

**REUNIÓN (12 Y 13 DE DICIEMBRE DE 2007)
EPEC (EMPRESA PROVINCIAL DE ENERGÍA DE CÓRDOBA – ARGENTINA) y
UPM (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID)**

Estudios sobre recursos en parques eólicos
y otras actividades sobre energía eólica de nuestro
grupo

Laboratorio de Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
A. Crespo, E. Migoya, A. Jiménez y J. García
J. Amador (E.U.I.T.I-UPM)



Contenido:

- **Presentación del grupo**
- Estudio de recursos: orografía, estelas
- Predicción
- Aspectos medioambientales
- Ejemplo de un estudio de viabilidad de la energía eólica en la Comunidad de Madrid
- Estado actual de la energía eólica
- Consideraciones económicas y legislación
- Líneas relevantes de investigación
- Cursos sobre energía eólica

Grupo de Mecánica de Fluidos

ETSII, UPM

- Simulaciones numéricas de diferentes flujos de interés industrial, tales como: "Movimiento del aire alrededor de trenes de alta velocidad"
- Estudio de las características del viento y de recursos en parques eólicos, predicción.
- Dispersión de gases
- Simulación del movimiento de humos y gases en incendios
- También estudiamos procesos de interés biológico, como la "Dinámica de burbujas en medios viscoelásticos" y el "Flujo sanguíneo".
- Estudios experimentales en los que se simulan también procesos de interés industrial, estudiándose en particular la "Cavitación" o métodos de medida en fluidos

Grupo de Mecánica de Fluidos ETSII, UPM Estudio de las características del viento y de recursos en parques eólicos

- Influencia de la orografía local en el comportamiento del viento
- Estelas de aeroturbinas
- Predicción del viento
- Parques eólicos marinos

Grupo de Mecánica de Fluidos ETSII, UPM Estudio de las características del viento y de recursos en parques eólicos

Todos estos trabajos han sido financiados por organismos públicos y privados:

- Proyectos de la Unión Europea
- Proyectos del gobierno español o gobiernos regionales
- Empresas privadas: Gamesa, Endesa, etc
- Promotores españoles de parques eólicos

Contenido:

- Presentación del grupo
- Estudio de recursos: orografía, estelas
- Predicción
- Aspectos medioambientales
- Ejemplo de un estudio de viabilidad de la energía eólica en la Comunidad de Madrid
- Estado actual de la energía eólica
- Consideraciones económicas y legislación
- Líneas relevantes de investigación
- Cursos sobre energía eólica

Influencia de la orografía local en el comportamiento del viento

- Modelo simplificado: UPMORO
- Comparación con modelo comercial WASP
- Modelos con la resolución de ecuaciones completas aplicables a configuraciones orográficas complejas

UPMORO

UPMORO es un código basado en un modelo clásico de Jackson & Hunt, :

“Turbulent wind flow over a low hill”. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 101:929:955 (1975).

“Turbulent flow over hills and waves”. *Annu. Rev. Fluid. Mech.*30:507-538 (1998).

Este trabajo se inició con un contrato con GAMESA y se finalizó con otro con la empresa SOTAVENTO promotora del parque eólico del mismo nombre y ha dado lugar a la siguiente publicación:

“Comparative study of the behavior of wind-turbines in a wind farm” *Energy* 32 pp. 1871-1885, 2007



Laboratorio de Mecánica de Fluidos, ETSII, Universidad Politécnica de Madrid



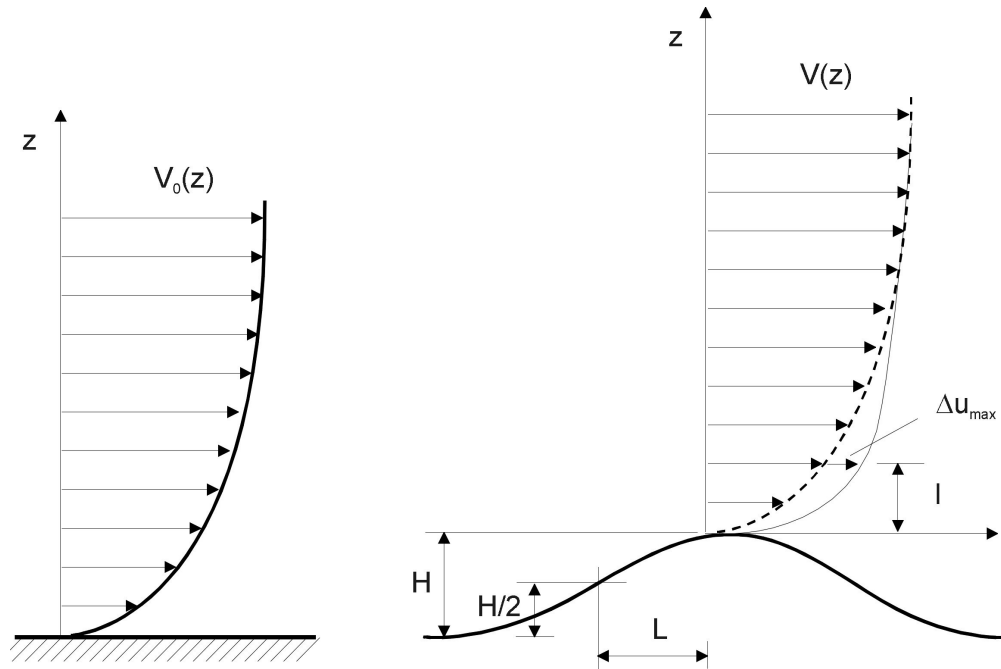
UPMORO

Suposiciones iniciales:

- *Modelo lineal.*
- *Flujo adiabático.*
- *Región interior donde los esfuerzos turbulentos son importantes*
- *Diferentes regiones exteriores:*
 - *La más externa: el flujo es esencialmente potencial*
 - *Intermedia: el flujo es rotacional*
- *La longitud de la colina condiciona el tamaño de las distintas regiones del flujo.*
- *No es aplicable a zonas muy complejas y abruptas. Para estos casos se usa el modelo de ecuaciones completas.*



UPMORO Flujos básico y perturbado

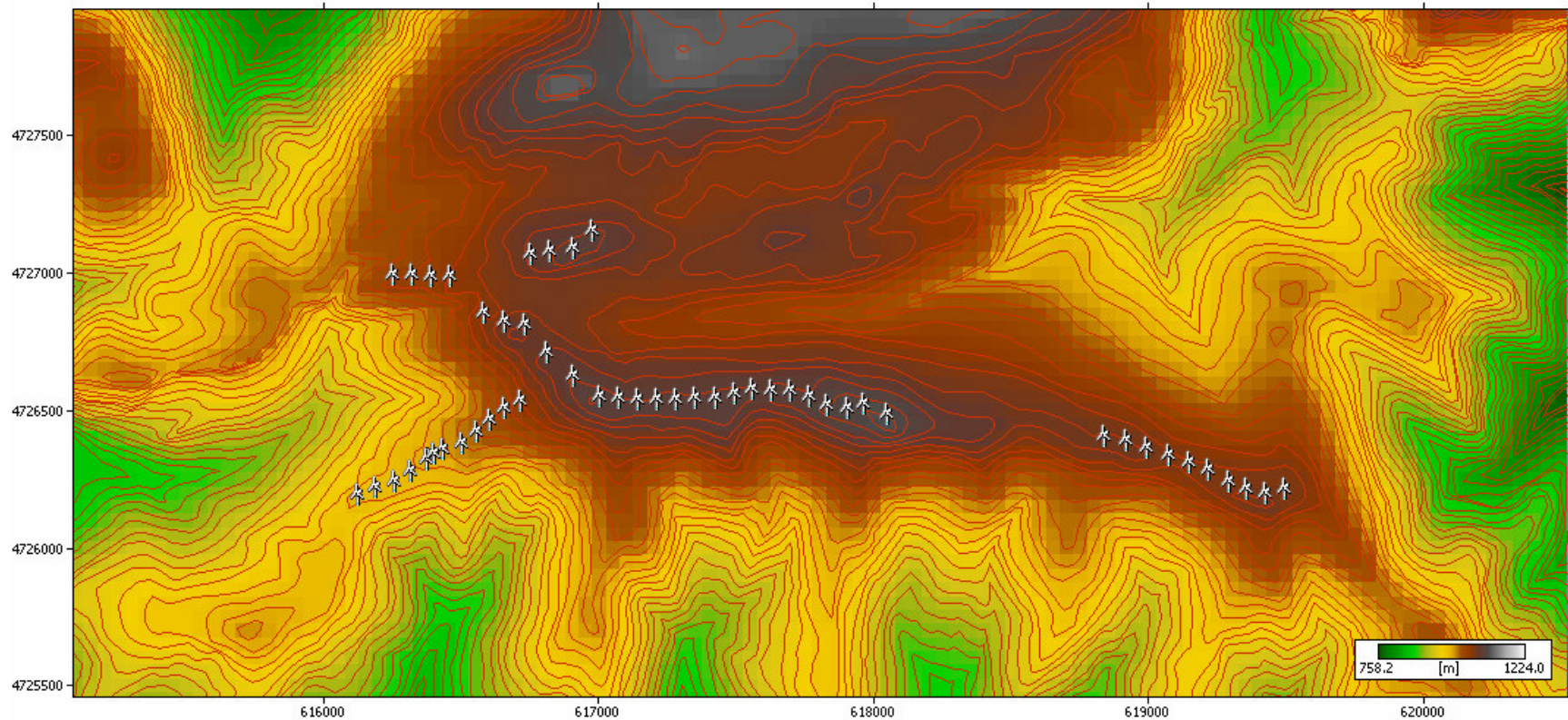


Flujo básico sin perturbar a la izquierda. Flujo perturbado a la derecha.

Importancia de la longitud L : el tamaño del obstáculo determina la situación de las regiones del flujo.



Parque eólico de Alaitz: Orografía y posición de las turbinas

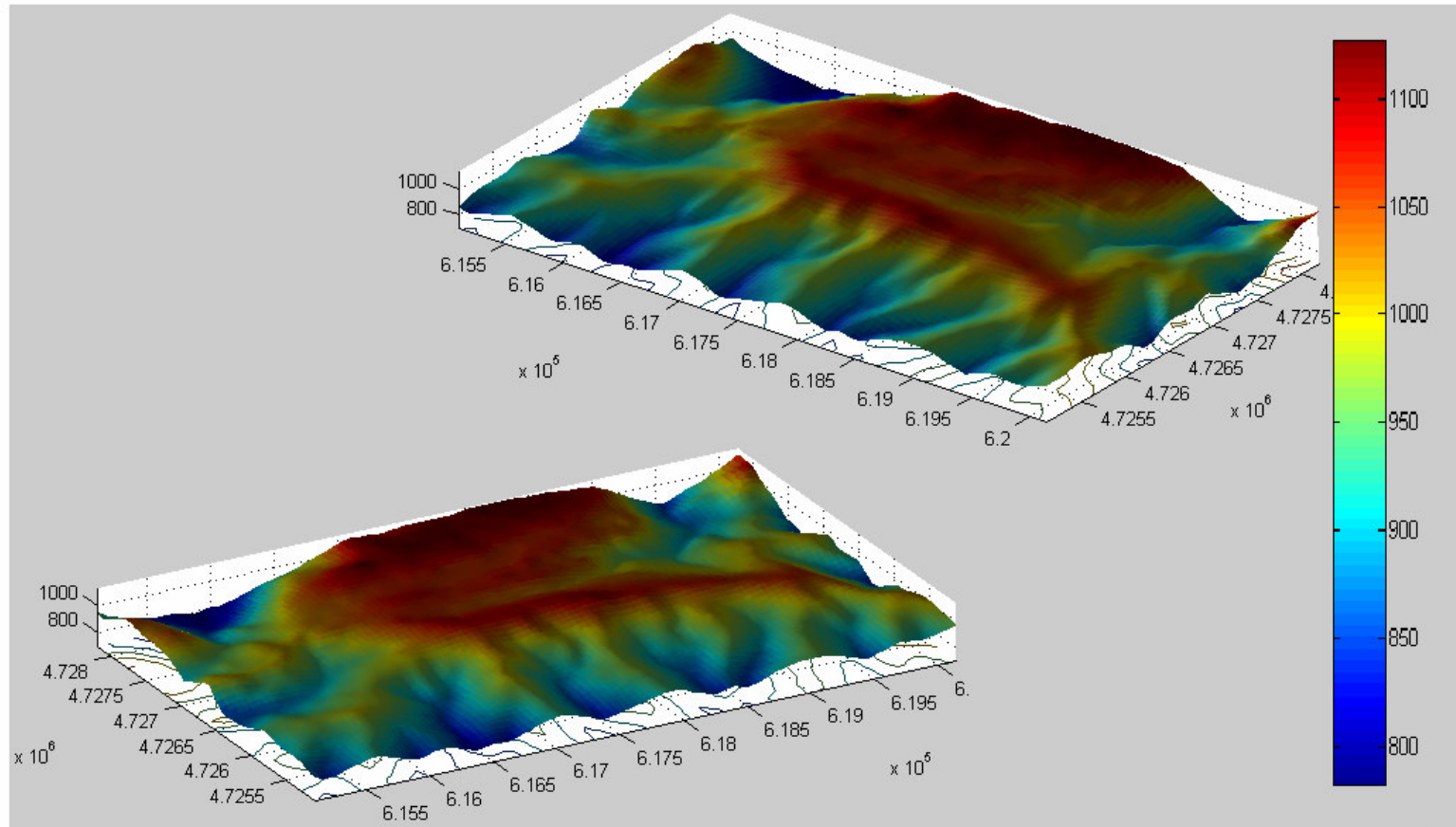


Laboratorio de Mecánica de Fluidos, ETSII, Universidad Politécnica de Madrid



Parque eólico de Alaitz:

Orografía 3D



Coordenadas UTM y cota en m



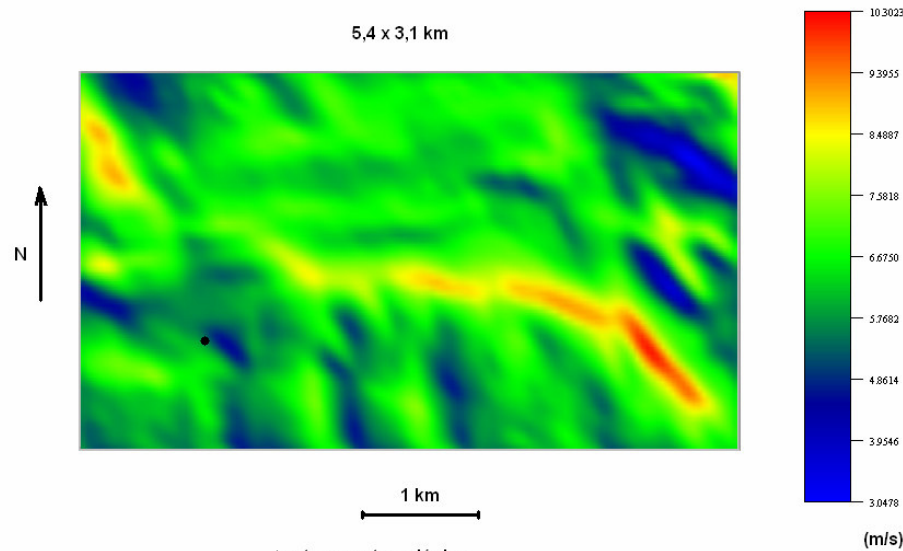
Laboratorio de Mecánica de Fluidos, ETSII, Universidad Politécnica de Madrid



Comparación: Dirección 30° N

UPMORO

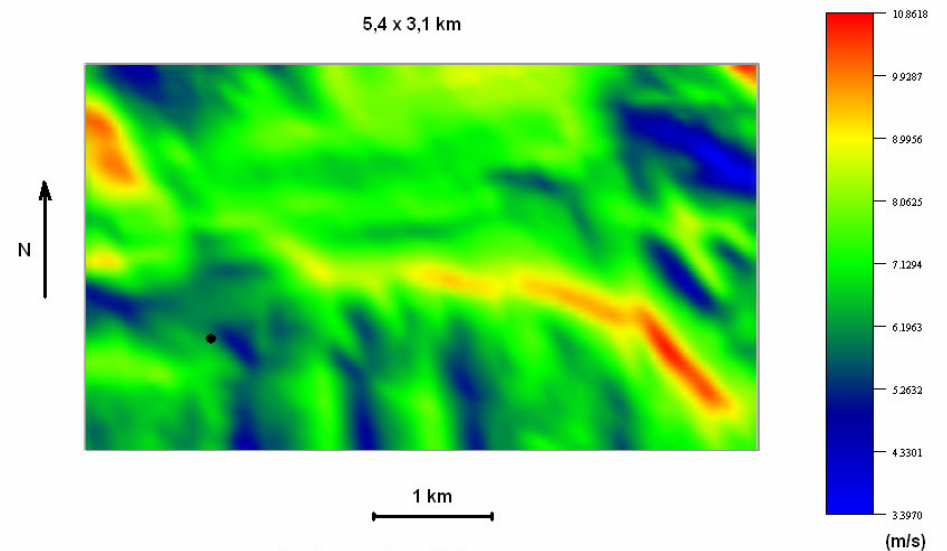
WASP



Viento supuesto en la torre:

V=5,92 m/s

dirección: 30° respecto al Norte



Viento supuesto en la torre:

V=5,92 m/s

dirección: 30° respecto al Norte

Estimación de recursos. Modelos numéricos, ecuaciones completas (Apoyo de GAMESA)

- El problema en general consiste en la resolución de las ecuaciones del movimiento fluido alrededor de una configuración más o menos compleja.
- En general las ecuaciones de conservación a resolver son:
 - Masa
 - Cantidad de movimiento (3 ecuaciones)
 - Energía
 - Fracción másica de vapor de agua
- Aunque a veces se prescinde de estas dos últimas, sobre todo para atmósferas neutras.
- También se suele suponer que las variaciones de densidad son muy pequeñas,



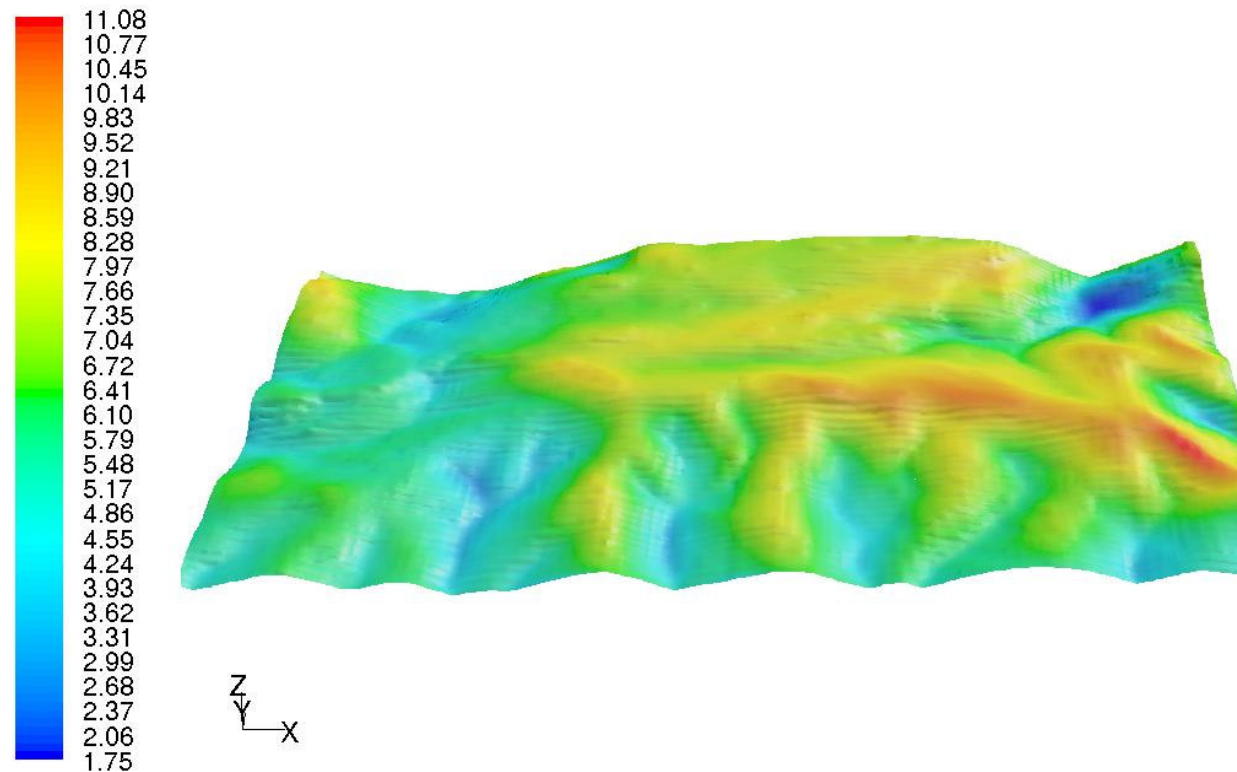
Estimación de recursos: modelos numéricos , ecuaciones completas

Para simular la turbulencia se suelen utilizar diferentes modelos de cierre turbulentos con los que se calculan los términos de transporte turbulentos

- A estas ecuaciones hay que imponerle condiciones de contorno apropiadas, que incluyen el efecto de la orografía.
- Por otra parte se debe conocer el flujo entrante, cuyas propiedades se suponen estadísticamente conocidas a partir de una estación meteorológica cercana y trasvasándolas al terreno considerado a través del viento geostrófico. Se supone un flujo entrante básico similar al presentado en el modelo anterior.
- Se pueden realizar códigos propios para implementar estos modelos, aunque a veces es más sencillo la utilización de códigos comerciales.
- Generalmente se requieren estaciones de trabajo, aunque para configuraciones sencillas puede bastar con un PC.



Modelos numéricos, ecuaciones completas. FLUENT



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

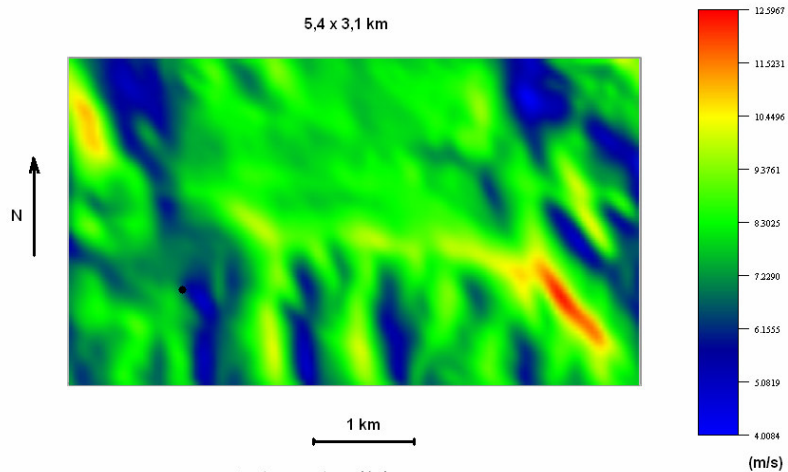
ETSII-UPM
FLUENT 6.2 (3d, segregated, ske)

Contornos de velocidad a 45 m, dirección 60° N. Resultados preliminares.
Parque de Alaitz.

Comparación: Dirección 60° N

UPMORO

5,4 x 3,1 km

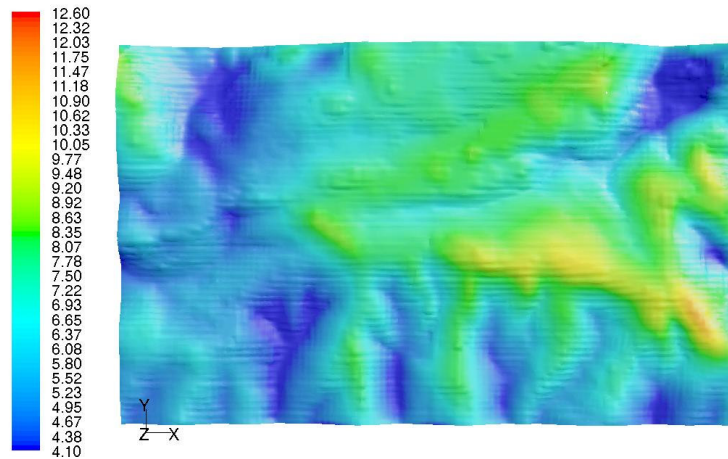


• = torre meteorológica

Viento supuesto en la torre:

V=5,92 m/s

dirección: 60° respecto al Norte

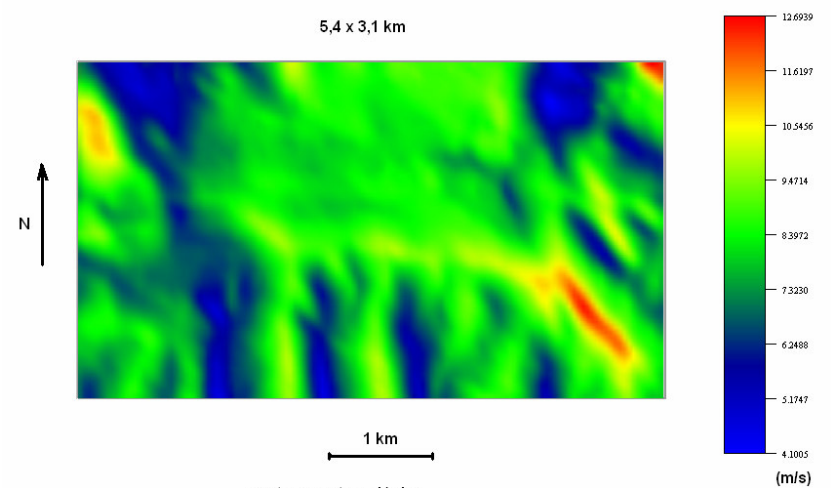


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

ETSII-UPM
FLUENT 6.2 (3d, segregated, ske)

WASP

5,4 x 3,1 km



• = torre meteorológica

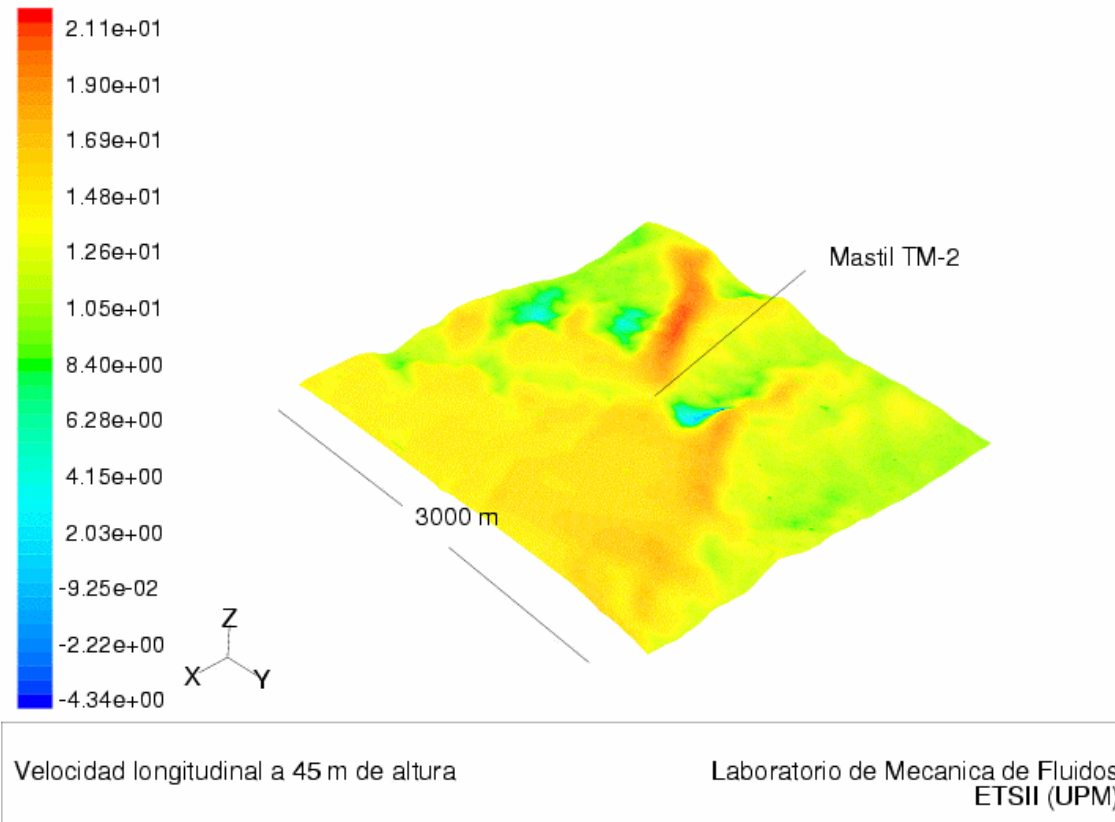
Viento supuesto en la torre:

V=5,92 m/s

dirección: 60° respecto al Norte

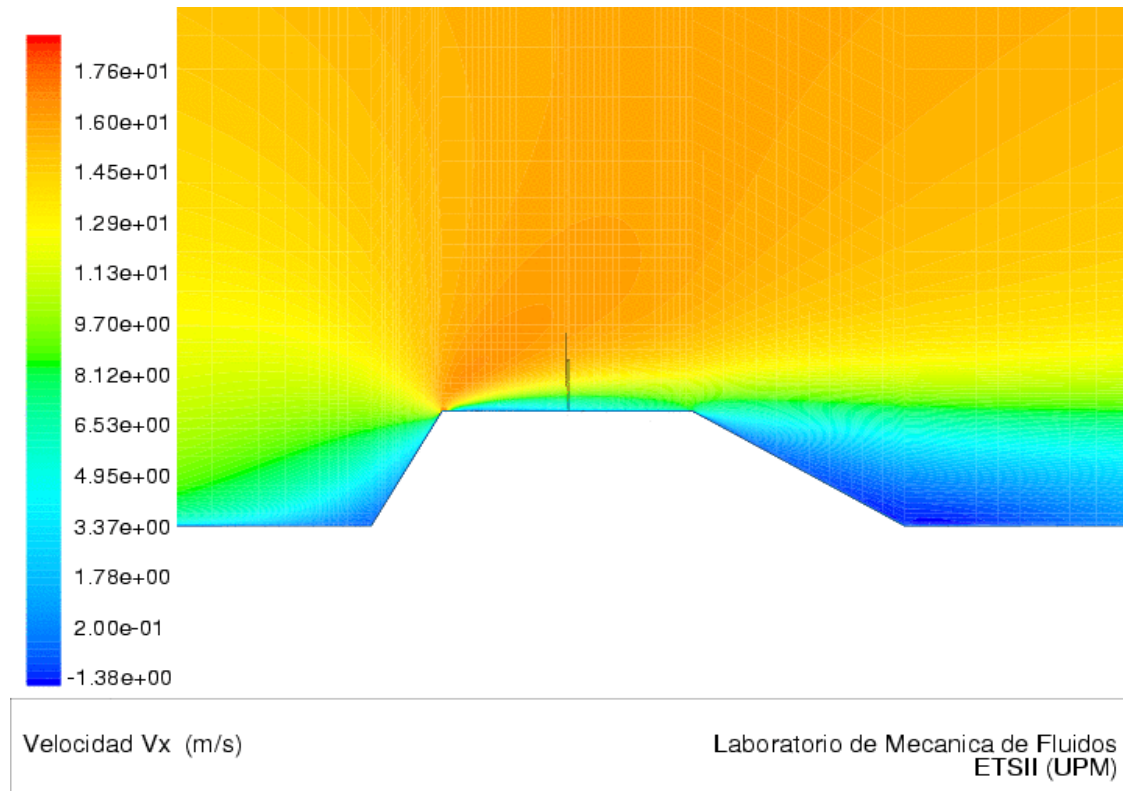
Ecuaciones
completas.FLUENT.

Resultados para otra orografía con mayores pendientes



Contornos de la componente v de la velocidad, según la dirección del viento incidente en una superficie paralela al suelo a una distancia de 45 m. Dirección 337° a partir del N en sentido horario. El eje y apunta hacia el norte. Calculados con el modelo introducido en FLUENT.

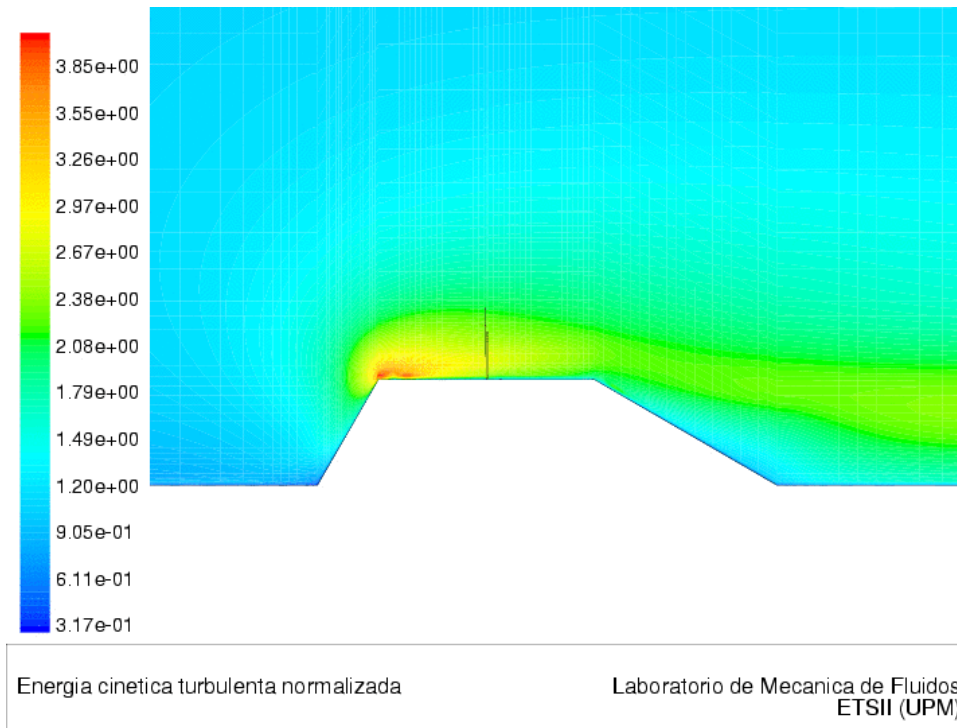
Estimación de recursos: obstáculo artificial con mucha pendiente



Ejemplo. Contornos de velocidad en la dirección principal calculados con Fluent. Colina trapezoidal con pendientes importantes. Se aprecian zonas de recirculación que sería imposibles de obtener con los modelos lineales



Estimación de recursos: obstáculo artificial con mucha pendiente, turbulencia



Contornos de intensidad turbulenta calculados con FLUENT. Colina trapezoidal.



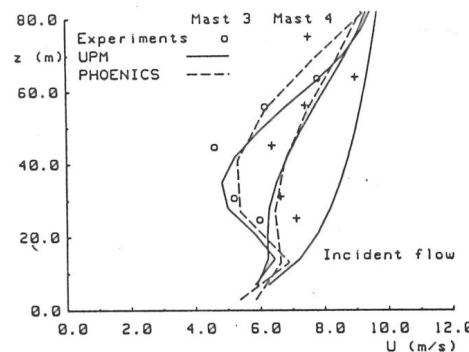
Estelas de aeroturbinas

- El efecto de la interferencia entre aeroturbinas suele ser importante, ya que las utilizadas en la actualidad tienen una potencia nominal típica de entre 500 y 1500 kW, con diámetros de entre 40 y 60 m, y para poder producir energía de forma significativa es necesario agrupar las máquinas en parques eólicos.
- Hay que buscar de forma adecuada el emplazamiento de las máquinas, de manera que se aprovechen aquellos lugares con más potencial eólico, situando en ellos el mayor número posible de aerogeneradores, minimizando al mismo tiempo los efectos nocivos asociados a la interferencia.
- La máquina eólica extrae energía cinética del viento, por lo que éste es menos intenso en su estela, dando lugar a que la producción energética de una máquina situada a sotavento de otra disminuya.



Estelas de aeroturbinas

- En la estela el nivel de turbulencia es mayor que en el viento libre, dando lugar a que aumenten las cargas no permanentes sobre la máquina a sotavento, y a que su vida se acorte por el fenómeno de fatiga.
- Es posible que una máquina que en ausencia de estelas cumple con la normativa deje de hacerlo cuando esté sometida a la interferencia, debido a la mayor turbulencia incidente. (Ver ejemplo a continuación)
- Otro factor importante es la falta de uniformidad de la corriente en planos verticales, o cortadura, que se ve notablemente afectada, no sólo por la estela sino también por la topografía compleja. Al aumentar la cortadura, por encima de la natural, aumentan también las cargas cíclicas a que se ven sometidas las palas en su giro.



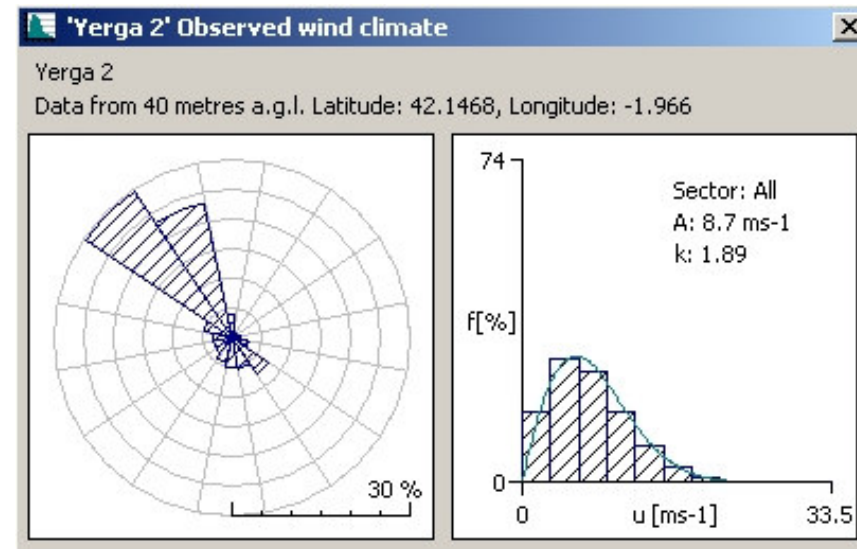
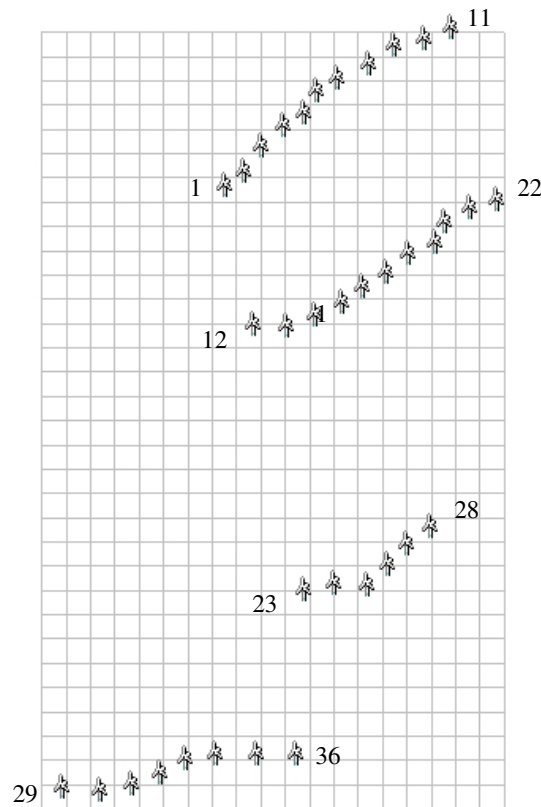
19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



22

Estelas de aeroturbinas. Ejemplo de posible modificación del comportamiento de la aeroturbina en relación con su clase



Parque eólico con rosa de los vientos. Turbinas 22 y 28 muy afectadas y 1, 12, 23 y 29 poco afectadas



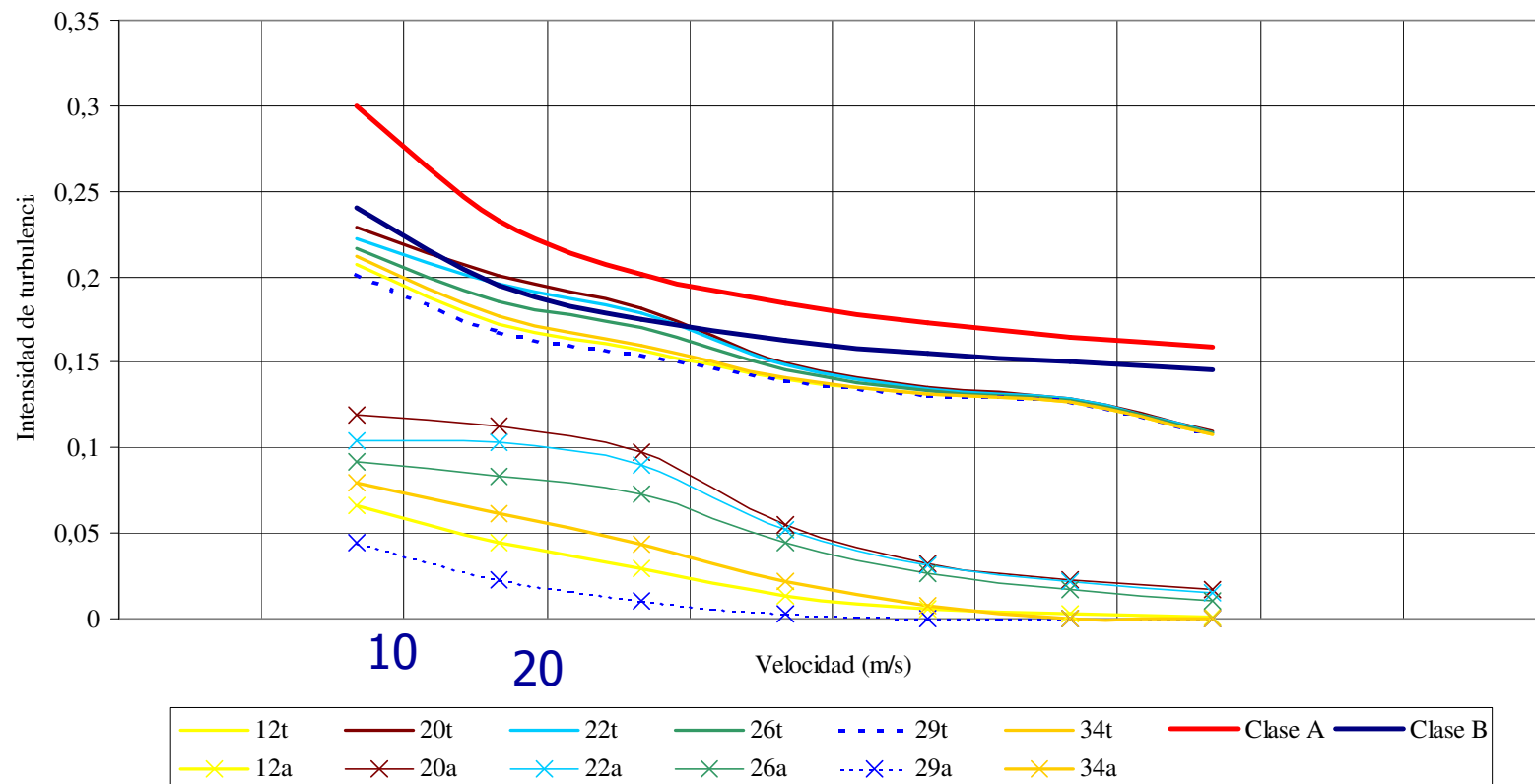
19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



23

Estelas de aeroturbinas. Ejemplo de posible modificación del comportamiento de la aeroturbina en relación con su clase



Turbulencia añadida generada por las aeroturbinas y turbulencia total. Turbinas 20, 22 dejan de cumplir con el criterio de clase B.



19/12/2007



24

Factores que influyen en las características del viento en las estelas y en la interacción entre máquinas

distancia entre aeroturbinas.

-Si una máquina está suficientemente alejada de otra, el efecto de aquella sobre ésta será poco o nada importante. Los efectos de la máquina se hacen sentir fundamentalmente en la estela aguas abajo, en la dirección del viento incidente.

-El defecto de velocidad que genera la máquina puede decaer a menos de un 10% de la velocidad inicial en distancias del orden de unos 6 a 10 diámetros. Sin embargo el decaimiento de la turbulencia es en distancias mucho mayores.

- El efecto lateral de las máquinas, en dirección perpendicular al viento, decae a valores aceptables en distancias muy pequeñas, del orden de 1 a 3 diámetros. En regiones donde la dirección del viento es predominante las máquinas pueden colocarse bastante juntas.

- En cualquier caso, los efectos de las estelas de distintas máquinas en un parque eólico se superponen y para evaluar los efectos nocivos hay que repetir los cálculos para todo el rango de velocidades y direcciones de viento incidentes

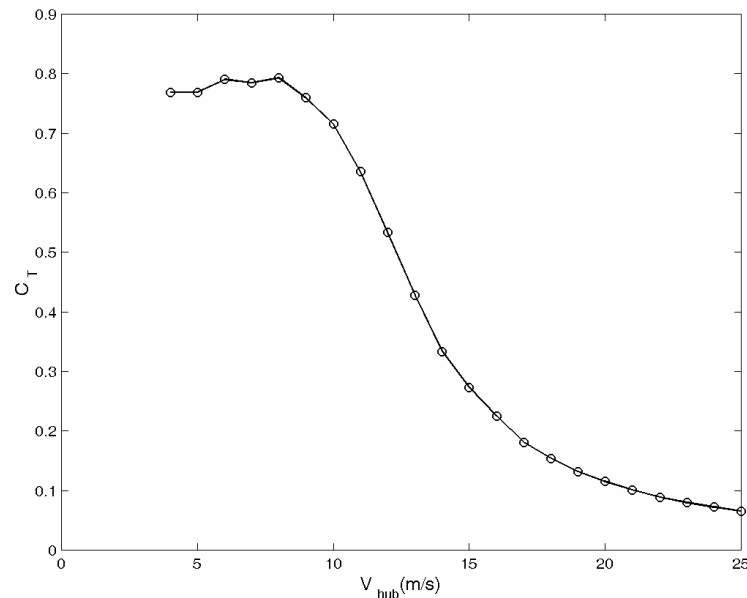


Factores que influyen en las características del viento en las estelas y en la interacción entre máquinas

La característica de la aeroturbina que más influye en su estela es la **fuerza de empuje**

- Dicha fuerza frena el aire y da origen a la estela. Cuanto mayor sea, más intensa será la estela. Adimensionalmente se suele expresar mediante el siguiente coeficiente de empuje:

$$C_T = \frac{\text{Fuerza de empuje}}{\frac{1}{2} \rho V_{hub}^2 \frac{\pi D^2}{4}}$$



Fuerza sobre la aeroturbina



La fuerza de empuje puede dar lugar a que flexionen las palas



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



27

Fuerza sobre la aeroturbina



La fuerza de empuje en situaciones extremas puede dar lugar al tumbado de la aeroturbina



19/12/2007

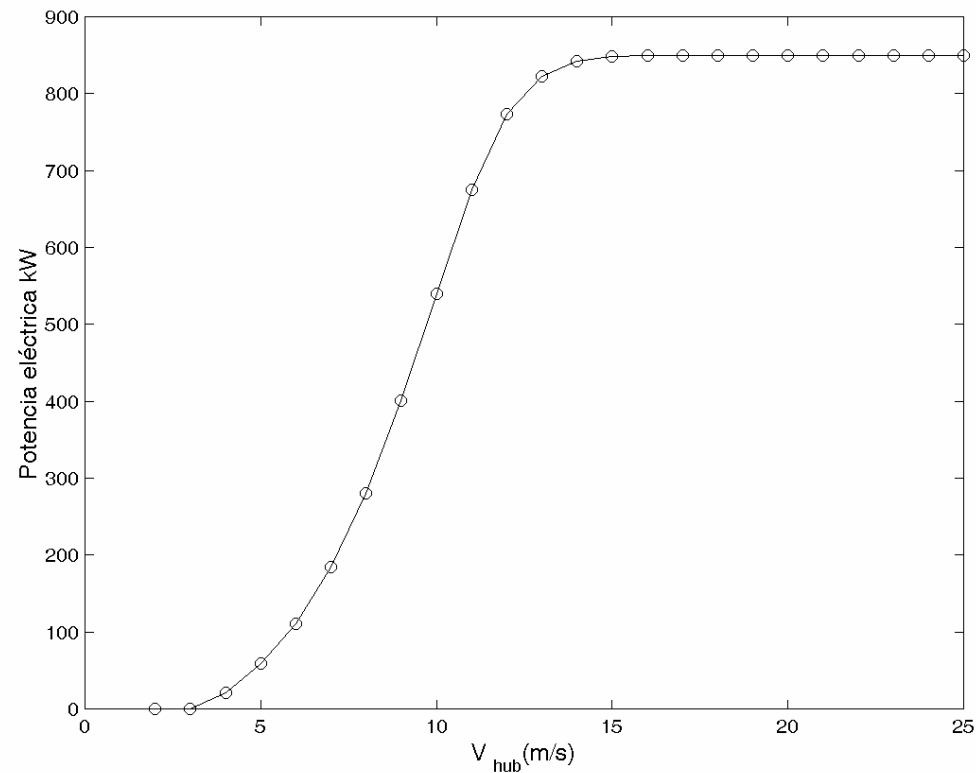
Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



23

Factores que influyen en las características del viento en las estelas y en la interacción entre máquinas

-A su vez, para la máquina afectada por la estela, la potencia que ésta pierde depende de forma importante de la **curva de potencia**



19/12/2007



Factores que influyen en las características del viento en las estelas y en la interacción entre máquinas

- **La intensidad de la turbulencia ambiente** también influye en el desarrollo de las estelas.

- Cuanto mayor sea dicha turbulencia más se difunde la estela, abriéndose y afectando a un mayor número de máquinas, aunque por otra parte el déficit de velocidad creado es menor. De estos efectos contrapuestos el segundo es el dominante, y por lo general, al igual que ocurre con una sustancia contaminante, cuando mayor sea la turbulencia ambiente menor será el efecto nocivo de la estela.

- Por otra parte la propia turbulencia generada por la estela se sumaría a una turbulencia ambiente, dando lugar a un efecto relativo que será tanto menor cuanto mayor sea la turbulencia ambiente.



Factores que influyen en las características del viento en las estelas y en la interacción entre máquinas

-A su vez, la turbulencia ambiente depende de diversos factores, fundamentalmente de la **rugosidad del terreno** **inestabilidad atmosférica** cuanto mayores sean, mayor será dicha turbulencia, y, de acuerdo con lo anterior, menor sería la influencia de las estelas.

-Para los parques eólicos en el mar (offshore), en que la rugosidad y la turbulencia ambiente son pequeños, los efectos de las estelas pueden ser relativamente más importantes.



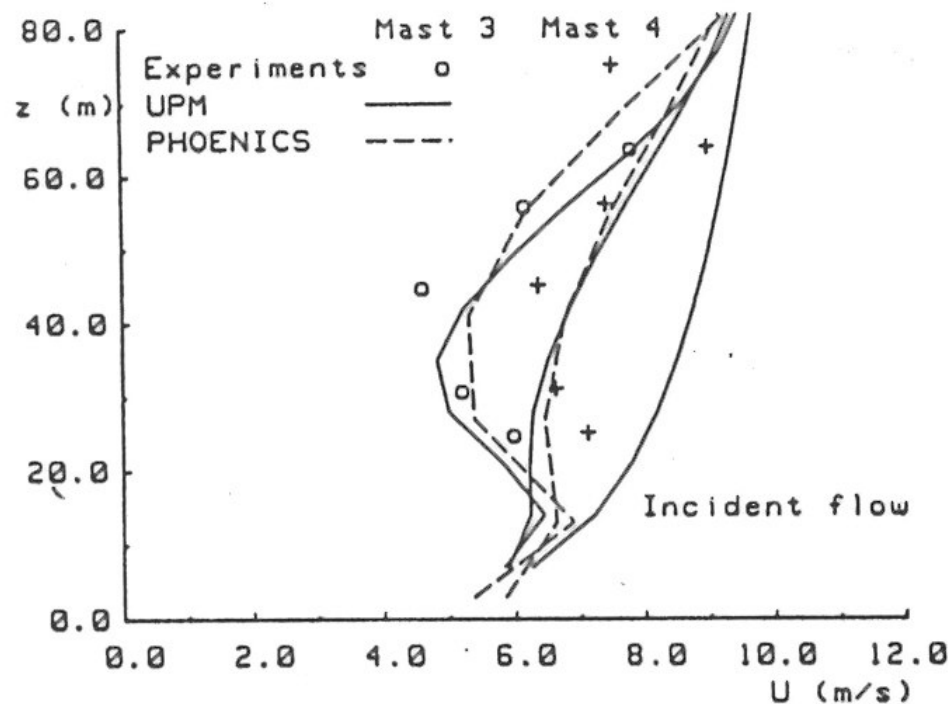
Modelos numéricos para el estudio de las estelas

- Existen diversos tipos de modelos numéricos de diferente grado de complejidad para el estudio tanto de estelas aisladas como de estelas superpuestas en parques eólicos, que se revisan en el trabajo de Crespo y Hernández (1999) y Vermeer, Sorensen y Crespo (2003).
- Los más sencillos son los modelos denominados cinemáticos, que presuponen la forma del perfil de velocidades en la estela, y se basan en leyes simples de difusión de la estela.
- En esta presentación describiremos brevemente los modelos más exactos desarrollados en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la ETSII, UPM.



Modelos numéricos para el estudio de las estelas UPMWAKE

-El código *UPMWAKE* supone que la aeroturbina está inmersa en una corriente básica no-uniforme correspondiente a la capa superficial de la capa límite terrestre.



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



33

Modelos numéricos para el estudio de las estelas

UPMWAKE

- Dicha corriente básica viene descrita por expresiones clásicas, en las que entran como parámetros la rugosidad del terreno y la longitud de Monin-Obukhov, con la que se caracteriza la estabilidad atmosférica.
- La máquina perturba la corriente básica, generando un defecto de velocidad y una turbulencia que se difunden en dicha corriente básica, hasta que, a una distancia suficientemente grande su efecto se amortigua.
- Las ecuaciones que describen el movimiento fluido son similares a las indicadas para el estudio de los efectos topográficos: conservación de masa, cantidad de movimiento, energía, conservación de la energía cinética turbulenta y de su ritmo de disipación.



Modelos numéricos para el estudio de las estelas

UPMWAKE

-El código UPMWAKE resuelve un sistema de 7 ecuaciones de conservación en derivadas parciales para 7 incógnitas:

ECUACIONES DE CONSERVACIÓN:

- * masa
- * tres de cantidad de movimiento
- * energía
- * energía cinética turbulenta, k
- * ritmo de disipación, ε

INCÓGNITAS

- * 3 velocidades
- * presión
- * temperatura potencial
- * k
- * ε

En atmósfera neutra no hace falta resolver la ecuación de la energía, y tenemos un sistema de 6 ecuaciones con 6 incógnitas

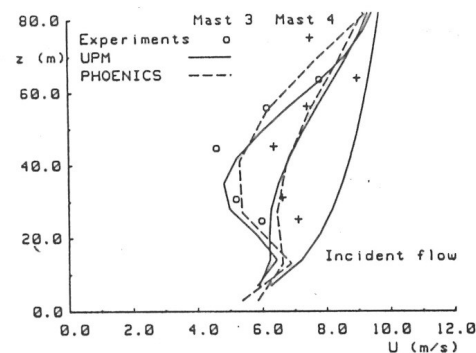


Modelos numéricos para el estudio de las estelas

UPMWAKE

-UPMWAKE se validó y mejoró mediante comparación con resultados experimentales tanto de túnel aerodinámico como de aeroturbinas reales. Estos trabajos se realizaron mediante 4 contratos con la UE dentro del programa de I+D 1985/88 y el programa Joule de 1990/94, en el curso de los cuales se colaboró con diferentes centros de investigación tales como el TNO de Holanda, el RISO de Dinamarca, National Power de Gran Bretaña y la Universidad de Amberes.

-Dada la posibilidad de UPMWAKE de reproducir la cortadura del viento incidente sobre la aeroturbina, el instituto holandés ECN lo utiliza bajo licencia, en combinación con un programa de modelización aerolástico para estimar cargas sobre aeroturbinas situadas en estelas



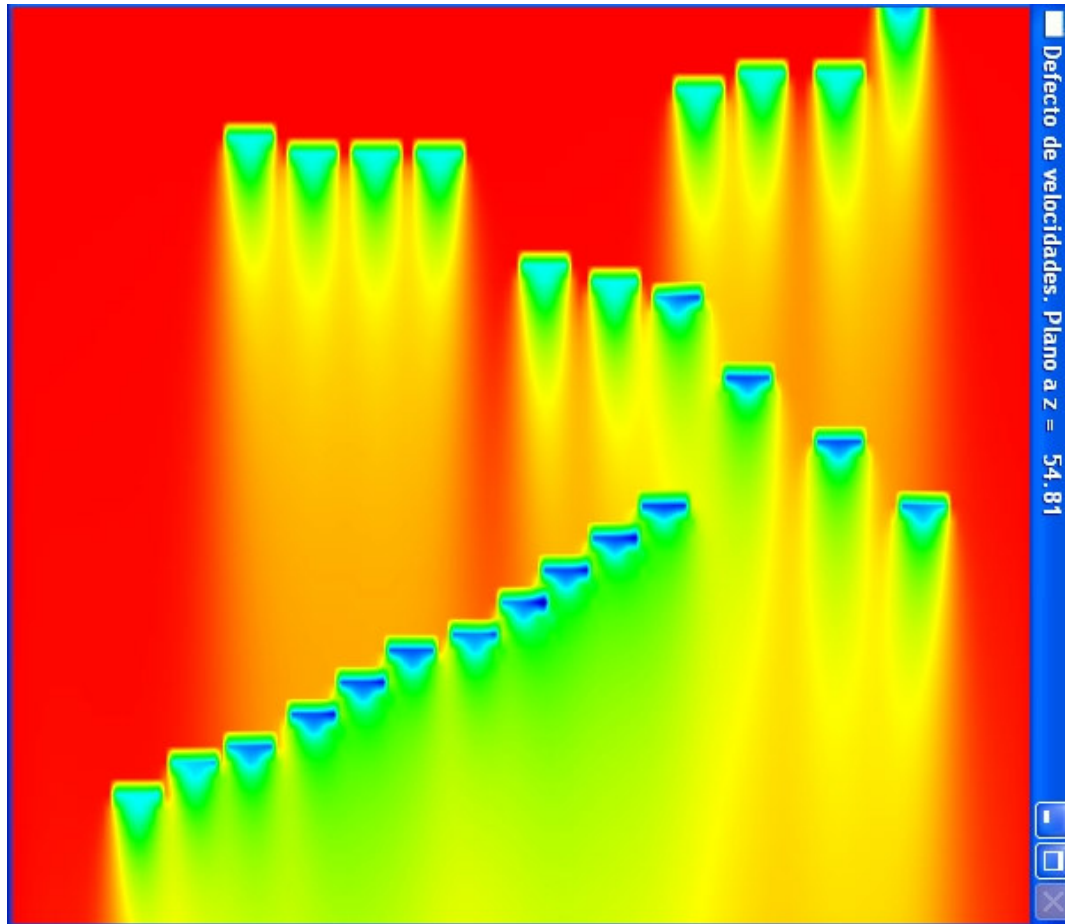
Modelos numéricos para el estudio de las estelas UPMPARK

- El código UPMPARK es una extensión del código UPMWAKE al caso de un parque con muchas aeroturbinas.
- El código de hecho resuelve las mismas ecuaciones de conservación que el UPMWAKE.
- La diferencia fundamental reside en cómo se aplican las condiciones de contorno en cada aeroturbina. Se hace uso de que el problema es tratado como si fuese parabólico, de manera que no se transmite información a barlovento en la dirección del viento principal.
- El número de nodos debe ser lo suficientemente grande para abarcar un corte transversal del parque en dirección normal al viento incidente y además tener en cuenta que el efecto de las estelas está lo suficientemente amortiguado lateralmente para poder imponer condiciones de contorno correspondientes al flujo sin perturbar.



Resultados UPMPARK:

Defecto de velocidad (zoom)



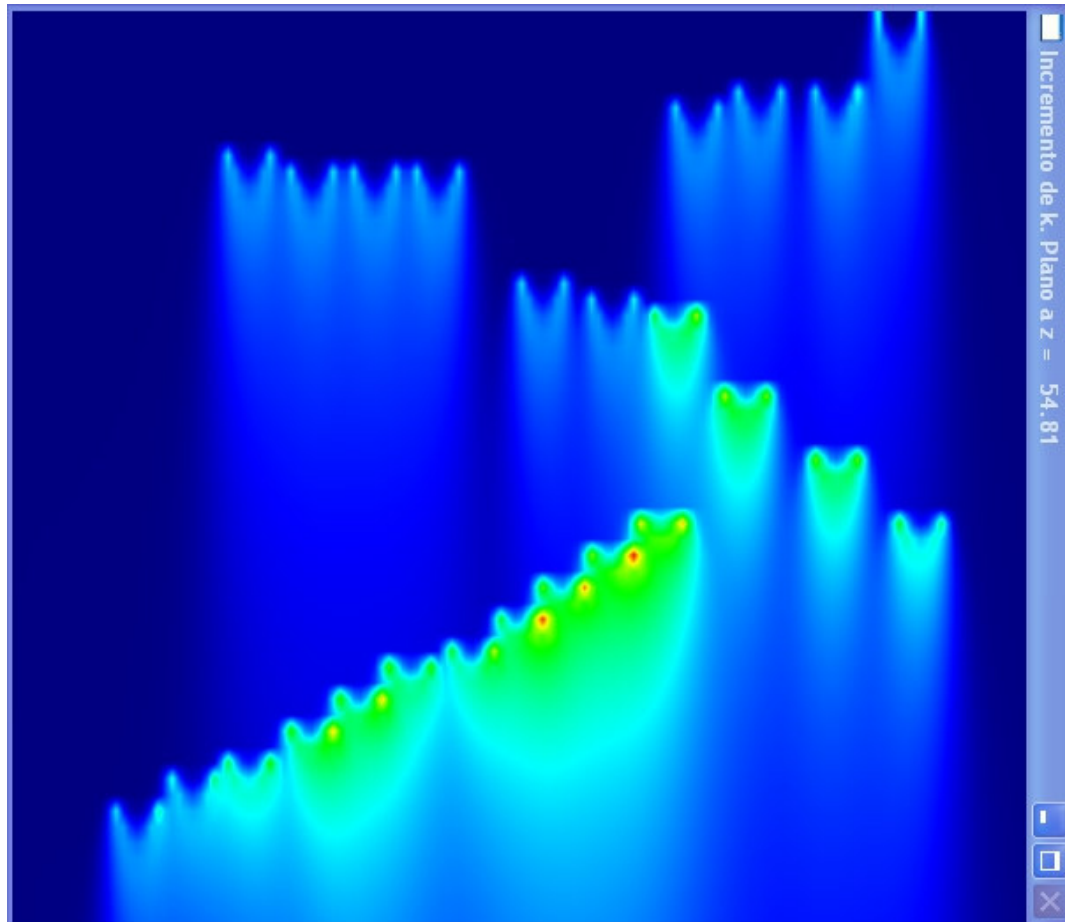
Velocidad: 10m/s
Dirección: 0°
Plano de cota z = 54.81 m

maximo (rojo): 0.00
minimo (azul):-7.46 m/s



Resultados UPMPARK:

Incremento de energía cinética turbulenta (zoom)



Velocidad: 10m/s

Dirección: 0°

Plano de cota z = 54.81 m

maximo (rojo): 13.70 m²/s²

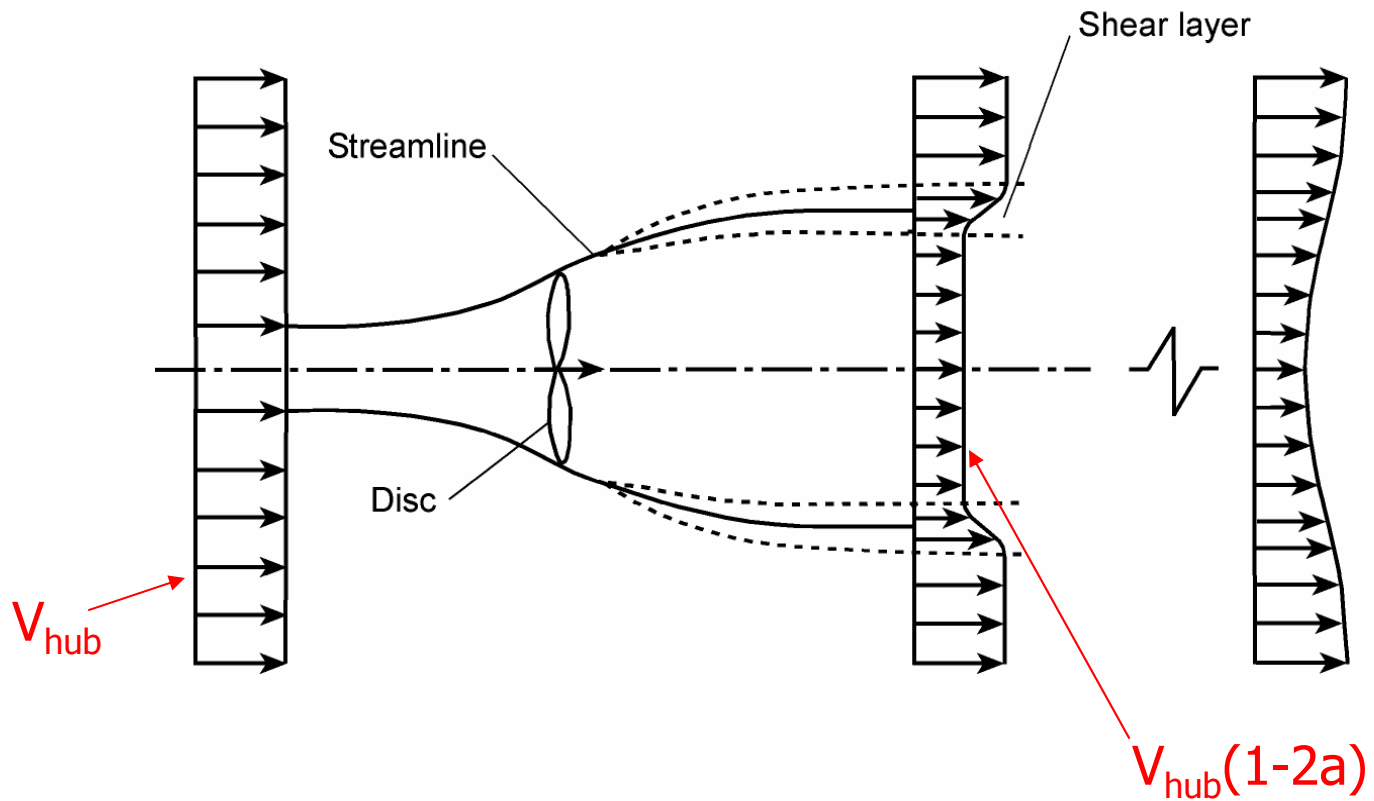
minimo (azul): 0.00



Laboratorio de Mecánica de Fluidos, ETSII, Universidad Politécnica de Madrid



Esquema mostrando el inicio de la estela en un plano horizontal



19/12/2007



Visualización del inicio de la capa de cortadura en la estela cercana



Fig. 4. Flow visualisation with smoke, revealing the tip vortices (from [16]).



19/12/2007

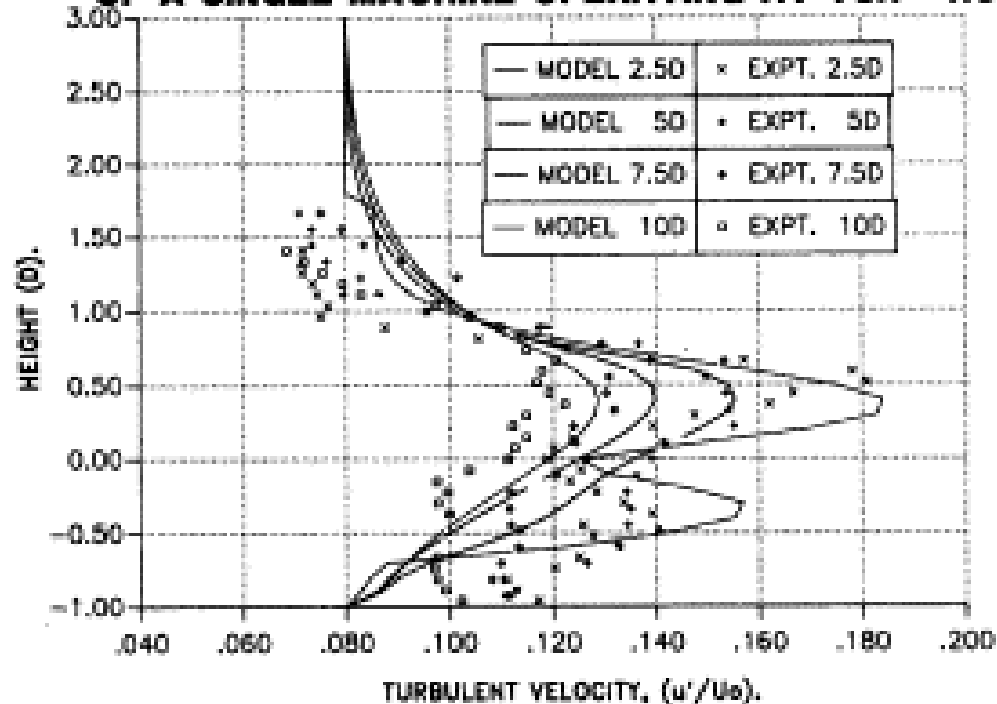
Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



41

Evolución de la turbulencia en la estela

**COMPARISON BETWEEN THE MEASURED AND PREDICTED
TURBULENT VELOCITY PROFILES IN THE WAKE
OF A SINGLE MACHINE OPERATING AT TSR= 4.0.**



Perfil vertical de turbulencia a distintas distancias aguas debajo de la aeroturbina. Comparación de medidas y cálculos numéricos.



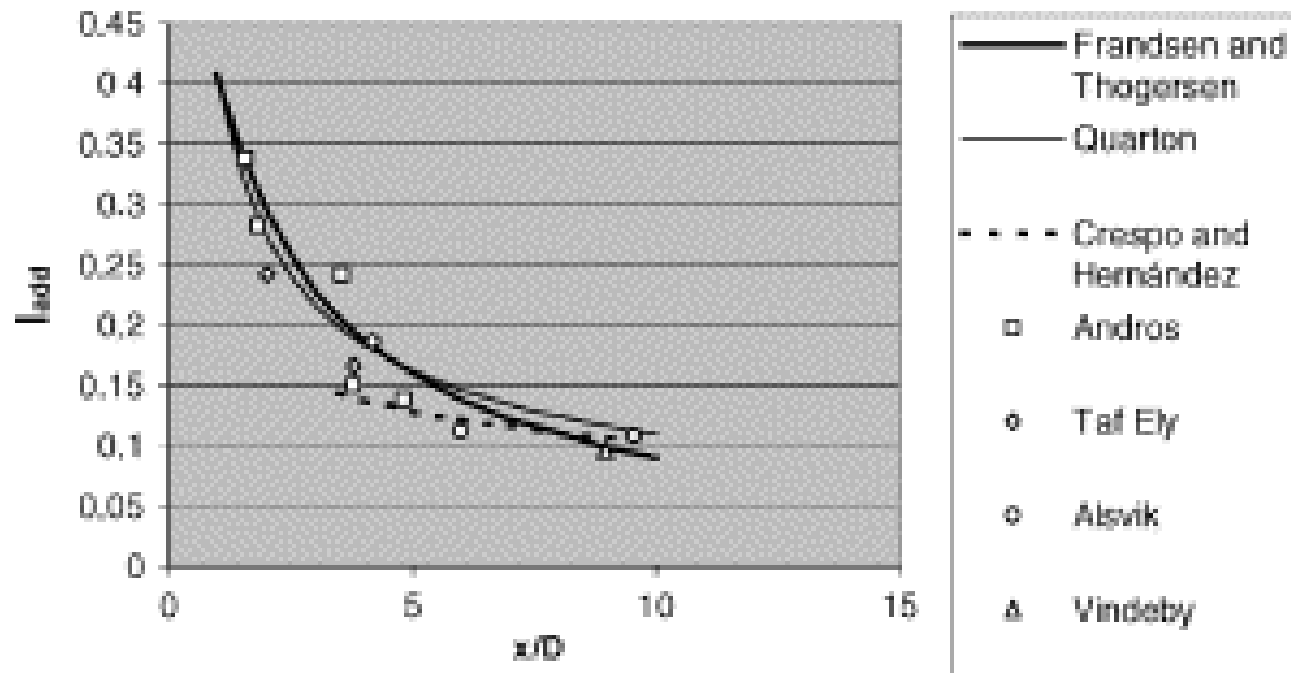
19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



42

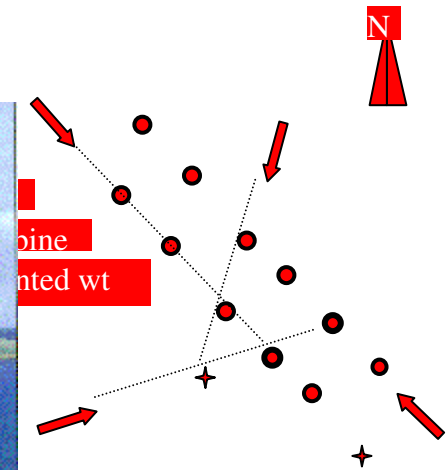
Correlaciones aproximadas para el cálculo del defecto de velocidad y de la turbulencia añadida



Maximum, added hub height wake turbulence measured in four different cases, compared with three correlations: with adjusted coefficients. Wind velocities in the range $9 \text{ m/s} < U < 11 \text{ m/s}$



Efecto de las estelas en la carga dinámica o en la fatiga debido al aumento de la turbulencia



Parque eólico marino de Vindeby



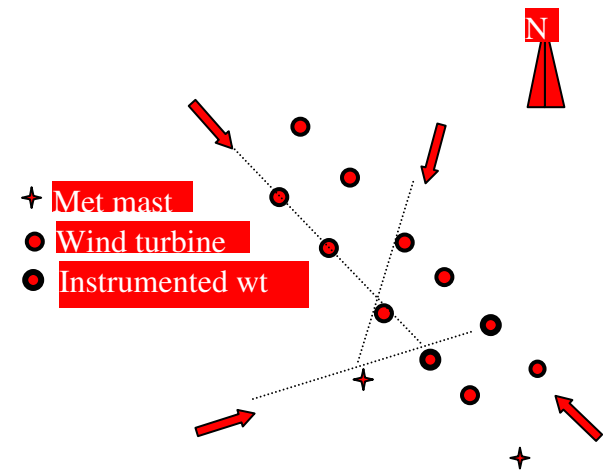
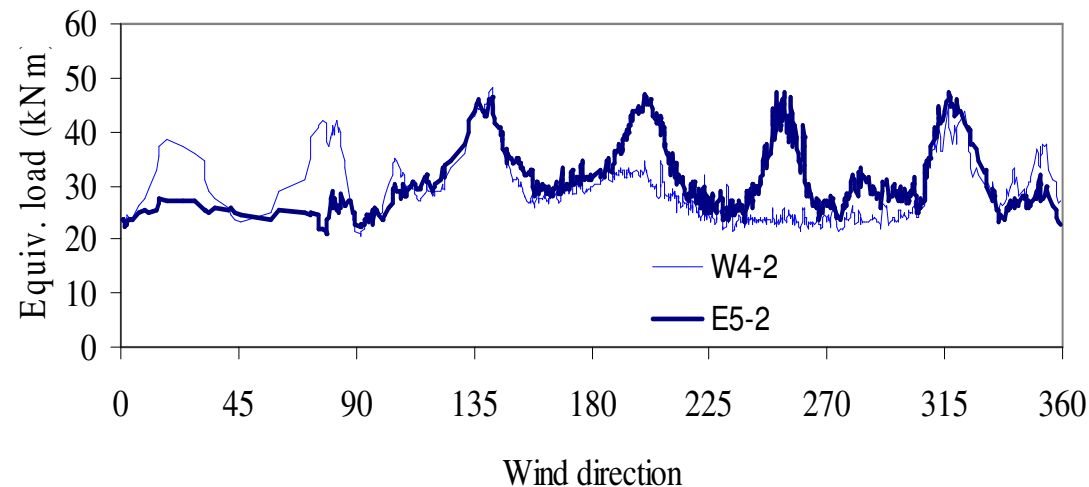
19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



44

Efecto de las estelas en la carga dinámica o en la fatiga debido al aumento de la turbulencia



Medidas de la parte fluctuante del par flector en la raíz de la pala, para el parque eólico offshore de Vindeby. Los picos corresponden a cuando la máquina instrumentada está en la estela de otra. La magnitud del pico parece independiente del número de aeroturbinas aguas arriba.



Efecto de las estelas en la carga dinámica o en la fatiga debido al aumento de la turbulencia

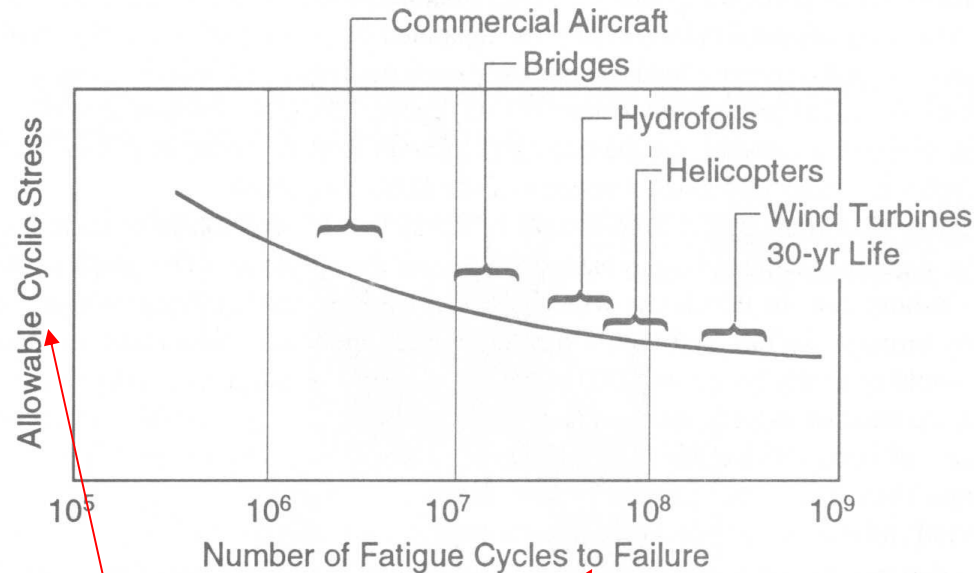


Figure 12-2. Schematic S-N curve illustrating the severity of wind turbine fatigue requirements compared to those of other structural systems.

Curva que da la carga de fatiga en función del número de ciclos

$$n_{fat} = a s_{fat}^{-m} \quad s_{fat} = b n_{fat}^{-1/m}$$



Modelos numéricos para el estudio de las estelas UPMPARK

-El código se desarrolló a través de los contratos de la UE antes mencionados y dos contratos del programa JOULE II de la UE de los años 1993/96 y 1995/99. En los mismos se colaboró con las compañías ELKRAFT de Dinamarca, 'Riso National Laboratory' de Dinamarca, 'Bonus Energy AS' de Dinamarca, 'Finish Meteorological Institute' de Finlandia, 'Nelleman, Niels & Rauschenberger' de Dinamarca, 'Stadwerke Rostock AG' de Alemania y 'National Wind Power' de Gran Bretaña. En estos casos una de las aplicaciones más importantes fue la realizada en campos eólicos en el mar.

-En años recientes, El programa UPMPARK también ha sido cedido bajo licencia a fabricantes y promotores españoles, tales como ECOTECNIA, MADE, GAMESA , IBERINCO e IBEREOLICA.



Continuación de estos trabajos sobre estelas de aeroturbinas

- Modelo de torbellino de gran escala LES para el estudio de la turbulencia en las estelas de las aeroturbinas. Subvencionado a través de convenio con GAMESA y un contrato europeo coordinado por el laboratorio Riso de Dinamarca.
- Aplicación de los modelos de recursos al estudio de la predicción. Subvencionado con contrato del gobierno español.
- Modelos de flujo linealizado aplicados en terrenos complejos, en fase de preparación.



Referencias más relevantes y recientes

A Jimenez, A Crespo, E Migoya, J. García (2007) "**Large-eddy simulation of spectral coherence in a wind turbine wake**" *Aceptado para publicación en la revista Environmental Research Letters*

A Jimenez, A Crespo, E Migoya, J. García (2007) "**Advances in large-eddy simulation of a wind turbine wake**" Vol. 75 Journal of Physics (IOP):Conference series

Emilio Migoya, Antonio Crespo, Javier García, Fermín Moreno, Fernando Manuel, Ángel Jiménez, Alexandre Costa (2007) "**Comparative study of the behavior of wind-turbines in a wind farm**" Energy 32 pp. 1871-1885.

Alexandre Costa, Antonio Crespo, Jorge Navarro, Gil Lizcano, Henrik Madsen and Everaldo Feitosa (2007) "**A Review on the Young History of the Wind Power Short-term Prediction**" *Aceptado para publicación en la revista Renewable and Sustainable Energy Reviews*



Referencias más relevantes y recientes (continuación)

- E. Migoya, A. Crespo, A. Jiménez, J. García, F. Manuel (2007) "**Wind energy resource assessment in Madrid region**" Renewable Energy 32 pp. 1467-1483
- R. Gómez, A. Crespo, E. Migoya, F. Manuel, J. Hernández (2005) "**Anisotropy of turbulence in wind turbine wakes**" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Octubre 2005, Vol 93/10, pp 797-814. Revista
- L.J. Vermeer, J.N.Sørensen y A. Crespo (2003) "**Wind Turbine Wake Aerodynamics**" Progress in Aerospace Sciences. Vol. 39. Issues 6-7. Agosto-Octubre 2003. pp. 467-510. Revista
- A. Crespo, J. Hernández and S. Frandsen (1999) "**A Survey of Modelling Methods for Wind-Turbine Wakes and Wind Farms**" Wind Energy. Volume 2, Issue 1, 1999. Pages: 1-24.

de estos artículos se puede dar copia en formato electrónico.



Contenido:

- Presentación del grupo
- Estudio de recursos: orografía, estelas
- Predicción
- Aspectos medioambientales
- Ejemplo de un estudio de viabilidad de la energía eólica en la Comunidad de Madrid
- Estado actual de la energía eólica
- Consideraciones económicas y legislación
- Líneas relevantes de investigación
- Cursos sobre energía eólica

Predicción

- Dada la gran variabilidad del viento es necesario conocer sus características con una cierta anticipación.
- Cuando esa anticipación es del orden de horas o de días, puede servir para predecir la producción eléctrica de cada parque eólico, y de esta manera programar debidamente el funcionamiento de las otras centrales de producción de energía eléctrica.
- Normalmente, los productores de energía eólica deben predecir a las 10 horas de cada día las producciones a cada hora del día siguiente



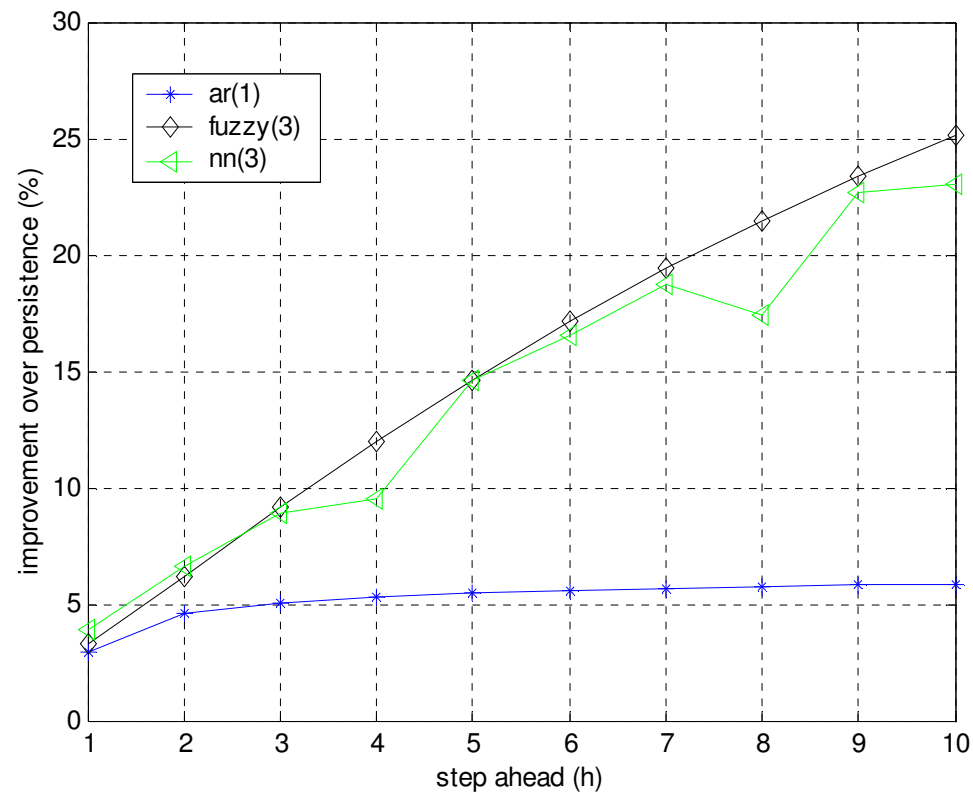
Predicción

- Para esta predicción existen métodos estadísticos, el más sencillo consiste en suponer que el viento que hay en un instante es igual al que hay en el siguiente.
- Existen métodos más sofisticados basados en correlacionar el viento que hay en un cierto instante con los que ha habido en una serie de instantes anteriores.
- También se utilizan métodos basados en redes neuronales y lógica difusa. Sin embargo, el procedimiento más atractivo y fiable, consiste en usar los resultados de las predicciones meteorológicas.
- Dichas predicciones darían con una cierta anticipación el viento geostrófico, y a partir del mismo se calcularía el viento a nivel del suelo en las inmediaciones del parque eólico
- Posteriormente, habría que aplicar uno de los procedimientos indicados para estimar el efecto orográfico local.



Caso típico de predicción con métodos estadísticos

test set from Alaiz wind farm
variable = power; exogenous variable = not implemented yet



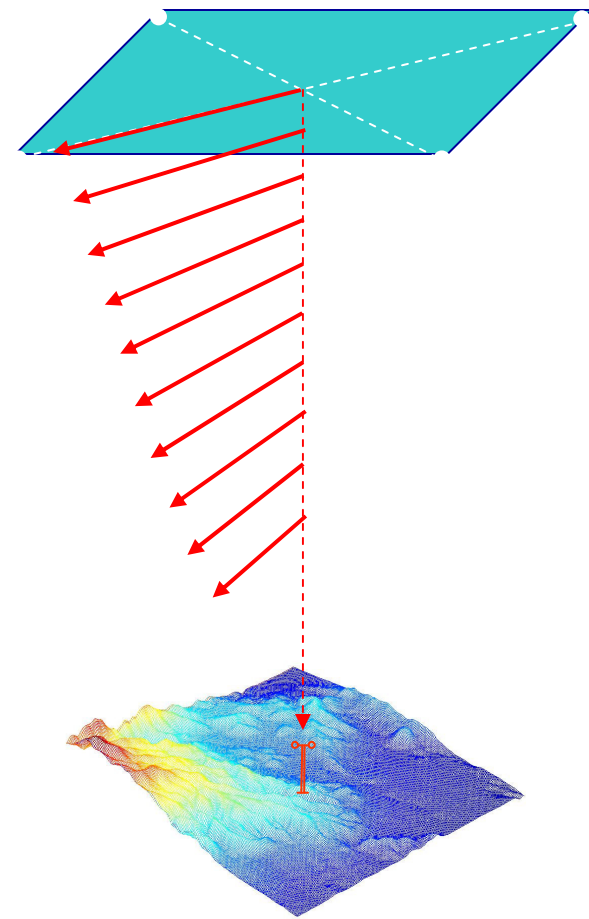
Mejoras sobre la persistencia típicas que se obtienen utilizando diferentes métodos estadísticos

Bajada típica del viento geostrófico al suelo

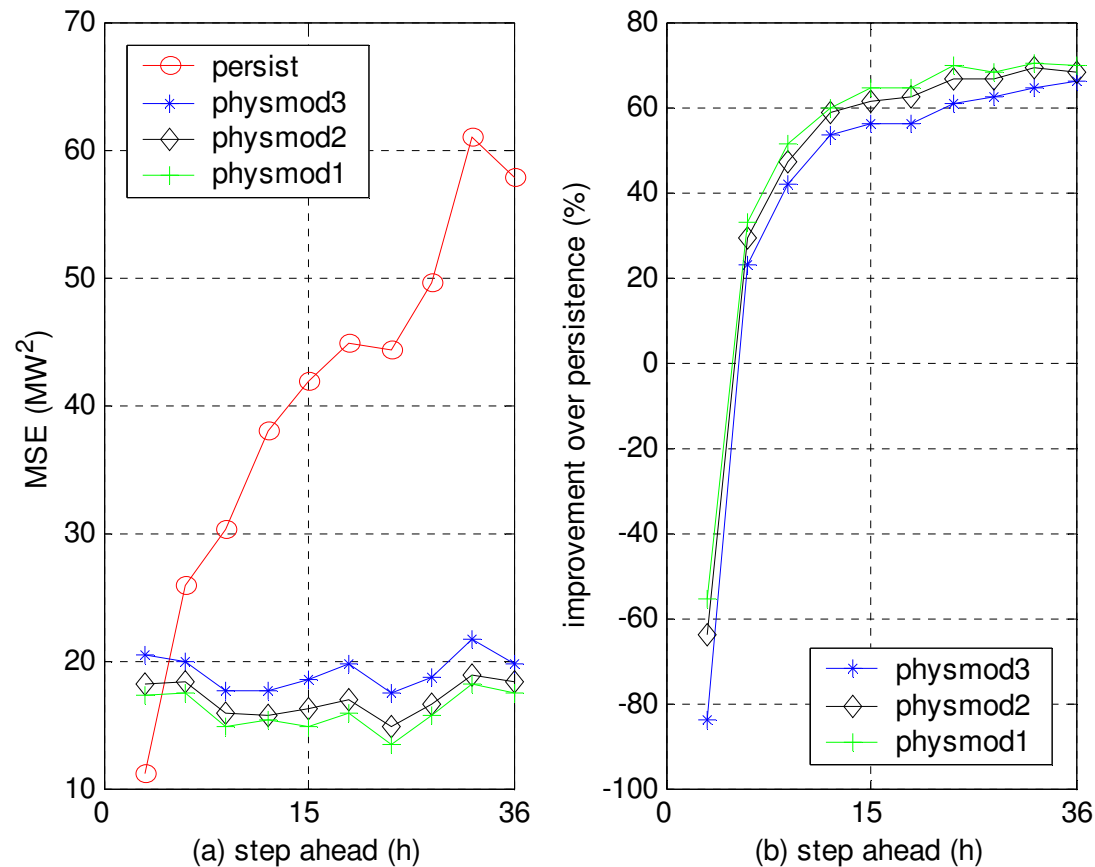
$$\frac{G}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \left[\ln \left(\frac{u_*}{fz_0} \right) - A \right]^2 + B^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{-B}{\ln \left(\frac{u_*}{fz_0} \right) - A} \right]$$

Troen and Petersen, 1989 Landberg, 2001



Casos típicos de predicción con métodos meteorológicos



Mejoras sobre la persistencia típicas que se obtienen utilizando diferentes métodos meteorológicos

Contenido:

- Presentación del grupo
- Estudio de recursos: orografía, estelas
- Predicción
- Aspectos medioambientales
- Ejemplo de un estudio de viabilidad de la energía eólica en la Comunidad de Madrid
- Estado actual de la energía eólica
- Consideraciones económicas y legislación
- Líneas relevantes de investigación
- Cursos sobre energía eólica

Evaluación de Impacto Ambiental de Parques Eólicos

Impactos potenciales de un parque eólico

Parque eólicos y legislación medioambiental

Introducción a los estudios de impacto ambiental

Estudio de impacto ambiental de un parque eólico

Evaluación de impacto ambiental de Parques Eólicos

Impactos potenciales de un parque eólico

❖ Impactos positivos

❖ Impactos negativos

- ✓ Impacto visual
- ✓ Impacto sobre las aves
- ✓ Impacto sobre la vegetación
- ✓ Impactos sobre el suelo
- ✓ Ruido
- ✓ Otros impactos

Impactos potenciales positivos de un parque eólico

- **Reducción de emisiones de CO₂**
- **Ahorro de combustibles fósiles**
- **Creación de empleo**
- **Utilización de recursos autóctonos**

Evaluación de impacto ambiental de Parques Eólicos

Impactos potenciales de un parque eólico

- ❖ Impactos positivos
- ❖ Impactos negativos
 - ✓ **Impacto visual**
 - ✓ Impacto sobre las aves
 - ✓ Impacto sobre la vegetación
 - ✓ Impactos sobre el suelo
 - ✓ Ruido
 - ✓ Otros impactos

Factores que influyen en el impacto visual

⇒ **Calidad del paisaje**

⇒ **Número de máquinas, su tamaño y diseño**

⇒ **La disposición de los aerogeneradores, etc.**

Paisaje árido



19/12/2007

Parque eólico en Fuerteventura

Paisaje agrícola



Parque eólico de Rejsby

Paisaje marino



Parque eólico de Tuno Knob (15 MW – 10 turbinas)

Paisaje Industrial



Parque eólico de Avedøre (12 Turbinas Bonus 300 kW)

19/12/2007

Central Térmica 250 MW (5 km centro de Copenhague)

Paisaje urbano



Parque eólico de La Higuera (ALBACETE)

Paisaje rural



Parque eólico de La Higuera (ALBACETE)

Impacto visual

Factores que influyen en el impacto visual

⇒ **Calidad del paisaje**

⇒ **Número de máquinas, su tamaño y diseño**

⇒ **La disposición de los aerogeneradores, etc.**

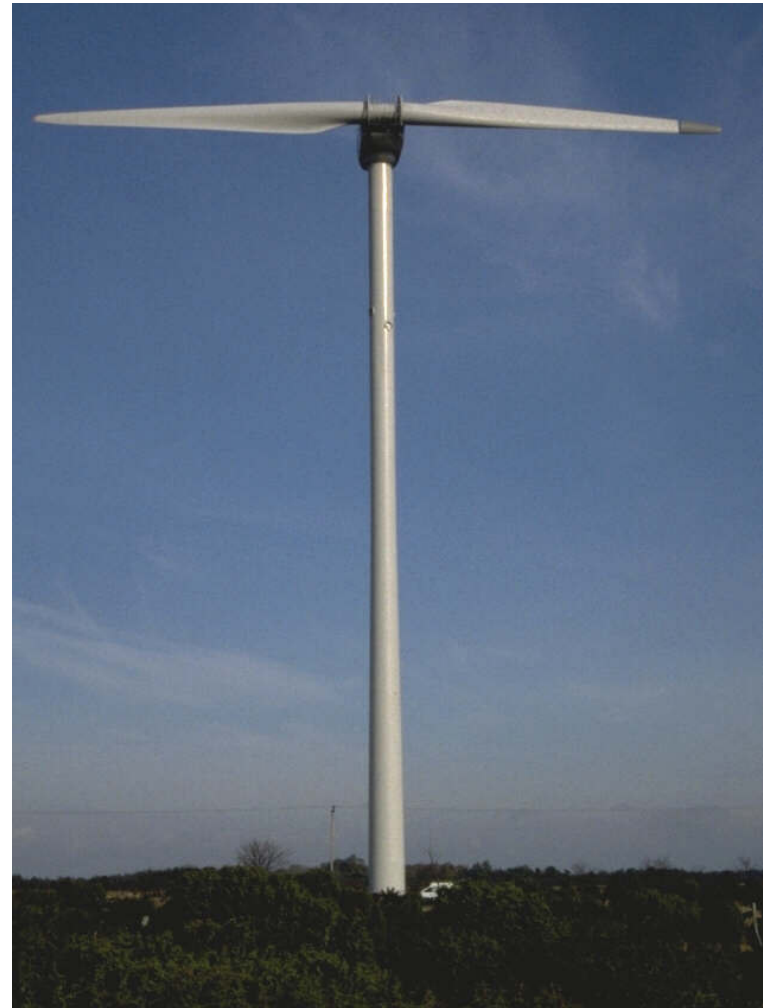
Número de aerogeneradores

País	Nº turbinas / parque
Inglaterra	10 – 20
Holanda	10 – 20
Dinamarca	10 – 35
Alemania	4 – 15
USA (Altamont Pass)	1000
España (Tarifa)	100

Uniformidad visual

- ⇒ **Un único tipo de turbina por parque eólico**
- ⇒ **Misma altura de la torre**
- ⇒ **Hileras espaciando las turbinas suficientemente**
- ⇒ **Tonalidades de gris antireflectante**
- ⇒ **Baja velocidad de giro**
- ⇒ **Todas girando**

Impacto visual: bipala o tripala



Impacto visual

Influencia del tipo de torre



Influencia de la disposición del centro de transformación



19/12/2007



74

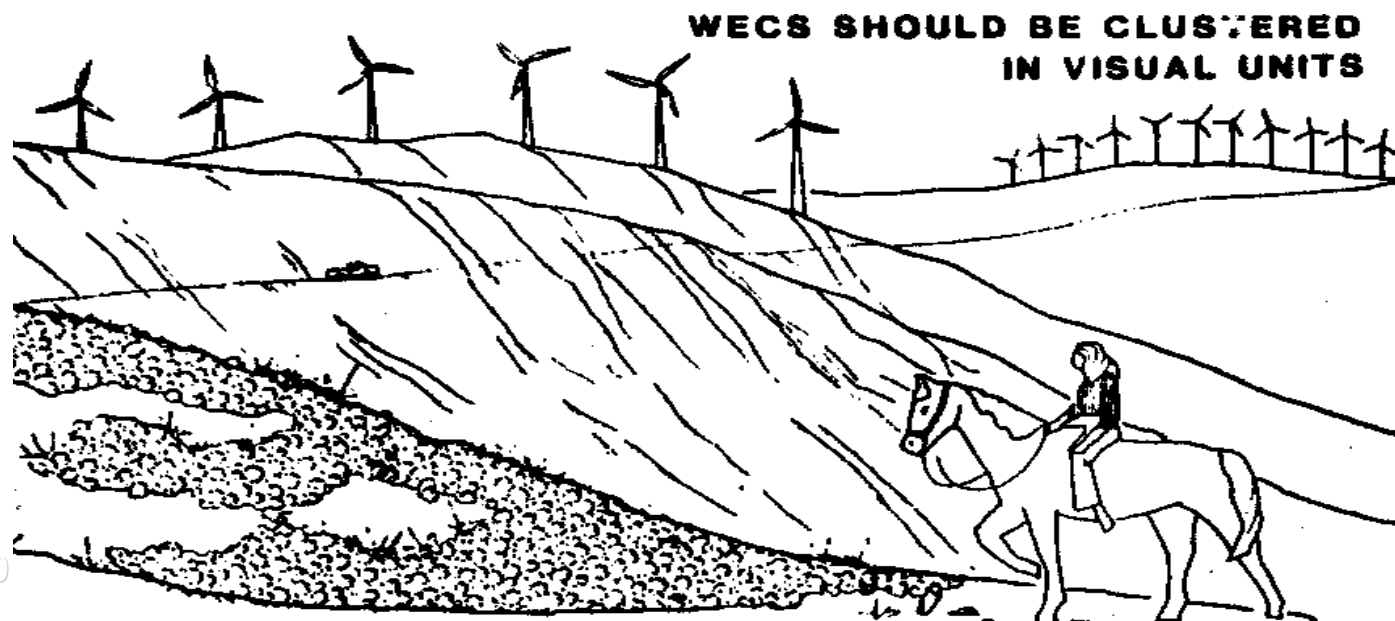
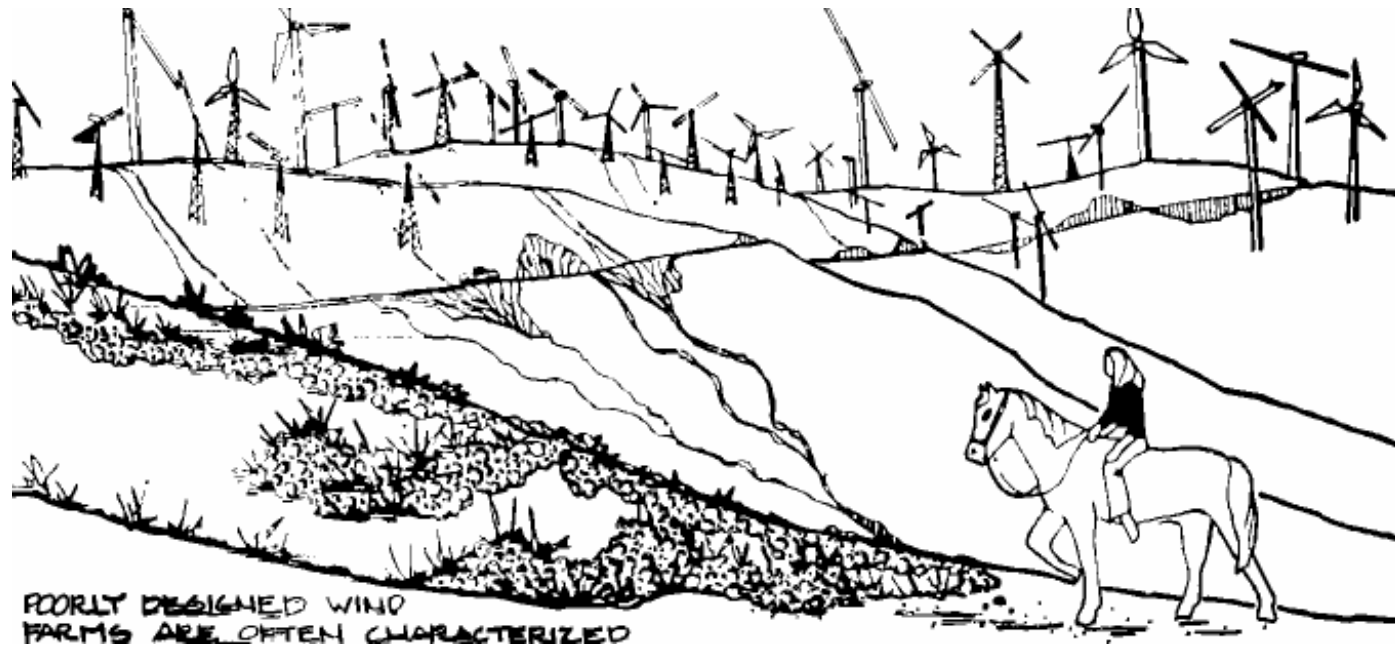
Impacto visual

Factores que influyen en el impacto

⇒ **Calidad del paisaje**

⇒ **Número de máquinas, su tamaño y diseño**

⇒ **La disposición de los aerogeneradores, etc.**



Paisaje montañoso

Parque eólico de Tarifa (CADIZ)





Parque eólico de Cabo Vilano



Parque eólico de Lanzarote



Parque eólico de Ebeltoft (Turbinas Nordtank 55 kW)

Vista lateral



Parque eólico de La Muela

Evaluación de impacto ambiental de Parques Eólicos

Impactos potenciales de un parque eólico

- ❖ Impactos positivos
- ❖ Impactos negativos
 - ✓ Impacto visual
 - ✓ Impacto sobre las aves
 - ✓ Impacto sobre la vegetación
 - ✓ Impactos sobre el suelo
 - ✓ Ruido
 - ✓ Otros impactos

Efectos perturbadores

- ⇒ **Sobre reproducción, estacionamiento y forraje**
- ⇒ **Sobre las aves migratorias**

Riesgo de colisión

- ⇒ **Determinar número de aves que colisionan**
- ⇒ **Especies afectadas**

Muerte de aves por colisión

- ⇒ **No todas las aves mueren cuando colisionan**
- ⇒ **Aves “atrapadas” por la turbulencia de las palas**
- ⇒ **La probabilidad de encontrar aves muertas depende de:**
 - **Actividad depredadora del lugar**
 - **Eficiencia del personal encargado del recuento**
 - **La vegetación y hábitat**
 - **Condiciones climatológicas**
 - **Tamaño de las aves**
- ⇒ **Aves muertas por razones distintas a la colisión**

Medidas

- ⇒ **Distancia mínima entre aerogeneradores de 120 m**
- ⇒ **Paradas técnicas temporales de molinos con mayores tasas de riesgo**
- ⇒ **Posible eliminación de molinos**
- ⇒ **Selección idónea de ubicación de parques y de aerogeneradores**
- ⇒ **Manejo correcto de las carroñas en el entorno de los parques eólicos**
- ⇒ **Señalización de tendidos eléctricos**

Evaluación de impacto ambiental de Parques Eólicos

Impactos potenciales de un parque eólico

- ❖ Impactos positivos
- ❖ Impactos negativos
 - ✓ Impacto visual
 - ✓ Impacto sobre las aves
 - ✓ Impacto sobre la vegetación
 - ✓ Impactos sobre el suelo
 - ✓ Ruido
 - ✓ Otros impactos

Impacto sobre la vegetación

❖ Causas del impacto:

- Eliminación en la superficie directamente ocupada
- Dificultad de desarrollo por deposición de polvo

❖ Depende de la valoración de las especies afectadas

- Complejidad
- Naturalidad
- Singularidad
- Fragilidad – Reversibilidad

❖ Medidas correctoras:

- Retirada, almacenamiento y reposición
- Limpieza mediante riego

Evaluación de impacto ambiental de Parques Eólicos

Impactos potenciales de un parque eólico

❖ Impactos positivos

❖ Impactos negativos

✓ Impacto visual

✓ Impacto sobre las aves

✓ Impacto sobre la vegetación

✓ Impactos sobre el suelo

✓ Ruido

✓ Otros impactos

Impacto sobre el suelo

❖ Tipos de alteraciones:

- Ocupación
- Movimientos de tierra
- Compactación
- Activación de procesos erosivos
- Contaminación por vertidos

Minimización

- Optimización de la ocupación del terreno
- Evitar crear condiciones de erosión
- Ajuste de accesos a curvas de nivel
- Gestión adecuada de los residuos



Evaluación de impacto ambiental de Parques Eólicos

Impactos potenciales de un parque eólico

❖ Impactos positivos

❖ Impactos negativos

✓ Impacto visual

✓ Impacto sobre las aves

✓ Impacto sobre la vegetación

✓ Impactos sobre el suelo

✓ Ruido

✓ Otros impactos

Fuentes de ruido en un aerogenerador:

Ruido mecánico

- ⇒ **Fuentes: Multiplicador, generador, ventiladores, bombas, compresores, motores, etc.**
- ⇒ **Depende de la calidad de mecanizados, etc.**
- ⇒ **No se suele emplear aislamiento acústico**
- ⇒ **Formas de reducir el ruido mecánico:**
 - ❑ **Cajas de engranajes silenciosas**
 - ❑ **Evitar amplificaciones**

Fuentes de ruido en un aerogenerador:

Ruido aerodinámico

Producido por el movimiento de las palas

❖ Fuentes de ruido:

- ✓ **Ruido en el borde de salida de la pala**

Interacción entre turbulencia y parte posterior de la pala

750 – 2000 Hz (se percibe como un silbido)

- ✓ **Ruido en la punta de la pala**

Interacción entre turbulencia y punta de pala

- ✓ **Efectos de parada**

Impacto por ruido: fase de explotación

Nivel de sonido dB(A)		Fuente acústica
10	Zona de seguridad	Caída de hojas
20		Susurros
30		Dormitorio
40		Música suave
50		AEROGENERADOR 200 m
60		Oficina
70		Coche
80		Calle concurrida
90	Zona peligrosa	Camión pesado
100		Industria
110		Perforadora de roca
120	Umbral de dolor	Avión de turbohélice
130	Zona perjudicial	Remachadora
140		Avión a reacción
150		

Evaluación de impacto ambiental de Parques Eólicos

Impactos potenciales de un parque eólico

- ❖ Impactos positivos
- ❖ Impactos negativos
 - ✓ Impacto visual
 - ✓ Impacto sobre las aves
 - ✓ Impacto sobre la vegetación
 - ✓ Impactos sobre el suelo
 - ✓ Ruido
 - ✓ Otros impactos

Impacto por interferencias electromagnéticas

- ⇒ **Tipos de perturbación: Reflexión y Difracción**
- ⇒ **Interferencias mayores en la región detrás de las turbinas**
- ⇒ **Impacto periódico debido al movimiento de las palas**
- ⇒ **Métodos de calculo analítico: muy complicados**
- ⇒ **Señales más vulnerables: TV**
- ⇒ **Soluciones**
 - ❑ **Ligera corrección de antenas existentes**
 - ❑ **Instalar transmisor auxiliar**
 - ❑ **Comunicación por cable**

Contenido:

- Presentación del grupo
- Estudio de recursos: orografía, estelas
- Predicción
- Aspectos medioambientales
- Ejemplo de un estudio de viabilidad de la energía eólica en la Comunidad de Madrid
- Estado actual de la energía eólica
- Consideraciones económicas y legislación
- Líneas relevantes de investigación
- Cursos sobre energía eólica

Estudio del potencial eólico en la Comunidad de Madrid



- La comunidad de Madrid está en el centro de España
- Tiene una extensión de 8028 km² y una población de 5 millones
- No tiene ningún parque eólico instalado, aunque si hay muchos en regiones circundantes



Estudio del potencial eólico en la Comunidad de Madrid

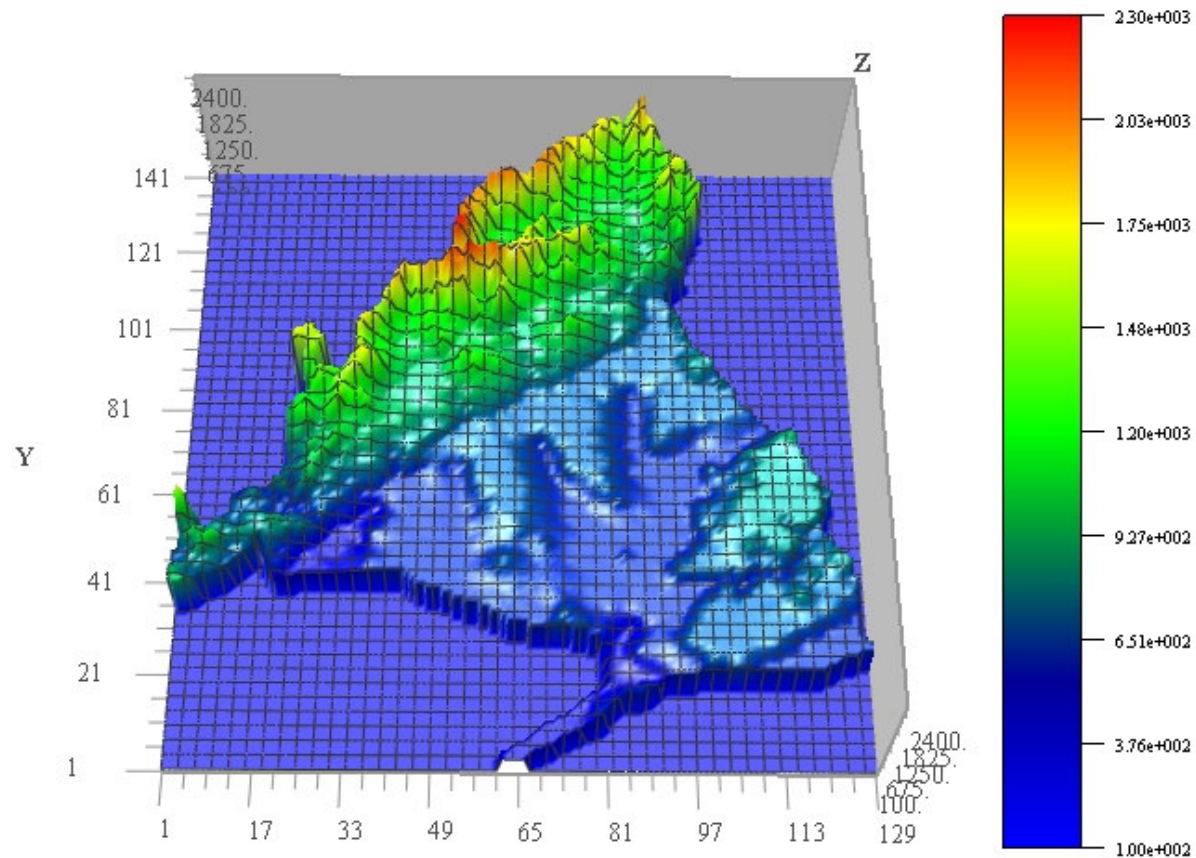
Códigos utilizados WASP, UPMORO y UPMPARK.

- Datos de entrada:

- Orografía y rugosidad del terreno
- Prototipos de máquinas, 2 MW de potencia
- Prototipos de parques separación entre máquinas 11 Ø
- Datos de entrada de 4 estaciones meteorológicas
- Índice RIX para elegir la estación más apropiada.



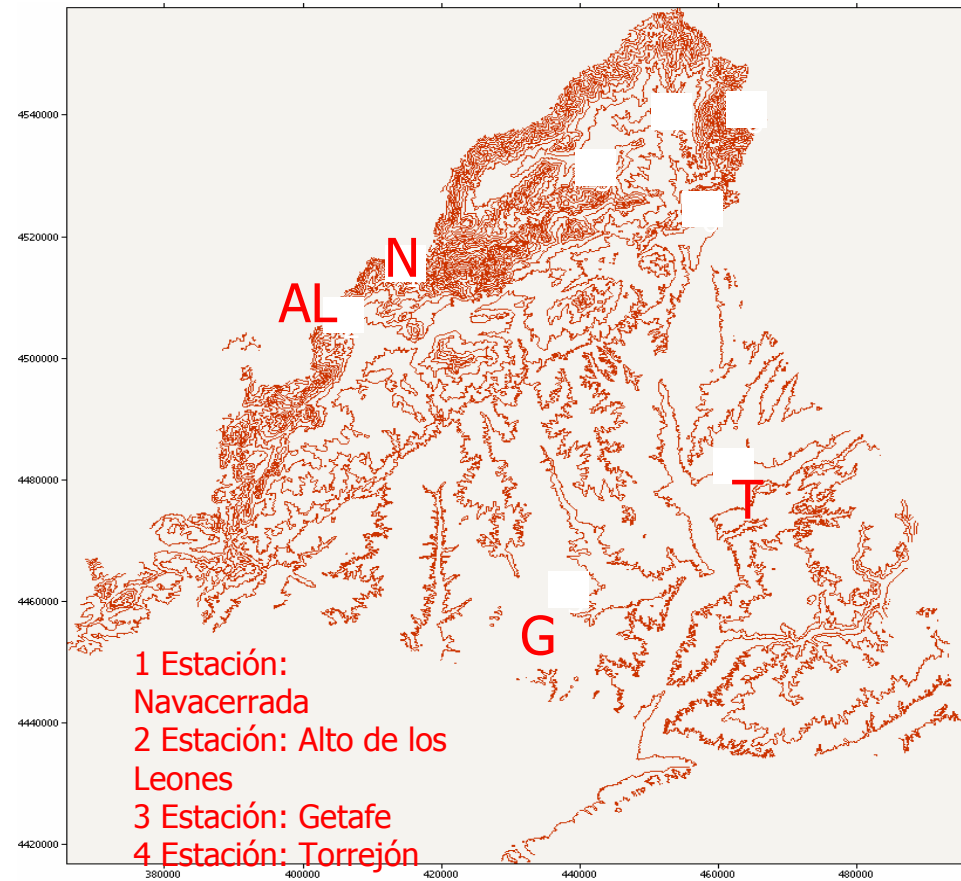
Estudio del potencial eólico en la Comunidad de Madrid



Mapa digitalizado de toda la CAM con 105.000 puntos líneas de nivel cada 100m



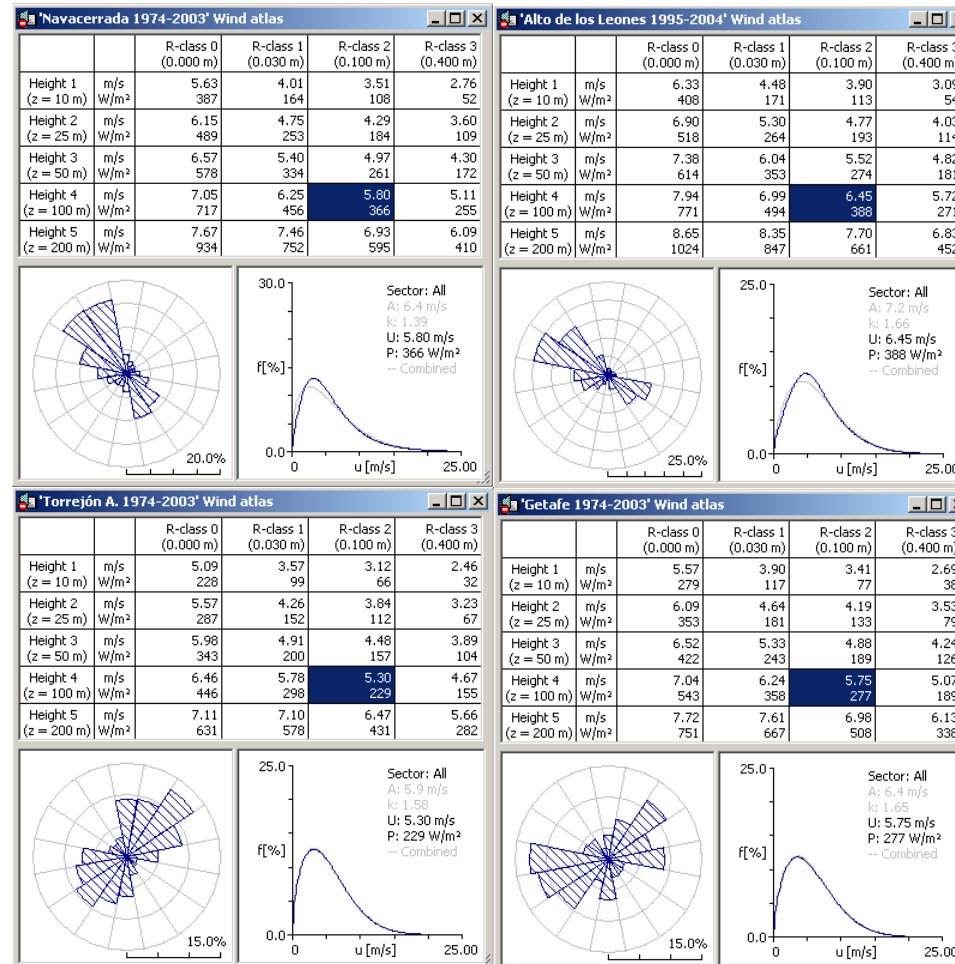
Estudio del potencial eólico en la Comunidad de Madrid



Datos de cuatro estaciones meteorológicas más apropiadas



Estudio del potencial eólico en la Comunidad de Madrid

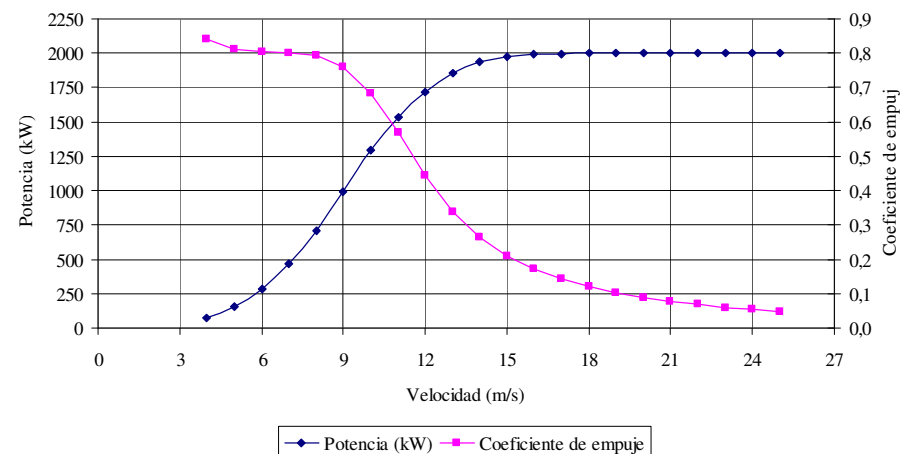
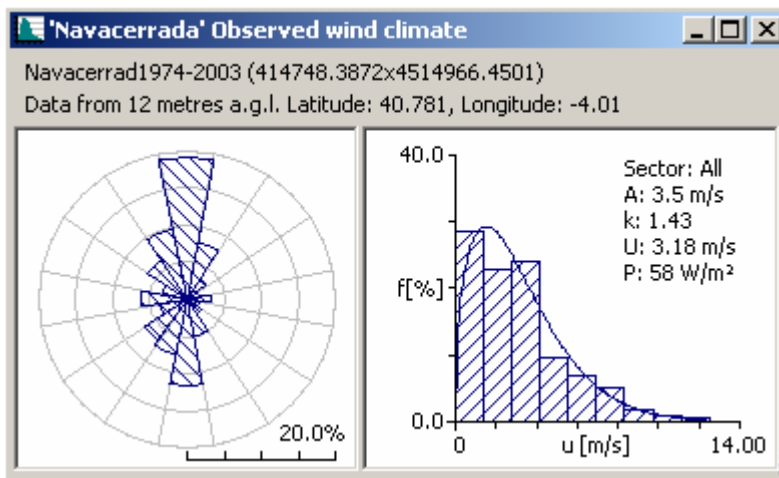


Datos de cuatro estaciones meteorológicas más apropiadas

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



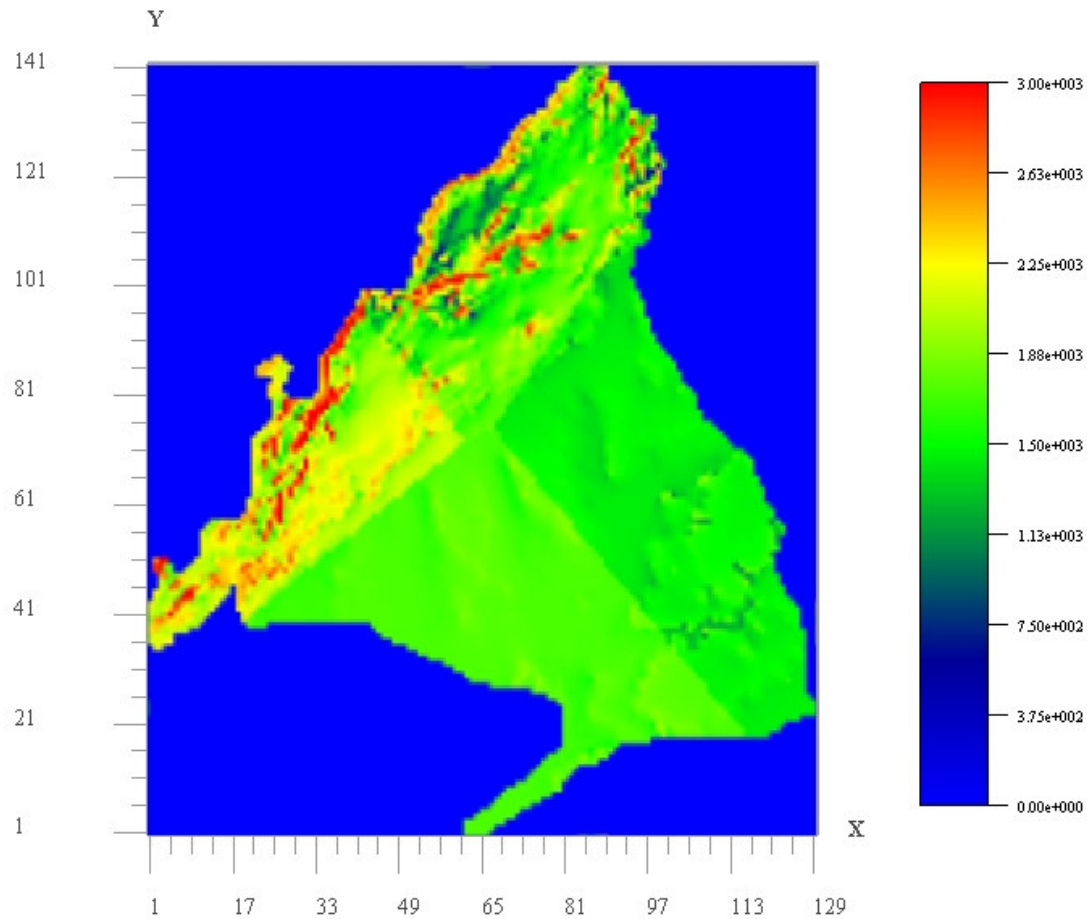
Estimación del recurso eólico a partir de los cálculos orográficos y de estelas combinados con las rosas de los vientos y las curvas de potencia de las aeroturbinas



19/12/2007



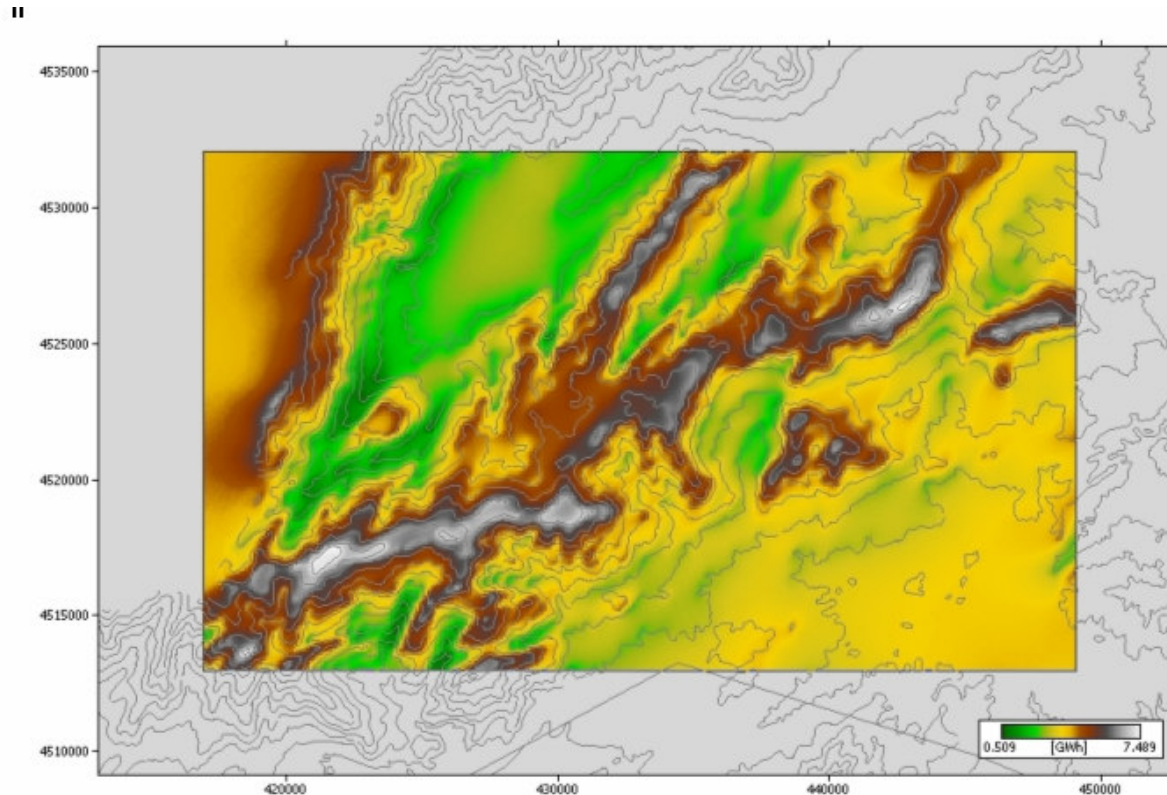
Estudio del potencial eólico en la Comunidad de Madrid



Producción en horas equivalentes por año



Estudio del potencial eólico en la Comunidad de Madrid



Detalle de la producción en horas equivalentes por año



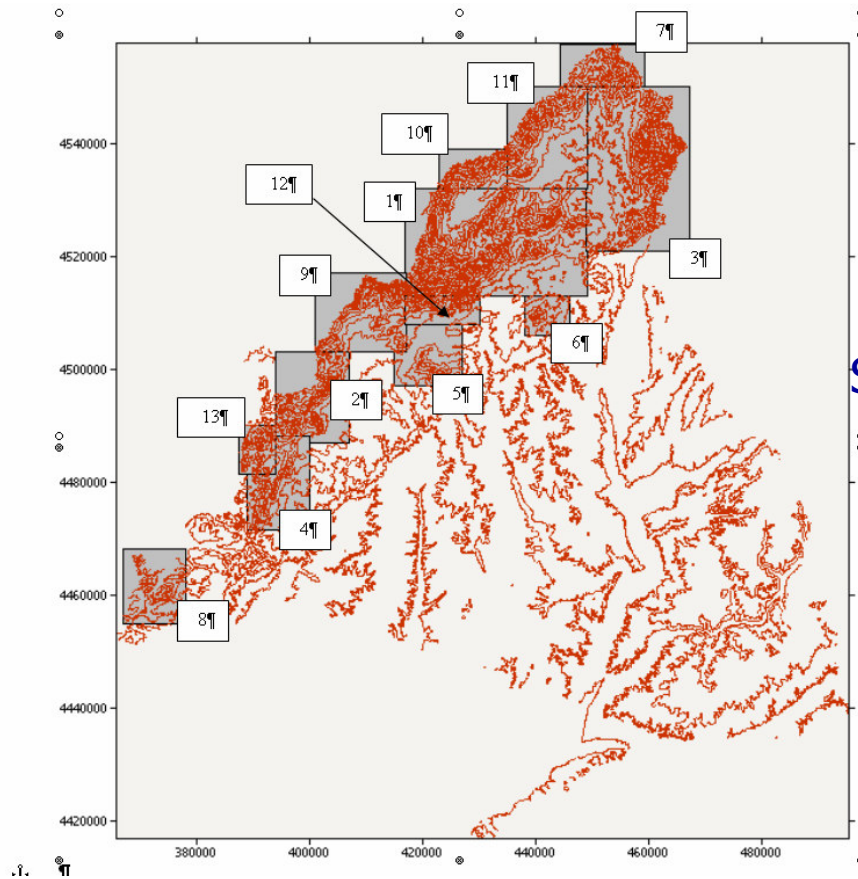
19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



104

Estudio del potencial eólico en la Comunidad de Madrid



Se identifican 13 zonas de interés



19/12/2007



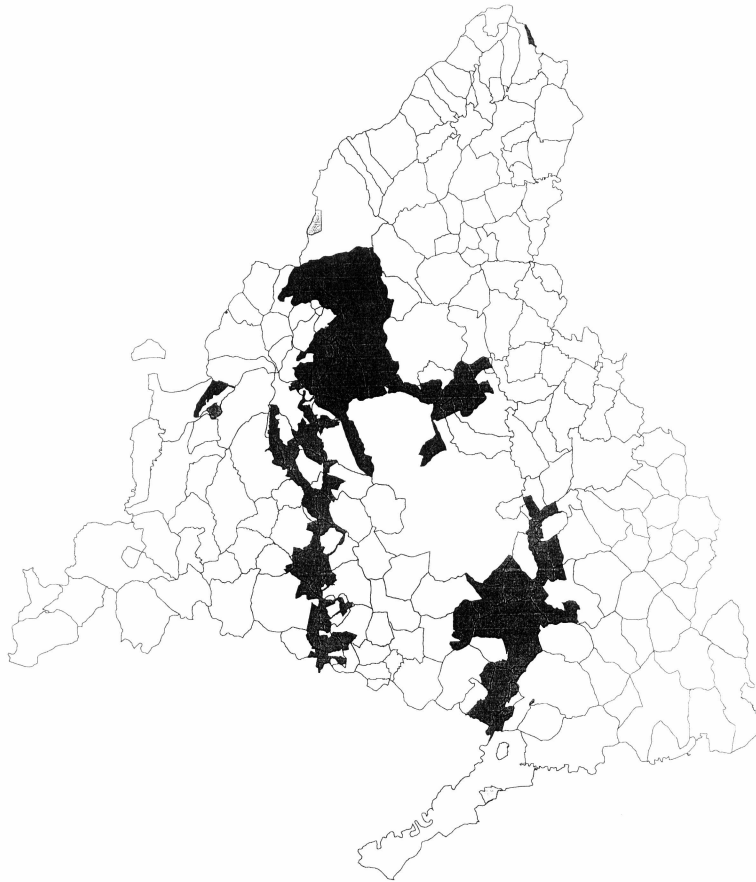
105

Condicionantes al desarrollo del potencial eólico en la Comunidad de Madrid

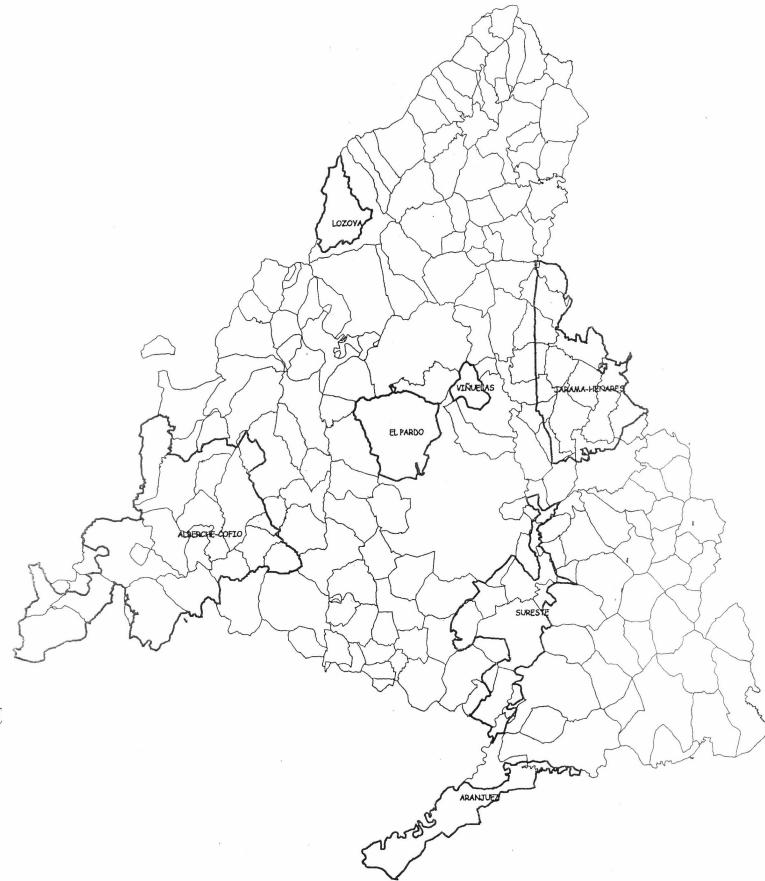
- Red eléctrica de evacuación
- Accesibilidad del terreno
- Población
- Espacios protegidos
 - * ZEPAS
 - * Espacios Naturales
 - * Lugares de importancia comunitaria LIC
 - * Montes preservados



Condicionantes al desarrollo del potencial eólico en la Comunidad de Madrid



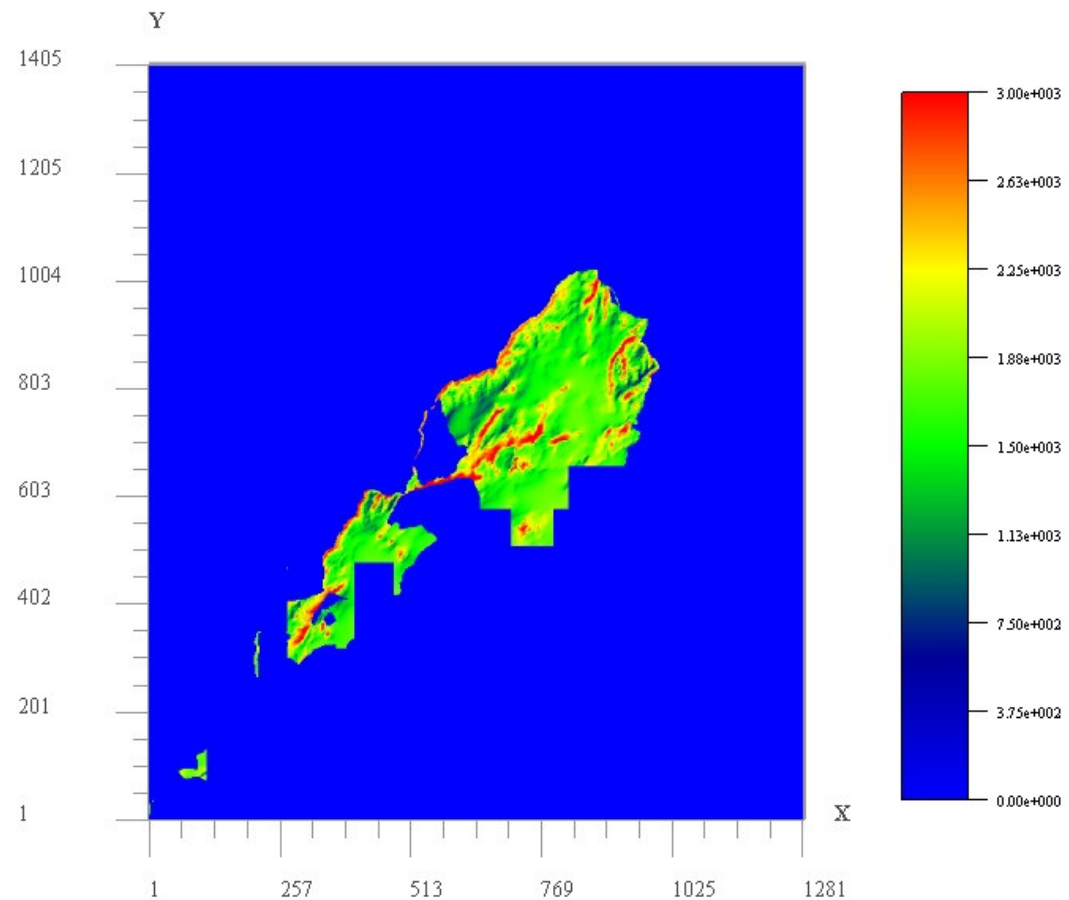
Espacios Naturales
Protegidos



Zonas ZEPAs



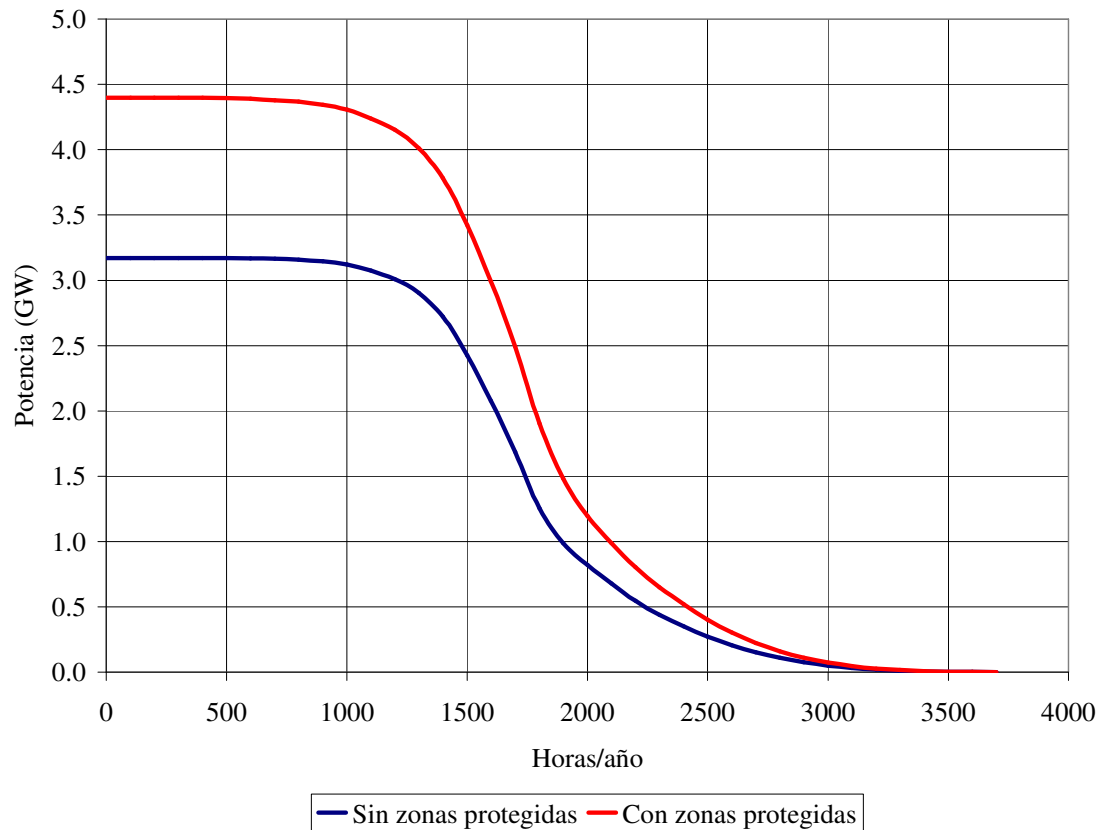
Potencial eólico instalable en la Comunidad de Madrid



Horas anuales equivalentes en zonas no excluidas y de interés



Potencial eólico instalable en la Comunidad de Madrid



Potencia nominal máxima instalable en la CAM en función del número de horas/año.



Potencial eólico instalable en la Comunidad de Madrid

- De los resultados obtenidos para las zonas que excluyen las áreas protegidas medioambientalmente, se deduce que en las zonas rentables económicamente desde el punto de vista eólico, factor de utilización superior a 0.29 (2500horas/año), **la potencia instalable en la CAM sería de unos 200 MW**. La extensión en la que se podría elegir situar los aerogeneradores sería de hasta 140 km².
- Con un rendimiento más dudoso, factor de utilización superior a 0.24 (2100horas/año), **la potencia nominal llegaría a 500 MW** en una extensión de hasta 340km².
- Si no se excluyesen los espacios protegidos, las zonas rentables económicamente con un factor de utilización superior a 0.29 subirían hasta los 200 km², pudiendo instalarse 300 MW, y para un rendimiento menor, factor de utilización superior a 0.24, la potencia nominal llegaría a 700 MW en una extensión de hasta 500 km².



Potencial eólico instalable en la Comunidad de Madrid

-También hay que resaltar que las mejores áreas eólicas, una vez descontadas las zonas ZEPAs y los Espacios Naturales Protegidos, pueden interferir con el LIC de la *Cuenca del Río Lozoya y de la Sierra Norte*. Por tanto, **el desarrollo eólico de gran parte de la CAM quedaría supeditado a las restricciones impuestas para su conservación**. En caso de que esta zona (que es además para la que se han pedido todas las licencias de parques hasta el momento) quedase excluida, el desarrollo de la energía eólica en la Comunidad se vería bastante afectado, y las previsiones anteriores reducidas de forma importante



Potencial eólico instalable en la Comunidad de Madrid

-Como parte importante de esta promoción se propone situar 5 estaciones de medición en las localizaciones en las que se prevé que se van a instalar parques eólicos.

-Durante los tres años siguientes se propone continuar con el mantenimiento y obtención de datos. De esta manera se ayudaría indirectamente al futuro promotor de ese parque, al que se le ahorrarían los gastos correspondientes a esta primera instalación de las torres. Además, se aumentaría el tiempo de medida, ya que un promotor particular sólo podría comenzar sus trabajos de instalación de las torres de medición a partir de la correspondiente autorización oficial.



Potencial eólico instalable en la Comunidad de Madrid

- El primer año del plan sería necesario dedicarlo a la búsqueda de los emplazamientos concretos de las estaciones, obtención de permisos y trámites para la adquisición e instalación del equipo.
- Con los datos de medida, de al menos cuatro años, y mapas más detallados, se debería hacer un estudio más completo de las zonas de interés utilizando modelos de cálculos más precisos y más apropiados a terrenos con orografía compleja.



Contenido:

- Presentación del grupo
- Estudio de recursos: orografía, estelas
- Predicción
- Aspectos medioambientales
- Ejemplo de un estudio de viabilidad de la energía eólica en la Comunidad de Madrid
- Estado actual de la energía eólica
- Consideraciones económicas y legislación
- Líneas relevantes de investigación
- Cursos sobre energía eólica

Energía eólica- Estado actual

- Crecimiento espectacular
- Para finales de 2000 en España había 2228 MW instalados, siendo el tercer país del mundo con potencia eólica instalada
- En el año 2006 España pasó a ser el 2º país, después de Alemania con 11730 MW instalados, lo que representa un 426 % de incremento en seis años
- En todo el mundo había 74335 MW instalados a finales de 2006



Energía eólica- Estado actual (Datos AEE)

- Crecimiento respecto a 2005 del 15,8 %
- Durante 2006 se generaron 22.200 GWh cubriendo el 8,8% de la demanda, un 6,48% más que el año anterior
- Punta de producción de 8142 MW el 8 de diciembre, lo que supuso un 31% de la producción total en ese momento
- El objetivo para 2011 es llegar a 20.200 MW con una producción de 46 TWh anual, que representaría el 13,5 % de la demanda de energía eléctrica en ese momento



Energía eólica- Estado actual

-Según un estudio del World Watch Institute el número de puestos de trabajo producido por cada TWh anual de energía eólica es de 542, mientras que en una clásica instalación térmica es de unos 120.

-Antiguamente, la disponibilidad de las máquinas, es decir el tiempo que no estaban averiadas o en mantenimiento, era del 60%, hoy es del 97%.

-El coste de la energía producida es cinco veces menor que hace 20 años



Energía eólica- Estado actual

Outstanding figures in wind energy sector in Spain (updated at the end of the year 2005)

General	
Overall Capacity Installed	9,781 MW
Accumulated Investment	€ 8,774 m
Energy Sold	21,000 GWh
Electricity Market Share	7.5%
Equivalent Consumption	6 million households

Social Benefits
More than 550 companies involved in the sector.
Accumulated Employment
Design, Construction and Erection.
127,000 men-year Direct 31,750 Non Direct 95,250
Operation and Maintenance.
1,950 permanent jobs (all direct)

Environmental Issues	
POLLUTANT	AVOIDED QUANTITY (t) *
SO ₂	144,500
NO _x	79,800
CO ₂	19,690,000

* In relation to electricity generated by means of national hard coal-fired power plants [CIEMAT and CNE (2001)]



19/12/2007

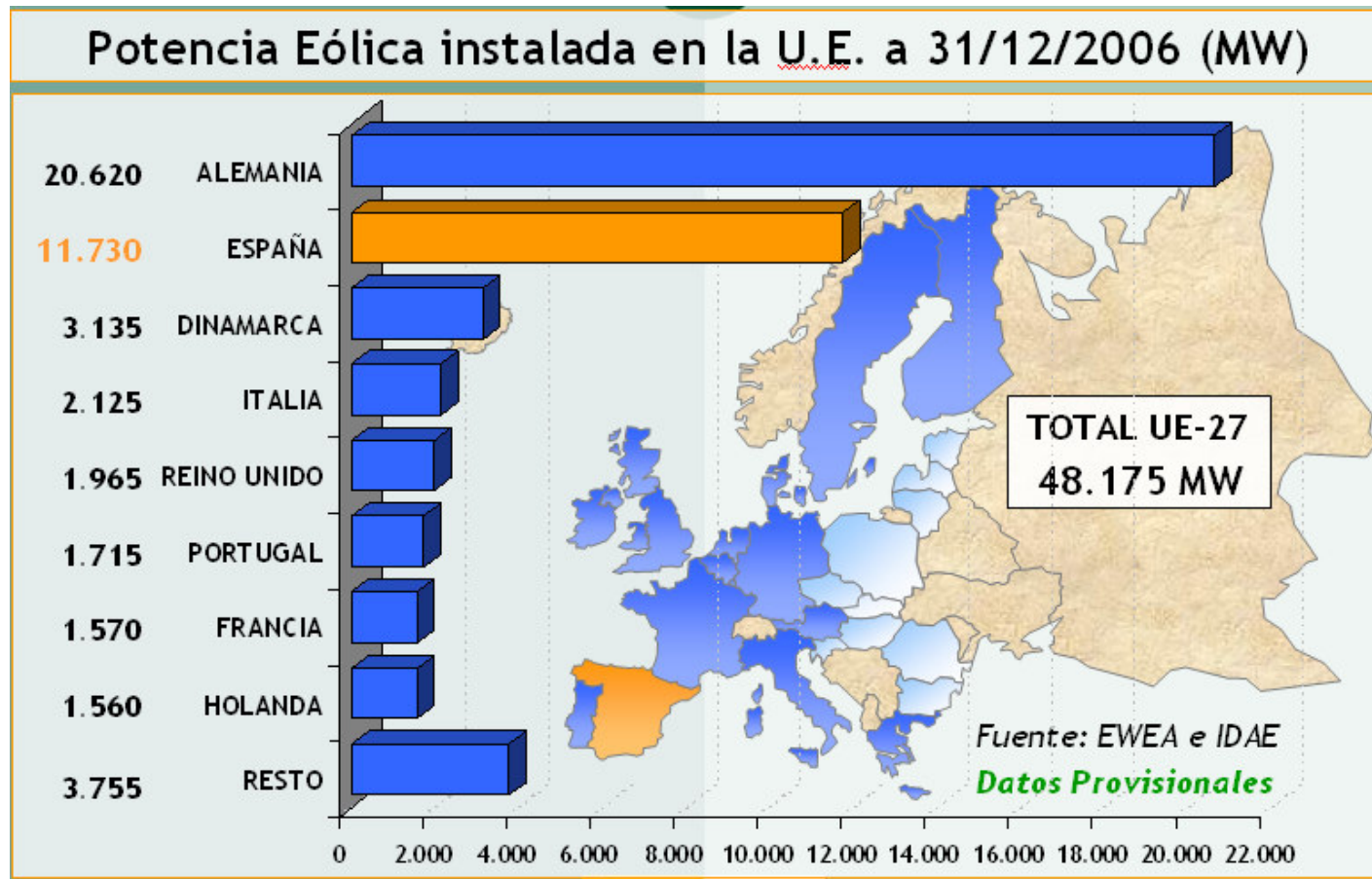
Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



118

Energía eólica- Estado actual

POTENCIA EOLICA (MW) INSTALADA EN LA UE A 31/12/2006 (IDAE)



19/12/2007

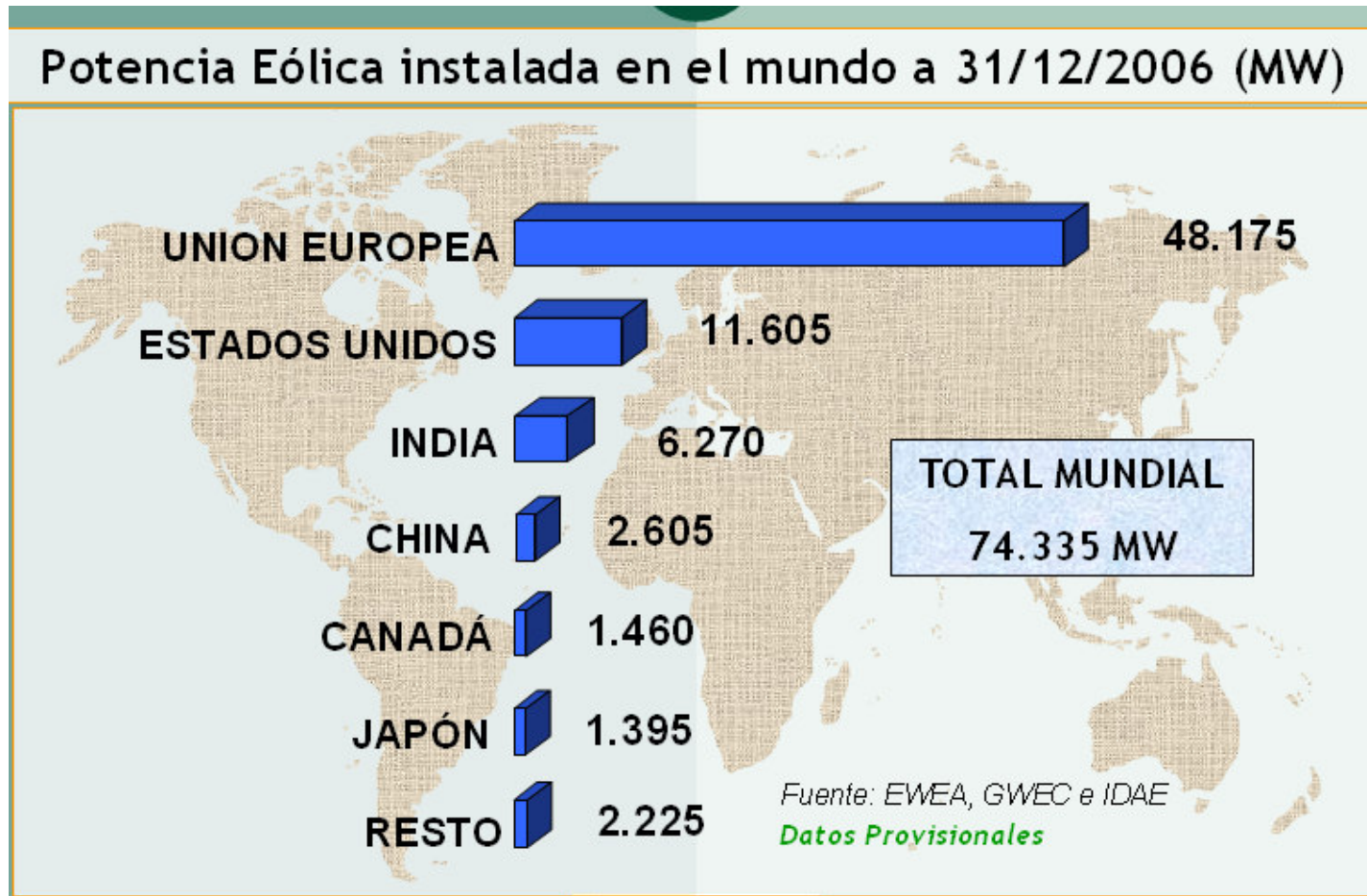
Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



119

Energía eólica- Estado actual

POTENCIA EOLICA (MW) INSTALADA EN EL MUNDO A 31/12/2006 (IDAE)



19/12/2007

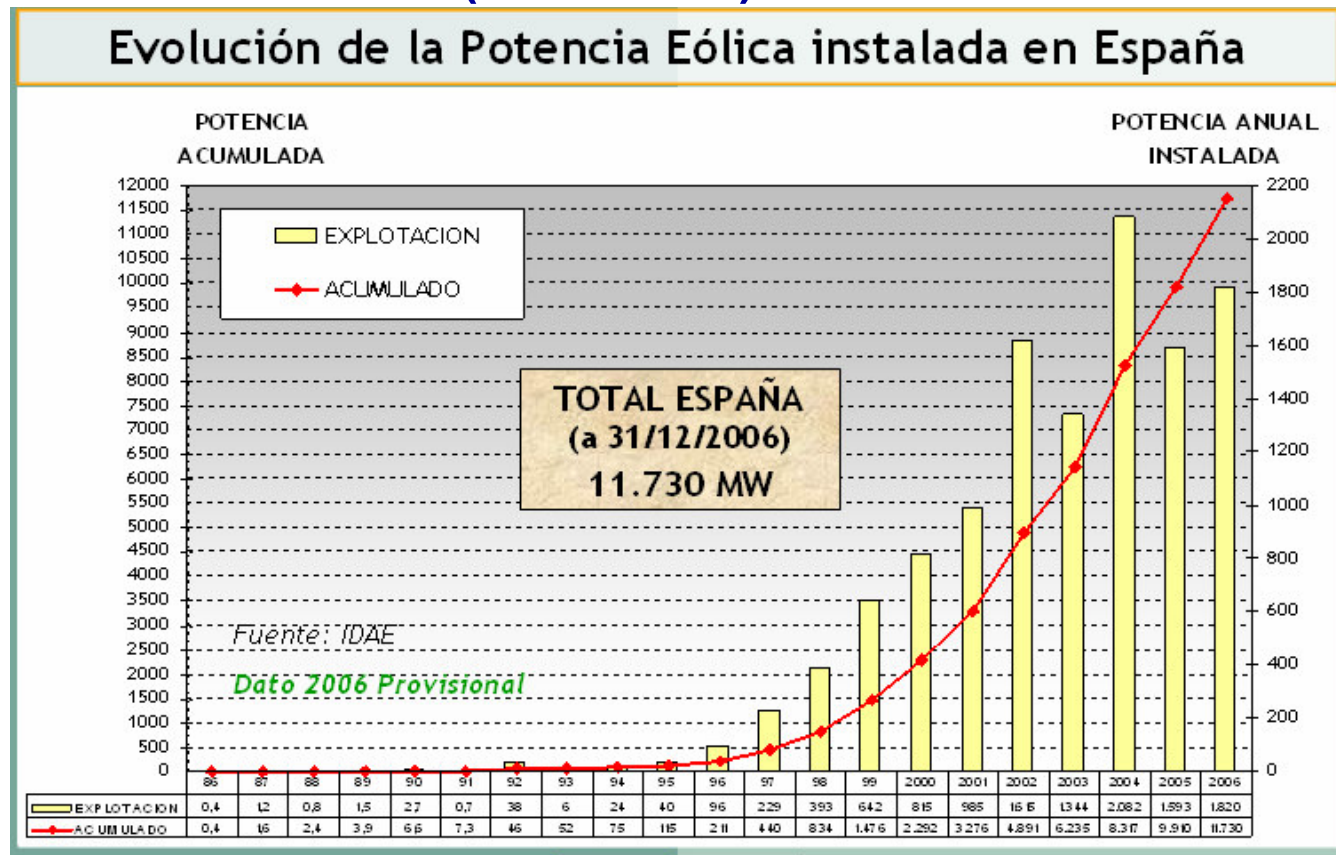
Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



120

Energía eólica- Estado actual

EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA EÓLICA (MW) EN ESPAÑA (IDAE 2006)



19/12/2007

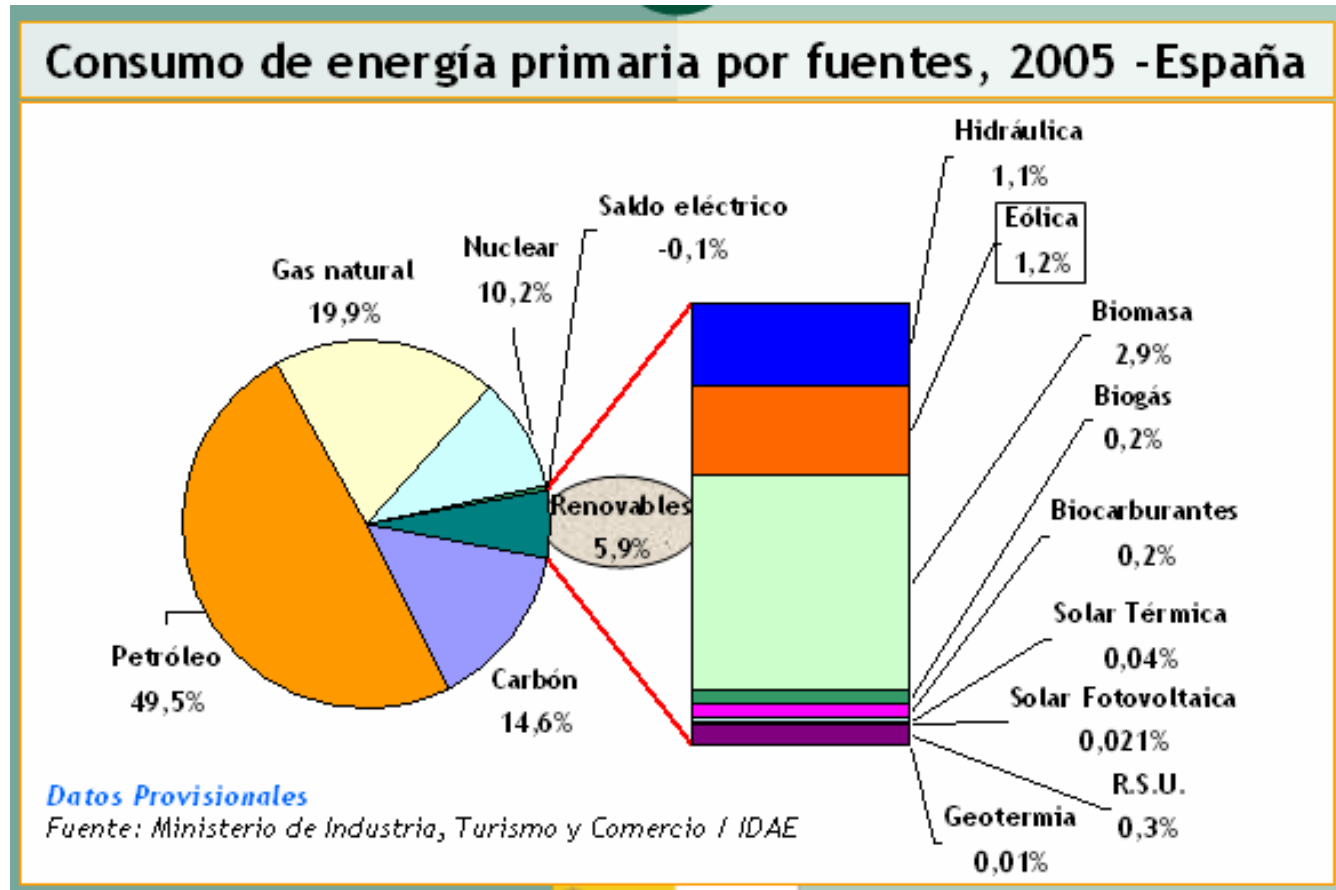
Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



121

Energía eólica- Estado actual

Consumo de energía primaria por fuentes 2005 (IDAE)



19/12/2007

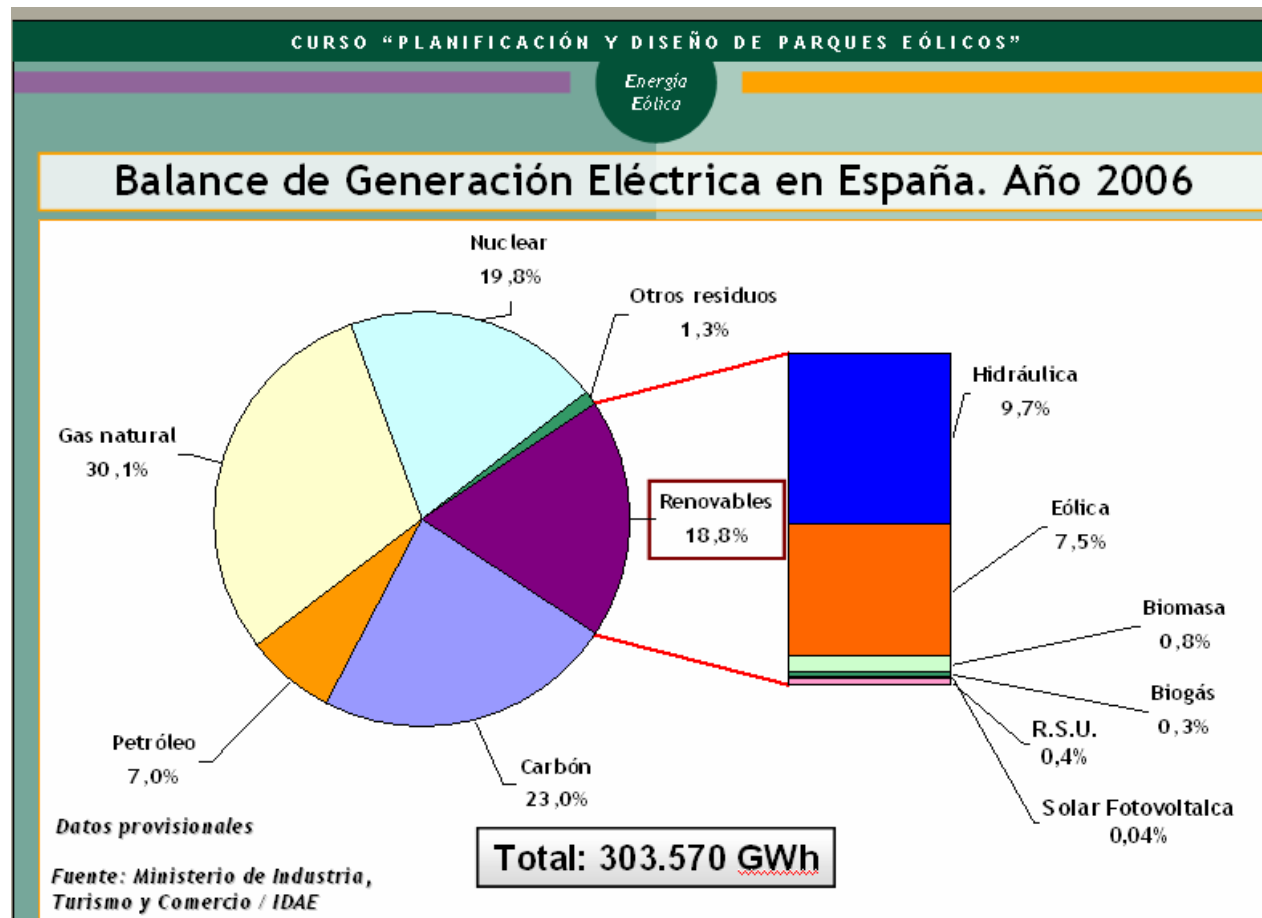
Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



122

Energía eólica- Estado actual

Consumo de energía eléctrica por fuentes 2006 (IDAE)



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM

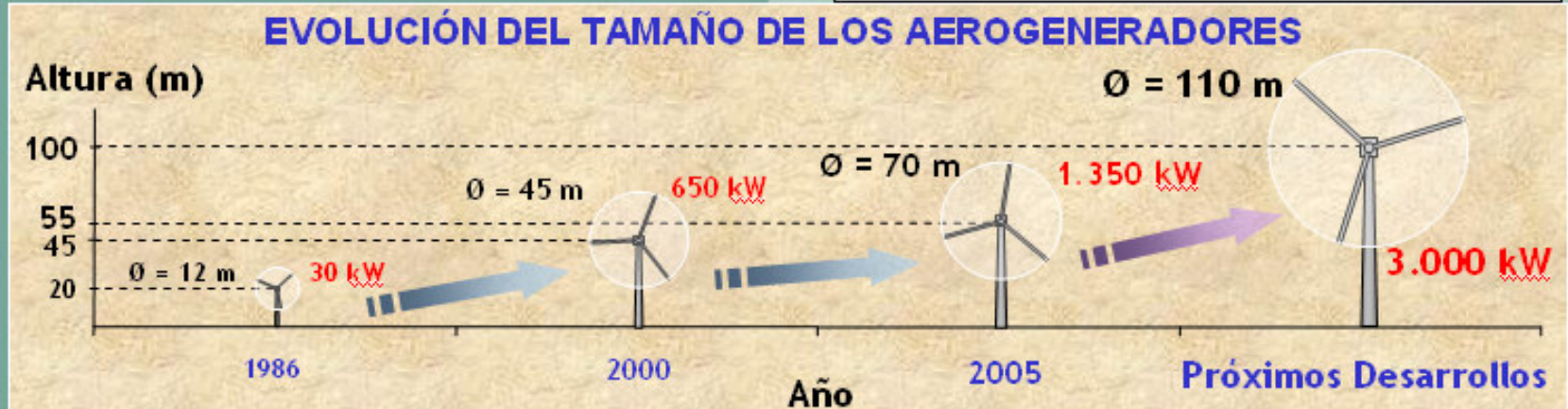
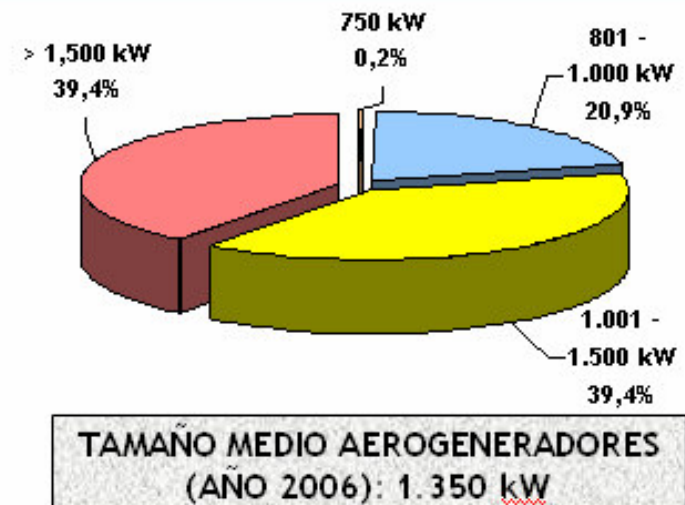


123

Energía eólica. Situación tecnológica a 31-12-06 (IDAE).

Líneas de innovación prioritaria en España

- Aumento de potencia unitaria. Incorporación de nuevos materiales.
- Mejora de la calidad de energía, estabilidad de red y soporte de fallos.
- Adaptación de los aerogeneradores a las condiciones del mar.



19/12/2007

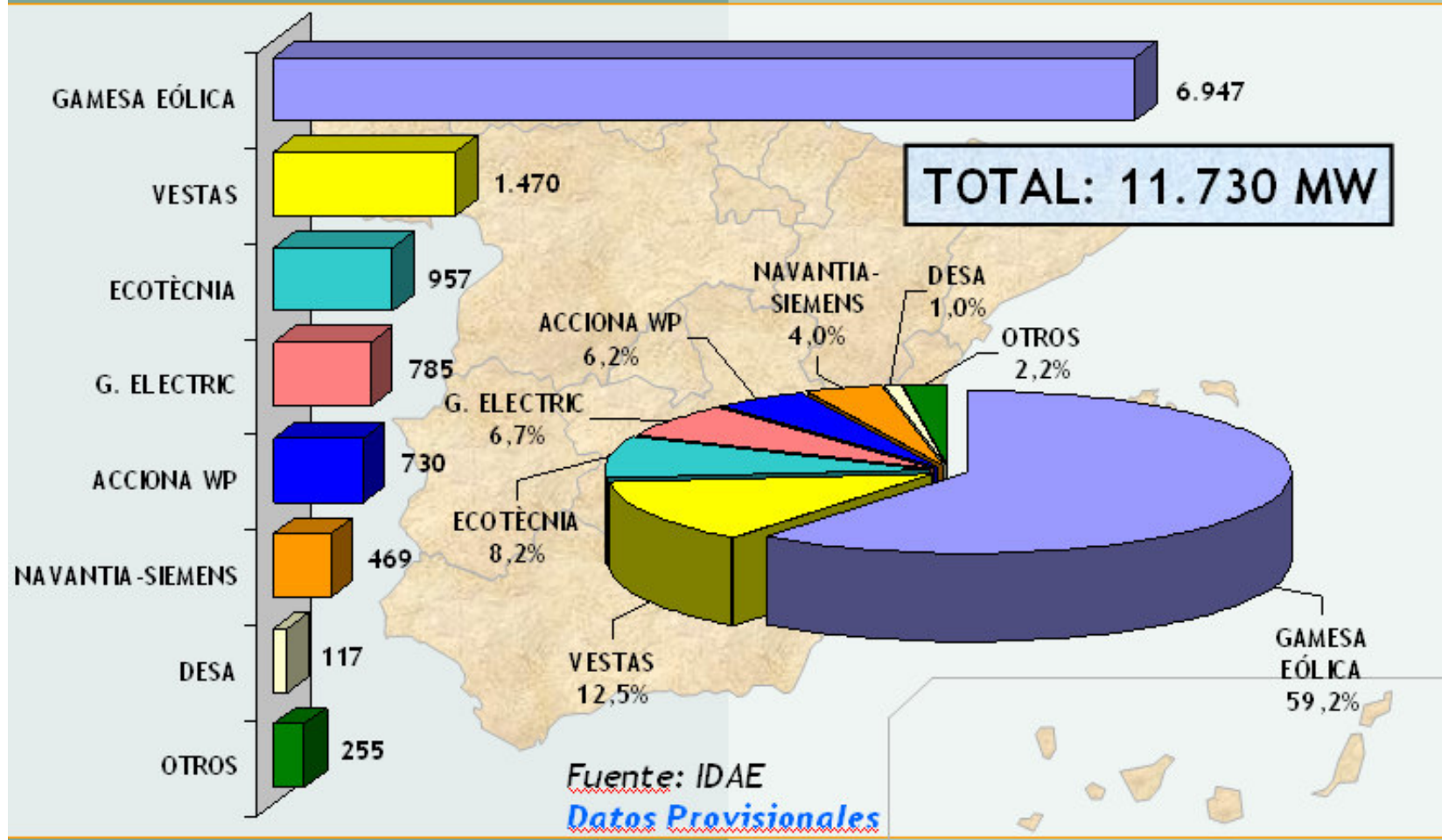
Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



124

Energía eólica. Situación tecnológica a 31-12-06 (IDAE).

Potencia eólica instalada en España por fabricantes (31/12/2006)



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



125

Energía eólica. Situación tecnológica a 31-12-06 (IDAE).

Situación tecnológica en España (año 2006)

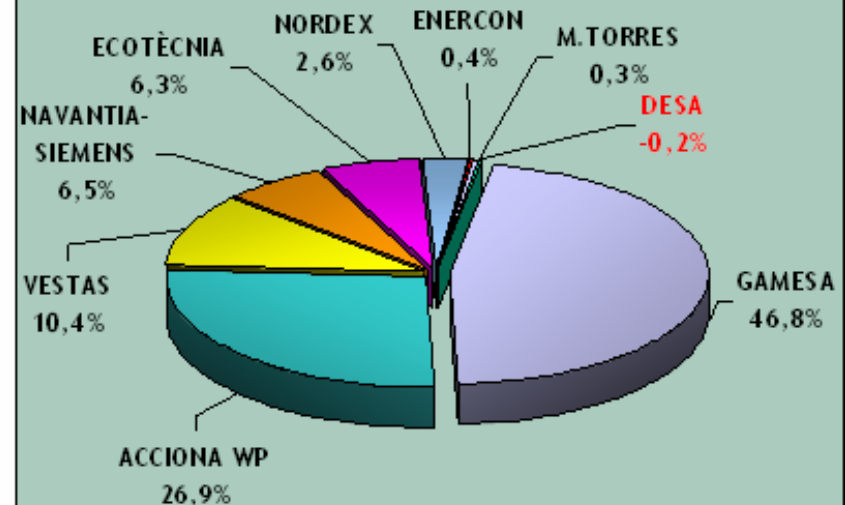
El 97% de los aerogeneradores instalados en 2006 fueron suministrados por fabricantes implantados en España:

- ✓ Tecnología Nacional (80%):
GAMESA, ECOTECNIA(*), ACCIONA WP, M. TORRES
- ✓ Tecnología Foránea (14%):
VESTAS, NORDEX, ENERCON
- ✓ Transferencia de tecnología (7%):
NAVANTIA-SIEMENS

Potencia media unitaria en 2006:
≈ 1.350 kW (1.357 máquinas)

Tamaño medio de parque: ≈ 27 MW

(*) ECOTECNIA fue adquirida a finales de junio/07 por la francesa ALSTOM.



TOTAL: 1.820 MW

CONTRIBUCIÓN POR
FABRICANTES



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



126

Energía eólica. Situación tecnológica a 31-12-05 (IDAE).

Aerogeneradores nacionales de potencia > 1 MW

MODELO	FABRICANTE	POTENCIA	Diámetro Rotor	Altura Buje	CARACTERÍSTICAS
G-80-90 /2000	GAMESA EÓLICA	2,0 MW	80 m – 90 m	60 m - 100 m	PASO VARIABLE VELOCIDAD VARIABLE
AE-61	MADE (Grupo Gamesa)	1,32 MW	61 m	60 m	PASO FIJO DOS VELOCIDADES
Ecotècnia 1670	ECOTÈCNIA	1,67 MW	74 m	60 m - 70 m	PASO VARIABLE VELOCIDAD VARIABLE
TWT 1650	M TORRES	1,65 MW	72 m	60 m	PASO VARIABLE VELOCIDAD VARIABLE ACOPLAMIENTO DIRECTO
Acciona IT 1500	ACCIONA WP	1,5 MW	70 / 77 m	80 m	PASO VARIABLE VELOCIDAD VARIABLE



19/12/2007



Energía eólica. Situación tecnológica a 31-12-06 (IDAE).

Aerogeneradores comerciales (España)

TECNÓLOGO	Pot. Eólica (MW) en España a 31/12/2006	Modelos de aerogeneradores	Centros Productivos (ensamblaje aerogeneradores) en España
GAMESA EÓLICA	6.947 (59,2%)	G 80-83-87-90 /2000 G 52-58 /850 G 128 /4.5 (2008)	6 (Navarra -2-, Soria, La Coruña, Zaragoza, Valladolid)
ECOTÉCNIA	957 (8,2%)	Ecot. 74-80 /1670 Ecot. 100 /3000 (2008)	2 (La Coruña, Navarra)
ACCIONA WP	730 (6,2%)	AW 70-77-82 /1500 AW 1xx /3000 (2009)	2 (Navarra, Castellón)
M TORRES	25 (0,2%)	TWT 72-77-82 /1650 TWT 92 /2.5 (2009)	1 (Soria)
NAVANTIA - SIEMENS	469 (4,0%)	Navantia-Siemens 1.3	1 (La Coruña)
EOZEN - VENSYS	0	Eozen-Vensys 70-77 /1500	1 (Granada)
VESTAS	1.470 (12,5%)	V 90 /3000 V 80-90 /2000 V 120 /4.5	2 (Lugo, León)
G. ELECTRIC	785 (6,7%)	GEWE 1.5 sl GEWE 3.6	1 (Toledo)



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



128

Energía eólica- Estado actual

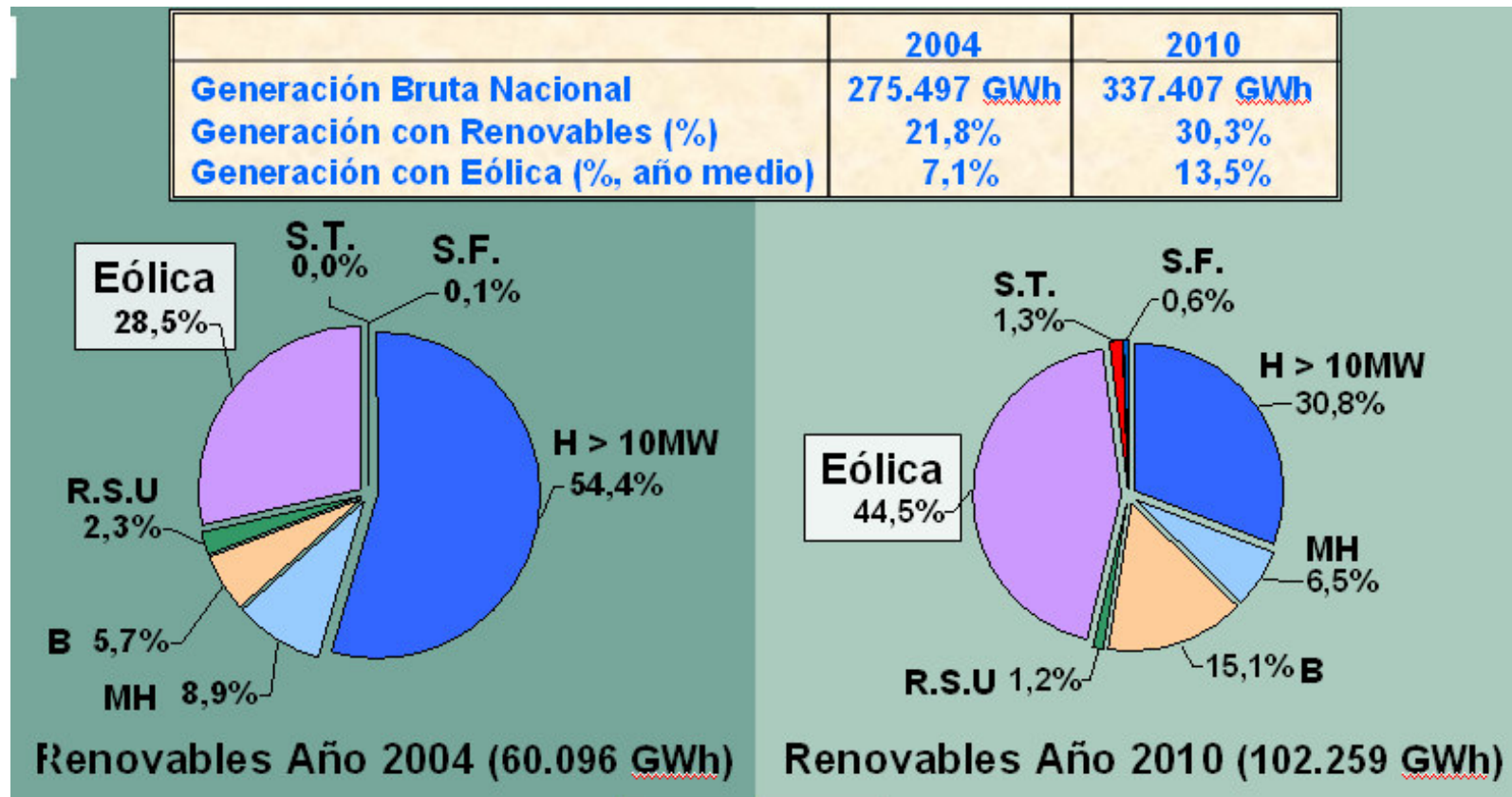
Plan de EERR 2005-2010 (IDAE)

Planificación Nacional:	El PER 2005-2010
✓ Objetivos Energéticos (EE RR en 2010): - Consumo Energía Primaria: 12,1%. - Consumo Bruto Electricidad: 30,3%. - <u>Biocarburantes</u>: 5,83% en el sector transporte. ✓ Inversión estimada (período 2005-2010): 23.598,64 M € ✓ Apoyos públicos (2005-2010): 8.492,24 M € - Sistema de Primas (Áreas Eléctricas): 4.956,21 M € - Incentivos Fiscales (<u>Biocarburantes</u>): 2.855,09 M € - Subvenciones (Biomasa Térmica y Solar): 680,94 M € ✓ Establece medidas sectoriales para alcanzar los nuevos objetivos. ✓ Papel fundamental de la Biomasa y la Eólica.	



Energía eólica- Estado actual

Plan de EERR 2005-2010 (IDAE)



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



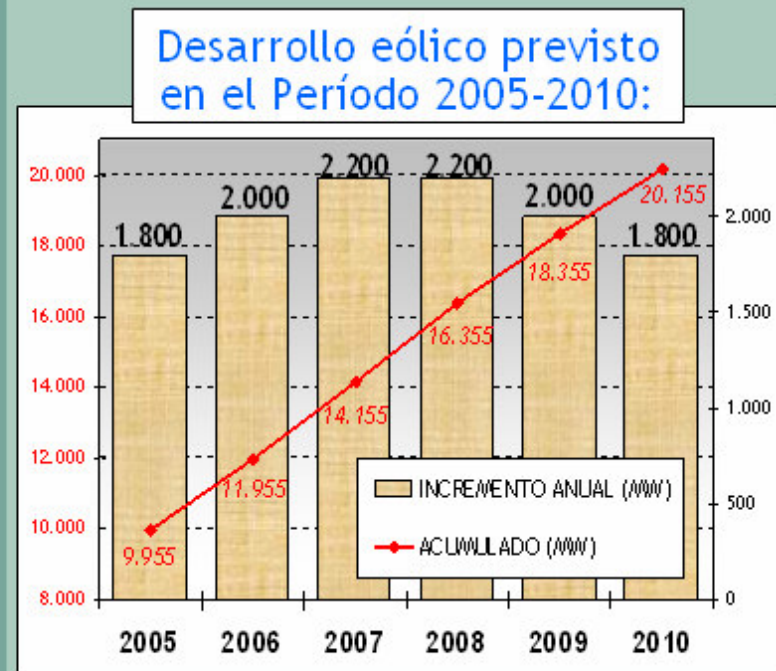
130

Energía eólica- Estado actual

Plan de EERR 2005-2010 (IDAE)

Objetivo eólico: **20.155 MW** en 2010

- ✓ Incremento de 12.000 MW en el período 2005-2010:
 - Potencia eólica media: **2.000 MW/año.**
 - Inversión media: **1.960 millones €/año.**
- ✓ Aumento de la contribución eólica hasta los **45.000 GWh/año:**
 - 13,5 % sobre la generación bruta nacional en 2010.
 - 44 % de la producción eléctrica con fuentes renovables en 2010.
- ✓ Fundamental: **Conexión y evacuación al sistema.**



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



131

Energía eólica. Situación tecnológica a 31-12-05 (IDAE).

PER Plan de Energías Renovables

**PER 2005-2010:
Área Eólica
Generación de Empleo**



	Período de aplicación PER (años)						ACUMULADO PER 2005-2010
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Potencia eólica instalada (kW)	1.800	2.000	2.200	2.200	2.000	1.800	12.000
Fase de Construcción (h-año)	23.400	26.000	28.600	28.600	26.000	23.400	156.000
Fase de O+M (h-año)	2.160	2.000	1.760	1.320	800	360	8.400
Total Empleo Generado (hombres-año)							164.400

En esta área, el desarrollo del PER generará trabajo equivalente a unos 165.000 hombres durante un año.



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



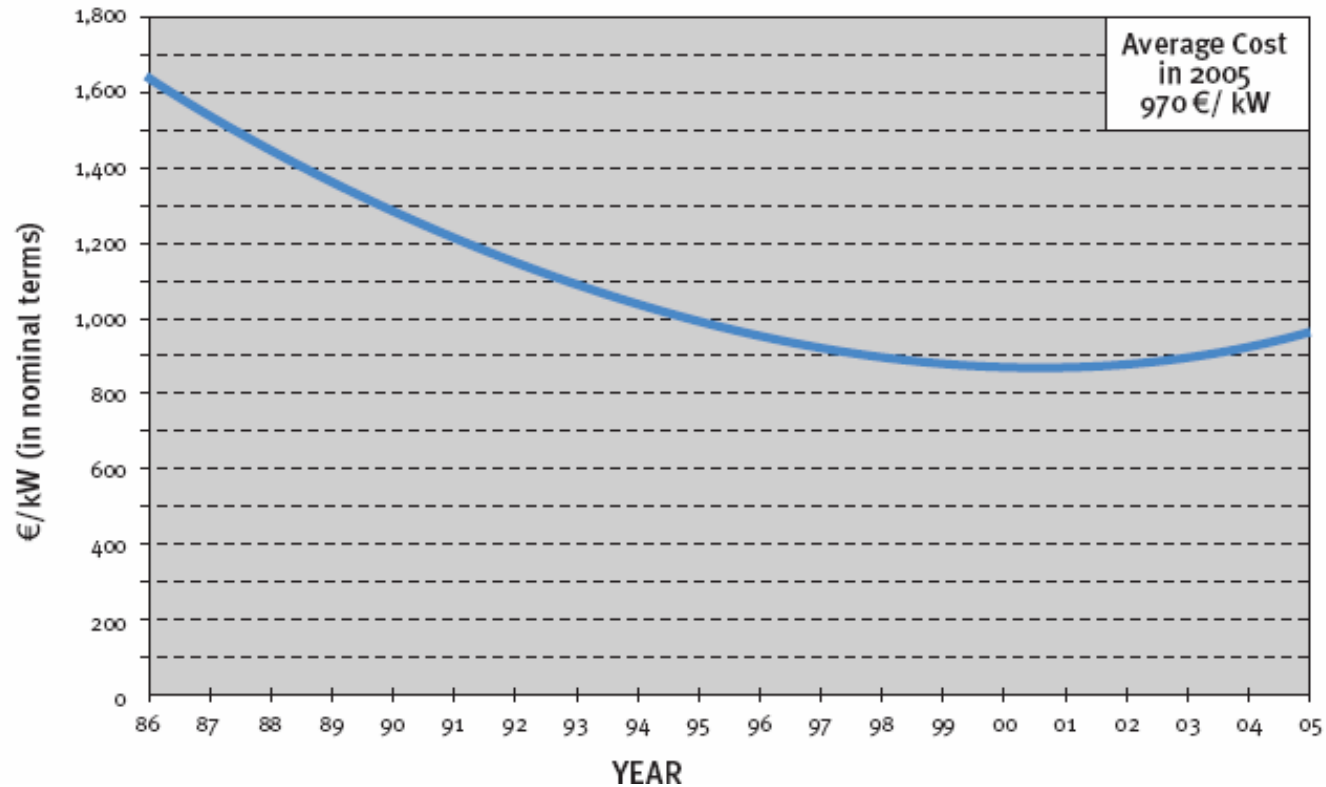
132

Contenido:

- Presentación del grupo
- Estudio de recursos: orografía, estelas
- Predicción
- Aspectos medioambientales
- Ejemplo de un estudio de viabilidad de la energía eólica en la Comunidad de Madrid
- Estado actual de la energía eólica
- Consideraciones económicas y legislación
- Líneas relevantes de investigación
- Cursos sobre energía eólica

Energía eólica- Costes

Evolution of cost per kW of installed capacity in Spain (Tendency curve)



Evolución del precio del kW instalado (IDAE)



19/12/2007

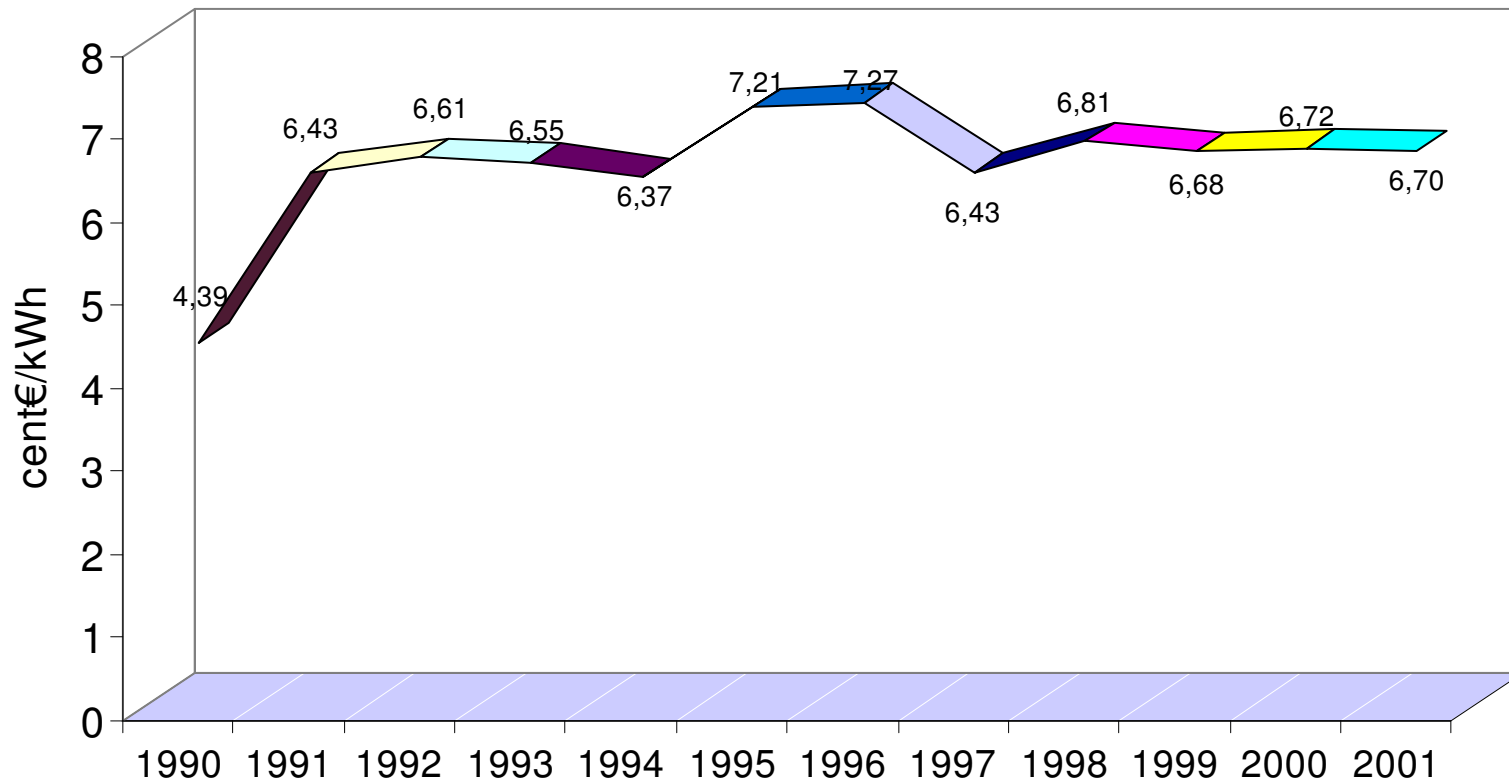
Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



134

Energía eólica. Costes

PRECIO MEDIO DE LA ENERGÍA EÓLICA



Energía eólica- Estado actual (Datos Emergency Energy Research ¿OPTIMISTAS?)

-Los parques eólicos producen energía a 49,78 Euros/MWh comparados con los 53-55 Euros/MWh de las centrales de gas y los superiores a 60 Euros/MWh de las de carbón

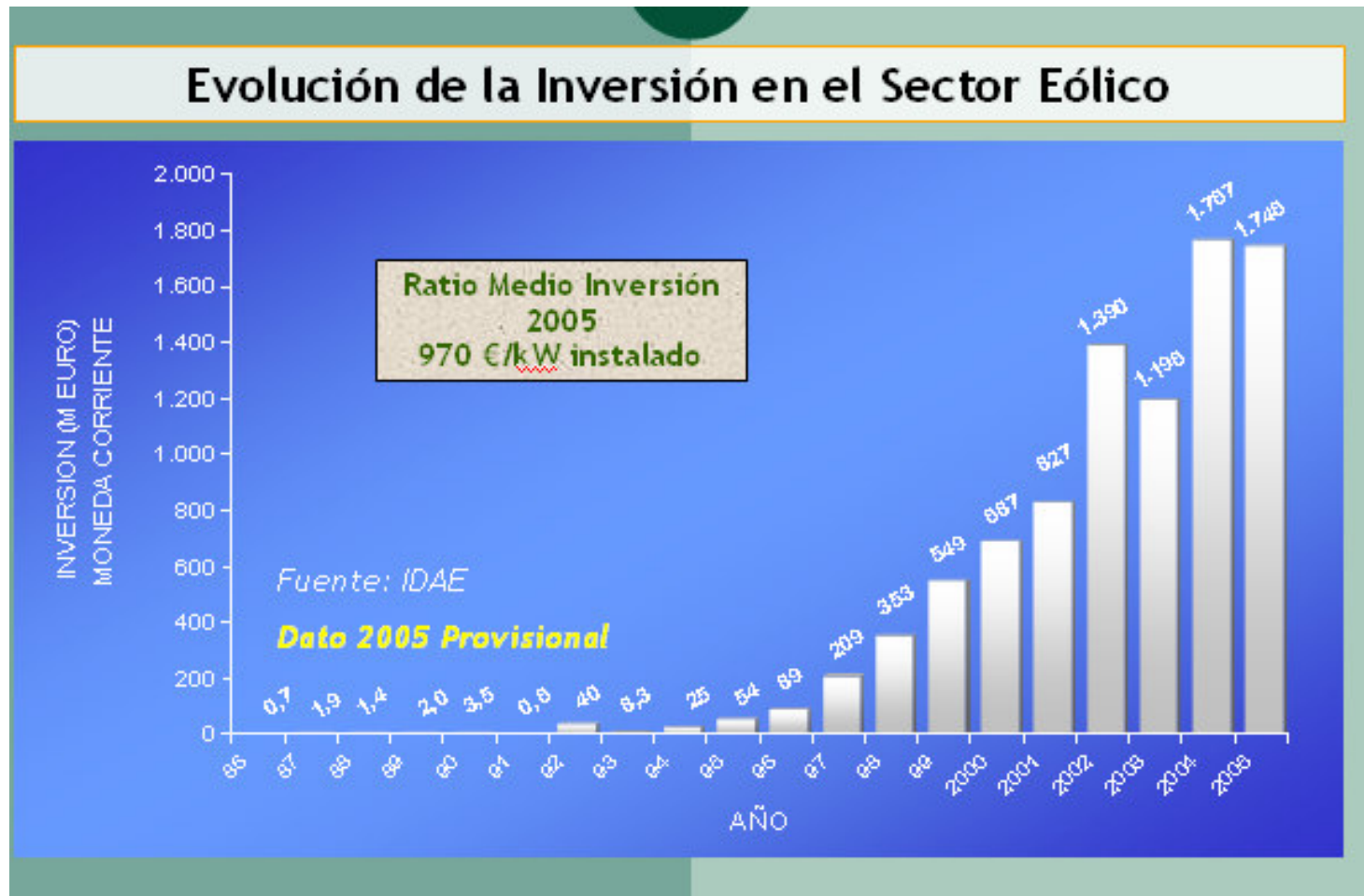


19/12/2007



Energía eólica- Estado actual

EVOLUCIÓN DE LA INVERSIÓN (en millones de Euros) EN ESPAÑA (IDAE)



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



137

Energía eólica. Costes

COSTES DE INVERSIÓN *(datos suministrados por IDAE)*

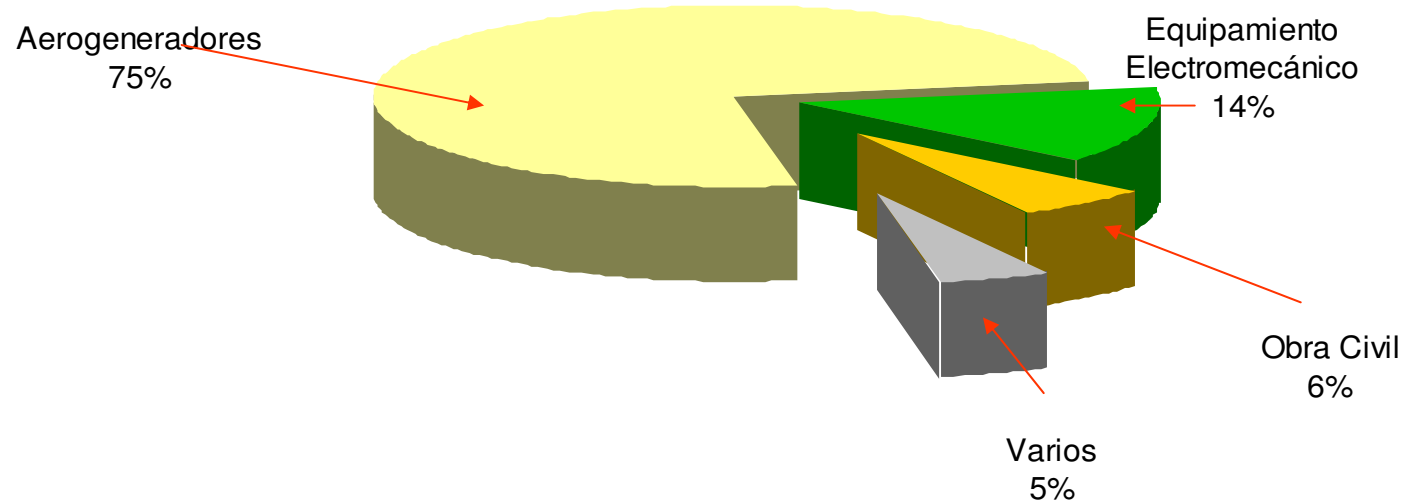
↖ Parque eólico tipo:

- ← Potencia nominal: 30 MW
- ← Línea eléctrica: 10 km a 132 kV
- ← Inversión total: 29 millones de euros
- ← Coste de explotación total medio anual: 3% coste de inversión



Energía eólica. Costes de inversión

Distribución típica



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



139

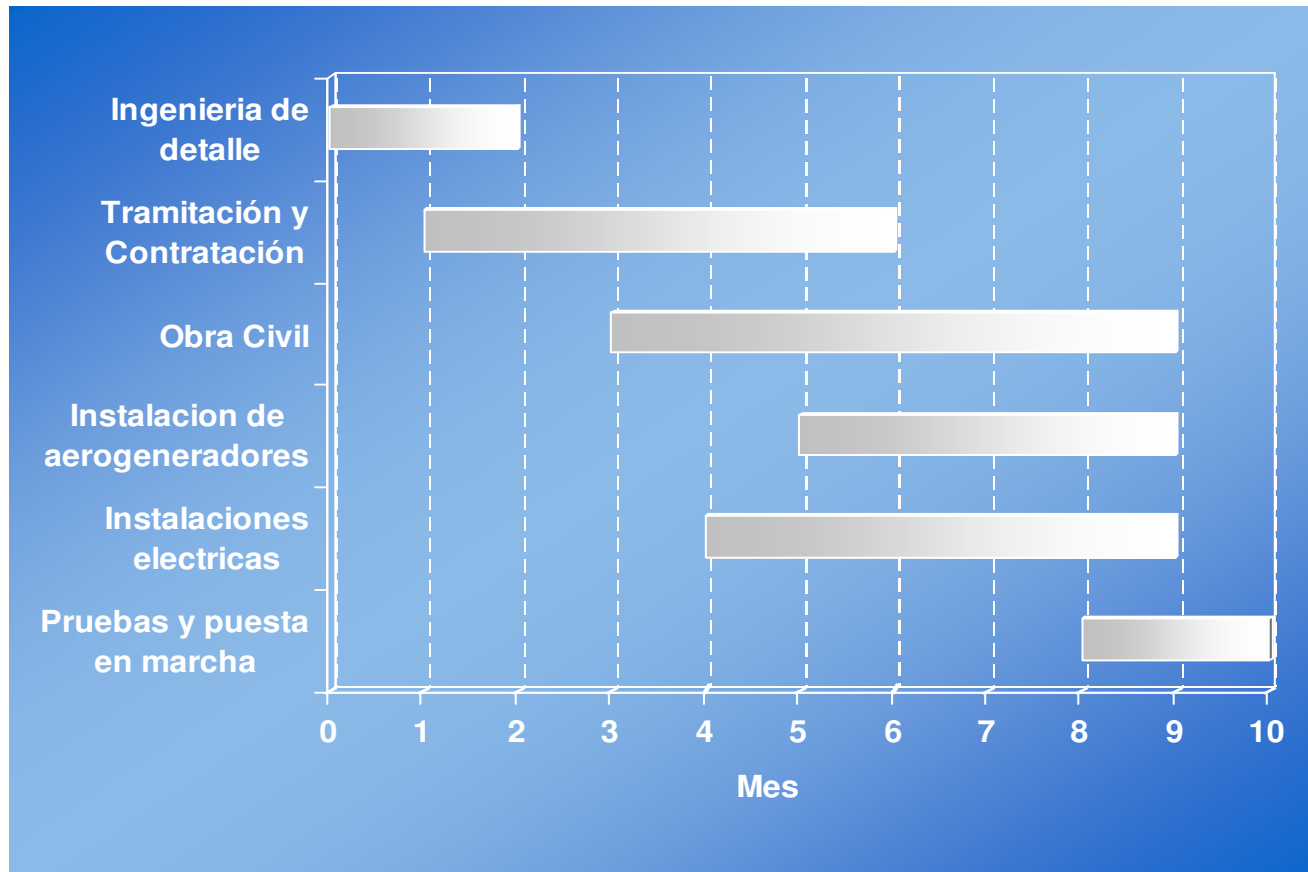
Energía eólica. Costes

Costes de explotación

- Reparaciones de los equipos 21-23 %
- Operación y Mantenimiento 51-55%
- Gestión y Administración 9-11%
- Alquiler de terrenos 11-19 %
- Estos costes se pueden estimar entre 0,01 y 0,015 Euro/kWh



Energía eólica. Costes



Planificación típica de un parque eólico de 15 Mw
(IDAE, 2004)



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



141

Incentivos a la Industria Eólica en España

Regimen especial

RÉGIMEN ORDINARIO

- ✂ **Centrales convencionales**
P > 50 MW (nucleares, térmicas, grandes hidráulicas)
- ✂ **Actividad no regulada**, en competencia, libre instalación y acceso a las redes.
- ✂ **OBLIGACIÓN** de ir al mercado
- ✂ **Retribución** Mercado mayorista:
 - ↳ Precio marginal.
 - ↳ Pagos adicionales por:
 - ✓ GP
 - ✓ SS.CC

RÉGIMEN ESPECIAL



- ✂ **INSTALACIONES** P ≤ 50 MW de:
 - ↳ **COGENERACIÓN**
 - ↳ **ENERGÍAS RENOVABLES**
 - ↳ **RESIDUOS**
- ✂ **Incorpora** su producción o energía excedentaria a la red ó
- Participa** voluntariamente en el mercado
- ✂ **Retribución:**
 - ↳ Tarifa regulada
 - ↳ Precio Mercado + Prima
 - ↳ En ambos casos **COMPLEMENTOS**



Incentivos a la Industria Eólica en España

Regimen especial. Impacto ambiental



LA GENERACIÓN ELÉCTRICA PROVOCA IMPACTOS AMBIENTALES

Es responsable del:

**LLUVIA
ÁCIDA**

**CAMBIO
CLIMÁTICO**

90% de emisiones de SO_2 procedentes de GIC*

68% de emisiones totales de SO_2

90% de emisiones de NO_x procedentes de GIC*

23% de emisiones totales de No_x

25% de emisiones totales de CO_2

95% producción de **RESIDUOS DE ALTA ACTIVIDAD**

*GIC: grandes instalaciones de combustión (> 50MWt)



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



143

Incentivos a la Industria Eólica en España

Regimen especial. Impacto ambiental. Internalización de costes

- ✍ Los precios de mercado no incluyen la totalidad de los costes
- ✍ Los costes ambientales recaen en la sociedad: **LOS QUE CONTAMINAN NO SON LOS QUE PAGAN.**
- ✍ Los reguladores tienen dos opciones:
 - ✍ *Prohibir la actividad o el producto (gasolina con plomo)*
 - ✍ Internalizar los costes ambientales



INTERNALIZACIÓN DE LOS COSTES AMBIENTALES
para lograr asignaciones más eficientes en el mercado a partir de la liberalización, y así tender hacia el desarrollo sostenible



Incentivos a la Industria Eólica en España

- La Ley 54/1997, del Sector Eléctrico supuso un apoyo importante para el desarrollo de toda la industria eólica en España, permitiendo que los parques eólicos de potencia inferior a 50 MW vertieran toda su energía al sistema, sin someterse al mercado mayorista de electricidad, y recibiendo un precio regulado por encima del precio resultante de dicho mercado.
- Hasta recientemente estuvo en vigor el RD 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en Régimen Especial.



Incentivos a la Industria Eólica en España

-El RD 436/2004 ofrece a los generadores eólicos dos alternativas a la hora de vender e incorporar su energía la red:

- * Venta a precio fijo regulado (a tarifa).
- * Venta al mercado mayorista de electricidad a precio de mercado.



Características de la venta a tarifa.

-Bajo este sistema el parque podrá incorporar toda su energía a la red del distribuidor y éste último pagará un precio fijo regulado (tarifa) por cada kWh. Bajo esta modalidad el generador se asegura que toda la producción diaria será vendida y aceptada por el distribuidor ya que éste está obligado por la regulación a comprar toda la energía generada en el parque.

-Penalización de desvíos

-Complementos por energía reactiva

-Complementos por hacer frente a huecos de tensión



Características de la venta en el mercado mayorista.

-La regulación incentiva esta modalidad complementando el precio de mercado obtenido por el generador eólico con una prima y un incentivo, ambos regulados con carácter anual. Adicionalmente, el generador también recibe el complemento por energía reactiva y tiene derecho al complemento frente a huecos de tensión

-Bajo esta modalidad el generador eólico se convierte en un agente más del mercado mayorista y gestionado por el Operador del Mercado Eléctrico Español (OMEL) y realizará sus ofertas de venta para cada hora como un generador más. De esta forma, el generador verterá a la red de distribución la energía que haya sido comprada en el mercado diario en cada hora y gestionará sus desvíos en los mercados secundarios (intradarios).



Características de la venta en el mercado mayorista y a tarifa

Grupo b.2. Instalaciones que usan como energía primaria la energía eólica.					
Subgrupo b.2.1. Instalaciones eólica ubicadas en tierra.					
Subgrupo b.2.2. Instalaciones eólicas ubicadas en el mar.					
	Tarifa			Prima	Incentivo
	Menos de 5 años	Entre el 6º y 15º año	Más de 15 años		
Parque<5MW	90% de la Tr	90% de la Tr	80% de la Tr	40% de la Tr	10% de la Tr
Parque>5MW	90% de la Tr	85% de la Tr	80% de la Tr	40% de la Tr	10% de la Tr

Tr para el 2004=7.2072 c€/kWh

Retribución de la energía eólica en el Régimen Especial de Generación en vigor hasta recientemente (2004-2007)



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



149

Nueva normativa

REAL DECRETO 661/2007, de 25 de mayo, (BOE 26 de mayo) por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

Para ello se mantiene un sistema análogo al contemplado en el Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, en el que el titular de la instalación puede optar por vender su energía a una tarifa regulada, única para todos los periodos de programación, o bien vender dicha energía directamente en el mercado diario, en el mercado a plazo o a través de un contrato bilateral, percibiendo en este caso el precio negociado en el mercado más una prima. En éste último caso, se introduce una novedad para ciertas tecnologías.



Nueva normativa

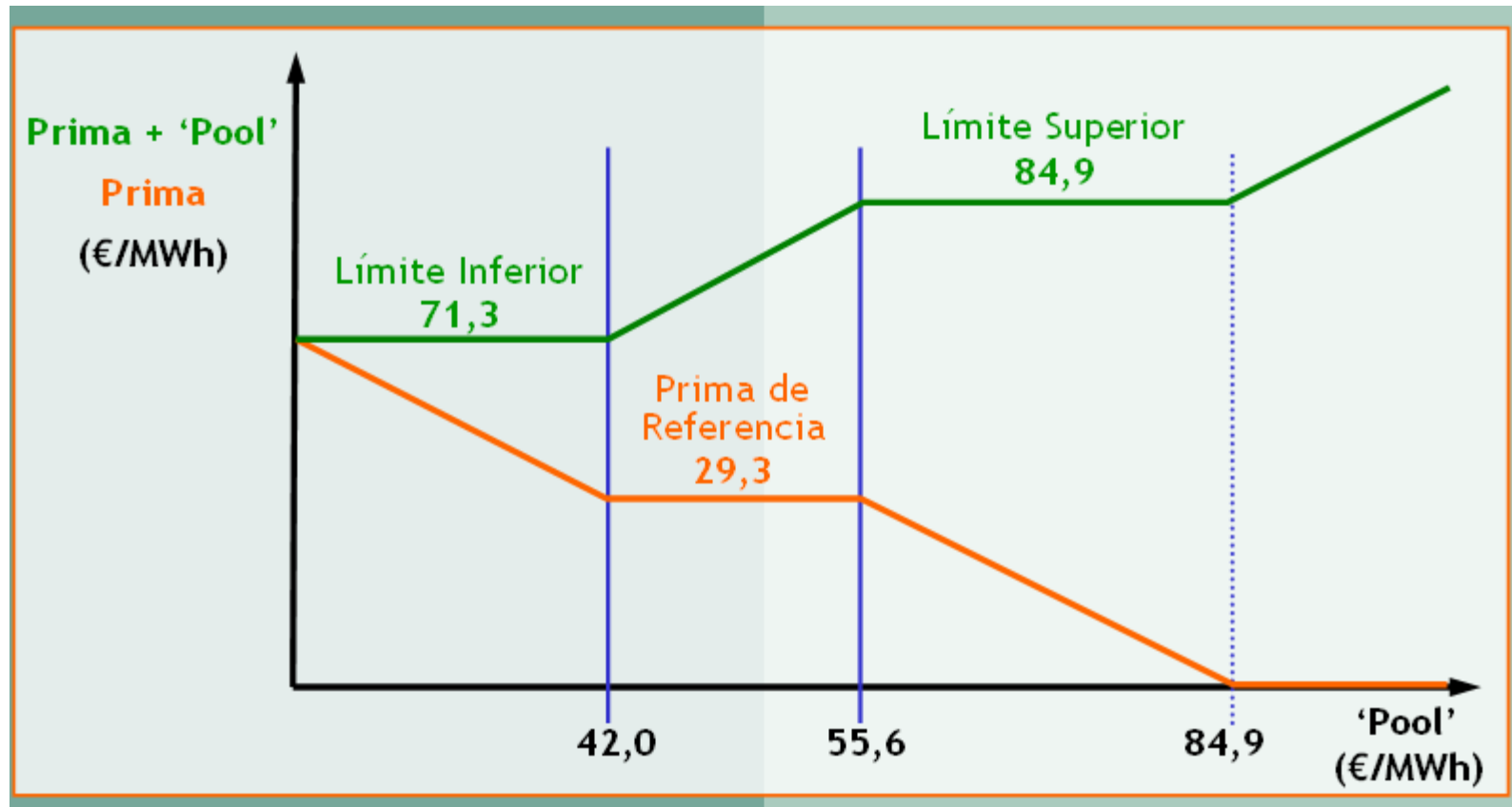
REAL DECRETO 661/2007, de 25 de mayo, (BOE 26 de mayo) por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

Se establecen unos límites inferior y superior para la suma del precio horario del mercado diario, más una prima de referencia, de forma que la prima a percibir en cada hora, pueda quedar acotada en función de dichos valores. Este nuevo sistema, protege al promotor cuando los ingresos derivados del precio del mercado fueran excesivamente bajos, y elimina la prima cuando el precio del mercado es suficientemente elevado para garantizar la cobertura de sus costes, eliminando irracionalidades en la retribución de tecnologías, cuyos costes no están directamente ligados a los precios del petróleo en los mercados internacionales.



Nueva normativa

*REAL DECRETO 661/2007, de 25 de mayo, (BOE 26 de mayo)
por el que se regula la actividad de producción de
energía eléctrica en régimen especial.*



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



152

Nueva normativa: Resumen

REAL DECRETO 661/2007, de 25 de mayo, (BOE 26 de mayo)

Tarifa regulada Única, independiente de la potencia del parque y del año de puesta en marcha: 73,23 €/MWh.

Venta al mercado Prima de referencia -29,29 €/MWh-, entre los límites inferior -71,3 €/MWh- y superior -84,9 €/MWh-.

Instalaciones eólicas marinas Sólo venta al mercado. Se introduce una prima máxima a efectos del procedimiento de concurrencia.

Adecuación tecnológica frente a huecos de tensión P.O. 12.3

Parques existentes: plazo de adecuación hasta enero de 2010.

Complemento económico durante 5 años

Instalaciones nuevas: obligatorio, sin complemento

- ✓ Se consideran 2.000 MW adicionales al objetivo del PER, para la “repotenciación” de instalaciones antiguas anteriores a dic/2001
Complemento adicional de 7 €/MWh hasta dic/2017.



19/12/2007



Contenido:

- Presentación del grupo
- Estudio de recursos: orografía, estelas
- Predicción
- Aspectos medioambientales
- Ejemplo de un estudio de viabilidad de la energía eólica en la Comunidad de Madrid
- Estado actual de la energía eólica
- Consideraciones económicas y legislación
- Líneas relevantes de investigación
- Cursos sobre energía eólica

Energía eólica. Investigación y desarrollo IDAE

- Modelos de predicción
- Orografía y estelas
- Aerodinámica no ideal y no estacionaria
- Comportamiento aero-elástico
- Cargas dinámicas y fatiga
- Materiales y componentes estructurales
- Calidad de la energía conectada a la red
- Velocidad variable de giro
- Ruido
- Problemas medioambientales
- Normativa y standards



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



155

I+D PARA MAXIMIZAR EL VALOR DE LA ENERGÍA EÓLICA (EWEA)

- Mejor estimación del potencial eólico
- Mejorar diferentes aspectos de la turbina
 - * Efecto escala
 - * Cargas, fatiga, etc.
 - * Diseño aerodinámico
- Minimizar costes de mantenimiento
- Efecto de escala en grandes parques eólicos



I+D PARA MAXIMIZAR EL VALOR DE LA ENERGÍA EÓLICA (EWEA)

- Operación en ambientes extremos
- Integración en la red
- Problemática y aplicaciones de pequeñas aeroturbinas
- Apoyo popular y efectos medioambientales
- Estándares y certificaciones



I+D PARA MAXIMIZAR EL VALOR DE LA ENERGÍA EÓLICA (EWEA)

– Mejor estimación del potencial eólico

Figure 3.2

Different systems to measure the wind characteristics. From left to right: an offshore mast equipped with La. classical cup anemometers, two experiments with SODAR (on land and offshore).



In the past, in order to facilitate site selection and assess the feasibility of possible projects, wind 'atlases' have been produced, containing not only wind speed characteristics at different locations, but

also methods to estimate wind speeds other than those used at a particular location, as well as methods to determine the vertical wind gradient for different levels of terrain roughness (see Figure 3.3).

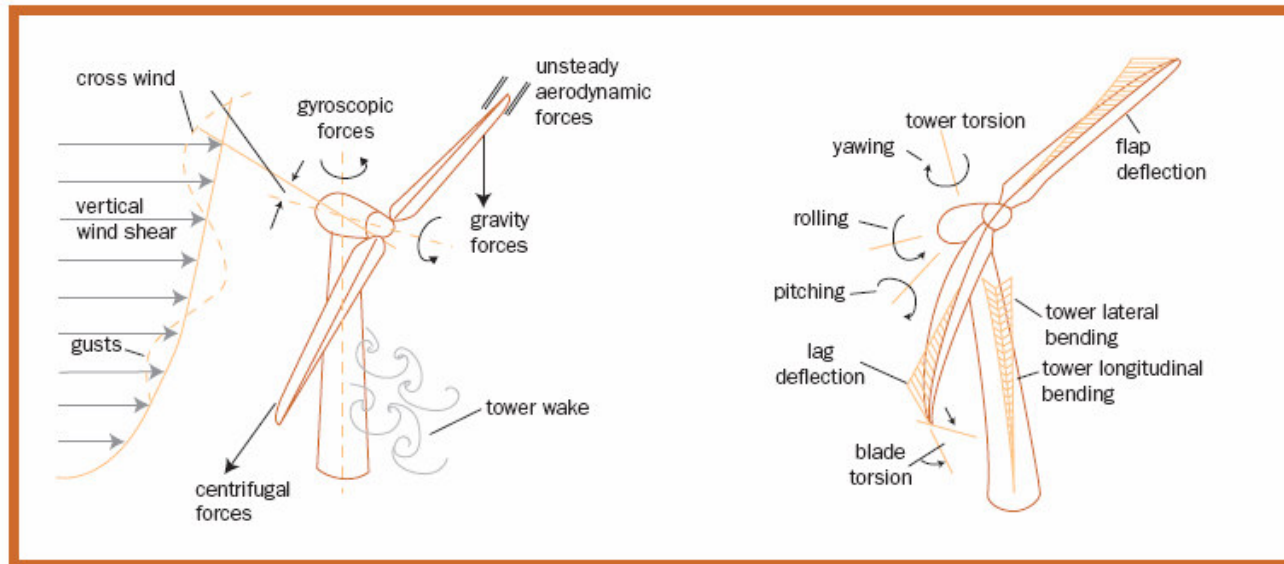


I+D PARA MAXIMIZAR EL VALOR DE LA ENERGÍA EÓLICA (EWEA)

- Mejorar diferentes aspectos de la turbina
 - * Efecto escala
 - * Cargas, fatiga, etc.
 - * Diseño aerodinámico

Figure 3.9

On the left all external dynamic forces are indicated that expose a turbine to extreme fatigue loading. On the right the various vibration and deflection modes of a wind turbine can be seen. From the dynamic point of view a wind turbine is a complex structure to design reliably for a given service life time.



Source: Kleßling, F: Modellierung des aeroelastischen Gesamtsystems einer Windturbine mit Hilfe symbolischer Programmierung, DFVLR-Report, DFVLR-FB 84-10, 1984.

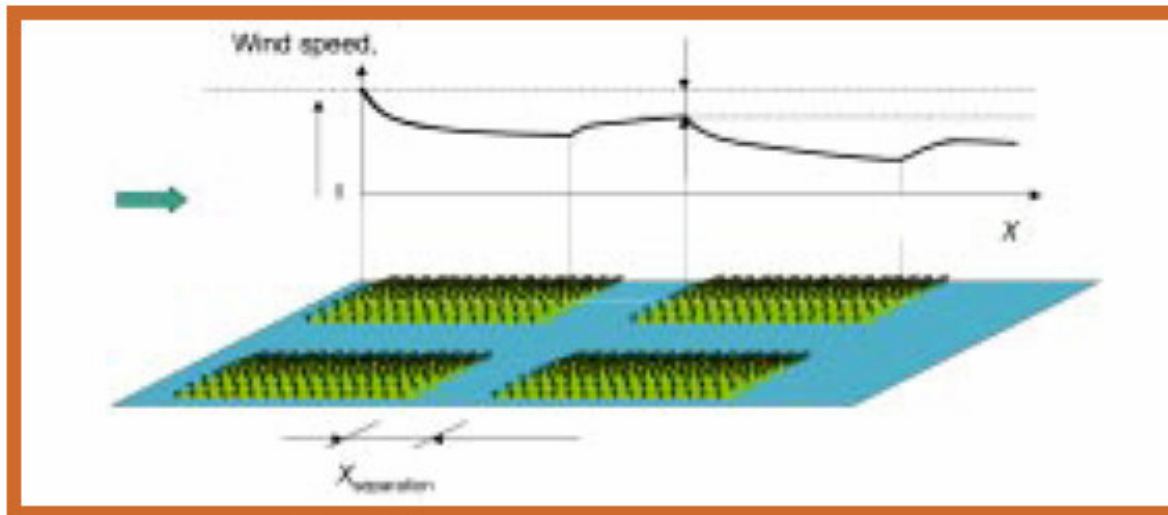


I+D PARA MAXIMIZAR EL VALOR DE LA ENERGÍA EÓLICA (EWEA)

- Minimizar costes de mantenimiento
- Efecto de escala en grandes parques eólicos, estelas

Figure 3.14

The effect of a large wind farm on the wind resource of a nearby wind farm. The magnitude of the total available wind resource in a certain area will depend on the numbers of large wind farms to be installed and their relative distances.



Source : Risø

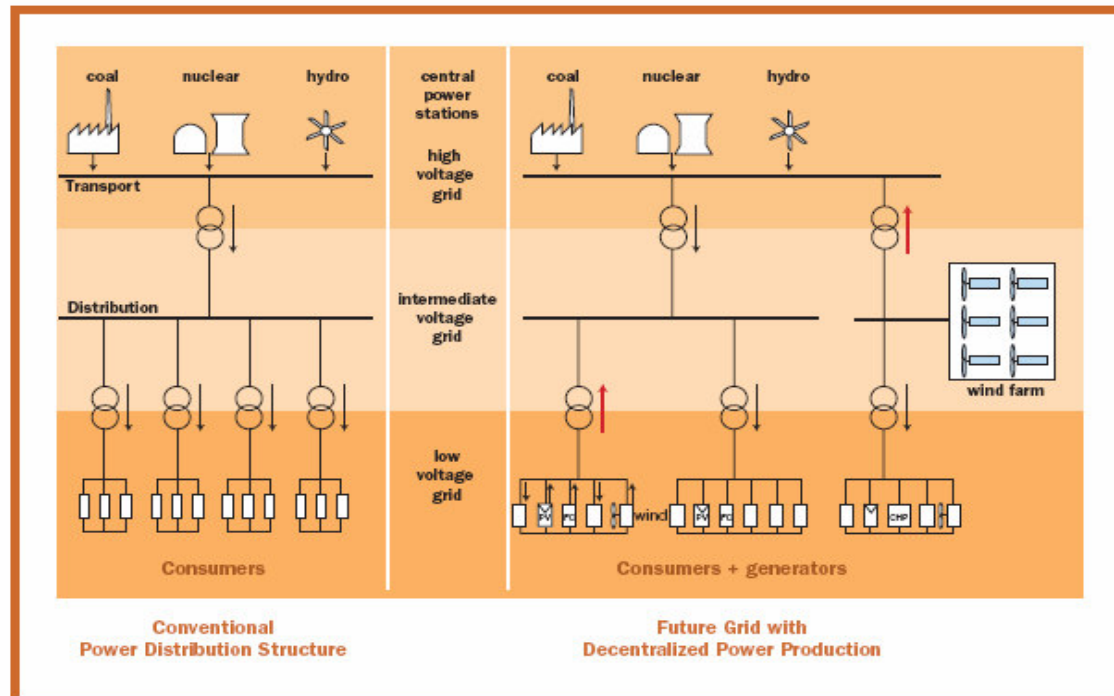


I+D PARA MAXIMIZAR EL VALOR DE LA ENERGÍA EÓLICA (EWEA)

- Operación en ambientes extremos
- Integración en la red

Figure 3.16

Wind turbines will be connected to a grid that is fundamentally different from the conventional grid, as a large variety of generators will be integrated. Thus the grid needs to become "intelligent".



Source: ISET



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



161

I+D PARA MAXIMIZAR EL VALOR DE LA ENERGÍA EÓLICA (EWEA)

- Problemática y aplicaciones de pequeñas aeroturbinas

Figure 3.13

Application of a small wind turbine in a hybridised system consisting of wind, solar and diesel energy units.



Source : EU-Project HYBRIX, ISET/IBERINCO



19/12/2007



162

I+D PARA MAXIMIZAR EL VALOR DE LA ENERGÍA EÓLICA (EWEA)

Apoyo popular y
efectos medioambientales

Figure 3.17

Measurements of acoustic noise emission of a rotor in an anechoic wind tunnel (left) and in the field (right). The visualisation of the acoustic noise source gives the designers to change the shape of the blades to reduce aero-acoustic noise emission.



Source: NLR, DATA project (EC) Source: NLR, SIROCCO Project EC

The anechoic measuring sections of the German-Netherlands Windtunnel (DNW). On the right, field measurements of the location of acoustic noise sources of a wind turbine.



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



163

I+D PARA MAXIMIZAR EL VALOR DE LA ENERGÍA EÓLICA (EWEA)

- Estándares y certificaciones

Figure 3.19

Wind Energy R&D has come a long way since the 1970s.



19/12/2007

Mecánica de Fluidos. ETSII-UPM



164

Contenido:

- Presentación del grupo
- Estudio de recursos: orografía, estelas
- Predicción
- Aspectos medioambientales
- Ejemplo de un estudio de viabilidad de la energía eólica en la Comunidad de Madrid
- Estado actual de la energía eólica
- Consideraciones económicas y legislación
- Líneas relevantes de investigación
- Cursos sobre energía eólica

Cursos sobre energía eólica en los que está involucrado nuestro laboratorio

- Experto en diseño y planificación de parques eólicos
 - * Directores: C. Veganzones (Máquinas Eléctricas) y A. Crespo (Mecánica de Fluidos) ETSII-UPM
- Master en energías renovables y medio-ambiente
 - * Director: Julio Amador ETUII-UPM

Cursos sobre energía eólica en los que está involucrado nuestro laboratorio

Textos:

„**Sistemas eólicos de producción de la energía eléctrica**“
coordinadores J. L. Rodríguez Amenedo, J. C. Burgos, S. Arnalte.
Editorial Rueda

A. Crespo, E. Migoya, R. Gómez-Elvira y C. Vezanzones (2003) **“La Energía Eólica”** capítulo 5º del libro “Energías Renovables para el desarrollo”, coordinador J. M. De Juana. Thomson-Paraninfo. Libro.
ISBN 84-283-2864-1

Experto en diseño y planificación de parques eólicos

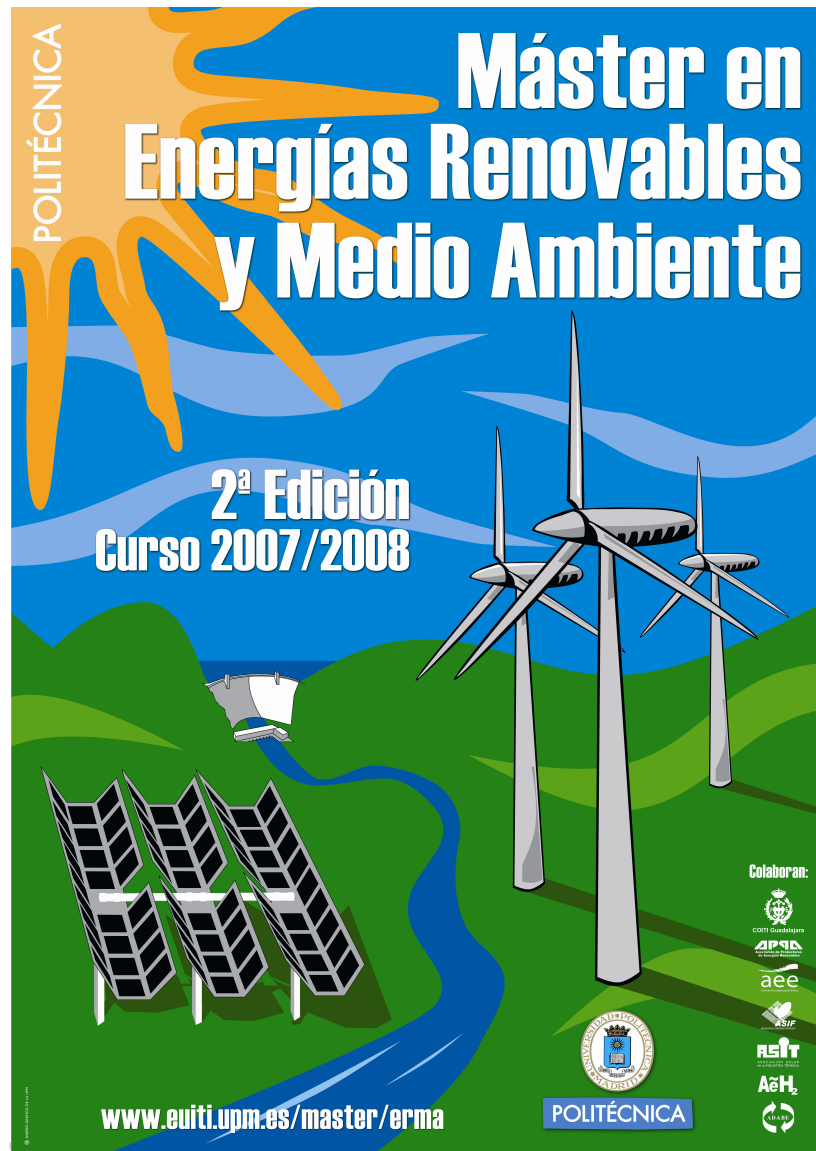
- Curso íntegramente sobre energía eólica
- Duración 125-150 horas
- Dirigido a Licenciados/Diplomados: en carreras técnicas, ciencias físicas o ciencias ambientales.
- Se ha impartido 15 veces
- En cada ocasión hay unos 15/20 alumnos
- Muy multidisciplinar con 35/40 profesores, generalmente fruto de contactos de nuestros laboratorios con empresas u organismos relacionados con energía eólica

Experto en diseño y planificación de parques eólicos

- Planteamiento general del problema.
- Características generales del viento
- Recursos eólicos
- Estelas y disposición en el parque. Producción de energía.
- Aerodinámica.
- Fuerzas, fatiga y cargas dinámicas.
- Efectos de la turbulencia en el comportamiento de la máquina eólica.
- Componentes y materiales apropiados. Palas, buje, torre, cimentación, etc.
- Sistemas de regulación y control.
- Sistemas de conversión eléctrica.
- Conexión de parques eólicos a red. Estabilidad de la red. Calidad de suministro
- Mantenimiento, gestión y operación de parques eólicos.
- Descripción de tipos de máquinas eólicas.
- Estado del arte, normalización e instrumentación.
- Consideraciones económicas y medioambientales.
- Mercado eléctrico
- Predicción
- Estado del arte y nuevas tendencias en parques eólicos
- Riesgos laborales



POLITÉCNICA



Origen

- ☐ Actividades de investigación y desarrollo en energías renovables
- ☐ Relación con empresas y agentes energéticos
- ☐ Relaciones con otras universidades europeas
- ☐ Experiencias de formación continua, etc.



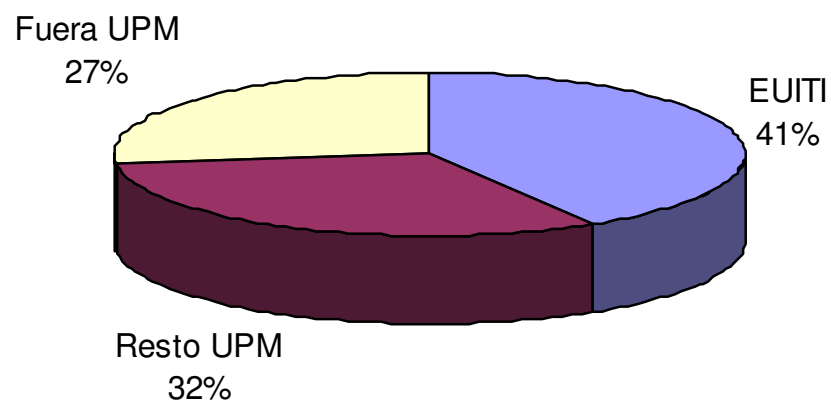
POLITÉCNICA

Reunión EPEC - UPM



Nº	Módulo	Créditos ECTS
1	Mercado energético	3
2	Sistemas Fotovoltaicos	10
3	Conversión térmica de la energía solar	3
4	Centrales termosolares	2
5	Aprovechamientos hidroeléctricos	3
6	Aerogeneradores y Parques eólicos	10
7	Eficiencia y ahorro energético	3
8	Pilas de Hidrógeno	2
9	Biomasa	3
10	Utilización de los biocombustibles en el transporte	3
11	Producción limpia, ecología industrial y desarrollo sostenible	3
12	Acceso universal a la energía	2
Conferencias		1
Proyecto fin de máster		12

Profesorado



Entidad de procedencia de los ponentes	Número de horas	Nº ponentes
EUITI	199	17
Resto UPM (ETSII)	152 (70)	23 (11)
Fuera UPM (CIEMAT)	129 (32)	32 (4)
TOTAL	480	72

UPM

- 7 Centros de la UPM
- 15 Departamentos