

*Energía eólica:
¿Horizonte sin límites?*

UPM (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID)

Estudios sobre recursos y turbulencia en parques
eólicos

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



Contenido:

- Estudio de recursos:
 - * orografía,
 - * estelas
- Turbulencia (Fatiga)
 - * orografía,
 - * estelas
- Predicción

Estimación de Recursos

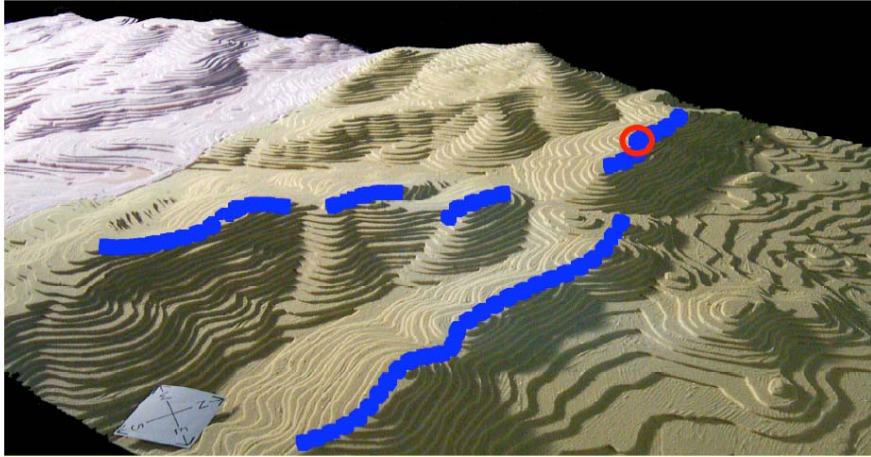


FIGURE 1. ALTAMONT PASS TERRAIN MODEL USED IN WIND TUNNEL SIMULATIONS. RED CIRCLE INDICATES THE LOCATION OF THE PLANT'S METEOROLOGICAL TOWER. A TOTAL OF 87 TURBINES ARE INSTALLED ALONG RIDGES INDICATED WITH BLUE CIRCLES. MODEL SIMULATES A REGION 2.6 KM WIDE.



Measurements in the TNO wind tunnel

- Métodos físicos, simulación en túnel
- Mapas de viento obtenidos de satélites (Parques marinos)
- Modelos numéricos, de variada complejidad

Estimación de Recursos

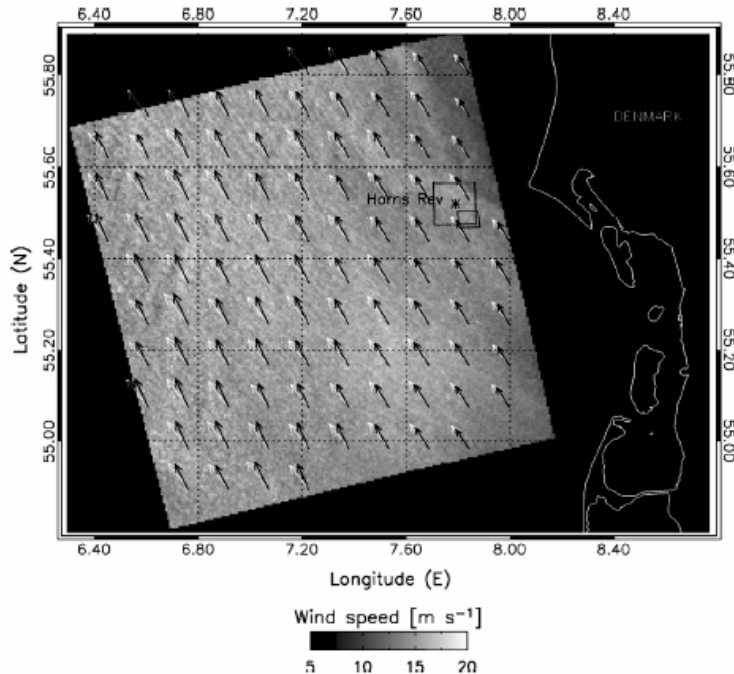


Fig. 3. ERS-2 SAR wind field from 21 September 2000 at 21:30 UTC. At Horns Rev, the meteorological mast (star), the wind farm (trapezoid), and the 5 km square box used for pixel averaging are indicated. Arrows show the in situ wind direction (white) and the automatic local gradient wind vectors (black). Image streaks indicate the wind direction and orthogonal internal waves are visible at the top left image corner.

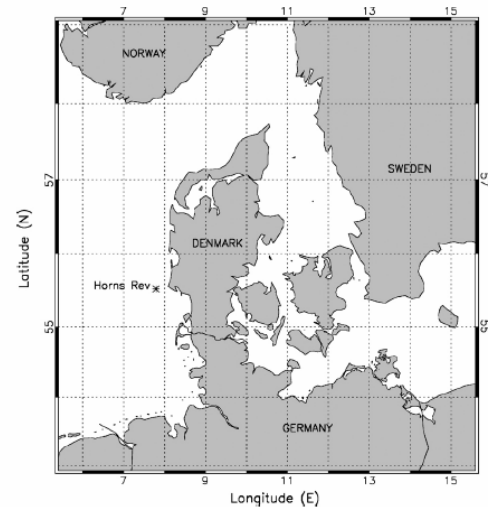
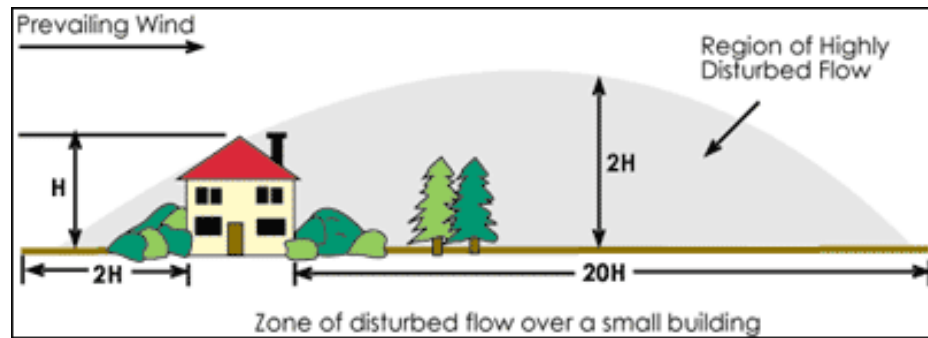
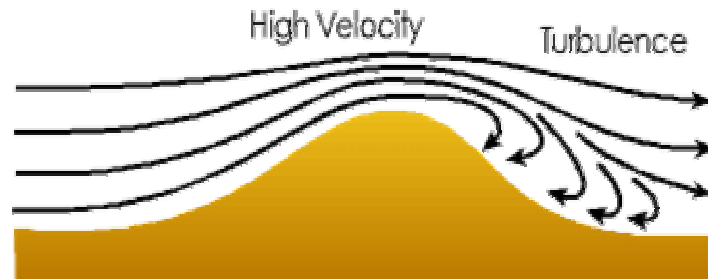
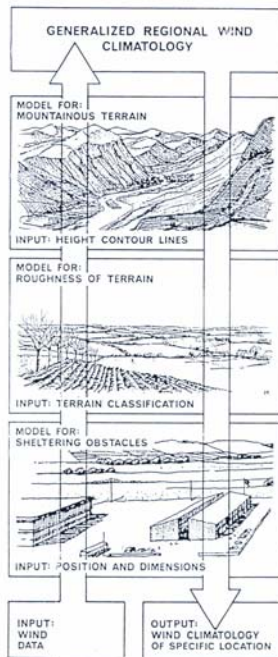


Fig. 2. Map of Denmark showing the location of Horns Rev in the North Sea.

- Mapas de viento obtenidos de satélites (parques marinos)
Synthetic Aperture Radar (SAR)
Interacción del viento con ondas de capilaridad, de longitud de onda muy pequeña
Efectos de estela de parque

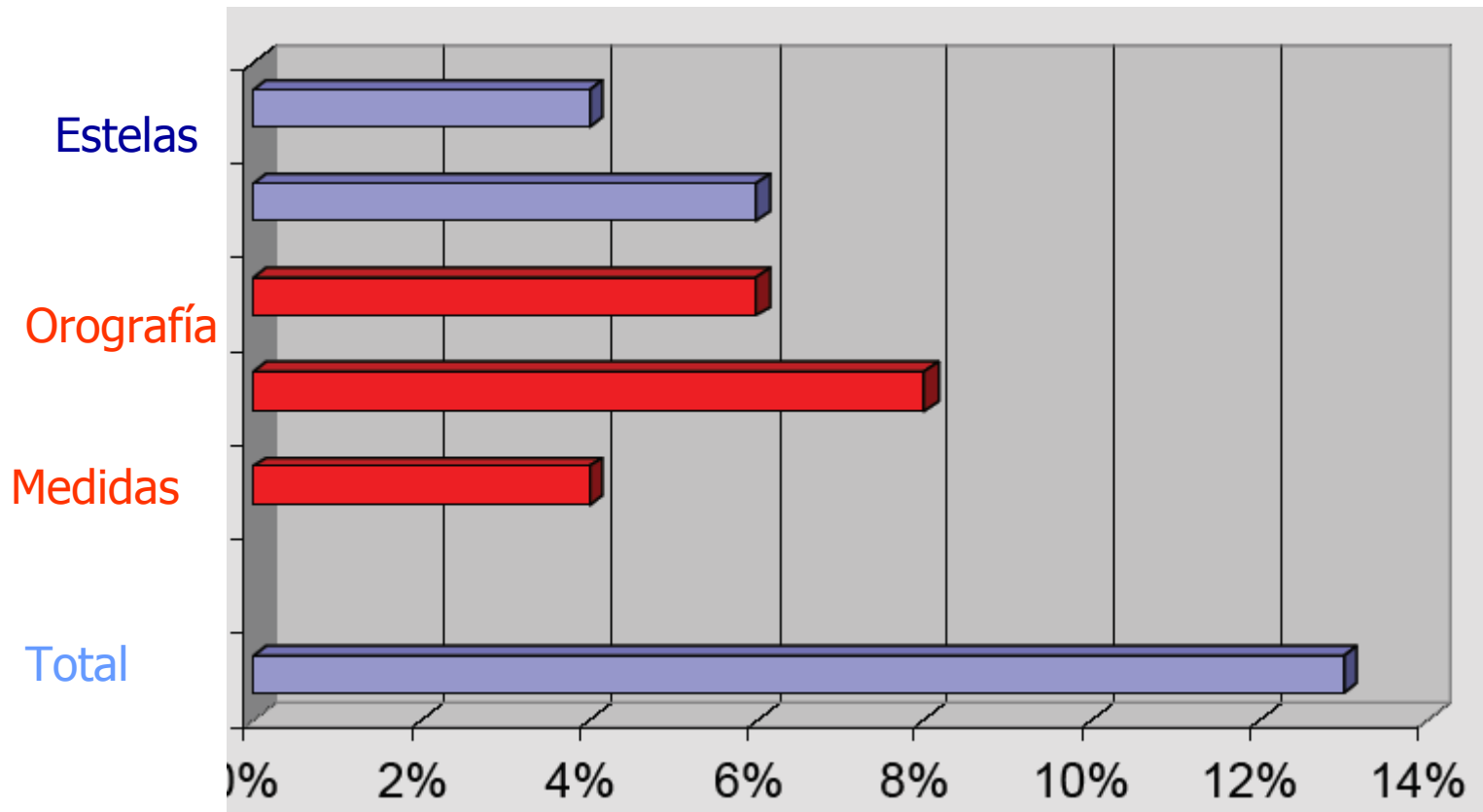
Modelos numéricos

- Datos de macroescala a microescala (Datos de estación meteorológica)
- Resolución en el parque eólico teniendo en cuenta orografía, obstáculos y estelas



Modelos numéricos

Posibles errores e incertidumbres (Meteodyn)

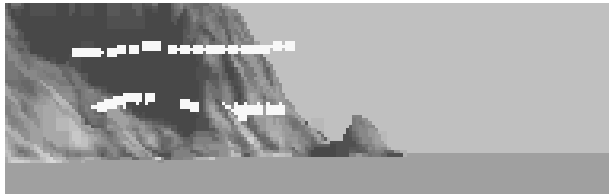


Modelos numéricos

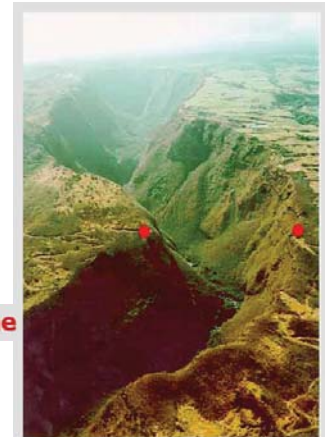
-Resolución de ecuaciones completas para terrenos complicados

* Modelos de aplicación general, FLUENT, PHOENICS...

* Modelos específicos, WindSim (Basado en PHOENICS), Meteodyn...



Validation Grande Ravine



- Modelos simplificados para terreno moderadamente complejo, Wasp, UPMORO

- Modelos tipo Mass-Consistent

Estimación de recursos. Modelos numéricos, ecuaciones completas

- El problema en general consiste en la resolución de las ecuaciones de 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,



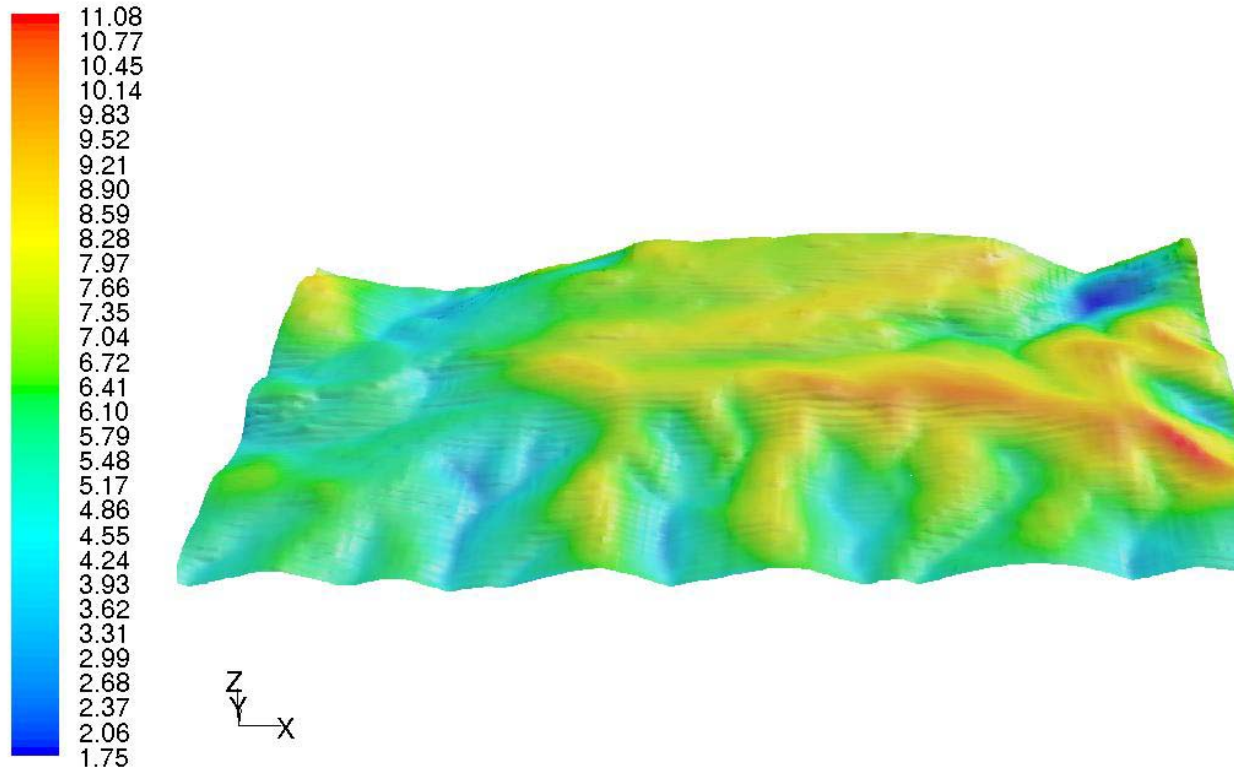
Estimación de recursos: modelos numéricos , ecuaciones completas

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 geostrofico.
- 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.

UPMORO (Similar al WASP)

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



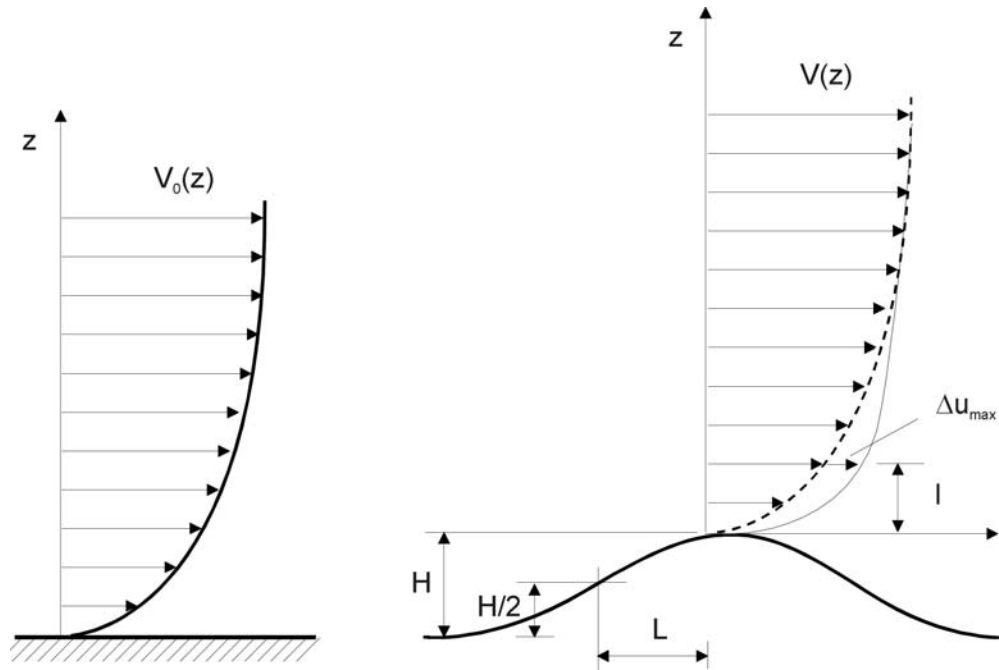
UPMORO

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

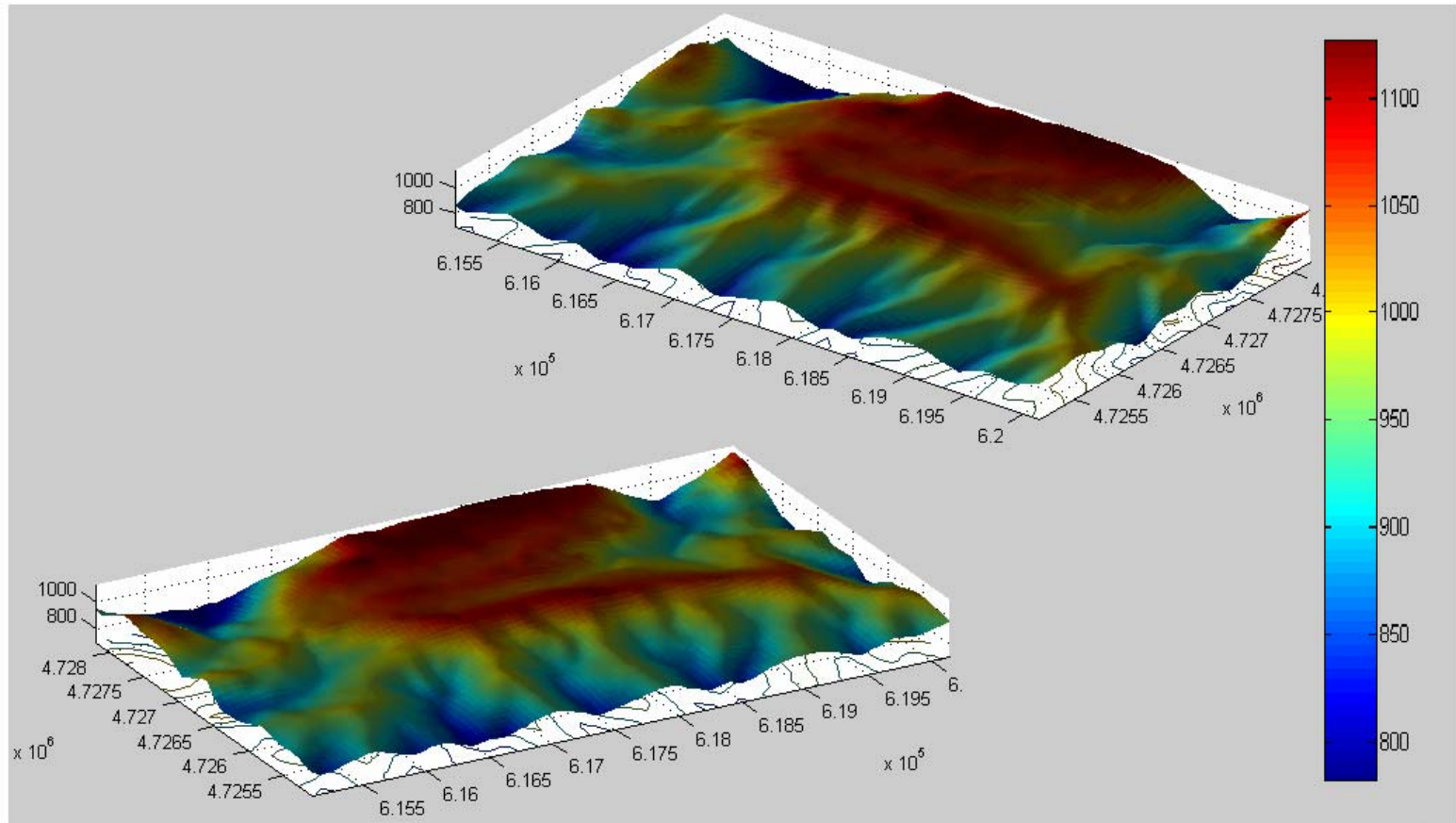


Flujo básico sin perturbar a la izquierda. Flujo perturbado a la derecha.

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



Parque eólico de Alaitz: Orografía 3D



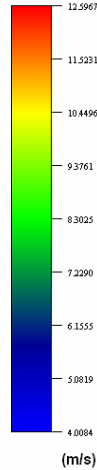
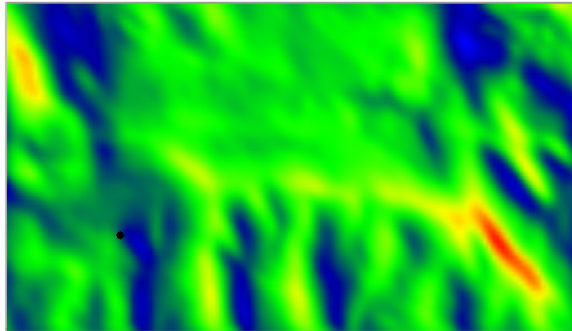
Coordenadas UTM y cota en m



Comparación: Dirección 60° N

UPMORO

5,4 x 3,1 km

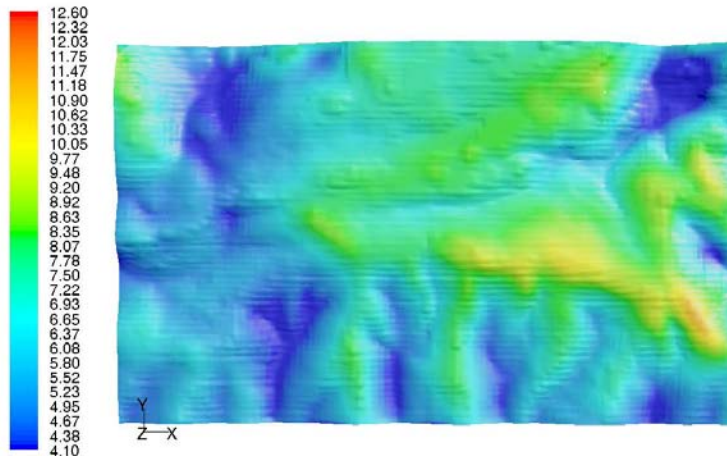


• = torre meteorológica

Viento supuesto en la torre:

V=5,92 m/s

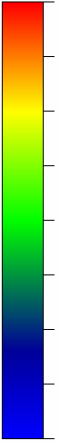
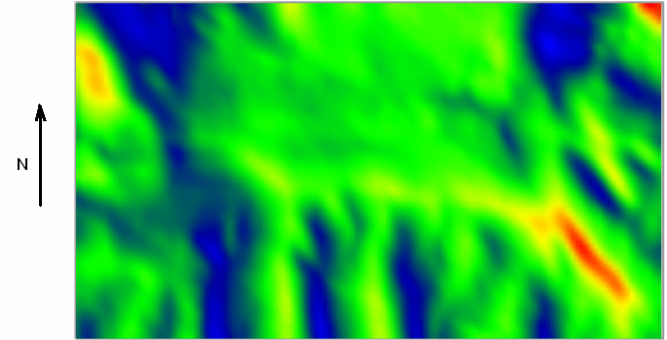
dirección: 60° respecto al Norte



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

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.

Curva de potencia

Una vez obtenida la distribución de velocidades en cada punto se utiliza la curva de potencia para obtener la energía producida

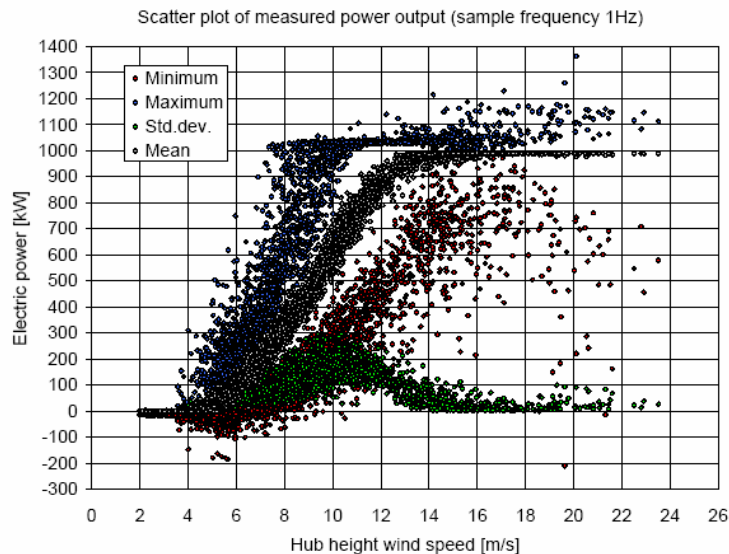


Figure 2 – Presentation of example data: power performance test scatter plots sample at 1 Hz (mean Hub height wind speed (m/s) minutes)

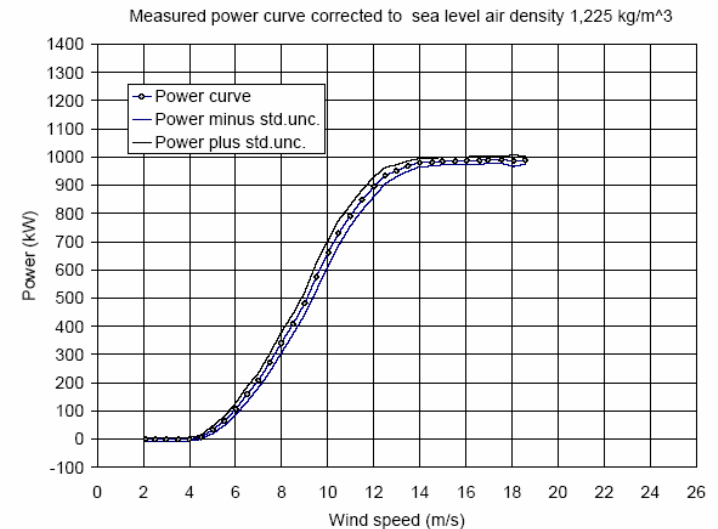
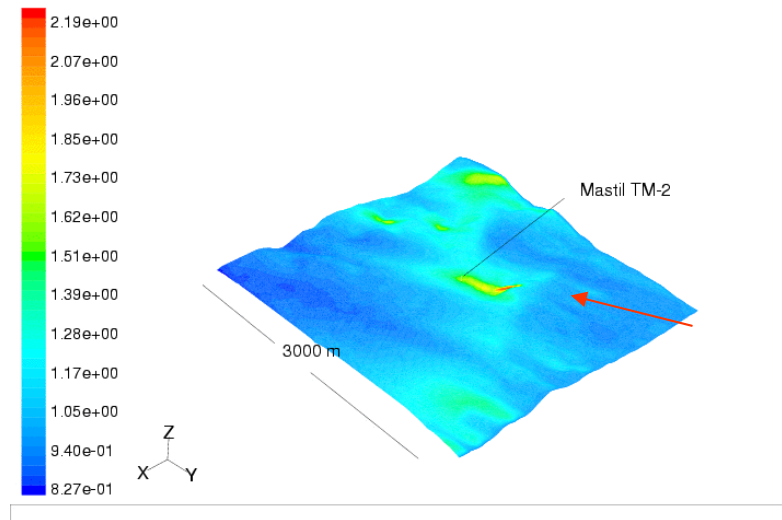


Figure 3 – Presentation of example measured power curve

Turbulencia debida a orografía

-En principio sólo los programas de ecuaciones completas son capaces de estimar la turbulencia.



-Los programas UPMORO o WASP no dan información sobre turbulencia

-Una nueva versión de WASP llamada WASP Engineering da valores de turbulencia. Experiencia limitada. Resultados poco contrastados.

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.

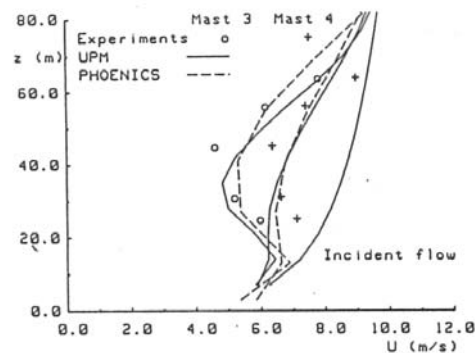


Estelas de aeroturbinas

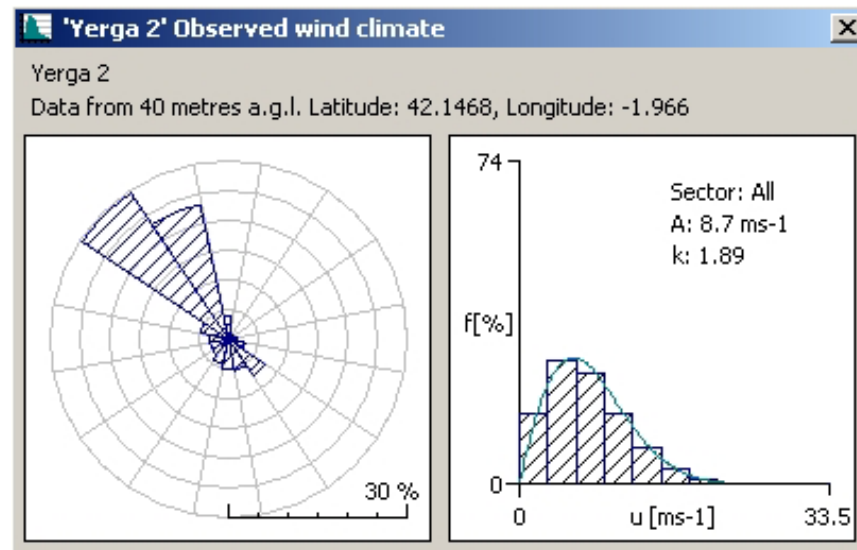
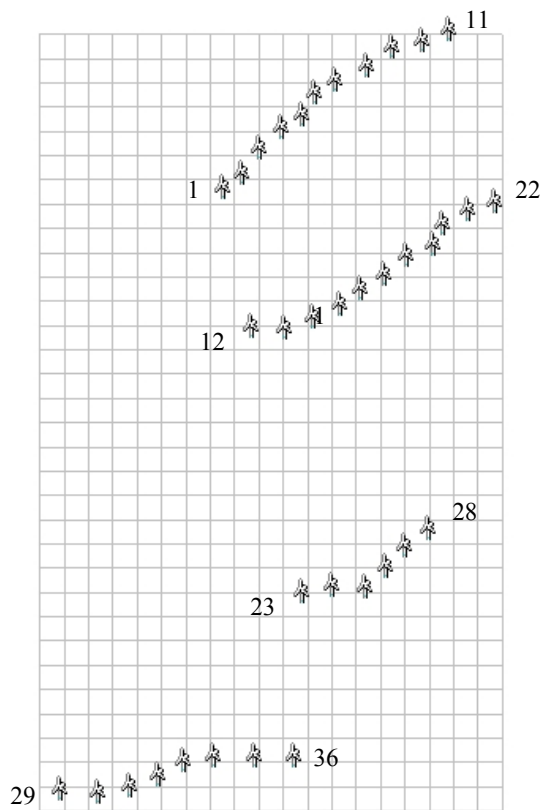
-En la estela el nivel de turbulencia es mayor que en el viento libre, dando lugar a que aumenten las cargas no permanentes sobre la máquina a sotavento, y a que su vida se acorte por el fenómeno de fatiga.

-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.



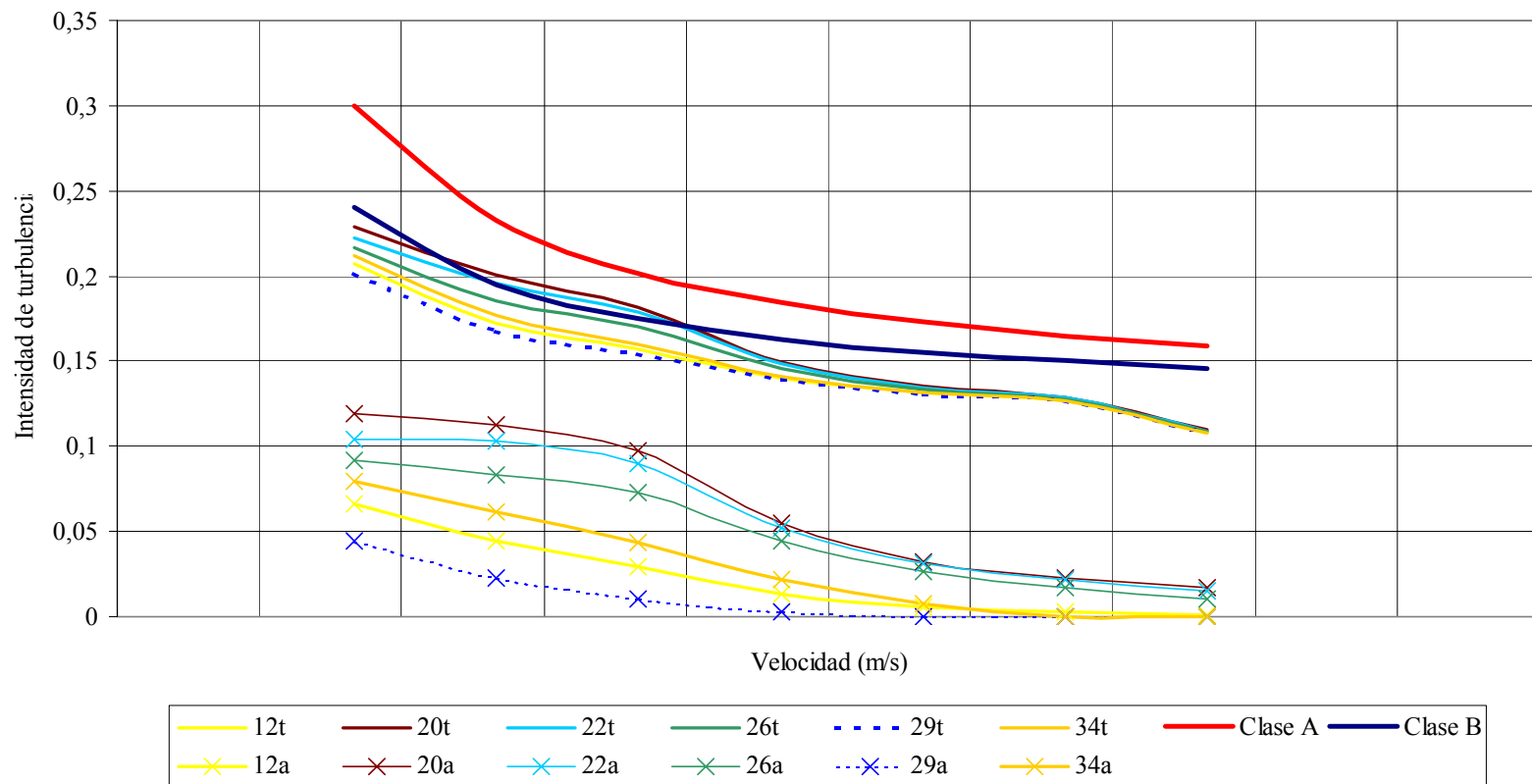
Estelas de aeroturbinas. Ejemplo de posible modificación del comportamiento de la aeroturbina en relación con su clase



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



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



Estelas de aeroturbinas

Estrategias de control y optimización en parques eólicos

- Se trata de controlar la aeroturbina que está aguas arriba de manera que aunque produzca menos potencia su estela sea menos intensa y el efecto combinado sea beneficioso para el funcionamiento del parque eólico
- Este control puede ser a base del cambio de paso, patente HEAT AND FLUX de ECN
- También puede ser cambiando la orientación de la aeroturbina desalineándola con el viento, patente del instituto real sueco de tecnología.

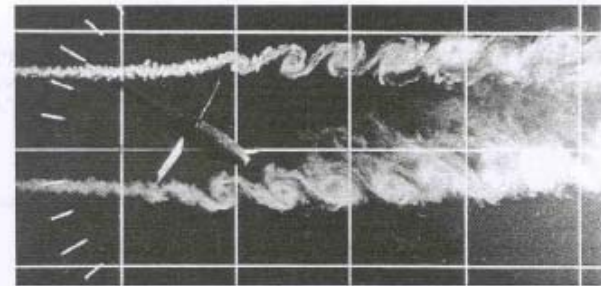
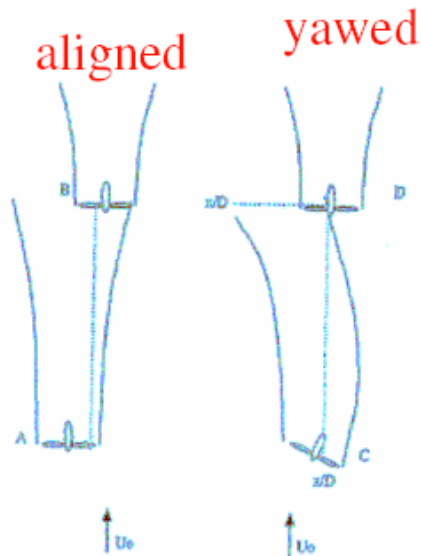


FIGURE 1. Flow visualisation of wake deflection from a turbine yawed 30° conducted at the Royal Institute of Technology (KTH), January 1987.

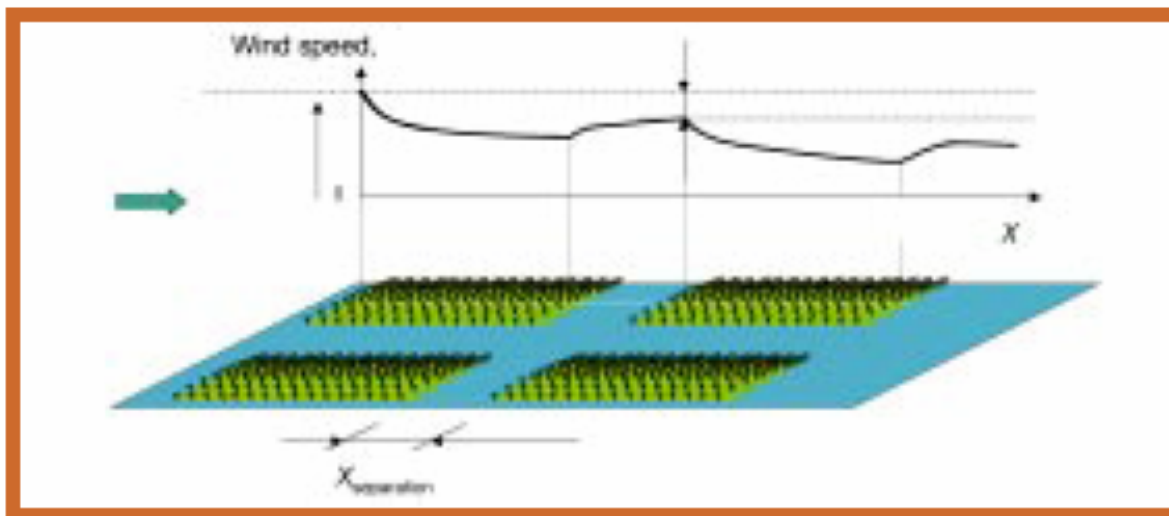
Estelas de aeroturbinas

Sensación de que muchos parques han disminuido su producción

- ¿Posible cambio climático?
- ¿Parque nuevo instalado en las proximidades?
- Interferencias entre grandes parques eólicos
- Cuantificar ese efecto

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



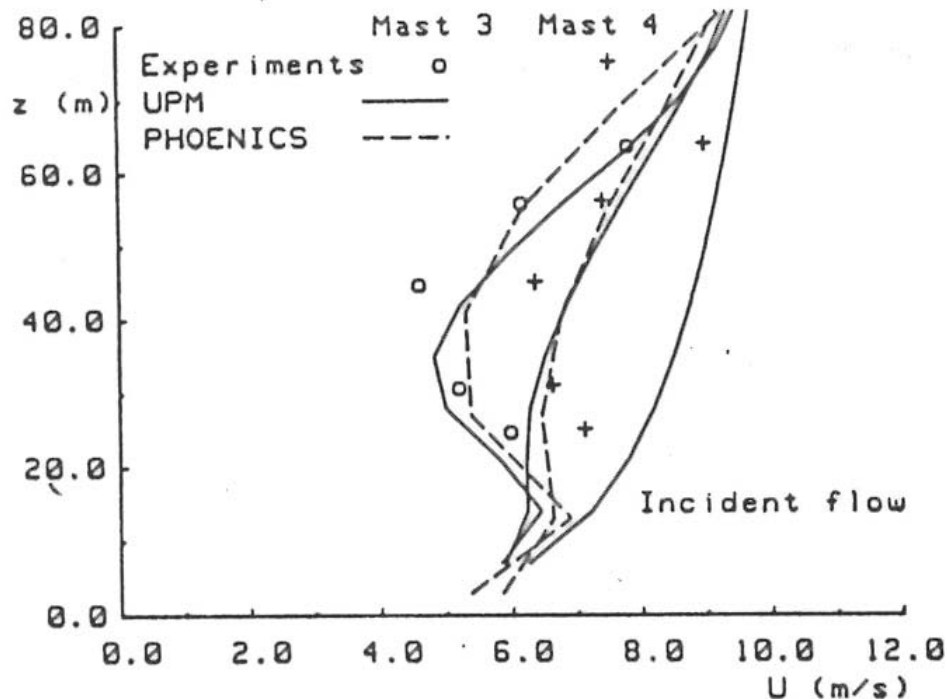
Modelos numéricos para el estudio de las estelas

- 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.



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.

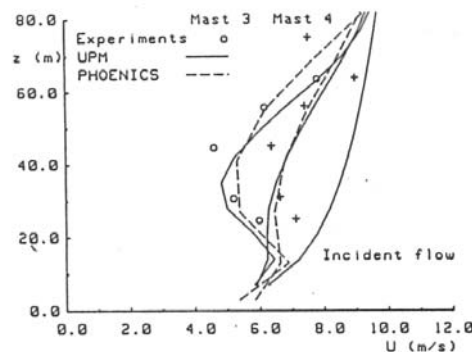


Modelos numéricos para el estudio de las estelas

UPMWAKE

-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



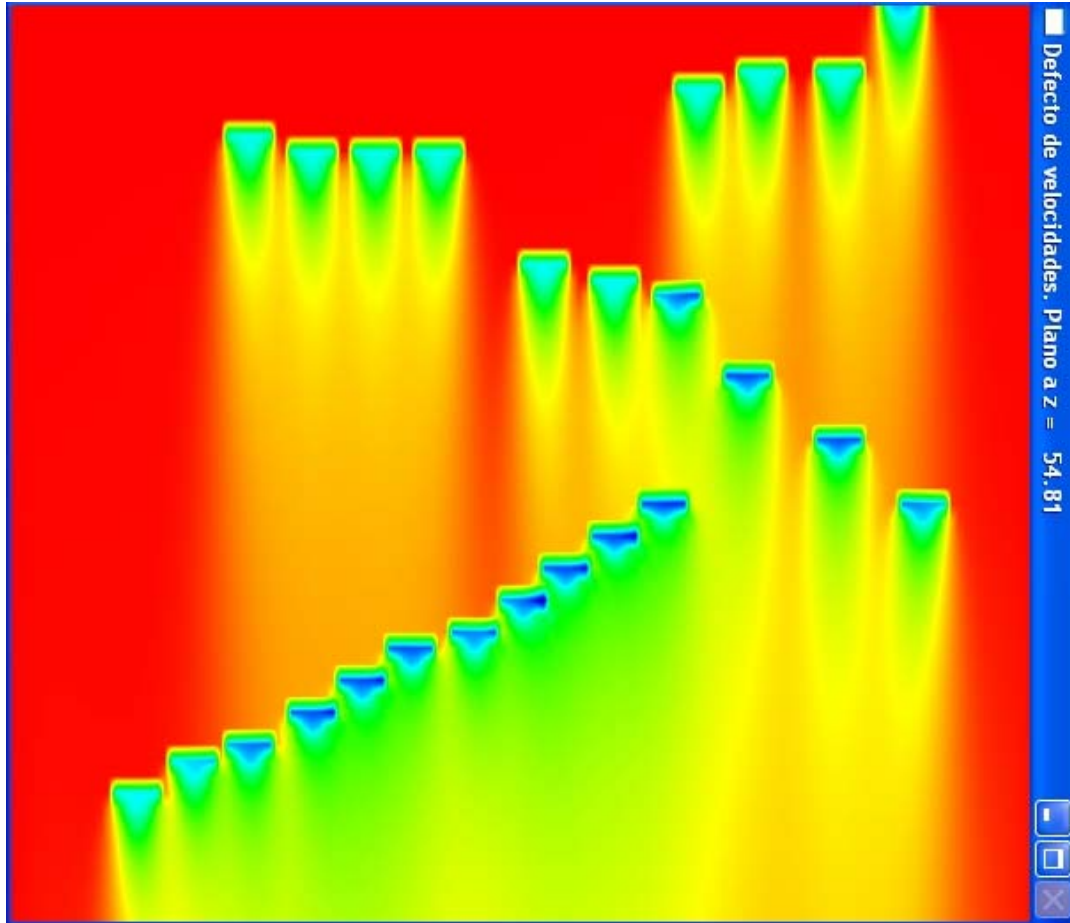
Modelos numéricos para el estudio de las estelas

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)



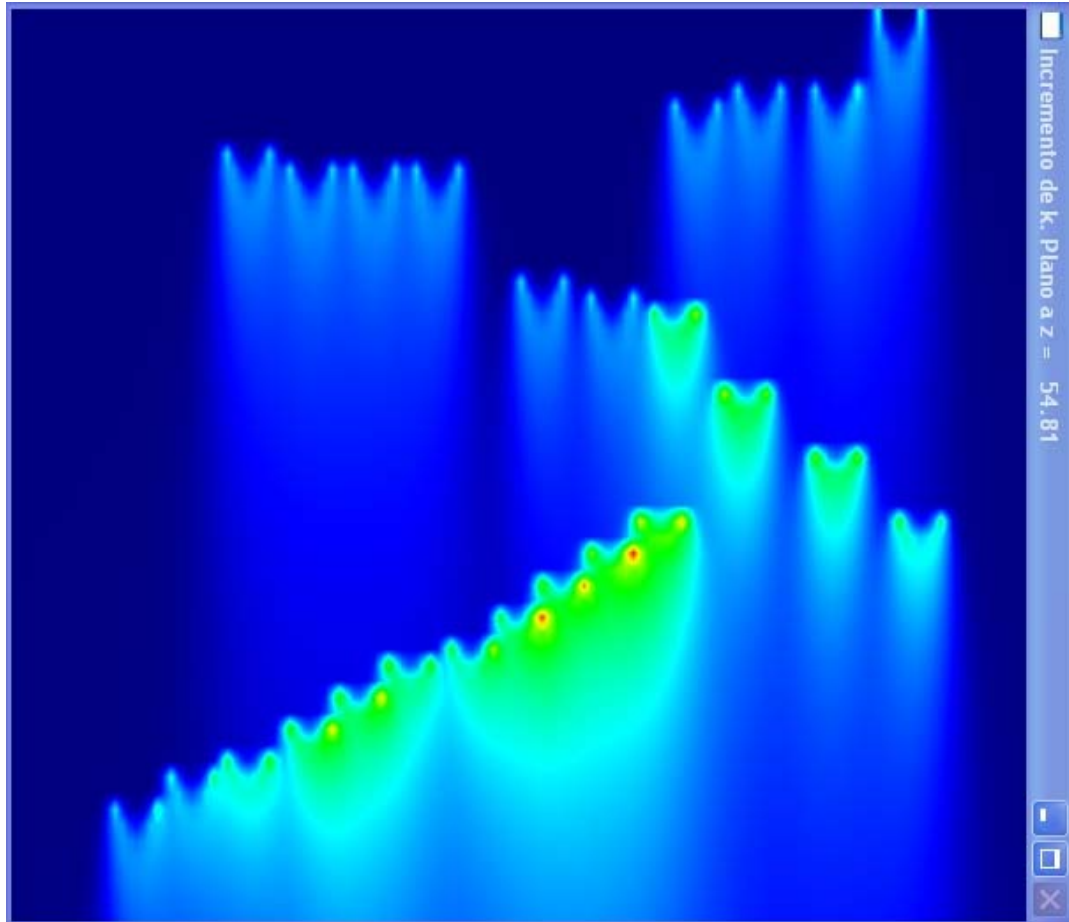
Velocidad: 10m/s
Dirección: 0°
Plano de cota z = 54.81 m

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



Resultados UPMPARK:

Incremento de energía cinética turbulenta (zoom)



Velocidad: 10m/s

Dirección: 0°

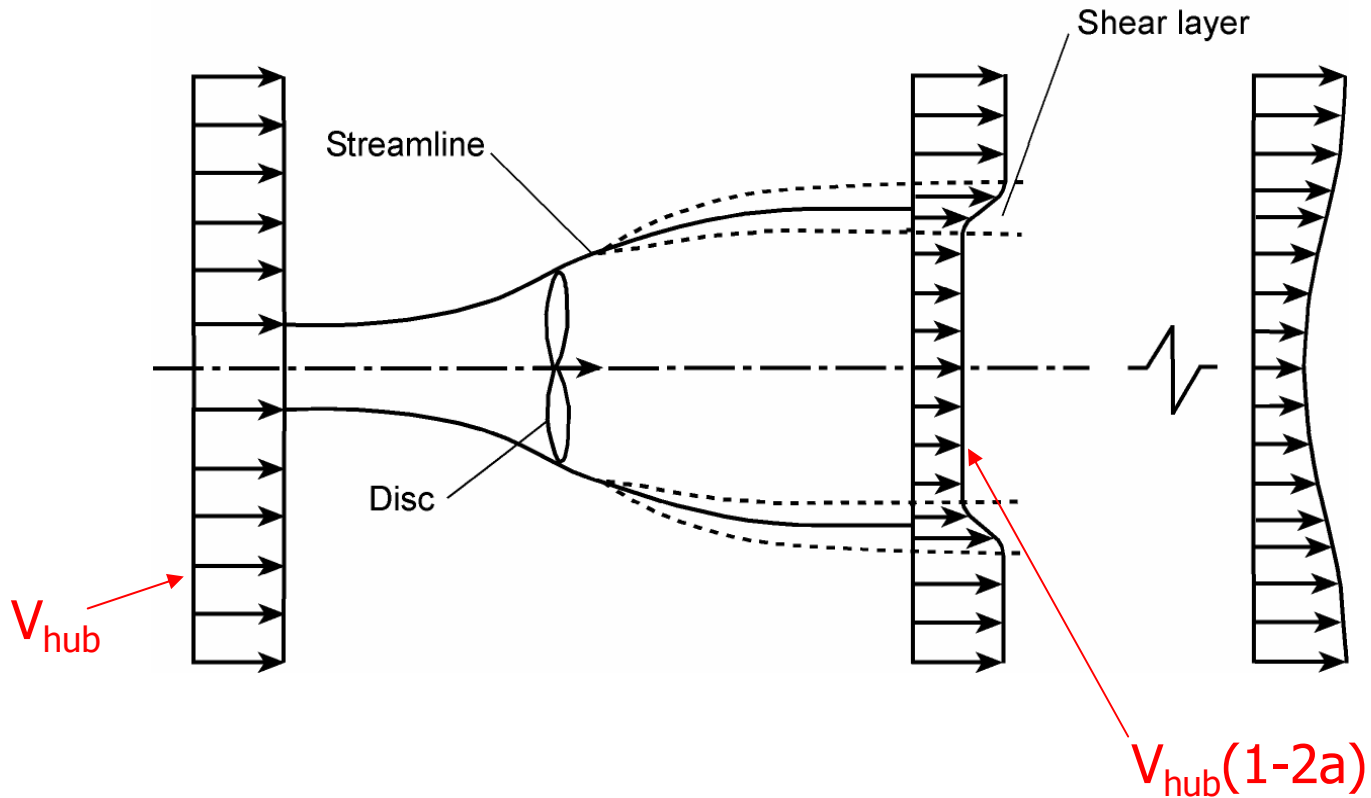
Plano de cota z = 54.81 m

maximo (rojo): 13.70 m²/s²

minimo (azul): 0.00



Esquema mostrando el inicio de la estela en un plano horizontal



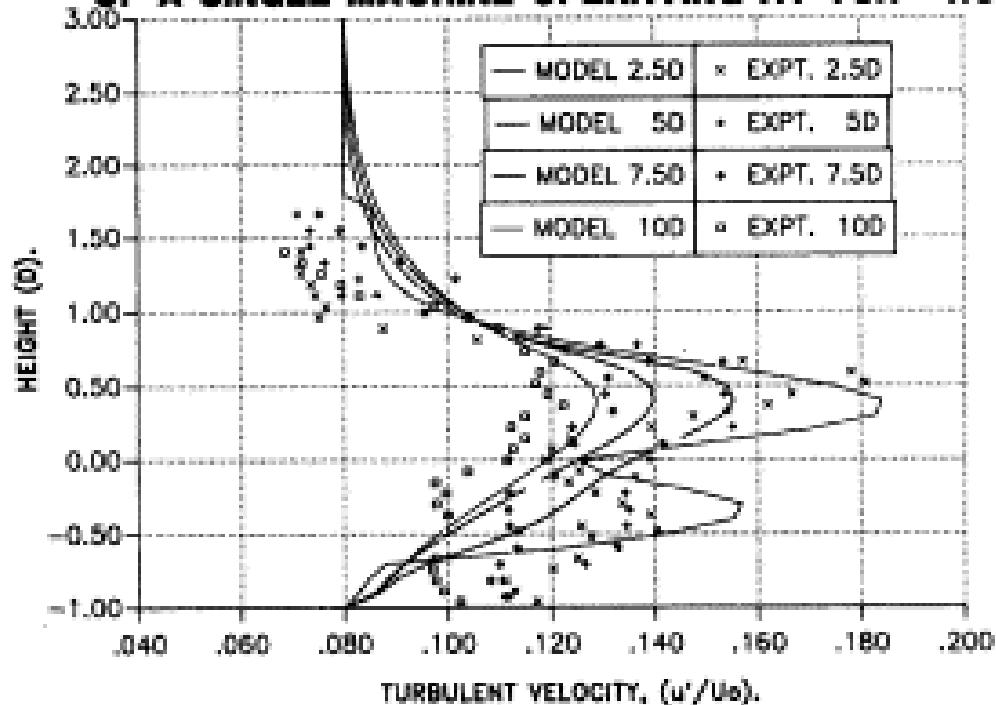
Visualización del inicio de la capa de cortadura en la estela cercana



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

Evolución de la turbulencia en la estela

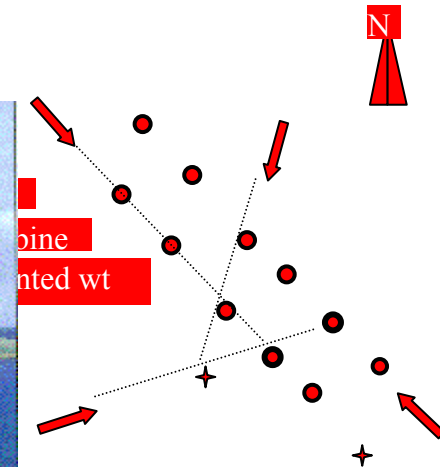
**COMPARISON BETWEEN THE MEASURED AND PREDICTED
TURBULENT VELOCITY PROFILES IN THE WAKE
OF A SINGLE MACHINE OPERATING AT TSR= 4.0.**



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



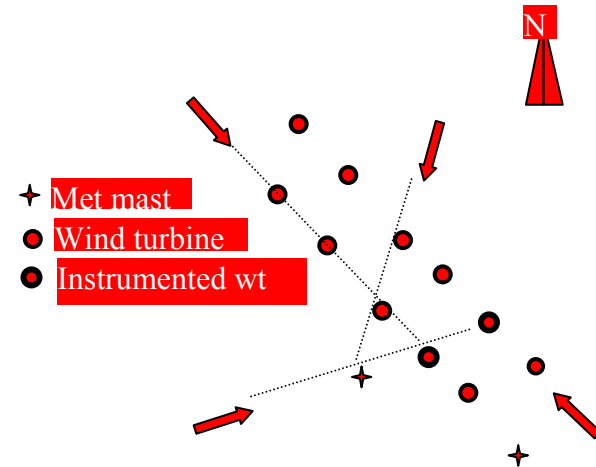
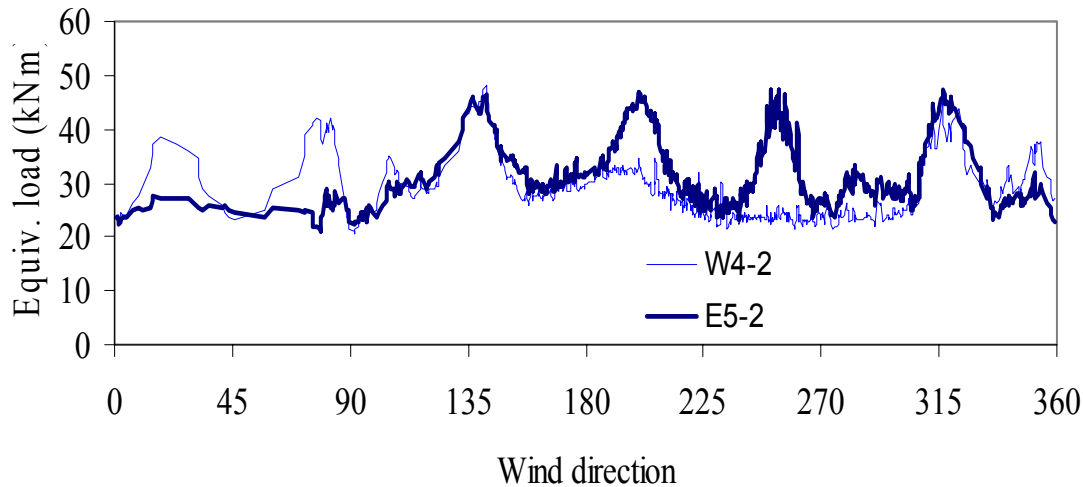
Efecto de las estelas en la carga dinámica o en la fatiga debido al aumento de la turbulencia



Parque eólico marino de Vindeby



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

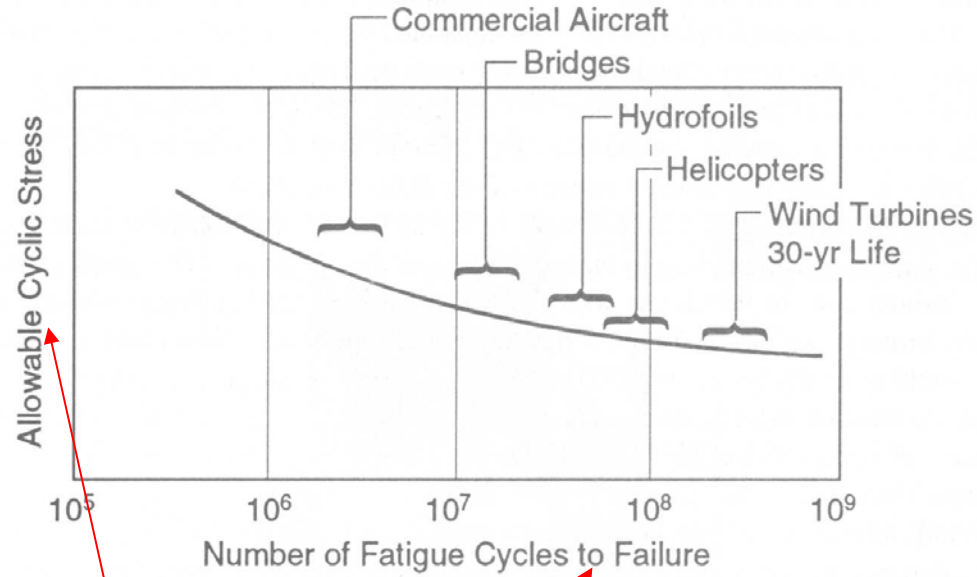


Figure 12-2. Schematic S-N curve illustrating the severity of wind turbine fatigue requirements compared to those of other structural systems.

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

$$n_{fat} = a S_{fat}^{-m}$$

$$S_{fat} = b n_{fat}^{-1/m}$$



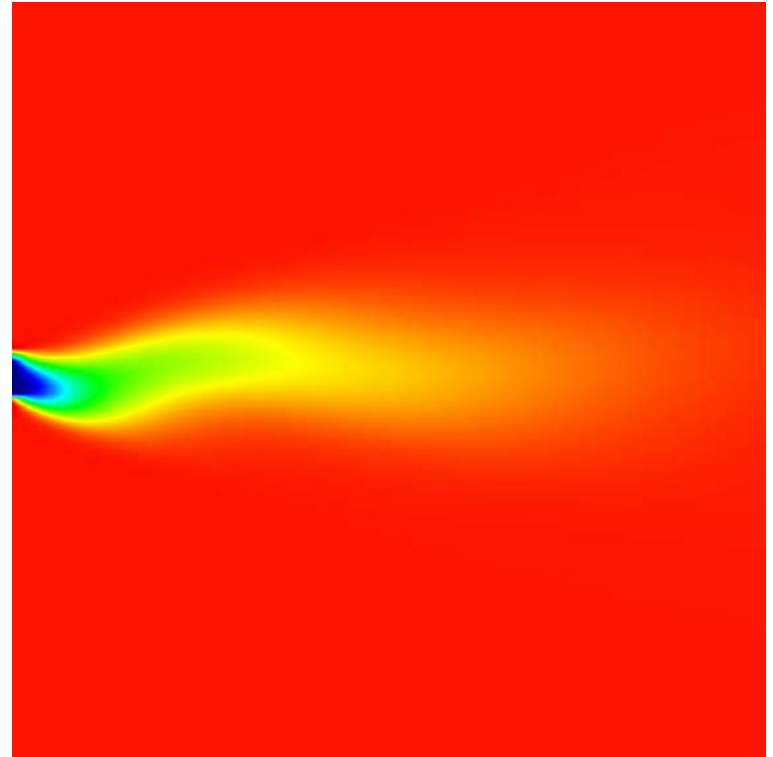
Wake meandering

Wake Meandering Visualization



Idaho Falls Smoke Visualization

Estela de un avión



Estela de una aeroturbina

Continuación de estos trabajos

- 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.



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



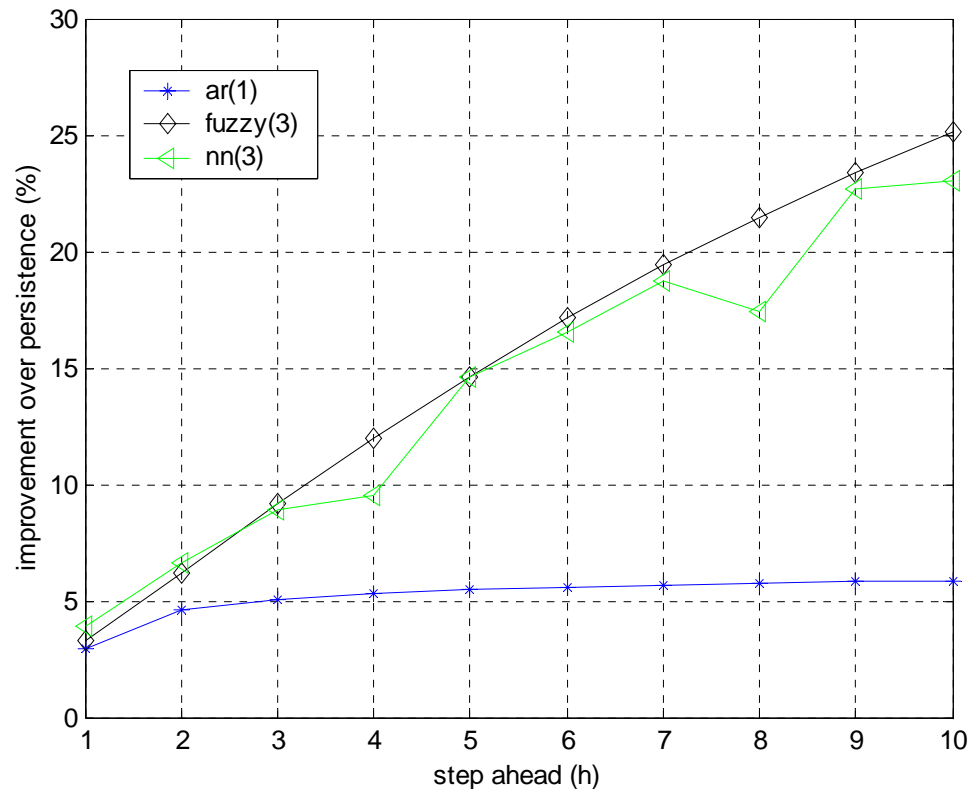
Predicción

- 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 geostrofico, 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



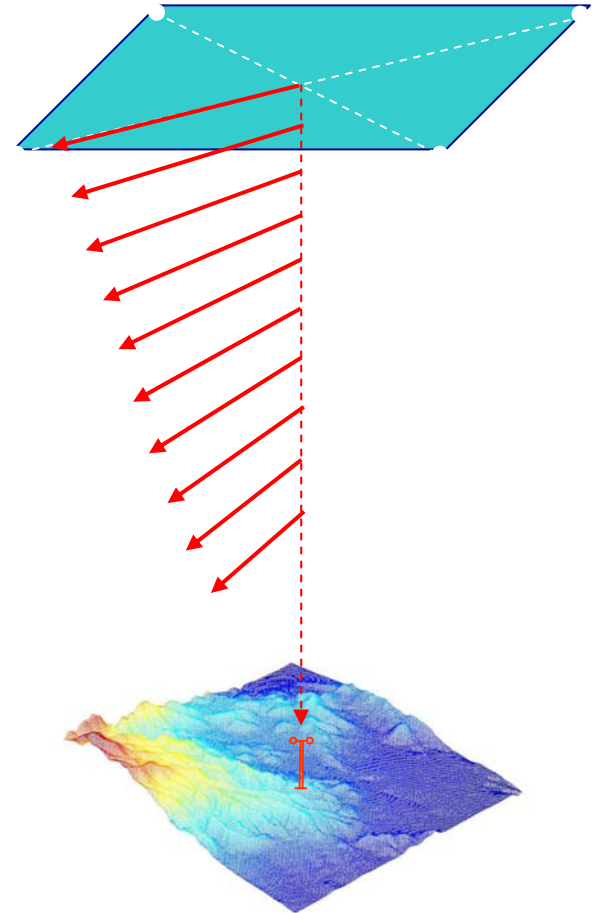
Mejoras sobre la persistencia típicas que se obtienen utilizando diferentes métodos estadísticos

Bajada típica del viento geostrófico al suelo

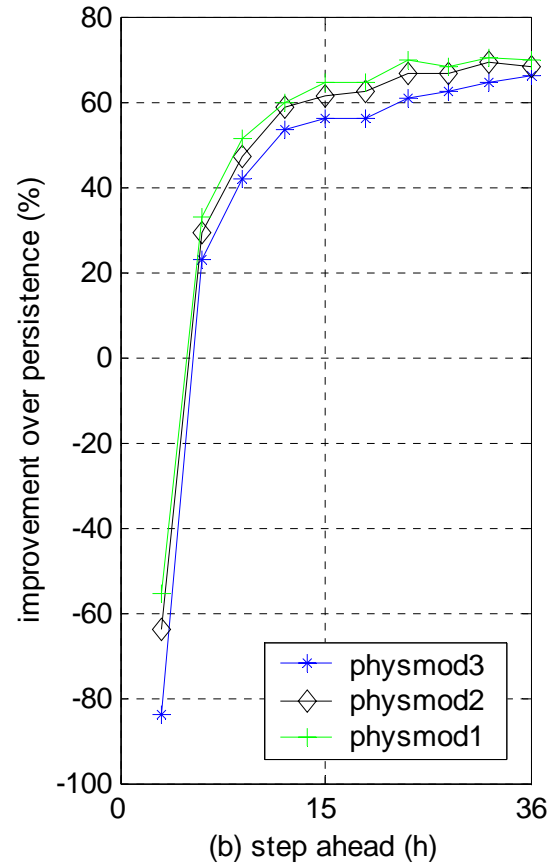
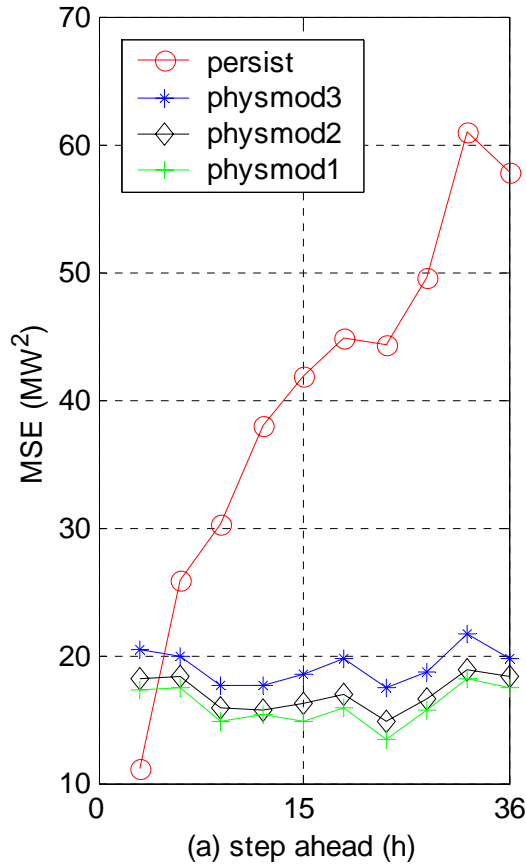
$$\frac{G}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \left[\ln \left(\frac{u_*}{fz_0} \right) - A \right]^2 + B^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

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

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