

05-035

TURBULENCE INFLUENCE ON OFFSHORE WIND TURBINES IMPLEMENTATION

Bahamonde García, Manuel Ignacio; Pérez Litrán, Salvador; Sánchez Herrera, María Reyes; Macías Macías, José; Eugenio Barroso, Juan Manuel

Universidad de Huelva

Turbulence of the atmospheric flow in the boundary layer depends on different factors, such as: the roughness of the ground, the orography, the sea surface state and atmospheric stability conditions.

In open sea conditions, the transfer of momentum from the atmosphere to the ocean is very important, since part of it contributes to the generation of waves, while the rest influences the turbulence and currents convective generation.

In the offshore wind turbines wakes, the level of turbulence is greater than the wind without obstacles, causing transient loads to occur in other wind turbines located downstream, which has a structural stress effect on its components. Another effect of the wakes is the lack of uniformity of the vertical flows of the wind, that is to say, of shear, thereby increasing cyclic loads on wind turbine rotors. Therefore, in the of offshore wind farms implementation it is necessary to evaluate the turbulence in the site, since this will generate dynamic structural loads on the wind turbines, as well as variations of their electrical production.

Keywords: *wind energy; turbulence; wakes; offshore wind turbines*

INFLUENCIA DE LA TURBULENCIA EN LA IMPLANTACIÓN DE LOS AEROGENERADORES MARINOS

La turbulencia del flujo atmosférico en la capa límite depende de distintos factores, tales como: la rugosidad del terreno, la orografía, el estado de la superficie del mar y las condiciones de estabilidad atmosférica.

En condiciones de mar abierto, la transferencia de cantidad de movimiento de la atmósfera al océano es muy importante, ya que una parte de ella contribuye a la generación de oleaje, mientras que el resto influye en la generación de turbulencia y corrientes convectivas.

En la estela de los aerogeneradores marinos, el nivel de turbulencia es mayor que el viento sin obstáculos, haciendo que se produzcan cargas transitorias en otros aerogeneradores situados aguas abajo, que tiene un efecto de tensión estructural sobre sus componentes. Otro efecto de las estelas es la falta de uniformidad de los flujos verticales del viento, es decir, de la cizalladura, por lo que aumentan las cargas cíclicas sobre el rotor de los aerogeneradores. Así pues, en la implantación de parques eólicos marinos es necesario evaluar la turbulencia en el emplazamiento, ya que ésta generará cargas dinámicas estructurales sobre los aerogeneradores, así como variaciones de su producción eléctrica.

Palabras clave: *energía eólica; turbulencia; estelas; aerogeneradores marinos*

Correspondencia: Manuel Ignacio Bahamonde García; bahamonde@uhu.es



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La velocidad del viento es una magnitud vectorial tridimensional que experimenta fluctuaciones aleatorias de pequeña escala en el espacio y en el tiempo, que se superponen a un flujo organizado de mayor escala (OMM, 2014). No obstante, se suele simplificar considerando que el viento de superficie es una magnitud vectorial bidimensional definida por la velocidad y la dirección.

Los fenómenos atmosféricos tienen distintas dimensiones espaciales (desde centímetros a miles de kilómetros) y temporales (desde segundos a meses), superponiéndose normalmente unas con otras. En el rango de la microescala la turbulencia del viento se define como la variación temporal y espacial de la velocidad del viento con variaciones temporales entre 0 y 10 minutos, y espaciales hasta decenas de metros. También, en general, se define como la fluctuación de la velocidad del viento en intervalos inferiores al periodo de cálculo de la velocidad media.

La turbulencia atmosférica es una suma de efectos combinados, principalmente mecánicos y térmicos. Así, la turbulencia mecánica tiene su origen en la cortadura del perfil del viento debido a los gradientes de presión a gran escala y a la rugosidad de la superficie terrestre o rugosidad de la superficie del mar, y la turbulencia térmica se debe a la transmisión de calor entre la superficie terrestre, o marina, y los flujos de aire de la capa límite atmosférica.

La transferencia de cantidad de movimiento de la atmósfera al océano es muy importante, ya que una parte de ella contribuye a la generación de oleaje, mientras que el resto influye en la generación de turbulencia y corrientes convectivas en las capas superficiales del océano. En la capa de la atmósfera en contacto directo con la superficie marina, la turbulencia se encuentra muy afectada por el oleaje, pero por encima de dicha capa, que puede ser de 2 a 4 veces la altura de la ola, el flujo atmosférico puede considerarse horizontal y unidireccional (Castro, González & Portela, 1991).

Para realizar una evaluación del potencial eólico es necesario caracterizar la turbulencia atmosférica en el emplazamiento, ya que ésta generará cargas dinámicas estructurales sobre los aerogeneradores, así como variaciones de la potencia suministrada. Generalmente, las zonas con turbulencia alta están asociadas a superficies complejas con pendientes acusadas, obstáculos o estelas de aerogeneradores. También, el perfil vertical de la velocidad de viento está influenciado por el nivel de turbulencia.

La fluctuación del viento está descrita de forma aproximada por la velocidad media de la velocidad, \bar{v} , durante un tiempo determinado, principalmente 10 minutos, y por la intensidad de turbulencia, I_t .

La velocidad media del viento medida en el tiempo T viene dada por la ecuación:

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (1)$$

Asimismo, la varianza, $\overline{v^2}$, da una estimación del carácter aleatorio de la velocidad del viento y viene dada por la siguiente expresión:

$$\overline{v^2} = \frac{1}{T} \int_0^T (v(t) - \bar{v})^2 dt \quad (2)$$

$$\overline{v^2} = \sigma^2 \quad (3)$$

siendo la desviación estándar, σ , la raíz cuadrada de la varianza.

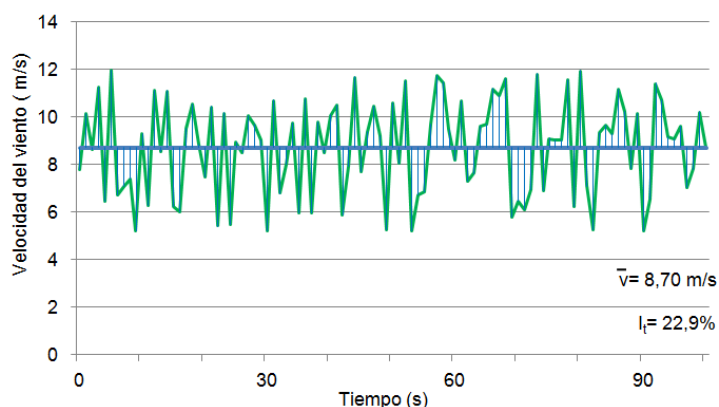
El coeficiente de variación, que llamamos intensidad de turbulencia, es la razón entre la desviación estándar y la velocidad media del viento:

$$I_t = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (4)$$

La intensidad de turbulencia varía en un amplio rango entre 0,05 y 0,40 debido a las fluctuaciones naturales y a los diferentes periodos promedio de las mediciones (Gasch & Twele, 2012).

En la figura 1 se representa un caso de la variación de la velocidad del viento durante un corto periodo de tiempo, donde se aprecia su carácter aleatorio y se valoran los dos parámetros citados.

Figura 1: Velocidad y turbulencia del viento



En general, una ráfaga es un evento discreto dentro de un campo de viento turbulento. En el ámbito de la energía eólica y en relación con grandes aerogeneradores, se define ráfaga como la máxima velocidad del viento en un tiempo de segundos a minutos.

1.1. Parámetros de estabilidad térmica

El número de Richardson, Ri , representa el balance entre los efectos térmicos y mecánicos en la generación del estado turbulento de las capas bajas de la atmósfera, siendo una expresión muy utilizada el número de Richardson del gradiente (Stull, 2009), que viene dado por la ecuación:

$$Ri = g / \bar{\theta}_v \frac{\partial \bar{\theta}_v / \partial z}{[(\partial \bar{U} / \partial z)^2 + (\partial \bar{V} / \partial z)^2]} \quad (5)$$

Si aproximamos: $\partial \bar{\theta}_v / \partial z \approx \Delta \bar{\theta}_v / \Delta z$, $\partial \bar{U} / \partial z \approx \Delta \bar{U} / \Delta z$, $\partial \bar{V} / \partial z \approx \Delta \bar{V} / \Delta z$, entonces podemos definir una nueva relación conocida como número de Richardson bulk, Ri_b :

$$Ri_b = g / \bar{\theta}_v \frac{\Delta \bar{\theta}_v \Delta z}{[(\Delta \bar{U})^2 + (\Delta \bar{V})^2]} \quad (6)$$

Las diferencias finitas de la temperatura potencial virtual, $\bar{\theta}_v$, y de las componentes de las velocidades del viento, U y V , son las variaciones de dichos parámetros con la altura. Al simplificar la ecuación (6), considerando la temperatura potencial virtual próxima a la temperatura del aire y la componente horizontal de la velocidad del viento, U , como única componente, queda de la forma siguiente para condiciones marinas (Grachev & Fairall, 1997):

$$Ri_b = \frac{gz(T_a - T_s)}{(273.15 + T_a)U^2} \quad (7)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, T_a es la temperatura del aire, T_s es la temperatura del agua de la superficie del mar y U es la velocidad del viento medido a una altura z .

1.2. Clases de aerogeneradores

En la actualidad, las clases de aerogeneradores se definen en función de los parámetros de la velocidad del viento y de la turbulencia. En general, en emplazamientos con intensidades de turbulencia superiores al 30% no es recomendable instalar aerogeneradores.

En la tabla 1 se especifican, a la altura del buje, los parámetros básicos que definen las clases de aerogeneradores según las normas UNE-EN 61400-1 (AENOR, 2006) y UNE-EN 61400-3 (AENOR, 2010).

Tabla 1. Parámetros básicos para las clases de aerogeneradores

Clases de aerogeneradores	I	II	III	S
v_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	Valores a especificar por el diseñador
A I_{ref} (-)		0,16		
B I_{ref} (-)		0,14		
C I_{ref} (-)		0,12		

v_{ref} : es la velocidad de referencia del viento promediada en 10 minutos.

A: designa la categoría para las características de las turbulencias más altas.

B: designa la categoría para las características de las turbulencias medias.

C: designa la categoría para las características de las turbulencias más bajas.

I_{ref} : es el valor esperado de la intensidad de turbulencia para 15 m/s.

Se define una clase de aerogenerador adicional, clase S, cuando se requieren condiciones especiales de viento, otras condiciones externas, o una clase de seguridad especial.

En el modelo de turbulencia normal de dichas normas el valor representativo de la desviación típica de la velocidad del viento longitudinal, σ_1 , debe venir dado por el percentil 90% de la velocidad del viento a la altura del buje de un aerogenerador. Dicho valor para las clases de aerogeneradores normalizados viene dado por:

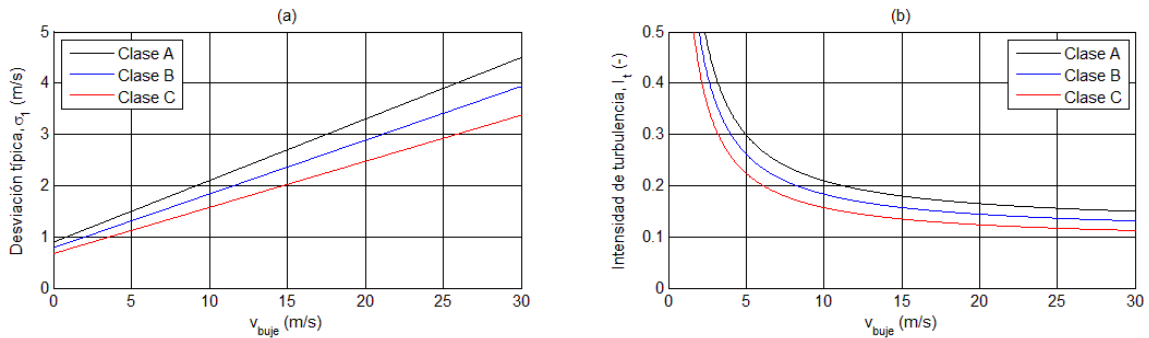
$$\sigma_1 = I_{ref} (0,75\bar{v}_{buj e} + b); \quad b = 5,6m/s \quad (8)$$

Asimismo, la intensidad de turbulencia viene dada por la siguiente expresión:

$$I_t = I_{ref} \frac{(0,75\bar{v}_{buj e} + b)}{\bar{v}_{buj e}}; \quad b = 5,6m/s \quad (9)$$

En las figuras 2(a) y 2(b) se representan la desviación típica y la intensidad de turbulencia, respectivamente, en función de la velocidad del viento a la altura del buje, para el modelo de turbulencia normal.

Figura 2: Gráficas del modelo de turbulencia normal



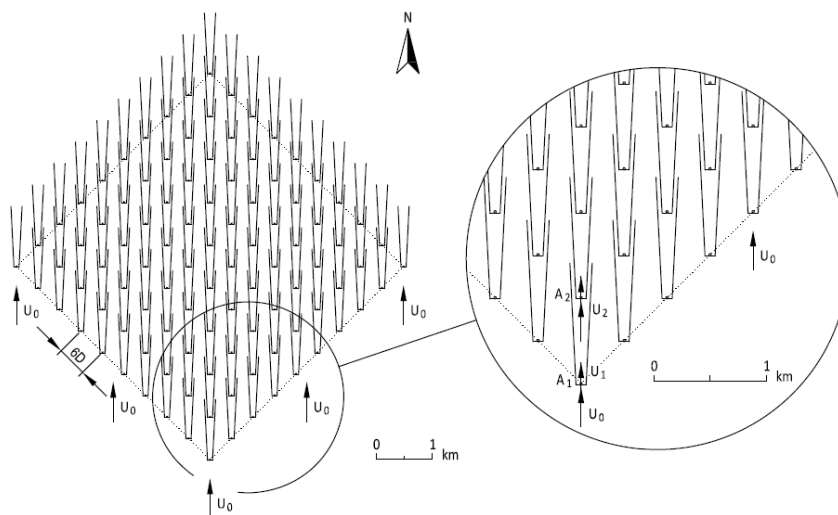
La intensidad de turbulencia efectiva (Frandsen, 2007) es un parámetro utilizado en la industria de la energía eólica para modelar la intensidad de turbulencia generada por las estelas de los aerogeneradores y que influyen en las cargas mecánicas.

1.3. Estela de aerogeneradores

Si un aerogenerador se encuentra lo suficiente alejado de otro el efecto de aquel sobre este será poco importante, los efectos de los aerogeneradores se hacen sentir especialmente en la estela aguas abajo de la dirección del viento incidente. Cuando un aerogenerador ha extraído energía de la velocidad del viento, este se ralentiza aguas abajo haciendo que otro aerogenerador situado en dicha estela produzca menos energía.

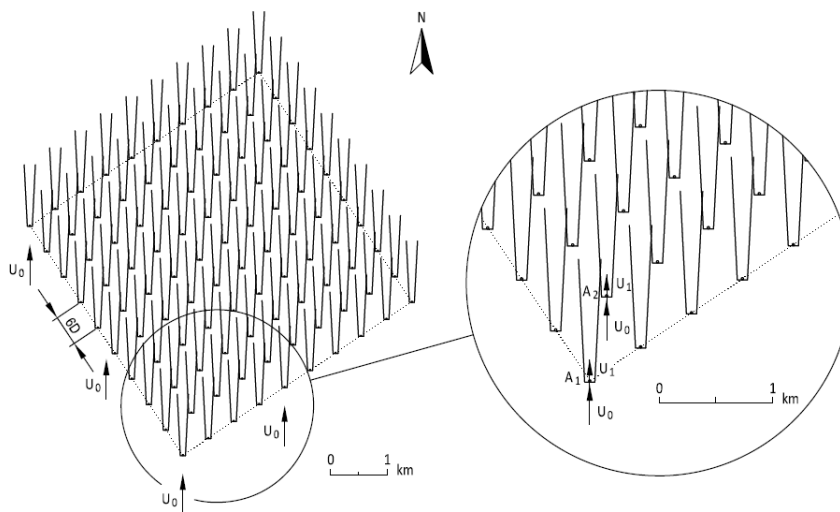
En la figura 3 se muestra una configuración de un parque eólico marino con interacciones alineadas de estelas simples en el supuesto que el viento de procedencia sea Sur. El aerogenerador A_1 que recibe el viento sin perturbar U_0 , tras el rotor la velocidad del viento ha disminuido hasta U_1 y de nuevo comienza a aumentar, por la aportación del viento sin perturbar de velocidad U_0 , cuando recorre la distancia hasta el aerogenerador A_2 , donde la velocidad del viento incidente es U_2 .

Figura 3: Interacciones alineadas de estelas simples en parque eólico marino



En la figura 4 se muestra una configuración de un parque eólico marino que mejora la producción de los aerogeneradores en el supuesto que el viento de procedencia más energético sea Sur. A partir de las terceras alineaciones tienen efecto las estelas múltiples, siendo la distancia mayor para que se pueda incorporar viento sin perturbar.

Figura 4: Interacciones de estelas múltiples en parque eólico marino



La turbulencia creada en la capa superficial depende de factores tales como la rugosidad del terreno, la orografía, el estado de la superficie del mar y las condiciones de estabilidad atmosférica, de tal forma que a mayor cuantía de dichos factores mayor turbulencia ambiental. En los parques eólicos marinos los factores que influyen en la turbulencia son menores, pudiendo ser los efectos de las estelas más importantes, ya que tiende a no ser perturbadas.

Cuanto mayor sea la turbulencia ambiental más se dispersa la estela, ampliándose y afectando a un mayor número de aerogeneradores, siendo el déficit de velocidad creado en el rotor menor, quedando la propia turbulencia creada en la estela sumada a la turbulencia ambiental. Un aerogenerador aislado que en ausencia de estelas cumple con la normativa, puede dejar de hacerlo cuando esté sometido a la influencia de otras estelas (Crespo et al., 2010).

2. Objetivos

La experiencia nos indica que en la capa límite atmosférica marina la velocidad del viento aumenta, en general, con la altura, siendo más uniforme que sobre tierra y, asimismo, la intensidad de turbulencia es más reducida y disminuye con la altura.

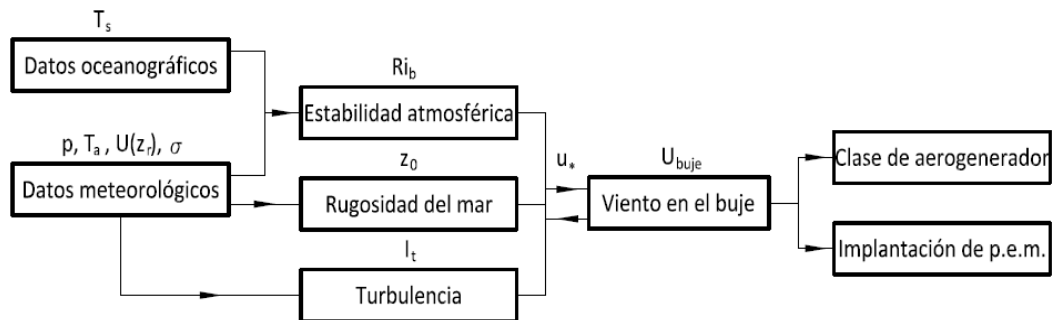
El objetivo principal planteado en la presente comunicación es caracterizar la influencia de la turbulencia en la implantación de los aerogeneradores marinos, de tal forma que nos permita hacer una valoración cualitativa sobre sus efectos, tanto en las cargas estructurales, como en la pérdida de producción, todo ello a partir de las mediciones oceanográficas y meteorológicas en un emplazamiento marino de estudio. A continuación, se comentan los resultados obtenidos a partir los datos medidos de la velocidad del viento a una altura de referencia, de una serie diezminutal durante varios años, obtenidos en la plataforma de investigación FINO 3.

En la primera parte se determinarán de las condiciones de estabilidad atmosféricas de la capa superficial oceánica, que permitirán establecer la distancia entre aerogeneradores que se encontrará entre seis y diez diámetros de rotor ($6D$ a $10D$), aunque este límite teórico también dependerá de la potencia a instalar y del área disponible para la implantación. En la segunda parte se determinan la intensidad de turbulencia en el emplazamiento a distintas cotas de forma global y según las condiciones de estabilidad.

3. Metodología

El método de estudio se esquematiza en la figura 5, el cual toma, como datos diezminutales de entrada, la temperatura superficial del agua del mar y una serie de datos meteorológicos a una cota inferior, como la temperatura y presión ambiental, la velocidad del viento y su desviación estándar. También se aporta a una cota superior la velocidad del viento y su desviación estándar. La velocidad de fricción, u_* , y la longitud de rugosidad aerodinámica, z_0 , pueden ser determinadas para obtener el perfil logarítmico del viento mediante la ecuación de la teoría de semejanza de Monin-Obukhov.

Figura 5: Esquema del método de estudio



La estabilidad atmosférica se determina mediante el número de Richardson bulk, Ri_b , dado por la ecuación (7), y dependiendo del valor obtenido, tenemos las siguientes estimaciones:

$$-0,02 \leq Ri_b \leq 0,02; \text{ atmósfera neutra}$$

$$Ri_b < -0,02; \text{ atmósfera inestable}$$

$$Ri_b > 0,02; \text{ atmósfera estable}$$

La intensidad de turbulencia se determina por la ecuación (4), a distintas alturas, con las variaciones continuas de la estabilidad atmosférica que definen la turbulencia ambiental, que llamaremos totales, y las que se obtienen para cada tipo de estabilidad, con el objetivo de hacer su estudio comparativo.

El método nos permite seleccionar la clase de aerogenerador según las normas UNE-EN citadas, e inferir los resultados para la selección de un aerogenerador para una implantación de parque eólico marino (p.e.m), cuyas mediciones se realizan con varios mástiles de medida con alturas inferiores a las del buje.

Asimismo, el conocimiento de la estabilidad atmosférica y la turbulencia ambiental permite un diseño optimizado de la implantación de un p.e.m. al reducir el efecto de las estelas producidas por los aerogeneradores.

4. Resultados con datos de la plataforma de investigación FINO 3

La plataforma de investigación FINO 3 (55° 11,7' N, 007° 09,5' E), situada en el Mar del Norte, del Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) correspondiente al Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) y al Projektträger Jülich (PTJ), ambos del Gobierno de Alemania, proporciona los datos diezminutales necesarios para la presentación de los resultados de dicho emplazamiento durante los años 2013, 2014 y 2015.

En la tabla 2 se indican los primeros datos medidos de la velocidad del viento, la desviación estándar y la intensidad de turbulencia a dos alturas, en varios años, cuyos valores se encuentran promediados durante diez minutos. En todos los casos las series temporales contienen miles de datos, siendo estos indicados por su eficacia.

Tabla 2. Datos de la velocidad del viento

Valores medidos en FINO3. Eficacia de datos: 89,0%						
Día/Mes/Año/Hora	Medidas a 30 m			Medidas a 80 m		
	\bar{v} (m/s)	σ (m/s)	I_t (-)	\bar{v} (m/s)	σ (m/s)	I_t (-)
01/01/2013 0:00	7,57	0,38	0,050	9,37	0,29	0,031
01/01/2013 0:10	7,50	0,31	0,041	9,19	0,15	0,016
01/01/2013 0:20	7,70	0,32	0,042	9,32	0,23	0,025
01/01/2013 0:30	7,84	0,39	0,050	9,39	0,25	0,027
...
Valores medidos en FINO3. Eficacia de datos: 92,4%						
Día/Mes/Año/Hora	Medidas a 30 m			Medidas a 80 m		
	\bar{v} (m/s)	σ (m/s)	I_t (-)	\bar{v} (m/s)	σ (m/s)	I_t (-)
01/01/2014 0:00	12,49	1,20	0,096	13,73	1,07	0,078
01/01/2014 0:10	10,43	1,32	0,127	12,74	0,70	0,055
01/01/2014 0:20	10,50	1,10	0,105	11,70	0,65	0,056
01/01/2014 0:30	10,24	0,82	0,080	11,24	0,57	0,051
...
Valores medidos en FINO3. Eficacia de datos: 95,1%						
Día/Mes/Año/Hora	Medidas a 30 m			Medidas a 80 m		
	\bar{v} (m/s)	σ (m/s)	I_t (-)	\bar{v} (m/s)	σ (m/s)	I_t (-)
01/01/2015 0:00	12,80	0,87	0,068	14,04	0,62	0,044
01/01/2015 0:10	12,20	0,86	0,070	13,29	0,73	0,055
01/01/2015 0:20	12,51	1,19	0,095	13,71	0,98	0,071
01/01/2015 0:30	11,99	1,25	0,104	13,39	1,10	0,082
...

Mediante el número de Richardson bulk, Ri_b , expresado por la ecuación (7), se determina el tipo de estabilidad atmosférica en cada serie diezminutal, siendo una estrecha franja en torno al cero, entre -0.02 y 0.02, indicativa de la estabilidad atmosférica neutra.

En la tabla 3 se resumen los datos relativos a la estabilidad atmosférica en cada año de estudio en el emplazamiento de la plataforma FINO 3. La mayoría de los datos representan una estabilidad atmosférica neutra, le siguen en número las condiciones inestables, y las condiciones estables representan un número reducido de casos.

Tabla 3. Estabilidad atmosférica

Atmósfera	Año 2013		Año 2014		Año 2015	
	n	%	n	%	n	%
Neutra	24.796	53,01	26.310	54,18	28.887	57,81
Inestable	17.773	38,00	18.887	38,89	18.755	37,53
Estable	4.206	8,99	3.367	6,93	2.327	4,66
Datos totales	46.775		48.564		49.969	
Eficacia de datos	0,890		0,924		0,951	

Aún siendo la eficacia de datos distinta en cada año, se observa que se mantienen en un determinado rango de valores porcentuales, lo que permite adoptar un criterio de selección de menor distancia entre dos aerogeneradores, para reducir el efecto de estela.

En relación a la turbulencia ambiental, conocidas las velocidades del viento y las desviaciones estándar a 30 m y a 80 m sobre el nivel del mar (s.n.m.), se obtienen las intensidades de turbulencia. Las figuras 6, 7 y 8 muestran las gráficas de los promedios de la intensidad de turbulencia y sus errores estándar, para cada rango de la velocidad del viento de 1 m/s, en el emplazamiento de estudio durante los años 2013, 2014 y 2015. En la parte (a), se representa la comparación del promedio de intensidad de turbulencia para las dos alturas de medidas, bajo todas las condiciones de estratificación atmosférica (T) y su comparación con la curva de la clase de aerogenerador de menor turbulencia, representada en la figura 2(b). Asimismo, en la parte (b) se comparan las intensidades de turbulencia para el caso de atmósfera neutra (N), en (c) para atmósfera inestable (I) y en (d) para atmósfera estable (E).

Figura 6: Comparación de la intensidad de turbulencia en 2013

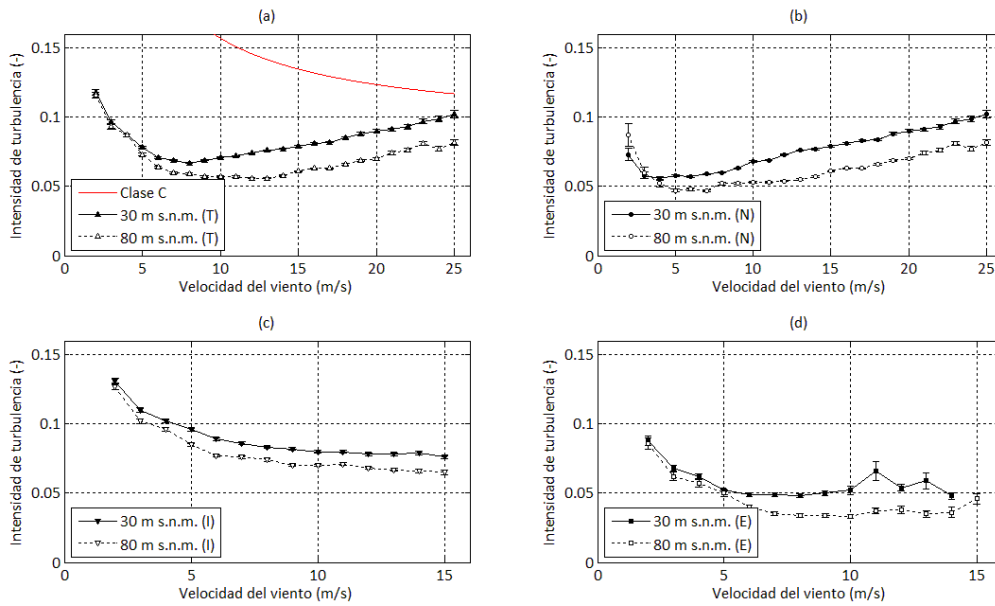


Figura 7: Comparación de la intensidad de turbulencia en 2014

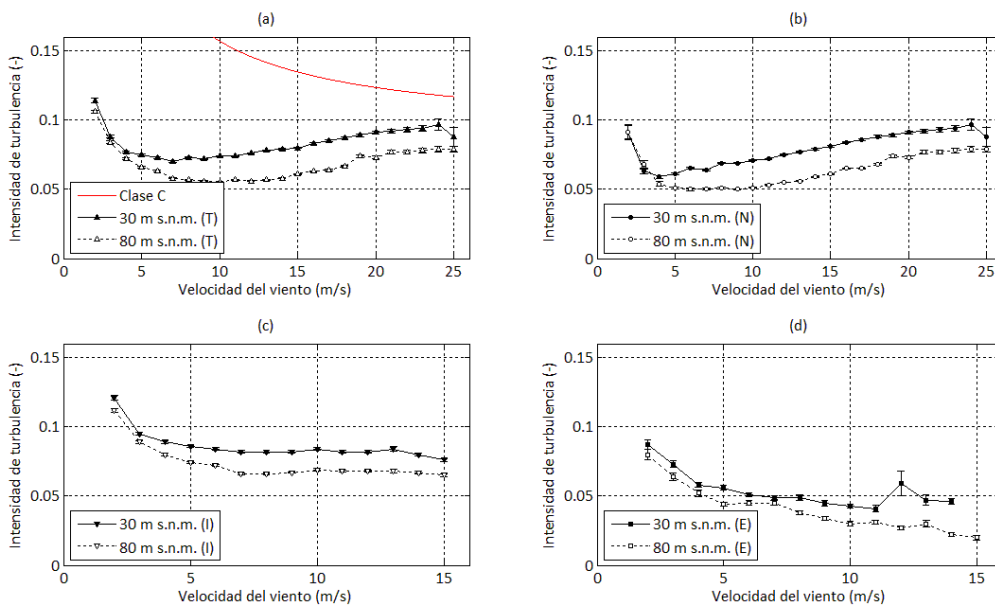
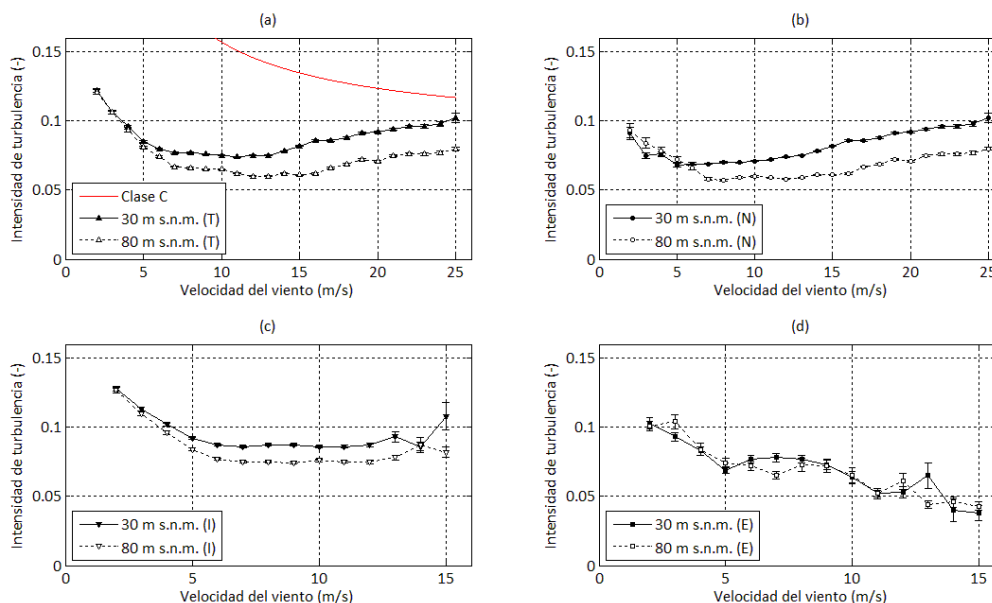


Figura 8: Comparación de la intensidad de turbulencia en 2015



Como se observa en las figuras 6, 7 y 8 (a) la turbulencia ambiental disminuye con la altura y se mantiene por debajo de la curva de baja turbulencia de las clases de aerogeneradores, de tal forma que si se realizan medidas de los datos meteorológicos a cotas inferiores a las del buje se puede hacer una estimación de la turbulencia del emplazamiento para los aerogeneradores individuales sin el efecto de estela del p.e.m.

En las figuras 6, 7 y 8 (b) se observa que para estabilidad neutra la velocidad del viento se da para todo el rango de las velocidades de funcionamiento de un aerogenerador, la intensidad de turbulencia presenta la misma forma para distintas alturas, decrecen ligeramente hasta 5 m/s y aumenta con una suave pendiente hasta 25 m/s.

En las figuras 6, 7 y 8 para condiciones inestables (c) y estables (d) en pocas ocasiones se superan los 15 m/s para medidas a 30 m, en el primer caso las curvas de la intensidad de turbulencia se mantienen casi horizontales y en el segundo caso son mayormente decrecientes, entre 5 y 15 m/s, observándose en ambas un decrecimiento entre valores de calma del viento y 5 m/s.

5. Conclusiones

En la capa límite atmosférica marina la estabilidad atmosférica va a ser identificativa del emplazamiento y depende de la latitud. En general, la condición de estabilidad neutra va a ser dominante, y según sea su valor así será la distancia de los aerogeneradores para una implantación de parques eólicos marinos. Como aplicación, hasta el 70% de estabilidad neutra en un emplazamiento puede tomarse un mínimo de 6D de rotor.

Las curvas de la intensidad de turbulencia en función de la velocidad del viento se mantienen por debajo de la curva de la clase C del modelo de turbulencia normal de las normas UNE-EN citadas, verificándose que el emplazamiento de estudio es de baja turbulencia, por lo que las cargas dinámicas estructurales son reducidas para un aerogenerador, sin los efectos de estela.

La producción de un aerogenerador se reduce cuando aumenta la turbulencia del viento, a la vista de los resultados su efecto cualitativo es reducido. No obstante, un estudio adicional

sería, por un lado, modelizar la intensidad de turbulencia a la cota del buje de un aerogenerador a partir de mediciones a cotas inferiores y, por otro lado, estudiar el efecto de las estelas simples y múltiples sobre la producción de los aerogeneradores.

6. Referencias

- AENOR (2006). Aerogeneradores. Parte 1: Requisitos de diseño. UNE-EN 61400-1. Madrid.
- AENOR (2010). Aerogeneradores. Parte 3: Requisitos de diseño para aerogeneradores marinos. UNE-EN 61400-3. Madrid.
- Castro, M., González, R., & Portela, A. (1991). Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico meteorológico. *Física de la Tierra*, 3, 103-138. Ed. Universidad Complutense. Madrid.
- Crespo, A., Migoya, E., García, J., Manuel, F.J., & Prieto, J.L. (2010). Efecto de las estelas en los parques eólicos. Ponencia en Congreso: Solar Decathlon Europe 2010. Madrid.
- FINO database. http://www.bsh.de/en/Marine_data/Projects/FINO/index.jsp [15-01-2018].
- Frandsen, S.T. (2007). *Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbines clusters*. Tesis. Universidad Técnica de Dinamarca.
- Gasch, R., & Twele, J. (2012). *Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation*. 2ª edición. Berlín: Springer.
- Grachev, A.A., & Fairall, C.W. (1997). Dependence of the Monin-Obukhov stability parameter on the bulk Richardson number over the ocean. *Journal of Applied Meteorology*, 36, 406-414.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., & Rogers, A.L. (2009). *Wind energy explained: Theory, design and application*. 2ª edición. Chichester (West Sussex): John Wiley & Sons Ltd.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). (2014). Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos. OMM-nº 8.
- Stull, R.B. (2009). *An introduction to boundary layer meteorology*. Springer.

Agradecimientos

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) correspondiente al Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) y al Projektträger Jülich (PTJ), ambos del Gobierno de Alemania, por el acceso a los datos de las plataformas de investigación FINO.