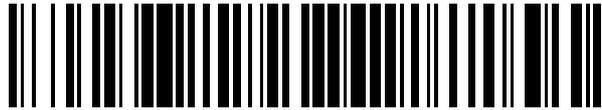


19



OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 745 538**

21 Número de solicitud: 201830733

51 Int. Cl.:

F03D 13/30 (2006.01)

F03D 17/00 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

20.07.2018

43 Fecha de publicación de la solicitud:

02.03.2020

71 Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE HUELVA (100.0%)

C/ Dr. Cantero Cuadrado 6

21071 Huelva ES

72 Inventor/es:

PEREZ LITRAN, Salvador y

BAHAMONDE GARCIA, Manuel Ignacio

74 Agente/Representante:

ALGUACIL OJEDA, Juan

54 Título: **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ANUAL DE UN AEROGENERADOR EN MAR ABIERTO**

57 Resumen:

Procedimiento para determinar la producción energética anual de un aerogenerador en mar abierto, que tiene en cuenta las variaciones continuas de la estabilidad atmosférica y de la rugosidad de la superficie del mar, a partir de las mediciones realizadas con mástiles de medidas, donde los datos meteorológicos se obtienen a cotas muy inferiores a las del buje de un aerogenerador.

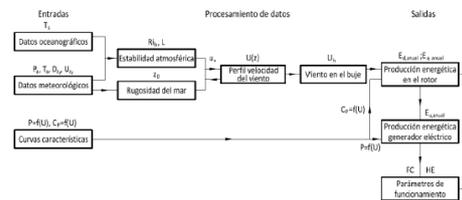


FIG.4

DESCRIPCIÓN**PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ANUAL DE UN AEROGENERADOR EN MAR ABIERTO**

5

Objeto de la invención

El objeto de la presente memoria es un procedimiento para determinar la producción energética anual de un aerogenerador en mar abierto, cuya principal característica distintiva es el hecho de tener en cuenta las variaciones continuas de la estabilidad atmosférica y de la rugosidad de la superficie del mar, a partir de unas mediciones realizadas con mástiles de medidas, donde los datos meteorológicos se obtienen a cotas muy inferiores a las del buje de un aerogenerador.

15 **Antecedentes de la invención**

En la actualidad, los altos costes de instalación y mantenimiento de los parques eólicos marinos, hacen necesario determinar con fiabilidad las mejores condiciones de viento, capaces de determinar mediante una predicción fiable el potencial eólico del mismo, para realizar un estudio de viabilidad realista que pueda derivar en una certidumbre mínima de retorno económico, que haga viable dicha inversión económica. Para conseguir esto, habrá que considerar que la capa límite atmosférica marina (CLAM) es diferente de la terrestre, tanto en los intercambios de cantidad de movimiento, como en los flujos de calor y humedad, así como por la variación continua de la rugosidad de la superficie del mar.

25

Por otra parte, la industria eólica marina está basada en la experiencia acumulada en la industria eólica terrestre, y en los códigos y normas de las industrias gasísticas y petroleras en condiciones marinas, como las publicadas por DetNorske Veritas, Germanischer Lloyd y la International Electrotechnical Commission (IEC).

30

En relación al potencial eólico, la norma IEC 61400-3, basada en la norma IEC 61400-1, 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, α , es 0,14.

35

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

Dicha ecuación, aunque ampliamente utilizada en las aplicaciones de ingeniería, no tiene en cuenta las condiciones de estabilidad atmosférica de la CLAM y sobreestima la velocidad del viento a la altura del buje, siendo su enfoque el estudio de las condiciones de diseño de los aerogeneradores.

Asimismo, la simplificación de las condiciones de contorno, considerando en todo el periodo anual una estabilidad atmosférica neutra y una rugosidad de la superficie del mar constante, no parece un enfoque conservador para determinar la variación de la velocidad del viento con la altura en la CLAM. Y por otro lado, la distribución de probabilidad de Weibull proporciona un mal ajuste de la distribución de las velocidades del viento, en comparación con modelos más complicados, por lo que puede dar lugar a desviaciones en el cálculo de la energía producida por un aerogenerador según el emplazamiento.

Debido a la complejidad que presenta la variación de la velocidad del viento con la altura en la CLAM, se requiere de un modelo que permita extrapolar las mediciones del viento, bajo determinadas condiciones de contorno, hasta la altura del buje de un aerogenerador.

La teoría de semejanza de Monin-Obukhov surge como consecuencia de la longitud de escala para los procesos de intercambio en la atmósfera (conocida como longitud de Obukhov) 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. Sin embargo, existen desviaciones cuando el flujo de viento se encuentra influenciado por la proximidad de tierra y para condiciones atmosféricas estables. Por lo que, en general, se considera que en la CLAM en condiciones de mar abierto se cumple dicha teoría, 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. Las estimaciones de potencia de salida mejoran significativamente si se tiene en cuenta la estabilidad.

Son conocidos el desarrollo de diversos estudios donde el perfil de la velocidad del viento sobre el mar se debe únicamente a la estabilidad atmosférica, en el supuesto que la rugosidad de la superficie del mar pueda ser predicha por la longitud de rugosidad de Charnock. Así, para condiciones atmosféricas neutras e inestables, la altura de la CLAM puede ser desestimada y las expresiones del perfil de la velocidad del viento, según la teoría de semejanza de Monin-Obukhov, están de acuerdo con las observaciones. En cambio, para condiciones estables, la altura de la CLAM deberá ser considerada de forma imprescindible.

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 toma de forma usual 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 τ es la tensión superficial, que actúa paralela sobre la superficie del mar, ρ es la densidad del aire y u_*^2 es la tensión cinemática.

Asimismo, en base a dicha teoría, el perfil diabático del viento se expresa mediante:

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

donde L es la longitud de Obukhov, expresada como:

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

siendo g/θ_v la flotabilidad, en $m/s^2 K$, 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, $z/L < 0$.

Por otro lado, 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, que viene dado por la ecuación:

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

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:

$$Ri_b = g/\bar{\theta}_v \frac{\Delta \bar{\theta}_v \Delta z}{[(\Delta \bar{U})^2 + (\Delta \bar{V})^2]} \quad (7)$$

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 (7), 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:

$$Ri_b = \frac{gz(T_a - T_s)}{(273,15 + T_a)U^2} \quad (8)$$

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.

La longitud de rugosidad aerodinámica, z₀, es la altura sobre una superficie donde la velocidad del viento se hace cero, que abreviaremos denominando longitud de rugosidad. En el mar, dicho parámetro se deberá a la variación continua del oleaje, el cual influye en el perfil logarítmico del viento de la teoría de semejanza. Así, con vientos muy suaves, las mediciones indican que la superficie del mar se aproxima a una superficie aerodinámica lisa, siendo independiente de la geometría del elemento rugoso, de tal forma que z₀ está dada por la ecuación:

$$z_0 \approx 0,11\nu / u_* \quad (9)$$

donde ν es la viscosidad molecular cinemática.

En cambio, también en condiciones marinas, para vientos de moderados a fuertes, la propia

acción del viento produce oleaje, que se traduce en una mayor longitud de rugosidad de la superficie del mar, siendo esta dependencia expresada por la relación de Charnock:

$$z_o = \alpha_c u_*^2 / g \quad (10)$$

5 donde α_c es la constante de Charnock, que suele ser citada entre 0,01 y 0,04, y que toma entre dicho rango valores bajos para mar abierto y valores altos para emplazamientos cerca de la costa.

10 Dicha expresión predice un incremento de z_o con la velocidad del viento e identifica la aceleración de la gravedad, g , como un parámetro dinámico esencial que caracteriza la interacción de equilibrio entre el viento y el oleaje.

Descripción de la invención

15 La energía eólica marina posee condiciones más favorables del viento que su homóloga terrestre, por lo que una estimación fiable del potencial eólico en la capa límite atmosférica es de gran importancia para justificar la viabilidad energética de nuevos parques eólicos marinos.

20 En la presente invención se desarrolla un procedimiento para determinar la producción energética anual de un aerogenerador en mar abierto, que tiene en cuenta las variaciones continuas de la estabilidad atmosférica y de la rugosidad de la superficie del mar, a partir de las mediciones realizadas con mástiles de medidas, donde los datos meteorológicos se obtienen a cotas muy inferiores a las del buje, siendo el enfoque principal el estudio de viabilidad de parques eólicos marinos.

25 Como aplicación y verificación, primero se extrapola la velocidad del viento con la altura mediante el procedimiento desarrollado, tomando los datos de una plataforma de investigación en mar abierto, la cual permite obtener los datos meteorológicos a distintas alturas. A continuación, se aplica al cálculo de la energía eléctrica de un aerogenerador
30 comercial, representativo en mar abierto, con una potencia nominal de 3,0 MW y con el buje a 80 m sobre la superficie del mar. Los resultados obtenidos fueron comparados con los datos de la velocidad del viento proporcionados a dicha altura por la plataforma, y su aplicación al cálculo de la energía, presentando desviaciones aceptables en todos los años de estudio, por lo que sería factible su aplicación industrial.

La extrapolación vertical de la velocidad del viento se ha realizado con las siguientes ecuaciones de la teoría de semejanza de Monin-Obukhov.

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

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

La primera para condiciones neutras y la segunda para condiciones no neutras, que incluye una función empírica para los procesos de estabilidad térmica en la CLAM, así para condiciones inestables se aplicó la ecuación de Paulson y para condiciones estables la ecuación de Businger-Dyer.

Asimismo, la longitud de Obukhov se determinará tras conocer la velocidad de fricción por el método numérico de iteración del punto fijo, siendo previamente calculados la flotabilidad y el flujo cinemático de calor, a partir de los datos experimentales medidos en el emplazamiento.

La longitud de rugosidad de la superficie del mar es un parámetro característico de las ecuaciones (2) y (4), de carácter variable y con valores reducidos, inferiores a 2 mm, incluso para condiciones más extremas del viento. Su influencia es reducida en la producción energética del aerogenerador, pero necesaria para el cálculo de la velocidad del viento con la altura, que incluye los cambios de la estabilidad atmosférica.

En las verificaciones realizadas, con estratificación neutra se observó que la variación de la velocidad del viento con la altura presenta una desviación razonable, siendo más acusada para velocidades bajas del viento. Por otro lado, con estratificación inestable se obtuvieron resultados muy favorables con pequeñas desviaciones y con estratificación estable se obtuvieron las mayores desviaciones. No obstante, en este ámbito, los resultados mejoraron cuando se sustituyó el valor constante y pequeño del coeficiente adimensional de transferencia principal de calor sensible por valores variables, dentro de un rango de atmósfera estable.

Las series diezminutales del viento predicho en altura se aplican a un aerogenerador comercial para obtener sus parámetros de funcionamiento, para su comparación con la producción del viento medido a la altura del buje. Los resultados presentaron desviaciones reducidas, por lo que se consideran satisfactorios para su aplicación comercial.

Breve descripción de las figuras

A continuación, se pasa a describir de manera muy breve un dibujo que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

La FIG.1 muestra una representación de la variación de la velocidad del viento con la altura (FIG.1(a)) 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. En la FIG.1(b) se muestra el detalle ampliado de dichas curvas entre 10 y 100 m.

La FIG.2 muestra una representación de la longitud de rugosidad en función de la velocidad del viento a 10 m en condiciones de atmósfera neutra (FIG. 2(a)), por aplicación de las ecuaciones (2) y (9), donde la parte de la curva desde 4 m/s a la derecha representa un efecto transitorio hasta que se origina el mar de vientos. Por otro lado, para vientos de moderados a fuertes, con velocidades igual o superior a 4 m/s, hasta 50 m/s, será de aplicación la relación de Charnock (10), quedando la representación de la longitud de rugosidad en función de la velocidad del viento a 10 m indicada en la FIG. 2(b), por aplicación de las Ecs. (2) y (10), para dos valores de la constante de Charnock.

La FIG 3 muestra una representación de las ecuaciones (9) y (10) donde la variación de la longitud de rugosidad en función de la velocidad de fricción es independiente de la altura en la CLAM (FIG.3(a)). Asimismo, para una altura constante, en condiciones de atmósfera neutra, al sustituir la Ecuación (9) en la Ecuación (2), obtenemos:

$$U(z) = u_* / k \ln(z u_* / 0,11\nu) \quad (11)$$

que representa la variación de la velocidad del viento con la velocidad de fricción, la cual será de aplicación con vientos suaves. Por otro lado, para vientos de moderados a fuertes al sustituir la Ecuación (10) en la Ecuación (2), obtenemos:

$$U(z) = u_* / k \ln(zg / \alpha_c u_*^2) \quad (12)$$

Ambas ecuaciones se representan en la FIG. 3(b) para 10 y 30 m.

La FIG.4 muestra una representación esquematizada del procedimiento para determinar la producción energética anual de un aerogenerador en mar abierto, objeto de la presente invención.

5

La FIG.5 muestra una representación donde en su parte (a) se indica la curva de potencia y en la parte (b) la curva del coeficiente de potencia del aerogenerador comercial de 3,0 MW con el buje a 80 m, para una densidad del aire de 1,225 kg/m³. Y donde, dichas curvas se han aproximado a una función continua al obtener veinte valores igualmente repartidos entre dos valores enteros de la velocidad del viento, con el objetivo de hacer un cálculo más preciso de su producción.

10

Realización preferente de la invención

15 En las figuras adjuntas se muestra una realización preferida de la invención. Más concretamente, el procedimiento para determinar la producción energética anual de un aerogenerador en mar abierto, objeto de la presente invención, que está caracterizado porque comprende:

20 i) una primera etapa de determinación de la estabilidad atmosférica mediante el número de Richardson bulk (Ri_b), según la ecuación (8) donde, dependiendo del valor obtenido, tendremos las siguientes estimaciones de la estabilidad atmosférica:

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

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

25

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

y, donde, la temperatura potencial virtual media, $\bar{\theta}_v$, para aire insaturado, con ratio de mezcla r , viene dada por la siguiente ecuación:

$$\bar{\theta}_v = \theta (1 + 0,64 r); \quad (13)$$

tomando $r = 20 \text{ g / kg}$

30 La temperatura potencial, θ , vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\theta = T_a (P_a / P_o)^{0,286} \quad (14)$$

siendo P_a la presión del aire y P_o la presión de referencia, que se tomará como 100 kPa.

y donde, el flujo cinemático de calor se tornará cambiante durante el ciclo diario y por ello, emplearemos la expresión aproximada:

$$F_{Hs} = C_H U_{z_r} (T_s - T_a) \quad (15)$$

5 donde z_r es la cota de medida de los datos meteorológicos y C_H es el coeficiente adimensional de transferencia principal de calor sensible, cuyos valores oscilan entre 0,001 y 0,005 para condiciones neutras, se duplican o triplican para atmósfera inestable; y tiende a cero para condiciones estables. Para la aplicación se tomarán los siguientes valores:

$$C_H = 0,0327 \frac{k}{\ln(z_r/z_0)}; \text{ atmósfera neutra} \quad (16)$$

$$C_H = 0,006; \text{ atmósfera inestable}$$

10 Y para distintos rangos dentro de atmósfera estable, los valores de C_H se indican en la Tabla 1.

Atmósfera	Rango de Ri_b (-)	$F = U_{z_r} (T_s - T_a) ((m/s)K)$	C_H (-)
Ligeramente estable	$0,021 \leq Ri_b \leq 0,031$	$F \leq -30$	0,0009
		$-1,5 \geq F > -30$	0,0006
Estable	$0,031 < Ri_b \leq 2$	$F \leq -30$	0,0003
		$-1,5 \geq F > -30$	0,00001
Muy estable	$Ri_b > 2$	$F < -1,5$	0,000001

Tabla 1. Coeficiente de transferencia principal de calor sensible para atmósfera estable

15

ii) una segunda etapa de cálculo de la velocidad de fricción, u^* , mediante el método numérico de iteración del punto fijo, según los siguientes casos:

Si $U_{z_r} < 4 m/s$, se sustituyen las ecuaciones (5) y (9) en la ecuación (4), siendo la viscosidad molecular cinemática $\nu = 1,461 \cdot 10^{-5} m^2/s$.

20 Si $4 \leq U_{z_r} \leq 50 m/s$, se sustituyen las ecuaciones (5) y (10) en la ecuación (4), con la constante de Charnock para mar abierto, $\alpha_c = 0,011$.

En ambos casos, para atmósfera neutra, $z_r/L = 0$, la función $\Psi_M(z_r/L)$ es cero en la ecuación (4). En cambio, para atmósfera inestable, $z_r/L < 0$, la función $\Psi_M(z_r/L)$ se

representa por la ecuación de Paulson:

$$\Psi_{MI}(z_r/L) = -2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2\tan^{-1}(x) - \pi/2 \quad (17)$$

donde: $x = \left[1 - \left(\frac{15z_r}{L}\right)\right]^{1/4}$

5 Y para atmósfera estable, $z_r/L > 0$, la función $\Psi_{ME}(z_r/L)$ se representa por la ecuación de Businger-Dyer:

$$\Psi_{ME}(z_r/L) = \frac{4,7z_r}{L} \quad (18)$$

iii) una tercera etapa de determinación de la longitud de rugosidad aerodinámica, z_o , para cada uno de los intervalos diezminutales, según los siguientes casos:

10 Si $U_{z_r} < 4 \text{ m/s}$, se aplica la Ecuación (9).

Si $4 \leq U_{z_r} \leq 50 \text{ m/s}$, se aplica la Ecuación (10).

iv) una cuarta etapa de cálculo de la longitud de Obukhov, L, según la ecuación (5) en cada intervalo diezminutal.

15 v) Finalmente, una última etapa de modelado, conocidos u_* , z_o y L, se determinará la velocidad del viento, U_h , en la nueva altura, h, de la capa límite superficial, según la expresión general:

$$U_h = u_* / k [\ln(h/z_o) + \Psi_M(h/L)] \quad (19)$$

Para los siguientes casos:

20 - Atmósfera neutra, $h/L = 0$:

$$U_h = u_* / k \ln(h/z_o) \quad (20)$$

- Atmósfera inestable, $h/L < 0$:

La función $\Psi_{MI}(h/L)$ se representa por la ecuación empírica de Paulson:

$$25 \quad \Psi_{MI}(h/L) = -2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2\tan^{-1}(x) - \pi/2; \quad (21)$$

Sustituyendo la Ecuación (21) en la Ecuación (19), se obtiene:

$$U_h = u_* / k \left[\ln(h / z_0) - 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2 \tan^{-1}(x) - \pi / 2 \right] \quad (22)$$

donde: $x = \left[1 - \left(\frac{15h}{L} \right) \right]^{1/4}$

- Atmósfera estable, $h/L > 0$:

5 La función $\Psi_{ME}(h/L)$ se representa por la ecuación empírica de Businger-Dyer:

$$\Psi_{ME}(h/L) = \frac{4,7h}{L} \quad (23)$$

Sustituyendo la Ecuación (23) en la Ecuación (19), se obtiene:

$$U_h = u_* / k \left[\ln(h / z_0) + \frac{4,7h}{L} \right] \quad (24)$$

10 Y, de esta forma, obtendremos la velocidad del viento, U_h , a la altura del buje del aerogenerador en la CLAM, en cada intervalo diezminutal con las variaciones de la estabilidad atmosférica y de la rugosidad de la superficie del mar.

Parámetros de funcionamiento

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

$$E_{d,anual} = \sum_i T_i \dot{W}_i \quad (25)$$

siendo T_i el tiempo de ocurrencia de cada intervalo de la velocidad del viento y la potencia del viento incidente en el rotor del aerogenerador para dicha velocidad del viento. La energía
20 aprovechada a la salida del rotor de un aerogenerador durante un año, $E_{a,anual}$, está determinada por la ecuación:

$$E_{a,anual} = \sum_i C_{P,i} T_i \dot{W}_i \quad (26)$$

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,
25 $E_{u,anual}$, viene dada por la ecuación:

$$E_{u,anual} = \sum_i T_i P_i \quad (27)$$

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 en un año. Con el objeto de caracterizar el

comportamiento de un aerogenerador, se definen los siguientes parámetros de funcionamiento equivalentes:

- 5 - 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:

$$FC = \frac{E_{u,anual}}{P_n \cdot T} \quad (28)$$

- 10 - 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 un año que se obtendría durante su funcionamiento real. Está dada por la ecuación:

$$HE = \frac{E_{u,anual}}{P_n} = 8760 \cdot FC (\text{horas/año}) \quad (29)$$

- 15 Para hacer un estudio comparativo de la producción energética de un aerogenerador situado en el emplazamiento donde se extraen los datos, se obtendrán los parámetros FC y HE, en cada uno de los años de estudio. Por último, se validarán los resultados obtenidos con los datos medidos en una plataforma de investigación en mar abierto a 80 m, esto es, a la misma altura del buje del aerogenerador seleccionado.

20

REIVINDICACIONES

1.- Procedimiento para determinar la producción energética anual de un aerogenerador en mar abierto que está **caracterizado porque** comprende:

- 5 **i)** una primera etapa de determinación de la estabilidad atmosférica mediante el número de Richardson bulk (Ri_b), según la ecuación (8) donde, dependiendo del valor obtenido, tendremos las siguientes estimaciones de la estabilidad atmosférica:

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

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

10 $Ri_b > 0,02; \text{ atmósfera estable}$

y, donde, la temperatura potencial virtual media, $\bar{\theta}_v$, para aire insaturado, con ratio de mezcla r , viene dada por la siguiente ecuación:

$$\bar{\theta}_v = \theta(1 + 0,64 r); \tag{13}$$

tomando $r = 20 \text{ g / kg}$

- 15 La temperatura potencial, θ , viene determinada por la siguiente expresión:

$$\theta = T_a (P_a / P_o)^{0,286} \tag{14}$$

siendo P_a la presión del aire y P_o la presión de referencia, que se tomará como 100 kPa.

- 20 y donde, el flujo cinemático de calor se torna cambiante durante el ciclo diario y por ello, se emplea la expresión aproximada:

$$F_{Hs} = C_H U_{z_r} (T_s - T_a) \tag{15}$$

- 25 donde z_r es la cota de medida de los datos meteorológicos y C_H es el coeficiente adimensional de transferencia principal de calor sensible, cuyos valores oscilan entre 0,001 y 0,005 para condiciones neutras, se duplican o triplican para atmósfera inestable; y tiende a cero para condiciones estables; y donde, para la aplicación se toman los siguientes valores:

$$C_H = 0,0327 \frac{k}{\ln(z_r/z_o)}; \text{ atmósfera neutra} \tag{16}$$

$$C_H = 0,006; \text{ atmósfera inestable}$$

- 30 **ii)** una segunda etapa de cálculo de la velocidad de fricción, u^* , mediante el método numérico de iteración del punto fijo, según los siguientes casos:

Si $U_{z_r} < 4 \text{ m/s}$, se sustituyen las ecuaciones (5) y (9) en la ecuación (4), siendo la

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

Si $4 \leq U_{z_r} \leq 50 \text{ m/s}$, se sustituyen las ecuaciones (5) y (10) en la ecuación (4), con la

constante de Charnock para mar abierto, $\alpha_c = 0,011$;

quedando que:

- 5
- para atmósfera neutra, $z_r / L = 0$, la función $\Psi_M(z_r/L)$ es cero en la ecuación (4);
 - para atmósfera inestable, $z_r / L < 0$, la función $\Psi_{MI}(z_r/L)$ se representa por la ecuación de Paulson:

$$\Psi_{MI}(z_r/L) = -2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2 \tan^{-1}(x) - \pi/2 \quad (17)$$

donde: $x = \left[1 - \left(\frac{15z_r}{L}\right)\right]^{1/4}$

- 10
- y para atmósfera estable, $z_r / L > 0$, la función $\Psi_{ME}(z_r/L)$ se representa por la ecuación de Businger-Dyer:

$$\Psi_{ME}(z_r/L) = \frac{4,7z_r}{L} \quad (18)$$

iii) una tercera etapa de determinación de la longitud de rugosidad aerodinámica, z_0 , para cada uno de los intervalos diezminutales, según los siguientes casos:

15 Si $U_{z_r} < 4 \text{ m/s}$, se aplica la Ecuación (9).

Si $4 \leq U_{z_r} \leq 50 \text{ m/s}$, se aplica la Ecuación (10).

iv) una cuarta etapa de cálculo de la longitud de Obukhov, L, según la ecuación (5) en cada intervalo diezminutal.

20 v) y, finalmente, una quinta y última etapa de modelado, conocidos u_* , z_0 y L, donde se determina la velocidad del viento, U_h , en la nueva altura, h, de la capa límite superficial, según la expresión general:

$$U_h = u_* / k [\ln(h/z_0) + \Psi_M(h/L)] \quad (19)$$

25 2.- Procedimiento según la reivindicación 1 en donde en la quinta y última etapa, para los casos de:

- Atmósfera neutra, $h/L = 0$:

$$U_h = u_* / k \ln(h/z_0) \quad (20)$$

- Atmósfera inestable, $h/L < 0$:

la función $\Psi_{MI}(h/L)$ se representa por la ecuación empírica de Paulson:

$$\Psi_{MI}(h/L) = -2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2 \tan^{-1}(x) - \pi/2 ; \quad (21)$$

5 sustituyendo la ecuación (21) en la ecuación (19), se obtiene:

$$U_h = u_* / k \left[\ln(h/z_0) - 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2 \tan^{-1}(x) - \pi/2 \right] \quad (22)$$

donde: $x = \left[1 - \left(\frac{15h}{L} \right) \right]^{1/4}$

3.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 – 2 en donde en la quinta y
 10 última etapa, para el caso de atmósfera estable, $h/L > 0$: la función $\Psi_{ME}(h/L)$ se representa por la ecuación empírica de Businger-Dyer:

$$\Psi_{ME}(h/L) = \frac{4,7h}{L} \quad (23)$$

donde, sustituyendo la Ecuación (23) en la Ecuación (19), se obtiene:

$$U_h = u_* / k \left[\ln(h/z_0) + \frac{4,7h}{L} \right] \quad (24)$$

15

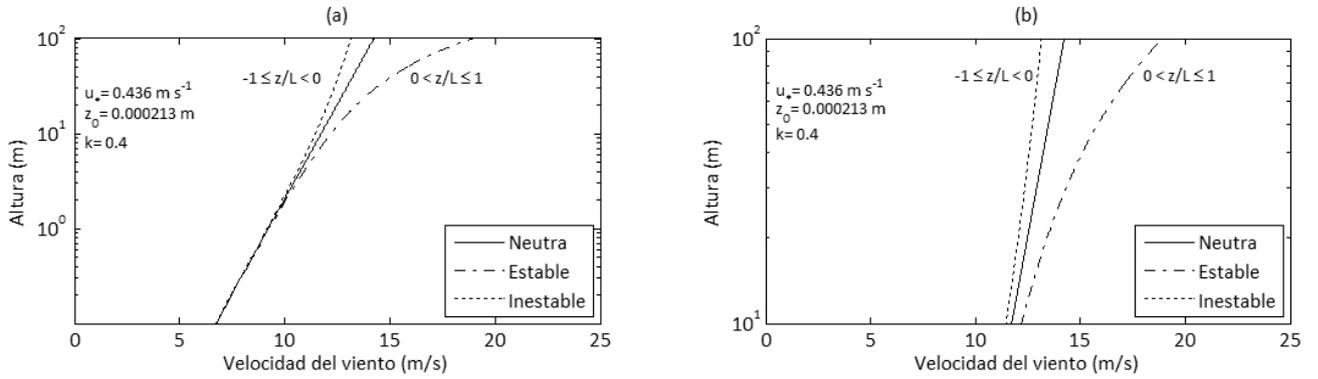


FIG.1

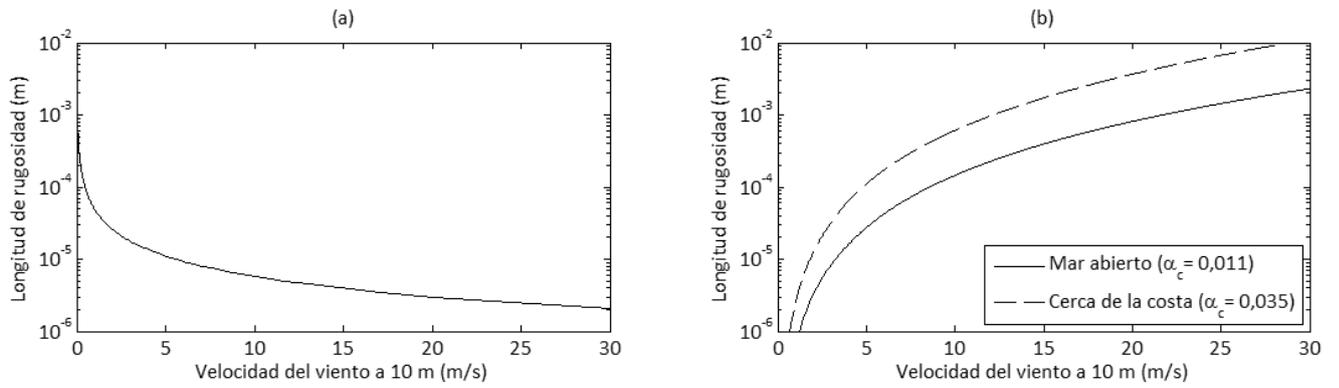


FIG.2

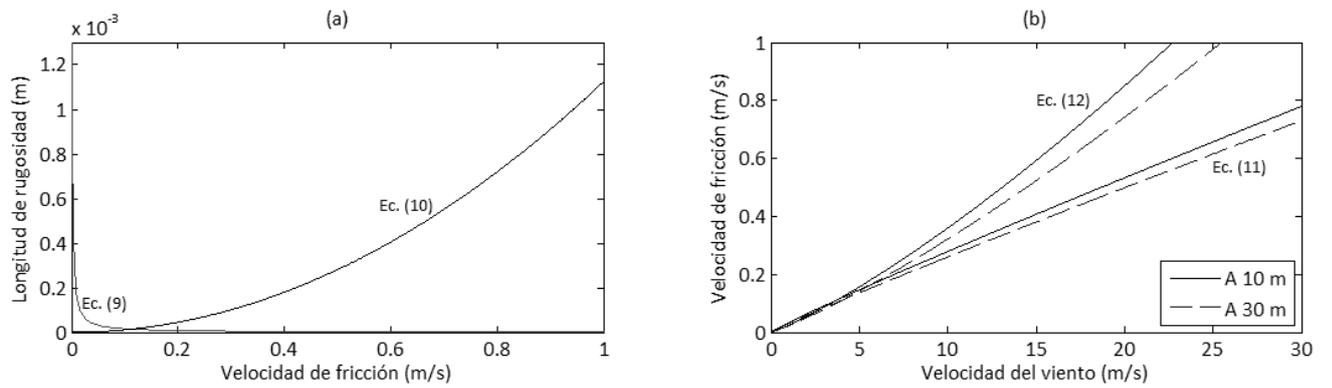


FIG.3

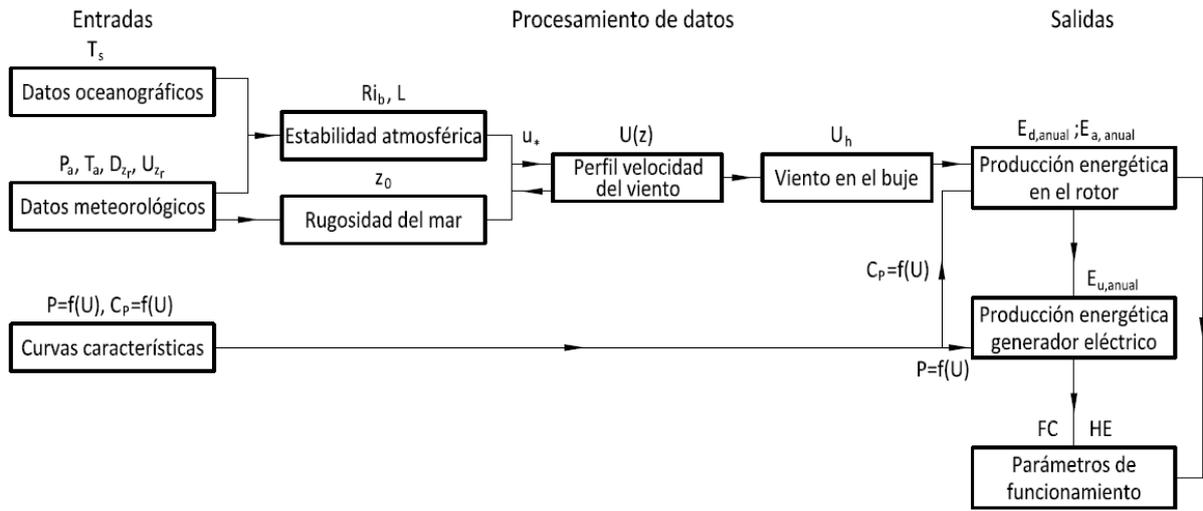


FIG.4

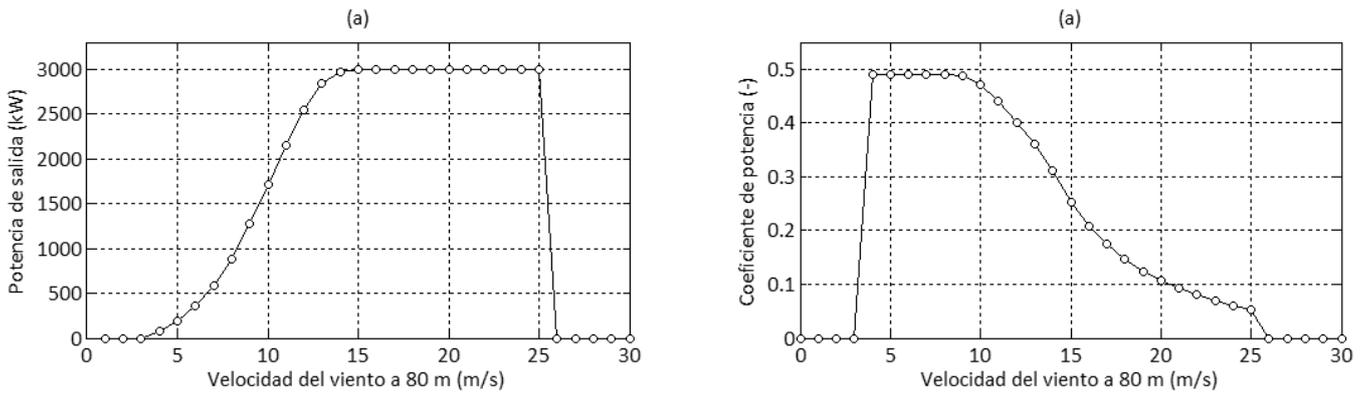


FIG.5