprodujo en condiciones normales de temperatura, y el punto medio del rotor se encontraba un metro de profundidad, los valores de estas propiedades, tabla 2-2, pretenden asemejarse lo más posible esa situación, procurando reflejar condiciones existentes en una aplicación real.

Tabla 1-2 Propiedades características del fluido de trabajo

Propiedades del agua	
Velocidad de entrada (m/s)	1
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	998.2
Temperatura (K)	283
Presión de referencia (Pa)	111125
Viscosidad (kg/ms)	0.001003

#### 2.3.4. Variación del número de celdas

El refinado de la malla de las simulaciones es imprescindible para llevar a cabo el estudio posterior del modelo y obtener posteriores conclusiones. Aumentando y disminuyendo el número de celdas, se comprobará la influencia de este parámetro en los resultados y por ello se elegirá el valor óptimo, en cuanto a coste computacional y resultados, en la zona donde los resultados se hayan estabilizado y no presenten gran modificación.

Se ha procedido a la comparación de diversas simulaciones en función del número de celdas que poseen como ya se conoce el comportamiento asintótico de las simulaciones en cuanto al número de celdas con el trabajar, se buscara la comparación para los distintos modelos, en el punto óptimo de trabajo.

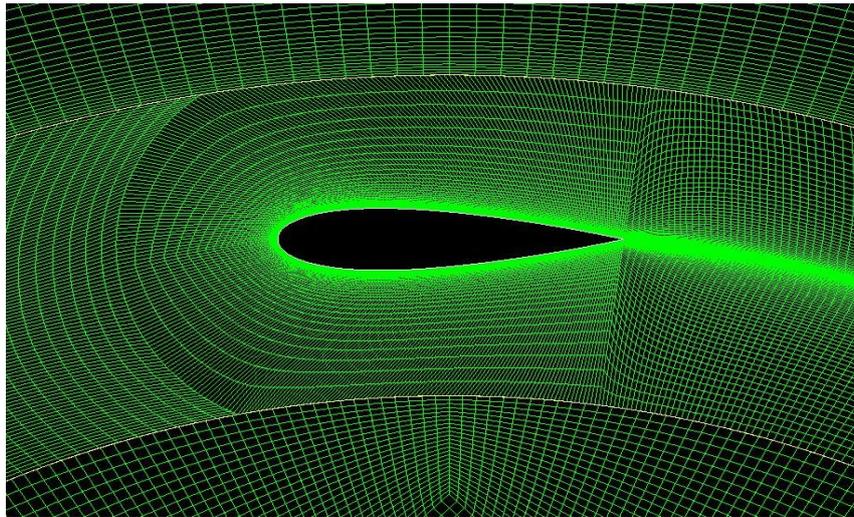


Figura 2-9 Malla del modelo 2 con 176000 celdas

Para llevar a cabo el proceso de aumentar la resolución en cuanto al número de celdas, se procedió al refinado de las zonas próximas a los perfiles. Priorizando la zona de la estela del mismo, donde los comportamientos del flujo son más interesantes, con la intención de captar lo mejor posible los fenómenos de desprendimiento de capa límite.

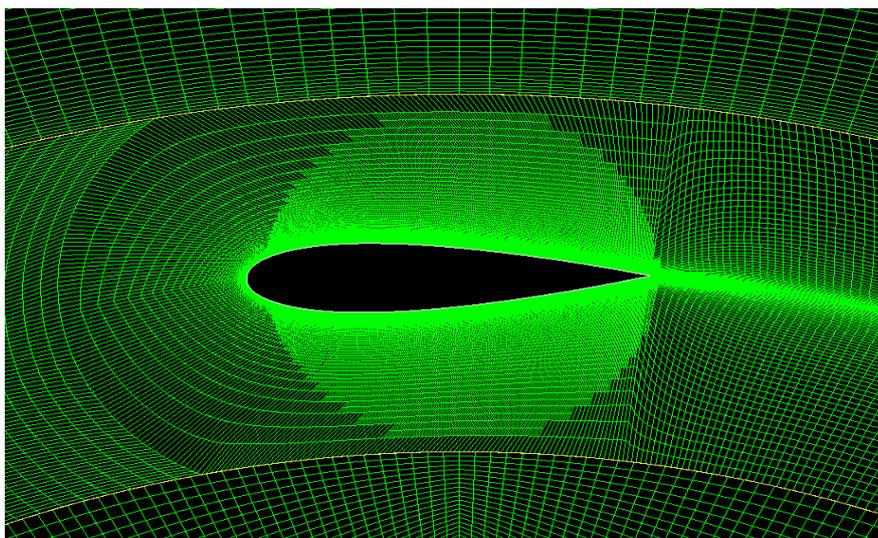


Figura 2-10 Malla del modelo 3 con 397391 celdas

El método para realizar este proceso constó de la utilización del comando Adapt- Region dibujando círculos concéntricos al perfil que se movieran con los mismos en su movimiento alrededor del eje. A partir de este procedimiento se obtuvo el Modelo 3, de la figura 2-10, con un total de 397391 celdas. La razón por la cual se optó por este procedimiento fue la cantidad de problemas derivados de la adaptación de las celdas por otros métodos, como fueron la adaptación por gradientes de presión o de velocidades.

En cuanto para el Modelo 1, figura 2-11, con un menor número de celdas que el modelo base (Modelo 2, figura 2-9), el procedimiento pasó por la modificación del archivo base, "journal", en el que se disminuyó la cantidad de nodos creados a la hora de la construcción de la malla, en el entorno del álabe. El resultado fue un modelo con 121415 celdas.

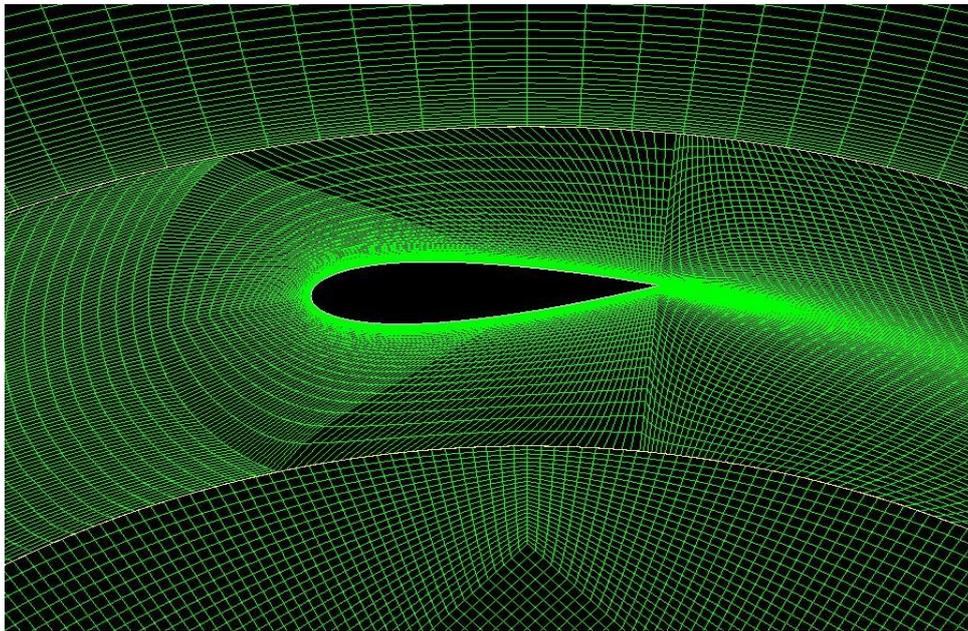


Figura 2-11 Malla del modelo 1 con 121415 celdas

Tabla 2-2 Resumen resultados de los modelos función del N° celdas

	Nº Celdas (Celdas)	Valor de Cm_promedio	Valor de Cp_promedio
<b>Modelo 1</b>	121415	0.21939	0.54847
<b>Modelo 2</b>	176915	0.21935	0.54839
<b>Modelo 3</b>	397391	0.16667	0.41667

Para interpretar la gráfica de polares de la figura 2-10, se representa en la coordenada radial el valor del coeficiente de potencia, y en la angular, con origen en +90°, y recorrido horario, el ángulo de rotación del álabe.

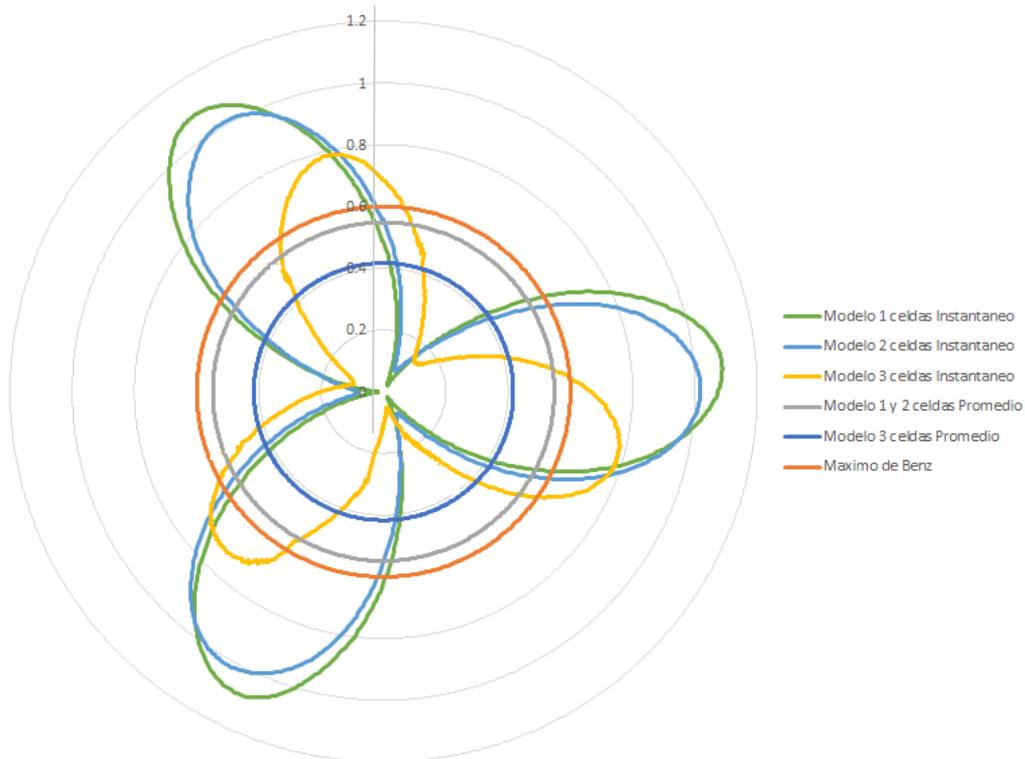


Figura 2-12 Gráfico Cp frente al ángulo en polares para la variación del Nº celdas

Visualizando la figura 2-10, de la comparación de los modelos 1 y 2, se extrae en la mayor variabilidad para el modelo 1, en cuanto al valor del coeficiente de potencia, llegando a valores mayores y menores en los máximos y los mínimos respectivamente, pese a mantener un promedio asumiblemente idéntico. En segundo lugar se observa el adelantamiento del momento para el cual se llega a los valores de los coeficientes de potencia máximos instantáneos.

Si se tuviera que tomar una decisión en base al Cp instantáneo, se optará por el modelo 2, el cual presenta el máximo en el momento en el que el álabe atraviesa la parte más a la derecha del modelo exactamente, además que el valor del coeficiente de potencia es un 14% menos variable.

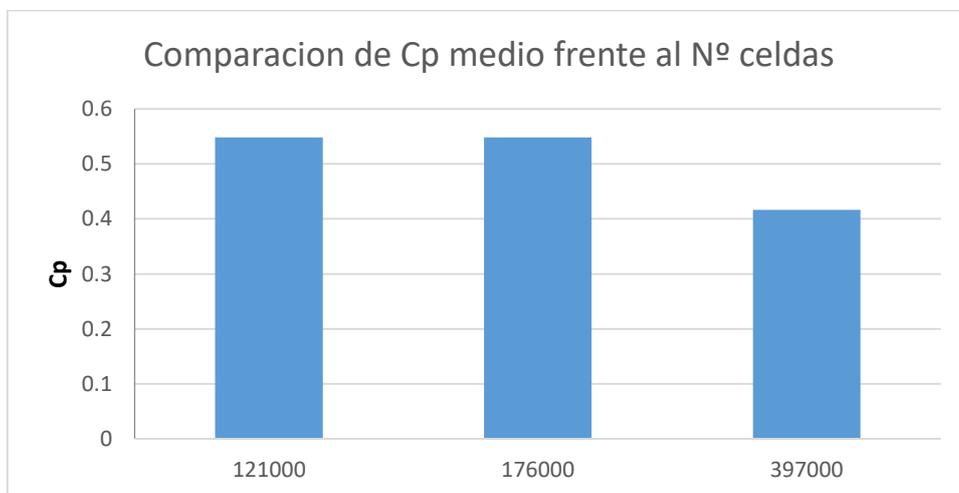


Figura 2-13 Cp frente al número de celdas

Los resultados obtenidos en las simulaciones muestran que los resultados numéricos, para el modelo 1 y 2, son prácticamente iguales, con una diferencia del 0.015%. Mientras que por su parte, el modelo 3, presenta muchos más problemas de convergencia a la par que unos resultados en cuanto al rendimiento desfavorable en comparación con los otros dos. Por ello, que para tomar la elección sobre cuál de los dos emplear, se prescindirá del Modelo 3.

La semejanza a la hora de observar los contornos de presión y de velocidad de ambos modelos, hace que se centre la atención en la vorticidad, donde el patrón difiere en mayor medida.

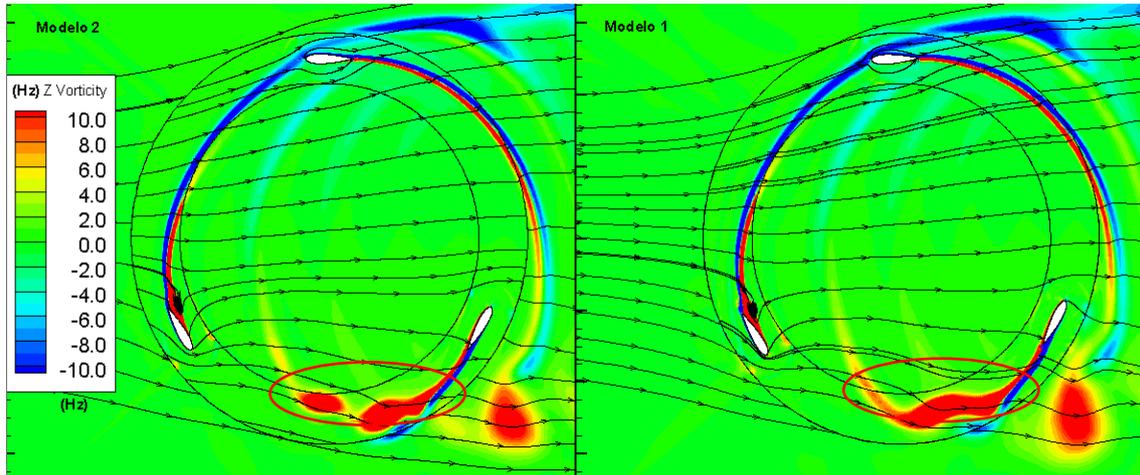


Figura 2-14 Comparación de contornos de vorticidad para el modelo 1 y 2, punto de diseño.

De la observación directa de la figura 2-14, pese a la semejanza de la mayoría de comportamientos, como son las estelas de los álabes, los torbellinos generados en la posición  $+120^\circ$ , y los valores de la vorticidad. Existe una diferencia relevante en las zonas delimitadas por los círculos rojos descritos en la imagen. Como se puede apreciar, mientras que para el modelo 1 el valor de la vorticidad es más continuo en la parte señalada, para el modelo 2, existen distintas zonas para los mismos valores de vorticidad, como que de diferentes masas de vorticidad se tratara. Este comportamiento implica, que en la estela del álabes donde, se están desprendiendo los torbellinos, se producen distintos centros de giro de los mismos. Mientras que para el modelo 1 no existen distintos centros, lo cual, es del todo indeseable. Es por ello que a la par de las diferencias numéricas se optará por el Modelo 2.

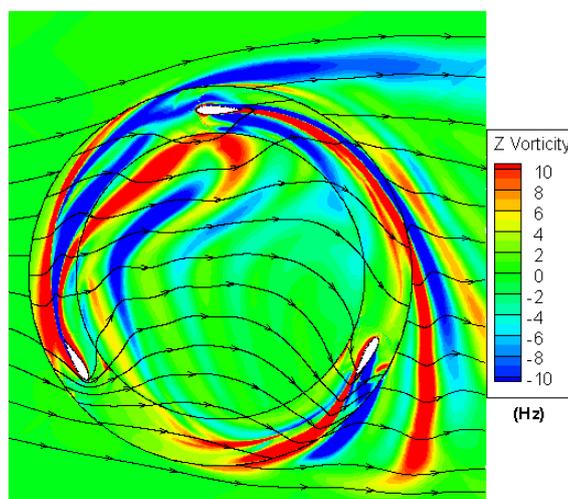


Figura 2-15 Contornos de vorticidad del modelo 3 en punto de diseño

Haciendo un inciso, y examinando más detenidamente los contornos de vorticidad del modelo 3, ver figura 2-15, se percibe que es un modelo muy marcado por la turbulencia y con un patrón de flujo mucho más perturbado que para los otros casos, lo cual explica por qué a la hora de su comparación en términos de  $C_p$  instantáneo, el comportamiento se mantiene tan alejado del resto.

### 2.3.5. Modelo computacional

Los parámetros y opciones designadas, en este apartado, son los empleados a la hora de la resolución de las distintas simulaciones en relación al algoritmo. Con ello se hace referencia a las decisiones del tipo matemático computacional, es decir, sobre la turbulencia, el orden y algoritmo de resolución, y otros.

Independientemente del tipo elegido, la solución de las simulaciones pasa por la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, particularizadas para un caso transitorio, bidimensional y flujo incompresible.

#### 2.3.5.1. Algoritmo de resolución y modelo de turbulencia

Pese a que para la mayoría de simulaciones el algoritmo empleado fue el mismo, para algunos casos particulares en los que no se logró la convergencia de la solución, se realizaron cambios en cuanto al orden de la resolución como se indicará posteriormente. Para las distintas simulaciones llevadas a cabo se optó por una resolución siguiendo un modelo de turbulencia del tipo K-omega/ SST, con flujo transicional y un orden de resolución de 2º grado.

El problema surgió con alguno de los modelos a la hora de modificar el valor del pitch, como se justificará posteriormente, en estos modelos la solución no convergía a partir de un cierto valor límite lo cual imposibilitaba completar la curva característica, para poder hacer estos límites lo más amplios posibles se procedió a cambiar el algoritmo de resolución a uno de 1º orden y disminuir los coeficientes de relajación, con la intención de que la simulación fuese menos forzada. Aunque no se eliminó el problema por completo, si se logró aumentar dichos límites para poder aproximar la tendencia de la curva característica, del coeficiente de potencia.

#### 2.3.5.2. Resolución temporal

En relación a la resolución temporal, se determina el parámetro de *Time Step*. Este parámetro será el encargado de determinar el tiempo existente entre cada avance de la simulación. A consecuencia de que como ya se ha expuesto en el apartado 2.3.1, condiciones de contorno, parte de la malla posee movimiento relativo respecto del resto, se hace necesario establecer una correlación entre la velocidad de rotación de esa parte y el intervalo temporal de avance que emplea el software, para realizar el cálculo entre instantes. Como se puede visualizar en la fórmula 2.6 la relación entre el Time Step,  $\Delta t$  y la velocidad de rotación,  $\omega$  es la siguiente:

$$\Delta t = \frac{2\pi}{\omega N} \quad (2.6)$$

El parámetro N se define como el número de Time Steps por vuelta, es un parámetro de elección libre por el usuario, que definirá en parte la complejidad de convergencia de la solución. A mayores valores de N se requiere más potencia computacional, pero al mismo tiempo la solución es más estable. Para las simulaciones, se ha determinado un valor de  $N=720$  Time Steps/vuelta, de esta forma se logra recoger resultados numéricos cada 0.5º de giro del generador.

El número total de Time Steps de los que constará una simulación completa es variable y función de la estabilidad que muestren las gráficas del coeficiente par frente al ángulo de giro. Una vez llegados al punto en el que los valores muestran buena repetitividad y periodicidad, se puede dar por convergida la simulación y validez los resultados, como se expondrá más profundamente en el apartado 3.1. Es por ello, que se establezca un número u otro de Time Steps, y por lo tanto, de vueltas del rotor.

Para la mayoría de simulaciones se establecieron 4 vueltas para validar los resultados, lo que corresponde a 2880 Time Steps por simulación, el problema surge cuando los resultados numéricos no presentan la periodicidad buscada, en ese caso el procedimiento fue el de aumentar el número de vueltas, llegando a practicar simulaciones con 8 e incluso 16 vueltas para algunas de las simulaciones más conflictivas correspondientes a la variación del Pitch.



### Capítulo 3. Análisis de los resultados

Para la labor que supone el análisis de los contornos de los perfiles de la turbina marina, que permitirán posteriormente llevar a cabo los capítulos de análisis, optimización y conclusiones, en primer lugar hay de llevar a cabo un método de trabajo riguroso, que permita analizar correctamente los resultados que el software, pone a disposición. Para ello, en este capítulo, se va a realizar una exposición de cuál es el método de trabajo realizado.

#### 3.1. Validez de los resultados

A la hora de realizar una simulación, no basta con que el software haya realizado el número de Time Steps programado, existen una serie de criterios o pautas a seguir para poder corroborar que los resultados numéricos obtenidos son válidos, y posibilitan transcender en el estudio. Mediante el posterior análisis del flujo mediante los contornos, y su eficacia mediante las curvas de par y potencia, se corroborara esta premisa. Los criterios a cumplir por cualquier simulación para poder trabajar con los datos son:

- La solución debe de converger en términos de valores numéricos, como se visualiza en la Figura 3-1. A la hora de graficar el  $C_m$  instantáneo frente a tiempo, la periodicidad de los resultados y la diferencia entre de los límites superiores e inferior promedio, para cada tercio de vuelta, deben de estar acotados dentro de unos criterios de error, que no conlleven a errores significativos en los resultados. La variabilidad debe ser poco representativa.

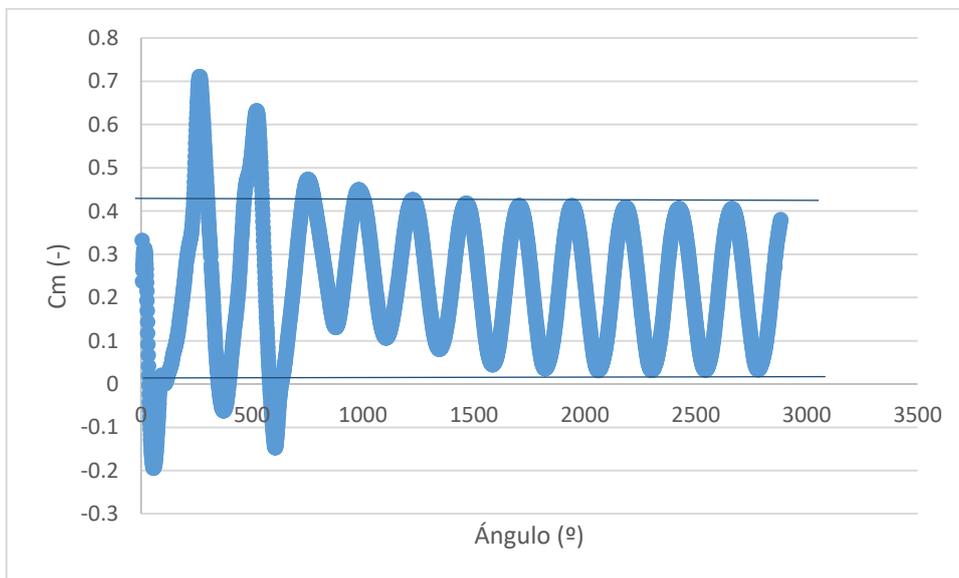


Figura 3-1  $C_m$  frente al ángulo de la simulación Pitch=0º, TSR=2.5, N=2880.

- Se debe verificar que el modelo de turbulencia posibilite obtener al menos un  $Y+$  por debajo de 5 en las paredes de los álabes, lo cual se puede corroborar en la Figura 3-2, este es un requisito impuesto por el modelo de turbulencia K-omega Transitional.

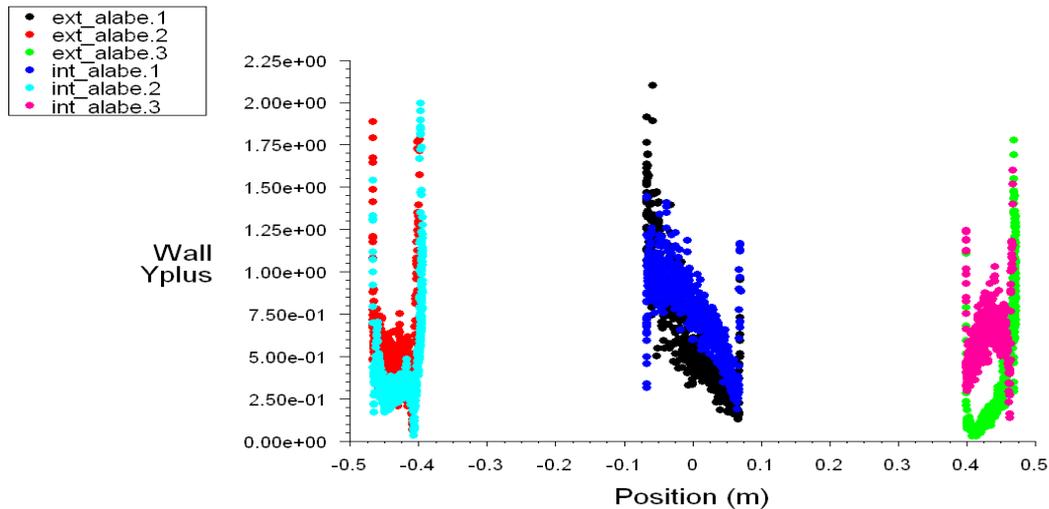


Figura 3-2 Y plus en la pared de los álabes, Pitch=0°, TSR=2.5

### 3.2. Modelo base inicial

En un primer instante a partir de la malla original aportada, con un ángulo de los álabes nulo, es decir, Pitch=0°, se llevó a cabo una serie de simulaciones con el objetivo de caracterizar el modelo, y fijar una referencia a partir de la cual poder compararlo con el resto de valores. Los resultados obtenidos en este capítulo serán sustento para el pos-procesado de la información, y la interpretación de los contornos y comportamiento del agua alrededor de los perfiles.

#### 3.2.1. Obtención de la curva de par y potencia de la turbina

La curva de par, es una representación del coeficiente de par,  $C_m$ , definido en el apartado 2.2.3, sobre el eje de giro del modelo, frente al ángulo de giro del rotor. Por ello, es de vital importancia para el estudio, y permite poder extraer con un simple vistazo, múltiples conclusiones: la capacidad de aporte de par del que dispone, el rango de giro para el cual el modelo extrae o aporta energía a la corriente, es decir, cuando funciona como turbina, y cuando como bomba, y la capacidad de autoarranque, entre otros.

Por todo esto, la obtención de la curva de par, es objetivo fundamental del estudio en cada simulación. A partir de ella, se podrá verificar la validez de las simulaciones, como se ha expuesto en el apartado 3.1, lo cual implicara que la solución ha convergido correctamente y los resultados son de suficiente fiabilidad. A partir de ahí, se extrae uno de los valores de mayor relevancia, el Coeficiente de Par Promedio, el cual se define como la media del valor que el  $C_m$  adopta a lo largo de su recorrido a través de una vuelta.

A partir del  $C_m$  la obtención del coeficiente de potencia,  $C_p$ , es inmediato, únicamente con el TSR, correspondiente a los distintos valores de la velocidad de rotación del modelo en cada simulación. A través del  $C_p$ , es posible, para unas condiciones fijadas, hacerse una idea de la capacidad de aprovechamiento energético o rendimiento, de la que goza la turbina.

Para el proceso de estudio con el fin de la obtención de la curva característica de la turbina, representación de los diversos coeficientes de potencia promedio, frente al TSR, gráfico de vital importancia a la hora de definir, el punto de diseño y el rango de funcionamiento, entre otros, el proceso seguido fue el siguiente:

En primer lugar, la representación de la curva de par, para la última vuelta una simulación que haya reunido los criterios definidos en el apartado 3.1. Para el caso de la figura 3-3 se muestra

la curva para el punto de diseño, es decir, donde el coeficiente de potencia,  $C_p$  es máximo (TSR=2.5).

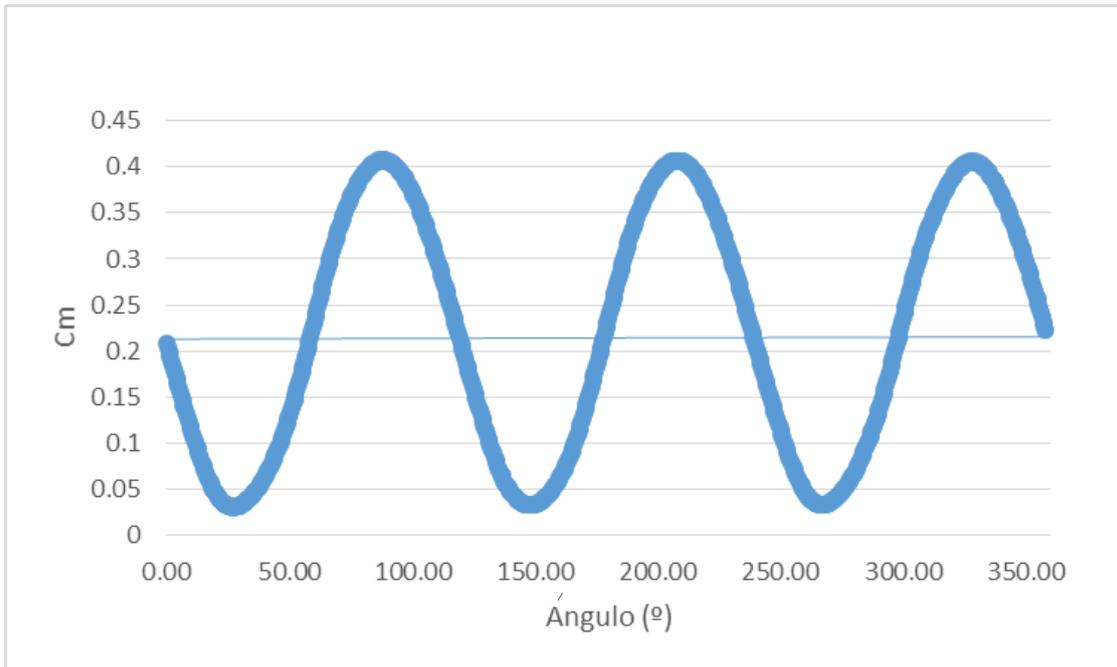


Figura 3-3 Curva de par en la última vuelta, simulación  $pitch=0^\circ$ ,  $TSR=2.5$ , 720 time steps

Del análisis directo de la respuesta del  $C_m$ , se puede extraer la periodicidad del modelo con la repetición tres veces por vuelta del perfil. Esta situación es totalmente necesaria debido a la forma trisimétrica de la geometría, que lleva al solape de los álabes en cuanto a sus posiciones, de forma similar a lo que ocurre con otros tipos de álabes en otras geometrías de generadores. Estas situaciones se denominan solape. El primer solape se produce cuando el primer álabes se encuentra a  $120^\circ$ , en este instante la disposición será  $+120^\circ, +240^\circ, +360^\circ$ , que se corresponde con una disposición idéntica a la inicial,  $0^\circ, +120^\circ, +240^\circ$ .

En la figura 3-4 se representan los valores de la simulación de las condiciones de diseño nuevamente, pero en esta ocasión, en coordenadas polares, con el fin de facilitar la visualización del modelo desde el punto de vista de su recorrido a través de la trayectoria circular. Asimismo se representa el límite de la Teoría de Betz (0.593) para poder comprobar que, pese a que el  $C_p$  instantáneo supera el límite, el promedio de las mismas no viola el principio. La interpretación del gráfico se desarrolló en el apartado 2.3.4.

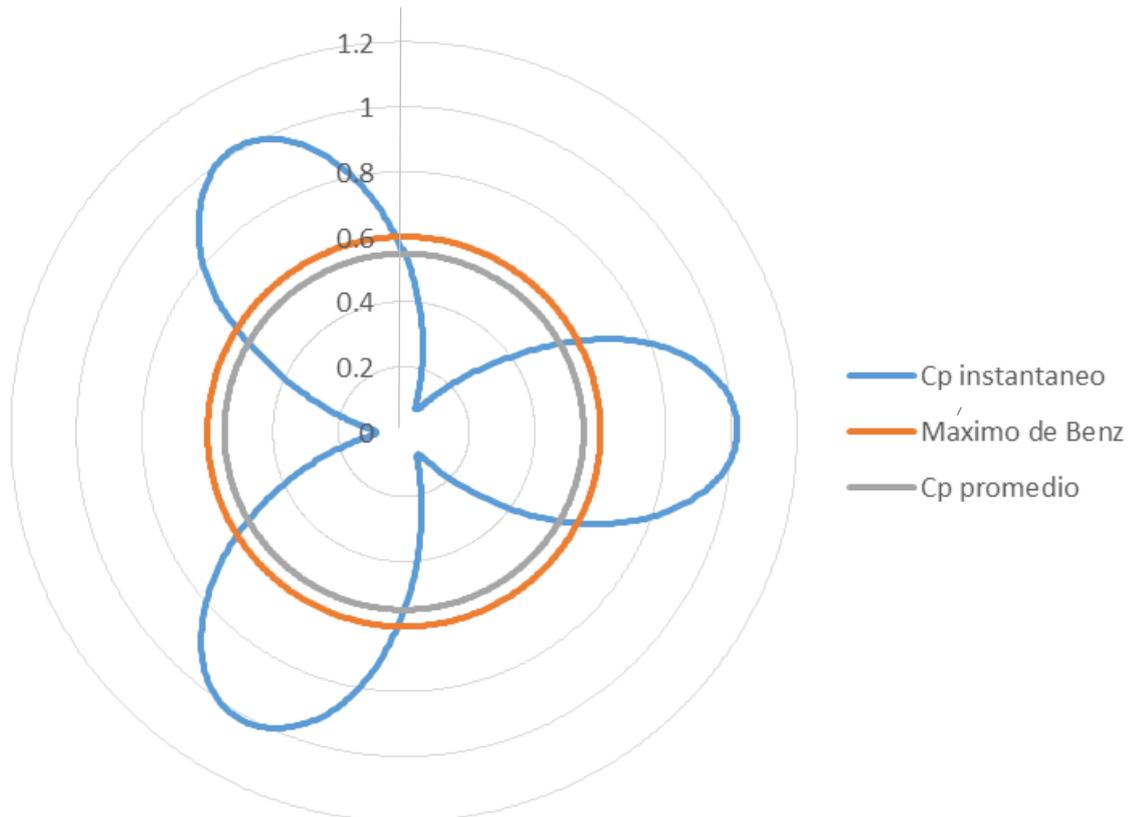


Figura 3-4 Curva de par en polares última vuelta, simulación  $\text{pitch}=0^\circ$ ,  $\text{TSR}=2.5$ , 720 times steps

En vista del coeficiente de potencia instantáneo se extrae que las posiciones de máximo valor se encuentran en  $+90^\circ$ ,  $+210^\circ$  y  $+330^\circ$ , siendo éstas, en las que uno de los tres álabes se encuentra en la posición más a la izquierda del modelo. Las de mínimo valor son las inmediatamente simétricas, correspondientes a la posición del álabes más a la derecha de los mismos, en  $+30^\circ$ ,  $+150^\circ$ ,  $+270^\circ$ .

### 3.2.2. Curva característica

Modificando el valor de la velocidad de rotación, y con ello el TSR, del modelo, se obtiene la curva característica de la turbina. Se pudo comprobar cómo se modifican los valores del coeficiente de momento promedio de cada simulación y por lo tanto los de potencia, como se resume en la tabla 3-1.

Tabla 3-1 Resumen parámetros característicos para  $\text{Pitch}=0^\circ$

$\omega$ (rad/s)	TSR	$C_m$	$C_p$
1	0.5	0.0289	0.0145
2	1	0.0345	0.0345
3	1.5	0.0844	0.1266
4	2	0.1845	0.3691
<b>5</b>	<b>2.5</b>	<b>0.2194</b>	<b>0.5484</b>
6	3	0.1762	0.5286
7	3.5	0.1273	0.4455
10	5	-0.0227	-0.1137

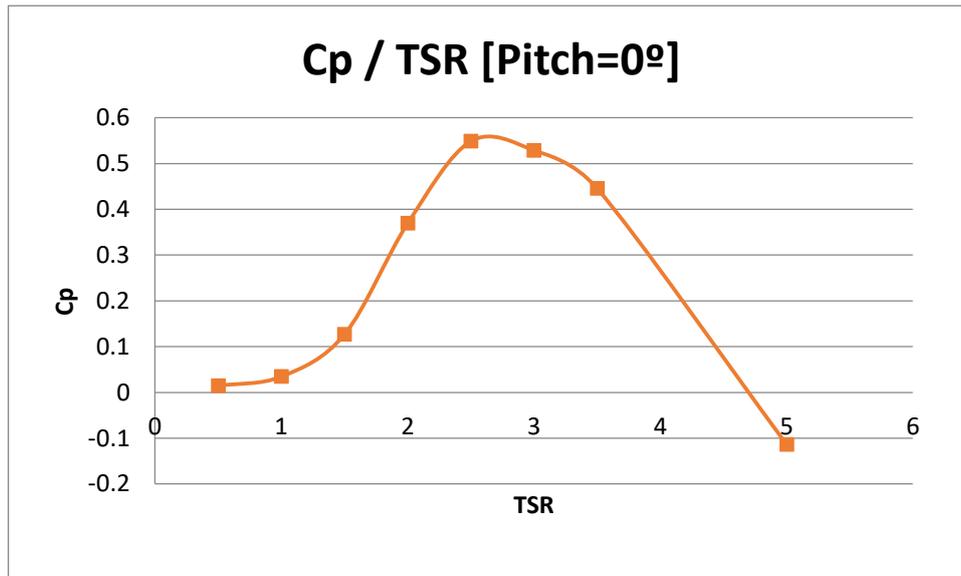


Figura 3-5 Curva característica para las simulaciones Pitch=0°

A través de la tabla 3-1 y la figura 3-5, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Punto de Diseño o máximo rendimiento:  $TSR=2.5$ ,  $\omega=5\text{rad/s}$
- Rango de funcionamiento:  $TSR=[0.5-4.7]$
- Forma de campana simetría a excepción de las zonas más alejadas del punto de diseño, donde las tendencias son distintas.
- La tendencia al autoarranque para bajos valores de velocidad no es uno de los puntos fuertes del diseño.

En lo que se refiere a la forma de la campana, en un rango de  $TSR= [2-3.75]$  los valores del coeficiente de potencia son altos, presentando unos valores en torno al 0.5, lo que implica un rendimiento cercano al 50%. Pese a ello la variabilidad en ese rango es elevada. Lo más favorable es que la forma de la campana se mantenga lo más invariable posible para el valor de diseño, debido a que interesa por un lado que el generador trabaje en el punto de máximo rendimiento, durante un máximo espacio de tiempo, y al mismo tiempo, a causa de la variabilidad de las corrientes submarinas, que la potencia eléctrica generada sea constante para poder ser lo más independiente posible frente a los cambios de la naturaleza. Al mismo tiempo desde un punto de vista puramente mecánico, una gran variabilidad del par en ciclos periódicos, deriva en ciclos de fatiga para los materiales, disminuyendo la fiabilidad constructiva del modelo.

Comparando los resultados con los del estudio experimental de [SANDIA, 2014], en el que se basó el dimensionamiento del modelo, se puede observar, mediante las figuras 3-6 y 3-7, que pese a que los valores difieren en valor, la tendencia en semejanza es prácticamente idéntica.

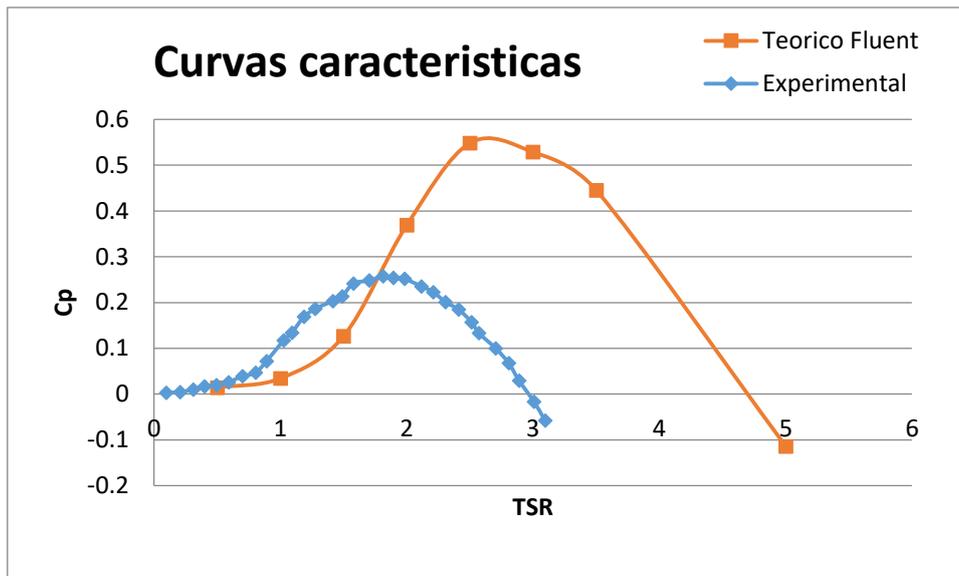


Figura 3-6 Curvas características para las simulaciones  $Pitch=0^\circ$  y los experimentos

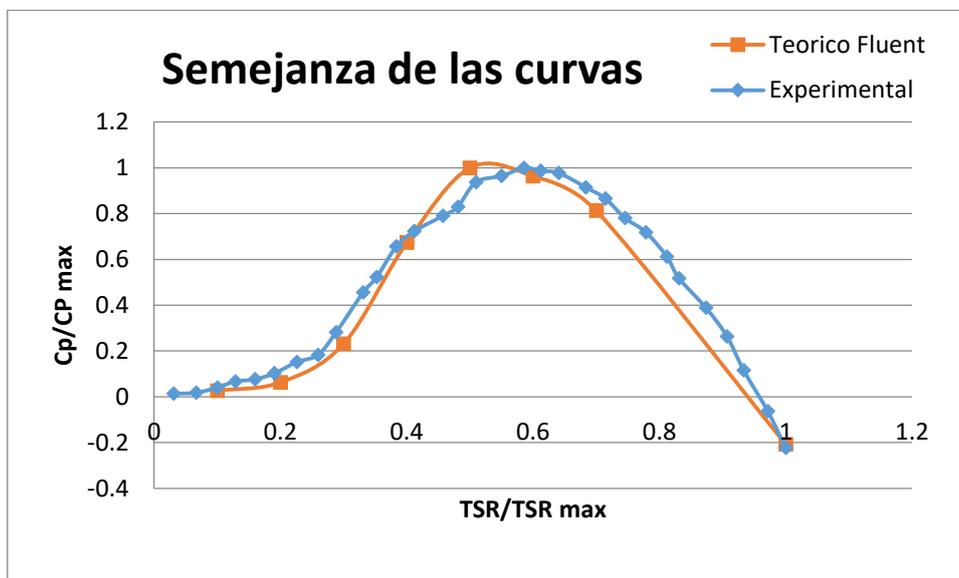


Figura 3-7 Curvas características para las simulaciones  $Pitch=0^\circ$  y las experimentaciones adimensionalizado

A consecuencia de la comparación de ambos modelos, se concluye que la simulación ha sido correcta y los resultados son suficientemente rigurosos para su posterior análisis ateniendo a los contornos de las propiedades del fluido en cuestión. La sobreestimación de los resultados teóricos de *Fluent*, se deben como ya se citó a lo largo del apartado 2, modelo, en las diferentes simplificaciones que se realizaron sobre la turbina al implantarse en un modelo numérico.

### 3.2.3. Contornos y diagramas

En este apartado se buscará el correcto análisis e interpretación de los contornos del fluido a lo largo del patrón de flujo del modelo. Para el caso analizado a continuación, se emplearán los datos del caso de diseño [TSR=2.5, Pitch=0°]. Puesto que es el caso de mayor interés, ya que es el punto donde más interesa que trabaje el modelo, y por ello, los resultados de los patrones de flujo serán los más representativos para todo el rango de trabajo.

#### 3.2.3.1. Contornos de presión

Los contornos de presión son especialmente interesantes desde el punto de vista del análisis, para la identificación de los posibles desprendimientos de capa límite, aparición de torbellinos y la identificación del intradós y extradós de cada perfil en su posición. A modo de justificación de los criterios usados para tales fines, se adjunta una ejemplificación del proceso seguido:

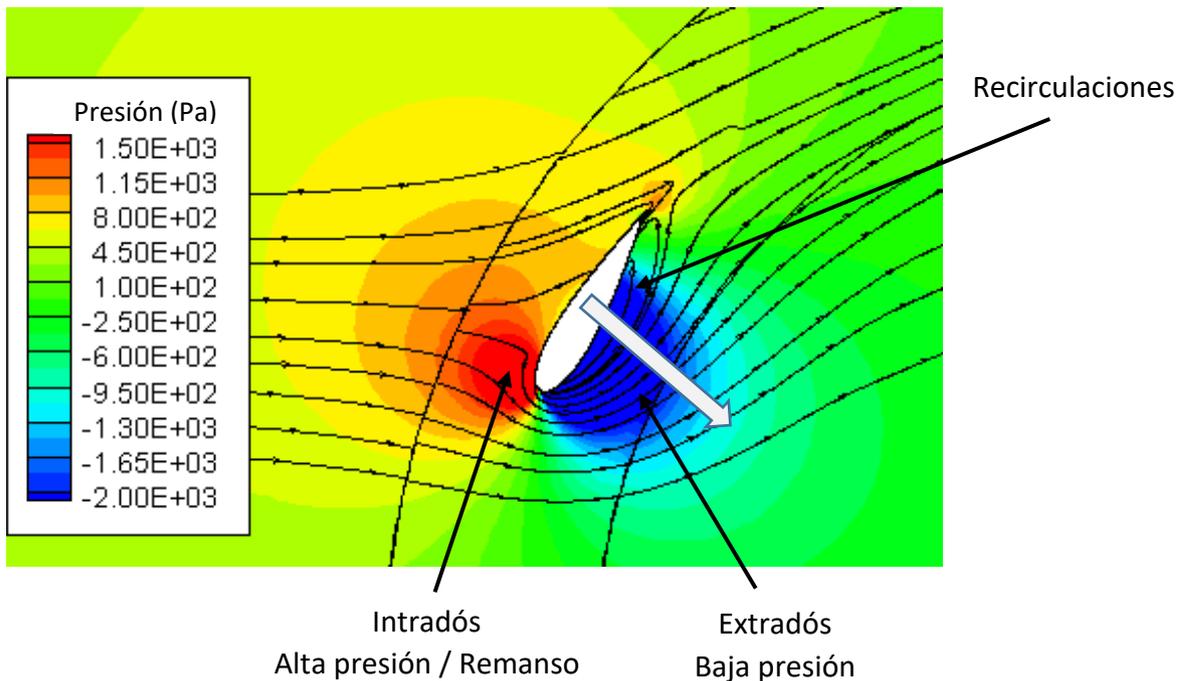


Figura 3-8 Contornos de presión, Pitch=0°, TSR=2.5, 60°

La medida de presión está efectuada en pascales, Pa, en referencia a la presión del agua en el punto medio de la turbina, es decir a 1 m de profundidad, 111125 Pa. A partir de ahí, las zonas verdes son las caracterizadas por una presión neutra, las más rojas o cálidas, por ser de altas presiones, y las azules o frías, de bajas presiones, y por lo tanto siendo estas el origen para la formación de torbellinos.

En la figura 3-8 se puede visualizar los distintos valores de la presión para el intervalo [+1500,-2000Pa], en referencia a la presión de 111125Pa. Se distinguen dos zonas fuertemente caracterizadas por los contornos azulados y los rojizos indicando las zonas de altas y bajas presiones. Los contornos de alta presión en el lado exterior del álabe, se corresponden con la Intradós, mientras que por su lado la zona interior de baja presión con la Extradós. La fuerza identificada mediante la flecha gris, es el resultado de ambas zonas. A su vez esta fuerza soportada por el álabe y transmitida al eje, se puede subdividir en una fuerza de sustentación, en este caso negativa, y una de arrastre, como se explicó en el apartado 2.1.2.

Observando las líneas de flujo, se ve claramente como la corriente ha modificado su trayectoria al paso por el álabe, con una gran influencia aguas abajo del mismo una gran aportación en dirección de la velocidad en el eje Y positivo. Haciendo un volumen de control en el álabe y calculando los flujos a través del mismo se podría establecer el valor de las fuerzas citadas. Al mismo tiempo, cabe citar la zona de remanso en el centro de las altas presiones, y la zona de recirculación del flujo en el extradós a causa del desprendimiento de la capa límite. En su avance por el recorrido del álabe, esas recirculaciones serán susceptibles de crear una zona de desprendimiento de torbellinos, como se denotará posteriormente.

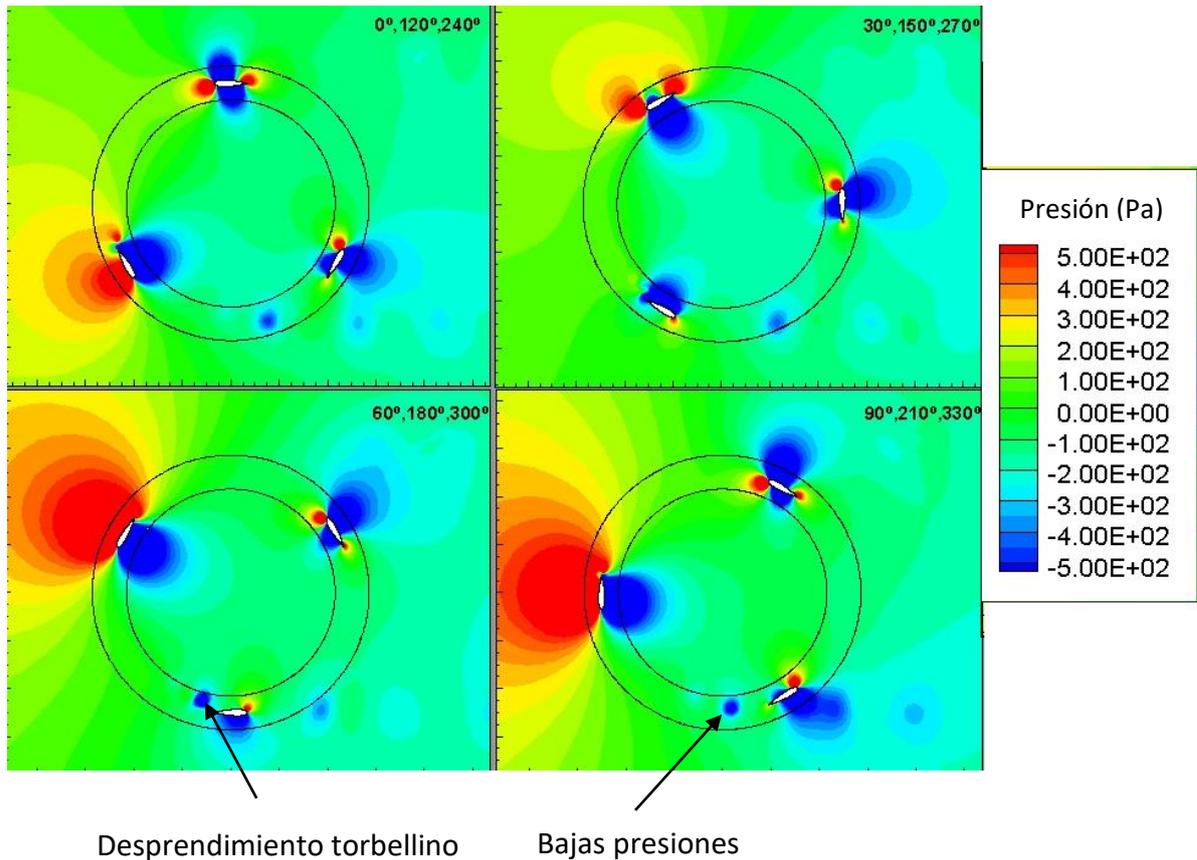


Figura 3-9 Contornos de presión, patrón de flujo, Pitch=0°, TSR=2.5

A partir de los contornos mostrados en la Figura 3-9 se puede observar distintas posiciones del álabe alrededor de su trayectoria. Puesto que como se podía comprobar en el apartado 3.1.1, se produce un solape de los coeficientes instantáneos cada 120°, los contornos de todas las propiedades fluidas serán iguales al repetirse en ese momento. Es por ello que solo se hace necesario, para explicar el patrón de flujo de las posiciones, esos 120° y no la vuelta completa. Se opta por hacer una representación de los contornos cada 30° para poder explicar todo el patrón de flujo en 4 imágenes, en parte por la simplicidad que supone, y en parte porque a partir de ellas se caracterizan las situaciones más relevantes del desarrollo:

- Posición +0°, +120°, +240°: Es el punto de inicio de la simulación, con un coeficiente de potencia cercano al valor promedio.
- Posición +30°, +150°, +270°: Corresponde al mínimo de  $C_p$  y por lo tanto la situación más desfavorable de la simulación. A partir de esta posición, 2 álabes se encontraran circulando en el contra del flujo y 1 a favor.

- Posición +60°, +180°, +300°: Situación opuesta de la del inicio.
- Posición +90°, +210°, +330°: La posición de mayor rendimiento y por ello la más favorable. 2 álabes se encontrarán circulando en el sentido de la velocidad y 1 en contra.

Al mismo tiempo cabe citar ciertas particularidades de ciertas posiciones:

En vista de los contorno en la estela de los álabes, y de cara a los fenómenos de la turbulencia, el recorrido entre 120° y 180°, es el más interesante desde el punto de vista de desprendimiento de torbellinos.

- Posición +120°: Desprendimiento de capa límite, inicio de la recirculación de gran intensidad
- Posición +150°: A partir de esta posición se produce el intercambio entre el intradós y el extradós, lo cual propiciará el desprendimiento de esa recirculación.
- Posición +180°: Desprendimiento final del torbellino que se separará del álabe.

A modo de resumen de las diferentes zonas de bajas y altas presiones de aporta la tabla 3-2.

Tabla 3-2 Caracterización extradós, e intradós para los ángulos de giro del rotor

Posición angular	Zona interior	Zona exterior
0°	-	-
+30°	Extradós	Intradós
+60°	Extradós	Intradós
+90°	Extradós	Intradós
+120°	Extradós	Intradós
+150°	Extradós	Intradós
+180°	Intradós	Extradós
+210°	Intradós	Extradós
+240°	Intradós	Extradós
+270°	Intradós	Extradós
+300°	Intradós	Extradós
+330°	Intradós	Extradós

Para la posición inicial de 0°, al propiciarse el cambio de zonas, no queda demasiado claro cuál de las caras del álabe corresponde a que comportamiento. En ese momento se produce el cambio en el sentido de la fuerza de sustentación sobre ese álabe.

### 3.2.3.2. Contornos de vorticidad

La vorticidad representa la velocidad de rotación asociada a una determinada corriente fluida en su movimiento a través del espacio. Es por ello que se podrá asociar la magnitud de la misma con la de los torbellinos generados por el sistema. Puesto que el modelo es bidimensional, solo existirá una dirección de rotación para la misma, y por lo tanto, es el que se muestra representado en los contornos, es decir en dirección del eje Z.

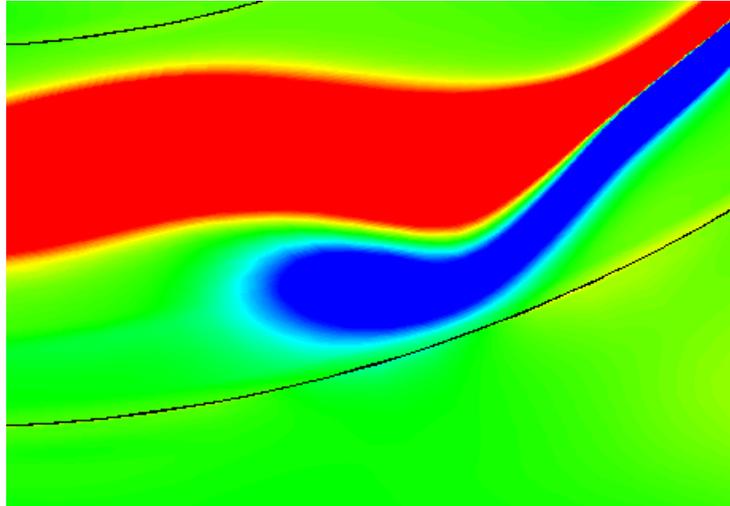


Figura 3-10 Contornos de vorticidad, Pitch=0°, TSR=2.5

Para entender los contornos de vorticidad, hay que tener en cuenta que el sentido positivo representado por los colores rojos corresponden a las corrientes con sentido de rotación antihorario, mientras que el sentido negativo correspondiente al azul es para aquellos en el sentido horario. Gracias a la representación en de los torbellinos en sendos sentidos, es posible visualizar con facilidad que la presencia de un torbellino suficientemente fuerte, en este caso rojo, genera inmediatamente otro contrarotante en el sentido opuesto, azul. Debido a los principios de inducción entre torbellinos, como se puede visualizar en la figura 3-10.

En la figura 3-11, se pueden visualizar los contornos para máximo y mínimo  $C_p$  instantáneo, a la par de las justificaciones en términos de presión se añaden, que en términos de vorticidad, se puede visualizar en la posición +30°, que el álabe acaba de atravesar la estela formada por el inmediatamente posterior, lo cual perturba la incidencia del flujo contra el mismo. Este hecho crea que la aportación por este álabe disminuya y por lo tanto sea, una de las razones por las que en esa posición, sea en la que se produzca el mínimo  $C_p$ .

Al mismo tiempo también se puede visualizar, que aguas abajo de la turbina, en un tono menos intenso, que implica menor intensidad de vorticidad, existen unas zonas de mayor tamaño en cuanto a la escala que predicen la posible formación de un torbellino de gran escala, este hecho se profundizará por medio de los contornos de velocidad.

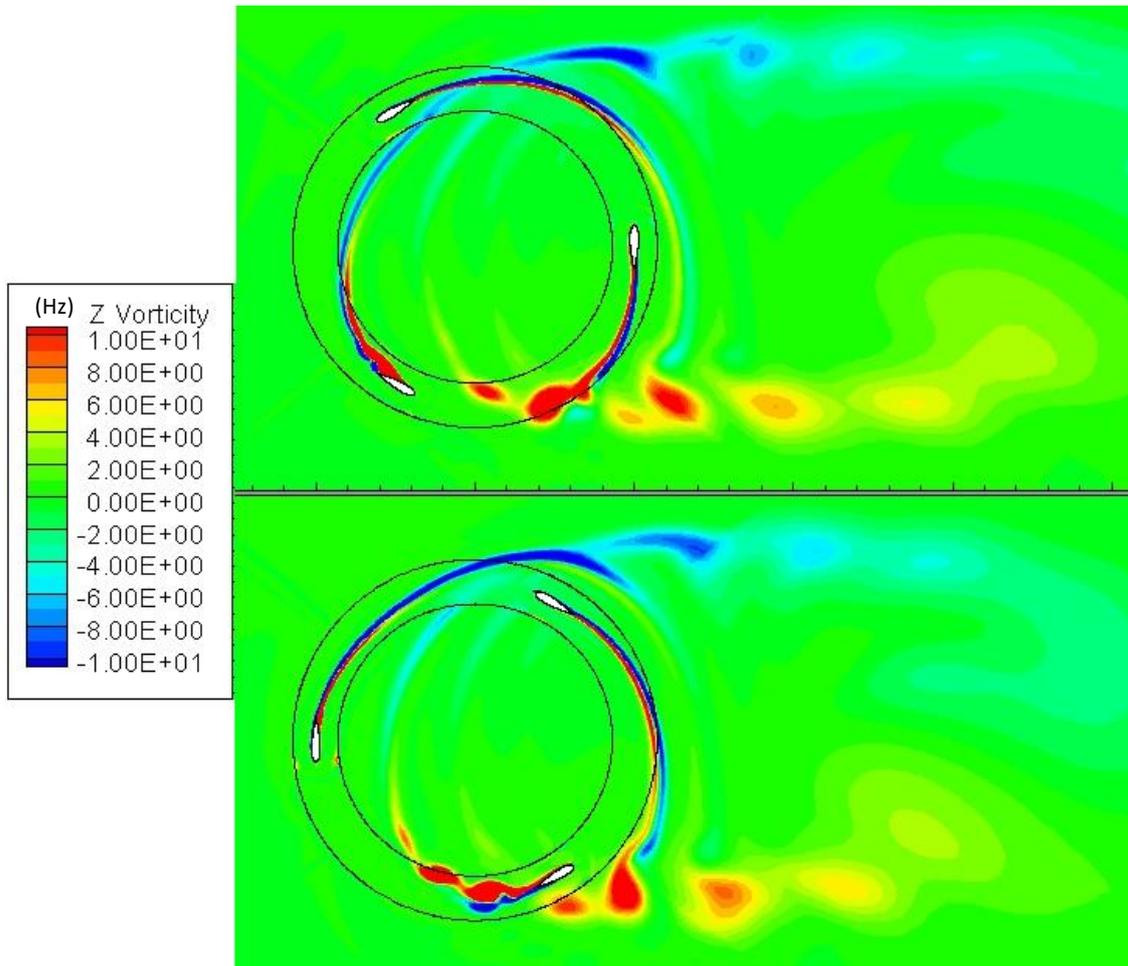


Figura 3-11 Contornos de vorticidad  $C_p$  max/min, Pitch=0°, TSR=2.5

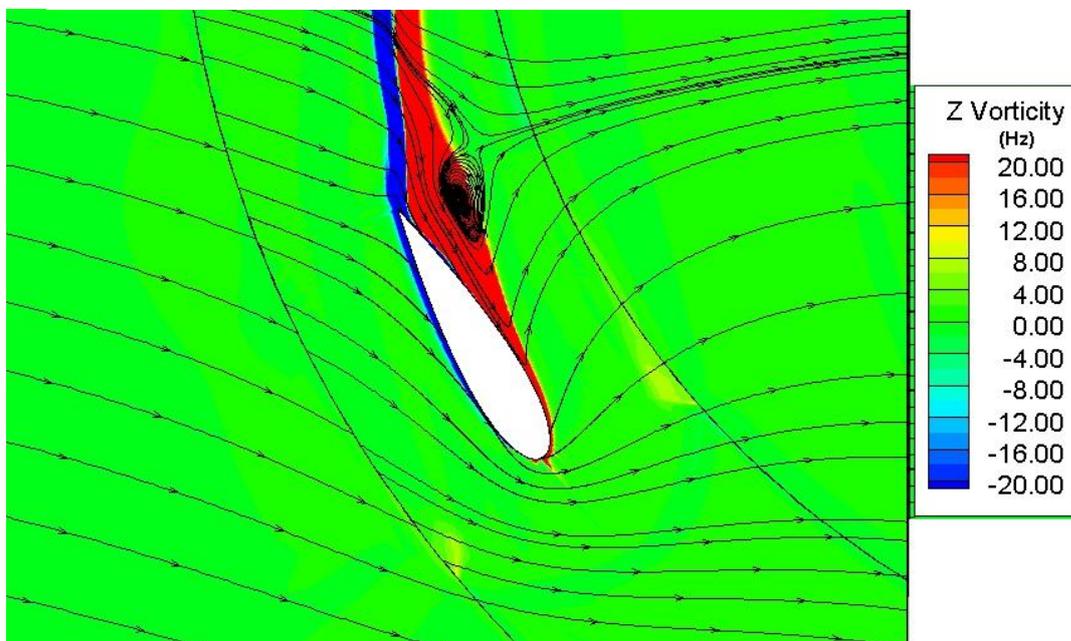


Figura 3-12 Contornos de vorticidad, Pitch=0°, TSR=2.5, 120°

Previo al desprendimiento del torbellino está su formación, como ya se había advertido en el apartado 3.2.3.1, contornos de presión. Las líneas de corriente en la posición  $+60^\circ$  preveían una formación de torbellino. Este propósito se da en la posición  $+120^\circ$ , como se puede ver en la figura 3-12. Para esa posición se capturan, los valores más intensos en cuanto a vorticidad, lo cual propicia esas recirculaciones intensas visualizadas por medio de las líneas de corriente.

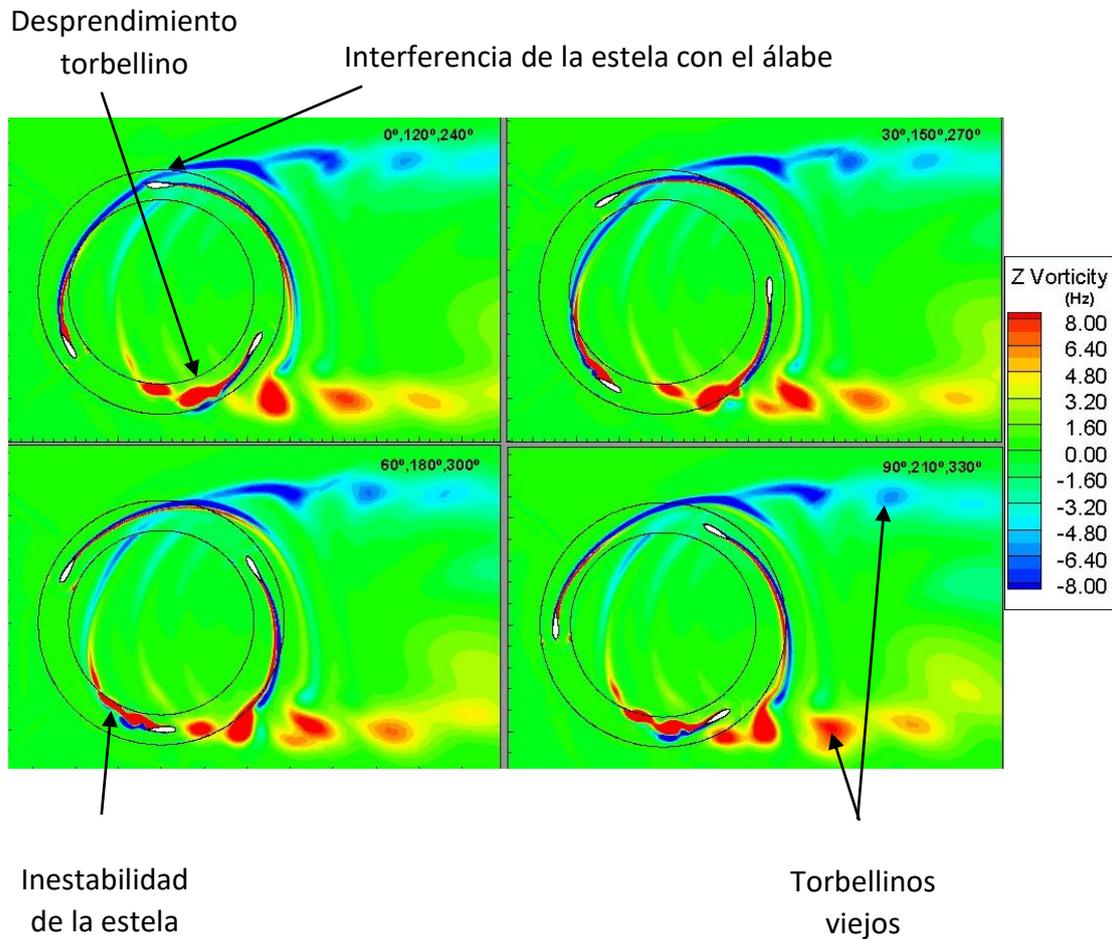


Figura 3-13 Contornos de vorticidad para el patrón de flujo,  $Pitch=0^\circ$ ,  $TSR=2.5$

Por todo ello, observado los contornos representados en la figura 3-13, se puede denotar múltiples observaciones. En primer lugar denotar que la estela de los álabes se muestra estable y sin interferencias para el recorrido desde  $+270^\circ$  hasta  $+90^\circ$  (mitad superior), donde predomina la influencia de la vorticidad horaria, y se produce el corte con la estela del posterior, dando lugar a un tipo de desprendimiento de torbellino horario, en la parte superior del modelo. Por su parte para el recorrido desde  $+90^\circ$  hasta  $270^\circ$  (mitad inferior), el flujo es mucho más turbulento, como bien se había predicho al ver los contornos de presión, donde se manifestaba una zona de menores presiones. En esta zona la influencia de los torbellinos antihorarios es más acusada, dando lugar a un desprendimiento mayor y produciendo un flujo mucho más perturbado. El motivo de las diferencias en los comportamientos se debe, a los sentidos relativos de velocidad entre el flujo y el álabe, como se denotó en la figura 2-5.

### 3.2.3.3. Contornos de velocidad

Los contornos representados en términos de velocidad absoluta calculados a partir de las componentes X e Y son de especial interés para dar explicación a los contornos de presión anteriormente expuestos. Para explicar la variación de la misma, a partir de la ecuación de energía, se da una equivalencia entre las zonas de altas presiones con bajas velocidades del fluido, y para bajas presiones con altas velocidades del mismo. Es por ello que en las zonas más rojas, cercanas a los perfiles, la tendencia a la creación de torbellinos y por ello el desprendimiento de capa límite serán los fenómenos más relevantes, como apoyaban los contornos de presión.

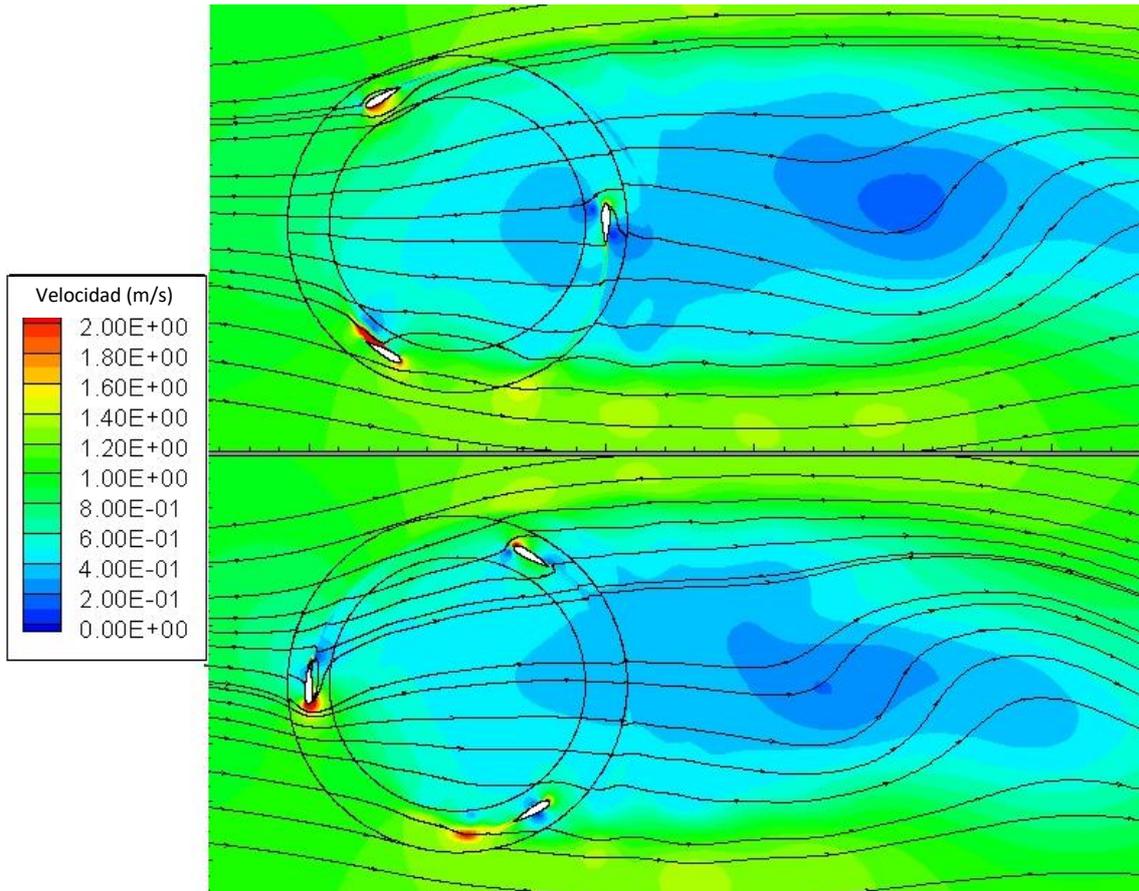


Figura 3-14 Contornos de velocidad,  $C_p$  max/min, Pitch=0°, TSR=2.5

Como se puede ver la figura 3-14, la estela azul posterior al paso de la corriente por el modelo, indica baja velocidad de traslación, acompañada de las líneas de corriente perturbadas, permiten conocer cómo se encontrará la corriente aguas abajo de la turbina. Generalmente los torbellinos de macro escala se trasladan a baja velocidad según las coordenadas del plano. Es por ello, que mediante los contornos de velocidad, se identifique la zona más lenta con el centro de un torbellino de gran escala. Al mismo tiempo como ya se denotaba en el apartado anterior de contornos de vorticidad, y como se puede visualizar en la figura 3-15, existen dos grandes zonas de vorticidad con valores contra rotantes que predecían la aparición del torbellino en cuestión. Estos torbellinos presentarán un marcado carácter anisótropo.

Que ese flujo perturbado con presencia de vorticidad, como se advertía en el diagrama anterior, entre en interferencia con otra turbina de características similares a la estudiada, no es interesante desde el punto de vista de su aprovechamiento en serie. Es por ello por lo que se

hará necesaria una distancia mínima determinada para conseguir la estabilidad de la corriente y acercarse a unas condiciones más semejantes a las de aguas arriba con un flujo sin perturbar.

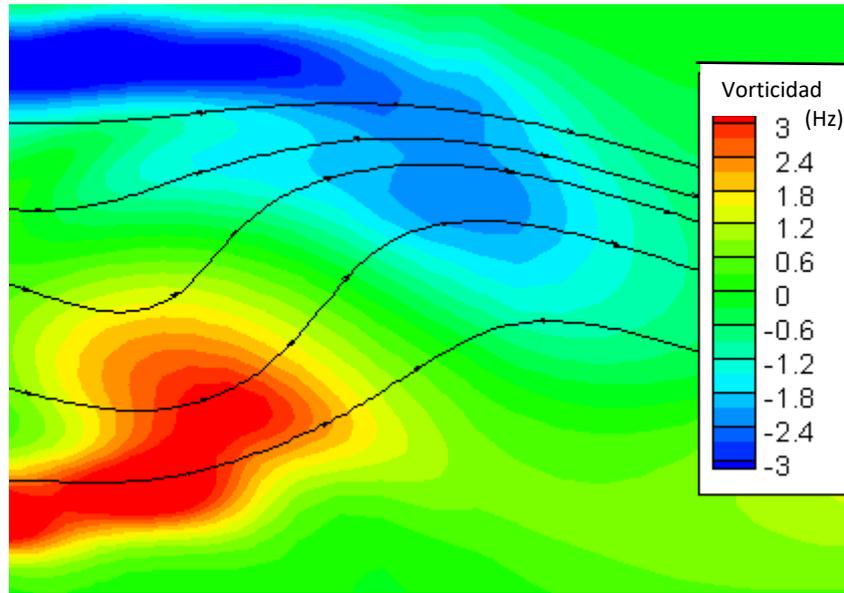


Figura 3-15 Contornos de vorticidad estela rotor, Pitch=0°, TSR=2.5

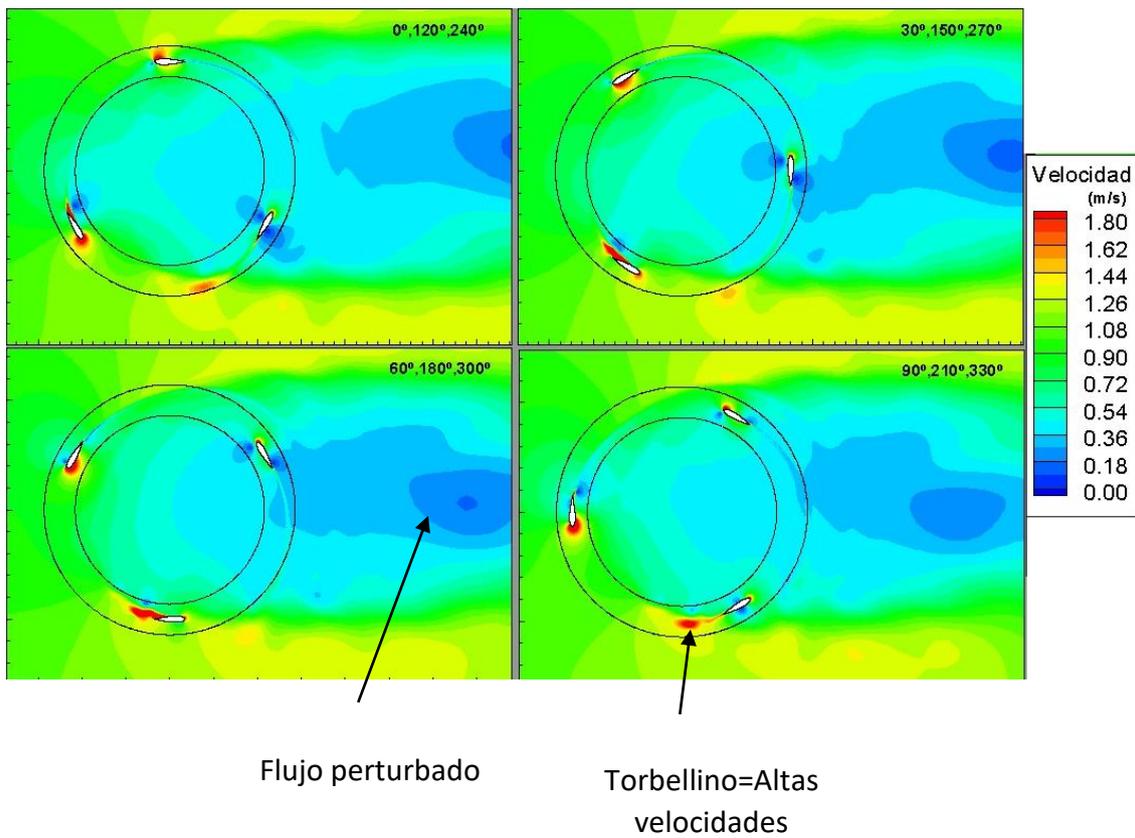


Figura 3-16 Contornos de velocidad, patrón de flujo, Pitch=0°, TSR=2.5

## Capítulo 4. Influencia del Ángulo de Pitch

Este cuarto apartado del análisis, consistirá en la variación del ángulo de pitch y su efecto, en términos de rendimiento, sobre los coeficientes de potencia óptimos, y la posible tendencia al autoarranque. Así como las diferencias de cara a la comparación de los contornos de presión, vorticidad y velocidad que permitirán dar sentido a la variación, entre los diversos casos.

En un primer momento, el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado, pasaba por el estudio de la influencia de la solidez para la turbina, debido a problemas con la creación de la malla, a causa de un *journal* defectuoso. Ésta, no permitía la creación de la corona circular a lo largo de los álabes, y por lo tanto, se optó por la modificación del objetivo, al actual.

### 4.1. Resultados numéricos

La obtención de las mallas para las simulaciones a distintos valores de Pitch, pasa por su obtención por medio del programa Gambit, como ya ocurría para la variación del número de celdas. Los valores elegidos para las simulaciones, son Pitch = -5° y +5°. Los motivos por los que se eligen éstos valores son, para comprobar los comportamientos de cara, tanto a resultados de rendimiento, como al patrón de flujo, al modificar el ángulo en ambos sentidos. En un primer momento se pretendió incluir también, valores de Pitch mayores, como en -10°, para comprobar a su vez la influencia del grado de modificación en los resultados, pero los problemas de convergencia que venían asociados a estas mallas, imposibilitaron su estudio.

Para las mallas estudiadas a +5° y -5°, existían problemas por la generación amorfa en las celdas del espacio, de las estelas de los álabes. A la hora de las simulaciones, estas celdas imposibilitaban su estudio. Para radicar con el problema se reconstruyó las mismas, mediante celdas triangulares, más homogéneas, que posibilitaron la correcta simulación.

#### 4.1.1. Curvas de potencia

Posteriormente a la simulación de ambos modelos, se obtuvieron los siguientes resultados numéricos mostrados en las tablas 4-1 y 4-2. Dichos valores fueron empleados, junto a los del caso base, para la creación de la gráfica característica, Cp/TSR, mostrada en la figura 4-1, la cual sintetiza todos los resultados obtenidos en el trabajo, como se justificara a continuación.

Como se puede comprobar por medio de la tabla 4-1, el valor máximo de Cp se da para un TSR=2.25, con pitch +5 , mientras que a partir de entonces existe una ligera tendencia a la disminución del Cp lo que posteriormente por medio de la figura 4-1, permitirá aproximar la tendencia de la gráfica.

Tabla 4-1 Parámetros característicos en las simulaciones para Pitch=+5°

Pitch=+5°			
$\omega$ (rad/s)	TSR	Cm	Cp
1	0.5	0.0210	0.0105
2	1	0.1570	0.1570
3	1.5	0.1923	0.2885
4	2	0.2542	0.5084
<b>4.5</b>	<b>2.25</b>	<b>0.2391</b>	<b>0.5379</b>
5	2.5	0.2114	0.5285

Tabla 4-2 Parámetros característicos en las simulaciones para Pitch=-5°

Pitch=-5°			
$\omega$ (rad/s)	TSR	Cm	Cp
2.5	1.25	0.2013	0.2517
3	1.5	0.1858	0.2786
4	2	0.1521	0.3042
<b>5</b>	<b>2.5</b>	<b>0.2104</b>	<b>0.5260</b>
6	3	0.1436	0.4307
10	5	-0.0500	-0.2500

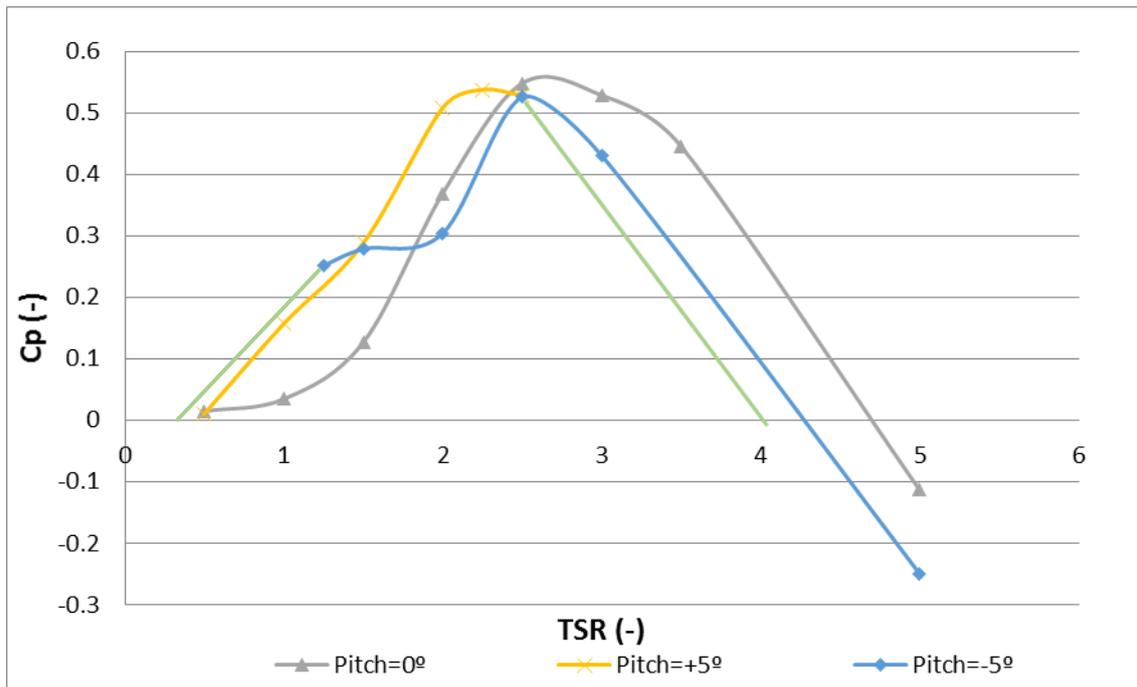


Figura 4-1 Grafica comparativa del Cp frente al TSR

Como se puede apreciar, las campanas para los casos de pitch= -5° y +5°, no se encuentran cerradas. La correspondiente a pitch= -5° no cierra para bajos valores TSR, y por su parte la de pitch= +5° no lo hace los altos. A la hora de la realización de las simulaciones, se continuaron los problemas debidos a la divergencia, para los casos de altos valores de TSR no se conseguía obtener ningún tipo de solución, mientras que para los bajos, se obtenían soluciones sin sentido, con valores de coeficiente de par de varios órdenes superior al resto. Pese a la modificación del algoritmo de resolución, y pruebas reiteradas para asegurar la repetitividad de las simulaciones, no se logró el objetivo de cerrar las campanas. Por ello a modo de referencia mediante las líneas verdes delineadas, de la figura 4-1, se presenta, a modo ilustrativo, la solución que podrían adoptar en un caso de convergencia total las gráficas.

Visualizando las gráficas nuevamente, en esta ocasión con un propósito comparativo en relación a la modificación efectuada, se denota que a la par que se modifican los valores del Pitch en cualquiera de los dos sentidos, se mejora la tendencia al autoarranque, pero disminuye la producción de potencia, por presentar menores valores de Cp para altos TSR.

Los punto de diseño para los 3 modelos son similares en el entorno de TSR=2.25-2.75, y con tendencias muy semejantes.

Tabla 4-3 Resumen de los valores característicos para los distintos modelos

	Nº Celdas	TSR de diseño (-)	Cm (-)	Cp (-)	Rango de TSR (-)
<b>Pitch= 0º</b>	176915	2.5	0.21936	0.54840	0.5-4.7
<b>Pitch= -5º</b>	176015	2.5	0.21039	0.52598	0.25- 4.25
<b>Pitch= +5º</b>	183641	2.25	0.23908	0.53794	0.5-4

A modo de resumen de los valores obtenidos, se presenta en la tabla 4-3, con todos los parámetros de valor, para una comparación numérica. Como puede apreciarse la diferencia entre los coeficientes de potencia promedios, para los distintos puntos de diseño, es mínima, existiendo una diferencia total de un 3.82% entre el mayor, Pitch=0º y el menor, -5º.

#### 4.1.2. Coeficiente de potencia frente al ángulo

Como se puede observar en la figura 4-2 y 4-3, existen diferencias entre los distintos perfiles de coeficiente de potencia frente al ángulo, para el punto de diseño de cada Pitch. Por un lado el ángulo, para el que cada modelo aporta el mayor rendimiento. Por otro, la amplitud de la variación del Cp instantáneo presenta una diferencia relativa del 22.83% entre el modelo con mayor variación, Pitch=0º y el de menor, para un Pitch=+5º.

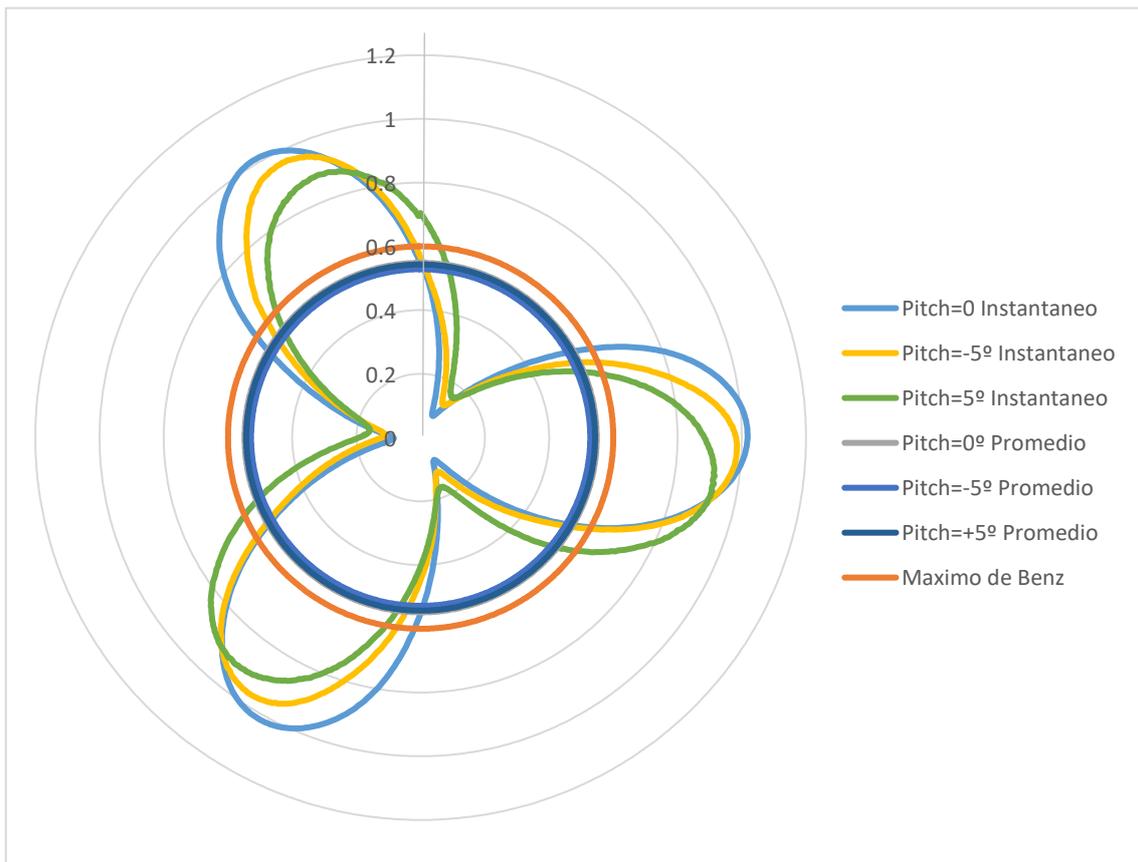


Figura 4-2 Valores de Cp frente al ángulo en polares para la variación del Pitch

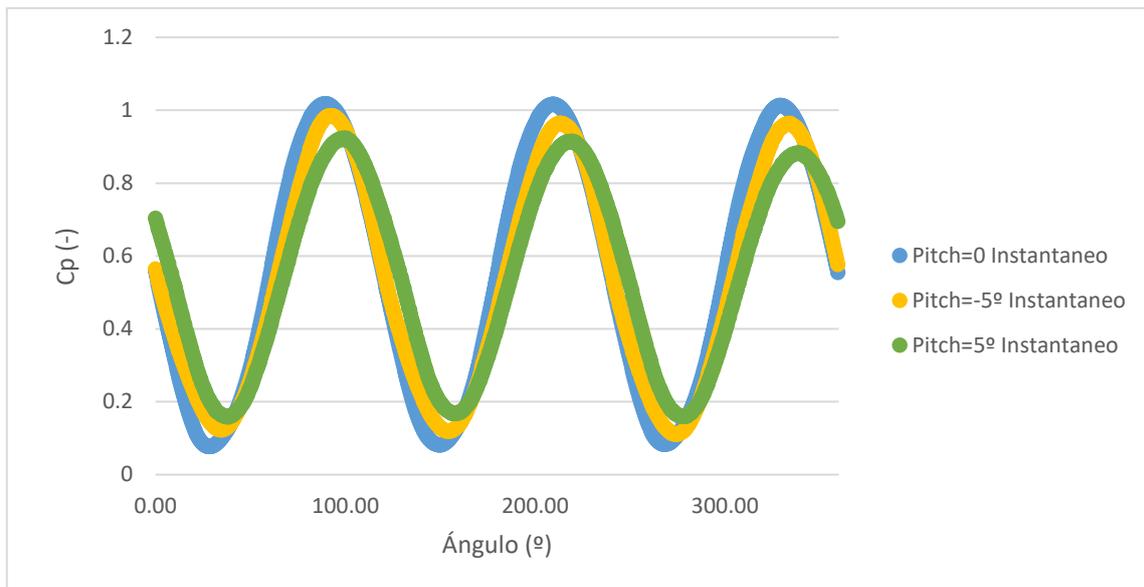


Figura 4-3 Valores de  $C_p$  frente al ángulo en para la variación del Pitch

Se puede ver una ligera tendencia al adelantamiento de los valores de coeficiente de potencia en referencia al ángulo, para el modelo de pitch  $-5^\circ$  y  $+5^\circ$ . Pese a que en un primer momento, la justificación del porqué, de que el sentido del pitch, provoque un mayor o menor adelanto, no sea inmediata, se podrá justificar posteriormente, por medio del análisis del patrón de flujo.

A partir de los resultados numéricos expuestos, el modelo más eficiente y por lo tanto el óptimo para trabajar es el de pitch  $0^\circ$ . Por otro lado, es también, el que mayor fluctuación presenta en las curvas de potencia, lo cual no es demasiado conveniente desde el punto de vista de la fatiga de los materiales. Puesto que no existen criterios decisivos desde un punto de vista numérico-gráfico, se procederá a profundizar en el estudio a partir del análisis del patrón de flujo.

#### 4.2. Análisis del patrón de flujo

Una vez obtenidas las curvas características, para las diversas simulaciones derivadas de la variación del pitch, se procederá a la interpretación del patrón de flujo mediante los diferentes contornos de las variables del fluido. Mediante éstos, se dará explicación a las diferencias observadas en el análisis de los resultados numéricos del apartado anterior.

Todos los contornos mostrados en este capítulo, corresponden a las simulaciones para los puntos de diseño, de cada valor del pitch correspondiente a los ángulos,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $+5^\circ$ . A la hora de designar los distintos modelos, cuando se nombre al modelo a), se refiere al Pitch  $-5^\circ$ ; b) Pitch  $0^\circ$ ; c) Pitch  $+5^\circ$ .

Asimismo las posiciones angulares, en los que se representaran los contornos de las variables, varían en intervalos de  $60^\circ$ , desde la posición inicial. Por ello se ilustraran las diferencias en las posiciones:  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $300^\circ$ .

En primer lugar, siguiendo el orden llevado en el resto de capítulos, se comenzará con la interpretación de los contornos de presión, seguidos por los de vorticidad. En última instancia profundizando en el comportamiento del flujo alrededor de los álabes, se interpretará el patrón de velocidad, añadiendo las líneas de corriente derivadas del sentido de esta variable.

#### 4.2.1. Contornos de presión del análisis paramétrico

Por medio de las figuras 4-4 y 4-5, se ilustran todas las posiciones angulares y modelos citados. Como se puede visualizar existen diferencias en los contornos, tanto a nivel de los álabes, como a nivel del dominio estático del interior de la corona circular.

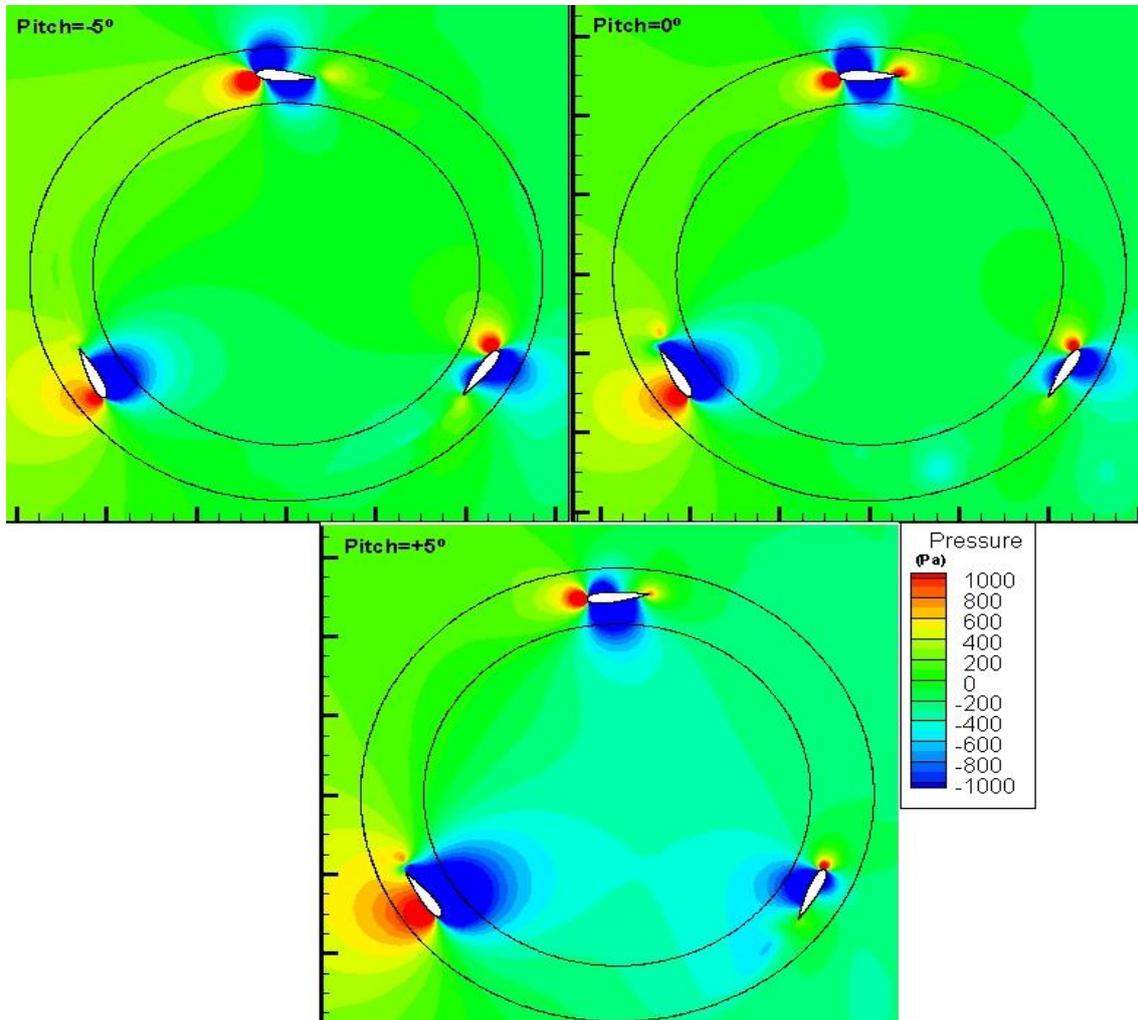


Figura 4-4 Contornos de presión en el punto de diseño, para la posición a 0°,120°,240°.

Para el modelo Pitch=+5°, se observa que en la zona del interior del rotor, los valores de presión son menores en comparación a los otros modelos. Asimismo para las posiciones 60° y 120°, donde la caracterización del extradós, e intradós, es más inmediata, se muestran máximos y mínimos de mayor valor absoluto que para los otros dos.

En las posiciones 0°, 180°, 240° y 300°, para el modelo de pitch=+5° se invierten los sentidos del extradós e intradós, lo que implica que para la totalidad del recorrido los extradós se encuentra en la zona interior del álabes.

Para la posición 180° mientras que en el pitch=0°, se visualizaban los centros de los torbellinos desprendidos en la estela del álabes, este fenómeno no se recoge en los otros dos modelos. Pese a ello en el modelo c), pitch=+5°, sí que existe una fuerte zona de succión para la cara interior del álabes.

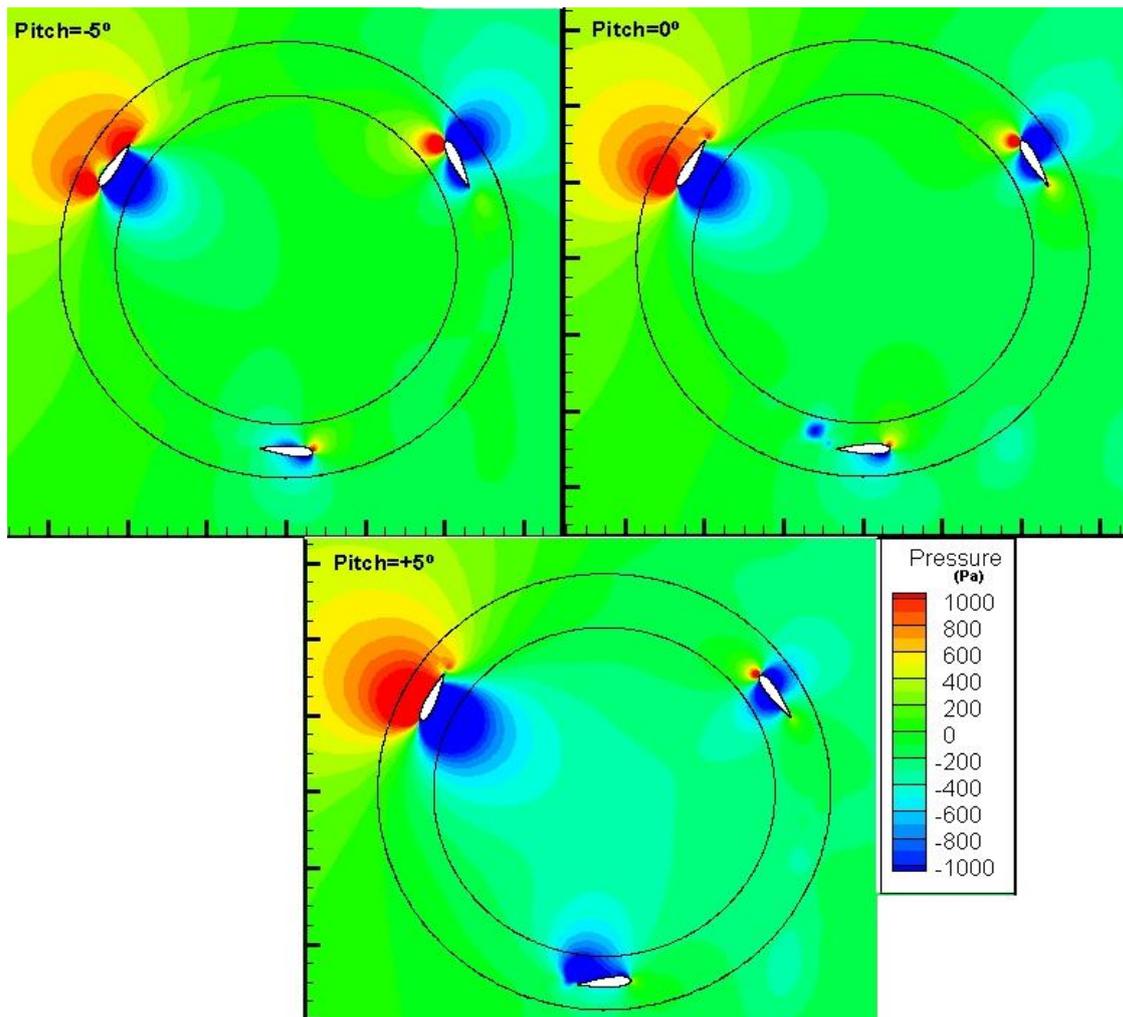


Figura 4-5 Contornos de presión en el punto de diseño, para la posición a 60°,180°,300°.

#### 4.2.2. Contornos de vorticidad del análisis paramétrico

De forma semejante a la presión, por medio de las figuras 4-6, y 4-7, se visualiza la vorticidad. Entre las diferencias más llamativas, en términos generales, sin entrar en el entorno de los álabes, se encuentra, que la turbulencia en los modelos a) y c), es superior que para el de b). Al mismo tiempo, las estelas de esos modelos son más intensas, conllevando por un lado, a una mayor inducción de torbellinos contrarrotantes, y por otra, al perdurar más en el tiempo durante la traslación del torbellino.

Los torbellinos desprendidos en el recorrido de los álabes para el modelo b), tienen forma circular, quedado claramente identificados los distintos centros de los mismos. Por el contrario para los otros modelos, el desprendimiento de los torbellinos equivalentes, se produce de una forma más difusa, pudiendo interpretar que el torbellino, más alargado, es una prolongación sin desprender de la estela que forma el álabe en su recorrido.

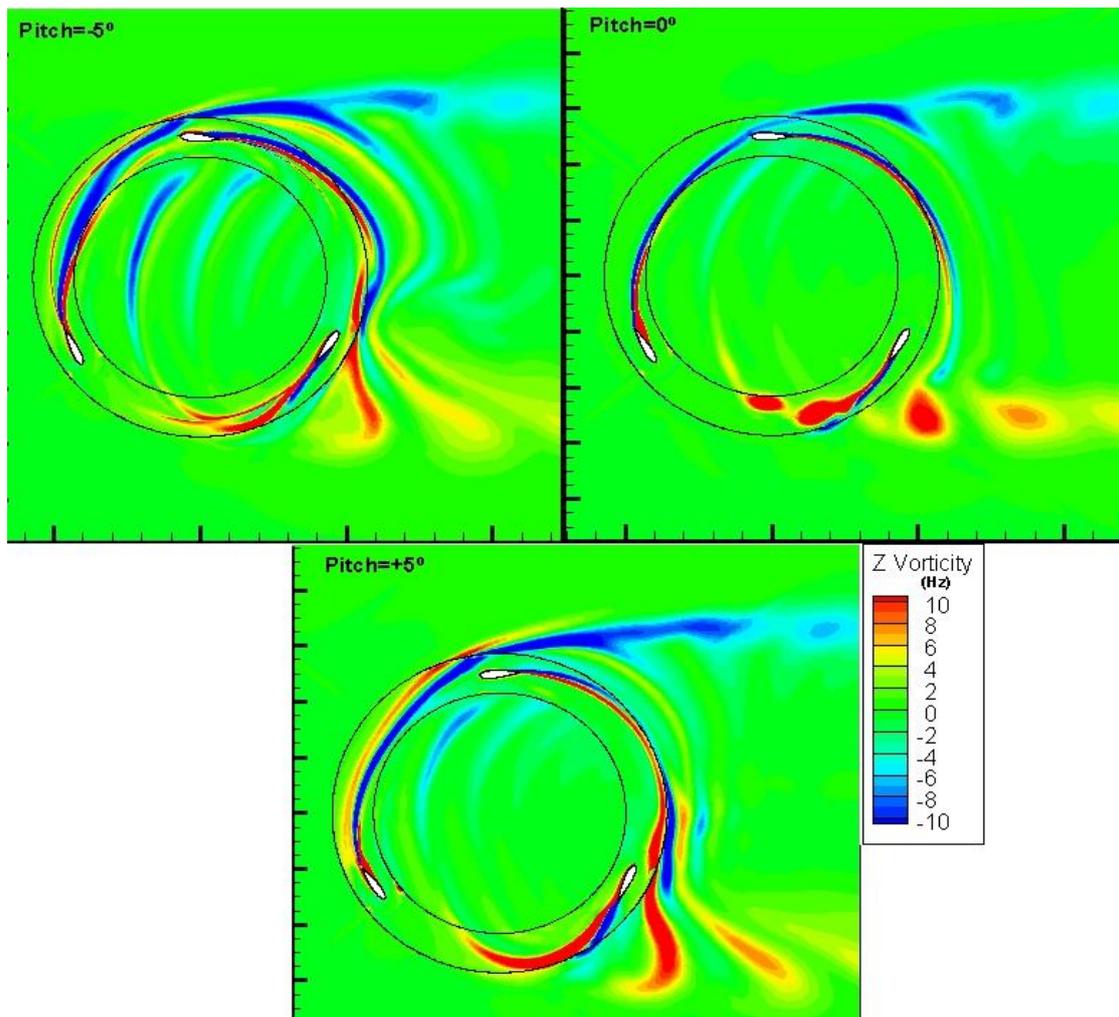


Figura 4-6 Contornos de vorticidad en el punto de diseño, para la posición a 0°, 120°, 240°.

En cuanto al fenómeno de corte con la estela que se explicó en el apartado 3.2.3.3, contornos de vorticidad, se visualiza un retraso del mismo en el tiempo para los modelos a) y c). Como se justificó, la perturbación del flujo por el corte de la estela, conllevaba entre otras razones a la disminución del  $C_p$ , para esa posición angular. Como se visualiza en la figura 4-6, mientras que para el modelo b), el corte en el borde de ataque se produce aproximadamente para la posición angular de 0°, para el modelo a), esto se da a 5°, y para el c), a 10°. Por lo tanto, este fenómeno justifica el atraso de las curvas de potencia frente al ángulo, como se denotaba en el apartado 4.1.2.

En el apartado de las semejanzas, pese a que las formas de las masas de vorticidad son muy distantes, el sentido de las mismas es constante, y por ello se podrán encontrar las zonas cálidas y frías en los tres modelos en las mismas posiciones relativas del rotor y los álabes lo cual da buena repetitividad a los modelos.

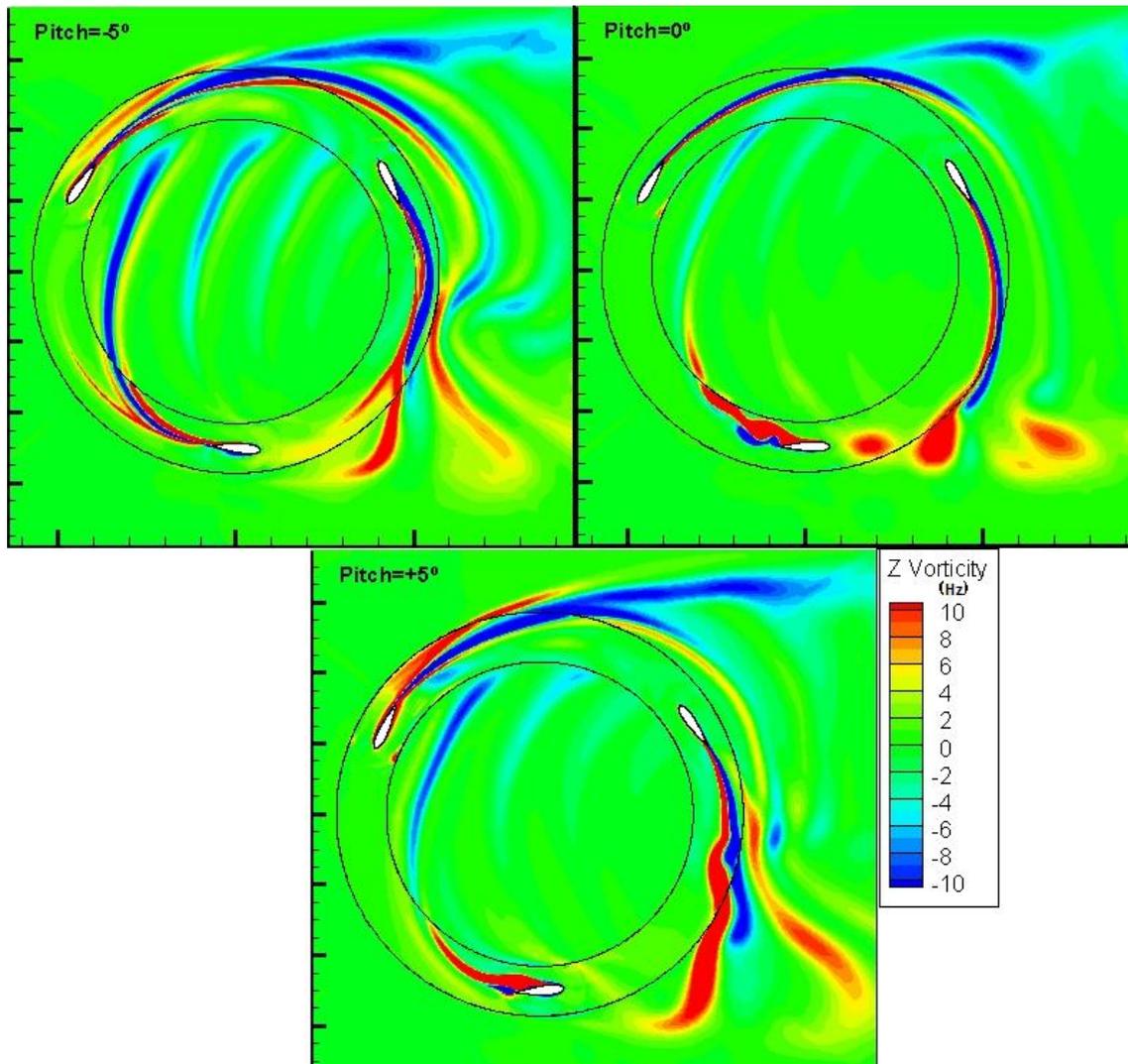


Figura 4-7 Contornos de vorticidad en el punto de diseño, para la posición a 60°, 180°, 300°.

#### 4.2.3. Contornos de velocidad del análisis paramétrico

Por medio de la figura 4-8, se puede visualizar de una forma más profunda y precisa, en comparación con las anteriores, los álabes para la posición del rotor al inicio. Equivalentemente en la figura 4-9, se visualizan las posiciones opuestas. Por medio de ambas ilustraciones se puede llevar a cabo una interpretación del patrón de flujo, con avances cada 60°. Al mismo tiempo, se presentan 3 columnas para los distintos modelos en función de la variación del ángulo de pitch, a) Pitch=-5°, b) Pitch=0°, c) Pitch=+5°.

Para la interpretación del flujo alrededor de cada álabes, se procede a particularizar cada posición angular, en un apartado independiente, para hablar de las peculiaridades comparativas entre los modelos.

En sendas figuras de los contornos de velocidad, se visualizan elipses con contorno rojo, delineadas a modo de identificación de las zonas donde se producen recirculaciones.

#### 4.2.3.1. Contornos de velocidad para la posición angular a 0°

Los valores del módulo de la velocidad son mayores, cuanto más negativo, es el ángulo de pitch, centrándose en el borde de ataque la máxima velocidad. Asimismo, la zona de remanso también es más intensa en función de ese parámetro, en el mismo sentido, y las recirculaciones, de mayor amplitud para la zona interior del álabe.

El fenómeno de desprendimiento de capa límite, producido en la parte exterior del perfil, viene alentada por la inclinación del álabe, siendo más fácil su desprendimiento para el caso a), donde el ángulo formado por el flujo, y el álabe es máximo, esto es lo que propicia la explicación de la variación del módulo de la velocidad

Para el modelo a), se visualiza una tendencia de alta velocidad en la primera parte de la estela, inmediata al borde de salida, lo cual genera un fenómeno de succión, como conforman los contornos de presión del apartado 4.2.1, a medida que se retrocede suficiente, pese a que el comportamiento de la estela tiende a unificarse para todos los modelos.

#### 4.2.3.2. Contornos de velocidad para la posición angular a 120°

La diferencia más notoria para esta posición, se encuentra en las recirculaciones y torbellinos, formados en el interior del álabe. Para el modelo b), el torbellino es más reducido pero con mayor intensidad, como confirma la vorticidad de la zona, mientras que por su lado para c), se encuentra un comportamiento opuesto, con mayor amplitud y menor intensidad.

A medida que el flujo incide sobre el álabe por la parte de la cola, debido a la baja presión asociada a la zona interior, como demuestra el apartado 4.2.1, produce que el mismo se desvíe bruscamente hacia la cara interior del álabe, la intensidad con la que se produce este proceso la marca la magnitud del valor de la velocidad en este punto, que como se visualiza es elevada para los modelos b) y c).

De forma semejante, ocurre en el borde de ataque, donde la intensidad de la velocidad indica en qué grado se desvía el flujo. El desprendimiento de la capa límite del borde, se produce de forma más inmediata a menores valores de velocidad, como en el modelo a).

#### 4.2.3.3. Contornos de velocidad para la posición angular a 240°

El flujo tiende a salir de las zonas más cercanas al borde de ataque, y la cara interior, y desde ahí se divide en dos. Una corriente que se dirige a la parte exterior del álabe, recirculándose en mayor o menor medida. Y otra que se dirige a la parte de la cola para morir ahí. Se producen por lo tanto dos recirculaciones, siendo éstas, de mayor intensidad para los modelos a) y c), con el pitch modificado.

De forma semejante a como ocurría en la posición de 120°, en la cola del perfil, en función de la intensidad de la velocidad, se ve una tendencia a la succión del flujo, en la parte donde se produce la interfase entre la cara interior y la exterior del álabe. A mayor intensidad, mayor cambio de la dirección del flujo.

Alejándose suficiente del álabe, en la estela, como se puede contrastar con los contornos de vorticidad y presión, en el modelo b), se producen mayores torbellinos desprendidos, que en los otros dos, pese a presentar estelas asumiblemente semejantes.

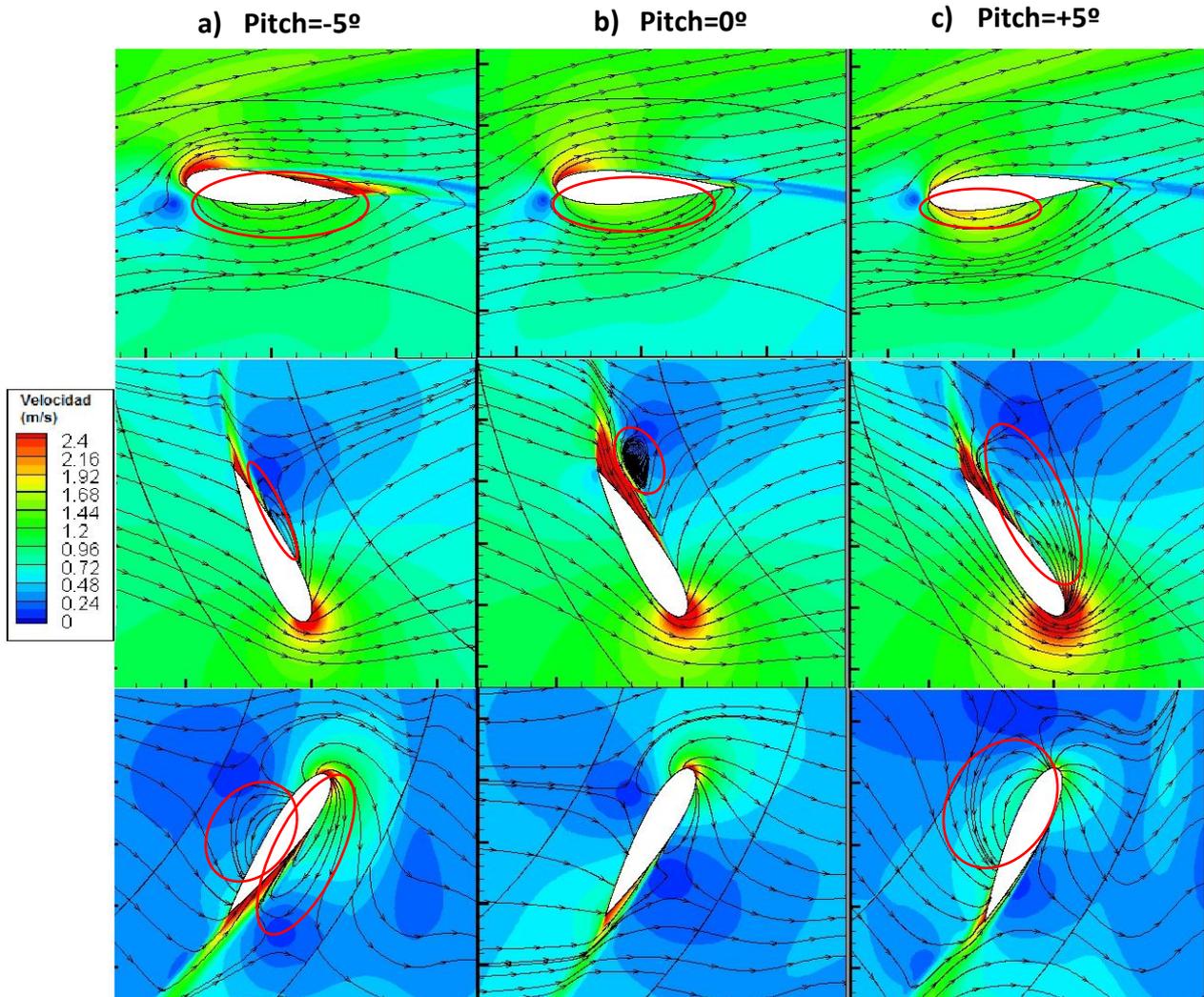


Figura 4-8 Contornos de velocidad en el punto de diseño, para la posición a 0°, 120°, 240°.

#### 4.2.3.4. Contornos de velocidad para la posición angular a 60°

El flujo a través del perfil, se produce entrando por la parte exterior, cercana al borde de ataque, dividiéndose en una parte que circula hacia la parte delantera del perfil, y otra hacia la cola. La variación del pitch tiene influencia en la corriente que se dirige hacia la parte delantera, puesto que por criterios, meramente geométricos, a menores valores de pitch, menor tendencia al desprendimiento de la capa límite soportara el flujo. Por lo tanto, las recirculaciones en la parte interior del álabe serán menores. Este comportamiento puede verse corroborado, por medio de la intensidad de la velocidad en esa parte del perfil, al mismo tiempo, con la lentitud de la velocidad en la zona de remanso en la cara opuesta.

Pese a pequeñas diferencia, la segunda parte del flujo, en dirección hacia la cola, no presenta demasiada influencia del pitch, a la hora de comparar los modelos. Produciendo unas estelas semejantes.

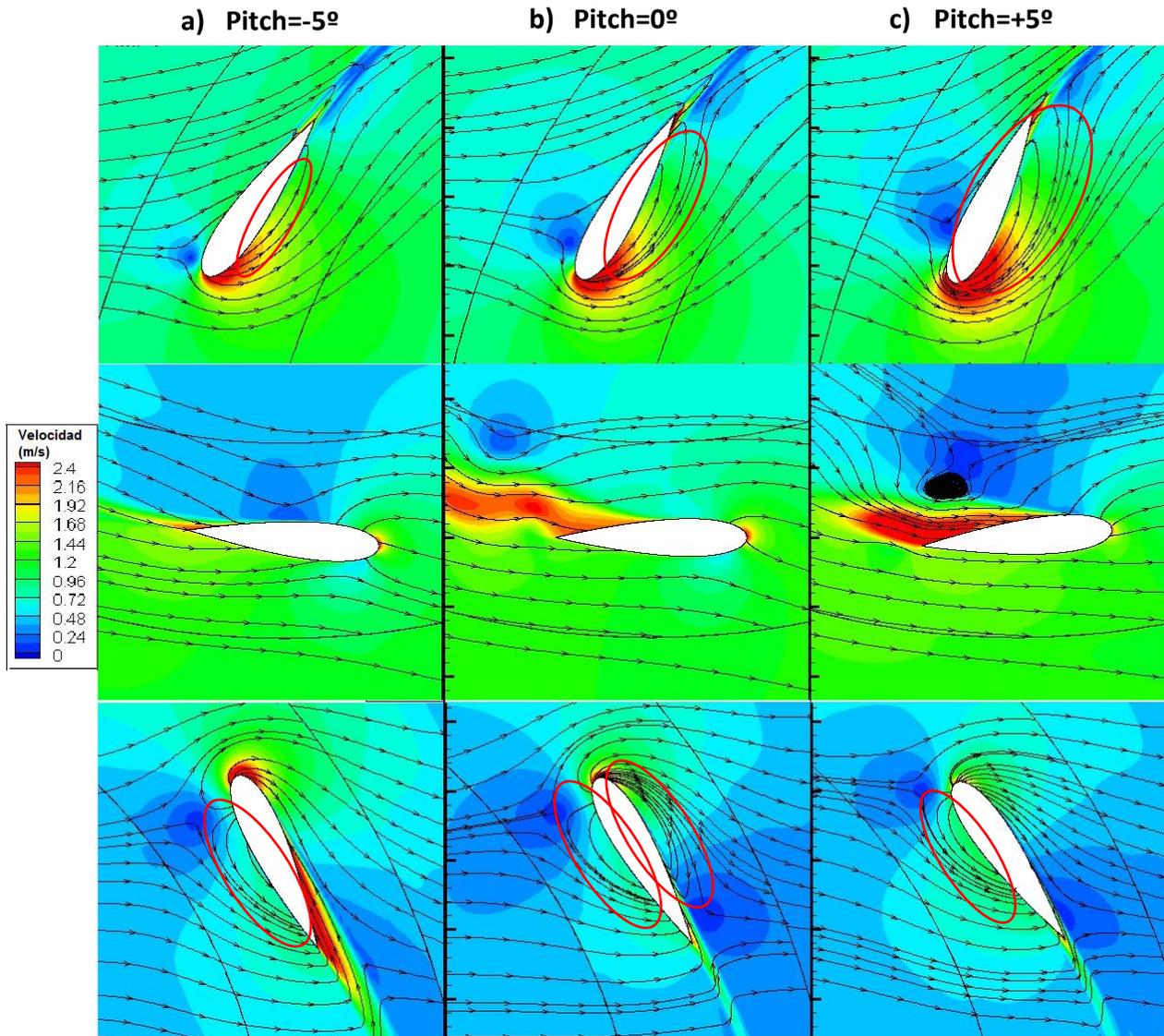


Figura 4-9 Contornos de velocidad en el punto de diseño, para la posición a  $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $300^\circ$ .

#### 4.2.3.5. Contornos de velocidad para la posición angular a $180^\circ$

Al contrario de lo ocurrido en el ángulo a  $60^\circ$ , es en la estela donde se observan las mayores diferencias entre los modelos.

Puesto que para esta situación, el álabe se encuentra moviéndose en el mismo sentido que el flujo, pero a mayor velocidad que éste, no es de extrañar la formación de fuerte turbulencia en la cola del álabe. Debido a la mayor velocidad del álabe, podría asumirse el supuesto de que el flujo, circulara en el sentido en el que la incidencia sobre el álabe se produjera desde la parte del borde de ataque. Por ello, no tiene mucho sentido el que el análisis, se base en las líneas de corriente.

Los fenómenos más interesantes, desde el punto de vista de la turbulencia, se manifiestan para los modelos b) y c), donde las estelas para la cara interior, presentan mucha mayor magnitud en comparación con el modelo a). Este comportamiento podía ser observado a través de los contornos de vorticidad, donde la estela para el modelo a), se mantenía estable, mientras que para los otros dos, la misma se había inestabilizado, y había desprendido torbellinos. O por la fuerte succión de los mismos en los contornos de presión.



#### 4.2.3.6. *Contornos de velocidad para la posición angular a 300º*

De forma semejante a lo explicado para el patrón de flujo en la posición 60º, por criterios geométricos, el ángulo de pitch, modifica el desprendimiento de la capa límite en el borde de ataque. En este caso para mayores ángulos de pitch, se observa una menor tendencia al desprendimiento, que asimismo, es representado por la magnitud de la velocidad en ese borde.

Al mismo tiempo, por razones semejantes, en el modelo a), se manifiesta una fuerte zona de succión en la cara exterior cerca de la cola, propiciada por la mayor verticalidad del álabe. Esa succión recoge el flujo en dirección a la cola.

Una parte muy importante del flujo aguas abajo del álabe nace en el borde de ataque, este es proveniente de las recirculaciones de cada modelo así como de la zona de remanso anterior, de dimensiones poco fluctuantes para los distintos modelos. Las líneas de corrientes no muestran trayectorias demasiado variables, a excepción de para el modelo b).

## Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

### 5.1. Conclusiones del estudio

Como se estableció a través de los objetivos del capítulo 1 de este trabajo, se pretendía, por un lado, obtener un modelo válido para la experimentación numérica, de una turbina de las características descritas en el capítulo 2, y a su vez, la obtención de los suficientes resultados e información que permitieran dar justificación de la modificación del rendimiento en función del análisis paramétrico sobre el Pitch.

Por lo tanto las conclusiones obtenidas de este trabajo son:

- Se ha obtenido un modelo numérico, a través del software Fluent, que aproxima adecuadamente el comportamiento de los modelos reales equivalentes, como se contextualizó en el Apartado 3.2.1. Por lo tanto es posible llevar a cabo, pruebas sobre la modificación de distintos parámetros, y estudiar la influencia de éstos, sobre el comportamiento de la turbina, con la intención de lograr buscar el punto de funcionamiento óptimo del modelo.
- Los resultados numéricos obtenidos, incluso después de la eliminación de la sobreestimación, a razón de las simplificaciones, son notablemente más altos que los estudios anteriores. Por ello, con rendimientos superiores al 50%, se obtienen resultados cercanos al límite de Betz. Lo que implica que al fin la turbina se convierte en una opción válida a la hora de la explotación de energías renovables, y la misma entra en competencia directa con los generadores de eje horizontal.
- Mediante el análisis del patrón de flujo, del capítulo 3, se dió justificación y concordancia, entre los resultados numéricos de las curvas características y de par, de las simulaciones convergidas y los contornos mostrados. Esto evidencia, la posibilidad de optimización, a través del estudio sobre la influencia de la turbulencia en las diversas posiciones de los álabes, para su posterior disminución.
- En cuanto al análisis paramétrico, para los distintos valores del pitch, se realizaron simulación exitosas para los ángulos a  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $+5^\circ$ , pese a que las simulación a  $-5^\circ$  y  $+5^\circ$ , no se lograra el corte con el eje de abscisas por los extremos, se obtuvieron los puntos de diseño para todos los modelos, pudiendo por lo tanto llevar a cabo la comparación en términos numéricos y de patrón de flujo.
- Debido a la semejanza de los valores máximos de  $C_p$ , para los distintos modelos, en el capítulo 4, se debió transcender en el estudio, llegando a la conclusión que el valor central de las simulaciones, es decir el de pitch=  $0^\circ$ , era el que presentaba un patrón de flujo menos inestable. Lo cual, unido a los resultados numéricos, como son gozar con el  $C_p$  máximo mayor, y presentar un rango de funcionamiento más amplio, en términos de TSR, en comparación al resto, verificaba que éste, era el modelo más adecuado para ser implementado en desarrollos futuros.

## 5.2. Investigaciones futuras

Entre las líneas de investigación para proseguir con el estudio de los generadores de eje vertical, se pueden destacar las siguientes:

- Utilización de un modelo tridimensional, para el estudio de este trabajo, con la intención de verificar, los valores de rendimiento en un modelo más fiable y realista, sin simplificaciones.
- Emplear álabes helicoidales que posibiliten la obtención de una curva de potencia con menores fluctuaciones, y con la intención de hacer nulas las mismas, mejorando la capacidad de autoarranque y eliminando los problemas debidos a la fatiga de los materiales.
- Ampliar el rango de variación del pitch a valores más allá del  $\pm 5^\circ$ , comprobando la influencia del módulo del pitch en el estudio. Asimismo contrastar los resultados con un modelo que modifique paralelamente la variación del pitch y la solidez, la intención de obtener mejores rendimientos.
- Variación de parámetros geométricos, como son, el número de álabes del modelo, distintos perfiles o geometrías para los álabes.
- Posibilidad de implantar un mecanismo de dirección estático con ángulos variables, para modificar el flujo de la corriente, y buscar el funcionamiento óptimo de la turbina para un mayor rango de TSR.
- Generación de un modelo real, para la experimentación y verificación de los distintos modelos numéricos a estudiar.

## Referencias

- [Zhang - 2012]** - Zhang X., Wang S., Wang F., Zhang, L., Sheng Q. (2012). The hydrodynamic characteristics of free variable pitch vertical axis tidal turbine. Institute of Ocean Renewable Energy System, pp. 834-840.
- [Tjiu – 2013]** - Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M.H., Sopian, K. (2013). Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: Challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development. *Renewable Energy*, 75, pp. 560-571.
- [Jing - 2013]** - Jing, F., Sheng, Q., Zhang, L. (2013). Experimental research on tidal current vertical axis turbine with variable-pitch blades. *Ocean Engineering*, 88, pp. 228–241.
- [SANDIA-2014]** – Neary, V.S., Fontaine, A.A., Bachant, P., Gunawan, B., Wosnik, M., Michelen, C., Meyer, R.J., Stranka, W. A. (2014). US Department of Energy (DOE) National Lab Activities in Marine Hydrokinetics: Scaled Model Testing of DOE Reference Turbines. SANDIA National Laboratories.
- [Parra-2014]** – Parra, T., Gallegos, A., Regidor, M., Uzarraga, Palomar, D.J., Castro, F. (2014). Influence of fixed angle on the performance of small scale H-Darrieus. Proceedings of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting and 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels.
- [Cáceres-2014]** - Cáceres, S.A. (2014). Estudio y Modelamiento de una turbina Eólica de Eje Vertical de Pequeña Escala. Universidad de Chile, memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico.
- [Lanzafame-2014]** – Lanzafame, R., Mauro, S., Messina, M. (2014). 2D CFD Modelling of a H-Darrieus Wind Turbines using a Transition Turbulence Model. *Energy Procedia*, 45, pp. 131-140.
- [Marsh - 2014]** - Marsh, P., Ranmuthugala, D., Penesis, I., Thomas, G. (2014). Three-dimensional numerical simulations of straight-bladed vertical axis tidal turbines investigation power output, torque ripple and mounting forces. *Renewable Energy*, 83, pp. 67-77.
- [Marsh - 2015]** - Marsh, P., Ranmuthugala, D., Penesis, I., Thomas, G. (2015). The influence of turbulence model and two and three-dimensional domain selection on the simulated performance characteristics of vertical axis tidal turbines. *Renewable Energy*, 105, pp. 106-116.
- [Rivero – 2016]** – Rivero, A. (2016). Análisis CFD sobre la influencia de la solidez en aerogeneradores H-Darrieus con perfiles asimétricos NACA 7425. Universidad de Valladolid, TGF.
- [Fernández - 2016]** – Fernández, M. 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. Universidad de Valladolid, TGF.

### **Referencias de imágenes**

Figura 1-1: (Visitada el 20/05/2017)

<https://www.iberdrola.com/conocenos/cifras/datos-operativos>

Figura 1-2: (Visitada el 18/04/2017)

<https://smienergias.wordpress.com/category/energia-mareomotriz/las-cifras-de-la-energia-mareomotriz-en-espana/>

Figura 1-3: (Visitada el 28/03/2017)

<https://www.pinterest.com/pin/429812358162607761/>

Figura 2-4: (Visitada el 13/04/2017)

<http://www.despegamos.es/2014/12/23/perfiles-naca/>

Figura 2-5: (Visitada el 15/04/2017)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical\\_axis\\_wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_axis_wind_turbine)

### **Otras webs visitadas en el estudio**

<http://www.magallanesrenovables.com/es/proyecto> (Visitada el 05/04/2017)

<https://www.youtube.com/watch?v=xj-AcpV-69A> (Visitada el 05/04/2017)

<http://www.ecoticias.com/especial-renovables-2016/112828/energia-mareomotriz-Espana>  
(Visitada el 05/04/2017)

<https://www.aeeolica.org/> (Visitada el 12/03/2017)

## Anexo

### Sumario de los parámetros del modelo de Fluent para permitir su reproducción

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
corona	2	fluid
entorno	3	fluid
wall-25	25	wall
wall-26	26	wall
wall-23	23	wall
wall-24	24	wall
laterales	4	symmetry
salida	5	pressure-outlet
entrada	6	velocity-inlet
int_eje_corona	7	interface
int_corona_eje	8	interface
int_ambiente_corona	9	interface
int_corona_ambiente	10	interface
int_álabe.3	11	wall
int_álabe.2	12	wall
int_álabe.1	13	wall
ext_álabe.3	14	wall
ext_álabe.2	15	wall
ext_álabe.1	16	wall
default-interior	18	interior
default-interior:001	1	interior

Boundary Conditions



corona	
Condition	Value
Material Name	water
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/m <sup>2</sup> )	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m <sup>2</sup> )	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

entorno	
Condition	Value
Material Name	water
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
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 <sup>2</sup> )	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m <sup>2</sup> )	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-25

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-26

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-23

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-24

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

-----  
laterales

Condition	Value
-----------	-------

-----

salida

Condition	Value
Gauge Pressure (pascal)	0
Backflow Direction Specification Method	1
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Y-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Z-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Turbulent Specification Method	0
Backflow Turbulent Kinetic Energy (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	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)	1
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

-----  
int\_eje\_corona

Condition Value  
-----

int\_corona\_eje

Condition Value  
-----

int\_ambiente\_corona

Condition Value  
-----

int\_corona\_ambiente

Condition Value  
-----

int\_álabe.3

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

-----  
int\_álabe.2

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

-----  
int\_álabe.1

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

-----



## ext\_álabe.3

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

## ext\_álabe.2

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

## ext\_álabe.1

Condition	Value
Wall Motion	0

```

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

```

-----
default-interior
Condition Value
-----
    
```

```

default-interior:001
Condition Value
-----
    
```

Solver Controls

```

-----
Equations
Equation  Solved
-----
Flow      yes
Turbulence  yes
    
```

```

-----
Numerics
Numeric          Enabled
-----
Absolute Velocity Formulation  yes
    
```

Unsteady Calculation Parameters

```

-----
Time Step (s)          0.001745329
Max. Iterations Per Time Step  20
    
```

```

-----
Relaxation
Variable          Relaxation Factor
-----
Density          1
    
```



Body Forces 1  
 Turbulent Kinetic Energy 0.80000001  
 Specific Dissipation Rate 0.80000001  
 Turbulent Viscosity 1

-----  
 Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance	
Flow	F-Cycle	0.1		
Turbulent Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.1	0.7
Specific Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.1	0.7

-----  
 Pressure-Velocity Coupling

Parameter	Value
Type	Coupled
Courant Number	200
Explicit Momentum Relaxation Factor	0.75
Explicit Pressure Relaxation Factor	0.75

-----  
 Discretization Scheme

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

-----  
 Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Spec. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

-----  
 Material Properties

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.21
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242

Viscosity                    kg/m-s    constant 0.00001  
 Molecular Weight            kg/kgmol constant 28.966  
 L-J Characteristic Length    angstrom constant 3.711  
 L-J Energy Parameter        k        constant 78.6  
 Thermal Expansion Coefficient 1/k        constant 0  
 Degrees of Freedom                            constant 0  
 Speed of Sound                m/s        none    #f

-----  
 Material: water (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1000
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	0.0011
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

-----  
 Material: aluminum (solid)

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