

## Obtención de campos de velocidades en terrenos destinados a parques eólicos mediante la simulación realizada con CFD.

Leo Miguel González Gutiérrez, Depto. de Fluidos y Calor, Univ. Pontificia Comillas en Madrid-IIT;  
Emilio Ezquerro Goicoechea, Director de la Oficina Técnica de DYTA.;  
José R. Rodríguez, Departamento de Ingeniería, DYTA

**Resumen.** Se muestra un método computacional para calcular los campos de velocidades en distintas configuraciones topográficas de terreno. Se comparan los resultados obtenidos por este método con los obtenidos mediante minuciosas medidas experimentales.

### 1. Introducción.

La energía eólica ha sido uno de los sectores que ha visto incrementada su presencia de forma más espectacular en los últimos años, este hecho no solamente puede afirmarse en un contexto nacional sino también en un ámbito internacional. Hechos como los problemáticos momentos que esta viviendo el precio del barril de petróleo llevan a que los deseos y previsiones para los próximos veinte años sean las de conseguir que el 10% de la energía producida sea de origen eólico. Actualmente se logran producir 14000 MW de potencia de origen eólico, de los cuales 1500 MW son españoles.

Un aprovechamiento más eficiente de la energía eólica es uno de los problemas abiertos que actualmente se está planteado a nivel técnico y que supone un gran reto para la ingeniería del sector. Fruto de este impulso es la diversificación que ha tomado las formas de estudio de este tema. Una de estas formas es la Mecánica de Fluidos Computacional que ayudándose de los avances técnicos experimentados en la fabricación de nuevos ordenadores ha dado lugar a una nueva forma de estudio e investigación sobre el comportamiento de fluidos como el viento en distintas circunstancias como podía ser el hecho de que atravesara una cierta extensión topográfica. Un acuerdo llevado a cabo entre la empresa DYTA y la Universidad Pontificia Comillas de Madrid ha tratado de crear una herramienta para alcanzar ambiciosos avances en este sentido.

De este acuerdo ha surgido un proyecto que tiene como finalidad ser capaz de estimar los recursos que un cierto emplazamiento topográfico posee. Históricamente la forma de estudiar este tipo de problemas ha sido el método experimental, es decir hacer uso de grandes túneles aerodinámicos. Los métodos numéricos han conseguido llevar ese tipo de ensayos a un contexto virtual de modo que en una oficina técnica se pueden llevar a cabo mediciones de los perfiles de viento en ciertos emplazamientos. Este tipo de códigos también se ha utilizado con anterioridad para analizar el efecto del viento sobre los contaminantes que emitían ciertas fábricas que estuvieran situadas en zonas montañosas, donde las separaciones y recirculaciones del flujo debían tenerse en cuenta.

Los métodos numéricos son capaces de resolver las ecuaciones diferenciales del movimiento del fluido y además tener en cuenta el fenómeno de la turbulencia típico en este tipo de análisis. La turbulencia complica sustancialmente la resolución de estos problemas ya que obliga a añadir complicadas ecuaciones de transporte que hacen que el sistema final sea complejo y con un alto grado de acoplamiento. Existen formulaciones simplificadas de las ecuaciones del movimiento del fluido, pero los resultados que se obtienen a partir de ellos no son suficientemente precisos cuando la complejidad del terreno es importante. Nuestro país debido a su rica orografía hace que los modelos simplificados no sean idóneos y que se requiera del modelo completo para dar respuestas adecuadas a este problema.

La precisión y el tiempo de cálculo también son dos variables importantes que se deben tener en cuenta cuando se utilizan herramientas numéricas para abordar este tipo de problemas. En este sentido, debido a los finos mallados que se requieren para discretizar las ecuaciones, se necesitan ordenadores con gran cantidad de memoria RAM (siempre por encima de 500 Mb) y rápidos procesadores, incluso a veces utilizando procesadores en paralelo. En cuanto al tiempo de cálculo se tiene que tener como referencia que cada resolución nos puede llevar del orden de 20 horas en un caso bidimensional y no menos de 50 en un caso tridimensional. Estas cifras son mejorables si se hace uso de cualquiera de estas dos técnicas:

- a) **Paralelización:** se hace uso de varios procesadores que realizan los cálculos de forma paralela de modo que el tiempo de cálculo de mejora considerablemente.
- b) **Nesting:** es una técnica que se basa en ir recortando el dominio computacional a medida que se va observando que hay zonas del dominio cuyo valor en el tiempo no cambia, estos puntos pasarían a ser de contorno y lo que queda entre ellos y los contornos dejaría de ser parte del dominio computacional. De esta forma el número de nodos con los que se trabaja va decreciendo y la velocidad en los cálculos aumenta.

La distribución del artículo es la siguiente: en el apartado 2 se hará el planteamiento concreto del problema sobre el que se quiere trabajar, es decir se considerarán y explicarán todas las particularidades que se han considerado al abordar el problema eólico en terreno complejo. En el apartado 3 se hablará del mallado utilizado en este tipo de problemas por ser uno de los aspectos más determinantes en la consecución de resultados. En el último apartado de este artículo se podrán ver los resultados más interesantes que proporcionan los códigos computacionales, detallando ciertas características de cómo se han obtenido los mismos.

## 2. Descripción del problema.

La promotora de parques eólicos DYTA ha sido capaz de proporcionar la topografía digitalizada de diversos emplazamientos donde ya había aerogeneradores o bien donde se estaba planteando la posibilidad de instalación de alguno de estos. También se han hecho estudios de emplazamientos muy estudiados desde un punto de vista experimental como puede ser la colina de Askervein (Escocia) [7], donde debido al aislamiento de dicha colina respecto al resto de las elevaciones del terreno la hace muy propicia para llevar a cabo estudios de tipo eólico y donde por tanto se pueden contrastar bien las medidas experimentales con los cálculos computacionales. Además en esta colina hay buenas condiciones de viento, esto es sopla siempre en la misma dirección y con gran uniformidad. Por otro lado la forma de la colina se asemeja a medio elipsoides aislado donde las formas geométricas son de gran suavidad. Las extensiones tridimensionales de terreno que se han logrado simular parten de una superficie alrededor de los 15 km<sup>2</sup>. La atmósfera se ha considerado termodinámicamente estable, sin grandes gradientes de temperatura o densidad, y además no se ha considerado un efecto Coriolis.

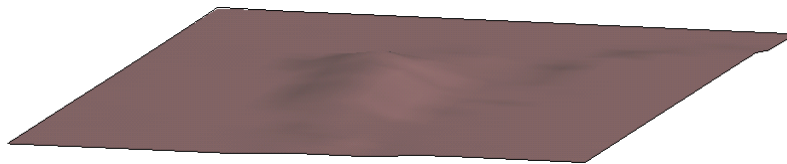


Fig. 1. Perspectiva de la colina de Askervein (Escocia)



Fig. 2. Alzado de la colina de Askervein.

Una vez se dispone de la topografía, se construye un volumen de control que nos va a valer como región de estudio o dominio computacional. Dicho volumen tiene como base la superficie de terreno digitalizada y se levanta hasta una altura que oscila entre 8 y 10 veces la longitud característica considerada en dicho problema. Esta región será mallada

posteriormente mediante una malla no estructurada en nuestro caso, con elementos tetraédricos de tipo Taylor-Hood. La calidad del mallado es uno de los detalles que más va a influir en la bondad de los resultados de modo que esta etapa hay que realizarla con sumo cuidado procurando que el tamaño de los elementos no crezca en exceso. El número máximo de nodos a los que se puede llegar en el mallado depende directamente de la cantidad de memoria RAM que nuestra máquina disponga.

Con los archivos que produce el mallador ya es posible comenzar la integración de las ecuaciones de un fluido que en nuestro caso se han considerado de densidad constante, es decir incompresible. Nuestra integración se hará tanto en el dominio del espacio, donde se pueden considerar casos bidimensionales o tridimensionales, como en el del tiempo, de modo que se considerará un régimen no estacionario:

### Conservación de la masa

$$\partial_i v_i = 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

### Conservación de la cantidad de movimiento.

$$\partial_t v_i + v_j \partial_j v_i = -\partial_i p + \left( \frac{1}{\text{Re}} \right) \partial_j^2 v_i - \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:  $v_i$  es la velocidad del viento.  
 $p$  es la presión del viento.  
 $Re$  es el número de Reynolds.  
 $R_{ij}$  es el tensor de esfuerzos debidos a la turbulencia.

### 2.1 Condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno utilizadas en este tipo de problemas son las siguientes:

- a) Entrada: se coloca un perfil exponencial(3) o logarítmico, y se mantiene fijo a lo largo de la simulación o bien se permite la posibilidad de retroalimentación con una vertical cualquiera del mallado.

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix}^\alpha \quad \text{Ecuación 3}$$

donde el parámetro  $\alpha$  es variable en función e las características del viento en la zona.

- b) Salida: se ha tenido en cuenta que la tensión normal sufrida por el fluido en dicha superficie es nula, a este tipo de condición se le conoce con el nombre de condición de contorno natural (NBC).  
 c) Superficie de terreno: se ha considerado una condición de contorno de deslizamiento.  
 d) Superficie superior: se ha colocado una condición de contorno tipo Dirichlet imponiendo el valor de la velocidad.  
 e) Superficies laterales: las superficies laterales han adoptado una condición de contorno tipo Dirichlet donde el valor de la velocidad venía impuesto por una ecuación tipo (3).

### 2.2. Modelo de turbulencia.

Una de las dificultades más importantes que hay en este problema es que se desarrolla enteramente en régimen turbulento, o dicho de otra manera el parámetro que aparece en las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento bajo el nombre de número de Reynolds es muy grande, de modo que las ecuaciones son altamente no-lineales y la región laminar a penas perceptible, siendo la región turbulenta la que ocupa la totalidad del dominio. El modelo de turbulencia que se ha utilizado en todas las simulaciones ha sido el  $k-\varepsilon$ , lo que añade dos complejas ecuaciones diferenciales adicionales a las anteriormente escritas, una de transporte de la energía cinética turbulenta  $k$  y la otra de transporte de la disipación turbulenta  $\varepsilon$ . Estas ecuaciones junto con las anteriores dan lugar a un sistema de 6 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales con seis incógnitas que son el campo de velocidades, el campo de presiones, la energía cinética turbulenta y la disipación turbulenta. Una vez se conocen  $k$  y  $\varepsilon$  se puede calcular la viscosidad turbulenta mediante la ecuación:

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 4}$$

### 3. El mallado.

Para el desarrollo de la malla se cuenta con el programa Gid, desarrollado por la UPC. Tal y como se ha comentado antes se ha considerado oportuno que la malla fuese no-estructurada para que se acomodase mejor a las posibles irregularidades del terreno. El tipo de elemento considerado es de tipo Taylor-Hood, esto es mallado cuadrático para la velocidad y lineal para la presión, la malla estará formada por tetrahedros en 3D y por triángulos en 2D.

Una de las grandes dificultades para conseguir un buen resultado en este tipo de problemas es que la calidad de la malla sea buena. Esto quiere decir que por un lado no haya grandes distorsiones ni irregularidades en la misma y por otro, y esto es muy importante, que el tamaño de elemento en las distintas partes del mallado no crezca desmesuradamente y siempre sea fiel a las indicaciones que el usuario realiza a su programa de mallado. Las últimas versiones del programa Gid son capaces de controlar razonablemente el crecimiento interior del tamaño de malla. El crecimiento de la malla debe ser de forma que en las proximidades de nuestra colina el tamaño sea lo más pequeño posible y además no crezca en exceso a unas distancias del orden de lo que podría representar un aerogenerador o una torre de medida, a partir de esa altura el crecimiento de malla puede ser ligeramente más rápido. Esto se consigue dividiendo el volumen de estudio en otros subvolúmenes a los cuales se les va asignando mayores tamaños de mallado a medida que se van alejando del suelo.

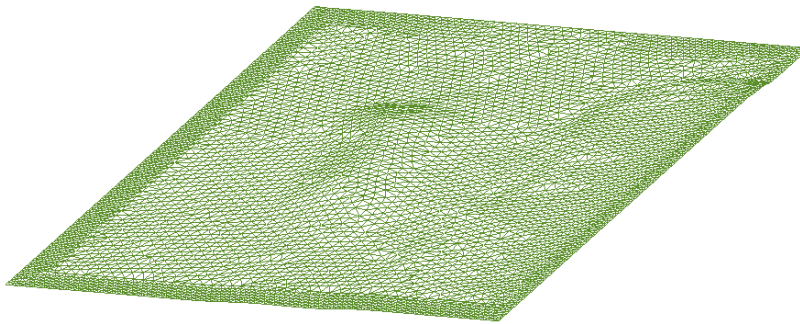


Fig. 3. Mallado superficial de la topografía.

	Geometría	Area de trabajo(m <sup>2</sup> )	Nodos	Tipo de malla
Kim & Patel[1]	3D	6000x2000	210000	estructurada
Leroy [2]	3D	3000x3000	83160	estructurada
NTUA [4]	3D-2D	5000x3000	300000	estructurada
Este trabajo	3D-2D	3500x3500	284805	No estructurada

Tab. 1. Distintos mallados empleados por investigadores del tema.

el refinado de la malla para conseguir una mejora de resultados. Concretamente la primera capa de elementos en fundamental para ser capaces de capturar la física de lo que allí se esta produciendo.

#### 4. Resultados

Una de las cosas más significativas en las medidas llevadas a cabo en Askervein es el rápido descenso de cociente de velocidades FSR a lo largo de la línea A-A.

$$FSR = \frac{U}{U_0} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde U<sub>0</sub> es la velocidad con la que se aproxima el viento a la colina.

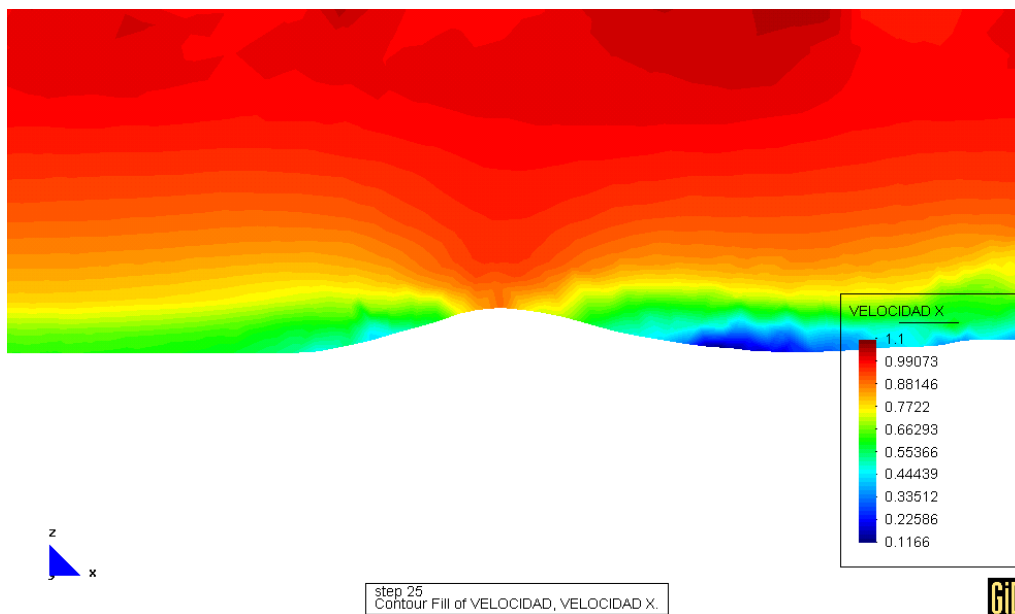


Fig. 4. Representación de la velocidad según la dirección de estudio.

En la figura 1 se puede apreciar las distribuciones del ratio FSR en el caso experimental, resultados computacionales conseguidos por otros autores y los resultados que se han conseguido en este trabajo.

Hay una cierta polémica en los resultados de esta colina que viene del hecho de que muchos autores de la rama computacional no incluyen unas colinas vecinas a la gran colina de estudio y esto provoca una cierta disparidad de resultados. El hecho de incluirlas provoca un cierto bloqueo que difícilmente se podría conseguir en ausencia de estas. Uno de los datos que más cuesta predecir a este tipo de autores es precisamente el valor de la velocidad en la cima de la colina.

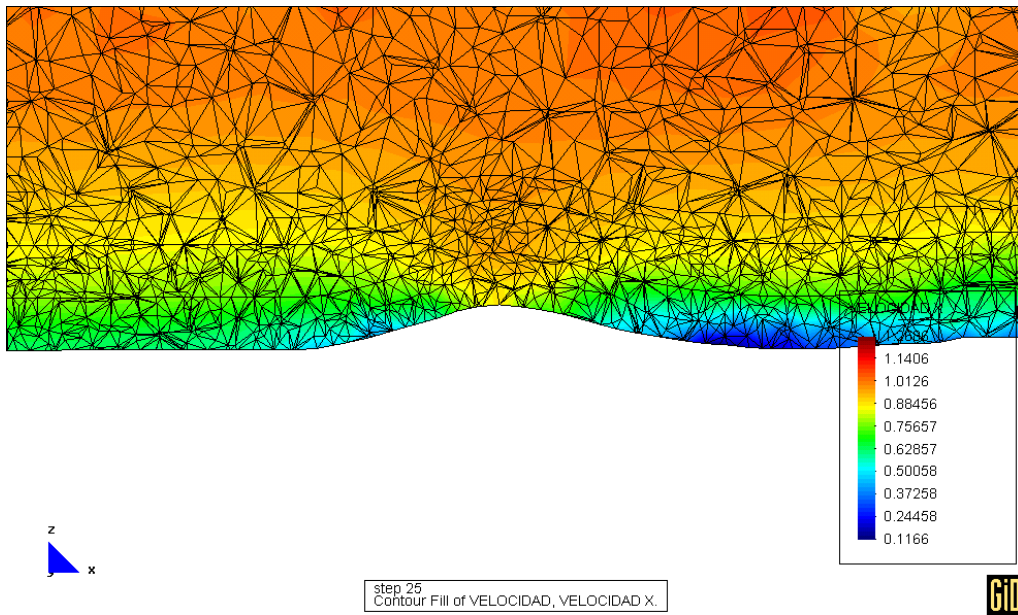


Fig. 5. Corte del dominio y visualización del mallado tridimensional.

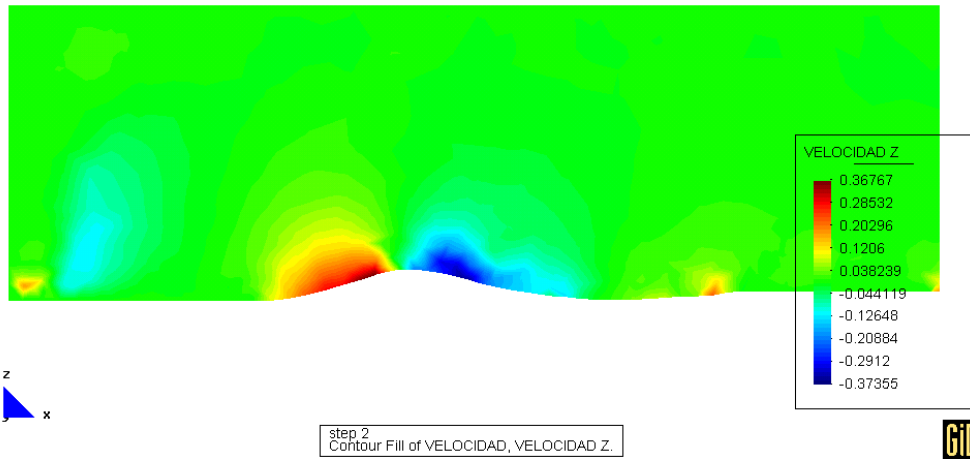


Fig. 6. Representación del campo vertical de velocidades.

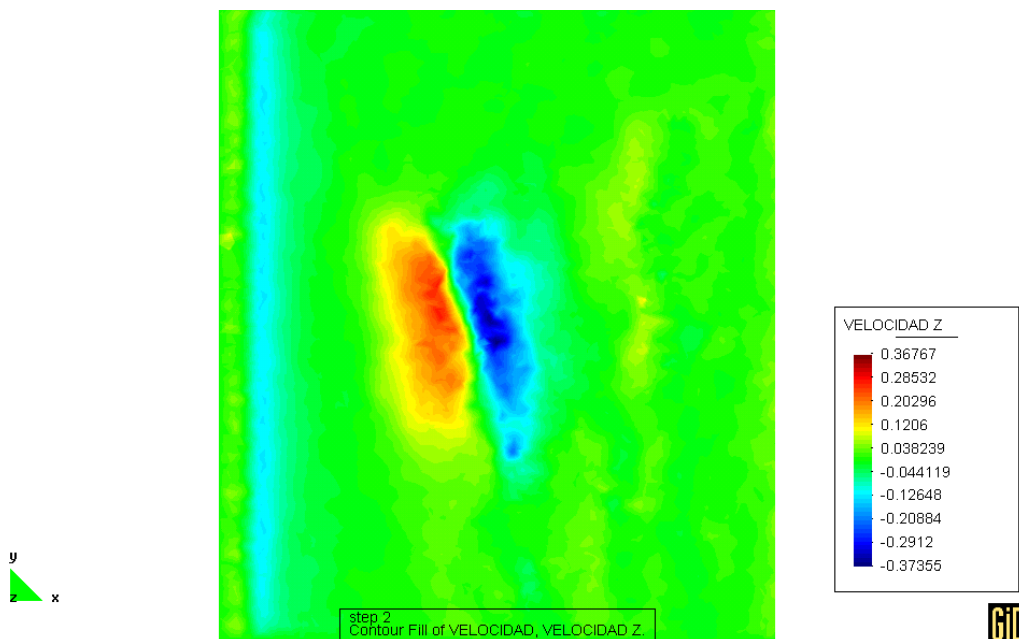
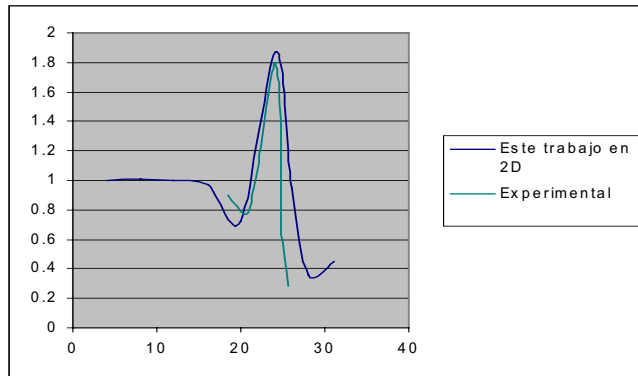
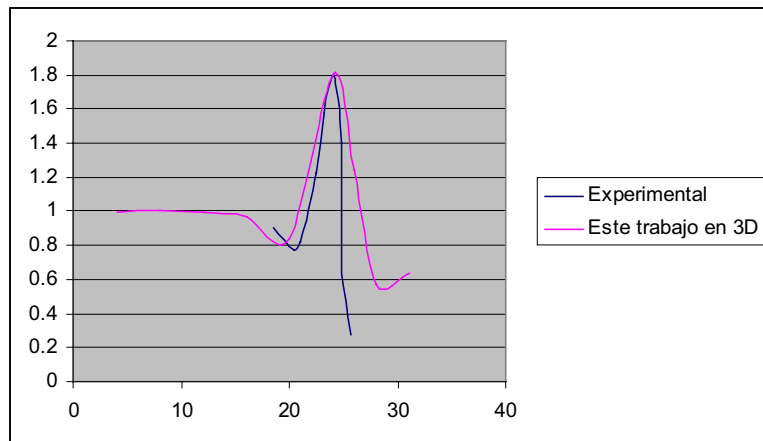


Fig. 7. Campo vertical de velocidades observado en planta.

Cuando el estudio se basa en conocer las características del campo de velocidades para una posible presencia de distintos aerogeneradores, es decir existe un problema energético subyacente, lo importante es calcular con precisión las curvas de crecimiento de la velocidad en función de la altura. Otros detalles del flujo como la energía cinética turbulenta o la viscosidad turbulenta no son de tan atractivo interés como el campo de velocidades. Es por ello que en este caso se valoran los resultados de velocidad para evaluar la eficacia del código.



También es interesante comentar que en la zona de recirculación que se crea tras la montaña los resultados obtenidos en forma computacional difícilmente obtienen mucha precisión, pero por suerte en esos emplazamientos difícilmente se coloca ningún tipo de aerogeneradores.



## 5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la empresa DYTA mediante el contrato DYTA-01 llevado a cabo con el Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid.

## 6. Bibliografía

- [1] "Test of turbulence models for wind flow over terrain with separation and recirculation".H.G.Kim and V.C.Patel. Boundary-Layer Meteorology 94: 5-21,2000.
- [2] "Wind field simulations at Askervein hill". Internal study.Jerome Leroy.Arne Reidar Gravdahl. VECTOR\_9910\_100.
- [3] "A study of wind potential in Complex Terrain".C.A.Toomer, J.Sander, S.Kunz.
- [4] "Statistical and Physical modelling of wind resources in Complex Terrain: Assessment of the Applicability of a 3D Navier Stokes code" G.Bergeles, I.Glekas, J.Prospathopoulos, S.Voutsinas. Documento interno de la NTUA.
- [5] "A mixed spectral Finite Difference model for Neutrally Stratified Boundary-Layer Flow over Roughness Changes and Topography".A.C.M.Beljaars, J.L.Walmsey and P.A.Taylor.Boundary-Layer Meteorology 38 (1987) 273-303.
- [6] "ADMS 3 Complex Terrain Flow Field Validation. Comparison of ADMS to Askervein Hill Field Data"
- [7] "Boundary-layer flow over topography: impacts of the Askervein study".J.L.Walmsey and P.A.Taylor.Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario, Canada.
- [8] "Estimación de recursos en Parques Eólicos".A.Crespo, J. Hernández, E. Mingoya, J. García, R. Gómez-Elvira, F. Manuel, J.C.Grau. Industria XXI.3.8-18.
- [9] "Computational Wind Engineering 1".S.Murakami.CWE 92-Proceedings of the First International Symposium on Computational Wind Engineering. Tokio (Japan).1992.