

“Caracterización del campo de vientos a sotavento de un aerogenerador marino. Influencia de la inclinación del rotor sobre el afloramiento de aguas profundas.”

Pedro Rodríguez Folgueras

Gestión Integral de Puertos y Costas, Universidad de Granada. Septiembre 2012

Resumen

En este documento se caracteriza de forma experimental el campo de vientos y el campo de presiones a sotavento de un aerogenerador marino y se evalúa el efecto que tiene la inclinación del plano del rotor sobre estas variables. Para ello se han realizado diversos ensayos en túnel de viento de un modelo a escala reducida de un aerogenerador. Este trabajo recoge el proceso experimental seguido para la toma de datos, así como un análisis de los mismos.

Como aplicación práctica de los resultados obtenidos, se hace una estimación de los efectos que la inclinación del plano del rotor de los aerogeneradores de un parque eólico puede tener sobre los procesos de afloramiento y hundimiento de masas de agua en las inmediaciones de dicho parque. Se describe el modelo teórico empleado y finalmente se comentan los resultados.

1 Introducción y Objetivos

El gran impulso experimentado en la última década por la tecnología de los parques eólicos marinos ha dado lugar a un creciente interés por conocer los efectos que causan estas instalaciones sobre el campo de vientos de su entorno. La importancia de estos estudios radica no sólo en evaluar los efectos que pueden tener sobre la capa límite atmosférica y la meteorología local (Roy et al., 2004 [1], Keith et al., 2004 [2], Barrie et al. [3]), sino también en determinar hasta qué punto la construcción de un nuevo parque eólico puede afectar al rendimiento de los parques eólicos vecinos (Corten et al., 2004 [4], Brand, 2009 [5]). Esta situación cobra cada vez más importancia en lugares como el Mar del Norte, donde se desarrollan los proyectos de obtención de energía eólica marítima más importantes de toda Europa. Adicionalmente han surgido estudios que relacionan la presencia de parques eólicos marinos con cambios locales en las corrientes oceánicas (Broström, 2008 [6]). Estas investigaciones abren la puerta a nuevos frentes de trabajo como la influencia de los parques eólicos sobre la dinámica marina y los ecosistemas acuáticos.

Las aproximaciones al modelado teórico de los parques eólicos marinos se han venido realizando tradicionalmente de dos modos diferentes. El primero de ellos consiste en asumir que los efectos que un parque de aerogeneradores tiene sobre el campo de vientos pueden simularse como la suma de los efectos individuales de cada uno de los aerogeneradores que lo componen, en particular mediante la superposición de cada una sus estelas individuales. Éste es el tipo de estrategia que suele implementarse en los modelos numéricos de explotación de energía eólica. La otra alternativa consiste en

emplear modelos analíticos que simulan los efectos de los campos eólicos no como adición de elementos más simples, sino considerándolos en su conjunto. En concreto, estos modelos proponen simular las características del parque eólico como un aumento de la rugosidad de la superficie del mar o bien en términos de un aumento de la turbulencia.

El presente trabajo guarda relación con la primera modalidad ya que se pone como objetivo la caracterización experimental de los efectos de un aerogenerador individual sobre la capa límite atmosférica y los campos de vientos y presiones a sotavento del mismo, así como las consecuencias de estos cambios en las tensiones tangenciales sobre la superficie del mar. Este acercamiento empírico a los cambios generados por un aerogenerador busca aproximarse a los efectos que un parque eólico marino tiene sobre las corrientes marinas forzadas por el viento y los procesos de upwelling y downwelling tal y como plantea de forma analítica Broström (2008) [6]. Adicionalmente, se ha analizado la influencia que tiene la inclinación del plano del rotor del aerogenerador en los fenómenos estudiados, con el objetivo de evaluar posibles diseños que potencien los fenómenos de upwelling. Su interés radica en que varios estudios relacionan estas zonas de afloramiento de aguas profundas con un incremento de la producción primaria y la riqueza pesquera al poner en circulación los nutrientes acumulados en el fondo (Botsford et al., 2003 [7], Small et al., 1981 [8]).

Para desarrollar este trabajo se ha caracterizado en primer lugar la capa límite atmosférica teórica de un medio marino, para unas condiciones de atmósfera neutra. Las formulaciones y parámetros elegidos se desarrollan en la sección 2.

En la sección 3 se hace una descripción del diseño experimental seguido en este trabajo. En ella se detalla el procedimiento empleado para reproducir en el túnel de viento la capa límite atmosférica marina (apartado 3.1), las características del modelo experimental del aerogenerador (apartado 3.2), la instrumentación empleada (apartado 3.3) y la configuración de los distintos ensayos realizados (apartado 3.4).

En la sección 4 se muestran los resultados de los ensayos realizados. Estos ensayos caracterizan el perfil de viento en el área a sotavento del aerogenerador, así como el déficit de velocidad, y las tensiones tangenciales y presiones sobre la superficie del mar a lo largo de un perfil longitudinal y varias secciones transversales. Así mismo se evalúa el efecto que tiene la modificación del plano del rotor del aerogenerador sobre los campos de velocidades, tensiones y presiones estudiados.

En la sección 5 se describe un modelo analítico de gravedad reducido, que simula el desplazamiento vertical de las capas de agua a consecuencia de un campo de tensiones superficiales. Esto permite evaluar los efectos que el déficit de velocidades asociado a la presencia un obstáculo tiene sobre los procesos de afloramiento y hundimiento de masas de agua. El objetivo, recogido en la sección 6, es poder aplicar a este modelo los resultados medidos en laboratorio.

Finalmente, en la sección 7 se exponen las conclusiones del trabajo, así como algunas propuestas de futuro que continúan esta línea de investigación.

2 Caracterización de la capa límite atmosférica

La capa límite atmosférica es la zona de la atmósfera donde las características del campo de vientos están bajo la influencia de la superficie sobre la que soplan, en este caso el mar. A continuación se describen las formulaciones y criterios empleados para caracterizar la capa límite atmosférica marina a fin de reproducirla en los ensayos en túnel de viento.

2.1 Parámetros empleados

Las principales características que condicionan las propiedades de la capa límite atmosférica son la rugosidad de la superficie, la latitud de la zona de estudio (que condiciona los efectos de Coriolis debidos a la rotación de la Tierra), los efectos térmicos y la velocidad del viento geostrofico.

2.1.1 Rugosidad superficial

La rugosidad superficial es la causante del descenso de la velocidad del viento desde su valor fuera de la capa límite atmosférica (viento geostrofico) hasta que se anula en tierra. Las capas bajas de aire reducen la velocidad de las que están por encima de ellas hasta una altura tal que el campo de vientos deja de notar la presencia del suelo. Esta rugosidad se caracteriza habitualmente por un parámetro denominado longitud de rugosidad y denotado como z_0 . Su valor representa, asumiendo un perfil logarítmico de velocidades, la altura a la que la velocidad del viento se hace cero.

La rugosidad en la superficie del mar es muy pequeña, mucho menor que en tierra. Aunque la rugosidad del mar se relaciona directamente con la magnitud del oleaje y éste, a su vez, depende del viento que está soplando, para este estudio se ha considerado adecuado suponer un valor constante de 0.0002 m, que es el recomendado por el European Wind Atlas [9] para condiciones de mar abierto.

2.1.2 Latitud de la zona de estudio

Se ha supuesto que el equivalente real al aerogenerador ensayado se encuentra a una latitud de 55º, que es en la que están situados los principales parques eólicos marinos europeos. El parámetro de Coriolis asociado, f , se deduce de la siguiente expresión:

(Ec. 1)

$$f = 2\Omega \cdot \sin(|\lambda|)$$

donde Ω es la velocidad angular de rotación de la Tierra y λ la latitud del punto considerado.

2.1.3 Efectos térmicos

En función de sus características térmicas, la atmósfera puede ser clasificada en tres categorías: estable, inestable y neutra. De entre ellas, las condiciones de estabilidad neutra son las más empleadas a la hora de definir un perfil teórico de viento en aplicaciones de energía eólica. Esta situación se produce cuando el aire cálido, en su ascenso, se enfría adiabáticamente de tal forma que se encuentra en equilibrio con el aire de su entorno. Es una situación típica de grandes vientos capaces de generar una gran turbulencia mecánica que provoca una gran mezcla en toda la capa límite.

2.1.4 Características del viento geostrofico

Aunque es el viento geostrofico el que condiciona el perfil del viento a baja altura, para caracterizar este perfil de forma teórica se toma como referencia su velocidad a una altura que normalmente es de 10 m. En relación con esto, Jain (2010) [10] establece que la velocidad media del viento a 10 m en un emplazamiento considerado de calidad buena para el aprovechamiento eólico oscila entre los 5.6 y 6.0 m/s.

2.1.5 Otras consideraciones

Existen diversos factores que pueden afectar en mayor o menor medida a las características del campo de vientos, como son la variación de la densidad del aire con la altura y con la humedad, la mayor o menor cercanía a la costa, la presencia de otros obstáculos cercanos, como pueden ser aerogeneradores contiguos, etc. A fin de simplificar, ninguno de estos aspectos será tenido en cuenta en el presente trabajo.

2.2 Perfiles teóricos de velocidad media e intensidad de turbulencia

Para describir el campo de vientos en el que se sitúa el aerogenerador de estudio se han empleado dos magnitudes características del mismo: el perfil de viento y la intensidad de turbulencia.

2.2.1 Perfil de viento teórico

Para caracterizar el perfil de viento teórico sobre la superficie del mar se ha supuesto una ley de tipo logarítmico de acuerdo con las consideraciones recogidas en ESDU (1985) [11]:

(Ec. 2)

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \Psi$$

donde $u(z)$ es la velocidad del viento a una altura z , u_* la velocidad de fricción del aire, k es la constante de Von Karman (cuyo valor aproximado es de 0.4) y z_0 es la longitud de rugosidad de la superficie. Por su parte, Ψ es una función que toma valores negativos en caso de atmósfera inestable (disminuyendo el gradiente vertical del viento) y positivos para atmósfera estable (aumentando el gradiente vertical del viento). Para el caso de estabilidad neutra, ESDU (1985) [11] propone la siguiente expresión:

(Ec. 3)

$$\Psi = 86.25 \cdot f \cdot z$$

donde f es el parámetro de Coriolis asociado a la latitud de la zona de estudio.

2.2.2 Intensidad de turbulencia teórica

La intensidad de turbulencia es una medida del nivel global de turbulencia y se define como:

(Ec. 4)

$$I = \frac{\sigma}{U}$$

donde σ es la desviación típica de las variaciones de la velocidad del viento en torno a la velocidad media U . La intensidad de turbulencia depende de numerosos factores tales como la rugosidad superficial, la altura sobre la superficie o el comportamiento térmico de la atmósfera. En este trabajo se emplea para el cálculo de la intensidad de turbulencia longitudinal teórica, I_u , la expresión recogida en ESDU (1985) [11]:

(Ec. 5)

$$I_u = \frac{2.63 \cdot \eta \cdot (0.538 + 0.09 \cdot \ln(z/z_0))^{\eta^{16}} \cdot u_*}{2.5 \cdot (u_* \cdot \ln(z/z_0) + 34.5 \cdot f \cdot z)}$$

con

$$\eta = 1 - 6 \cdot f \cdot z / u_*$$

3 Diseño experimental

Previamente al comienzo de los ensayos es necesario reproducir en el laboratorio la capa límite atmosférica propia del medio marino, definida de forma teórica en la sección 2. En el apartado 3.1 se describe el procedimiento seguido para alcanzar este objetivo, así como los resultados obtenidos. A continuación (apartados 3.2 y 3.3) se realiza una descripción del modelo de aerogenerador ensayado y de la instrumentación empleada. Finalmente (apartado 3.4) se muestra el diseño experimental y la localización de los puntos de medida escogidos.

3.1 Reproducción de la capa límite atmosférica en el túnel de viento

El empleo de túneles de viento en el estudio del comportamiento de aerogeneradores y turbinas está muy extendido dada la capacidad de estos dispositivos para generar flujos de aire controlados. En el presente trabajo se ha empleado el túnel de viento de capa límite del IIISTA. Este túnel de viento cuenta con una zona de ensayo de 16 m de longitud, 2.1 m de anchura, 1.8 m de altura y una capacidad para generar velocidades de viento de hasta 80 km/h.

La técnica habitual para reproducir un determinado perfil de velocidades en el túnel de viento consiste en disponer, en el tramo inicial del túnel, una serie de obstáculos o elementos de rugosidad tales que el perfil de viento original se vaya transformando al atravesarlos hasta adquirir las características del perfil deseado. Para este trabajo se contó con tres tipos de planchas con bloques distribuidos de manera uniforme al tresbolillo, así como barreras con alturas de 15, 30 y 60 cm y tuercas de distintas dimensiones. Las planchas utilizadas, todas ellas de 2.1x1.2 m de superficie, presentan las características recogidas en la siguiente tabla:

	Dimensiones (cm)			Separación (cm)	
	Largo	Ancho	Alto	Longitudinal	Transversal
Tipo 1	5	10	10	15	20
Tipo 2	4	8	4	8	16
Tipo 3	2.5	5	2.5	5	10

Para lograr reproducir las características de la capa límite atmosférica se ensayaron hasta 40 configuraciones diferentes de elementos rugosos. El cálculo del error cuadrático medio de los perfiles medidos con respecto a los perfiles teóricos de velocidad media e intensidad de turbulencia determinó la configuración óptima. Este error se calculó como la media de la distancia de cada punto medido al valor teórico de la curva que se pretende simular. En la Figura 1 se representa una nube de puntos donde cada elemento corresponde a una de las configuraciones ensayadas.

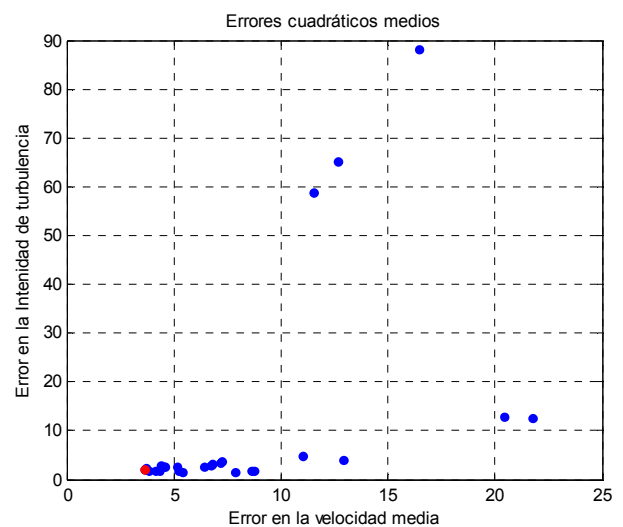


Figura 1. Errores cuadráticos medios de las configuraciones ensayadas para reproducir la capa límite atmosférica. En abscisas el error en la velocidad media (adimensional) y en ordenadas el error en la intensidad de turbulencia (adimensional).

En el eje horizontal se representa el error cuadrático medio correspondiente al perfil de velocidades y en el vertical el correspondiente al perfil de intensidad de turbulencia. Ya que se trabajó en todo momento con perfiles adimensionales, los errores carecen de unidades. Se señala en rojo la configuración final elegida, que es aquella cuyos errores se aproximan más a cero.

La disposición de paneles que mejor se ajustó a los perfiles teóricos es la compuesta por una plancha de tipo 1, seguida de otra de tipo 2, otra de tipo 3 y 5 m sin ningún tipo de elemento rugoso. En conjunto, la distancia necesaria para desarrollarse el perfil logarítmico de viento fue de 8.6 m, de forma que la zona útil de ensayo queda confinada en un tramo de unos 4.5 m. En la Figura 2 se muestra una fotografía de la configuración del túnel de viento previa a los ensayos.

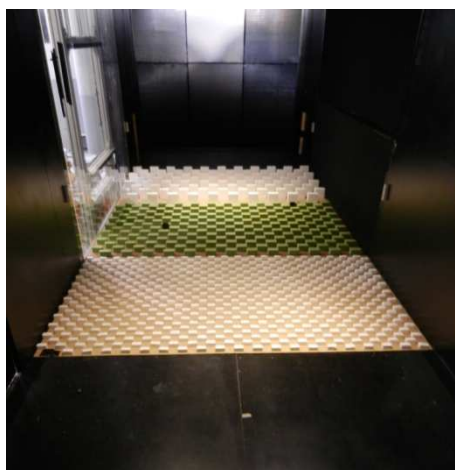


Figura 2. Configuración final de rugosidades empleada para reproducir la capa límite atmosférica marina en el túnel de viento.

En la Figura 3 se muestran los perfiles teóricos y medidos de velocidades medias e intensidad de turbulencia en el punto donde se sitúa la turbina.

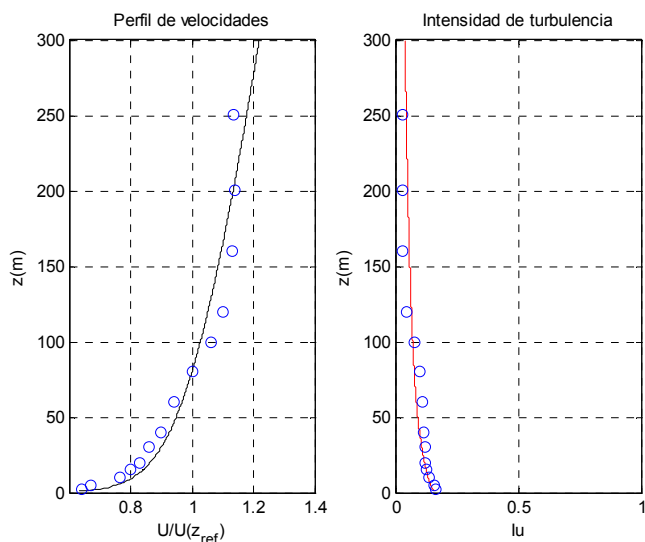


Figura 3. Perfiles verticales de velocidad media adimensionalizada del viento (izquierda), e intensidad de turbulencia (derecha). Se representan con línea continua los valores teóricos esperados y con círculos los valores medidos experimentalmente.

El eje vertical representa las alturas a las que se han medido la velocidad media y la intensidad de turbulencia. Estos valores están afectados de la escala 1:250 que es la empleada en todos los ensayos. Los límites de la zona de medida se han establecido entre 0 y 250 m, algo más de tres veces las dimensiones del diámetro del aerogenerador ensayado. Se puede admitir (Porté-Agel et al., 2011 [12]) que la altura de influencia de un aerogenerador es de dos veces su diámetro, rango que queda ampliamente cubierto en este trabajo.

El eje horizontal del perfil de viento representa la velocidad media adimensional $u/u(z_{ref})$, donde $u(z_{ref})$ es la velocidad medida a una altura de referencia. Aunque lo habitual es tomar esta altura de referencia a los 10 m, en este caso se ha optado por hacerlo a 80 m por ser la altura a la que se sitúa el eje del rotor.

Se observa que los datos medidos se ajustan razonablemente bien con los perfiles teóricos, por lo que se puede concluir que la capa límite generada en el túnel de viento es válida para representar la capa límite atmosférica real de un medio marino.

3.2 Modelo experimental del aerogenerador

Para este trabajo se ha empleado un modelo de aerogenerador de eje horizontal de tres palas que es el que se usa más habitualmente en la construcción de parques eólicos tanto marinos como terrestres. El diámetro del rotor es de 350 mm y su eje se sitúa a una altura sobre el suelo de también 350 mm. Dado que la escala empleada para el modelo es de 1:250, este aerogenerador representa un modelo real de 87.5 m de diámetro que está dentro del orden de magnitud de los que se instalan en la actualidad en la mayor parte de los parques eólicos del mundo. En base a estas dimensiones, el efecto barrera del modelo en el túnel de viento es del orden de 1:40, significativamente menor al límite máximo recomendado del 5% (ASCE, 1987) [13]. En la Figura 4 se muestra una fotografía del modelo y una representación esquemática de las dimensiones del aerogenerador.

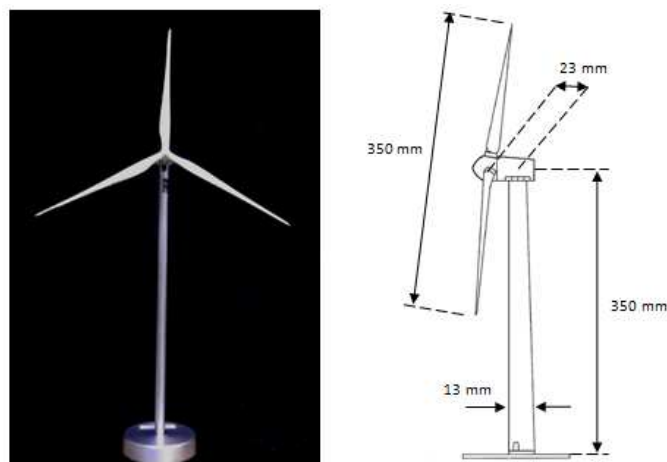


Figura 4. Modelo empleado en los ensayos y esquema con sus principales dimensiones en mm.

Las palas del aerogenerador están construidas siguiendo un perfil tipo NACA, que se encuentra girado con respecto al plano del rotor para potenciar sus características aerodinámicas. La anchura de las palas es de 9.6 mm en el empotramiento, 13.7 mm en su parte más ancha (a 24.2 mm del empotramiento) y 4.2 mm en su tramo final (a 162.3 mm del empotramiento). En la Figura 5 se muestra un esquema de las dimensiones de las palas.

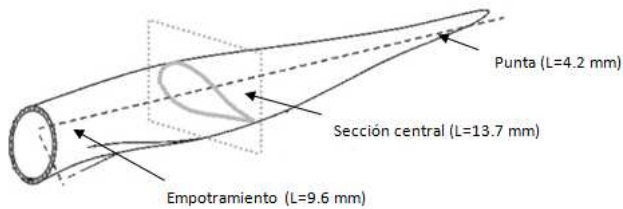


Figura 5. Dibujo esquemático de la pala del aerogenerador. En ella se señalan sus principales partes y sus dimensiones en mm.

El prototipo del aerogenerador cuenta con un mecanismo de giro y una escala graduada que permiten inclinar el eje del rotor un grado α entre 0 y 60 con respecto a la horizontal. La Figura 6 muestra una fotografía de detalle del dispositivo.



Figura 6. Detalle del mecanismo regulable que permite fijar la inclinación del plano del rotor deseada.

En los ensayos, la velocidad del viento medida en el túnel de viento a la altura del rotor es del orden de 7 m/s. De acuerdo con esto, el número de Reynolds asociado a una longitud característica del ancho de las palas es del orden de 9600, significativamente menor que el correspondiente a un aerogenerador real. Alfredsson et al. (1982) [14] establece que este número de Reynolds influye directamente en el comportamiento de la turbina y su capacidad para producir energía. No obstante, Medici et al. (2006) [15] sugiere que las características de los vórtices y las estelas que se generan a sotavento del aerogenerador son independientes de este número de Reynolds, por lo que el modelo empleado sí resulta válido para los objetivos de este trabajo.

3.3 Instrumentación

3.3.1 Anemómetro de hilo caliente

Las medidas de velocidad se han realizado empleando un anemómetro de hilo caliente simple capaz de tomar datos en una dirección y con una frecuencia de hasta 4000 Hz. Este dispositivo está compuesto por un filamento metálico por el que se hace pasar la corriente eléctrica. Los cambios de temperatura asociados a los cambios en la velocidad del aire

modifican la resistencia del filamento y en consecuencia el voltaje de la corriente. Una calibración previa permite identificar unívocamente el voltaje medido por el hilo caliente con la velocidad del flujo de aire en el punto de ensayo.

Una de las cualidades de los anemómetros de hilo caliente es su pequeño tamaño, lo que los hace muy poco invasivos en ensayos de laboratorio. Además, su capacidad de tomar datos a grandes frecuencias permite obtener no sólo valores medios de velocidad sino también las fluctuaciones turbulentas. En la Figura 7 se muestra una imagen de detalle del sensor utilizado y su filamento de medición.

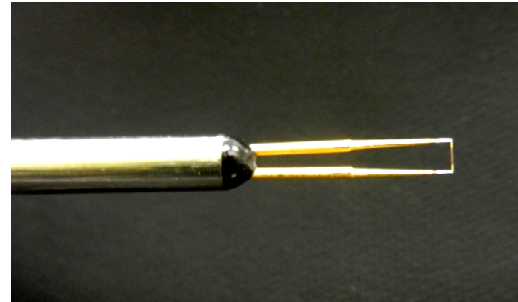


Figura 7. Detalle del filamento de medición de un anemómetro de hilo caliente.

3.3.2 Escáner de presión

Para caracterizar el campo de presiones de la zona de estudio se ha empleado un escáner de presión capaz de tomar los valores de la presión estática y dinámica a través de cada uno de los 20 puertos que se conectan a los puntos de medida mediante sendos taps de presión. Cada puerto del escáner cuenta con un sensor piezoresistivo capaz de transformar el valor de la presión en una señal eléctrica que es almacenada en un ordenador. Su funcionamiento se basa en el cambio de la resistencia eléctrica de unas bandas extensométricas cuando se alargan al deformarse por efecto de la presión.

Al igual que el anemómetro de hilo caliente, el sistema de medida de presión empleado destaca por sus reducidas dimensiones. Así, el diámetro de los taps de presión que se introducen en el túnel de viento tiene apenas 2 mm con lo que su interferencia en el flujo de aire es mínima. En la Figura 8 se muestra un detalle del escáner de presión empleado.

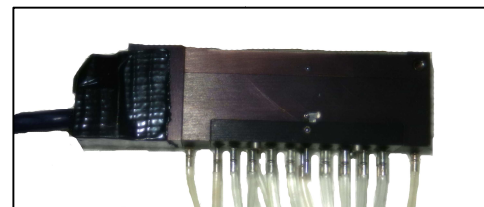


Figura 8. Detalle del escáner de presión empleado y los cables que conectan a los taps.

Se han efectuado simultáneamente las medidas en los 12 puntos de ensayo. Para ello se ha tomado en cada una de las configuraciones datos durante 2 minutos a una frecuencia de 125 Hz.

3.4 Configuración de los ensayos

A fin de conocer las características del campo de vientos a sotavento del aerogenerador se han tomado medidas del perfil de velocidades medias y de la intensidad de turbulencia tras el aerogenerador a lo largo del plano central longitudinal del túnel. Para poder caracterizar la evolución del déficit de velocidades, los puntos de medida se situaron a las distancias de 1, 4, 8 y 12 veces el diámetro del aerogenerador. En un estudio similar, Porté-Agel et al. (2011) [12] extiende su estudio a una distancia de 20 D (donde D es el diámetro del aerogenerador), aunque los perfiles tomados a distancias de 14 D muestran la casi total recuperación del perfil de viento original.

Se han repetido las medidas anteriores en planos paralelos al central a una distancia de un diámetro a cada lado con el fin de poder conocer la distribución transversal de velocidades. Todos los perfiles se han caracterizado mediante 12 puntos situados a alturas de 2, 4, 8, 12, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 68 y 80 cm del suelo, que corresponden con alturas de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 80, 100, 120, 140, 170 y 200 m a escala real. En la Figura 9 se muestra un dibujo esquemático de la configuración del túnel de viento y la disposición de los ensayos.

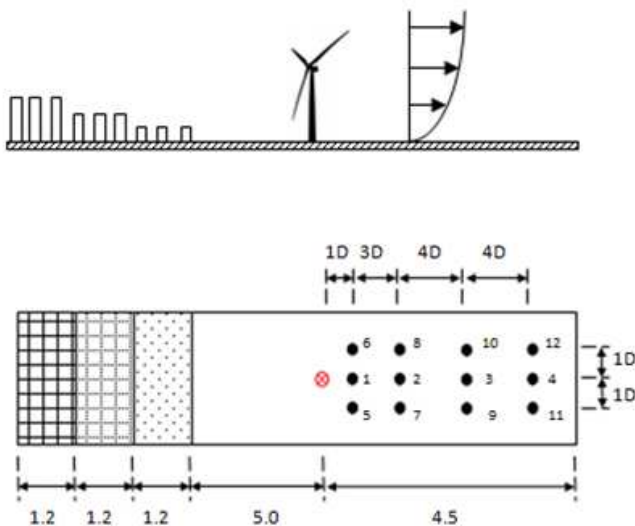


Figura 9. Esquema de la configuración en perfil (arriba) y planta (abajo) de los ensayos realizados. Las zonas con distintas tramas representan las rugosidades empleadas para reproducir la capa límite del medio marino. El punto rojo señala el emplazamiento del modelo del aerogenerador mientras que los puntos negros representan los lugares de toma de datos. Cotitas en metros.

Este esquema general se ha repetido para tres configuraciones de inclinación del plano del rotor de 5, 20 y 40° con respecto a la horizontal. La primera de ellas se

corresponde con la inclinación habitual del plano del rotor de los aerogeneradores y su finalidad es evitar el impacto de las palas con la torre.

4 Resultados y discusión

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en los ensayos descritos en la anterior. En el apartado 4.1 se comparan los datos de los perfiles de viento tomados para cada una de las inclinaciones de rotor ensayadas y se evalúa el déficit de velocidad producido por la presencia del aerogenerador. En el apartado 4.2 se calculan las tensiones tangenciales sobre la superficie asociadas a cada uno de los perfiles de viento medidos. Finalmente, en el apartado 4.3, se muestra la variación del campo de presiones correspondiente a las distintas inclinaciones del plano del rotor, con respecto a la situación original (sin aerogenerador).

4.1 Campo de vientos

A continuación se recogen los resultados de los perfiles de viento medidos en laboratorio. Las velocidades se han adimensionalizado en cada punto con respecto a la velocidad a 35 cm (altura del eje del rotor) medida sin aerogenerador. Las dimensiones se expresan en relación con el diámetro del rotor (D).

La Figura 10 muestra los perfiles de velocidades medidos en la sección central de ensayo, a las distancias de 1, 4, 8 y 12 diámetros del aerogenerador. Se reproducen los valores medidos para la situación sin aerogenerador (libre) y para las situaciones con aerogenerador con eje del rotor inclinado 5, 20 y 40°. Los resultados muestran una clara evidencia de la extracción de cantidad de movimiento que efectúa la turbina. Como es de esperar, este efecto es más pronunciado en las cercanías del aerogenerador y el perfil de velocidades se va recuperando a medida que aumenta la distancia a éste. No obstante, en la posición más alejada a la que se han tomado medidas, a una distancia del aerogenerador de $x/D=12$, aún se notan los efectos de la estela producida. En la vertical, la zona de influencia de la turbina queda limitada de forma clara a una altura $z/D=1.5$.

Los resultados obtenidos son coherentes con los publicados en otros trabajos. Los datos medidos en túnel de viento por Porté-Agel et al. (2011) [12] muestran un comportamiento análogo tanto vertical como longitudinalmente. No obstante, la reducción de velocidad a la altura del eje del aerogenerador presentada en su trabajo es significativamente superior a la medida con nuestro modelo. Otras publicaciones (Crespo et al. 1996 [16], Medici et al, 2006 [15]) muestran patrones similares, aunque con diferencias que Porté-Agel et al. (2011) [12] achaca a la influencia de las características de los distintos flujos incidentes.

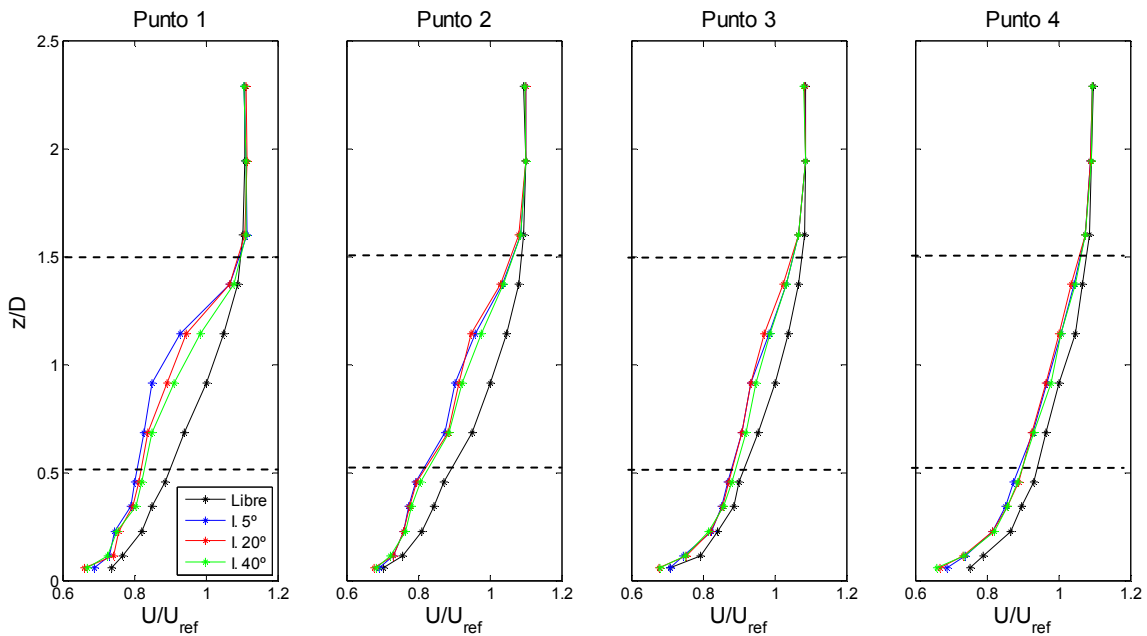


Figura 10. Perfiles de velocidad a lo largo del eje central de la zona de ensayo para las situaciones sin aerogenerador y con aerogenerador e inclinaciones del eje del rotor de 5°, 20° y 40°.

Los efectos asociados a la inclinación del eje del rotor quedan patentes en las medidas tomadas a una distancia de $x/D=1$, pero ya en el siguiente perfil medido ($x/D=4$) su influencia se difumina notablemente. Para evaluar mejor estos resultados, se representa en la Figura 11 el déficit de velocidades de cada una de las configuraciones del rotor con respecto a la velocidad sin aerogenerador.

Se observa cómo los máximos déficits se producen a la altura del eje del rotor y, lógicamente, en el perfil más cercano. Estos déficits toman valores de 15.1, 11.0 y 8.9 % para las inclinaciones de 5, 20 y 40°, respectivamente. A medida que aumenta la distancia al aerogenerador, estos valores máximos

disminuyen al tiempo que el déficit de velocidades se desplaza en altura. Este efecto es especialmente notable entre las distancias $x/D=1$ y $x/D=4$, donde los valores máximos caen del orden del 35 % para la inclinación de 5° y del 10 % en las otras dos, mientras que el área total de las curvas cae del orden del 15 % para la inclinación de 5° y se mantiene para las inclinaciones de 20 y 40°.

Los valores observados por debajo una altura de $z/D=0.25$ presentan una tendencia menos clara en su comportamiento debido posiblemente a la mayor incertidumbre de las medidas realizadas en las proximidades del suelo, por lo que no se han tenido en cuenta en los cálculos anteriores.

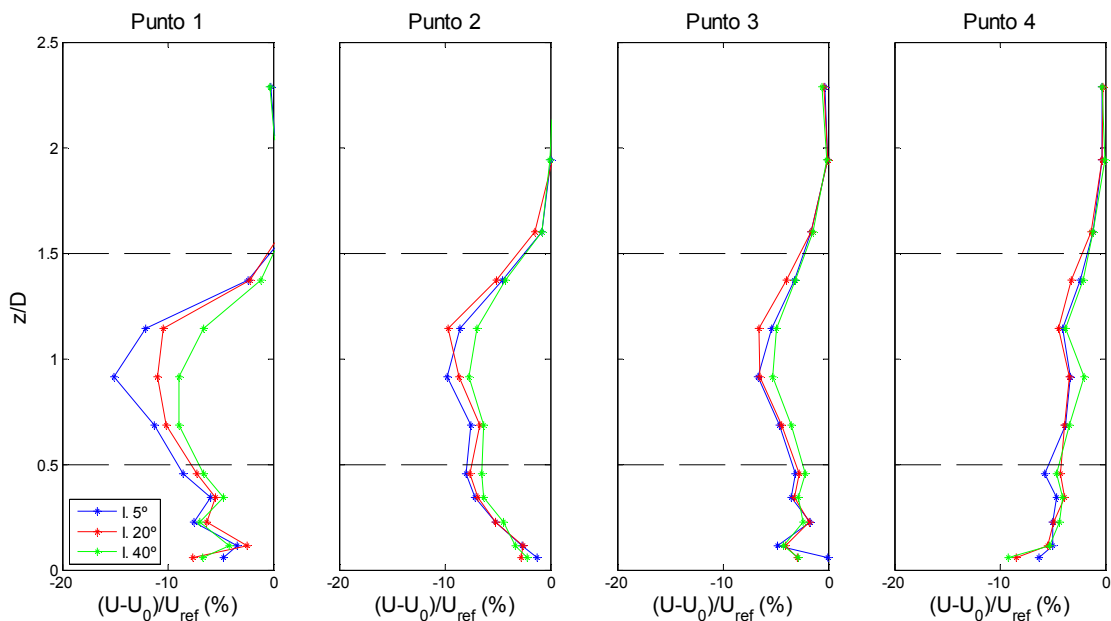


Figura 11. Déficit de velocidades, expresado en porcentaje, asociado a los perfiles de viento medidos a lo largo del eje central de la zona de ensayo.

En la Figura 12 se muestran los mismos datos que en la Figura 10, pero tomados en un plano longitudinal desplazado una distancia de 1 D del eje central de la zona de estudio. A esta distancia los efectos de la estela del molino no son

apreciables, de manera que las curvas con y sin modelo se confunden en todos los perfiles. El comportamiento al otro lado del eje central es el mismo, como cabría esperar de la distribución simétrica de los puntos de medida.

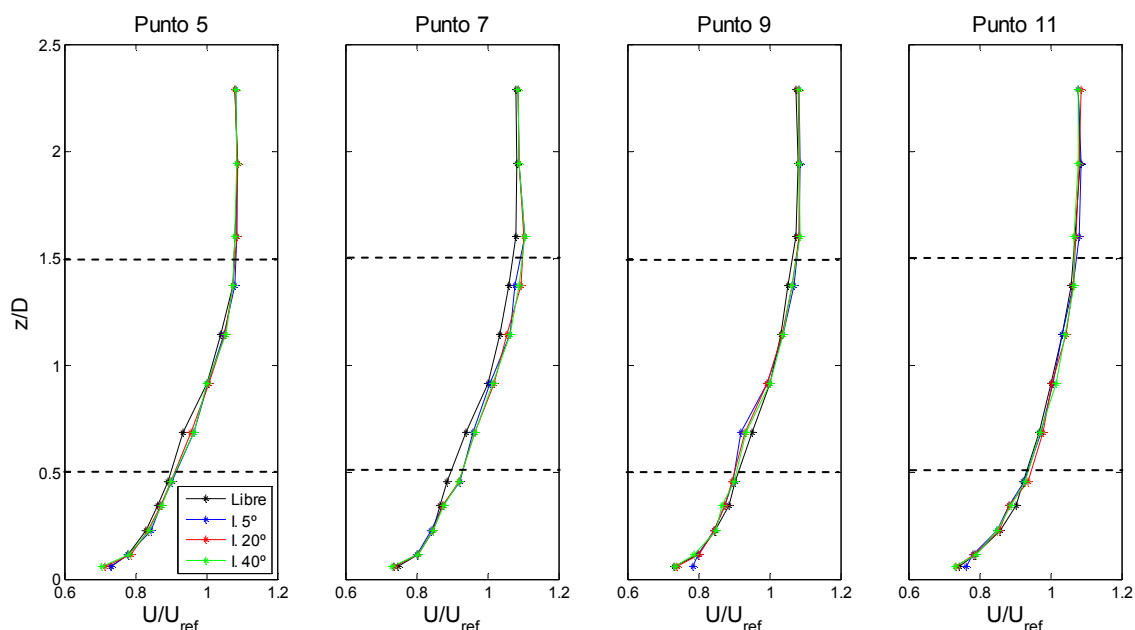


Figura 12. Perfiles de velocidad a lo largo de un plano lateral de la zona de ensayo para las situaciones sin aerogenerador y con aerogenerador e inclinaciones del eje del rotor de 5°, 20° y 40°.

Este comportamiento simétrico queda perfectamente reflejado en la Figura 13. En ella se muestran (para la sección transversal más cercana al aerogenerador) en rojo y negro los

perfiles laterales y en azul los centrales, para cada una de las configuraciones ensayadas.

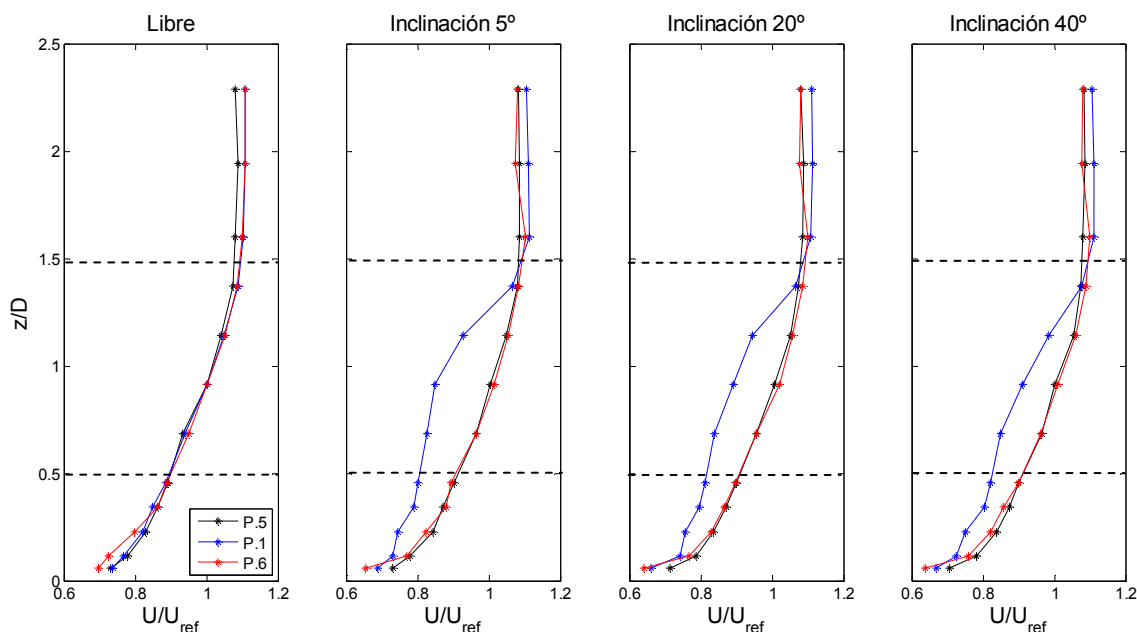


Figura 13. Perfiles de velocidad a lo largo de una sección transversal situada a una distancia de un diámetro del aerogenerador agrupados según tipo de configuración ensayada.

4.2 Tensiones tangenciales en superficie

La componente horizontal de la velocidad del viento genera unos esfuerzos sobre la superficie del mar que dan lugar a una

transferencia vertical de cantidad de movimiento. Este flujo de cantidad de movimiento en la interfase agua-aire es de gran importancia para modelar la circulación oceánica y atmosférica. El esfuerzo del viento sobre el océano, τ_w , se

define como la fuerza por unidad de área que ejerce la superficie del mar sobre el flujo de aire (Letchford et al., 2009 [17]) y se describe típicamente en términos del coeficiente de arrastre, C_D , a 10 m de la superficie.

(Ec. 6)

$$\tau_w = \rho_a \cdot C_D \cdot \overline{U}_{10}^{-2} = \rho_a \cdot u_*^2$$

Existen diferentes métodos para obtener de forma experimental el coeficiente de arrastre. En este trabajo se emplea el del perfil de velocidades, que se basa en la asunción de que la velocidad de fricción del aire, u_* , es aproximadamente constante en toda la capa superficial. Para la correcta aplicación de este método es necesario suponer condiciones de estabilidad neutra y ajustar un perfil logarítmico a al menos 5 puntos de referencia (Wieringa, 1993 [18]). Como valor final de la velocidad de fricción en cada perfil, se toma la media de las obtenidas a cada altura.

La Figura 14 muestra el déficit de tensiones tangenciales, con respecto a la situación sin aerogenerador, que se produce con cada una de las configuraciones de rotor ensayadas. Se observa una estructura simétrica, similar en todos los casos, con un déficit de tensiones tangenciales mayor en la zona central que en los laterales. Este resultado es coherente con los perfiles de velocidad medidos y se ajusta en sus aspectos básicos a la distribución teórica propuesta por Broström (2008) [6] para el déficit de tensiones tangenciales a sotavento de un parque eólico.

La recuperación longitudinal de las tensiones tangenciales se produce lentamente de manera que a una distancia de $x/D=12$ aún se obtienen déficits en torno al 3%. No obstante, el área de influencia lateral es mucho más reducida, y ya a una distancia entre 4 y 5 veces el diámetro del rotor (dependiendo del caso analizado) la tensión tangencial en los contornos alcanza el valor correspondiente a la situación sin aerogenerador.

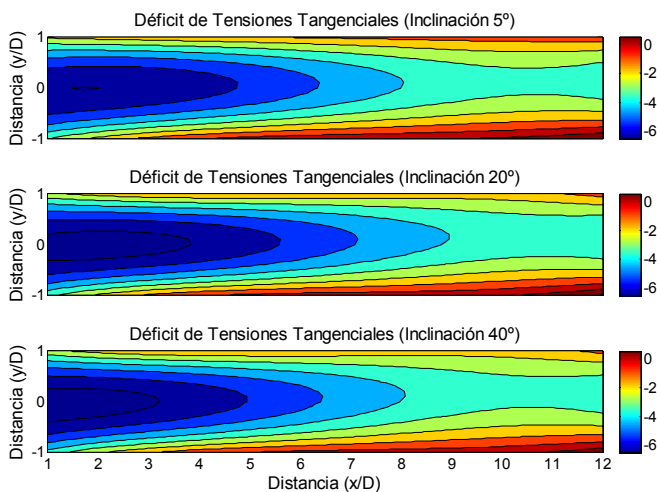


Figura 14. Vista en planta del déficit de tensiones tangenciales (en tanto por ciento) en la zona de estudio para las inclinaciones de 5, 20 y 40° del eje del rotor.

Los resultados obtenidos también revelan algunas diferencias ocasionadas por la variación en la inclinación del eje del rotor.

Así, se obtiene un aumento leve de los déficits máximos de tensiones con la inclinación del rotor, que toman valores de 6.3, 6.7 y 6.8 % para las inclinaciones de 5, 20 y 40°. Por su parte, el gradiente máximo del déficit de tensiones de una sección transversal también varía de unas configuraciones a otras. En este caso, el mayor gradiente se produce para la inclinación de 20°, que toma un valor de 5.7, siendo los valores para las inclinaciones de 5 y 40 °, de 5.1 y 5.5, respectivamente. Estas secciones transversales se sitúan a una distancia de $x/D=3.5$ en todos los casos.

4.3 Campo de Presiones

A continuación se recogen los resultados medidos sobre la superficie del túnel de viento con el escáner de presiones. La Figura 15 muestra la variación de las presiones para cada una de las inclinaciones del aerogenerador con respecto a la situación sin aerogenerador. Las presiones resultantes se han adimensionalizado mediante el valor medio de la presión en la configuración sin aerogenerador.

Se observa que el efecto del aerogenerador sobre las presiones en superficie es muy débil, con rangos de oscilaciones de -0.7 a 0.6 % para la inclinación de 5°, de -0.6 a 0.5 % para la inclinación de 20° y de -0.6 a 0.4% para la inclinación de 40°. La estructura de la distribución de presiones puede dividirse en dos zonas, una primera hasta una distancia de $x/D=7$ donde se observan diferencias debidas a la inclinación del plano del rotor y una segunda zona, a partir de ese punto, donde el efecto del aerogenerador está presente pero ya no se percibe la influencia de la inclinación.

En la primera zona se observa una reducción progresiva de las presiones a medida que aumenta la inclinación del aerogenerador. Esta evolución puede caracterizarse mediante la posición del punto en el que el déficit de presiones alcanza el valor del 0.1%. Este punto se sitúa a una distancia de $x/D=5$ para la inclinación de 5°, $x/D=4.5$ para la inclinación de 20° y $x/D=3$ para la inclinación de 40°. En la segunda zona el comportamiento es análogo en las tres situaciones, encontrándose el déficit máximo de presiones a una distancia de $x/D=10.5$ en todos los casos.

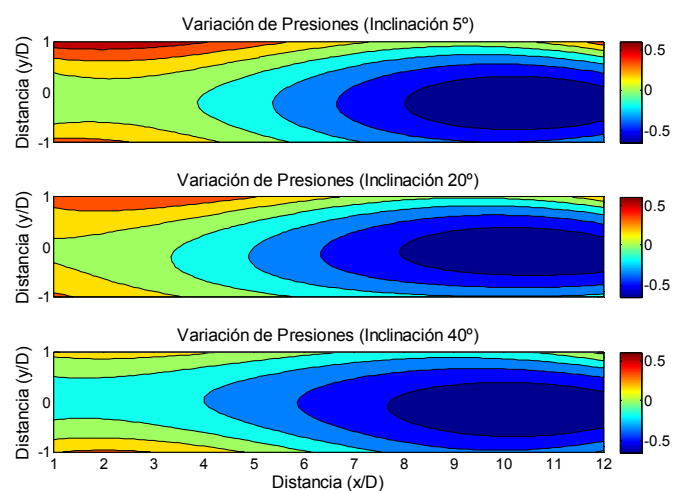


Figura 15. Vista en planta de la variación de las presiones (en tanto por ciento) en la zona de estudio para las inclinaciones de 5, 20 y 40° del eje del rotor.

Esta distribución de la variación de presiones responde a la suma de varios factores actuando conjuntamente. Estos son, la caída de presiones por efecto del rotor y el cambio en la velocidad del campo de vientos (tanto en su módulo como en su dirección) a consecuencia de la variación de la inclinación del eje del rotor. Separar la influencia de cada uno de ellos exige una caracterización más profunda del campo de vientos y es un punto de partida interesante para futuros trabajos.

Los efectos de estas presiones se traducen en la práctica en una variación del nivel medio del mar, de forma que las zonas de depresión dan lugar a elevaciones de la superficie mientras que las zonas de sobrepresión a hundimientos.

5 Influencia de los campos de tensiones tangenciales en la circulación local

La acción continuada del viento sobre la superficie del mar genera unas tensiones tangenciales sobre la interfase atmósfera-océano capaces de crear corrientes locales. El efecto de la mezcla turbulenta que se produce en esta zona traslada en profundidad las corrientes generadas. Así, la profundidad a la que son perceptibles las corrientes generadas por el viento depende de la viscosidad turbulenta y de la mezcla producida por las olas.

Ekman (1905) [19] estableció la relación entre la rotación de la Tierra y las corrientes oceánicas. De sus observaciones se desprende que la dirección de las corrientes va cambiando en profundidad dando lugar a la espiral logarítmica que lleva su nombre. En la Figura 16 se muestra una representación esquemática de la dirección de las corrientes y su magnitud (expresada mediante flechas) a distintas profundidades.

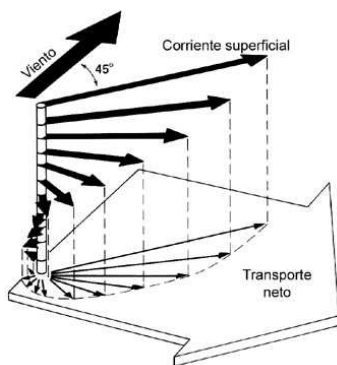


Figura 16. Representación esquemática de la espiral de Ekman.

La espiral de Ekman se prolonga de forma infinita. Dado que la velocidad de la corriente va disminuyendo en profundidad, se establece por convenio que la profundidad a la que los efectos del viento pasan a ser despreciables se produce cuando la dirección de la corriente es opuesta a la dirección del viento que la genera. Esto sucede para una profundidad dada por la siguiente expresión, que define la capa de Ekman:

(Ec. 7)

$$z_{Ek} = \frac{\pi}{a}$$

donde a es una constante que queda definida del modo siguiente:

$$a = + \sqrt{\frac{\rho_w \Omega \sin(\lambda)}{\mu_e}}$$

con ρ_w la densidad del agua y μ_e su viscosidad turbulenta.

El transporte neto asociado a las corrientes es perpendicular a la dirección del viento, tal y como se deriva de la integración en profundidades de las velocidades, u y v , dadas por la espiral de Ekman:

(Ec. 8)

$$S_{Ek,x} = \int_{\infty}^0 v dz = \frac{U_{a,s}}{a\sqrt{2}}$$

(Ec. 9)

$$S_{Ek,y} = \int_{\infty}^0 u dz = 0$$

con $U_{a,s}$ la velocidad del aire en superficie.

En determinadas circunstancias, el transporte de Ekman se relaciona con fenómenos de upwelling y downwelling. El primero consiste en el afloramiento de masas de agua densa y fría procedente de zonas profundas, con frecuencia cargadas de nutrientes, que desplazan a las masas de agua más cálidas y menos densas situadas en superficie. Por el contrario, el downwelling supone el hundimiento de masas de agua cálida y poco densa procedentes de la superficie, que desplazan a las más frías y densas situadas en profundidad.

Aunque pueden ser diversas las causas que dan lugar a estos fenómenos, en el ámbito de este trabajo nos centraremos en los fenómenos de upwelling y downwelling que se dan en el mar abierto asociados a procesos de divergencia y convergencia de las masas de agua en superficie. Aunque tradicionalmente se han asociado estas convergencias y divergencias a procesos ciclónicos y anticiclónicos, Broström (2008) [6] plantea la posibilidad de que el déficit de velocidad del viento asociado a la presencia de un parque eólico pueda ser causante también de estos efectos.

En la Figura 17 y la Figura 18, se muestra de manera esquemática el funcionamiento de estos fenómenos como consecuencia de la presencia de un obstáculo, tal como un parque eólico.

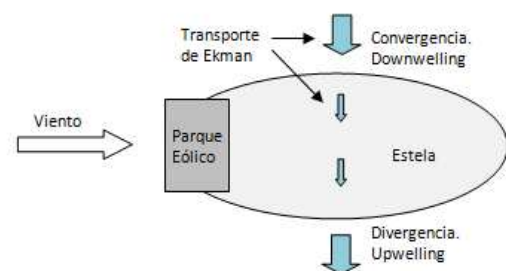


Figura 17. Esquema explicativo de los fenómenos de convergencia y divergencia debidos a la presencia de un parque eólico marino.

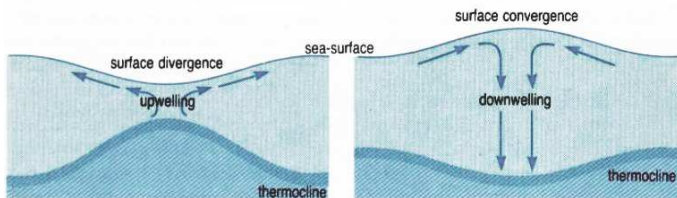


Figura 18. Esquema de funcionamiento de los procesos de upwelling y downwelling debidos a fenómenos de convergencia y divergencia de las masas de agua. (Fuente: Ocean Circulation: Oxford, Pergamon Press, 1989).

La velocidad vertical del agua, w_E , asociada a estos fenómenos puede obtenerse integrando la ecuación de continuidad en z desde la base de la capa de Ekman (Gill, 1983) [20]:

(Ec. 10)

$$w_E = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_y}{\rho_w f} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_x}{\rho_w f} = \vec{k} \cdot \nabla \times \frac{\vec{\tau}}{\rho_w f}$$

donde,

(Ec. 11)

$$\tau_x = -\rho_w f S_{Ek,y}$$

(Ec. 12)

$$\tau_y = \rho_w f S_{Ek,x}$$

De las ecuaciones anteriores se desprende que, ya que en general, las tensiones tangenciales ocasionadas por el viento van a variar mucho más que el parámetro de Coriolis, el valor de la velocidad vertical de bombeo va a depender principalmente de la variación espacial de la tensión $\vec{\tau}$.

Para evaluar el desplazamiento vertical de masas de agua debidas a los fenómenos de convergencia y divergencia, se toma como punto de partida un modelo de gravedad reducido de las aguas oceánicas. En este tipo de modelos se asume que el océano se puede dividir en dos capas de densidad constante: la capa inferior con densidad ρ_w y la capa superior (de mucho menor espesor) con densidad $\rho_w - \Delta\rho$. Las ecuaciones que rigen este modelo son las que siguen:

(Ec. 13)

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + h \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) - fhv = -g'h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho_w} + A\nabla^2(hu) - \kappa u$$

(Ec. 14)

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + h \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + fhu = -g'h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho_w} + A\nabla^2(hv) - \kappa v$$

(Ec. 15)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

donde g' es la gravedad reducida, h es el espesor de la capa superficial y κ el coeficiente de fricción con el fondo.

Broström (2008) [6] plantea el cálculo del flujo asociado al bombeo de Ekman a partir de la integración de estas ecuaciones, supuestos despreciables los términos no lineales:

(Ec. 16)

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + -fhv = -g'h_0 \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho_w}$$

(Ec. 17)

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + fhu = -g'h_0 \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho_w}$$

(Ec. 18)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

Manipulando estas ecuaciones se llega a (Gill, 1983) [20]:

(Ec. 19)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + f^2 \right) h - \nabla \cdot (gh_0 \nabla h) \right] = -\frac{f}{\rho_w} \nabla \times \tau - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(\nabla \cdot \tau)}{\partial t}$$

A su vez, despreciando las derivadas temporales de segundo orden y asumiendo como constante el esfuerzo del viento, Broström llega a la siguiente expresión adimensional:

(Ec. 20)

$$\frac{\partial}{\partial t} (h - a^2 \nabla^2 h) = -\nabla \times \left(\frac{\tau}{\Delta\tau} \right)$$

donde a es un número adimensional que representa el cociente entre el radio interno de Rossby y una longitud característica del parque eólico:

$$a = \frac{\sqrt{g'h_0}}{fL}$$

6 Aplicación práctica de los resultados obtenidos experimentalmente

Broström (2008) [6] plantea de forma analítica la posibilidad de que la presencia de una parque eólico marino de grandes dimensiones pueda dar lugar a la aparición en su entorno de zonas de afloramiento y hundimiento de masas de agua, como respuesta a variaciones locales en la altura del nivel medio del mar.

En esta sección se va a aplicar el conocimiento adquirido sobre la influencia de la inclinación del rotor de un aerogenerador en el campo de vientos, para realizar un primer acercamiento a la utilidad de emplear este parámetro de diseño para forzar los procesos de afloramiento de aguas profundas. Como se ha comentado anteriormente, el interés de este hecho radica en que las zonas de afloramiento tienen una importancia extraordinaria dentro del campo de la biología y la industria pesquera al provocar un ascenso a la superficie de aguas profundas, cargadas de nutrientes, que provocan una explosión en la productividad biológica de la zona.

En el apartado 4.2 se mostró cómo un aumento en la inclinación del rotor derivaba en un aumento del déficit de tensiones tangenciales sobre la superficie del mar. Ahora, para encarar este problema, se plantea la hipótesis de que los déficits de tensiones tangenciales en un aerogenerador individual pueden extrapolarse a los déficits conjuntos de todo un parque eólico. Aunque se trata de una hipótesis un tanto gruesa, resulta adecuada de cara a obtener una primera aproximación del funcionamiento del sistema. Adicionalmente se van a realizar las siguientes suposiciones: longitud característica del parque eólico, $L = 5 \text{ km}$; espesor de partida de la capa superficial, $h_0 = 10 \text{ m}$; densidad del agua superficial, $\rho_0 = 1025 \text{ kg/m}^3$; densidad del agua profunda, $\rho = 1027 \text{ kg/m}^3$; y latitud, $\lambda = 55^\circ$.

Para efectuar este análisis se partirá de la distribución de tensiones tangenciales propuesta por Broström (2008) [6] para un parque eólico. Esta distribución se asumirá que corresponde al caso de un ángulo de inclinación de 5° ya que es con la que cuentan habitualmente los aerogeneradores de eje horizontal. El déficit máximo de tensiones tangenciales asociado a esta configuración se aumentará en un 6.3 % para el caso con inclinación del 20° y en un 7.9% para el de 40° , que son los incrementos que se midieron en laboratorio para un único aerogenerador.

La Figura 19 muestra los resultados de estos cálculos: en la mitad superior los perfiles transversales de tensiones (adimensionalizadas) y en la mitad inferior la variación (a consecuencia del gradiente de tensiones tangenciales) del espesor de la capa superficial, de acuerdo con el modelo de gravedad reducido, a lo largo del perfil transversal.

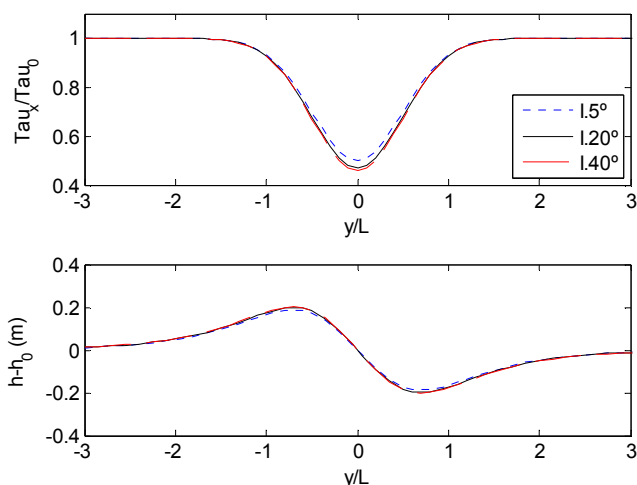


Figura 19. Perfiles transversales de tensiones tangenciales (adimensionalizadas) a sotavento del parque eólico y perturbaciones generadas en consecuencia en el espesor de la capa superficial de agua (m) para distintos valores de la inclinación del plano del rotor.

Los valores obtenidos señalan variaciones de 1.1 cm (incremento del 6%) entre las situaciones con inclinaciones de 5° y 20° y de 1.5 cm (incremento del 8%) entre las situaciones con inclinaciones de 5° y 40° . Estos pequeños cambios, cuando afectan a superficies muy extensas (como es la zona de

influencia de los grandes parques eólicos marinos), suponen la movilización de grandes cantidades de aguas procedentes de zonas profundas que pueden desembocar en un incremento de la productividad biológica de la zona afectada.

7 Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Se han medido en un túnel de viento los perfiles de velocidades y el campo de presiones superficiales a sotavento de un modelo a escala reducida de un aerogenerador marino y se ha evaluado la influencia que la inclinación del plano del rotor tiene en estas variables.

La caracterización del campo de vientos concuerda con los resultados expuestos por estudios previos similares. Se observa que la presencia del aerogenerador produce una zona de déficit de velocidades que queda acotada verticalmente por una altura de $z/D=1.5$ y transversalmente por una distancia de $y/D=\pm 1$. Longitudinalmente, la influencia del molino se va diluyendo, pero en el límite de la zona de medida, a $x/D=12$, el perfil de viento aún no se recupera por completo. Los máximos déficits medidos se dan en el punto más cercano al aerogenerador y a la altura del eje del rotor. La variación en la inclinación del plano del rotor se traduce en una disminución de los déficits de velocidades a medida que aumenta el ángulo. No obstante, esta influencia sólo se manifiesta en el campo cercano, hasta una distancia de $x/D=4$

Las medidas de presiones en la superficie muestran un déficit a sotavento del aerogenerador con respecto a la situación de flujo libre. Los déficits máximos de presión se dan a una distancia de $x/D=10.5$, con independencia del ángulo del aerogenerador ensayado. La influencia de la inclinación del aerogenerador se manifiesta únicamente a distancias menores a $x/D=7$, donde mayores inclinaciones dan lugar a una mayor disminución de las presiones.

A partir de los perfiles de viento medidos se han calculado las tensiones tangenciales sobre la superficie para distintas inclinaciones del plano del rotor. La presencia del aerogenerador da lugar a una disminución de estas tensiones en la zona central de los distintos perfiles transversales. Se observa también cómo los déficits máximos aumentan con la inclinación del eje del plano del rotor. Estos valores se han aplicado a un modelo de océano de gravedad reducido para obtener una estimación de los efectos que la inclinación del rotor de los aerogeneradores puede tener en los procesos de divergencia de las masas de agua. De esta estimación se desprende el efecto positivo de la inclinación del eje del rotor en los procesos de afloramiento de aguas profundas.

Como líneas de trabajo futuro se plantea profundizar tanto desde el punto de vista teórico como experimental en el conocimiento de los fenómenos anteriores y su aplicación práctica en un parque eólico marino real. Para lograrlo se hace imprescindible definir un marco teórico más preciso y detallar con exactitud aspectos tales como la interacción entre los campos de presión y velocidades, o el efecto combinado de la presencia de múltiples aerogeneradores. También es necesario acotar la profundidad de la zona afectada por los procesos de upwelling y las consecuencias del ascenso de

nutrientes en la producción biológica. Finalmente resulta decisivo analizar cómo afecta la inclinación del rotor al rendimiento de los aerogeneradores, de cara a evaluar la viabilidad de una propuesta conjunta de producción energética y aumento de los recursos pesqueros en el entorno de un parque eólico marino.

8 Agradecimientos

A mis profesores y compañeros del CEAMA, por todo lo que me han enseñado en este año intenso.

9 Referencias

- [1] Roy, S.B., Pacala, S.W., 2004. Can large wind farms affect local meteorology?
- [2] Keith, D.W., DeCarolis, J.F., Denkenberger, D.C., Lenschow, D.H., Malyshev, S.L., Pacala, S.W., Rasch, P.J., 2004. The influence of large-scale wind power on global climate.
- [3] Barrie, D.B., Kirk-Davidoff, D.B., 2009. Weather response to management of a large wind turbine array.
- [4] Corten, G. P., Brand. A. J., 2004. Resource decrease by large scale wind farms.
- [5] Brand, A. J., 2009. Wind farm design when other wind farms are close.
- [6] Broström, G., 2008. On the influence of large wind farms on the upper ocean circulation. *Journal of Marine Systems*
- [7] Botsford, L. W., Lawrence, C. A., Dever, E. P., Hastings, A., Largier, J., 2003. Wind strength and biological productivity in upwelling systems: an idealized study.
- [8] Small, L.F., Menzies, D.W., 1981. Patterns of primary productivity and biomass in a coastal upwelling region
- [9] Troen, I., Petersen, E.L., 1989. *European Wind Atlas*.
- [10] Jain, P., 2010. *Wind Energy Engineering*.
- [11] ESDU, 1985. Characteristics of atmospheric turbulence near the ground.
- [12] Porté-Agel, F., Wu, Y., Lu, H., Conzemius, R., 2011. Large-eddy simulation on atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms.
- [13] ASCE, 1987. *Wind tunnel model studies of buildings and structures*.
- [14] Alfredsson, P. H., Dahlberg, J. A., Vermeulen P. E. J. 1982. A comparison between predicted and measured data from wind turbine wakes.
- [15] Medici, D., Alfredsson, P. H., 2006. Measurements on a wind turbine wake: 3D Effects and bluff body vortex shedding.
- [16] Crespo, A., Hernández, J., 1996. Turbulence characteristics in wind-turbine wakes.
- [17] Letchford, C.W., Zachry, B.C., 2009. On wind, waves and surface drag.
- [18] Wieringa, J., 1993: Representative roughness parameters for homogeneous terrain
- [19] Ekman, V. W., 1905. On the influence of earth's rotation on ocean currents.
- [20] Gill, A. E., 1983. *Atmosphere-Ocean dynamics*.