

05-004

## INFLUENCE OF ATMOSPHERIC STABILITY ON ENERGY PRODUCTION OF THE OFFSHORE WIND TURBINES

Bahamonde García, Manuel Ignacio; Pérez Litrán, Salvador; Macías Macías, José

Universidad de Huelva

At present, the high production wind energy, with 591,549 MW installed, is the second renewable with the greatest worldwide implantation and contributes in an outstanding way in the energy mix of some countries. Likewise, offshore wind energy has experienced rapid growth in recent years, with the implementation of new offshore wind farms with increasing powers, reaching an accumulated capacity of 23,140 MW at the end of 2018 (GWEC, 2019).

The immense untapped wind potential of large marine areas around the world, make necessary a reliable method of predicting the wind resource, valid for any latitude, capable of determining the energy viability of new offshore wind farms. The knowledge of the interactions in the marine atmospheric boundary layer, identifying the boundary conditions, will help us achieve this purpose.

The objective of this communication is to characterize the influence of atmospheric stability, in open sea conditions, on the production of energy from marine wind turbines. For this, the logarithmic profile of the wind, the theory of similarity for neutral atmosphere conditions and a more general expression that includes a stability function for unstable and stable conditions will be considered.

**Keywords:** *wind energy; atmospheric stability; Richardson's number; similarity theory; offshore wind turbines*

## INFLUENCIA DE LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA EN LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE LOS AEROGENERADORES MARINOS

En la actualidad, la energía eólica de gran producción, con 591.549 MW instalados, es la segunda renovable con mayor implantación a nivel mundial y contribuye de forma destacada en el mix energético de algunos países. Asimismo, la energía eólica marina ha experimentado un rápido crecimiento en los últimos años, con la implantación de nuevos parques eólicos marinos de potencias crecientes, alcanzando a final de 2018 una potencia acumulada de 23.140 MW (GWEC, 2019).

El inmenso potencial eólico sin explotar de grandes áreas marinas en todo el mundo, hacen necesario un método fiable de predicción del recurso eólico, válido para cualquier latitud, capaz de determinar la viabilidad energética de nuevos parques eólicos marinos. El conocimiento de las interacciones en la capa límite atmosférica marina, identificando las condiciones de contorno, nos ayudará a conseguir dicho propósito.

El objetivo de la presente comunicación es caracterizar la influencia de la estabilidad atmosférica, en condiciones de mar abierto, en la producción de energética de los aerogeneradores marinos. Para ello, se considerará el perfil logarítmico del viento, de la teoría de semejanza para condiciones de atmósfera neutra y una expresión, más general, que incluye una función de estabilidad para condiciones inestables y estables.

**Palabras clave:** *energía eólica; estabilidad atmosférica; número de Richardson; teoría de semejanza; aerogeneradores marinos*

Correspondencia: Manuel Ignacio Bahamonde García bahamonde@uhu.es

Acknowledgements/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.



©2019 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 industria eólica marina, que inició su evolución con el parque eólico marino danés Vindeby en 1991, está basada en la experiencia acumulada en la industria eólica terrestre, así como en los códigos y normas de las industrias gasísticas y petroleras en condiciones marinas, como las publicadas por Det Norske Veritas (DNV), Germanischer Lloyd (GL) y la International Electrotechnical Commission (IEC) (Kalvig, Gudmestad & Winther, 2014).

En relación al potencial eólico, la norma IEC 61400-3 (2009), basada en la norma IEC 61400-1 (2005), representa el perfil de la velocidad del viento con la altura mediante la ecuación potencial (1), donde la velocidad del viento,  $U(z)$ , se obtiene en función de la altura,  $z$ , sobre el nivel medio del mar, a partir del valor medio del viento de entrada,  $U_{hub}$ , para la altura del buje,  $z_{hub}$ , y para condiciones normales del viento donde el exponente,  $\alpha$ , es 0,14.

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

Dicha ecuación, aunque ampliamente utilizada en las aplicaciones de ingeniería, no tiene en cuenta las condiciones de estabilidad atmosférica de la capa límite atmosférica marina (CLAM) y, en general, sobreestima la velocidad del viento a la altura del buje (Newman & Klein, 2014), siendo su enfoque el estudio de las condiciones de diseño de los aerogeneradores.

La teoría de semejanza de Monin-Obukhov (1954) surge como consecuencia de la longitud de escala para los procesos de intercambio en la atmósfera, conocida como longitud de Obukhov (1946), que representa la altura de la capa límite atmosférica, donde los procesos mecánicos se igualan a los procesos térmicos. Dicha teoría, aunque desarrollada a partir de mediciones sobre tierra, se considera que es de aplicación general para mar abierto, ya que predice un perfil logarítmico de la velocidad del viento en condiciones de viento homogéneo y estacionario.

En condiciones marinas, el papel de la estabilidad atmosférica en la capa superficial y la longitud de rugosidad aerodinámica, según el estado de la mar, son determinantes para conocer la producción energética de un parque eólico marino. Lange et al. (2004) llegaron a la conclusión que las estimaciones de potencia de salida mejoran significativamente si se tiene en cuenta la estabilidad.

### 1.1. El perfil de la velocidad del viento en la capa atmosférica superficial

La teoría de semejanza de Monin-Obukhov para la CLAM, en relación con la cantidad de movimiento, da como resultado la ecuación (2), que representa el perfil logarítmico del viento en condiciones de atmósfera neutra:

$$U(z) = u_* / k \ln(z/z_0) \quad (2)$$

donde  $k$  es la constante de von Kármán, que tomaremos con un valor de 0,4,  $z_0$  es la longitud de rugosidad aerodinámica y  $u_*$  es la velocidad de fricción, que se define mediante la siguiente expresión:

$$u_*^2 = \left| \frac{\tau}{\rho} \right| \quad (3)$$

donde  $\tau$  es la tensión superficial, que actúa paralela sobre la superficie del mar,  $\rho$  es la densidad del aire y  $u_*^2$  es la tensión cinemática.

Asimismo, en base a dicha teoría, el perfil diabático del viento viene dado mediante:

$$U(z) = u_* / k [\ln(z/z_0) + \Psi_M(z/L)] \quad (4)$$

donde  $L$  es la longitud de Obukhov, expresada como:

$$L = - \frac{u_*^3}{k \frac{g}{\theta_v} F_{Hs}} \quad (5)$$

donde  $g/\bar{\theta}_v$  es la flotabilidad, en  $m/s^2K$ , y  $F_{Hs}$  el flujo cinemático de calor, en  $K m/s$ .

La función empírica,  $\Psi_M(z/L)$ , representa los procesos de estabilidad térmica en la capa superficial. Así, para condiciones neutras,  $z/L = 0$ , la función de estabilidad toma el valor cero y obtenemos la ecuación (2); para condiciones estables,  $z/L > 0$  y para condiciones inestables,  $z/L < 0$  (Stull, 2009).

En relación a la longitud de rugosidad aerodinámica, con vientos muy suaves, inferiores a 4 m/s, la superficie del mar se aproxima a una superficie aerodinámica lisa, independiente de la geometría del elemento rugoso (Smith, 1988), de tal forma que  $z_0$  está dada por la ecuación:

$$z_0 = \frac{0,11\nu}{u_*} \quad (6)$$

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

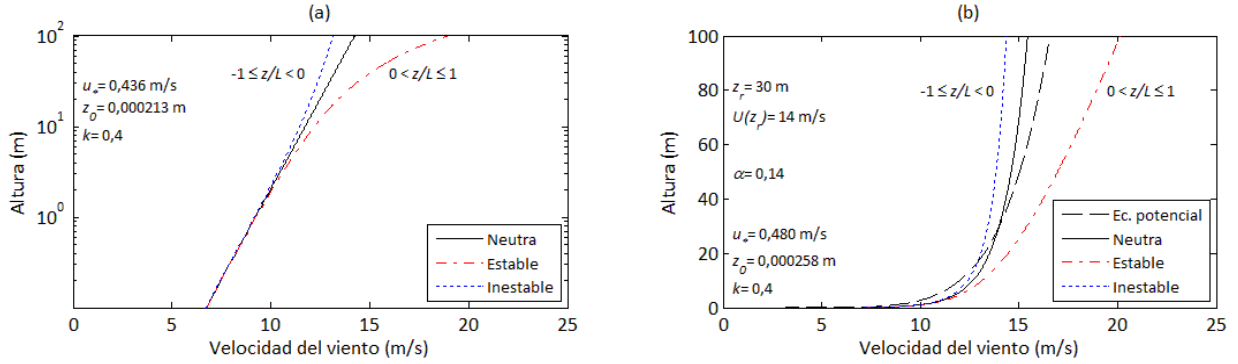
Por otra parte, en condiciones marinas para vientos de moderados a fuertes, igual o superior a 4 m/s, la propia acción del viento también produce oleaje, que se traduce en una mayor longitud de rugosidad de la superficie del mar. Esta dependencia se expresa por la relación de Charnock (1955):

$$z_0 = \frac{\alpha_c u_*^2}{g} \quad (7)$$

donde  $\alpha_c$  es una constante, denominada parámetro de Charnock, que suele ser citado entre 0,01 y 0,04, 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.

Resumiendo de forma gráfica, en la figura 1(a) se representa la variación de la velocidad del viento con la altura, en escala semilogarítmica, para condiciones de mar abierto y para distintos casos de estratificación atmosférica. Una relación logarítmica, como el perfil de la velocidad del viento con atmósfera neutra, aparece como una línea recta. Por otro lado, para los casos no neutros, el perfil de la velocidad del viento se desvía ligeramente de la logarítmica, de tal forma que, en las capas límites estables, el perfil del viento es cóncavo hacia abajo, mientras que en las capas límites inestables es cóncavo hacia arriba.

**Figura 1: Variación de la velocidad del viento con la altura en la capa superficial**



En la figura 1(b) se representan las ecuaciones (1) y (4) a partir de los datos medidos en un intervalo diezminutal. La ecuación potencial presenta un perfil a cotas superiores, desde la cota de medida, con menos pendiente que la ecuación logarítmica en condiciones de estratificación neutra, dando mayores valores de las velocidades del viento para una misma cota, siendo dicho comportamiento el mismo en todos los intervalos temporales considerados en un año. También se puede observar la comparación de la ecuación potencial con el perfil diabático del viento para los casos inestable y estable.

## 1.2. 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:

$$Ri = g / \bar{\theta}_v \frac{\partial \bar{\theta}_v / \partial z}{[(\partial \bar{U} / \partial z)^2 + (\partial \bar{V} / \partial z)^2]} \quad (8)$$

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,  $Ri_b$ :

$$Ri_b = g / \bar{\theta}_v \frac{\Delta \bar{\theta}_v \Delta z}{[(\Delta \bar{U})^2 + (\Delta \bar{V})^2]} \quad (9)$$

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 (9), 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):

$$Ri_b = \frac{g z (T_a - T_s)}{(273.15 + T_a) U^2} \quad (10)$$

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  $z$ .

## 2. Objetivos

El objetivo principal planteado en la presente comunicación es proporcionar un método fiable para determinar la variación de la velocidad del viento con la altura en la capa superficial de la atmósfera, en condiciones de mar abierto, a partir de los datos medidos en torres, donde los equipos meteorológicos se encuentran a cotas muy inferiores a las del buje de un aerogenerador.

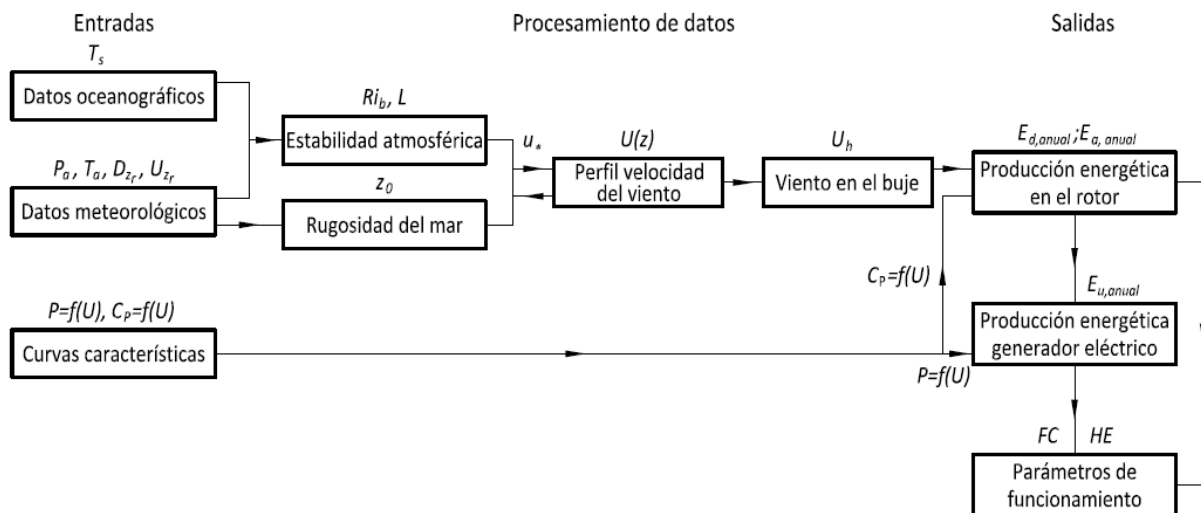
Como aplicación, primero se extrapola la velocidad del viento con la altura, con los datos de la plataforma de investigación alemana FINO 3, en el Mar del Norte, durante los años 2015, 2016 y 2017. A continuación, se aplica al cálculo de la energía eléctrica de un aerogenerador comercial de 3,0 MW, con el buje a 80 m sobre la superficie del mar.

La verificación de los resultados se ha realizado mediante la comparación de las velocidades del viento medidas, a dicha altura, en la plataforma y su aplicación al cálculo de la energía.

## 3. Metodología

El método de estudio se esquematiza en la figura 2, el cual toma, como datos de entrada para el cálculo, 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 y dirección del viento, siendo el resto de entradas las curvas de potencia y del coeficiente de potencia de un aerogenerador comercial. Los datos de salida son los cálculos relativos al rotor del aerogenerador y a la energía de salida del generador eléctrico, que determinan sus parámetros de funcionamiento, entre los que se encuentran el Factor de Carga ( $FC$ ) y el número de Horas Equivalentes ( $HE$ ), con el fin de realizar un estudio comparativo de la energía del viento en un emplazamiento marino.

Figura 2: Diagrama del método de estudio



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

$$FC = \frac{E_{u,anual}}{P_n \cdot T} \quad (11)$$

El número de Horas Equivalentes,  $HE$ , es el número de horas que debería funcionar un aerogenerador a plena carga para producir la misma energía en un año que se obtendría durante su funcionamiento real. Está dada por la ecuación:

$$HE = \frac{E_{u, anual}}{P_n} = 8.760 \cdot FC(\text{horas/año}) \quad (12)$$

#### 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 2015, 2016 y 2017. Así, en la tabla 2 se indican los primeros datos medidos y predichos por el método propuesto, conteniendo las series temporales miles de datos, siendo estos indicados por su eficacia.

**Tabla 2. Inicio de datos medidos y predichos**

| Emplazamiento de FINO 3 en 2015. Eficacia de datos: 95,1% |               |                |                |              |                |                        |           |                    |                    |
|-----------------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|--------------|----------------|------------------------|-----------|--------------------|--------------------|
|                                                           | Mar           |                | Medidas a 30 m |              |                | Predichos CLAM superf. |           | Predicho a 80 m    | Medido a 80 m      |
| Día/Mes/Año/Hora                                          | $T_s$<br>(°C) | $P_a$<br>(hPa) | $T_a$<br>(°C)  | $D_z$<br>(°) | $U_z$<br>(m/s) | $Ri_b$<br>(-)          | Est. atm. | $U_{p80}$<br>(m/s) | $U_{m80}$<br>(m/s) |
| 01/01/2015 0:00                                           | 7,65          | 1023           | 7,54           | 243          | 12,80          | -0,001                 | N         | 13,86              | 14,04              |
| 01/01/2015 0:10                                           | 7,65          | 1023           | 7,52           | 242          | 12,20          | -0,001                 | N         | 13,20              | 13,29              |
| 01/01/2015 0:20                                           | 7,65          | 1023           | 7,46           | 244          | 12,51          | -0,001                 | N         | 13,54              | 13,71              |
| ...                                                       | ...           | ...            | ...            | ...          | ...            | ...                    | ...       | ...                | ...                |
| Emplazamiento de FINO 3 en 2016. Eficacia de datos: 90,3% |               |                |                |              |                |                        |           |                    |                    |
|                                                           | Mar           |                | Medidas a 30 m |              |                | Predichos CLAM superf. |           | Predicho a 80 m    | Medido a 80 m      |
| Día/Mes/Año/Hora                                          | $T_s$<br>(°C) | $P_a$<br>(hPa) | $T_a$<br>(°C)  | $D_z$<br>(°) | $U_z$<br>(m/s) | $Ri_b$<br>(-)          | Est. atm. | $U_{p80}$<br>(m/s) | $U_{m80}$<br>(m/s) |
| 13/01/2016 13:10                                          | 7,70          | 1004           | 4,65           | 286          | 2,23           | -0,649                 | I         | 2,27               | 2,97               |
| 13/01/2016 13:20                                          | 7,70          | 1004           | 4,81           | 243          | 2,57           | -0,463                 | I         | 2,62               | 2,82               |
| 13/01/2016 13:30                                          | 7,75          | 1004           | 4,78           | 195          | 2,75           | -0,415                 | I         | 2,80               | 2,80               |
| ...                                                       | ...           | ...            | ...            | ...          | ...            | ...                    | ...       | ...                | ...                |
| Emplazamiento de FINO 3 en 2017. Eficacia de datos: 88,2% |               |                |                |              |                |                        |           |                    |                    |
|                                                           | Mar           |                | Medidas a 30 m |              |                | Predichos CLAM superf. |           | Predicho a 80 m    | Medido a 80 m      |
| Día/Mes/Año/Hora                                          | $T_s$<br>(°C) | $P_a$<br>(hPa) | $T_a$<br>(°C)  | $D_z$<br>(°) | $U_z$<br>(m/s) | $Ri_b$<br>(-)          | Est. atm. | $U_{p80}$<br>(m/s) | $U_{m80}$<br>(m/s) |
| 01/01/2017 0:00                                           | 8,15          | 1011           | 8,59           | 254          | 15,07          | 0,002                  | N         | 16,36              | 16,33              |
| 01/01/2017 0:10                                           | 8,15          | 1011           | 8,59           | 253          | 15,05          | 0,002                  | N         | 16,34              | 16,37              |
| 01/01/2017 0:20                                           | 8,15          | 1010           | 8,58           | 253          | 14,62          | 0,002                  | N         | 15,86              | 15,81              |
| ...                                                       | ...           | ...            | ...            | ...          | ...            | ...                    | ...       | ...                | ...                |

Mediante el número de Richardson bulk,  $Ri_b$ , expresado por la ecuación (10), 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 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. Aún siendo la eficacia de datos distinta en cada año, se observa que la estabilidad atmosférica se mantiene en un determinado rango de valores porcentuales.

**Tabla 3. Estabilidad atmosférica en el emplazamiento de FINO 3**

| Año  | Eficacia de datos | Cuasi-Neutra (N) |       | Inestable (I) |       | Estable (E) |      | Total |
|------|-------------------|------------------|-------|---------------|-------|-------------|------|-------|
|      |                   | No.              | %     | No.           | %     | No.         | %    |       |
| 2015 | 0,951             | 28887            | 57,81 | 18755         | 37,53 | 2327        | 4,66 | 49969 |
| 2016 | 0,903             | 21375            | 44,89 | 22268         | 46,77 | 3971        | 8,34 | 47614 |
| 2017 | 0,882             | 23965            | 51,68 | 19606         | 42,28 | 2800        | 6,04 | 46371 |

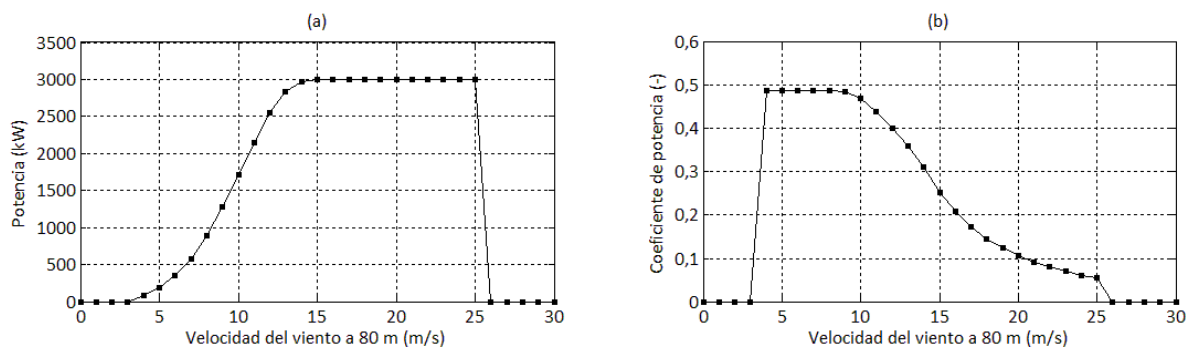
Asimismo, del total de datos, solo se emplean en la producción de energía los que se encuentran en el rango, R, de funcionamiento del aerogenerador seleccionado, esto es, entre 4 y 25 m/s, según la estabilidad atmosférica, quedando desglosados en la tabla 4.

**Tabla 4. Desglose de la estabilidad atmosférica en el emplazamiento de FINO 3 para el rango, R, de funcionamiento del aerogenerador entre 4 m/s y 25 m/s**

| Año  | Cuasi-Neutra R ( $N_R$ ) |       | Inestable R ( $I_R$ ) |       | Estable R ( $E_R$ ) |      | Total en R | Total |
|------|--------------------------|-------|-----------------------|-------|---------------------|------|------------|-------|
|      | No.                      | %     | No.                   | %     | No.                 | %    |            |       |
| 2015 | 28475                    | 63,55 | 14862                 | 33,17 | 1467                | 3,27 | 44804      | 49969 |
| 2016 | 21063                    | 50,07 | 17941                 | 42,65 | 3066                | 7,29 | 42070      | 47614 |
| 2017 | 23597                    | 57,96 | 15019                 | 36,89 | 2094                | 5,14 | 40710      | 46371 |

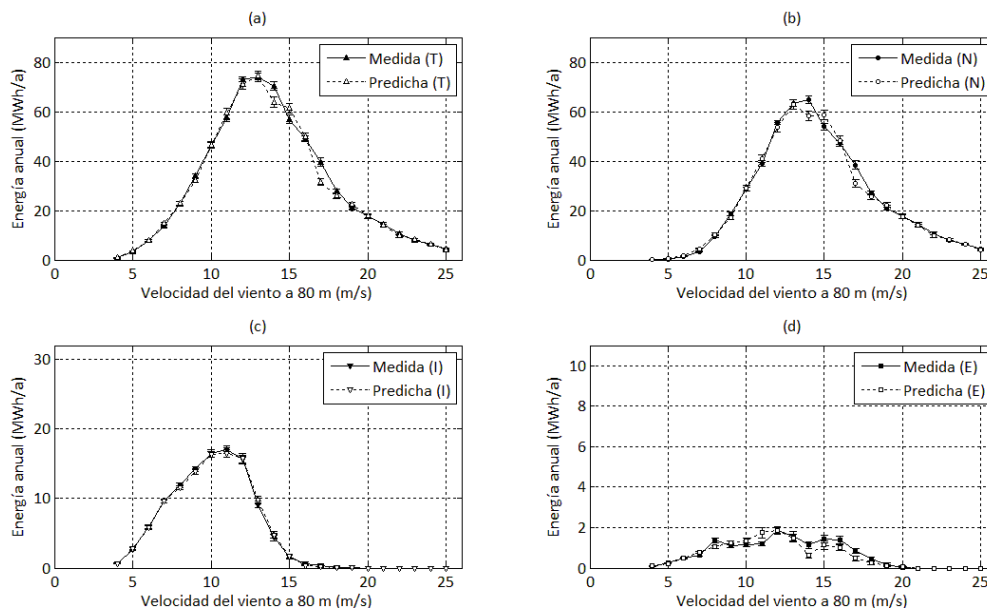
Conocidas las velocidades del viento, medidas y modeladas, a 80 m, para el cálculo de la producción energética se han seleccionado las curvas características del aerogenerador marino Vestas V90-3,0 MW, representadas en la figura 3, con el buje a 80 m sobre el nivel del mar, siendo la velocidad de arranque 4 m/s, la velocidad nominal 15 m/s y la velocidad de corte 25 m/s.

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

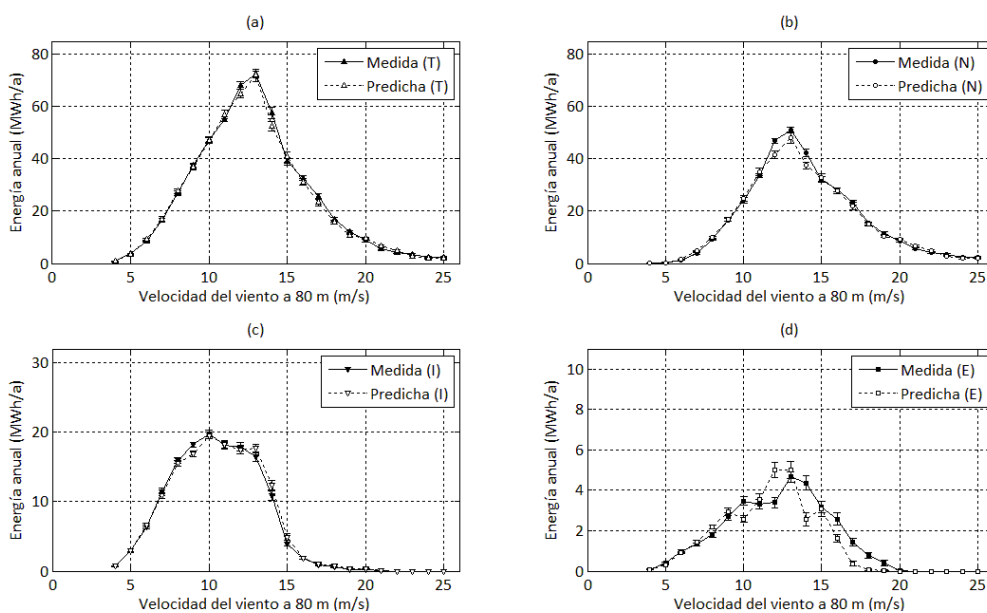


Las figuras 4-6 muestran las gráficas de los promedios de la producción energética de dicho aerogenerador, así como sus errores estándar, para cada rango de la velocidad del viento de 1 m/s, medido a una altura de 80 m, en el emplazamiento de la plataforma FINO 3, durante los años 2015 a 2017. En la parte (a), se representa la comparación del promedio de la energía producida, medida y predicha por el modelo, bajo todas las condiciones de estratificación atmosférica (T). En la parte (b), se comparan para el caso de atmósfera neutra (N), en (c) para atmósfera inestable (I) y en (d) para atmósfera estable (E).

**Figura 4: Promedio de la producción energética en 2015**

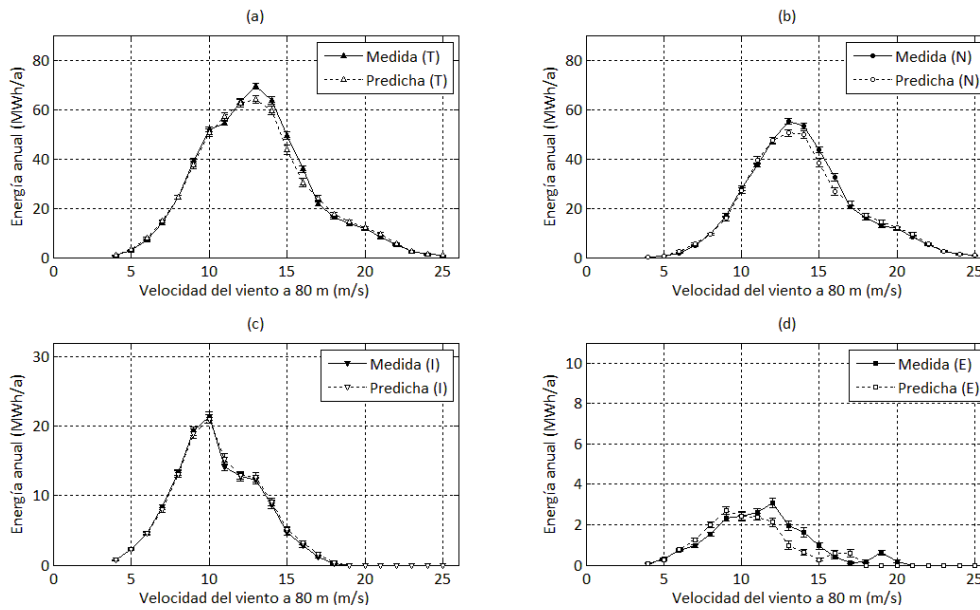


**Figura 5: Promedio de la producción energética en 2016**





**Figura 6: Promedio de la producción energética en 2017**



Como resumen del cálculo total de la energía, en la tabla 5 se indican los parámetros de funcionamiento equivalentes,  $FC$  y  $HE$ , de dicho aerogenerador, para la velocidad del viento a la altura del buje medidas y obtenidas, en los años del estudio, donde las desviaciones relativas no superan el 2,5%.

**Tabla 5. Resumen de los parámetros de funcionamiento y desviaciones**

| Año  | Eficacia de datos | Datos medidos |                 | Datos predichos |                 | Desviaciones           |                          |
|------|-------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------|--------------------------|
|      |                   | $FC_m$<br>(-) | $HE_m$<br>(h/a) | $FC_p$<br>(-)   | $HE_p$<br>(h/a) | $HE_m - HE_p$<br>(h/a) | $1 - HE_p / HE_m$<br>(%) |
| 2015 | 0,951             | 0,502         | 4398            | 0,493           | 4323            | 75                     | 1,70                     |
| 2016 | 0,903             | 0,416         | 3652            | 0,408           | 3586            | 66                     | 1,80                     |
| 2017 | 0,882             | 0,424         | 3715            | 0,414           | 3627            | 88                     | 2,36                     |

Asimismo, en la tabla 6 se muestra la contribución de las condiciones de estratificación atmosférica en la producción energética total, denotadas como horas equivalentes según medidas y tipo de atmósfera,  $HE_{mA}$ , y horas equivalentes predichas y tipo de atmósfera,  $HE_{pA}$ .

**Tabla 6. Contribución de la estabilidad atmosférica en las desviaciones**

| Año  | Datos medidos   |     |     | Datos predichos |     |     | Desviaciones              |     |    |                             |       |       |
|------|-----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|---------------------------|-----|----|-----------------------------|-------|-------|
|      | $HE_{mA}$ (h/a) |     |     | $HE_{pA}$ (h/a) |     |     | $HE_{mA} - HE_{pA}$ (h/a) |     |    | $1 - HE_{pA} / HE_{mA}$ (%) |       |       |
|      | N               | I   | E   | N               | I   | E   | N                         | I   | E  | N                           | I     | E     |
| 2015 | 3562            | 735 | 101 | 3497            | 732 | 94  | 65                        | 3   | 7  | 1,82                        | 0,40  | 6,93  |
| 2016 | 2442            | 978 | 232 | 2374            | 987 | 226 | 68                        | -9  | 6  | 2,78                        | -0,92 | 2,58  |
| 2017 | 2736            | 846 | 133 | 2654            | 860 | 113 | 82                        | -14 | 20 | 2,99                        | -1,65 | 15,03 |

Por otro lado, la consideración en un periodo anual de una estabilidad atmosférica neutra y una rugosidad de la superficie del mar constante, no parece un enfoque conservador para el cálculo de la energía, ya que si bien la rugosidad no tiene un efecto relevante, la estabilidad atmosférica puede llegar a tener efectos importantes, como en la latitud del emplazamiento de estudio.

De esta forma, como se indica en la tabla 7, resaltado en negrita, para una rugosidad de la superficie continuamente variable, cuando la estabilidad atmosférica es inestable, si se simplifica tomándola como neutra, se obtiene más energía y al contrario si la estabilidad atmosférica es estable, si se simplifica tomándola como neutra, se obtiene menos energía, produciéndose en el cómputo total un efecto de enmascaramiento de los resultados reales.

**Tabla 7. Comparación del número de horas equivalentes en el emplazamiento de FINO 3**

| Año  | Datos medidos<br>según tipo de atmósfera |     |     |       | Datos predichos<br>según tipo de atmósfera |            |            |       | Datos predichos<br>tomados como Neutros |             |            |       |
|------|------------------------------------------|-----|-----|-------|--------------------------------------------|------------|------------|-------|-----------------------------------------|-------------|------------|-------|
|      | $HE_{mA}$ (h/a)                          |     |     |       | $HE_{pA}$ (h/a)                            |            |            |       | $HE_{pA}$ (h/a)                         |             |            |       |
|      | N                                        | I   | E   | Total | N                                          | I          | E          | Total | N                                       | I--N        | E--N       | Total |
| 2015 | 3562                                     | 735 | 101 | 4398  | 3497                                       | <b>732</b> | <b>94</b>  | 4323  | 3497                                    | <b>808</b>  | <b>77</b>  | 4382  |
| 2016 | 2442                                     | 978 | 232 | 3652  | 2374                                       | <b>987</b> | <b>226</b> | 3587  | 2374                                    | <b>1081</b> | <b>186</b> | 3641  |
| 2017 | 2736                                     | 846 | 133 | 3715  | 2654                                       | <b>860</b> | <b>113</b> | 3627  | 2654                                    | <b>941</b>  | <b>92</b>  | 3687  |

No obstante, cuando el emplazamiento de estudio posee una estabilidad atmosférica neutra muy elevada, como el 90%, o superior, se podría simplificar tomando una estabilidad neutra en todo el periodo anual, ya que las diferencias en el cálculo de la energía serían muy reducidas.

De forma independiente al método propuesto, en la tabla 8 se indican los parámetros de funcionamiento del aerogenerador seleccionado obtenidos con la ecuación potencial (1), durante los años de estudio, y su comparación con los datos medidos en la plataforma FINO 3, destacando las desviaciones producidas.

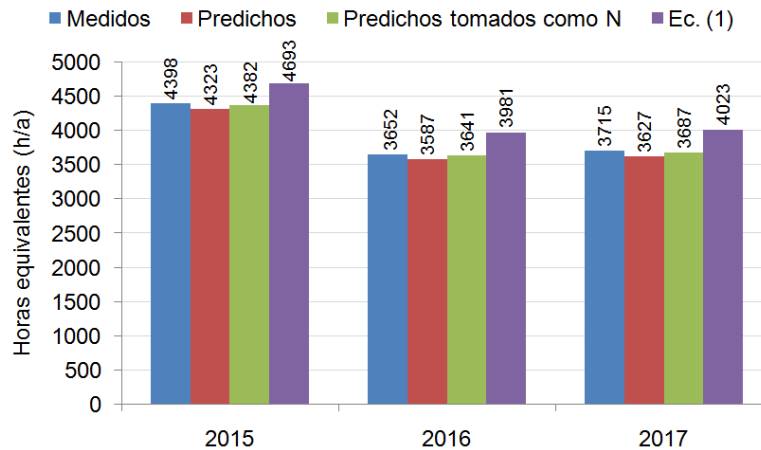
**Tabla 8. Resumen de los parámetros de funcionamiento y desviaciones con la Ec. (1)**

| Año  | Eficacia de datos | Datos medidos |              | Datos predichos Ec.(1) |              | Desviaciones        |                       |
|------|-------------------|---------------|--------------|------------------------|--------------|---------------------|-----------------------|
|      |                   | $FC_m$ (-)    | $HE_m$ (h/a) | $FC_p$ (-)             | $HE_p$ (h/a) | $HE_m - HE_p$ (h/a) | $1 - HE_p / HE_m$ (%) |
| 2015 | 0,951             | 0,502         | 4398         | 0,536                  | 4693         | -295                | -6,71                 |
| 2016 | 0,903             | 0,416         | 3652         | 0,453                  | 3981         | -329                | -9,01                 |
| 2017 | 0,882             | 0,424         | 3715         | 0,459                  | 4023         | -308                | -8,29                 |

Dichos resultados eran de esperar a tenor de las referencias citadas y de las representaciones del perfil de la velocidad del viento en la figura 1(b). Así, para un periodo anual, dicha ecuación, con un valor constante del exponente para condiciones marinas igual a 0,14, no contempla la variabilidad continua de la superficie del mar y, como se ha indicado, 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.

A modo de resumen, en la figura 7 se compara, mediante un gráfico de barras, el parámetro  $HE$  de la tabla 5, con los datos medidos, en azul y con el método propuesto, en rojo, el cual le confiere un carácter de validación de los resultados.

**Figura 7: Comparación de los resultados**



También de forma adicional se representan los valores de la tabla 7, en verde y de la tabla 8, en magenta. Aunque la gráfica de los valores predichos tomados todos como estratificación neutra, en color verde, parece que mejoran a los del método propuesto, ya se indicó que es fruto de la compensación que se produce en la suma total de los resultados.

## 5. Conclusiones

El conocimiento de las interacciones que tienen lugar en la CLAM es de gran importancia para valorar de forma fiable el potencial eólico en condiciones marinas y determinar la producción energética de los aerogeneradores que se instalan en el mar. Por ello, se ha propuesto un método para extrapolar la velocidad del viento con la altura, en condiciones de mar abierto, que considera las variaciones continuas de la estabilidad atmosférica y de la rugosidad de la superficie del mar, donde los datos de entrada y para la validación de los resultados se extraen de la plataforma de investigación alemana FINO 3.

El emplazamiento de FINO 3 muestra el mismo patrón de estabilidad atmosférica en los tres años de estudio, de tal forma que se puede inferir este comportamiento a otros emplazamientos marinos, tanto para el cálculo de la energía como para el estudio de la implantación de pp.ee.mm.

En los promedios de la producción energética total los resultados predichos se ajustan a los resultados obtenidos con las mediciones, siendo la mayor influencia la que proporciona la estratificación neutra. Asimismo, las estimaciones de la energía en condiciones de inestabilidad dan predicciones muy favorables, en cambio con estratificación estable se obtuvieron las mayores desviaciones.

Por todo ello, dicho método se puede extender a la forma habitual de las mediciones para un estudio de viabilidad energética, esta es, cuando son realizadas con mástiles de medidas, donde los datos meteorológicos se obtienen a cotas muy inferiores a las del buje de un aerogenerador.

## 6. Referencias

- Charnock, H. (1955). Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81, 639-640.
- FINO database. [http://www.bsh.de/en/Marine\\_data/Projects/FINO/index.jsp](http://www.bsh.de/en/Marine_data/Projects/FINO/index.jsp) [15-01-2019].

- 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.
- GWEC (Global Wind Energy Council). *Global Wind Report 2018*. Ed. GWEC. Abril de 2019.
- IEC. Wind turbines-part 1: design requirements wind turbines. IEC 61400-1, 2005.
- IEC. Wind turbines-part 3: design requirements for offshore wind turbines. IEC 61400-3, 2009.
- Kalvig, S., Gudmestad, O.T. & Winther, N. (2014). Exploring the gap between 'best knowledge' and 'best practice' in boundary layer meteorology for offshore wind energy. *Wind Energy*, 17, 161-171.
- Lange, B., Larsen, S., Højstrup, 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.
- Monin, A.S. & Obukhov, A.M. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 24 (151), 163-187.
- Newman, J.F. & Klein, P.M. (2014). The impacts of atmospheric stability on the accuracy of wind speed extrapolation methods. *Resources*, 3, 81-105.
- Obukhov, A.M. (1946). Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature. *Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 1, 95-115.
- 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.
- Stull, R.B. (2009). *An introduction to boundary layer meteorology*. Springer.