

05-005

## **Influence of sea surface roughness on energy production of marine wind turbines**

Manuel Ignacio Bahamonde García; Salvador Pérez Litrán

Universidad de Huelva;

Offshore wind energy has more favorable wind conditions than its land counterpart, being necessary to maximize its use to make it more competitive. Thus, a more detailed analysis of the offshore wind potential that includes the interactions taking place in the atmospheric boundary layer is required. In similarity theory, the wind speed profile depends on the atmospheric stability and the roughness of the surface layer, and can be extended to open sea conditions, considering conditions of continuous variability of the roughness of the sea surface and neutral atmospheric stability.

The objective of this paper is to characterize the influence of sea surface roughness on the energy production of offshore wind turbines in order to determine the energy viability of the implementation of new offshore wind farms, as well as for the prediction of its short-term energy production. For this, the wind speed profile is modeled by a potential equation and the logarithmic equation of similarity theory, and the results are compared with the data measured in the FINO3 research platform.

**Keywords:** wind power; sea surface roughness; similarity theory; offshore wind farms

## **Influencia de la rugosidad de la superficie del mar en la producción energética de los aerogeneradores marinos**

La energía eólica marina posee condiciones más favorables del viento que su homóloga terrestre, siendo necesario maximizar su aprovechamiento para hacerla más competitiva. Así, se requiere de un análisis más detallado del potencial eólico marino que incluya las interacciones que tienen lugar en la capa límite atmosférica. En la teoría de semejanza, el perfil de la velocidad del viento depende de la estabilidad atmosférica y de la rugosidad de la capa superficial, y se puede hacer extensiva a las condiciones de mar abierto, considerando unas condiciones de variabilidad continua de la rugosidad de la superficie del mar y estabilidad atmosférica neutra.

El objetivo de la presente comunicación es caracterizar la influencia de la rugosidad de la superficie del mar en la producción energética de los aerogeneradores marinos con el fin de determinar la viabilidad de la implantación de nuevos parques eólicos marinos (pp.ee.mm), así como para la predicción de su producción energética a corto plazo. Para ello se modela el perfil de la velocidad del viento mediante una ecuación potencial y la ecuación logarítmica de la teoría de semejanza, y se comparan los resultados con los datos medidos en la plataforma de investigación FINO3.

**Palabras clave:** energía eólica; rugosidad de la superficie del mar; teoría de semejanza; parques eólicos marinos

Correspondencia: Manuel Ignacio Bahamonde García bahamonde@uhu.es

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.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

## 1. Introducción

En el ámbito de la energía eólica los obstáculos que encuentra el viento en su recorrido influyen en la disminución de su velocidad y generan turbulencias. Si bien dichos obstáculos en tierra vienen caracterizados por una rugosidad superficial que no cambia a largo plazo, como pueden ser, entre otros, monte bajo, laderas arboladas y pastizales. En condiciones marinas la rugosidad de la superficie la presenta el oleaje, que es continuamente variable a corto plazo.

Al no existir un modelo general que describa la variación de la velocidad del viento con la altura en la capa límite atmosférica, se utilizan distintas ecuaciones que la aproximan a su valor real. Así, la International Electrotechnical Commission (IEC) (2009) y Germanischer Lloyd (GL) (2012) emplean para describir el perfil de la velocidad del viento en condiciones marinas la ecuación potencial (1), donde la velocidad del viento,  $U(z)$ , se obtiene en función de la altura,  $z$ , a partir del valor medio del viento de entrada,  $U_{hub}$ , para la altura del buje,  $z_{hub}$ . Pudiendo ser extendida para la velocidad del viento  $U(z_r)=U_{hub}$  a una altura de referencia  $z_r=z_{hub}$ , como es el valor de la velocidad del viento,  $U(z_r)$ , medido a una altura determinada,  $z_r$ , en una estación meteorológica situada en el mar.

$$U(z) = U_{hub} \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (1)$$

Esta ecuación asume una estabilidad atmosférica neutra y, sobre la base de una longitud de rugosidad superficial constante de 0,002 m, el exponente  $\alpha$  viene dado por 0,14 para cualquier velocidad del viento (GL, 2012).

Asimismo, existen distintas correlaciones, basadas en condiciones sobre tierra, que tratan de vincular el exponente  $\alpha$  con determinados parámetros, como: la naturaleza de la superficie, la hora del día, la estación de año, la temperatura y otros, y para su cálculo existen distintos métodos (Manwell, McGowan & Rogers, 2009):

- Correlación como una función de la velocidad y la altura.
- Correlación dependiente de la rugosidad de la superficie.
- Correlaciones basadas en la rugosidad de la superficie y la velocidad.

Por otra parte, Det Norske Veritas (DNV) (2014), recomienda el uso del perfil logarítmico del viento, basado en la teoría de semejanza de Monin-Obukhov (1954), ya que en condiciones de mar abierto representa de forma más exacta la variación de la velocidad del viento con la altura, al incluir la variación continua de la rugosidad de la superficie del mar. Así, el perfil logarítmico de la velocidad del viento,  $U(z)$ , con la altura,  $z$ , para condiciones de estabilidad neutra se expresa de la forma siguiente:

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (2)$$

donde  $k$  es la constante de von Kármán,  $u_*$  es la velocidad de fricción y  $z_0$  es la longitud de rugosidad aerodinámica.

La teoría de semejanza, aunque desarrollada a partir de mediciones sobre tierra, se ha comprobado que es de aplicación general para mar abierto, aunque presenta restricciones para los emplazamientos influenciados por su proximidad a tierra (Lange et al., 2004).

Asimismo, para condiciones de estabilidad atmosférica inestables y estables, el perfil de la velocidad del viento se desvía de su expresión logarítmica, de tal modo que la ecuación (3) representa una extensión de la teoría de semejanza para un perfil diabático de la velocidad del viento.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (3)$$

Donde la función  $\Psi_M(z/L)$  es una relación empírica que representa los procesos de estabilidad de la capa superficial, de la forma siguiente:

- Atmósfera neutra,  $\Psi_M(z/L) = 0$
- Atmósfera inestable,  $\Psi_M(z/L) < 0$
- Atmósfera estable,  $\Psi_M(z/L) > 0$

siendo  $L$  la longitud de Obukhov, que representa la altura de la capa límite donde los procesos mecánicos (cizalla del viento) se igualan a los procesos térmicos (flotabilidad).

### 1.1. Longitud de rugosidad aerodinámica

La longitud de rugosidad aerodinámica,  $z_0$ , que influye de forma explícita en el perfil logarítmico del viento de la teoría de semejanza, se define como la altura donde la velocidad del viento se hace cero.

En condiciones marinas con vientos muy suaves, la evidencia experimental sugiere que la superficie del mar se aproxima a una superficie aerodinámica lisa, independiente de la geometría del elemento rugoso (Smith, 1988), y  $z_0$  está dada por la ecuación:

$$z_0 = \frac{0,11\nu}{u_*} \quad (4)$$

siendo  $\nu = 1,461 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  la viscosidad molecular cinemática.

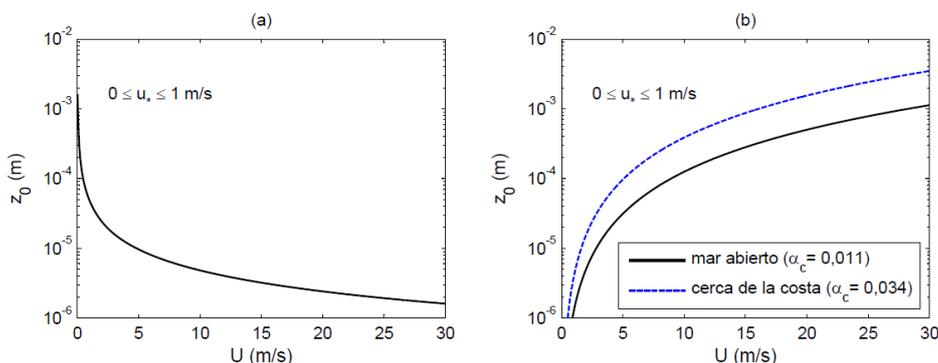
Por otra parte, en condiciones marinas para vientos de moderados a fuertes la propia acción del viento también produce oleaje, que se traduce en una mayor longitud de rugosidad de la superficie del mar. Esta dependencia se expresa por la relación de Charnock (1955):

$$z_0 = \frac{\alpha_c u_*^2}{g} \quad (5)$$

donde  $\alpha_c$  es una constante, denominada parámetro de Charnock, que suele ser citado entre 0,01 y 0,04 (Petersen et al., 1997), y que toma valores bajos para mar abierto y valores altos para emplazamientos cerca de la costa. Dicha expresión predice un incremento de  $z_0$  con la velocidad del viento, y también identifica la aceleración de la gravedad,  $g$ , como un parámetro dinámico esencial que caracteriza la interacción de equilibrio entre el viento y el oleaje.

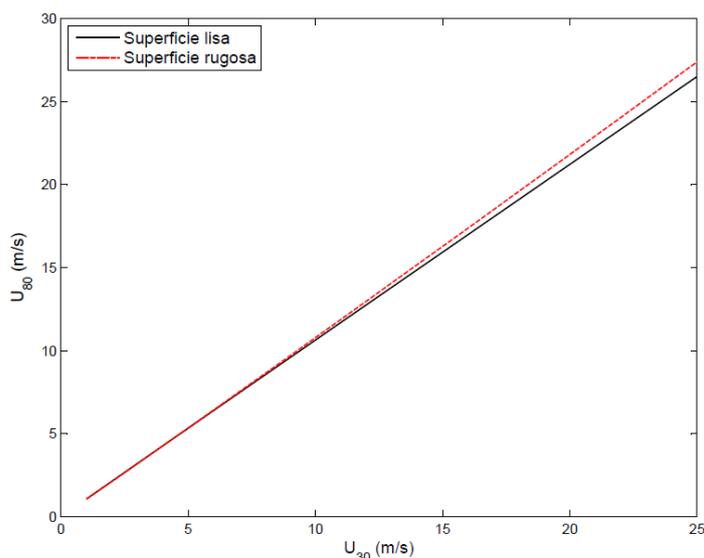
En las figuras 1(a) y 1(b) se representa la longitud de rugosidad aerodinámica en función de la velocidad del viento, para condiciones de la superficie del mar lisa y rugosa, respectivamente.

**Figura 1: Longitud de rugosidad aerodinámica en condiciones marinas**



En la figura 2 se muestra la variación del viento para una cota determinada,  $U_{80}$ , a partir de una medida del viento de referencia,  $U_{30}$ . Las ecuaciones (2) y (4) determinan la gráfica para una superficie del mar lisa y las ecuaciones (2) y (5) para una superficie del mar rugosa, por el efecto del oleaje; como se puede observar esta última indica un mayor aumento de la velocidad del viento con la altura.

**Figura 2: Influencia del estado de la superficie del mar en el potencial eólico**



Las condiciones de variabilidad continua de la rugosidad de la superficie del mar es el escenario más habitual en el rango de funcionamiento de un aerogenerador marino, dando una producción energética mayor que si se toma la superficie del mar lisa.

## 2. Objetivos

El objetivo principal planteado en la presente comunicación es caracterizar la influencia de la rugosidad de la superficie del mar en la producción energética de los aerogeneradores marinos.

El efecto de la velocidad del viento sobre la superficie del mar genera oleaje y para velocidades en torno a 4 m/s comienza la transición de superficie lisa a superficie rugosa, por lo tanto, la consideración de una superficie del mar lisa como hipótesis simplificativa no es un enfoque realista para el rango de funcionamiento de un aerogenerador.

Así pues, una superficie del mar rugosa relacionada con la velocidad del viento permitirá hacer un estudio del potencial eólico en condiciones de mar abierto más real, lo que influirá en la mejora del cálculo de la producción energética de aerogeneradores orientada el estudio de viabilidad de parques eólicos marinos.

El método de cálculo está basado en la aplicación de las ecuaciones potencial (1) y logarítmica (2), 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 FINO3.

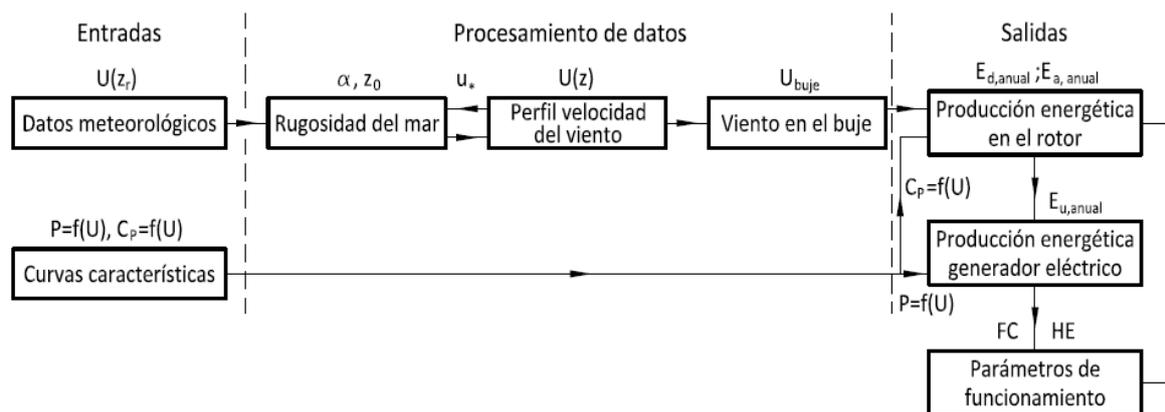
El resumen y la comparación de los resultados se realizan a través de la producción energética del aerogenerador Vestas V90-3.0MW, mediante sus parámetros de funcionamiento.

### 3. Metodología

Conocidos los datos meteorológicos medidos en un emplazamiento marino durante un periodo mínimo de un año se determinará, en primer lugar, el potencial eólico como la variación del viento con la altura, mediante las ecuaciones potencial (1) y logarítmica (2) con la influencia, implícita o explícita, de la rugosidad de la superficie del mar, y considerando una estabilidad atmosférica neutra durante todo el periodo. En segundo lugar, se obtendrá la producción energética de un aerogenerador marino en el emplazamiento conocidas las curvas características, proporcionadas por el fabricante del aerogenerador.

En la figura 3 se esquematiza el método de tal forma que de los datos meteorológicos de entrada como la temperatura y la presión ambiental, la velocidad y la dirección del viento se utilizará la velocidad del viento, siendo el resto de las entradas las curvas de potencia y del coeficiente de potencia de un aerogenerador marino multimegavatio. Los datos de salida serán los cálculos relativos al rotor del aerogenerador y a la energía de salida del generador eléctrico, que determinarán los parámetros de funcionamiento del aerogenerador, entre los que se encuentran el Factor de Carga (FC) y el número de Horas Equivalentes (HE), con el fin de realizar el estudio comparativo de la energía del viento en un emplazamiento.

**Figura 3: Diagrama de la producción energética de un aerogenerador marino**



Los cálculos serán los siguientes:

1. El perfil de la velocidad del viento por la ecuación potencial (1) con exponente 1,4; de donde se determinará la velocidad promediada del viento,  $U$ , a la cota del buje del aerogenerador.
2. El perfil de la velocidad del viento por la ecuación logarítmica (2), para ello se seguirán los siguientes pasos:

2a. Determinación de la velocidad de fricción,  $u_*$ , relacionada con la longitud de rugosidad aerodinámica,  $z_0$ , de la siguiente forma:

$$u_* = \frac{U(z_r) \cdot k}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (6)$$

Si  $U(z_r) < 4 \text{ m/s}$ , se sustituye (4) en (6) y tenemos:  $u_* = \frac{U(z_r) \cdot k}{\ln\left(\frac{z_r \cdot u_*}{0,11 \cdot \nu}\right)}$  (7)

Si  $4 \geq U(z_r) \leq 50 \text{ m/s}$ , se sustituye (5) en (6) y tenemos:  $u_* = \frac{U(z_r) \cdot k}{\ln\left(\frac{z_r \cdot g}{\alpha_c \cdot u_*^2}\right)}$  (8)

que se resolverán con el método numérico de iteración del punto fijo.

2b. Cálculo de la longitud de rugosidad aerodinámica,  $z_0$ , según las condiciones de superficie del mar, identificadas como lisa o rugosa.

2c. Determinación de la velocidad promediada del viento,  $U$ , a la cota del buje del aerogenerador.

En condiciones marinas el flujo de viento es más estable que sobre tierra, y la producción energética de los aerogeneradores marinos también es más estable. Asimismo, a medida que se reduce el rango de la serie temporal para determinar la velocidad media tendremos una mayor exactitud en el cálculo de la energía producida.

El viento medido en el emplazamiento se encuentra promediado cada diez minutos y las curvas de potencia y del coeficiente de potencia del aerogenerador se han discretizado en partes más pequeñas para obtener una mayor precisión en el cálculo. De esta manera, se han interpolado 20 valores entre dos valores enteros de la velocidad del viento de dichas curvas características.

La energía disponible a la entrada del rotor de un aerogenerador, durante un año,  $E_{d,anual}$ , viene dada por la ecuación:

$$E_{d,anual} = \sum_i T_i \dot{W}_i \quad (9)$$

siendo  $T_i$  el tiempo de ocurrencia de cada intervalo de la velocidad del viento y  $\dot{W}_i$  la potencia del viento incidente en el rotor del aerogenerador para dicha velocidad del viento.

La energía aprovechada a la salida del rotor de un aerogenerador, durante un año,  $E_{a,anual}$ , está determinada por la ecuación:

$$E_{a,anual} = \sum_i C_{P,i} T_i \dot{W}_i \quad (10)$$

donde  $C_{P,i}$  es el coeficiente de potencia del rotor del aerogenerador para cada intervalo de la velocidad del viento.

La energía útil a la salida del generador eléctrico, durante un año,  $E_{u,anual}$ , viene dada por la ecuación:

$$E_{u,anual} = \sum_i T_i P_i \quad (11)$$

donde  $P_i$  es el valor de la potencia extraído de la curva de potencia del aerogenerador para cada intervalo de la velocidad del viento incidente.

Con el objeto de caracterizar el comportamiento de un aerogenerador se definen los siguientes parámetros de funcionamiento equivalentes:

- Factor de carga (FC), es la relación entre la energía útil,  $E_{u,T}$ , producida por un aerogenerador durante un periodo de tiempo,  $T$ , y la que hubiera producido si durante dicho periodo hubiese estado funcionando continuamente a su potencia nominal,  $P_n$ , que expresamos mediante la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{E_{u,T}}{P_n \cdot T} \quad (12)$$

- Horas equivalentes a plena carga (HE), es el número de horas que debería funcionar un aerogenerador a plena carga para producir la misma energía en el periodo de tiempo  $T$  que se obtendría durante su funcionamiento real, y viene dado por la ecuación:

$$HE = \frac{E_{u,T}}{P_n} = T \cdot FC(\text{horas} / \text{periodo}) \quad (13)$$

que extendido a un año, sería:

$$HE = \frac{E_{u,anual}}{P_n} = 8.760 \cdot FC(\text{horas} / \text{año}) \quad (14)$$

Para hacer un estudio comparativo de la producción energética de un aerogenerador situado en el emplazamiento donde se extraen los datos se valorarán los parámetros FC y HE en cada uno de los años a partir de potencial eólico determinados por las ecuaciones (1) y (2). Y por último se validarán los resultados obtenidos con las medidas de la velocidad del viento a la altura del buje del aerogenerador, ya que la plataforma de investigación FINO3 permite hacer las medidas en varias alturas de la capa superficial.

El método propuesto no considera los periodos transitorios del viento desalineado con la dirección del oleaje, debido a que son reducidos y en corto plazo se produce la alineación, con nuevo crecimiento del mar. Así, la estructura de la capa límite marina se asemeja a la capa límite sobre tierra, siendo posible la aplicación de la teoría de semejanza. También se considera que en condiciones marina el flujo de viento es constante y la turbulencia ambiental es muy reducida.

La consideración de superficie del mar lisa solo tiene relevancia para el estudio comparativo de la variación del potencial eólico marino considerando la variación de la rugosidad de la superficie del mar, ya que para el cálculo de la producción energética de una aerogenerador apenas tiene efecto dentro del cómputo anual, debido a que se encuentra fuera del rango de funcionamiento del aerogenerador.

#### 4. Resultados con datos de la plataforma de investigación FINO3

La plataforma de investigación FINO3 (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 meteorológicos necesarios para la presentación de los resultados de dicho emplazamiento durante los años 2013, 2014 y 2015.

En la parte izquierda de la tabla 1 se indican los primeros datos medidos de la velocidad del viento a distintas alturas, en varios años, cuyos valores se encuentran promediados durante diez minutos. La velocidad del viento medida a 30 m se utiliza como referencia para los cálculos y la velocidad del viento a 80 m para la comparación de los resultados, debido a que es la cota a la que se encuentra el buje del aerogenerador seleccionado. Asimismo, en la otra parte de dicha tabla se encuentran los valores obtenidos con las ecuaciones potencial (1) y logarítmica (2). En todos los casos las series temporales contienen miles de datos, siendo indicadas mediante la eficacia de datos.

**Tabla 1. Potencial eólico en el emplazamiento**

Valores medidos. FINO3 Eficacia de datos: 89,0%			Ec. (1)	Cálculos con U(30)		Ec. (2)
Día/Mes/Año Hora	U(30) (m/s)	U(80) (m/s)	U <sub>buj</sub> (m/s)	u* (m/s)	z <sub>0</sub> (m)	U <sub>buj</sub> (m/s)
01/01/2013 0:00	7,57	9,37	8,68	0,231	0,000060	8,14
01/01/2013 0:10	7,50	9,19	8,60	0,228	0,000058	8,06
01/01/2013 0:20	7,70	9,32	8,83	0,235	0,000062	8,28
01/01/2013 0:30	7,84	9,39	8,99	0,240	0,000065	8,43
01/01/2013 0:40	7,96	9,58	9,13	0,245	0,000067	8,56
01/01/2013 0:50	7,96	9,51	9,13	0,245	0,000067	8,56
01/01/2013 1:00	7,74	9,21	8,88	0,237	0,000063	8,32
...	...	...	...	...	...	...
Valores medidos. FINO3 Eficacia de datos: 92,4%			Ec. (1)	Cálculos con U(30)		Ec. (2)
Día/Mes/Año Hora	U(30) (m/s)	U(80) (m/s)	U <sub>buj</sub> (m/s)	u* (m/s)	z <sub>0</sub> (m)	U <sub>buj</sub> (m/s)
01/01/2014 0:00	12,49	13,73	14,33	0,419	0,000197	13,52
01/01/2014 0:10	10,43	12,74	11,97	0,337	0,000128	11,26
01/01/2014 0:20	10,50	11,70	12,05	0,340	0,000130	11,33
01/01/2014 0:30	10,24	11,24	11,75	0,330	0,000122	11,05
01/01/2014 0:40	9,98	11,26	11,45	0,320	0,000115	10,76
01/01/2014 0:50	9,44	11,30	10,83	0,300	0,000101	10,17
01/01/2014 1:00	11,04	12,23	12,66	0,361	0,000146	11,93
...	...	...	...	...	...	...
Valores medidos. FINO3 Eficacia de datos: 95,1%			Ec. (1)	Cálculos con U(30)		Ec. (2)
Día/Mes/Año Hora	U(30) (m/s)	U(80) (m/s)	U <sub>buj</sub> (m/s)	u* (m/s)	z <sub>0</sub> (m)	U <sub>buj</sub> (m/s)
01/01/2015 0:00	12,80	14,04	14,68	0,431	0,000209	13,86
01/01/2015 0:10	12,20	13,29	14,00	0,407	0,000186	13,20
01/01/2015 0:20	12,51	13,71	14,35	0,419	0,000197	13,54
01/01/2015 0:30	11,99	13,39	13,75	0,399	0,000178	12,97
01/01/2015 0:40	12,17	13,00	13,96	0,406	0,000185	13,16
01/01/2015 0:50	11,72	12,80	13,45	0,388	0,000169	12,67
01/01/2015 1:00	12,10	13,20	13,88	0,403	0,000182	13,09
...	...	...	...	...	...	...

Las velocidades del viento obtenidas con las ecuaciones (1) y (2) se desvían más del dato experimental medido en altura para velocidades del viento de referencia inferiores a 9 m/s. En la tabla 2 se indican los valores máximos y mínimos de la longitud de rugosidad aerodinámica. Aún para condiciones más extremas del viento la longitud de rugosidad no

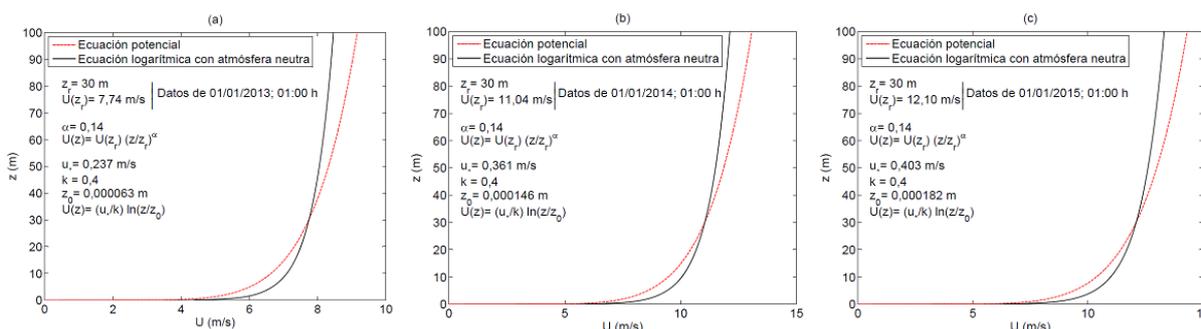
supera los 3 mm, esto es, el viento impulsa la formación del oleaje y prácticamente no se desprende de la superficie.

**Tabla 2. Valores extremos de la rugosidad de la superficie del mar**

FINO3. Años:	2013	2014	2015
$Z_0$ máx (m)	0,002089	0,001110	0,001706
$Z_0$ mín (m)	0,000013	0,000013	0,000011

En las figuras 4(a), 4(b) y 4(c) se muestran los perfiles de la velocidad del viento con las ecuaciones de estudio para una franja diezminutal arbitraria, destacando que el comportamiento es el mismo en todos los periodos de tiempo considerados en cada año.

**Figura 4: Perfiles de la velocidad del viento**

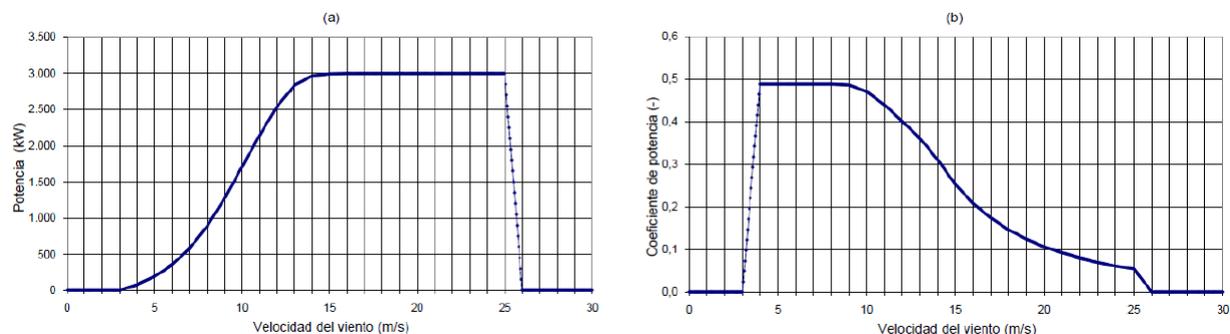


En general, para un periodo anual, la ecuación potencial, con un valor constante del exponente, no contempla la variabilidad continua de la superficie del mar y sobreestima la velocidad del viento a la altura del buje de los aerogeneradores, siendo adecuado para el estudio de sus condiciones de diseño, pero no para el estudio de la viabilidad de parques eólicos marinos.

En cambio, la velocidad del viento obtenida con la ecuación logarítmica se ajusta mejor al valor medido en todo el periodo y su determinación pasa por el cálculo de la velocidad de fricción,  $u_*$ , relacionado con el coeficiente de arrastre de la superficie y la longitud de rugosidad aerodinámica,  $z_0$ , para cada intervalo de tiempo promediado.

Por otra parte, obtenido el valor de la velocidad del viento a la altura del buje, para el cálculo de la producción energética se ha seleccionado el aerogenerador marino Vestas V90-3,0 MW, de 90 m de diámetro de rotor, con el buje a 80 m sobre el nivel del mar (s.n.m.) y 3 MW de potencia nominal. En la figuras 5(a) y 5(b) se indican las curvas de potencia y del coeficiente de potencia, las cuales se han discretizado al obtener veinte valores entre dos valores enteros de la velocidad del viento y hacer un cálculo más preciso de su producción.

**Figura 5: Curvas características del aerogenerador Vestas V90-3,0 MW**



La curva de potencia se inicia con una velocidad de arranque de 4 m/s, alcanza el valor nominal a 15 m/s y lo mantiene hasta 25 m/s, siendo esta la velocidad de corte. En relación con la curva del coeficiente de potencia, relacionada con el rendimiento del rotor del aerogenerador, en el arranque toma su máximo valor que mantiene hasta una velocidad de 10 m/s, y a partir de aquí el rendimiento del rotor va disminuyendo hasta alcanzar algo más del 5% en la velocidad de corte.

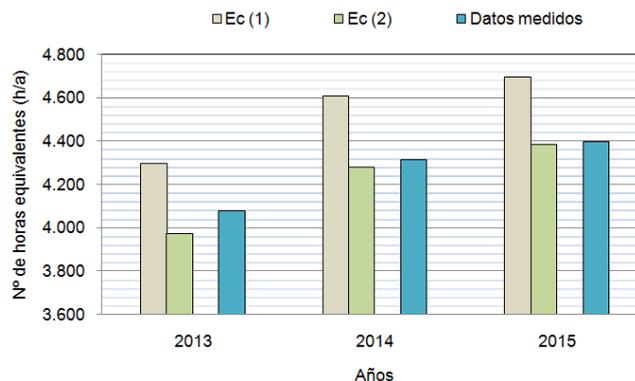
En la tabla 3 se indican los parámetros de funcionamiento equivalentes, FC y HE, de dicho aerogenerador, para la velocidad del viento a la altura del buje obtenidas con las ecuaciones (1) y (2) y con los datos experimentales medidos a la altura del buje, para varios años.

**Tabla 3. Comparación de los parámetros de funcionamiento**

Años	2013		2014		2015	
Parámetros	FC	HE	FC	HE	FC	HE
Vel. viento en el buje	(-)	(h/a)	(-)	(h/a)	(-)	(h/a)
Ec. (1): ecuación potencial, con $\alpha = 0,14$	0,490	4.296	0,526	4.607	0,536	4.693
Ec. (2): ecuación logarítmica, atm. neutra, con superficie variable, $z_0$	0,454	3.973	0,488	4.279	0,500	4.382
Datos medidos	0,466	4.079	0,492	4.312	0,502	4.398

Como resumen, en la figura 6 se compara gráficamente el parámetro HE para confirmar que el potencial eólico determinado por la ecuación logarítmica, considerando una estabilidad atmosférica neutra, da el mejor resultado cuando se compara con el valor de HE obtenido con la velocidad del viento medido a la altura del buje.

**Figura 6: Comparación del número de horas equivalentes**



La variación anual que se observa en la gráfica se debe a la variación de la eficacia de los datos, 89,0%, 92,4% y 95,1% para los años 2013, 2014 y 2015, respectivamente. El emplazamiento de la plataforma de investigación presenta un potencial eólico elevado, que se traduce en más de 4.200 h/a.

## 5. Conclusiones

El conocimiento de las interacciones que tienen lugar en la capa límite atmosférica es esencial para valorar el potencial eólico en condiciones marinas y determinar la producción energética de los aerogeneradores.

La ecuación potencial contempla una rugosidad constante de la superficie del mar para cualquier velocidad del viento y denota el perfil de la velocidad del viento para condiciones de diseño de los aerogeneradores, por lo que sobreestima la velocidad del viento a la altura del buje. De la misma forma que existen correlaciones para aplicaciones sobre tierra sería conveniente un estudio que relacionara el exponente de la función, al menos, con la rugosidad de la superficie del mar y con las condiciones de estabilidad atmosférica.

La ecuación logarítmica de la teoría de semejanza contempla una rugosidad variable de la superficie del mar y hace una predicción más favorable del potencial eólico en un emplazamiento marino. No obstante, se podrían mejorar los resultados al considerar los flujos de calor y de humedad.

Los datos medidos a distintas alturas en la plataforma de investigación FINO3 nos han permitido confirmar la influencia de la rugosidad en el potencial eólico que se ha traducido en una mejora en la producción energética del aerogenerador marino seleccionado. Asimismo, el estudio comparativo realizado confirma que la ecuación logarítmica da unos resultados próximos a la realidad en cada año de estudio.

## 6. Referencias

- Charnock, H. (1955). Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81, 639-640.
- DNV (2014). Design of offshore wind turbine structures. DNV-OS-J101.
- FINO database. [http://www.bsh.de/en/Marine\\_data/Projects/FINO/index.jsp](http://www.bsh.de/en/Marine_data/Projects/FINO/index.jsp) [15-01-2017].
- Germanisher Lloyd (2012). Guideline for the certification of offshore wind turbines.
- IEC (2009). Wind turbines-part 3: Design requirements for offshore wind turbines. IEC 61400-3.
- Lange, B., Larsen, S., Hojstrup, J., & Barthelmie, R. (2004). Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92, 959-988.
- 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.
- Monin, A.S., & Obukhov, A.M. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 151, 163-187.
- Petersen, E.L., Mortensen, N.G., Landberg, L., Hojstrup, J., & Frank, H.P. (1997). Wind power meteorology. Roskilde, Dinamarca: Risø National Laboratory. Risø-I-1206(EN). 45 pp.
- Smith, S.D. (1988). Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *Journal of Geophysical Research*, 93, 15.467-15.472.