



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por su amor, su paciencia y todo lo que hace por mí día a día.

A mi padre por quererme, ayudarme, apoyarme y creer en mí.

A mi hermana por cuidarme, animarme y ser mi alegría en los peores momentos.

A mi tío por ser mucho más que un tío, estar ahí siempre y ser un ejemplo para mí.

A mis abuelos maternos, Elisa y Pepe, por quererme, preocuparse y transmitirme los mejores valores en el trabajo, el compromiso y el respeto hacia los demás.

A mis abuelos paternos, Carmen y Rafa, por quererme, apoyarme y ofrecerme las mejores oportunidades de formación educativa y profesional.

A mi pareja por cuidarme, quererme, darme fuerzas y estar junto a mí siempre que lo he necesitado, en los buenos y en los malos momentos.

A mi tutor por su tiempo, dedicación y por iniciarme en un nuevo campo en mi vida profesional.

A José Manuel por ayudarme y saber guiarme en la dirección correcta cuando lo necesité.

RESUMEN

La implantación de energías renovables sigue siendo a día de hoy un reto. En concreto, la energía eólica, ya que es muy costosa la realización de un estudio previo para conocer si es rentable establecer un nuevo parque o microparque eólico. Esto se debe al material utilizado para ello (sensores, anemómetros) y a que deben estar durante meses para poder obtener las series temporales significativas. El presente proyecto final de grado aborda un nuevo método de estudio a partir de técnicas CFD mediante un software de código abierto y libre distribución (OpenFOAM). Para ello se ha utilizado una máquina virtual Linux en una granja de servidores (vSphere) que ha permitido asignar los recursos necesarios en función de sus necesidades. El caso de estudio elegido es una colina sometida a un flujo de aire horizontal que constituye un problema clásico de la mecánica de fluidos. De esta manera se puede llegar a validar el modelo propuesto con una serie de datos experimentales. Se han estudiado 3 modelos diferentes de turbulencia, ensayándose 5 tamaños de malla diferentes. Una vez simulados los 15 casos, se procede a realizar un análisis de convergencia de malla en el cuál se determina el grado de convergencia de la malla según el modelo de turbulencia empleado sin tener en cuenta los datos experimentales, tal y como propone la asociación americana de ingenieros mecánicos (ASME). Una vez obtenida la malla convergida de cada modelo se lleva a cabo un proceso de validación empleando resultados experimentales a partir de un análisis de varianza (ANOVA). De entre las mallas convergidas se elige la correspondiente al modelo de turbulencia que más se ajusta a los datos experimentales.

Palabras clave: ingeniería eólica, microemplazamiento, modelo numérico, CFD, dinámica de fluidos computacional, OpenFOAM, análisis de la varianza.

RESUM

La implantació de energies renovables és encara un repte a dia de hui. En concret, l'energia eòlica, ja que és molt costosa la realització d'un estudi previ per a conèixer si és rentable establir un nou parc o microparc eòlic. Això es deu al material utilitzat per a dur-lo a terme (sensors, anemòmetres) i a que deuen estar durant mesos per a poder obtenir les sèries temporals significatives. El present projecte final de grau aborda un nou mètode d'estudi a partir de tècniques CFD mitjançant un software de codi obert i lliure distribució (OpenFOAM). Per a dur-lo a terme s'ha utilitzat una màquina virtual Linux en una granja de servidors (vSphere) que hi ha permès assignar els recursos necessaris en funció de les seues necessitats. El cas d'estudi triat és una muntanya que pertany a un problema clàssic de la mecànica de fluids. D'aquesta manera es pot arribar a validar el model proposat amb una sèrie de dades experimentals. S'estudiaran 3 models diferents de turbulència, els quals comptaran amb 5 tipus de malles distintes. Una vegada simulats els 15 casos, es procedirà a realitzar un anàlisi de convergència de malla en el qual es determinarà la malla convergida sense tenir en compte les dades experimentals, tal com proposa l'associació americana d'enginyers mecànics (ASME). Una vegada obtinguda la millor malla de cada model es procedirà a comparar si aquestes malles són les que millor s'adapten als resultats experimentals a partir d'un anàlisi de variança (ANOVA). D'aquesta manera es tria la millor malla convergida per a treballar amb el model justificant la seua elecció final.

Paraules clau: enginyeria eòlica, microemplaçament, model numèric, CFD, dinàmica de fluids computacional, OpenFOAM, anàlisi de la variança.

ABSTRACT

The introduction of renewable energies remains a challenge today. Specifically, wind energy, due to the high cost of assessment techniques when a new wind farm is to be built. This is due to the material used for it (sensors, anemometers) and that they must be for months in order to obtain sufficient data. The present final degree project tackles a new method of study using the CFD open-source platform OpenFOAM. To this end, a Linux virtual machine has been used in a server farm (vSphere) that has allowed to allocate the necessary resources according to their needs. The case study chosen is a mountain belonging to a classical problem of fluid mechanics. In this way, it is possible to validate the proposed model with a series of experimental data. Three different models of turbulence will be studied, which will have 5 different mesh types. Once the 15 cases have been simulated, a mesh convergence analysis will be carried out, in which the best mesh of each model will be determined without considering the experimental data, as proposed by the American Society of Mechanical Engineers (ASME). Once the best mesh of each model is obtained, all meshes will be compared to the experimental results from an analysis of variance (ANOVA). In this way, it will be known if the mesh that best predicts the experimental result is one of the best convergence analysis or not. And, if not, the best mesh would be chosen to work with the model justifying its final choice.

Keywords: wind power engineering, microplacement, numerical model, CFD, computational fluid dynamics, OpenFOAM, ANOVA

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TRABAJO FINAL DE GRADO

- Memoria descriptiva
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. OBJETIVO DEL DOCUMENTO	15
1.2. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	15
CAPÍTULO 2. DESARROLLO TEÓRICO	17
2.1. ENERGÍA EÓLICA	17
2.1.1. Introducción	17
2.1.2. Historia	17
2.1.3 Ley de Betz	19
2.1.4. Parques eólicos	21
2.2. CFD	22
2.2.1. Introducción	22
2.2.2. Mallado	23
2.2.2.1. Mallado según la relación topológica entre celdas	23
2.2.2.2. Mallado según la dirección de sus ejes con respecto a los objetos	24
2.2.2.3. Mallado según la distribución de tamaños	25
2.2.3. Calidad de la malla	25
2.2.3.1. Skewness	25
2.2.3.2. Smoothness	26
2.2.3.3. Ratio de aspecto	26
2.2.4. Ecuaciones de flujo	27
2.2.5. Turbulencia	28
2.2.6 Funciones de pared	28
2.3. OPEN FOAM	29

2.4. ESTADÍSTICA.....	29
2.4.1. Introducción	29
2.4.2. Análisis de varianza	29
2.4.3. Modelo de regresión	30
CAPÍTULO 3. DESARROLLO PRÁCTICO	31
3.1. MODELADO DEL CASO DE ESTUDIO.....	31
3.1.1. Introducción	31
3.1.2. Enunciado y elección del problema	31
3.1.3. Configuración del caso en el programa.....	32
3.1.3.1. Definición del entorno	32
3.1.3.2. Entrada de datos y modelado	32
3.1.3.3. Simulación	37
3.2. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA	41
3.2.1. Introducción	41
3.2.2. Procedimiento para la estimación del error de discretización	41
3.2.3. Postprocesado y cálculo del error de discretización	43
3.2.4. Resultados	45
3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	49
3.3.1. Introducción	49
3.3.2. Análisis de la varianza (ANOVA)	49
3.3.3. Modelo de regresión	52
3.3.3.1. Modelo de regresión usando los datos experimentales.....	54
3.3.3.2. Modelo de regresión usando los datos de los casos de estudio.....	56
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
4.1. INTRODUCCIÓN	61
4.2. ELECCIÓN DEL MODELO FINAL.....	61
4.3. ANÁLISIS DE CAMPOS.....	64
4.3.1. Introducción	64
4.3.2. Representación gráfica de velocidad, presión y energía cinética turbulenta para la malla seleccionada	64
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	67
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....	69

ANEXOS	73
ANEXO 1: MÁQUINAS VIRTUALES	73

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

PRESUPUESTO	77
1. NECESIDAD DEL PRESUPUESTO	77
2. CONTENIDO DEL PRESUPUESTO	77
2.1. Coste del personal	77
2.2. Coste de materiales	77
2.3. Material fungible	78
2.4. Costes finales	78

MEMORIA DESCRIPTIVA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO DEL DOCUMENTO

En este trabajo final de grado se aborda el desarrollo de una metodología de análisis del microemplazamiento de parques eólicos mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD). Para ello se ha elegido un caso de estudio en el que se cuenta con datos experimentales. De este modo, se puede comparar los resultados obtenidos en las simulaciones con resultados experimentales. Para ello se estudiará en caso a partir de 3 modelos de turbulencia con 5 tamaños de malla distintos. Tras la simulación, se aplicará un análisis de convergencia de malla que determinará el mayor o menor grado de incertidumbre de las mallas estudiadas. Sobre las mallas que cumplan dicho análisis, se elegirán las que mejor representen el caso real. Para ello se hará un estudio estadístico. Tras la realización de dicho estudio se analizarán los resultados y se argumentará qué malla de las convergidas es la elegida y por qué. De esta manera se conseguirá llegar al objetivo de este trabajo que es determinar el emplazamiento óptimo en función del recurso eólico disponible en el terreno analizado partiendo de datos climáticos.

1.2. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se ha estructurado según la normativa de la ETSII en cuanto a trabajos finales de grado. Dicho documento consta, además de este capítulo introductorio, de desarrollo teórico, desarrollo práctico, análisis de resultados, conclusiones y trabajos futuros, así como de la bibliografía utilizada.

En cuanto al desarrollo teórico, en este punto se abordan los aspectos fundamentales que dan sentido y explican la parte práctica del trabajo. Se comienza haciendo una breve introducción a la energía eólica (fuente energética de estudio del trabajo), para posteriormente explicar los conceptos básicos e ideas necesarias para utilizar correctamente técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD). Por último, también se hace una breve referencia teórica a los modelos estadísticos que se utilizarán en la parte práctica.

En lo referente a la parte práctica, es en este punto donde se desarrolla el método utilizado para la obtención final del modelo de malla convergida que mejor represente el caso de estudio. En primer lugar, se explica cómo se ha programado en OpenFOAM (software con el que se resolverá el trabajo) el caso de estudio, introduciendo en él los 3 modelos de turbulencia con 5 tamaños de malla. Una vez simulados todos los casos, se procede a efectuar un análisis de convergencia de malla en donde se obtendrán las mallas que presentan menor incertidumbre. Este estudio se hace al margen de los resultados experimentales y sirve para conocer qué mallas se van a tener en cuenta en el análisis estadístico. En dicho análisis se aplica un ANOVA y análisis de regresión con los que se obtendrán las mallas, de las que han convergido, que mejor representan el caso de estudio.

Una vez obtenidas las mallas convergidas que representan el caso con menor error, se procede a realizar un análisis y elección en el apartado de discusión de resultados. Tras la elección de la mejor malla, se realiza un análisis de los campos de velocidades, presiones y energía cinética turbulenta representados por el modelo.

Finalmente, en el apartado de conclusiones y trabajos futuros se hace un cierre al trabajo reflexionando sobre los puntos más interesantes que se han ido desarrollado.

Además, también se cuenta con la bibliografía empleada a lo largo del documento y un pequeño anexo explicando con mayor profundidad una herramienta a la que se ha tenido acceso en este trabajo y con la que se ha considerado interesante trabajar, las máquinas virtuales.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO TEÓRICO

2.1. ENERGÍA EÓLICA

2.1.1. Introducción

En la actualidad, las fuentes de energías renovables están a la orden del día y se está intentando, cada vez más, que estas energías sean las que más porcentaje de generación eléctrica produzcan. Sin embargo, todavía queda un largo camino por avanzar si se desea que este modelo energético sea el que se acabe adoptando.

El auge de este tipo de energías vino dado a partir de la crisis del petróleo y el intento de reducir la producción de gases de efecto invernadero. Por ello, se impulsaron e invirtieron en energías renovables como la eólica, solar o mareomotriz entre otras. Dentro de estas energías, la que más volumen de producción eléctrica está ofreciendo actualmente es la energía eólica, la energía con la que se pretende trabajar y hacer el estudio en este trabajo final de grado. Pese a que su definición sea la de la energía que es aprovechada gracias al viento, actualmente su principal aplicación está en aprovechar la energía cinética del viento para convertirla, mediante los aerogeneradores, en energía eléctrica.

Por este motivo, dado que es una energía renovable con un alto rendimiento y que proporciona una gran producción de energía eléctrica, este trabajo final de grado se centra en el estudio del viento sobre una colina para analizar cuál sería la mejor alternativa para aprovechar al máximo este recurso.

2.1.2. Historia

Los primeros registros que se tienen del uso de la energía eólica datan del año 3000 a.C. aproximadamente. Se trata de navíos veleros que aprovechaban el viento marino como transporte en las civilizaciones mesopotámicas y egipcias, tal y como se puede observar en el jeroglífico de la figura 1.^[1]



Figura 2.1. Jeroglífico egipcio de un barco velero ^[2]

El siguiente caso del que se tiene constancia data del siglo I d.C. Es el primer registro de una máquina de viento en la historia. Se trata del molinillo de Herón de Alejandría, un molino de viento que funcionaba como órgano. En la figura 2.2 se puede observar una representación de este instrumento.^[3]

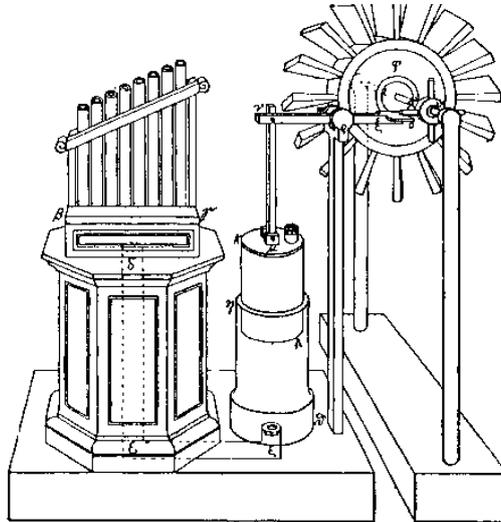


Figura 2.2. Representación del molinillo de Herón de Alejandría^[4]

Los primeros molinos de viento datan de entre el siglo VII y el siglo IX (según diferentes fuentes), en Sistán, actual Afganistán. Eran molinos de eje vertical compuestos de entre 6 a 12 velas los cuales se utilizaban para moler el grano o extraer el agua. Estos molinos se adaptaron y cambiaron la posición de su eje de vertical a horizontal en Europa. Fueron este tipo de molinos los que comenzaron a popularizarse y extenderse a través de Oriente Medio y Asia central.^[4,5]

Los molinos más desarrollados y típicos de la Europa del siglo XII comenzaron siendo de base madera para posteriormente convertirse en molinos de base piedra. Pero el material utilizado y la estructura de las aspas era la misma. Un eje horizontal con aspas que variaban en número de 4 a 8 y con una longitud de las mismas de entre 3 a 9 metros. Estos molinos se utilizaban principalmente para moler el cereal y fueron muy utilizados hasta el descubrimiento de la máquina de vapor. A partir de ese momento el proceso mecánico de moler el grano era mucho más rentable por lo que dejaron de construirse.^[5]

Fue a partir del siglo XIX cuando hubo una modernización para el aprovechamiento de la energía eólica. Se trataba de la primera turbina eólica, fabricada por Charles Francis Brush en Dinamarca. Esta transformaba la energía cinética del viento en energía eléctrica la cual se acumulaba en unas baterías. Tal y como muestra la figura 2.3, la turbina constaba de un rotor de un diámetro de 17 metros con 144 palas las cuales generaban una potencia de 12kW.^[6]

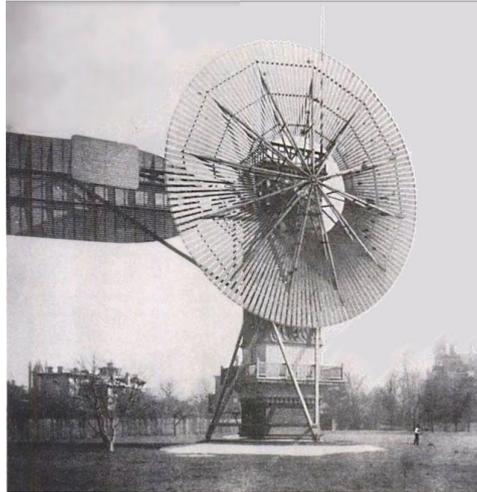


Figura 2.3. Primera turbina de viento de Charles Francis Brush (1888) ^[7]

Tras este descubrimiento y avance, Dinamarca impulsó la investigación en esta nueva forma de aprovechar la energía eólica. A finales del siglo XIX, Poul la Cour (un meteorólogo danés) fue una de las personas que más investigó y fue introduciendo esta nueva energía en Europa gracias a sus aerogeneradores comerciales. Estos se comenzaron a instalar debido a la escasez de energía provocada por la primera guerra mundial y supuso un impulso a la energía eólica tal y como se conoce en la actualidad.

Paralelamente a Poul la Cour, el ingeniero naval Albert Betz fue quien centra su atención en el estudio más teórico del aprovechamiento de la energía de los aerogeneradores. Betz llegó a la conclusión de que, independientemente del diseño, el máximo rendimiento que se puede obtener de la transformación de la energía eólica en energía mecánica es del 59%.^[8] En el siguiente punto se profundiza más sobre la ley de Betz y su importancia.

Pasada la primera mitad del siglo XX, el ingeniero danés Johannes Juul, alumno de Poul la Cour, construyó el primer aerogenerador para corriente alterna en 1957. Dicho aerogenerador es el que se conoce como predecesor de los actuales.^[9,10]

En los años 70 y 80, con la crisis del petróleo, comenzó a investigarse nuevas formas de energía renovable para no depender tanto de los combustibles fósiles. Alemanes y daneses fueron quienes desarrollaron los primeros aerogeneradores que resultaban económicamente rentables y supusieron una revolución energética en el ámbito de la explotación de la energía eólica.^[10] A partir de este momento comenzaron a construirse parques eólicos los cuales se tratan en el próximo apartado.

2.1.3 Ley de Betz

Como se ha comentado en el punto anterior, Albert Betz formuló en 1919 la ley que lleva su nombre, la cual se muestra en la ecuación. Esta ley relaciona las variables de las que depende el viento para obtener la potencia que se puede extraer de él ya que no toda la energía almacenada por el viento puede ser extraída.^[11,12]

$$P_{extraída} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad 2.1$$

Se puede observar que la potencia extraída es proporcional a la densidad del aire, el área de barrido de las palas del rotor en dirección perpendicular al viento, de la velocidad del viento al cubo y de un parámetro C_p . Este parámetro es un coeficiente de potencia (denominado límite de Betz).^[11,12]

Como muestra la ecuación 2.1, la potencia y el coeficiente de potencia son directamente proporcionales, por lo tanto, obteniendo el máximo de la potencia se puede hallar el valor del coeficiente de potencia que lo maximiza. A continuación, en las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4, se demuestra cómo se obtiene ese valor. Para ello la figura 2.4 ayuda a definir cada una de las velocidades que se suponen.

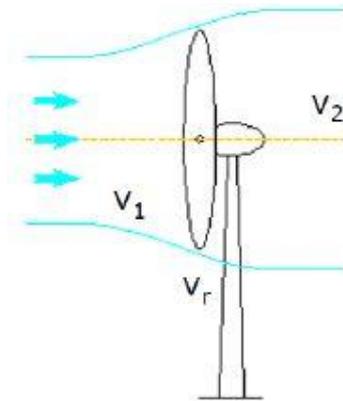


Figura 2.4. Representación de la velocidad del viento en un aerogenerador^[13]

Sea v_1 la velocidad del viento antes de pasar por el aerogenerador, v_2 su velocidad tras pasar por las palas de rotor y v_r la velocidad del rotor (calculada como la media entre la velocidad del viento a la entrada y la salida del rotor) se realiza el siguiente cálculo:

$$v_r = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad 2.2$$

A partir de la ecuación de la ley de Betz y sustituyendo el término de la velocidad cúbica por el que aparece en la velocidad del rotor y la diferencia de los cuadrados de las velocidades antes y después de pasar por el aerogenerador se obtiene la expresión de la ecuación 2.3.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_r \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad 2.3$$

Sustituyendo v_r en la ecuación 2.3 por su valor en la ecuación 2.2 se obtiene la siguiente ecuación.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right) \quad 2.4$$

Derivando e igualando a cero la ecuación 2.4 se obtiene el valor para el cual la potencia es máxima. Este valor corresponde con la relación entre $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$.

Por lo tanto, el valor de C_p que hace que la potencia sea máxima es 0,5926. Este valor es un máximo teórico, pues en la realidad está comprendido entre 0 y 0,4.^[13]

Cabe destacar, a partir de la ley de Betz, que el valor más importante a la hora de obtener potencia del viento es su velocidad, ya que ésta está elevada al cubo. Por este motivo, el objeto de este trabajo es encontrar los puntos en donde la velocidad sea la mayor posible dentro de las posibilidades de instalación para poder aprovechar al máximo esa potencia.

2.1.4. Parques eólicos

Un parque eólico es la concentración de un número de aerogeneradores en una superficie determinada que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica.

Los parques eólicos generan un importante porcentaje de la energía eléctrica que se consume diariamente en todo el mundo. Según datos de la Asociación Empresarial Eólica, España es el quinto país del mundo a nivel de potencia eólica instalada. Esta potencia instalada es de 23.026MW (a fecha de 31 de diciembre de 2016) siendo la segunda tecnología de demanda eléctrica con un 19,3%.^[14]

Sin embargo, no proporciona una energía eléctrica constante, ya que depende de las rachas de viento, lo que hace que no se pueda obtener la potencia deseada en un determinado momento. Esto, sumado a que se necesita una superficie considerable para instalar los aerogeneradores que componen dichos parques, hace que sea de vital importancia obtener la estimación de un modelo que represente la realidad lo más aproximado posible.

Para ello se hacen estudios de la orografía y se instalan veletas y anemómetros durante más de un año.^[15] Estos estudios dependen del tipo de parque eólico que se vaya a implantar. Se pueden clasificar en 2 categorías: según dónde estén situados (en la tierra o en el mar), o según la cantidad de aerogeneradores que lo compongan (grandes parques o microemplazamientos).



Figura 2.5. Fotografía circumpolar de un campo de aerogeneradores^[16]

Este trabajo final de grado se centra en el estudio de uno de los tipos de parques eólicos que se pueden instalar: un microemplazamiento terrestre. Para este tipo de parques resulta difícil, costoso y poco rentable establecer sensores. Es por este motivo por lo que se suele recurrir a modelos determinísticos y estadísticos para hallar una aproximación al caso real. No obstante, lo que se pretende con este trabajo es establecer un modelo tridimensional determinístico mediante las técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD). El cual, se somete posteriormente a un análisis estadístico.

2.2. CFD

2.2.1. Introducción

Gracias al avance y desarrollo de la tecnología informática de los últimos años se ha podido mejorar muchas técnicas de análisis en diferentes sectores. Una de ellas está relacionada con los análisis de flujo de diferentes fluidos gracias a las técnicas de CFD (Computational Fluid Dynamics).

El movimiento de los fluidos se puede describir gracias a las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones (Ecuaciones 2.5 y 2.6) no tienen solución analítica, a excepción de algunos casos muy concretos, por lo que resulta muy difícil comprender la situación exacta en la que se encuentra el fluido. Es por ello que estas fórmulas han necesitado del modelado numérico y experimental para obtener resultados con certeza.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad 2.5$$

$$\rho(\vec{A} - \vec{X}) = -\nabla p + \frac{1}{3}\mu\nabla(\nabla \cdot \vec{V}) + \mu\Delta\vec{V} \quad 2.6$$

Hace unos años la manera en la que se trabajaba era realizando modelos experimentales a menor escala del objeto de estudio e introduciéndolas en túneles de viento. Hoy en día, pese a que en ciertos sectores se sigan utilizando, se ha reducido debido a su alto coste tanto económico como de tiempo frente al uso de técnicas de dinámica de fluidos computacional.

Se define CFD como la técnica que permite predecir el flujo de fluidos, su transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento, sus reacciones químicas y los fenómenos relacionados mediante la resolución de las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos con la ayuda de un método numérico determinístico a partir de una malla en la zona del dominio actualizado. Este tipo de modelo tiene un enfoque euleriano y está basado en la discretización del medio continuo.^[17,18]

Existe otro tipo de modelo numérico tridimensionales denominado SPH. Este tipo de modelo no utiliza malla y tiene un enfoque lagrangiano, el análisis se centra más en el movimiento de las partículas y no en un volumen de control fijo en el espacio a lo largo del tiempo. Este tipo de modelo suele resultar más ventajoso cuando coexisten varios fluidos, siendo el comportamiento de la fase dispersa irrelevante.^[19]

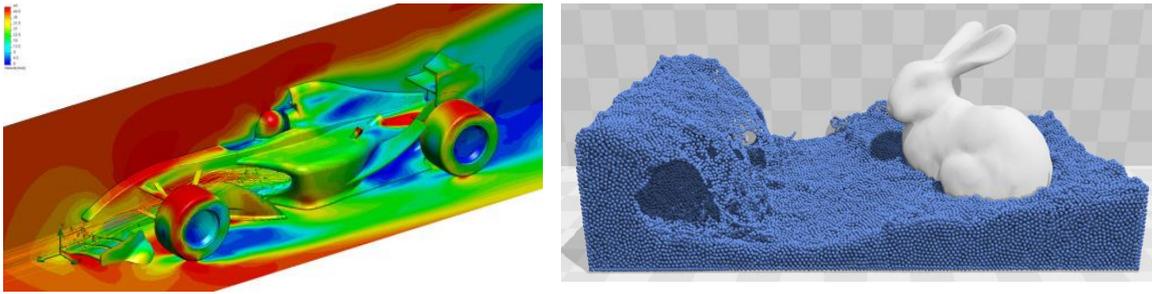


Figura 2.6. Representación gráfica de un modelo CFD (izquierda) y un modelo SPH (derecha)^[20,21]

Estas técnicas ofrecen un gran abanico de estudio dentro de la ingeniería. Desde el desarrollo de detalles de nuevos productos, así como la resolución de ciertos problemas o complementar ensayos y experimentos (lo que permite reducir el volumen de trabajo que requiere el laboratorio). De las industrias que más utilizan este tipo de técnicas destacan la aeroespacial, la marina, la de automoción, la industria del acero, la electrónica, además de la industria química, biomédica y la de generación de energía.

En el caso de estudio, lo que se pretende es utilizar esta herramienta como un nuevo método para valorar la viabilidad del microemplazamiento de parques eólicos. A continuación, se exponen y describen los diferentes aspectos que se han de tener en cuenta para el modelo CFD antes de seleccionar los más adecuados para el caso de estudio dado.

2.2.2. Mallado

Para poder analizar y calcular cómo el fluido fluye por el elemento de estudio se ha de establecer la región de estudio y una discretización de la geometría que permita al programa hacer iteraciones sobre cada celda resultante. La técnica que discretiza espacialmente el elemento de estudio se denomina mallado.

El mallado consiste en seleccionar, de entre las diferentes formas de dividir el objeto de estudio, la más adecuada que permita obtener una solución precisa con un tiempo de cálculo computacional razonable. Para ello existen diferentes formas de realizar el mallado. En el caso de este trabajo final de grado se va a trabajar con una malla estructurada, adaptativa y refinada. Los siguientes subapartados se hace referencia a las clasificaciones más importantes.^[22]

2.2.2.1. Mallado según la relación topológica entre celdas

En este punto se presenta uno de los tipos de clasificación de malla. Concretamente esta clasificación depende de si las celdas y los nodos tienen un patrón de conectividad ortogonal entre ellos mismos o no. Dentro de esta categoría se pueden clasificar en mallas estructuradas, no estructuradas e híbridas. En la figura 2.7 se muestra una representación de estos 3 tipos de malla que se explican a continuación.

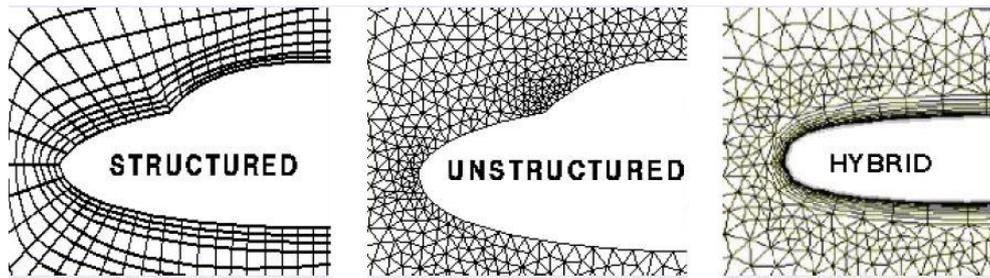


Figura 2.7. Mallas estructurada, no estructurada e híbrida^[23]

En cuanto a las mallas estructuradas, son aquellas que tienen una conectividad regular entre sus celdas. El acceso a la información por parte del modelo es más rápido y los tiempos de latencia son menores.^[24]

Respecto a las no estructuradas, son las mallas que presentan una conectividad irregular, no siguen un patrón claro de conectividad. Este tipo de malla, pese a ser más lenta y dar tiempos de latencia mayores, se utiliza en aquellos casos en los que la geometría a estudiar sea irregular y compleja ya que, generar una malla estructurada que se adapte bien a una forma irregular es mucho más difícil.^[25]

Por último, también existe un tipo de malla que aúna las ventajas de ambas, la malla híbrida. Combina zonas de malla estructurada con zonas de malla no estructurada para adaptarla según las condiciones del modelo.^[26]

2.2.2.2. Mallado según la dirección de sus ejes con respecto a los objetos

En este apartado se muestra otro tipo de clasificación para las mallas. La característica principal de este tipo de malla es su adaptación o no al contorno del objeto de estudio. Existen 2 tipos: adaptativas y no adaptativas.

Las mallas adaptativas son aquellas que se acondicionan a la superficie del cuerpo de estudio. Estas no presentan un orden en sus nodos y los ejes de la malla se ajustan a los contornos sólidos del objeto de estudio. En la figura 2.8 (izquierda) se puede observar una malla adaptativa.^[26]

Las mallas no adaptativas son aquellas en las que tan sólo hay un pequeño ajuste a la superficie o volumen de control en las zonas más próximas del objeto. En la derecha de la figura 2.8 se representa una malla no adaptativa.

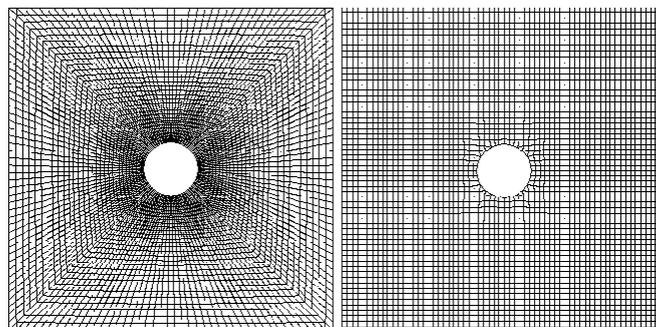


Figura 2.8. Mallas adaptativa y no adaptativa^[27]

2.2.2.3. Mallado según la distribución de tamaños

En cuanto a otra variación más dentro de la clasificación de las mallas, se encuentra la que clasifica las mallas según su distribución de tamaños. Hay mallados que permiten poder adaptar la malla ante un cambio de propiedades, para grandes gradientes y hasta para reducir tiempos de cálculo en aquellas zonas que no sean importantes. Se pueden clasificar en mallas uniformes y refinadas.^[26]

Las mallas uniformes son aquellas que no varían su tamaño de malla, mientras las refinadas pueden disminuir o aumentar su tamaño en determinadas zonas para, como se ha comentado anteriormente, disminuir el tiempo de cálculo o mejorar en la precisión de resultados. En la figura 2.9 se observan la malla uniforme (izquierda) y refinada (derecha).

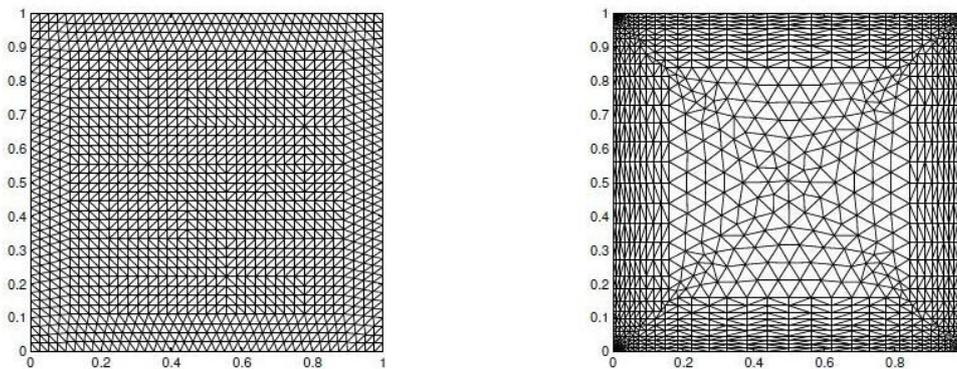


Figura 2.9. Mallas uniforme y refinada^[28]

2.2.3. Calidad de la malla

En el siguiente apartado se comenta la importancia y los factores que determinan la calidad de la malla. Es importante elegir la malla adecuada para cada modelo y llevar a cabo unas buenas prácticas. En primer lugar, se ha de tener una densidad de malla lo suficientemente fina como para poder evaluar los principales aspectos del flujo. Además, la malla adyacente a una pared ha de ser capaz de resolver el flujo en la capa límite (es decir, en el lugar geométrico de los puntos en donde la velocidad de la pared alcanza el 99% de la velocidad del flujo exterior). Por otro lado, ante el mismo número de celdas, las mallas hexaédricas aportan soluciones más precisas (en especial si las líneas de malla están alineadas con la dirección del flujo). A parte de estos ejemplos de buenas prácticas existen una serie de indicadores que permiten conocer la calidad de la malla. Estos indicadores son: skewness (el cual evalúa la asimetría), smoothness (el cual evalúa la suavidad en el cambio gradual de tamaño de malla) y el ratio de aspecto.^[29, 30]

2.2.3.1. Skewness

Este parámetro mide la asimetría de la malla. Existen varios métodos para evaluar la asimetría de la malla. Uno de ellos se basa en medir la calidad de la malla a partir del equiángulo de desvío. Para ello, se calcula la asimetría del equiángulo tal y como muestra la ecuación 2.7.^[29]

$$\max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad 2.7$$

Siendo θ_{max} el ángulo más grande, θ_{min} el ángulo más pequeño (tal y como se muestran en la figura 2.10) y θ_e el ángulo de la cara equiangular (60° en el caso de un triángulo y 90° en el caso de un cuadrilátero).^[29]

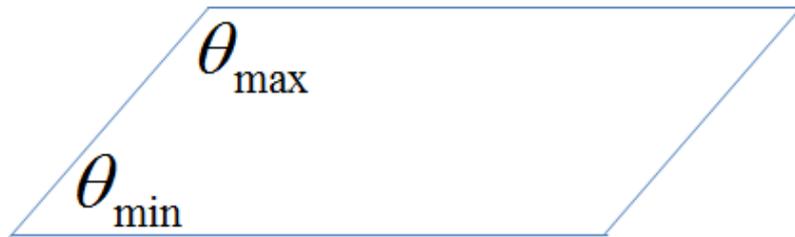


Figura 2.10. Representación de la asimetría de un cuadrilátero^[31]

Lo que se busca es que ese valor sea lo más cercano a cero posible, siendo los valores máximos aceptables de 0,85 para celdas triangulares y de 0,9 para celdas cuadradas.^[30]

2.2.3.2. Smoothness

La suavidad con la que se produce un cambio en el tamaño de la celda es otro aspecto que determina la calidad de la malla. Las variaciones de tamaño entre celdas, de ser grandes, pueden llegar a dar resultados erróneos en esas zonas. Es por ello que el mayor cambio en el espaciado de la malla ha de ser de un 20% como máximo, es decir, la malla contigua no ha de aumentar o disminuir en su tamaño más de un 20%.^[29]

2.2.3.3. Ratio de aspecto

El ratio de aspecto es la relación que existe entre la longitud del lado mayor con el lado menor de la malla. Tal y como se muestra en la figura 2.11, este ratio es igual a 1 para un triángulo equilátero y un cuadrado. Este ratio debe ser lo más cercano a 1 posible.^[29]

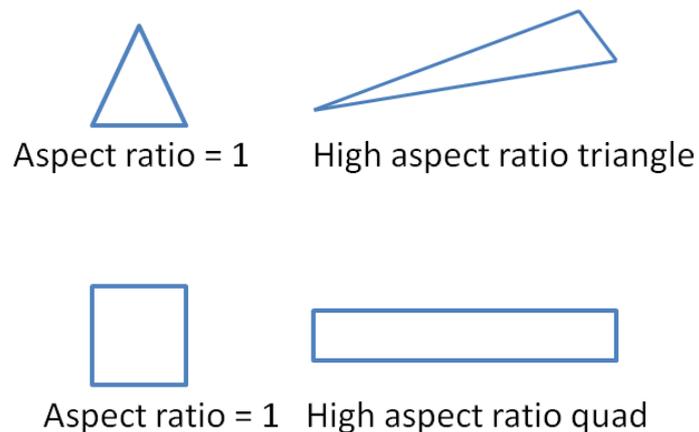


Figura 2.11. Representación en los cambios de la relación de aspecto^[32]

2.2.4. Ecuaciones de flujo

Las ecuaciones que permiten la resolución de los modelos CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, tal y como se había introducido en el apartado 2.2.1 de este trabajo (ecuaciones 2.5 y 2.6).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad 2.5$$

$$\rho(\vec{A} - \vec{X}) = -\nabla p + \frac{1}{3}\mu\nabla(\nabla \cdot \vec{V}) + \mu\Delta\vec{V} \quad 2.6$$

Estas dos ecuaciones son ecuaciones fundamentales de la dinámica diferencial de fluidos.

Por un lado se encuentra la ecuación 2.5, denominada balance de masa o ecuación de continuidad. La idea de esta ecuación es imponer que la materia es un invariante y para ello se debe igualar a cero la suma de la variación de la masa en el interior del volumen seleccionado más el flujo de masa neto. Esta suma se expresa en forma diferencial en dicha ecuación 2.5.

- El término $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ es la variación local de la densidad en un punto genérico del espacio del fluido y viene a representar la variación de masa por unidad de volumen en el interior del volumen de control diferencial.
- El término $\rho\vec{V}$ es el flujo unitario de masa que atraviesa una superficie elemental y por lo tanto, el término $\nabla \cdot (\rho\vec{V})$ viene a representar el balance del flujo másico a través de la superficie elemental que encierra el volumen diferencial.

Por otro lado, se encuentra la ecuación 2.6, el llamado balance de fuerzas o ecuación de Navier-Stokes y de Euler. Dicha ecuación surge de plantear la ecuación fundamental de la dinámica, donde la suma de todas las fuerzas que actúan sobre una masa diferencial, tanto en superficie como en volumen, es el producto de esa masa por su aceleración. Para obtener la forma final reflejada en dicha ecuación 2.6 se hace uso de la hipótesis de Stokes donde se relaciona la viscosidad del fluido, las causas que son las fuerzas de superficie representadas por las componentes del tensor de tensiones y los efectos que es la deformación de la partícula elemental del fluido.

- El término \vec{A} es la aceleración del fluido.
- El término $\rho\vec{X}$ es la resultante de las fuerzas exteriores por unidad de volumen.
- El término ∇p es el gradiente de presiones.
- El término $\frac{1}{3}\mu\nabla(\nabla \cdot \vec{V})$ son las pérdidas por disipación viscosa derivadas de la dilatación ($\nabla \cdot \vec{V} > 0$) o de la contracción (signo negativo). En flujos incompresibles este término es nulo.
- El término $\mu\Delta\vec{V}$ es la disipación viscosa, presente siempre en cualquier fluido real.

Para la resolución de dichas ecuaciones se va a utilizar un algoritmo SIMPLE. En el caso de estudio de este proyecto final de grado las condiciones que se deben resolver son las de un flujo monofásico, isoterma, viscoso y turbulento isotrópico (se asumen que las fluctuaciones turbulentas se propagan por igual en todas las direcciones).^[33]

2.2.5. Turbulencia

La turbulencia es otro punto importante a la hora de resolver un modelo CFD. Hay una primera clasificación dependiendo de la naturaleza del flujo. Puede ser laminar (movimiento ordenado y por capas), o turbulento (movimiento caótico y fluctuante). En el caso de estudio de este TFG se trabaja con un alto número de Reynolds, por lo que se está trabajando en la zona turbulenta.

Según si la turbulencia se resuelve en un menor o mayor grado existen 3 familias de modelos: Direct Numerical Simulation (DNS), el cual tiene una alta resolución y un gran gasto computacional; Large Eddy Simulation, que resuelve sólo grandes estructuras y tiene un menor coste computacional; y por último Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), el cual realiza el promediado de todas las fluctuaciones turbulentas con un coste computacional sensiblemente inferior al del resto de métodos. Este último es el que más se utiliza en el mundo ingenieril y es el que se va a utilizar en este proyecto final de grado.^[34]

Los modelos RANS añaden 1 o 2 ecuaciones de transporte adicionales representando el transporte de turbulencia. Los modelos más utilizados son los modelos k-ε Standard, Realizable o RNG y los modelos k-ω Standard o SST. Los modelos de tipo k-ω no tienen funciones de pared, necesitan de un refinado mayor y sus tiempos de cálculo también son mayores. Los modelos de turbulencia elegidos para el estudio de este trabajo son los 3 modelos k-ε: el modelo Standard, el Realizable y el RNG.^[35]

2.2.6 Funciones de pared

Las funciones de pared se basan en adimensionar los perfiles de velocidad tal y como propuso Von Kármán (ecuaciones 2.8 y 2.9).^[36]

$$y^+ = y \frac{u_t}{\nu} \quad 2.8$$

$$u^+ = \frac{u}{u_t} \quad 2.9$$

La capa límite se puede dividir en 3 categorías dependiendo del valor de y^+ . En la figura 2.12 se representa la función de pared.

- Subcapa viscosa: $y^+ < 5$ $u^+ = y^+$ 2.10
- Subcapa intermedia: $y^+ \in [5, 30]$ (impredecible)
- Subcapa logarítmica: $y^+ > 30$ $u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C^+$ 2.11

La clasificación de las funciones de pared tiene dos categorías: de alto número de Reynolds (primer elemento en subcapa intermedia) y de bajo número de Reynolds (primer elemento en subcapa logarítmica).^[36] El caso de estudio de este trabajo final de grado es de alto número de Reynolds.

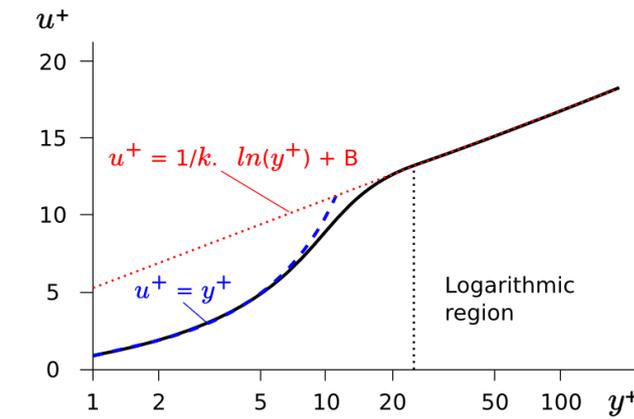


Figura 2.12. Representación de la ecuación de pared^[37]

2.3. OPEN FOAM

OpenFOAM es un software gratuito de CFD de código libre lanzado y desarrollado principalmente por OpenCFD Ltd. Su principal función es la del procesamiento de problemas de mecánica de medios continuos (en la cual se incluye la dinámica de fluidos computacional) a partir del sistema operativo Linux. Su implementación se basa en un enfoque tensorial utilizando técnicas de programación y el método de volumen finito o FVM. Cuenta también con una herramienta para la visualización y el análisis de los datos denominada ParaView, la cual también es de código libre y software gratuito.^[38]

2.4. ESTADÍSTICA

2.4.1. Introducción

Muchos de los modelos utilizados hoy en día para establecer parques eólicos están basados en modelos determinísticos. Sin embargo, lo que se pretende realizar con este trabajo final de grado es evaluar la veracidad y determinar el grado de aceptación de las mallas mediante el uso de 2 herramientas estadísticas: el análisis de varianza y el modelo de regresión. De este modo se obtiene un modelo tridimensional determinístico mediante las técnicas de dinámica de fluidos computacional y, tras validar las mallas a partir del análisis de convergencia de malla, se elige la mejor malla obtenidas estadísticamente de las validadas por el análisis de convergencia.

2.4.2. Análisis de varianza

El análisis de varianza es una técnica estadística básica utilizada a la hora de ver el efecto de una variable o factor sobre otra de salida, o si existen diferencias entre los valores medios de una variable de salida en función de los valores que toma una variable de entrada. Consiste en descomponer la variabilidad total observada de unos datos en una serie de términos, asociados a los efectos de cada factor estudiado y a sus posibles interacciones, más una parte residual con la que posteriormente se compararán las primeras para investigar su posible significación estadística.^[39]

2.4.3. Modelo de regresión

El modelo de regresión es un análisis estadístico que sirve para determinar las relaciones entre las distintas variables a estudiar. Este tipo de análisis permite conocer cómo el valor de la variable varía cuando cambia una de las variables independientes y manteniendo las otras fijas. La diferencia con ANOVA es que permite analizar la evolución de una variable de salida a partir de una de entrada aunque los valores de esta última no hayan sido prefijados a priori. De esta manera se puede llegar a conocer cuánto se deberían modificar las variables independientes para que la variable dependiente diera un valor dentro del rango de aceptación, cosa que no siempre es posible.^[40]

CAPÍTULO 3. DESARROLLO PRÁCTICO

3.1. MODELADO DEL CASO DE ESTUDIO

3.1.1. Introducción

En los puntos de este apartado se explica la elección del caso de estudio, se hace una definición del entorno de trabajo y se explican los pasos que se han llevado a cabo para simular dicho caso. Para ello se ha elegido 5 tamaños de malla, las cuales se han usado para 3 modelos de turbulencia distintos ($k-\varepsilon$ Standard, realizable $k-\varepsilon$ y RNG $k-\varepsilon$) y se ha simulado hasta que los residuos obtenidos en las simulaciones han sido lo suficientemente pequeños como para considerar que los resultados habían convergido.

3.1.2. Enunciado y elección del problema

El caso de estudio con el que se trabaja en este trabajo final de grado es un problema clásico de la mecánica de fluidos. Se trata de estudiar cómo circula el flujo de viento al encontrarse con una colina. Dicho caso está recogido en un repositorio de problemas de CFD de la ERCOFTAC. En concreto, se encuentra en la página "The Turbulence Mechanics/CFD Group Web Server", de la Escuela Mecánica, Aeroespacial y de Ingeniería Civil de la universidad citada.^[41]

Se trata del problema número 18 titulado: "Flujos de la colina modelo 2D". Dentro de este problema se encuentran 2 casos: el flujo sobre una sola colina y el flujo periódico sobre una serie de colinas consecutivas montadas en el mismo lugar. En la figura 3.1 se pueden observar ambos casos mencionados. El caso que se estudia en este trabajo final de grado es el primero de ellos, el de la imagen de la izquierda de la figura 3.1.^[42]

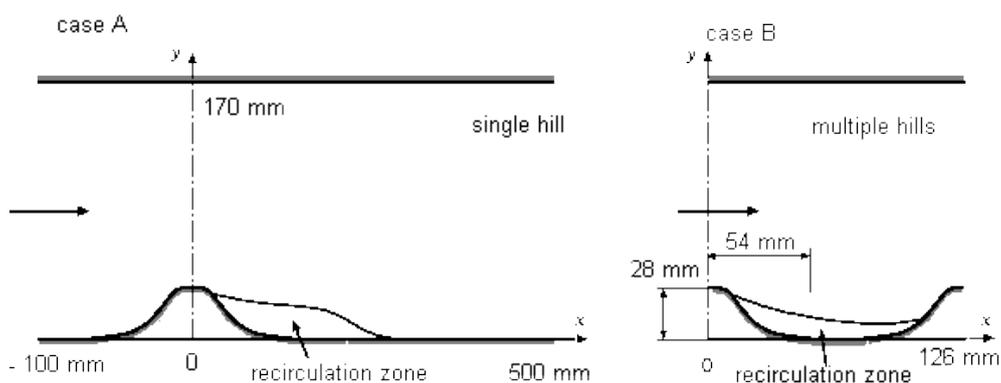


Figura 3.1. Representación gráfica de el flujo sobre una sola colina (izquierda) y el flujo periódico sobre colinas consecutivas (derecha)^[43]

Este caso ha sido elegido ya que es un problema clásico de la mecánica de fluidos, es un caso genérico en cuanto a colinas de esta apariencia y tiene mediciones reales del perfil de velocidades. De esta manera, una vez modelados los diferentes casos, se puede llevar a cabo una comparación con medidas experimentales para poder validar los modelos.

3.1.3. Configuración del caso en el programa

3.1.3.1. Definición del entorno

Una vez seleccionado el problema, el siguiente paso es preparar las herramientas para su resolución. Para ello se ha optado por resolver este caso mediante el uso del programa de CFD OpenFOAM. Se ha elegido este programa ya que es un programa de software gratuito y de código libre (tal y como se ha explicado en el punto 2.4). Esto permite que el coste del estudio reduzca su precio considerablemente ya que el precio de las licencias de programas basados en CFD es de decenas de miles de euros al año.

Para poder trabajar con OpenFOAM se necesita el uso de un sistema operativo Linux. Este sistema operativo podría haberse instalado complementariamente con el sistema operativo del ordenador de trabajo y, posteriormente, haber mandado las simulaciones al centro de cálculo RIGEL.

Sin embargo, existía la posibilidad de utilizar una granja de servidores (vSphere) en la cual instalar una máquina virtual con el sistema operativo Linux (Ubuntu) pudiendo dotar a dicha máquina virtual del hardware óptimo en cada momento. Ya que se ha considerado más interesante la opción de trabajar en este entorno debido a que se pueden asignar todos los recursos necesarios para reducir el tiempo de los procesos de cálculo. De este modo, este trabajo final de grado queda más completo ya que, no sólo se está trabajando con programa de CFD, sino que se trabaja con una herramienta de futuro como son las máquinas virtuales. En el Anexo I que se encuentra al final del documento, se explica detalladamente cómo se ha creado la máquina virtual y su asignación de recursos.

3.1.3.2. Entrada de datos y modelado

Para introducir la geometría del caso de estudio, elegir los modelos de turbulencia de cálculo y hacer el dimensionado de las mallas, OpenFOAM trabaja sobre carpetas. Este programa no cuenta con interfaz gráfica a la hora de introducir los datos iniciales (una vez obtenida la simulación sí que se puede representar mediante la herramienta ParaView).

Para llevar a cabo la introducción de datos se eligió una de las carpetas que guardaba un caso tutorial y se hizo una copia de la misma. A partir de esta se fueron cambiando los archivos de los que constaba adaptándolos al caso de estudio.

Todos los casos que se quieran simular deben constar de 3 carpetas, tal y como muestra la figura 3.2. La carpeta *0*, la carpeta *constant* y la carpeta *system*.



Figura 3.2. Carpetas de datos de los casos en OpenFOAM

La primera de estas carpetas, la carpeta 0, recoge los valores de una serie de magnitudes físicas. Las que interesan y se van a modificar para el caso que ocupa a este trabajo son tanto la velocidad (carpeta U), como la presión (carpeta p) que son las variables a resolver para el caso de la colina.



Figura 3.3. Documentos recogidos dentro de la carpeta 0

Lo que se modifica en ambas carpetas son las condiciones de contorno de acuerdo con las que debe tener este caso. Comenzando por la presión, a los límites superior e inferior se les asigna un gradiente de presión cero, al igual que al límite izquierdo (que es por donde sopla el fluido de izquierda a derecha tal y como se observa en la figura 3.1 caso A), mientras que a la pared derecha se le aplica un valor fijo de presión 0. En la figura 3.4 se puede observar el código y la forma de programación de las condiciones de contorno para la presión.

```
boundaryField
{
    top
    {
        type            zeroGradient;
    }

    bottom
    {
        type            zeroGradient;
    }

    inlet
    {
        type            zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 0;
    }
}
```

Figura 3.4. Condiciones de contorno establecidas para la presión

Del mismo modo, en lo referente a la velocidad se aplica un proceso parecido. En este caso, se aplica un valor de 0 al límite inferior (ya que no puede existir velocidad en esos puntos), un gradiente de velocidades igual a cero a la salida no se impone esta condición al límite superior (por este motivo está como *slip*) y por último un perfil de velocidades en la entrada, es decir, por la pared izquierda. Toda esta programación se muestra al comienzo de la siguiente página, en la figura 3.5.

```

boundaryField
{
  top
  {
    type            slip;
  }
  bottom
  {
    type            fixedValue;
    value           uniform (0 0 0);
  }
  inlet
  {
    type            fixedProfile;
    profile         csvFile;
    profileCoeffs
    {
      nHeaderLine   1;
      refColumn     0;
      componentColumns (1 2 3);
      separator     ",";
      mergeSeparators no;
      fileName       "experimentals/inletU.csv";
      outOfBounds   clamp;
      interpolationScheme linear;
    }
    direction       (0 1 0); // Axis of the profile coordinates
    origin          0;       // Origin of the profile coordinates
  }
  outlet
  {
    type            zeroGradient;
  }
}

```

Figura 3.5. Condiciones de contorno establecidas para la velocidad

En lo referente a la carpeta *constant*, esta consta de 3 archivos y una carpeta como se muestra en la figura 3.6. Estos 3 archivos son los que recogen el modelo de turbulencia con el que se va a realizar la futura simulación. En este punto, la carpeta con la que se está trabajando debe triplicarse. Esto se debe a que se van a hacer simulaciones diferentes para 3 modelos distintos de turbulencia tal y como se comentó en el apartado en el apartado 2.3.5.



Figura 3.6. Archivos recogidos en la carpeta *constant*

Los 3 modelos son RANS de tipo $k-\epsilon$, pero uno es el $k-\epsilon$ Standard, otro el Realizable y el último el RNG. Por este motivo, a la hora de modificar los archivos *RASProperties* y *turbulenceProperties* se cambia la línea que especifica el modelo de turbulencia con el que se va a calcular. En la figura 3.7 se observa un ejemplo del modelo $k-\epsilon$ Standard. Para cambiar el modelo al Realizable o al RNG simplemente se ha de sustituir el texto en la línea *RASModel* por *realizableKE* o *RNGkEpsilon* tal y como muestran los comentarios en azul de la figura 3.7.

```
simulationType RAS;  
  
RAS  
{  
  RASModel      kEpsilon; //realizableKE; //RNGkEpsilon;  
  turbulence     on;  
  printCoeffs   on;  
}
```

Figura 3.7. Definición del modelo de turbulencia.

Continuando con la carpeta *polyMesh*, la cual se encuentra dentro de la carpeta *constant*, se observa en la figura 3.8 los elementos que la componen. En esta carpeta es donde se recogen la geometría del objeto a estudiar, la colina en este caso y la malla que se a utilizar en cada caso.



Figura 3.8. Archivos contenidos dentro de la carpeta *polyMesh*

En cuanto a la geometría de la colina, se puede encontrar un archivo en la página web de la Universidad de Manchester, en donde estaba recogido el caso de estudio, en el que muestra la geometría de dicha colina. Las condiciones de contorno que aparecen en esta carpeta hacen referencia a las superficies que se han definido como las de los extremos para el caso de estudio.

En lo referente a la malla a utilizar, en este punto es en donde se van a multiplicar de 3 carpetas a 15 ya que se van a elegir 5 tipos de malla para cada modelo de turbulencia. Quedando de tal manera las 15 carpetas que se muestran en la figura 3.9.

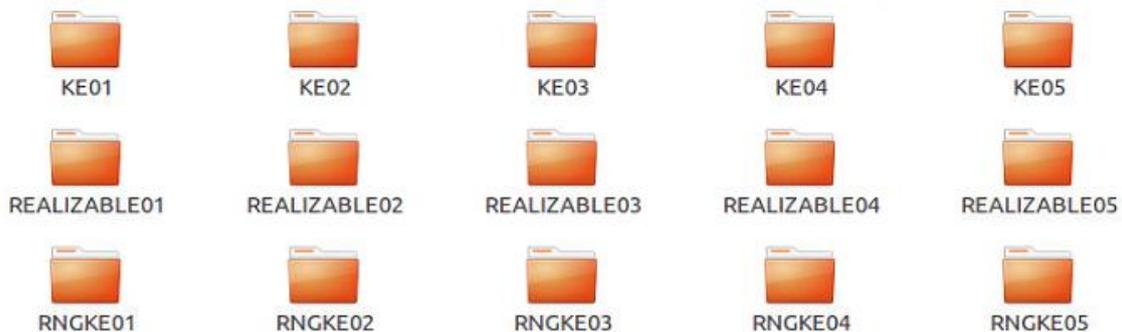


Figura 3.9. Carpetas de los 15 casos de estudio

El refinamiento que se ha elegido para cada malla es el recogido en la tabla 3.1. En ella se observa como el número de celdas en la malla 5 es la mayor de todas (malla más fina), mientras que en la 1 el número de celdas es el menor (malla más gruesa). Todo ello representado sobre el eje i o eje horizontal.

	Nº celdas eje i	Longitud eje i
Malla 1	8	46
Malla 2	32	46
Malla 3	56	46
Malla 4	81	46
Malla 5	105	46

Tabla 3.1. Número de celdas impuestas según la malla utilizada

Comparando la malla 1 con la malla 5 en el código introducido en OpenFOAM queda como se observa en la figura 3.10.

```

blocks
(
  hex (0 1 13 12 4 5 17 16) ( 8 1 5 )
  hex (1 2 14 13 5 6 18 17) ( 43 1 5 )
  hex (2 3 15 14 6 7 19 18) ( 73 1 5 )
  hex (4 5 17 16 8 9 21 20) ( 8 1 12 )
  hex (5 6 18 17 9 10 22 21) ( 43 1 12 )
  hex (6 7 19 18 10 11 23 22) ( 73 1 12 )
);

blocks
(
  hex (0 1 13 12 4 5 17 16) ( 105 1 70 )
  hex (1 2 14 13 5 6 18 17) ( 606 1 70 )
  hex (2 3 15 14 6 7 19 18) ( 1019 1 70 )
  hex (4 5 17 16 8 9 21 20) ( 105 1 161 )
  hex (5 6 18 17 9 10 22 21) ( 606 1 161 )
  hex (6 7 19 18 10 11 23 22) ( 1019 1 161 )
);
    
```

Figura 3.10. Comparación de código entre la malla 1 (izquierda) y la malla 5 (derecha)

La primera parte en ambas imágenes de la figura 3.10 coincide ya que son los puntos que definen los 6 cubos que dividen el dominio. Lo que varía son los vectores de la derecha que son los que definen el número de divisiones en el eje x, y, z del modelo. La profundidad no se ve afectada ya que se está trabajando en 2 dimensiones. Por lo tanto tan sólo se están dividiendo en la componente horizontal y en la componente vertical.

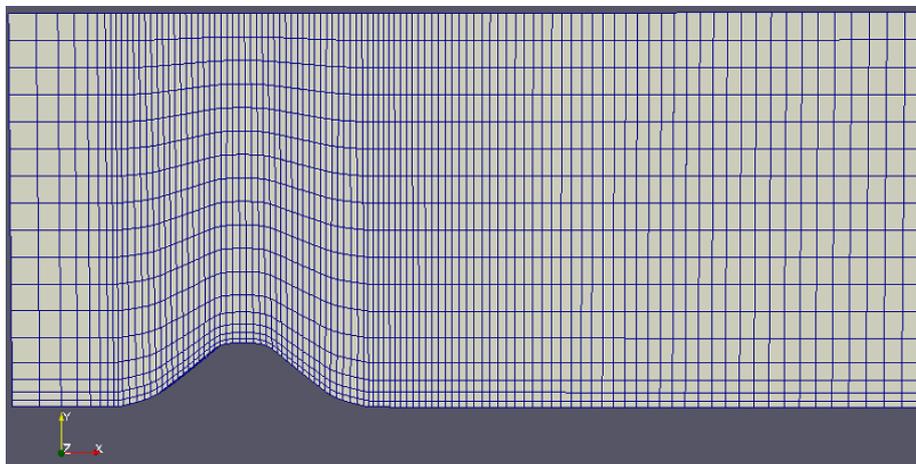


Figura 3.11. Extracto de la forma de malla utilizada en los distintos modelos

En la figura 3.11, se observa el extracto de la forma de malla utilizada para las simulaciones de los casos. La malla representada es la más gruesa para que se pueda observar con claridad las celdas y disposición de la misma.

En cuanto a los factores que determinan la calidad de malla, estos se obtienen introduciendo el comando *checkMesh* en la terminal. Los valores máximos obtenidos de skewness y ratio de aspecto para las mallas utilizadas son de 0,510923 y 6,32408. Ambos valores se consideran aceptables en cuanto a la calidad de las mallas.

Por último, en la carpeta *system* se pueden encontrar 3 archivos (figura 3.12). El archivo *controlDict* es el diccionario en donde se indica al caso el tiempo inicial, el tiempo final, el intervalo de tiempo, cada cuanto tiempo graba la solución, etc. El archivo *fvSchemes* es el diccionario que contiene los esquemas de discretización e interpolación para cada término de las ecuaciones definidas. Y, por último, *fvSolution* es el diccionario que contiene los métodos de resolución y tolerancia para los ecuaciones utilizadas en la resolución.^[44]



Figura 3.12. Archivos contenidos dentro de la carpeta *system*

3.1.3.3. Simulación

Una vez obtenidas las 15 carpetas para cada caso, el siguiente paso es realizar la simulación de cada uno de ellos. Para ello, lo primero que se hace es llamar al programa. Posteriormente se abre la carpeta correspondiente en la que se encuentra uno de los modelos a calcular. Y finalmente se usa el script *Allrun* para realizar la simulación. Todos los pasos vienen descritos en la figura 3.13 con el caso de ejemplo de la malla 1 del modelo k- ϵ Standard.

```
rafa@ububtu-01: ~/OpenFOAM/rafa-4.1/run/KE01
rafa@ububtu-01:~$ cd $FOAM_RUN
rafa@ububtu-01:~/OpenFOAM/rafa-4.1/run$ cd KE01
rafa@ububtu-01:~/OpenFOAM/rafa-4.1/run/KE01$ ./Allrun
Cleaning /home/rafa/OpenFOAM/rafa-4.1/run/KE01 case
Running blockMesh on /home/rafa/OpenFOAM/rafa-4.1/run/KE01
Running simpleFoam on /home/rafa/OpenFOAM/rafa-4.1/run/KE01
rafa@ububtu-01:~/OpenFOAM/rafa-4.1/run/KE01$
```

Figura 3.13. Simulación del modelo k- ϵ Standard malla 1

El script *Allrun* elimina todas las posibles carpetas de resultados y comienza a realizar las iteraciones de dicho modelo hasta un valor determinado. En este caso se realizarán 10.000 veces para todos los casos. Una vez acabada la simulación se obtiene una representación gráfica de la evolución de los residuos para observar si dicho modelo ha convergido o no.

Las primeras mallas en resolverse fueron las 5 del modelo k- ϵ Standard. Los tiempos que dieron de cálculo para esas mallas vienen recogidos en la tabla 3.2.

	Tiempo (s)
Malla 1	62
Malla 2	2981
Malla 3	10143
Malla 4	17827
Malla 5	24234

Tabla 3.2. Tiempo de cálculo para las diferentes mallas del modelo k- ϵ Standard

Observando que el tiempo de cálculo para la malla más fina era superior a las 6 horas y media, se decidió aumentar los recursos de la máquina virtual para reducir estos tiempos. En un primer momento la máquina virtual contaba con un procesador Intel de 2.1GHz. Se decidió aumentar hasta 8 procesadores de 2.1GHz. Resolviendo todos los casos con la nueva configuración se ha obtenido los tiempos que recoge la tabla 3.3 (medidos todos en segundos).

	Standard	Realizable	RNG
Malla 1	58	65	100
Malla 2	765	1087	1159
Malla 3	3187	4002	3865
Malla 4	7163	8552	8232
Malla 5	13909	14127	15560

Tabla 3.3. Tiempo de cálculo para las diferentes mallas de cada modelo de turbulencia

Como se puede observar, los tiempos de cálculo del modelo k- ϵ Standard se han reducido. En concreto se han reducido una media del 50,36% para los 5 casos, tal y como muestra la tabla 3.4 en la que se recogen los tiempos de cálculo (medidos en segundos) resueltos con 1 procesador y con 8 procesadores. Lo que demuestra que, como es natural, el escalado no es total (es decir, los tiempos de cálculo no se reducen a 1/8). Puedes comentar algo al respecto.

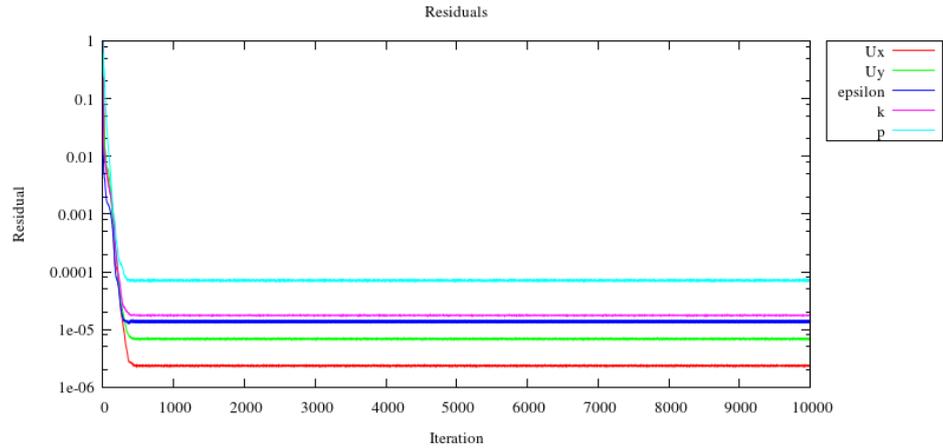
	1 procesador	8 procesadores	Reducción del $t_{\text{cálculo}}$
Malla 1	62	58	6,45%
Malla 2	2981	765	74,34%
Malla 3	10143	3187	68,58%
Malla 4	17827	7163	59,82%
Malla 5	24234	13909	42,61%
		Media	50,36%

Tabla 3.4. Comparación del tiempo de cálculo dependiendo del número de procesadores utilizados por la máquina virtual

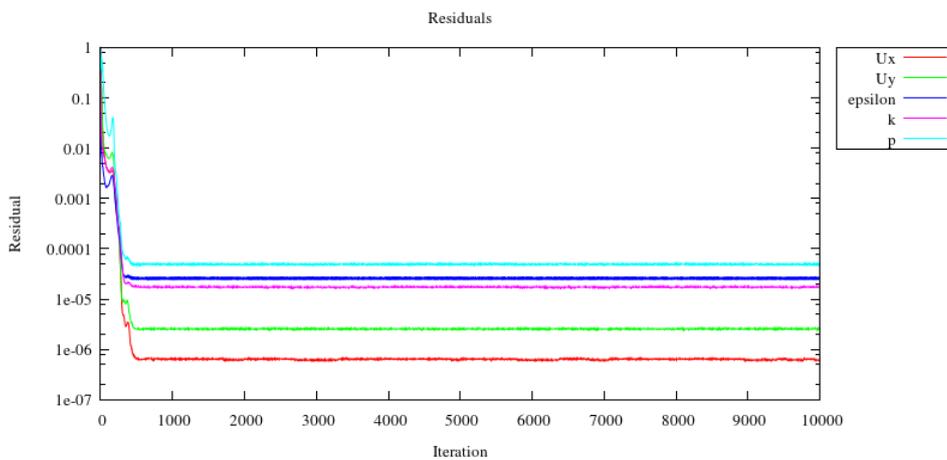
Ya que existía la posibilidad de aumentar los recursos de la máquina virtual sin coste alguno, se observa como se ha mejorado el rendimiento de cálculo. Por este motivo se ha decidido trabajar con esta tecnología en este trabajo final de grado ya que, permite aumentar los recursos de hardware si es necesario (como ha sido el caso). El hecho de contar con esta tecnología en el trabajo supone un aumento del presupuesto final, sin embargo se ha decidido utilizar esta tecnología ya que estaba al alcance durante el transcurso de este trabajo.

En cuanto a los residuos obtenidos, todos ellos se encuentran por debajo del 0.0001. Se podría decir que la precisión de los 15 modelos por continuar iterando no sería apreciable ya que se han alcanzado unos residuos muy bajos para todos los casos.

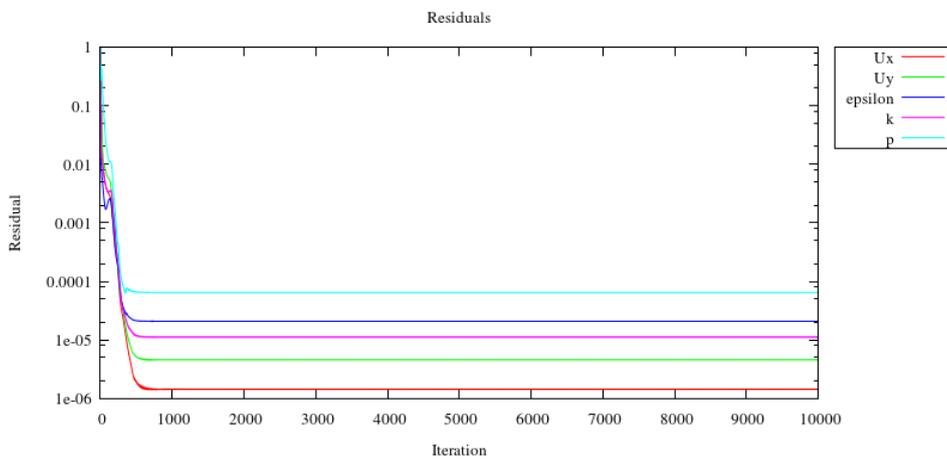
Dado que plasmar las 15 gráficas de los residuos para cada uno de los 15 modelos ocuparía demasiado espacio, se ha decidido mostrar el resultado de los residuos de la malla más gruesa (figura 3.14) y de la malla más fina (figura 3.15) para los 3 modelos de turbulencia.



Residuos modelo k-ε Standard



Residuos modelo realizable k-ε



Residuos modelo RNG k-ε

Figura 3.14. Residuos obtenidos para las mallas más gruesas de los 3 modelos de turbulencia

Se observa como los residuos de todos los valores calculados se encuentran por debajo del 0,0001 antes de llegar a 1000 iteraciones, mucho antes del valor esperado. Esto se debe a que la malla con la que está calculando es una malla más gruesa, además, el tiempo medio de ejecución para el caso de esta malla en los 3 modelos es de 74,33s.

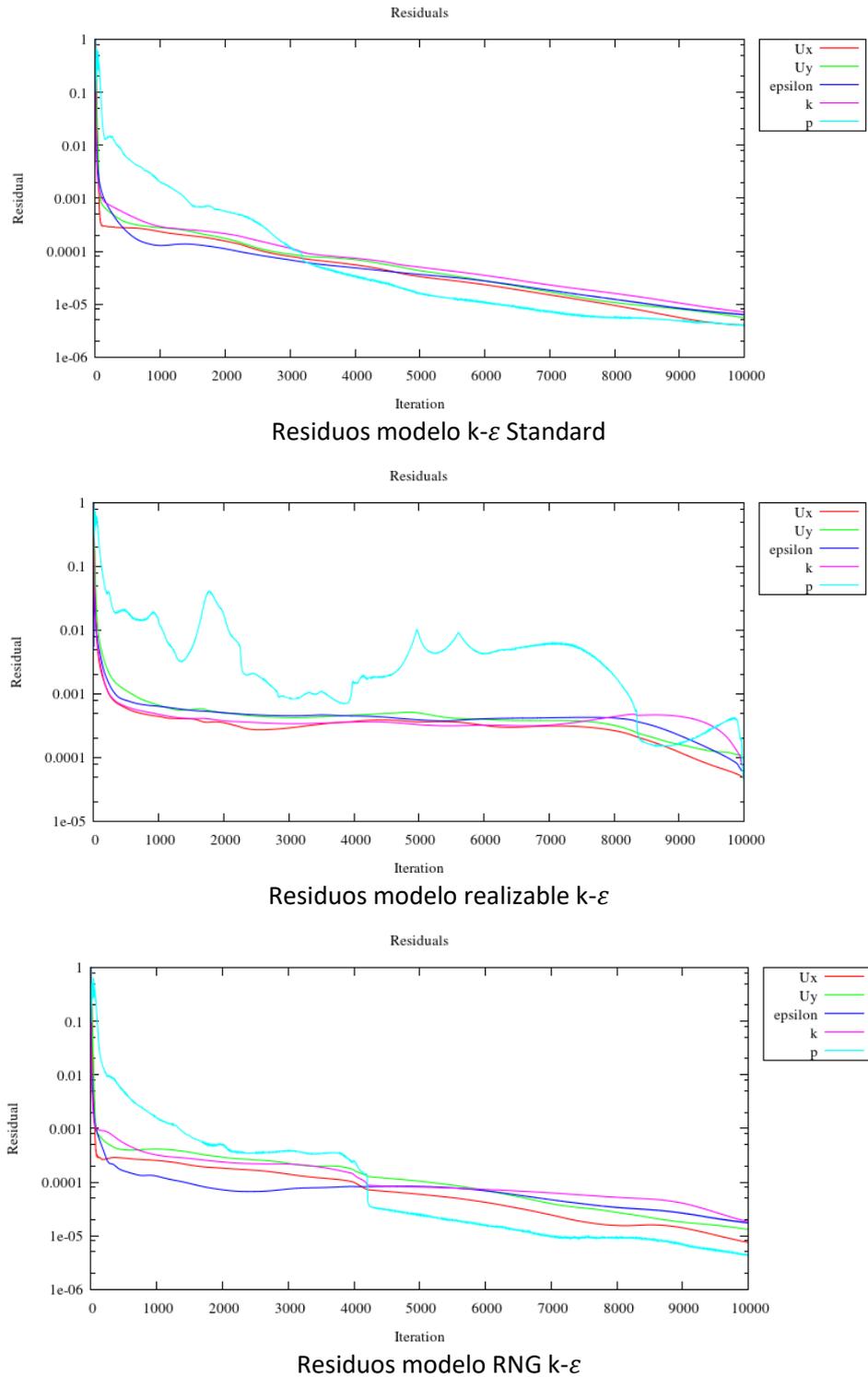


Figura 3.15. Residuos obtenidos para las mallas más finas de los 3 modelos de turbulencia

Para el caso de la malla más fina en los 3 modelos de turbulencia, se observa que no ha convergido tan rápido como el caso de la malla 1. Esto entra dentro de lo esperado ya que se trata de una malla más fina que la primera. No obstante, cabe destacar que para este tamaño de malla también se encuentran todos los valores por debajo de 0,0001. El único valor que ha tardado más en converger ha sido la presión en el modelo realizable, aunque se observa como finalmente ha convergido por debajo del 0,001.

3.2. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA

3.2.1. Introducción

Una vez obtenidas las simulaciones de los 15 casos de estudio se ha de encontrar un método para elegir el mejor caso. Lo más razonable, a priori, es comparar todos los casos con los experimentales y seleccionar el que más se asemeje a los datos recogidos experimentalmente. Sin embargo, la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ASME (American Society of Mechanical Engineers) propone la realización de lo que se denomina un análisis de malla. Este análisis es ciego, es decir, no tiene en cuenta los datos experimentales (ya que en muchas simulaciones CFD no se puede contar con dichos datos para realizar posteriormente una comparación).

En el siguiente apartado se explican los diferentes valores que se han de calcular y los pasos a seguir según publica la ASME en su artículo titulado *Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications* (Procedimiento de Estimación y Notificación de Incertidumbre Debido a la Discretización en las Aplicaciones CFD).^[45]

3.2.2. Procedimiento para la estimación del error de discretización

El primer paso que se debe realizar es la definición de un tamaño de malla representativo. Para ello se divide la longitud representativa de uno de los 6 bloques comentados anteriormente, y se divide entre el número de celdas de las que consta tal y como se muestra en la ecuación 3.1.

$$h = \frac{\text{longitud eje } i}{n^{\circ} \text{ de celdas eje } i} \quad 3.1$$

La tabla 3.5 muestra los resultados para todas las mallas. Como los 3 modelos tienen las mismas 5 mallas, tan sólo se ha de representar estos casos.

	Nº celdas eje i	Longitud eje i	h
Malla 1	8	46	5,750
Malla 2	32	46	1,438
Malla 3	56	46	0,821
Malla 4	81	46	0,568
Malla 5	105	46	0,438

Tabla 3.5. Tamaño de malla representativo

Tras la realización de este cálculo, se calcula un valor r como la relación entre una malla y la malla inmediatamente más fina. Esta relación ha de ser siempre superior a 1, tal y como muestra la ecuación 3.2. Además, se recomienda que el r_{global} (la relación entre la malla más gruesa y la malla más fina) sea superior a 1,3. La tabla 3.6 recoge el cálculo para las 4 combinaciones posibles.

$$r = \frac{h_{\text{gruesa}}}{h_{\text{fina}}} > 1 \quad 3.2$$

r	
r _{global}	13,125
r ₁₂	4,000
r ₂₃	1,750
r ₃₄	1,446
r ₄₅	1,296

Tabla 3.6. Relación entre tamaños de malla representativos

A continuación, se calcularán una serie de valores a partir de la combinación de 3 mallas. En el caso de este trabajo, al tener 5 modelos, se calcularán las combinaciones 123, 234 y 345 (siendo *ijk* las mallas *i*, *j* y *k* y recordando que la malla más gruesa es la malla 1 y la más fina es la malla 5).

El primer valor que se ha de calcular es ϕ_i . Este es el valor de la variable indicadora, es decir, es un valor que se toma de un punto de la simulación. Este valor se debe calcular varias veces ya que serán necesarios de varios puntos para llevar a cabo un buen análisis.

Posteriormente, se calcula el error del valor ϕ_i obtenido en un punto entre lo que dice una malla con respecto a su inmediata más fina (ecuación 3.3). Con este valor se puede calcular el valor *s*, el cual representa el valor unitario positivo o negativo (ecuación 3.4).

$$\varepsilon_{ij} = \phi_i - \phi_j \quad 3.3$$

$$s = \text{signo} \left(\varepsilon_{ij} / \varepsilon_{jk} \right) \quad 3.4$$

Hallados todos estos valores, se puede calcular uno de los valores más interesantes para realizar el análisis de convergencia de malla. Este valor es *p* y representa el orden aparente de la malla. Se calcula tal y como se muestra en la ecuación 3.5. Además, dicho valor debe ser lo más próximo posible al orden formal del modelo, que en el caso de este trabajo final de grado es de 2.

$$p_{ijk} = \frac{1}{\ln(r_{kj})} \cdot \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_{jk}} \right| + \ln \left(\frac{r_{jk}^{p_{ijk}} - s_{ijk}}{r_{ij}^{p_{ijk}} - s_{ijk}} \right) \right| \quad 3.5$$

Tras hallar el orden aparente de la malla, se puede calcular la incertidumbre debida a la discretización, GCI. Este valor se recomienda que sea inferior al 10%, o, a ser posible, inferior al 5%. Para calcular este valor se necesita de otro, el error relativo. Las ecuaciones 3.6 y 3.7 recogen el cálculo del error y la incertidumbre.

$$e_{aij} = \left| \frac{\phi_j - \phi_i}{\phi_j} \right| \quad 3.6$$

$$GCI_{ij} = \frac{1.25 \cdot e_{aij}}{r_{ij}^{p_{ijk}} - 1} \quad 3.7$$

3.2.3. Postprocesado y cálculo del error de discretización

Una vez explicado cuáles son los pasos que se han de seguir para el cálculo de la incertidumbre de la malla, se procede a explicar cómo se han obtenido los puntos para aplicar el proceso.

Tras tener las 15 casos simulados, el procedimiento a seguir es abrir el visualizador de resultados *paraView*. Para ello se selecciona la carpeta del caso que se quiere visualizar en la terminal, tal y como muestra la figura 3.16 con el caso de la malla más gruesa del modelo k- ϵ Standard, y se introduce el comando *paraFoam* para que abra el visor sobre ese caso.

```
rafa@ububtu-01: ~/OpenFOAM/rafa-4.1/run/KE01
rafa@ububtu-01:~$ cd $FOAM_RUN
rafa@ububtu-01:~/OpenFOAM/rafa-4.1/run$ cd KE01
rafa@ububtu-01:~/OpenFOAM/rafa-4.1/run/KE01$ paraFoam
Created temporary 'KE01.OpenFOAM'
```

Figura 3.16. Comandos a introducir para abrir el visualizador de resultados

Al abrir el visualizador se procede a preparar cada caso para su posterior análisis. En primer lugar, se seleccionan las variables a que se quieren visualizar y se elige también que los resultados que muestre sean los de la última iteración. Tras la realización de estos pasos, ya se pueden obtener datos de los resultados que propone cada caso.

Para obtener los resultados que aporta cada caso, se utiliza la herramienta *Plot Over Line*. Esta herramienta permite seleccionar una línea sobre la que posteriormente el programa devuelve un documento Excel con la información que hay en todos los puntos de esa línea.

Dado que se desea trabajar sobre todos los puntos de una recta horizontal, sin encontrar de por medio la colina, se ha decidido elegir una altura de 0,04 unidades de distancia (siendo 0,17 el máximo). Quedando el segmento de puntos a seleccionar tal y como muestra la figura 3.17.

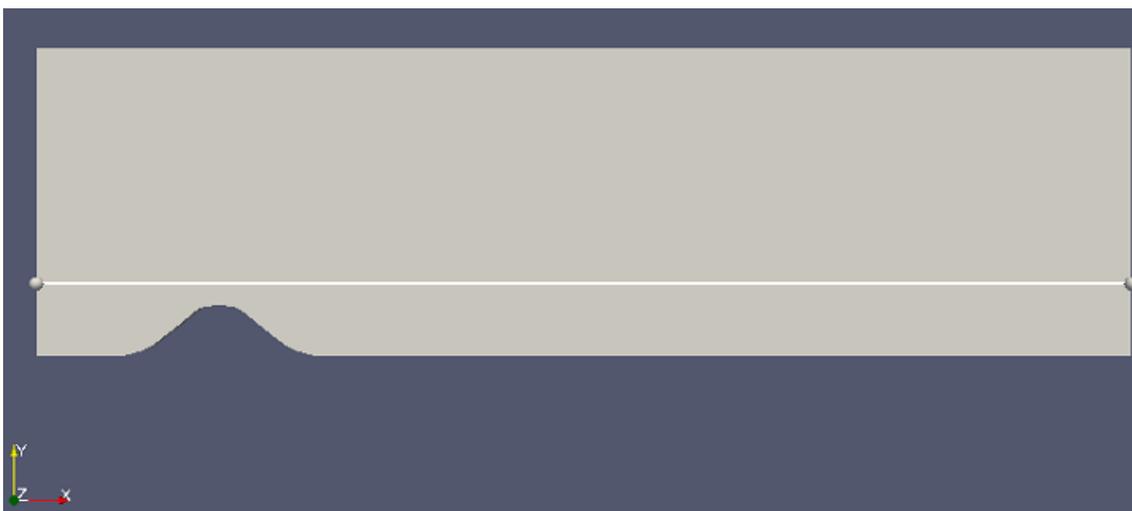


Figura 3.17. Representación del segmento elegido para la obtención de datos del modelo

A partir de la selección del segmento para la obtención de datos se puede especificar la resolución que se desea obtener, es decir, cuántos puntos se quieren representar. En este caso se escogen 100 divisiones ya que, la distancia en dirección horizontal del caso es de 0,6 unidades de distancia (va desde -0,1 a 0,5 unidades de distancia) y con 100 divisiones es más que suficiente para la realización del cálculo.

Tras decidir la resolución se le da a aplicar y el programa devuelve una gráfica como la mostrada en la figura 3.18. En ella se observa la evolución de distintas magnitudes a lo largo de la distancia escogida. Esta herramienta es muy importante y utilizada en los siguientes puntos ya que permite representar gráficamente los perfiles de velocidades para comparar posteriormente dichos perfiles modelados con los experimentales.

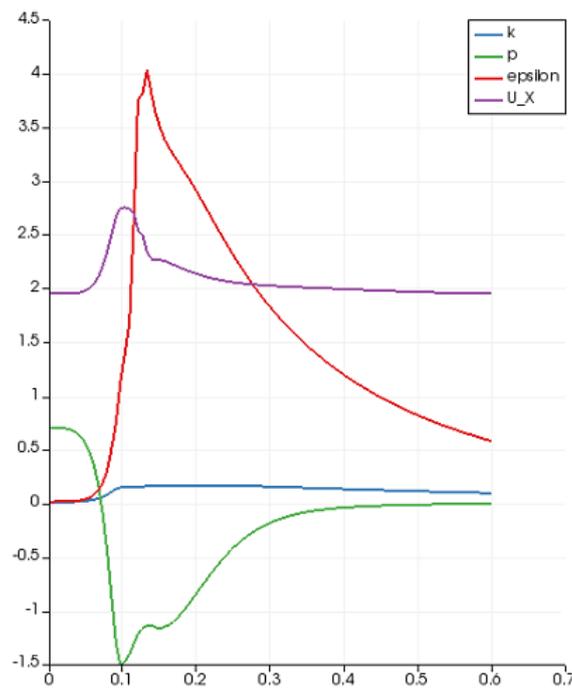


Figura 3.18. Gráfica obtenida tras la elección de puntos en el modelo

Al obtener esta gráfica el programa permite guardar esta información, ya que lo que está haciendo es realizar la representación de puntos con la resolución asignada, en un documento Excel. Este es el procedimiento que se ha de realizar 15 veces para todos los casos modelados y poder calcular el análisis de convergencia de malla.

Los datos que se van a utilizar para realizar el análisis de convergencia de malla son las velocidades horizontales, que son las que serían aprovechadas por el aerogenerador o los aerogeneradores que se llegaran a instalar en la colina.

Para calcular el análisis de convergencia de malla se hace uso de una hoja de cálculo Excel. Pasando los datos obtenidos a 15 hojas de cálculo se decide obtener el resultado de cada modelo de turbulencia en una hoja distinta. Para ello se seleccionan 8 puntos, que serán los mismos para cada malla (ya que todas tienen la misma resolución y están sobre la misma horizontal) y se procede a realizar el cálculo del orden aparente de la malla (p) y la incertidumbre debida a la discretización (GCI). Un ejemplo de tabla que recogía los puntos seleccionados para el cálculo es la que se muestra en la tabla 3.7.

ϕ U0	KE_01	KE_02	KE_03	KE_04	KE_05
1	2,047	2,068	2,068	2,069	2,071
2	2,111	2,138	2,140	2,141	2,143
3	2,212	2,240	2,243	2,245	2,247
4	2,338	2,378	2,382	2,385	2,389
5	2,503	2,549	2,555	2,559	2,563
6	2,673	2,711	2,720	2,726	2,731
7	2,751	2,794	2,805	2,813	2,820
8	2,756	2,777	2,790	2,799	2,807

Tabla 3.7. Datos de velocidades obtenidos de 8 puntos para el caso k- ϵ Standard

Los 8 puntos que se han elegido para la realización del cálculo no han sido arbitrarios. Se han elegido los puntos que se sitúan desde la cumbre de la colina hacia la derecha. Estos puntos son importantes y se han elegido ya que es en ese punto donde comienza el despegue y donde se sitúa el perfil de velocidades más interesante de cara a una posible instalación de aerogeneradores. La figura 3.19 muestra la región donde se encuentran los 8 puntos elegidos (los cuales son equidistantes entre sí).



Figura 3.19. Representación de los puntos elegidos para el análisis de convergencia de malla

A partir de aquí se realizan todos cálculos necesarios y se obtienen los resultados que se muestran en el siguiente apartado.

3.2.4. Resultados

Debido al hecho de que se ha hecho el análisis para 8 puntos, la combinación entre mallas era de 3 y que son 3 modelos de estudio, se ha elegido mostrar los resultados medios para tanto el orden aparente de la malla como para la incertidumbre. En las tablas 3.8 y 3.9 se muestran respectivamente dichos resultados medios. Además, en este punto también es interesante observar el resultado de otra magnitud: y^+ . Este valor es importante en el modelado de la turbulencia para determinar si el tamaño de las celdas cerca de las paredes del dominio es el adecuado o no. Dicho valor se representa en la tabla 3.10 que se muestra a continuación.

	p_{123}	p_{234}	p_{345}
Standard	1,26	0,37	0,87
Realizable	0,41	2,18	8,06
RNG	1,66	1,95	0,89

Tabla 3.8. Valores medios del orden aparente de malla obtenidos según su modelo de turbulencia

	GCI_{23}	GCI_{34}	GCI_{45}
Standard	0,54%	2,48%	1,75%
Realizable	1,75%	0,31%	0,01%
RNG	1,55%	0,56%	1,14%

Tabla 3.9. Valores medios de la incertidumbre obtenidos según su modelo de turbulencia

	Standard	Realizable	RNG
Malla 1	154,59	161,79	161,40
Malla 2	34,09	30,74	30,38
Malla 3	17,10	15,92	15,57
Malla 4	11,43	10,65	10,40
Malla 5	8,66	8,48	7,98

Tabla 3.10. Valores medios de y^+ obtenidos según la malla y el modelo de turbulencia

Como se puede apreciar en la tabla 3.8 , las incertidumbres obtenidas son todas inferiores al 2,5%. Hasta el 15% se pueden llegar a aceptar y por debajo del 5% son unas muy buenas incertidumbres. Por lo tanto, ante este valor se observa que todas las mallas responden muy bien.

Por otro lado, en cuanto a los valores de y^+ observados en la tabla 3.10, se observa como a medida que se reduce el tamaño de malla a valores más finos este valor disminuye considerablemente. El rango de aceptación de este valor es de [5,300].

Sin embargo, si se desea ser más estricto existe otro rango más reducido que es el que va de [5,30]. Como se puede observar, en el primer rango entran todos los valores, pero en el segundo entran a partir de la malla 3.

Dado que han entrado dentro del primer rango de valores se van a aceptar como buenos, pero más adelante ,en la memoria, se vuelve a hacer mención del rango más reducido en el que entran a partir de la tercera malla.

Por último, la tabla 3.8 es la más importante ya que es la que muestra los valores que van a decidir qué malla se selecciona según el análisis de convergencia de malla para cada modelo. Como se ha comentado en el punto 3.2.2, el valor del orden aparente de la malla ha de ser lo más parecido posible al orden formal del modelo. Ya que el orden formal del modelo es 2, los valores más próximos son: p_{123} para el modelo Standard y p_{234} para los modelos Realizable y RNG. Dado que es la combinación de 3 mallas lo que nos aporta este resultado, el criterio de selección que se suele utilizar es elegir la malla con menor coste computacional. Este es el

criterio que se va a utilizar en este trabajo final de grado para el análisis de convergencia de malla. Por lo tanto, las mallas elegidas finalmente dependiendo del caso son la 1 para el modelo Standard (malla más gruesa) y la 2 para los modelos Realizable y RNG (segunda malla más gruesa).

Con esta elección de mallas, el siguiente paso es la comparación de las mismas con el resultado experimental para observar cuál de ellas es la que mejor representa dicho resultado. Para ello, lo primero es tener los datos experimentales que están en la página web de la Universidad de Manchester a la que se hizo referencia en el punto 3.1.2. Los datos del perfil de velocidades se descargan y obtienen de esa página. Se seleccionan los paquetes de datos a 3 distancias distintas para evaluar el perfil de velocidades en la cumbre, la recirculación a mitad de la colina y la futura estabilización dejando una distancia de la misma (distancias 0; 0,05 y 0,09 metros).

A continuación, se obtienen los perfiles de velocidades a la misma distancia que los experimentales del mismo modo que se explicó en el punto 3.2.3. En este caso, en vez de realizar un único segmento horizontal para obtener los resultados de los puntos, se harán 3 segmentos verticales a las distancias 0; 0,05 y 0,09 metros como muestra la figura 3.20.

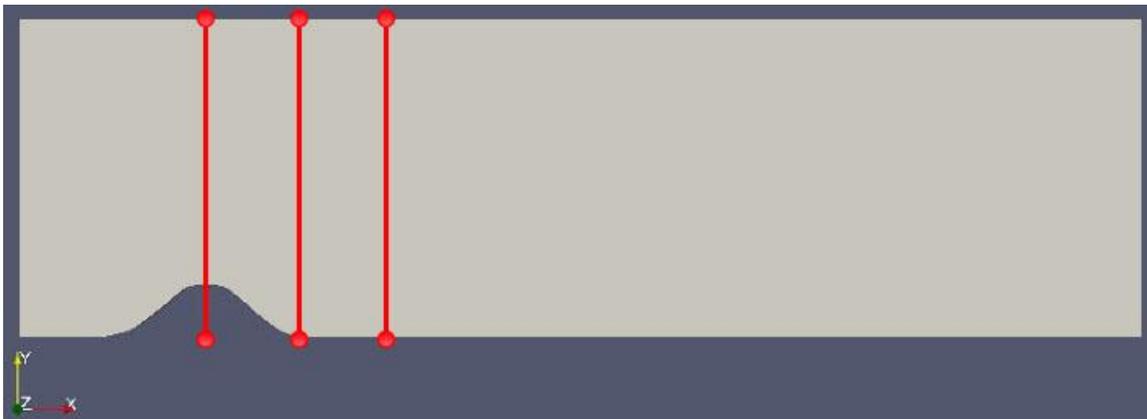


Figura 3.20. Representación de los 3 segmentos de obtención de datos a las distancias 0; 0,05 y 0,09 metros para el cálculo del perfil de velocidades

Ya que en este caso se pretende representar gráficamente el perfil de velocidades para compararlo con el experimental (y que posteriormente se van a hacer uso de estos datos en la parte de análisis estadístico), la resolución que a la que se van a obtener los distintos puntos es de 500.

Una vez aplicados los pasos para la obtención de datos y pasados los mismos a Excel se procede a hacer una comprobación gráfica, a las 3 distancias propuestas, de las mallas seleccionadas por el criterio de análisis de convergencia. Dichas gráficas aparecen representadas en la siguiente página en la figuras 3.21.

Las 3 gráficas están representadas con datos adimensionales, que es como se encuentran los datos obtenidos experimentalmente. Para ello se divide la altura y entre el y_{\max} que se encuentra en la página donde se describe el caso, siendo $y_{\max}=28$ m(variable que representa la altura de la colina). Lo mismo sucede con las velocidades, todas ellas se dividen por un valor U_0 el cual representa la velocidad media de entrada de flujo, que se encuentra en los datos ofrecidos por el caso. En este caso, el valor de $U_0= 2,147$ m/s. Tras ajustar los datos de cada

caso obtenidos por OpenFOAM a la forma en la que están representados los experimentales se obtienen las gráficas mostradas.

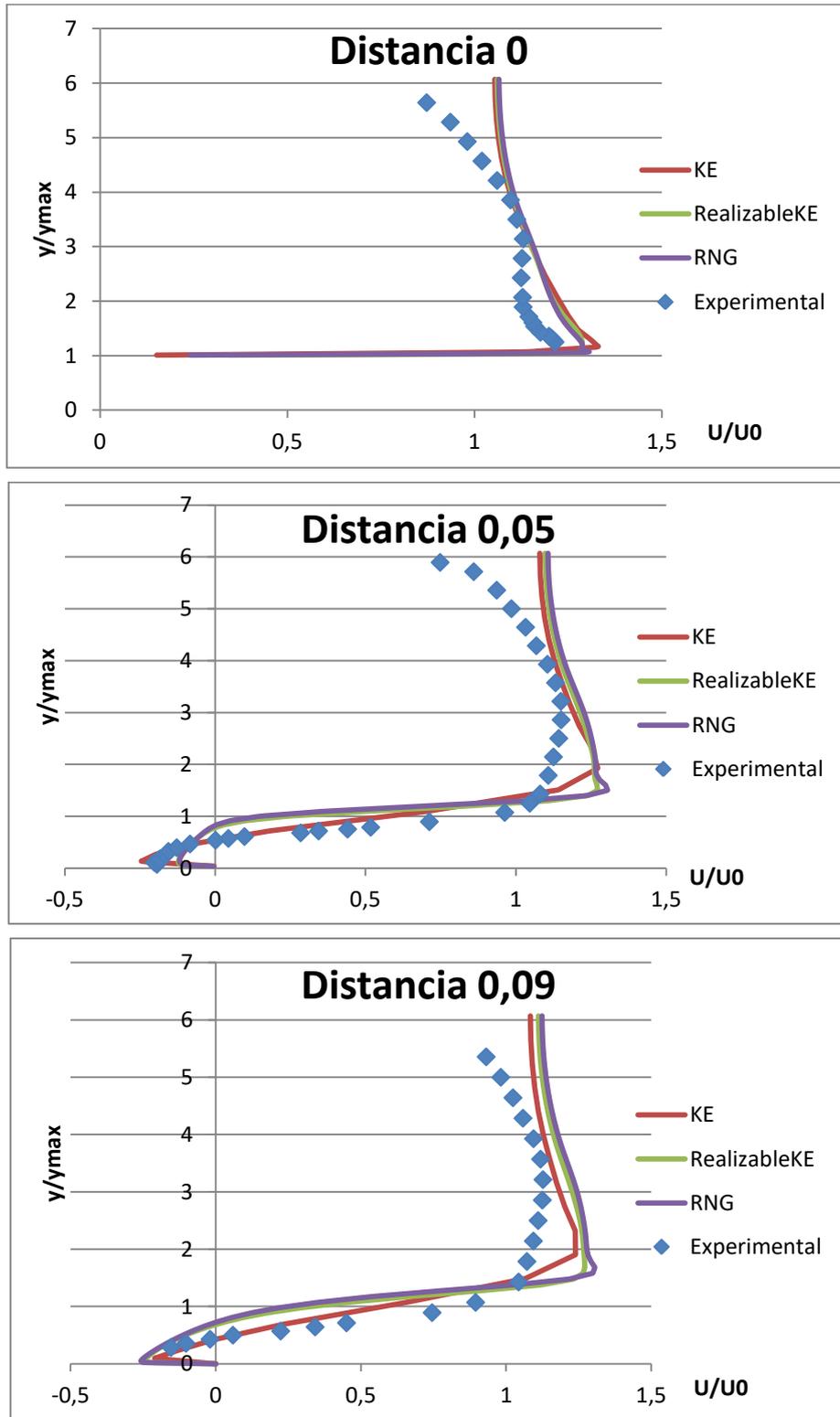


Figura 3.21. Comparación entre el resultado experimental y las mallas elegidas en el análisis de convergencia a las distancias de 0; 0,05 y 0,09 metros.

Como se puede observar, más o menos representan los modelos lo mismo que el perfil de velocidades. Sin embargo, para verificar que son estas mallas las que mejor representan el

modelo experimental o no, se ha decidido proceder a efectuar un análisis estadístico de todas las mallas (el cual se trata en el siguiente apartado). De esta manera se confirma si el análisis de convergencia de malla propuesto en este apartado da los modelos indicados que mejor representan la realidad.

3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.3.1. Introducción

Dado que los análisis de convergencia de malla no siempre aportan el mejor resultado comparado con datos experimentales (simplemente se obtiene la malla con menor incertidumbre), se ha considerado realizar un análisis estadístico básico a los datos obtenidos de los 15 casos y comparar ambos análisis. De esta manera se puede decidir cuál de las mallas convergidas en el análisis de convergencia de malla es la que mejor representa los resultados experimentales.

Para ello se aplica en primer lugar un análisis de la varianza sobre los 3 modelos y las 5 mallas. A partir de este análisis se determina qué tipo de modelo está representando con mayor precisión los datos reales, para posteriormente aplicar un análisis de regresión obteniendo así la malla que mejor representa los datos experimentales.

3.3.2. Análisis de la varianza (ANOVA)

En primer lugar, tal y como se hizo en la parte final del punto 3.2.4, se obtendrán los datos de los 15 casos a las distancias de 0; 0,05 y 0,09 (obteniendo así 45 datos). El procedimiento a seguir es el mismo que el descrito en el apartado 3.2.4. Al acabar de realizar ese proceso se ordenan todos los datos en una tabla Excel para facilitar el posterior análisis de la varianza. En la tabla 3.11 se recoge un pequeño extracto de la tabla Excel utilizada en este trabajo. En la siguiente página se explica lo que representa cada variable.

Modelo	Malla	Posición	y/y _{max} exp	y/y _{max} mod	Error y/y _{max}	Velocidad exp	Velocidad mod	Error V
KE	1	0	1,250	1,251	-0,07%	1,215	1,316	-10,09%
KE	1	0	1,286	1,287	-0,14%	1,211	1,310	-9,98%
KE	1	0	1,321	1,324	-0,21%	1,205	1,304	-9,82%
KE	1	0	1,357	1,360	-0,29%	1,199	1,297	-9,80%

Tabla 3.11. Extracto de la tabla utilizada en Excel para el posterior análisis ANOVA

Se puede observar que la tabla cuenta con diferentes columnas a la hora de incluir los datos y siendo sencillo un filtrado posterior. En la primera columna se encuentra el modelo de turbulencia utilizado (KE o Standard, Realizable o RNG), en la segunda se encuentra en qué malla se están obteniendo los datos (1-5).

En cuanto a la columna posición, en ella se refleja la posición en x a la que se obtienen los resultados, es decir, si en la cumbre de la colina, a mitad o desplazados a la derecha (tal y como refleja la figura antes mencionada 3.19).

La siguiente columna es en la que se encuentran los datos experimentales de la posición en altura dividido por el y_{\max} . La columna de al lado es lo mismo pero en este caso para el modelo. Como no se podían obtener con total exactitud estos valores, se han elegido siempre los más

cercanos a los experimentales con un error máximo del 0.64%. Es en la siguiente columna donde se calcula ese error. Dado que para todas las alturas en la posición 0 el experimental es el mismo y la división del modelo de malla ha sido la misma, estos errores de posición siempre son los mismos. Ocurre lo mismo si se varía la posición y la altura a lo largo de los diferentes modelos.

Por último, en las 3 últimas columnas ocurre algo parecido que en las 3 que las preceden. La velocidad experimental no varía si se encuentra en la misma posición en x e y. Sin embargo, la velocidad del modelo sí. Y es eso lo que debe determinar este análisis estadístico, la malla de qué modelo representa mejor los resultados experimentales. Por este motivo está la última columna que valora el error de velocidad entre el experimental y el modelo.

Una vez explicada la tabla que recoge la información para realizar el análisis, se procede a realizar el ANOVA. Dicho análisis se realiza mediante la ayuda del programa Statgraphics en el que se obtienen los resultados mostrados en la tabla 3.12 y en las figuras 3.22 y 3.23 mostradas más adelante.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Modelo	0,213779	2	0,106889	4,91	0,0075
B:Malla	0,0959199	4	0,02398	1,1	0,3545
C:Posicion	181,136	2	0,90568	41,6	0
INTERACCIONES					
AB	0,00614334	8	0,00076792	0,04	1
AC	0,110178	4	0,0275445	1,27	0,2819
BC	0,0328413	8	0,00410516	0,19	0,9925
RESIDUOS	232,094	1066	0,0217724		
TOTAL (CORREGIDO)	25,498	1094			

Tabla 3.12. Análisis de Varianza para Error V - Suma de Cuadrados Tipo III

Como se puede observar, el valor obtenido para la malla es de 0,3545, es decir, un 35,45%. Este factor es estadísticamente no significativo ya que es superior al 5%(riesgo de primera especie utilizado en el presente trabajo). Sin embargo, hay 2 factores en los que el p-valor es menor al 5%. Dichos factores son el modelo y la posición. Por tanto se puede afirmar que estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el error entre la velocidad experimental y la velocidad obtenida de los diferentes modelos con una probabilidad de error menor al 95%. Esto quiere decir que tanto la posición en la que se están comparando los experimentales con los modelados (en la cumbre de la colina, en la zona de recirculación y en la zona en la que se empieza a estabilizar el flujo), como el modelo de turbulencia utilizado de cálculo son significativos a la hora de determinar una mejor o peor comparación con los experimentales.

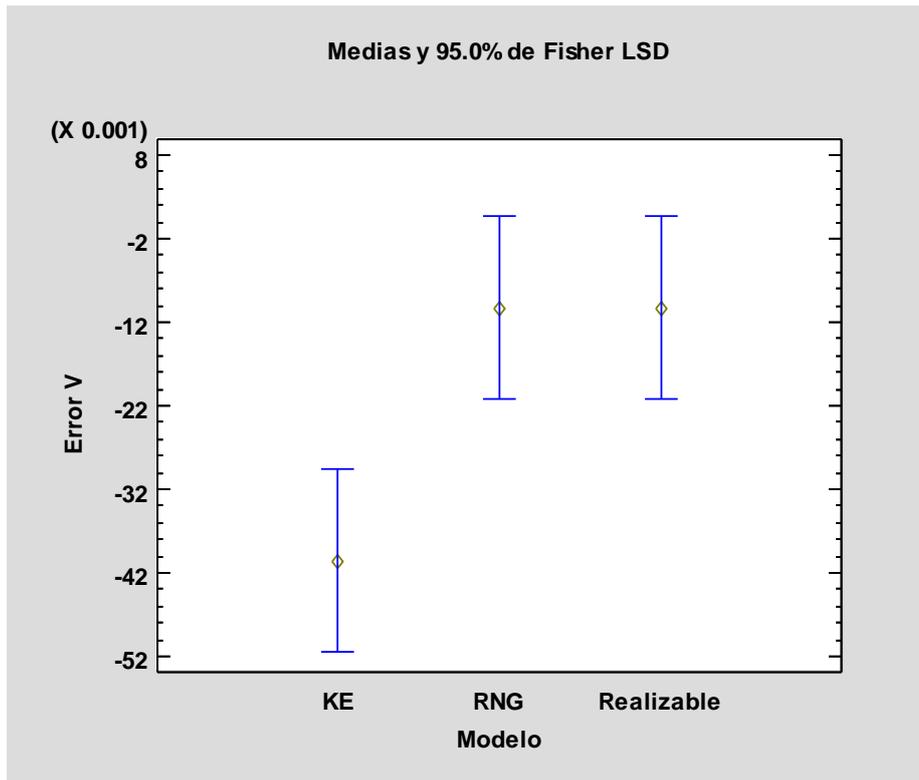


Figura 3.22. Gráfico LSD del error entre experimental y calculado dependiendo del modelo de turbulencia utilizado

Tal y como muestra el gráfico de diferencias mínimas significativas (LSD) de la figura 3.22, se puede observar como el modelo KE, que es el que equivale al Standard, presenta un error mucho menor que los otros 2 modelos. Esto quiere decir que el modelo de turbulencia Standard reproduce mejor los puntos experimentales que los otros 2 modelos.

Además, como se puede observar en la figura 3.23, el error parece disminuir conforme el mallado es más fino, encontrándose el error medio de todas las mallas del modelo Standard por debajo del error mínimo de los otros 2 modelos y encontrándose el error máximo por debajo del medio de los otros dos (hecho comprobado en la figura 3.22).

Ante esta situación, se deduce que el mejor modelo es el $k-\varepsilon$ Standard. Y ya que, como muestra la tabla 3.12, el modelo tiene un efecto estadísticamente significativo, se realiza un análisis de regresión para el modelo $k-\varepsilon$ Standard, el cual se muestra el siguiente apartado.

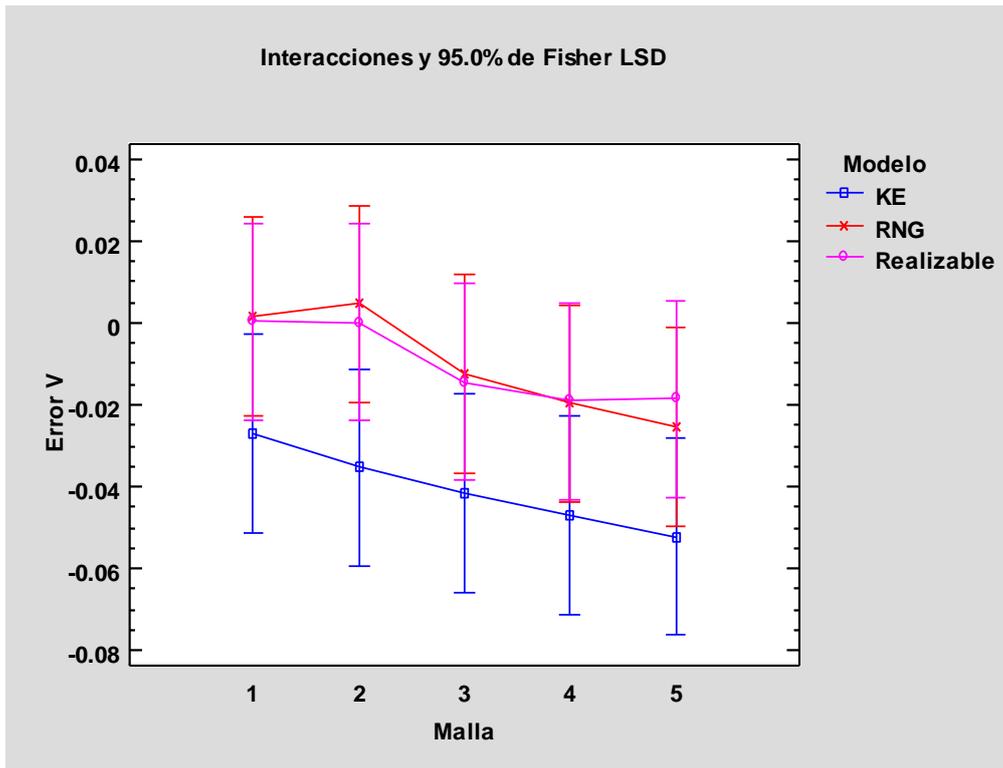


Figura 3.23. Diagrama de bigotes del error entre experimental y calculado dependiendo del modelo de turbulencia y la malla

3.3.3. Modelo de regresión

A partir de los resultados mostrados en el apartado anterior, se decide realizar un modelo de regresión sobre el modelo k- ϵ Standard. Se realiza siendo la variable dependiente el error entre la velocidad experimental y la velocidad obtenida a partir de los casos modelados. Y en cuanto a las variables independientes, estas serán la malla, la posición y la altura normalizada y/y_{max} . Como ya se ha comentado en la parte teórica, en el caso de los modelos de regresión es posible incluir variables cuyo valor no ha sido prefijado, razón gracias a la cual se ha introducido la variable y/y_{max} . Este modelo de regresión se aplica mínimo en 2 ocasiones ya que se pretende observar como variables independientes la altura normalizada de los datos experimentales y la altura normalizada de los casos modelados.

En un primer momento se realizan estos 2 modelos, pero los resultados de R-cuadrada obtenidos son demasiado bajos, por lo que se decide añadir a los datos independientes la posición al cuadrado y la altura normalizada (tanto experimental en un caso, como la de los casos modelados en otro) al cuadrado también.

A partir de este modelo se obtienen unos gráficos, mostrados en las figuras 3.24 y 3.25, que tienden a representar modelos polinómicos cuadráticos.

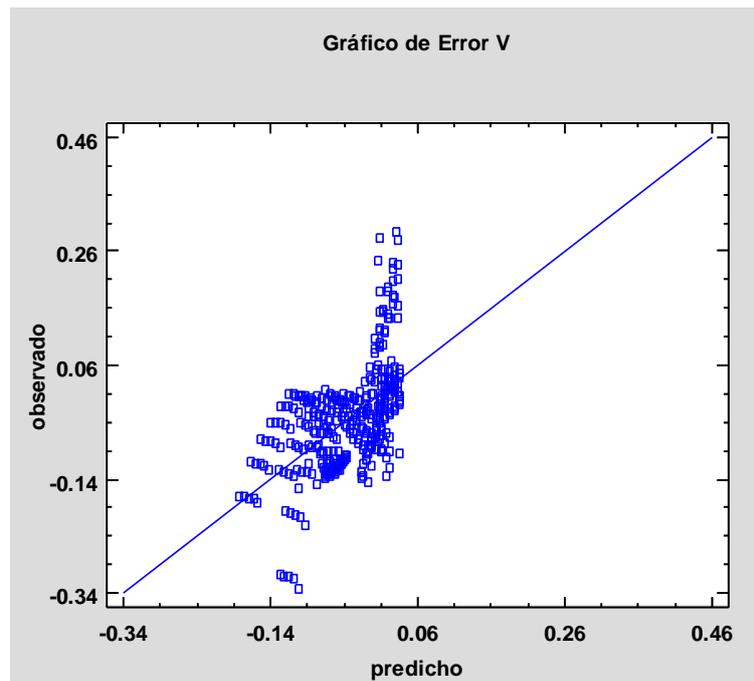


Figura 3.24. Gráfico del error de velocidades entre el observado y el predicho

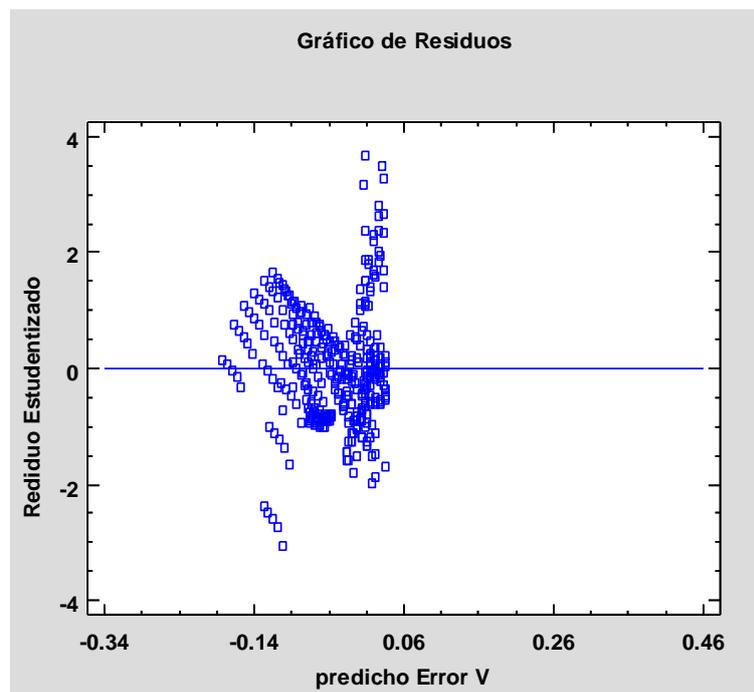


Figura 3.25. Gráfico de residuos entre e error de velocidades predicho y el residuo

Pero este no es el modelo de regresión final. Se continuó añadiendo datos independientes elevando la relación de alturas al cubo, a la cuarta y así hasta llegar a elevar dicho factor a 8. Obteniéndose los 2 modelos de regresión múltiple mostrados a continuación, uno para las alturas normalizadas experimentales (el primero de los dos mostrados) y otro usando las alturas normalizadas halladas con los modelos de cálculo.

El haber obtenido, en ambos casos, que los factores de altura normalizada se hayan ido elevando hasta llegar a 8 parece seguir una tendencia a una serie de Taylor. Este hecho se da en algunos casos a la hora de discretizar ecuaciones usando métodos CFD que estudian cómo se comporta un flujo en una serie de puntos.^[26] Que se haya obtenido este resultado en los análisis de regresión mostrados en los siguientes puntos confirma que este caso estudiado puede aproximar su función mediante un desarrollo en series de Taylor.

3.3.3.1. Modelo de regresión usando los datos experimentales

Dicho modelo de regresión lineal múltiple describe la relación entre el error de las velocidades experimentales y de los modelos con 11 variables independientes. Los datos obtenidos tras hacer uso de la herramienta Statgraphics son los mostrados en las tablas 3.13 y 3.14.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	Valor-P
Constante	0,0589581	0,0294547	200,166	0,0461
Malla	-0,00640651	0,00202215	-316,816	0,0017
Posición	0,196637	0,0303544	647,804	0
Posición ²	-0,200833	0,0315789	-635,971	0
$y/y_{\max} \text{ mod}$	-107,139	0,205682	-520,897	0
$(y/y_{\max} \text{ mod})^2$	372,046	0,522098	712,598	0
$(y/y_{\max} \text{ mod})^3$	-488,966	0,605745	-807,215	0
$(y/y_{\max} \text{ mod})^4$	309,708	0,371954	832,651	0
$(y/y_{\max} \text{ mod})^5$	-105,72	0,128844	-820,525	0
$(y/y_{\max} \text{ mod})^6$	0,199704	0,025271	790,249	0
$(y/y_{\max} \text{ mod})^7$	-0,0196793	0,00261589	-752,299	0
$(y/y_{\max} \text{ mod})^8$	0,00078994	0,00011096	711,915	0

Tabla 3.13. Análisis de Regresión Múltiple del modelo Standard para la altura normalizada experimental siendo la variable dependiente el Error V

Como se puede apreciar en la tabla 3.13, el factor malla vuelve a salir como que tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el Error V. Además, conforme aumentamos en la resolución de malla pasando de una malla gruesa a su inmediata más fina (dentro de las calculadas en este trabajo), se aprecia una reducción del error de $(n-1) * 0,00640651$, siendo el error máximo que se puede reducir entre la malla 1 y la 5 de un 0,02562 (un 2,56%).

En este caso de estudio sale un $R^2=65,9564\%$. Es decir, que el modelo explica en un 65,96% la variabilidad del error de velocidad. Con disposición de más datos o variables potencialmente predictoras, hubiera podido llegar a aumentar el valor de R^2 .

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	204,282	11	0,185711	62,29	0,0000
Residuo	105,239	353	0,00298127		
Total (Corr.)	309,521	364			

Tabla 3.14. Análisis de Varianza del modelo Standard para la altura normalizada experimental

Nuevamente, en el análisis de varianza se obtiene que el modelo tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el Error V, al igual que en el caso de análisis de la varianza calculado en el punto 3.3.2 de este apartado.

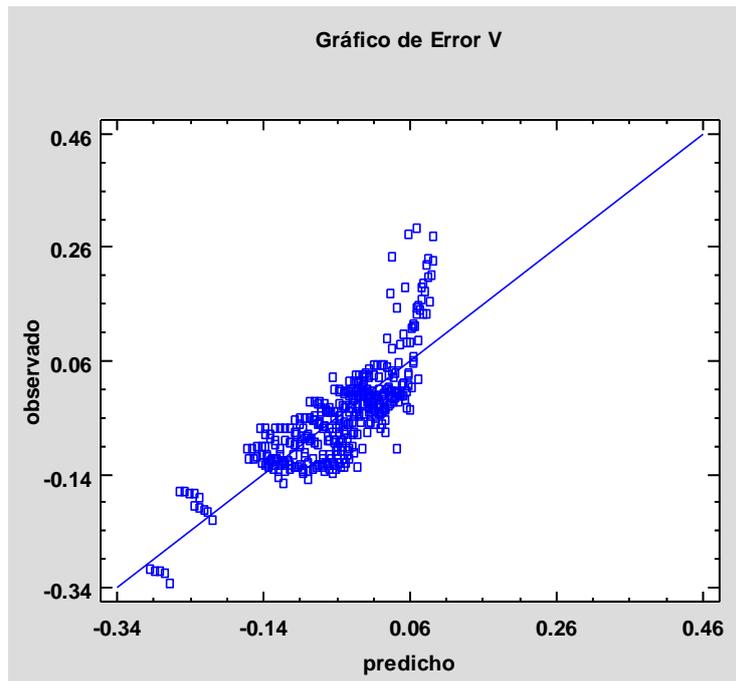


Figura 3.26. Gráfico del error de velocidades entre el observado y el predicho para el caso de variable independiente la altura normalizada experimental

En lo referente al gráfico de error mostrado en la figura 3.26 se observa que se asemeja a la representación de un polinomio de grado 8 (grado hasta el que se ha llegado en la variable independiente de la altura normalizada experimental). El hecho de que siga apareciendo una evolución aproximadamente cuadrática en el gráfico indica que todavía hay efectos no lineales de variables no incluidas en el modelo que afectan al error.

Y en cuanto al gráfico de residuos de la figura 3.27, como ocurre con el gráfico del error de velocidades, también se aprecia como una de las variables independientes es de octavo grado.

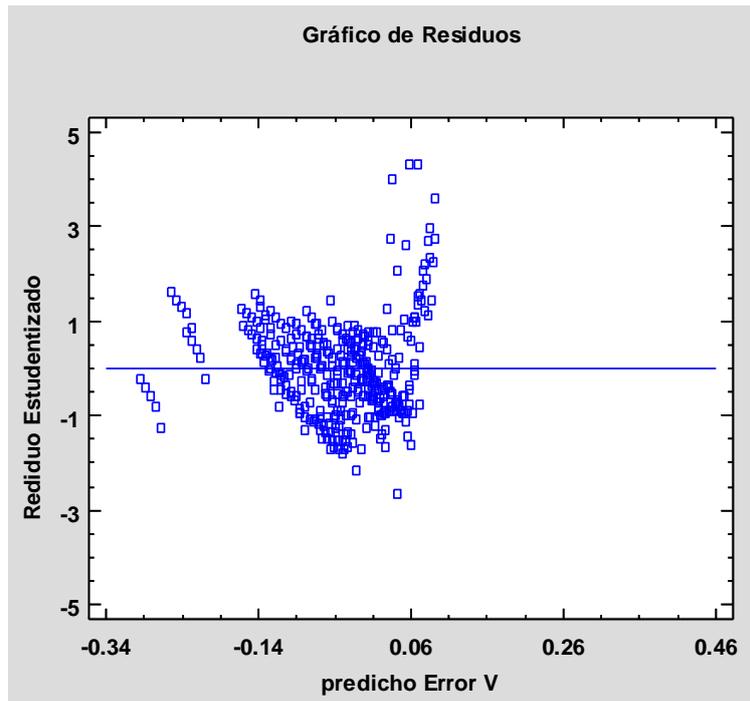


Figura 3.27. Gráfico de residuos para el caso de variable independiente la altura normalizada experimental

Ante los resultados mostrados en este modelo de regresión lineal se puede concluir que la malla que mejor representa el resultado experimental estadísticamente es la malla más fina del modelo de turbulencia Standard.

3.3.3.2 Modelo de regresión usando los datos de los casos de estudio

En el siguiente apartado se realiza otro modelo de regresión, en este caso para la altura normalizada que se ha obtenido de los casos modelados. Dicho modelo de regresión lineal múltiple describe la relación entre el error de las velocidades experimentales y de los modelos con 11 variables independientes, al igual que en el caso 3.3.3.1 pero sustituyendo las variables dependientes de altura normalizada experimental por las modeladas. Los datos obtenidos tras hacer uso de la herramienta Statgraphics son los mostrados en las tablas 3.15 y 3.16.

Al igual que ocurría en el análisis de regresión del apartado anterior, el factor malla tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el Error V. El valor que define la reducción de error conforme aumenta la malla es el mismo que en el del caso anterior. Sin embargo, el valor del R^2 para este caso no es exactamente el mismo. En concreto varía unas centésimas obteniendo un R^2 igual al 65,9994%. Con lo cual se extraen las mismas conclusiones que en el apartado anterior afirmando que el valor de R^2 explica en un 65,96% la variabilidad del error de velocidad. Y el error máximo ante la elección de malla, según lo obtenido en este análisis es de un 2,56% entre la malla más gruesa y la malla más fina (al igual que en el valor calculado para el otro modelo de regresión).

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	Valor-P
Constante	0,0603445	0,02767540	218,044	0,0299
Malla	-0,0064065	0,00202088	-317,016	0,0017
Posición	0,1958210	0,03034800	64,525	0
Posicion ²	-0,2000870	0,03156860	-633,817	0
y/y _{max} mod	-108,176	0,20732300	-521,774	0
(y/y _{max} mod) ²	374,841	0,52489200	71,413	0
(y/y _{max} mod) ³	-492,169	0,60864300	-808,632	0
(y/y _{max} mod) ⁴	311,605	0,37381600	833,579	0
(y/y _{max} mod) ⁵	-106,352	0,12955900	-820,876	0
(y/y _{max} mod) ⁶	0,2008990	0,02542840	790,056	0
(y/y _{max} mod) ⁷	-0,0197991	0,00263416	-751,631	0
(y/y _{max} mod) ⁸	0,0007949	0,00011182	710,848	0

Tabla 3.15. Análisis de Regresión Múltiple del modelo Standard para la altura normalizada de los casos de estudio siendo la variable dependiente el Error V

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	204,282	11	0,185711	62,29	0,0000
Residuo	105,239	353	0,00298127		
Total (Corr.)	309,521	364			

Tabla 3.16. Análisis de Varianza del modelo Standard para la altura normalizada de los casos simulados

Tal y como muestra el análisis de varianza para el caso de la altura normalizada de los casos simulados, se observa como nuevamente es el factor modelo quien tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el Error V. Por lo tanto, se puede determinar que tanto para el caso experimental como para los casos modelados se están obteniendo los mismos resultados y la elección de puntos de los casos modelados frente a los experimentales no está influyendo a la hora de seleccionar el mejor modelo, tal y como se deseaba que fuera desde un principio.

En cuanto a los gráficos de error de velocidad entre el predicho y el observado (figura 3.28) y el gráfico de residuos mostrado en la figura 3.29, se puede observar que son muy parecidos a sus homónimos del punto anterior. En ambos gráficos se nota que hay una componente polinómica de octavo grado que hace que las formas de ambos gráficos sean así.

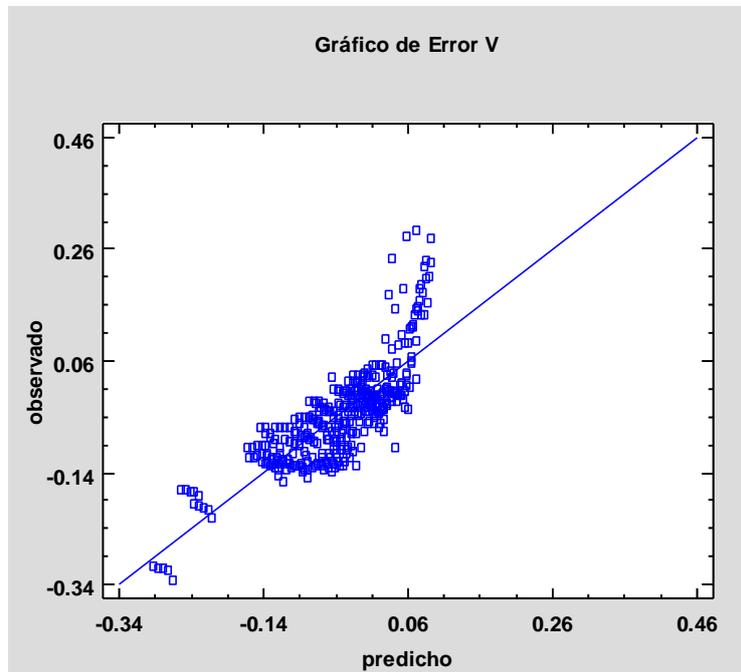


Figura 3.28. Gráfico del error de velocidades entre el observado y el predicho para el caso de variable independiente la altura normalizada de los casos simulados

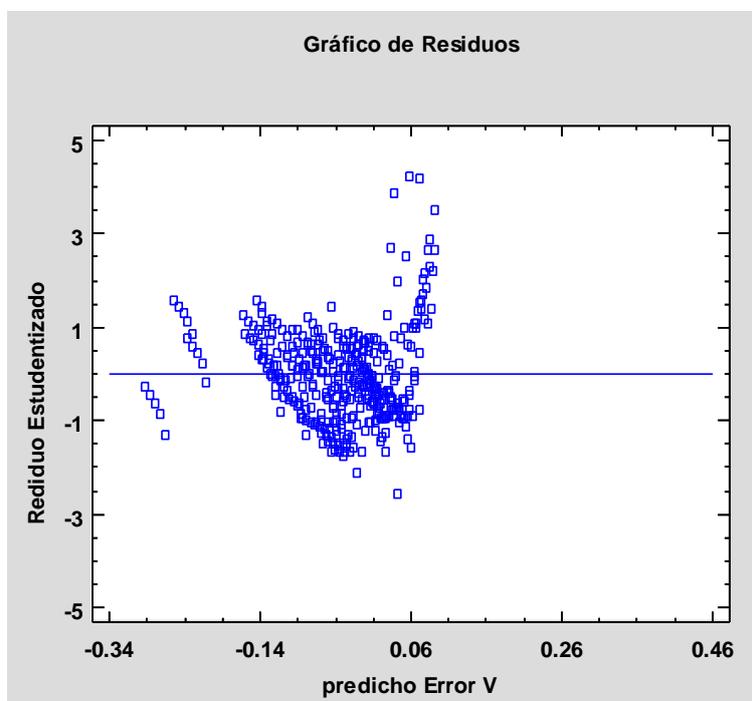


Figura 3.29. Gráfico de residuos para el caso de variable independiente la altura normalizada de los casos simulados

Nuevamente, y como se comentó al final del apartado anterior, la malla a elegir a partir de este estudio de regresión lineal es la malla 5, la más fina, del modelo de turbulencia Standard.

En el apartado de análisis de resultados se realiza un análisis que determina, según el análisis de convergencia de malla, la malla convergida se aproxima más al resultado experimental.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se aborda una parte muy importante, la elección final de la malla. Tras decidir y justificar cuál es la malla y el modelo de turbulencia escogidos, se realiza un análisis de los campos de velocidades, presiones y energía cinética turbulenta que se obtienen de la simulación de dicha malla.

4.2. ELECCIÓN DEL MODELO FINAL

En este punto se pretende abordar la selección de la mejor malla para representar al caso de estudio. Tras los análisis de convergencia de malla y el análisis estadístico hay 2 mallas con las que se está en duda: la malla más fina y la malla más gruesa del caso k- ϵ Standard.

La malla 2 de los casos Realizable y RNG se han descartado tras el análisis de la varianza donde se observaba que estos modelos presentaban una mayor imprecisión que el elegido.

En primer lugar, se van a representar gráficamente ambas mallas en comparación con el experimental en las 3 posiciones de estudio a lo largo de este trabajo final de grado: a 0; 0,05 y 0,09 metros. Estas representaciones gráficas son las que se muestran en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3.

Como ocurría con las gráficas representadas en la figura 3.21, en las gráficas de las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 están representados datos adimensionales. Las alturas se encuentran divididas entre la altura y_{max} , la cual representa el valor de la altura de la colina, siendo de 28 m(variable que representa la altura de la colina). Lo mismo sucede con las velocidades, las cuales se dividen entre el valor de velocidad media a la entrada (que es de 2,147 m/s).

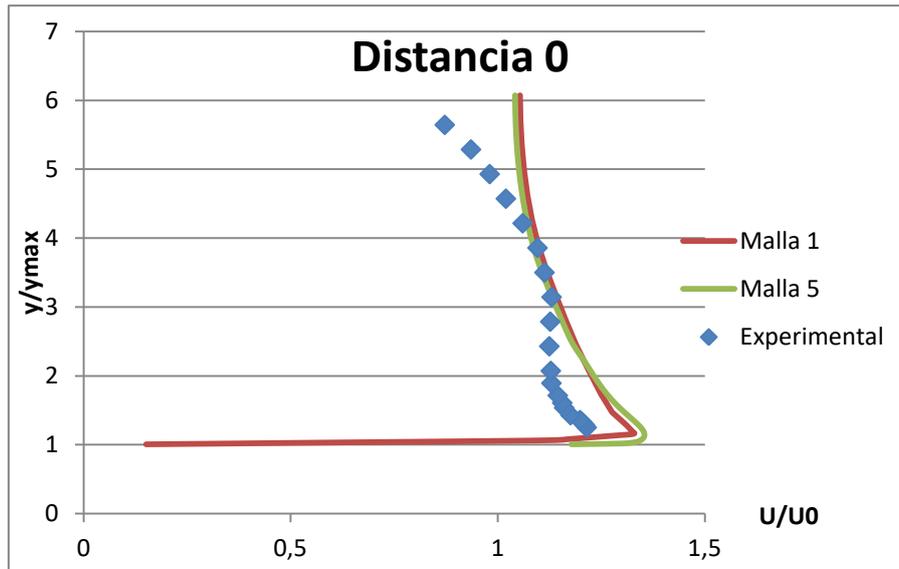


Figura 4.1. Comparación de velocidades de las mallas 1 y 5 con los datos experimentales a distancia 0 m

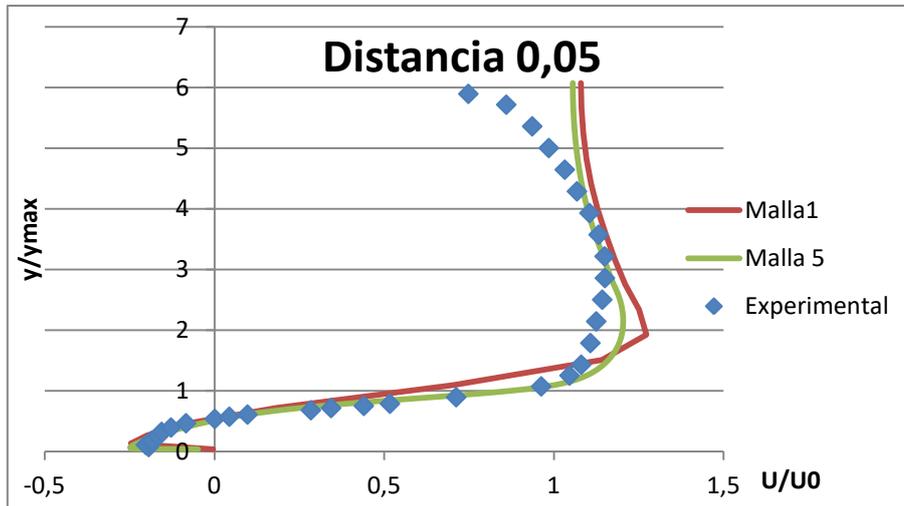


Figura 4.2. Comparación de velocidades de las mallas 1 y 5 con los datos experimentales a distancia 0,05 m

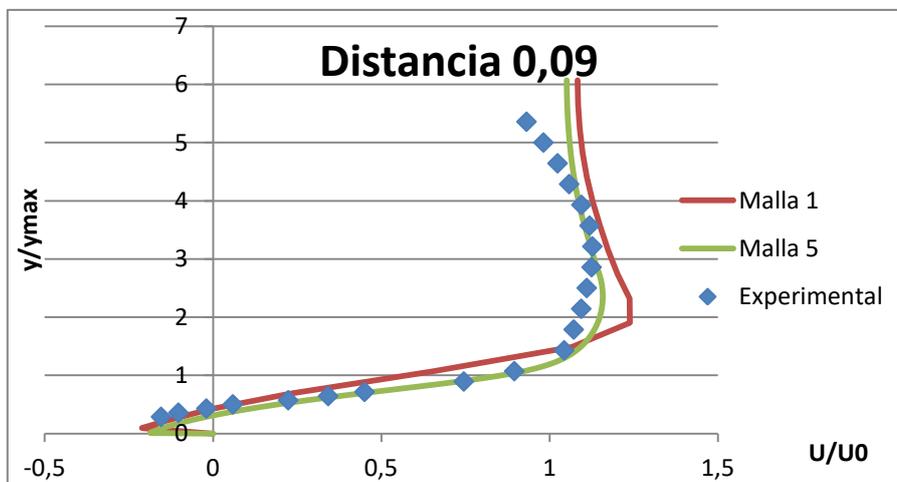


Figura 4.3. Comparación de velocidades de las mallas 1 y 5 con los datos experimentales a distancia 0,09m

Como se observa en las 3 figuras, la malla 5 representa con más precisión los datos experimentales que la malla 1. Este hecho ya era conocido tras el estudio de análisis de varianza, en donde en la figura 3.22 se observa como el error ante el experimental era inferior en la malla 5 que en la 1. En concreto, de un 2,56% tal y como se calculó en el apartado 3.3.3.1.

Ante estos hechos, queda de manifiesto que la malla 5 representa mejor los datos experimentales. Sin embargo, el análisis de convergencia de malla no ha aportado un valor de orden aparente de malla lo suficientemente parecido al del orden formal del modelo, por lo que quedaría descartada.

Como se recoge en la tabla 3.8, el valor de orden aparente de malla para el conjunto de mallas 123 ha sido de 1,26, mientras que el conjunto de mallas 345 ha dado 0,87. En la tabla 4.1 se muestra el extracto del que se hacía mención sobre la tabla 3.8.

	p_{123}	p_{234}	p_{345}
Standard	1,26	0,37	0,87

Tabla 4.1. Extracto de la tabla 3.8 sobre el modelo Standard

Es por ello que se ha decidido hacer un nuevo estudio de convergencia de malla, esta vez aumentando el segmento de valores. De este modo se puede determinar si aumentando el número de puntos a estudiar nos ofrece unos resultados distintos en los que el modelo con mejor orden aparente de malla sea el del caso 345, o que por lo menos sea más cercano a 2 (que es el orden formal del modelo) de lo que lo es hasta ahora. En la figura 4.4 se muestra un segmento rojo, mayor que el segmento blanco mostrado en la figura 3.18), en el cual se muestra el rango de datos que se ha tomado para efectuar dicho análisis.



Figura 4.4. Representación de los puntos ampliados el segundo análisis de convergencia de malla

El método a utilizar es el mismo explicado en el apartado 3.2.3, por este motivo no se vuelve a repetir en esta parte. Tras realizar dicho proceso de cálculo se obtienen los siguientes valores medios de orden aparente de malla e incertidumbre mostrados en las tablas 4.2 y 4.3 respectivamente.

	P_{123}	P_{345}
Standard	1,709	1,876

Tabla 4.2. Valores medios del orden aparente de malla para los casos de combinación de malla más gruesa y más fina

	GCI_{23}	GCI_{45}
Standard	0,86%	0,70%

Tabla 4.3. Valores medios de la incertidumbre obtenidos para los casos de combinación de malla más gruesa y más fina

Como se puede observar en dichas tablas, el análisis de convergencia de malla estudiado con la ampliación de puntos da una mejor incertidumbre para el caso de malla más fina y un orden aparente de malla muy cercano al orden formal para la combinación de mallas más finas.

El hecho de que haya cambiado considerablemente un análisis con respecto a otro es debido a que ahora se han escogido muchos más puntos y queda un estudio más fiable.

Tras los resultados de este nuevo análisis de convergencia de malla, tanto dicho análisis como el análisis estadístico hacen ver que la mejor malla es la más fina. Es una malla con una muy baja incertidumbre (por debajo del 1%) y es la que mejor representa los datos experimentales.

Sin embargo, dicha malla tiene un tiempo de simulación de 13909 segundos, frente a los 58 segundos que tarda la malla más gruesa. En el caso que se quisiera obtener una malla con un tiempo de simulación mucho menor (la malla 1 no llega al minuto de simulación mientras que la malla 5 tarda en torno a 3,86 horas) pero penalizando el error con el experimental (aumentando en un 2,56% según se ha calculado en el apartado 3.3.3.1) es una opción válida y viable.

Ya que el objeto de este trabajo final de grado es la obtención de la malla que mejor represente el caso de estudio y que las 3,86 horas de tiempo de simulación es un tiempo aceptable comparándolo con otras simulaciones, la malla elegida para representar la colina estudiada es la malla 5 del modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ Standard.

4.3. ANÁLISIS DE CAMPOS

4.3.1. Introducción

En el siguiente apartado se aborda el análisis de los distintos campos de velocidades, presiones y energía cinética. En concreto, se realiza un análisis detallado de la malla elegida en apartado 4.3.2 y se efectúa una comparación de la malla 1 con la malla 5 del modelo $k-\varepsilon$ Standard.

4.3.2. Representación gráfica de velocidad, presión y energía cinética turbulenta para la malla seleccionada

A continuación se representan 3 figuras que representan 3 magnitudes muy importantes a la hora de instalar un parque eólico: la velocidad, la presión y la energía cinética turbulenta (figuras 4.5, 4.6 y 4.7 respectivamente). Dichas figuras se comentarán realizando un pequeño análisis de las causas y consecuencias que producen los efectos mostrados.

En primer lugar, la primera figura de las 3 que se van a analizar representa el campo de velocidades a lo largo del dominio modelado. Como se puede apreciar, la velocidad es cero cuando el fluido está en contacto con las superficies sólidas de la colina o del suelo.

Sin embargo, a medida que se aumenta en altura esta velocidad aumenta. Este hecho se da antes de que el flujo llegue a la cumbre de la colina. Aguas abajo de la misma se puede observar en color azul la recirculación debida a la turbulencia que se produce en las cercanías de la colina. Conforme el flujo se desplaza hacia la derecha se tiende a estabilizar a los valores de inicio.

Justo antes de la cumbre de la colina se observa el despegue del flujo y como aumenta su velocidad debido a un efecto de vena contracta. Es por este motivo por lo que se busca instalar los aerogeneradores lo más altos y cercanos a esta zona de despegue para poder aprovechar al máximo el recurso eólico (esto es así siempre y cuando las condiciones del terreno lo permitan).

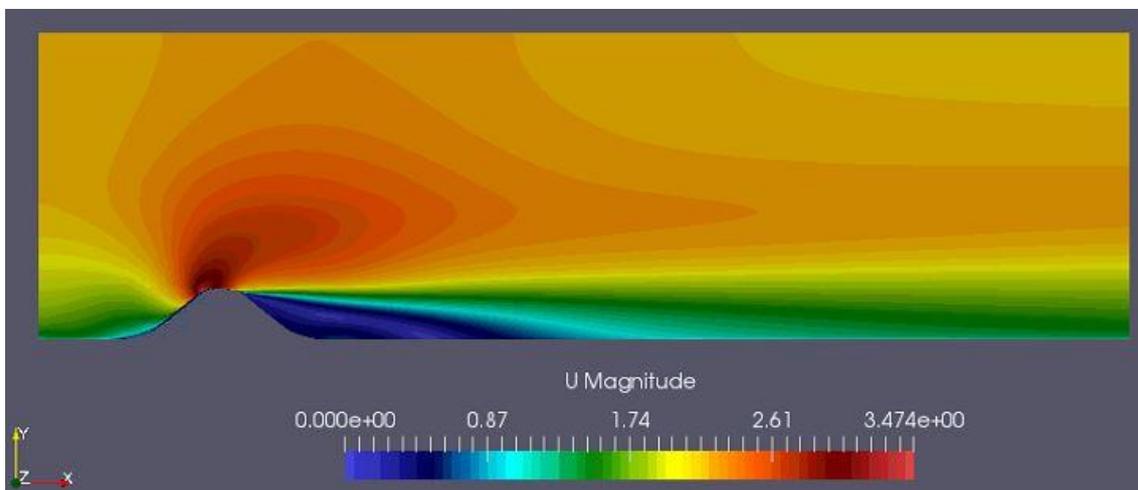


Figura 4.5. Representación del campo de velocidades del viento en el dominio modelado

En segundo lugar, en cuanto a la figura 4.6, en ella se representa la evolución de la presión a lo largo del dominio modelado. Se observa un aumento de la presión cuando el flujo choca contra la colina. Se produce debido a un estancamiento y un consecuente aumento de presiones.

Al llegar a la cumbre de la colina, justo en el mismo punto que se producía la velocidad máxima en lo comentado anteriormente para el caso de la figura 4.5, se produce el mínimo valor de presiones. Esto se debe, como ya se ha comentado, a que se produce un efecto de vena contracta en el que, al aumentar la velocidad, disminuye la presión.

Una vez pasada la cumbre de la colina, se observa un gradiente adverso de presiones. Hay menos presión y por este motivo se produce la zona de recirculación del flujo.

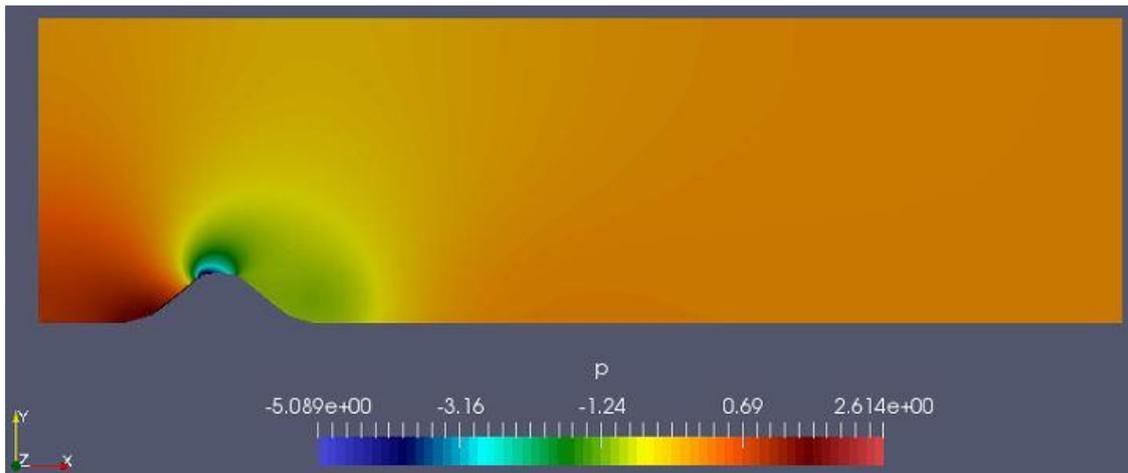


Figura 4.6. Representación del campo de presiones del viento en el dominio modelado

Por último, en lo referente a la energía cinética turbulenta, esta es una de las 2 variables que introduce el modelo RAS utilizado en la resolución del caso propuesto en este trabajo final de grado. Esta representación sirve de comprobación en cuanto al modelo de turbulencia.

Como se observa en la figura 4.7, la zona en la que se produce mayor turbulencia coincide con la zona de recirculación que se puede observar en la figura 4.5. Esta zona es la interfaz entre el flujo circulante y el no circulante, lo que hace que el gradiente sea muy grande.

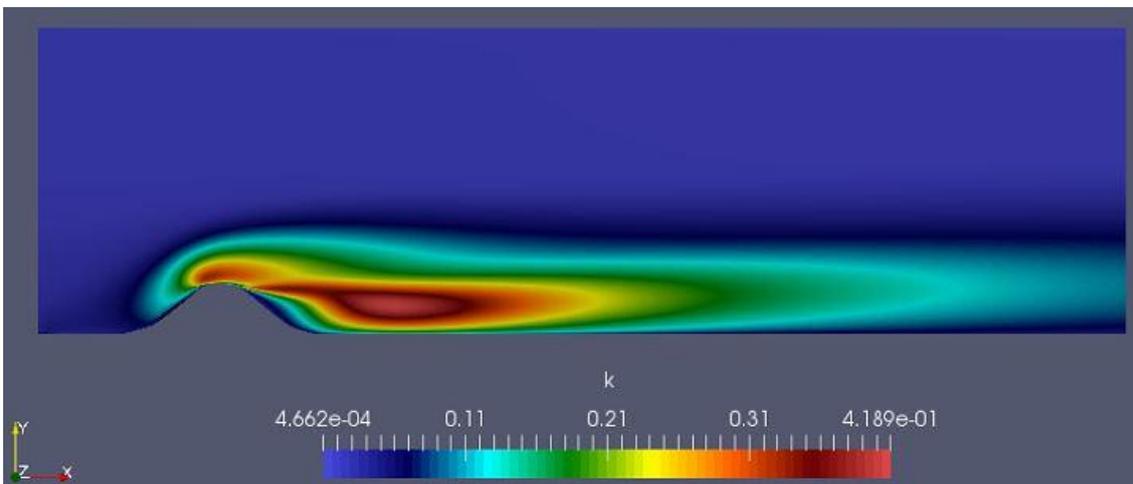


Figura 4.7. Representación del campo de energía cinética turbulenta del dominio modelado

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS

FUTUROS

En este trabajo final de grado se propone el desarrollo de una metodología de análisis, mediante técnicas CFD, para el microemplazamiento de un parque eólico. Para ello se ha escogido un problema clásico en la mecánica de fluidos en el que se estudia el recurso eólico sobre una colina. Dicho caso ha sido elegido dado que se dispone de datos experimentales para llevar a cabo una rigurosa validación del modelo.

En primer lugar, se ha realizado los estudios utilizando 3 modelos diferentes de turbulencia ($k-\varepsilon$ Standard, Realizable y RNG) con 5 tamaños de malla. Tras esto, se ha caracterizado la incertidumbre de dichas mallas a partir de un exhaustivo análisis de convergencia de malla recomendado por la ASME.

Una vez realizado el análisis de convergencia de malla, se realiza un ANOVA para obtener qué malla de las que han convergido en el análisis de convergencia de malla es la que mejor representa los resultados experimentales.

Tras los análisis y discusiones desarrollados a lo largo del documento, se obtiene 2 mallas que tienen sus ventajas y desventajas a la hora de resolver el caso planteado. Ambas pertenecen al mismo modelo de turbulencia, el modelo $k-\varepsilon$ Standard, siendo estas la malla más fina y la malla más gruesa.

De elegirse la malla más gruesa para resolver el caso de estudio, esta cuenta con un error entre los resultados modelados y experimentales del 2,56% superior con respecto a la malla más fina (según el análisis de regresión estudiado). Sin embargo, de la principal ventaja de elegir esta malla es su tiempo de cálculo. El tiempo de simulación para esta malla no llega al minuto (58 segundos), frente a las 3,8 horas de que tarda en simular la malla más fina. Por lo tanto, es un alternativa interesante en el caso de que se desee penalizar el error mejorando el tiempo de cálculo. Se podría aplicar como un primer estudio en el que no se busca precisión si no conocer más o menos cómo se comporta el caso que se quiere estudiar.

La malla que se ha elegido es la más fina ya que es la que mejor representa el resultado experimental y el tiempo de simulación de esta malla está por debajo de las 4 horas. Un tiempo aceptable y razonable si se tiene en cuenta que dicho modelo es además el que menor error tiene frente al resultado experimental de todos los estudiados.

Como posible línea de trabajo futuro de este trabajo, se propone extender el análisis a casos reales, ya que se conoce el campo de velocidades del caso de estudio, por lo que se podrían obtener distintos perfiles de velocidades si se deseara construir un parque eólico. Además, caracterizado el perfil de velocidad en cada punto del terreno, se podría estimar la producción energética esperable en función de la altura a la que se instalara uno o varios generadores en

una ubicación determinada. Esta información se contrastaría con una función de costes de aerogeneradores que tenga en cuenta sus dimensiones a partir de un ensayo de mercado de distintos modelos de aerogeneradores. De esta manera se obtendría una metodología aplicable a un caso real gracias a los datos obtenidos aplicando la metodología de análisis de este trabajo final de grado.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]ERESRENOVABLE.COM. *Energía eólica – qué es, cómo funciona y las ventajas y desventajas de la energía eólica.* <<http://erenovable.com/aerogeneradores-eolicos/energia-eolica/>>
- [2]ERESRENOVABLE.COM. *Energía eólica – qué es, cómo funciona y las ventajas y desventajas de la energía eólica.* <<http://static2.erenovable.com/wp-content/uploads/2016/03/energia-eolica-molino-egipto-600x475.jpg>>
- [3]WIND MACHINES.
<https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiowoyLhvXTAhVHLhoKHU-uAt4QFggmMAA&url=http%3A%2F%2Fwindturbineins.com%2F_literature_64402%2FWind_Machines&usg=AFQjCNELpBoSgJ1bOklyK9KTXFENX4fMbQ>
- [4]WIKIPEDIA. *Hero of Alexandria.*
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Heron%27s_Windwheel.png>
- [5]WIKIPEDIA. *Energía eólica.* <https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica>
- [6]ECOINVENTOS. *Primera turbina eólica de la historia.* <<http://ecoinventos.com/primera-turbina-eolica-de-la-historia/>>
- [7]ECOINVENTOS. *Primera turbina eólica de la historia.*
<<https://i0.wp.com/ecoinventos.com/wp-content/uploads/2011/12/primera-turbina-eolica-de-la-historia.jpg?fit=640%2C662>>
- [8]WIKIPEDIA. *Albert Betz.* <https://es.wikipedia.org/wiki/Albert_Betz>
- [9]ENERGIA EÓLICA. *Historia de la energía.* <<http://eeolicacsj.blogspot.com.es/p/historia.html>>
- [10]LA ENERGIA DEL FUTURO. *Historia de la energía eólica.*
<<http://laenergiadelfuturohoy.blogspot.com.es/2013/01/historia-de-la-energia-eolica.html>>
- [11]ENERGETICA FUTURA. *¿Cuánta energía se puede sacar del viento? Límite de Betz.*
<<https://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-sacar-del-viento-limite-de-betz/>>
- [12]DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. *La ley de Betz.* <<http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/betz.htm>>
- [13]Apuntes tecnología energética. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y NUCLEAR(2016-2017). Tema 4: Energía eólica. Diapositivas 25-28.
- [14]ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA. *La eólica en España.*
<<https://www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>>

- [35] CFD Online. *RANS-based turbulence models*. <https://www.CFD-online.com/Wiki/RANS-based_turbulence_models>
- [36] CFD Online. *Wall functions*. <https://www.CFD-online.com/Wiki/Wall_functions>
- [37] CFD Online. <https://www.CFD-online.com/W/images/6/6a/Img_lawOfTheWall_whiteBG.png>
- [38] Open FOAM. <<http://www.openfoam.com/>>
- [39] Romero Villafranca, R. & Zúñiga Ramajo, L.R. (2005). *Métodos estadísticos en ingeniería*. UPV: Universidad Politécnica de Valencia.
- [40] Montgomery, D. C. *Design and analysis of experiments*, 6th ed. Tempe: Wiley, 2005
- [41] The Turbulence Mechanics/CFD Group Web Server. <<http://CFD.mace.manchester.ac.uk/>>
- [42] Almeida et al. (1990) "2D Model Hill Wake Flows" en The Turbulence Mechanics/CFD Group Web Server. <http://CFD.mace.manchester.ac.uk/cgi-bin/CFDdb/prcase.cgi?18&EXP&&database/cases/case18&cas18_head.html&cas18_desc.html&cas18_meth.html&cas18_data.html&cas18_refs.html&cas18_rsol.html>
- [43] Imagen <<http://CFD.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/database/cases/case18/test18.gif>>
- [44] Apuntes de Mecánica de Fluidos Computacional Aplicada. *WorkShop 1: Introducción a OpenFOAM*. Luis Parras, Patricio Bohórquez. Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Málaga, Universidad de Málaga, España. Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Jaén, Universidad de Jaén, España. Junio 2010. <<http://blogs.ujaen.es/prmedina/wp-content/uploads/2014/04/workshop1.pdf>>
- [45] Ismail B. Celik, Urmila Ghia, Patrick J. Roache, Christopher J. Freitas, Hugh Coleman and Peter E. Raad (22 Julio 2008). "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications" en THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. <<http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1434171>>

ANEXOS

ANEXO 1: MÁQUINAS VIRTUALES

Durante la realización de este trabajo final de grado se ha podido disponer de una máquina virtual en la que se han instalado los programas de simulación para realizar los cálculos necesarios en cada caso. Este anexo explica de forma más detallada qué es una máquina virtual y cómo se crea.

VMware vSphere es un sistema de virtualización por software. Un sistema virtual por software es un programa que simula un sistema físico (un computador, un hardware) con unas características de hardware determinadas. Cuando se ejecuta el programa (simulador), proporciona un ambiente de ejecución similar a todos los efectos a un computador físico (excepto en el puro acceso físico al hardware simulado), con CPU (puede ser más de una), BIOS, tarjeta gráfica, memoria RAM, tarjeta de red, sistema de sonido, conexión USB, disco duro (pueden ser más de uno), etc.

Un virtualizador por software permite ejecutar varios computadores (sistemas operativos) dentro de un mismo hardware de manera simultánea, permitiendo así el mayor aprovechamiento de recursos. El rendimiento del sistema virtual varía dependiendo de las características del sistema físico en el que se ejecute, y de los recursos virtuales (CPU, RAM, etc.) asignados al sistema virtual.

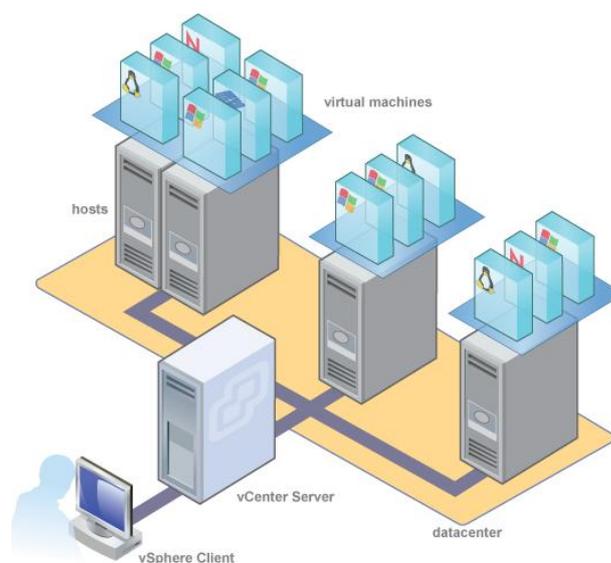


Figura anexa 1. Representación de un entorno vSphere

En cuanto a la creación de la máquina virtual, se usa VMware vSphere Client para conectarse al servidor ESX y crear la máquina virtual. Tras esto, se utiliza el asistente para crear una nueva máquina virtual. En él se introduce un nombre identificativo para la máquina virtual y se selecciona el datastore donde se alojan los ficheros de la máquina virtual.

Para este caso se selecciona el sistema operativo Linux ya que es el necesario en el uso del programa OpenFOAM. Se indicará el número de socket y de cores para esta máquina virtual, en función del uso que se desea. Este valor puede ajustarse posteriormente (una vez que la máquina virtual esté en funcionamiento).

Finalmente, se selecciona la cantidad de memoria RAM a asignar a la máquina virtual así como de los adaptadores de red y discos deseados. Una vez definida la máquina virtual, se crea y arranca, para posteriormente instalar el sistema operativo a utilizar.

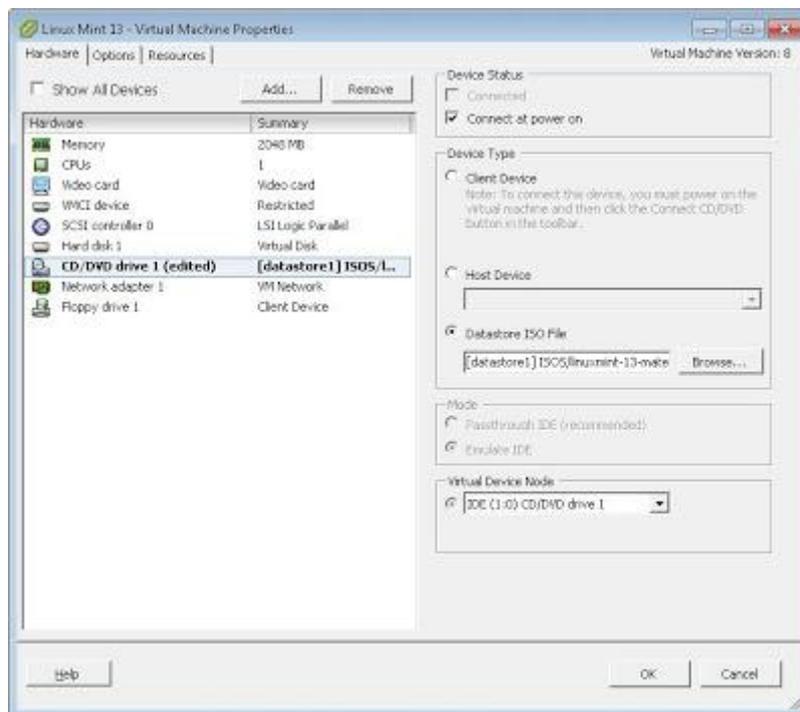


Figura anexa 2. Ejemplo de definición para una máquina virtual

PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

1. NECESIDAD DEL PRESUPUESTO

En esta parte se pretende cuantificar económicamente el coste de la horas trabajadas (tanto por el autor del trabajo, como por las máquinas utilizadas), así como de los materiales que se han utilizado.

2. CONTENIDO DEL PRESUPUESTO

2.1. Coste del personal

Para hallar el coste del personal se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$Coste(€) = Precio/h * horas de trabajo \quad P.1$$

Se ha determinado el coste a la hora de un ingeniero industrial recién titulado como de 10,21€/hora. En la tabla P.1 se muestra el desglose del coste personal en función de la tarea realizada

Descripción de tarea	Precio (€/h)	Horas	Coste parcial (€)
Búsqueda de información	10,21	40	408,40
Programación en OpenFOAM	10,21	115	1174,15
Análisis de resultados	10,21	70	714,70
Análisis estadístico	10,21	15	153,15
Redacción de documentos	10,21	60	612,60
TOTAL		300	3063,00

Tabla P.1.Costes del personal según tarea realizada

2.2. Coste de materiales

Para hallar el coste de materiales utilizados se utiliza la ecuación P.2, en la que se calculan los costes de los materiales utilizados en función de su periodo de amortización.

$$Coste(€) = Precio * \frac{horas de uso}{8760/año} * \frac{1}{periodo de amortización (años)} \quad P.2$$

Desarrollo de una metodología de análisis del microemplazamiento de parques eólicos mediante técnicas CFD

Se ha determinado un periodo de amortización de 5 años tanto para hardware como para software informático utilizados.

Material	Precio (€)	Horas de uso	Periodo de amortización	Coste
Ordenador de sobremesa Sony Vaio	1000	300	5	6,85
Microsoft Office	80	170	5	0,55
OpenFOAM	0	115	5	0,00
Vsphere	3000	115	5	39,38
Servidores Lenovo	6000	115	5	78,77
			TOTAL	125,55

2.3. Material fungible

Descripción	Coste (€)
Paquete de folios de 100 unidades	3,00
Impresión	11,00
Encuadernación	3,50
TOTAL	17,50

2.4. Costes finales

Descripción	Coste (€)
Coste del personal	3063,00
Coste de materiales	125,55
Material fungible	17,50
TOTAL	3206,05