

05-012

Statistical wind study applied to marine emplacements

Manuel Ignacio Bahamonde García; Salvador Pérez Litrán

Universidad de Huelva;

In the field of wind power, the Weibull distribution is often used to describe wind speed, both on land and sea. However, such a distribution is not a general law, which can lead to considerable deviations in the energy calculation of wind turbines.

Therefore, the advantages of a two-parameter probability density function such as the Weibull distribution vanish when it does not represent the wind speed at a site.

The objective of this paper is to determine the distribution of Weibull under open sea conditions from the meteorological data obtained in the German research platform FINO3 and in buoys of the American National Data Bouy Center in different latitudes of the hemisphere North, and verify their adjustment with respect to the histograms of wind speeds. In this way, it will be possible to study the importance of the deviations of the energy production of the wind turbines.

Keywords: wind power; Weibull distribution; energy production; offshore wind farms

Estudio estadístico del viento aplicado a emplazamientos marinos

En el ámbito de la energía eólica la distribución de Weibull se utiliza frecuentemente para describir la velocidad del viento, tanto en emplazamientos terrestres como marinos. No obstante, dicha distribución no se trata de una ley general, por lo que puede dar lugar a desviaciones considerables en el cálculo energético de los aerogeneradores.

Por ello, las ventajas de una función de densidad de probabilidad de dos parámetros como la distribución de Weibull se desvanecen cuando no representa a la velocidad del viento en un emplazamiento.

El objetivo que se plantea en la presente comunicación es determinar la distribución de Weibull en condiciones de mar abierto a partir de los datos meteorológicos obtenidos en la plataforma de investigación alemana FINO3 y en boyas de la estadounidense National Data Bouy Center, en distintas latitudes del hemisferio Norte, y verificar su ajuste con respecto a los histogramas de las velocidades del viento. De esta forma, se podrá estudiar la importancia de las desviaciones de la producción energética de los aerogeneradores marinos en un emplazamiento y, en consecuencia, determinar la viabilidad de parques eólicos marinos.

Palabras clave: energía eólica; distribución de Weibull; producción energética; 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.



Este 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

La fase de investigación de los proyectos de parques eólicos marinos (pp.ee.mm.) comienza con un estudio de viabilidad energética, que requieren de una campaña de medidas con equipos meteorológicos a distintas alturas en el sitio de implantación.

Aún con las dificultades inherentes a las mediciones en condiciones marinas, la envergadura y el coste del proyecto así lo requieren, además el tiempo de medición debe ser lo suficientemente amplio ya que, dependiendo de las condiciones locales, la velocidad del viento puede experimentar fuertes fluctuaciones. Así, en la elaboración del Mapa Eólico Europeo, Troen & Petersen (1989) determinaron que el contenido energético anual del viento en un emplazamiento puede variar en un rango de hasta el $\pm 25\%$.

Asimismo, es habitual que la determinación del potencial eólico y la evaluación de las cargas de los aerogeneradores se realicen principalmente con promedios diezminutales de la velocidad del viento, siendo más excepcionales los promedios horarios y semihorarios (Gasch & Tewe, 2012).

La reducción del tiempo de mediciones se puede realizar cuando una distribución estadística representa de forma adecuada la velocidad del viento de la zona de estudio. Así, uno de los supuestos utilizados en el desarrollo del Método del Atlas del Viento fue que la distribución de las velocidades del viento se encontraba bien representada por la función de distribución de Weibull. Aunque investigaciones anteriores a dicho Método ya indicaron esta relación, y la experiencia general es que los datos medidos en lugares con vientos de moderados a fuertes casi siempre pueden ser aproximados por la función de Weibull (Petersen et al., 1997).

No obstante, aunque ampliamente utilizada, no hay evidencias que sea una distribución estadística de aplicación general, observándose desviaciones en condiciones marinas en la franja de vientos alisios.

En estudios más extensos, Morgan et al. (2011) utilizando series de tiempo diezminutales de la velocidad del viento en 178 estaciones de boyas oceánicas, demostraron que la distribución de Weibull proporciona un mal ajuste a la distribución de las velocidades del viento en comparación con otros modelos estadísticos.

1.1. La distribución de Weibull

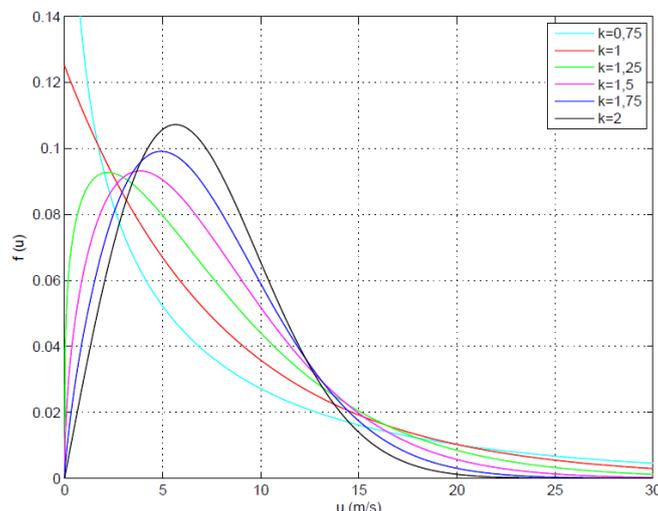
La distribución de Weibull para la variable aleatoria velocidad del viento, u , tiene una función de densidad de probabilidad que está definida por:

$$f(u; k, c) = \begin{cases} \frac{k}{c^k} u^{k-1} e^{-(u/c)^k} & u > 0; \quad k, c > 0, \\ 0 & \text{para cualquier otro valor.} \end{cases} \quad (1)$$

siendo k el parámetro de forma, adimensional, que describe la forma de la curva y c el parámetro de escala, en m/s, relacionado con la velocidad del viento característico de la serie temporal considerada.

En la figura 1 se muestran varias gráficas de la distribución de Weibull para distintos valores de k y un valor constante de c igual a 8 m/s, las cuales presentan distintos perfiles dependiendo del valor de k . Así, si $k < 1$, la distribución tiene forma de J traspuesta, si $k = 1$ la distribución de Weibull se reduce a la distribución exponencial negativa, y si $k > 1$, la función de densidad de Weibull presenta un pico único (Canavos, 1994).

Figura 1: Función de densidad de Weibull para distintos valores de k



En el ámbito de la energía eólica el valor de k se encuentra entre 1 y 4, adoptando un valor característico aproximado para distintas zonas climáticas (Gasch & Twele, 2012). Así, podemos distinguir:

- Regiones árticas: $k=1$
- Regiones del centro de Europa: $k=2$
- Regiones de vientos alisios: $k=3$ a $k=4$

Como caso particular, cuando el parámetro de forma es igual a 2 y el parámetro de escala se reemplaza por $2^{1/2} \sigma$, la función de densidad de Weibull se reduce a:

$$f(u; \sigma^2) = \frac{u}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{u^2}{2\sigma^2}\right)} \quad u > 0, \quad (2)$$

que es la función de densidad de probabilidad de Rayleigh, siendo σ^2 la varianza de la velocidad del viento.

Existen distintos métodos para el cálculo de los parámetros de Weibull, k y c , dependiendo de los datos disponibles. El método de mínimos cuadrados (MC) proporciona una alternativa robusta y computacionalmente eficiente a las técnicas actualmente en uso (Carta & Ramírez, 2007).

2. Objetivos

La viabilidad energética de pp.ee.mm. requiere de un estudio detallado del potencial eólico en la fase de investigación del proyecto.

El objetivo principal planteado en la presente comunicación es que a partir de los datos medidos de la velocidad del viento en un emplazamiento marino, mediante plataforma de

investigación y boyas en alta mar, verificar si dichas medidas siguen una distribución de probabilidad de Weibull, en tal caso la producción energética de los aerogeneradores situados en dicho emplazamiento se aproximarán al valor real de su producción. Así dicha distribución caracterizará la zona de implantación de pp.ee.mm. Si por el contrario los valores medidos se desvían de Weibull su uso puede llevar a errores en la predicción de la producción energética.

3. Metodología

Conocidos los datos meteorológicos diezminutales durante varios años de la plataforma de investigación alemana FINO3, y las boyas de medidas en alta mar 41041 y 51004 de la National Data Bouy Center (NDBC), que gestiona la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); se determinará perfil de la velocidad de viento dado por la ecuación potencial (3) de la norma IEC 61400-3 (AENOR, 2010), 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 $U(z_r)$ a una altura de referencia z_r , con el exponente, α , igual a 0,14.

$$U(z) = U(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (3)$$

A continuación se agrupan las velocidades del viento, a la altura del buje de un aerogenerador, con un ancho de clase de 1 m/s para obtener los histogramas y la distribución de Weibull.

El cálculo de los parámetros k y c se determinan por ajuste de mínimos cuadrados, ya que se dispone de las medidas de las velocidades del viento en medias diezminutales. Así pues, a partir de la distribución acumulativa de Weibull, $F(u)$, expresada por la ecuación:

$$F(u) = 1 - e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k}, \quad (5)$$

Se aplican dos veces el logaritmo neperiano y se tiene:

$$\begin{aligned} \ln(1 - F(u)) &= -\left(\frac{u}{c}\right)^k; \\ \ln[-\ln(1 - F(u))] &= k \ln u - k \ln c \end{aligned} \quad (6)$$

Y se realiza el ajuste por mínimos cuadrados a la recta: $y=mx+n$, en donde:

$$y = \ln[-\ln(1 - F(u))]; \quad x = \ln u; \quad m = k; \quad n = -k \ln c$$

Calculada la recta por mínimos cuadrados, la pendiente m proporciona el valor del parámetro de forma k , y el valor del parámetro de escala, c , se obtiene a partir de la expresión:

$$c = e^{-\left(\frac{n}{k}\right)} \quad (7)$$

Por tanto, la recta que mejor se ajusta a los N pares de medidas $(x_1, y_1); (x_2, y_2); \dots (x_N, y_N)$ viene dada por la condición:

$$\chi^2(m,n) = (mx_i + n - y_i)^2 \quad (8)$$

Haciendo:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial m} = 0;$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial n} = 0;$$

Obtenemos la pendiente de la recta, m , y la ordenada de la recta en el origen, n , según las siguientes expresiones:

$$m = \frac{NS_{xy} - S_x S_y}{NS_{xx} - S_x S_x} \quad (9)$$

$$n = \frac{S_{xx} S_y - S_x S_{xy}}{NS_{xx} - S_x S_x} \quad (10)$$

Siendo: $S_x = \sum_{i=1}^N x_i$; $S_y = \sum_{i=1}^N y_i$; $S_{xx} = \sum_{i=1}^N x_i^2$; $S_{xy} = \sum_{i=1}^N x_i y_i$;

La estimación de la incertidumbre de cada uno de los parámetros viene dada por:

$$\sigma_m^2 = \frac{N}{NS_{xx} - S_x S_x} \frac{\chi^2(m,n)}{N-2} \quad (11)$$

$$\sigma_n^2 = \frac{S_{xx}}{NS_{xx} - S_x S_x} \frac{\chi^2(m,n)}{N-2} \quad (12)$$

Asimismo, el coeficiente de correlación lineal, r , viene dado por:

$$r = \frac{NS_{xy} - S_x S_y}{\sqrt{NS_{xx} - S_x S_x} \sqrt{NS_{yy} - S_y S_y}} \quad (13)$$

Siendo: $S_{yy} = \sum_{i=1}^N y_i^2$

Una vez determinados los parámetros de forma, k , y de escala, c , la recta de regresión también se podría utilizar para conocer de forma apriorística si la distribución de probabilidad de Weibull representa la distribución del viento en el emplazamiento.

No obstante, dicha comprobación gráfica se realizará a partir de los datos representados en las tablas para representar los histogramas de las velocidades del viento y la función de Weibull. Por último, se verifica que dicha distribución estadística es representativa, para ello se aplican las frecuencias obtenidas de las velocidades del viento a la producción energética de un aerogenerador y se cuantifican sus parámetros de funcionamiento entre los que se encuentran el Factor de Carga (FC) y el número de Horas Equivalentes (HE).

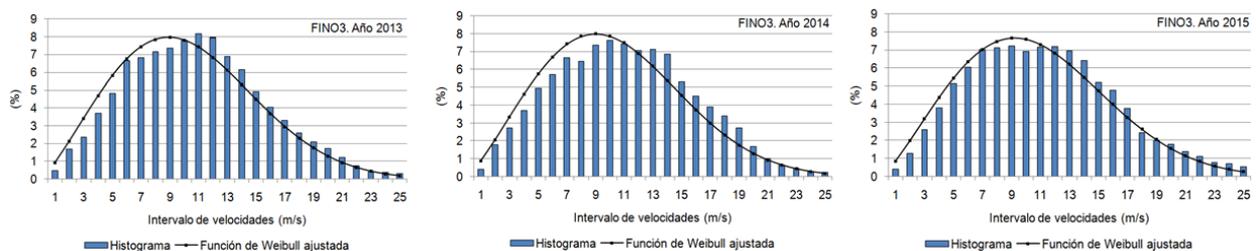
4. Resultados con datos experimentales en mar abierto

En la tabla 1 se agrupan las frecuencias de las velocidades del viento con un ancho de clase de 1 m/s y se indican los resultados de la distribución de la velocidad del viento a 80 m obtenidos con la ecuación potencial (3) a partir de los datos meteorológicos diezminutales, medidos a 30 m, en la plataforma de investigación FINO3 (55° 11,7' N, 007° 09,5' E), en el Mar del Norte, y también se indican los resultados de la distribución de Weibull. En la figura 2 se muestran las gráficas extraídas de dicha tabla para distintos años.

Tabla 1. Distribución de la velocidad del viento a 80 m en la plataforma FINO3

Vel. viento (m/s)	Año 2013			Año 2014			Año 2015		
	Frecuencia		D. Weibull ajustada k= 2,236; c= 11,629 m/s	Frecuencia		D. Weibull ajustada k= 2,257; c= 11,677 m/s	Frecuencia		D. Weibull ajustada k= 2,231; c= 12,048 m/s
	n	%	%	n	%	%	n	%	%
1	220	0,47	0,92	192	0,40	0,88	208	0,42	0,86
2	777	1,67	2,14	867	1,79	2,07	635	1,28	1,99
3	1103	2,37	3,43	1325	2,73	3,34	1279	2,57	3,20
4	1719	3,69	4,69	1799	3,71	4,60	1894	3,81	4,37
5	2238	4,81	5,82	2389	4,93	5,74	2556	5,14	5,45
6	3110	6,68	6,76	2772	5,71	6,70	3004	6,04	6,36
7	3185	6,84	7,44	3231	6,66	7,41	3490	7,02	7,05
8	3341	7,18	7,85	3124	6,44	7,85	3545	7,13	7,49
9	3440	7,39	7,97	3563	7,35	7,99	3597	7,23	7,68
10	3639	7,82	7,82	3705	7,64	7,86	3436	6,91	7,61
11	3801	8,16	7,42	3596	7,41	7,48	3554	7,14	7,32
12	3702	7,95	6,84	3416	7,04	6,91	3581	7,20	6,84
13	3217	6,91	6,12	3454	7,12	6,19	3464	6,96	6,22
14	2867	6,16	5,32	3322	6,85	5,38	3188	6,41	5,51
15	2288	4,91	4,50	2581	5,32	4,56	2596	5,22	4,75
16	1887	4,05	3,70	2180	4,49	3,75	2370	4,76	3,99
17	1531	3,29	2,97	1890	3,90	3,00	1869	3,76	3,28
18	1206	2,59	2,32	1645	3,39	2,34	1205	2,42	2,62
19	980	2,10	1,76	1313	2,71	1,77	988	1,99	2,05
20	793	1,70	1,30	810	1,67	1,31	878	1,76	1,56
21	558	1,20	0,94	481	0,99	0,94	689	1,38	1,16
22	349	0,75	0,66	310	0,64	0,66	553	1,11	0,84
23	192	0,41	0,45	220	0,45	0,45	392	0,79	0,60
24	176	0,38	0,30	137	0,28	0,30	355	0,71	0,41
25	146	0,31	0,20	110	0,23	0,19	261	0,52	0,28
26	92	0,20	0,12	72	0,15	0,12	163	0,33	0,18
	46557	100	99,77	48504	100	99,79	49750	100	99,66

Figura 2: Gráficas de la velocidad del viento a 80 m en la plataforma FINO3

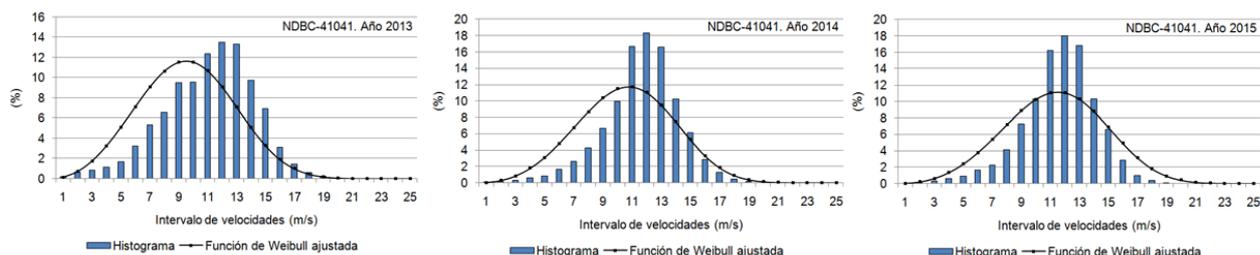


A partir de los datos meteorológicos diezminutales a 5 m sobre el nivel del mar (s.n.m.) de la Estación 41041 (14°19'43" N 46°4'55" W) en alta mar, de la National Data Bouy Center (NDBC), al Este de la Isla de Martinica, durante varios años, se ha obtenido la velocidad del viento con la ecuación potencial (3) y la distribución de Weibull a 80 m. En la tabla 2 se agrupan los resultados y en la figura 3 se representan los mismos. Como se observa la función estadística no es representativa del viento en la zona, lo que repercutiría en el cálculo de la producción energética de un aerogenerador en el emplazamiento.

Tabla 2. Distribución de la velocidad del viento a 80 m en la boya NDBC-41041

Vel. viento (m/s)	Año 2013			Año 2014			Año 2015		
	Frecuencia		D. Weibull ajustada k= 3,217; c= 10,698 m/s	Frecuencia		D. Weibull ajustada k= 3,616; c= 11,789 m/s	Frecuencia		D. Weibull ajustada k= 3,671; c= 12,579 m/s
	n	%	%	n	%	%	n	%	%
1	93	0,18	0,16	38	0,07	0,05	13	0,03	0,03
2	332	0,65	0,73	89	0,17	0,30	50	0,10	0,21
3	426	0,83	1,77	173	0,34	0,85	153	0,31	0,63
4	601	1,17	3,26	312	0,61	1,78	295	0,59	1,35
5	854	1,66	5,11	442	0,86	3,11	447	0,90	2,40
6	1675	3,26	7,14	843	1,64	4,80	807	1,63	3,78
7	2740	5,33	9,09	1360	2,65	6,74	1129	2,28	5,43
8	3387	6,58	10,66	2209	4,30	8,70	2049	4,13	7,21
9	4887	9,50	11,55	3408	6,63	10,39	3617	7,29	8,91
10	4910	9,54	11,58	5136	10,00	11,49	5143	10,37	10,28
11	6358	12,36	10,71	8543	16,63	11,75	8028	16,18	11,07
12	6929	13,47	9,13	9409	18,31	11,06	8908	17,95	11,10
13	6839	13,29	7,13	8512	16,57	9,54	8337	16,80	10,31
14	5008	9,73	5,07	5271	10,26	7,47	5132	10,34	8,83
15	3559	6,92	3,28	3161	6,15	5,28	3272	6,59	6,93
16	1605	3,12	1,91	1478	2,88	3,34	1404	2,83	4,94
17	741	1,44	0,99	643	1,25	1,87	507	1,02	3,18
18	317	0,62	0,46	228	0,44	0,92	192	0,39	1,83
19	119	0,23	0,19	77	0,15	0,39	58	0,12	0,93
20	42	0,08	0,07	17	0,03	0,14	16	0,03	0,42
21	11	0,02	0,02	13	0,03	0,04	12	0,02	0,16
22	8	0,02	0,01	6	0,01	0,01	13	0,03	0,05
23	4	0,01	0,00	3	0,01	0,00	14	0,03	0,02
24	0	0,00	0,00	3	0,01	0,00	7	0,01	0,00
25	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	10	0,02	0,00
26	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	5	0,01	0,00
	51445	100	100	51374	100	100	49618	100	100

Figura 3: Gráficas de la velocidad del viento a 80 m en la boya NDBC-41041

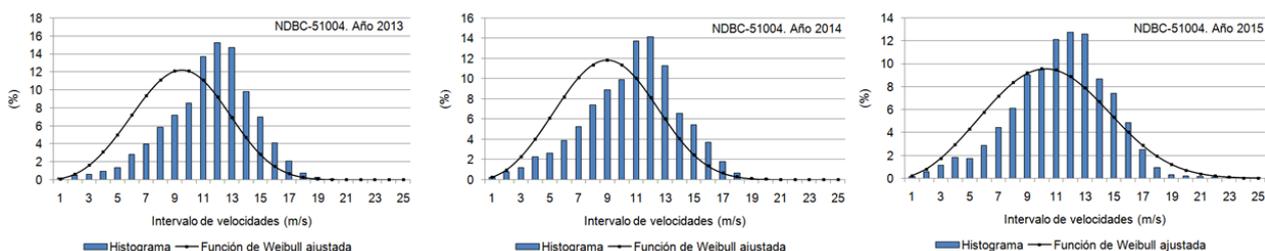


Asimismo, partir de los datos meteorológicos diezminutales a 5 m s.n.m. de la Estación 51004 (17°36'6" N 152°23'42" W) en alta mar, de la National Data Bouy Center (NDBC), al Sureste de Hawaii, durante varios años, se ha obtenido la velocidad del viento con la ecuación potencial (3) y la distribución de Weibull a 80 m. En la tabla 3 se agrupan los resultados y en la figura 4 se representan los mismos. Como se observa dicha función estadística aquí tampoco es representativa del viento en la zona, lo que daría una diferencia significativa en el cálculo de la producción energética.

Tabla 3. Distribución de la velocidad del viento a 80 m en la boya NDBC-51004

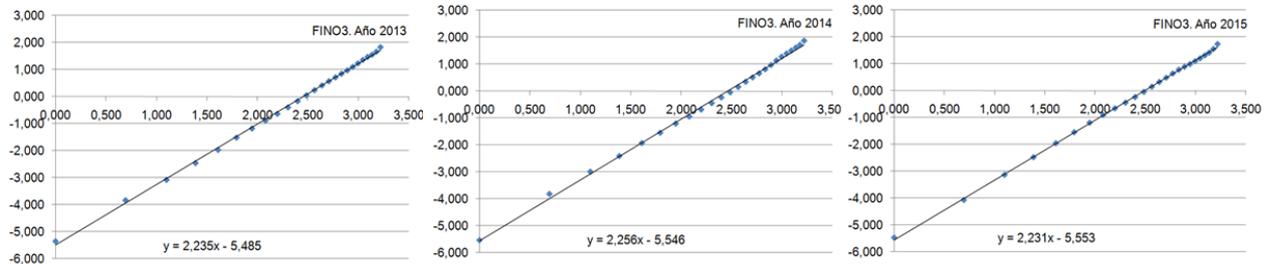
Vel. viento (m/s)	Año 2013			Año 2014			Año 2015		
	Frecuencia		D. Weibull ajustada k= 3,355; c= 10,569 m/s	Frecuencia		D. Weibull ajustada k= 3,101; c= 10,190 m/s	Frecuencia		D. Weibull ajustada k= 2,901; c= 11,896 m/s
	n	%	%	n	%	%	n	%	%
1	115	0,22	0,12	102	0,24	0,23	75	0,14	0,22
2	298	0,57	0,63	332	0,78	0,99	293	0,56	0,82
3	333	0,64	1,61	497	1,17	2,28	587	1,12	1,74
4	502	0,96	3,10	950	2,24	4,04	961	1,84	2,94
5	722	1,38	5,02	1110	2,62	6,11	894	1,71	4,33
6	1475	2,82	7,20	1652	3,90	8,24	1504	2,87	5,79
7	2081	3,98	9,36	2238	5,28	10,12	2318	4,43	7,18
8	3051	5,83	11,12	3139	7,41	11,42	3192	6,10	8,36
9	3770	7,20	12,13	3779	8,92	11,87	4731	9,04	9,19
10	4475	8,55	12,14	4190	9,89	11,39	4952	9,46	9,58
11	7189	13,73	11,12	5830	13,76	10,06	6358	12,14	9,47
12	7983	15,25	9,26	5993	14,14	8,16	6672	12,74	8,89
13	7687	14,68	6,98	4783	11,29	6,04	6583	12,57	7,92
14	5130	9,80	4,72	2796	6,60	4,07	4537	8,66	6,68
15	3671	7,01	2,84	2308	5,45	2,49	3881	7,41	5,34
16	2165	4,14	1,51	1577	3,72	1,37	2530	4,83	4,03
17	1115	2,13	0,71	757	1,79	0,67	1298	2,48	2,87
18	393	0,75	0,28	268	0,63	0,29	493	0,94	1,93
19	143	0,27	0,10	52	0,12	0,11	168	0,32	1,21
20	40	0,08	0,03	19	0,04	0,04	103	0,20	0,72
21	11	0,02	0,01	2	0,00	0,01	70	0,13	0,40
22	0	0,00	0,00	1	0,00	0,00	43	0,08	0,20
23	0	0,00	0,00	1	0,00	0,00	48	0,09	0,10
24	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	36	0,07	0,04
25	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	24	0,05	0,02
26	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	12	0,02	0,01
	52349	100	100	42376	100	100	52363	100	100

Figura 4: Gráficas de la velocidad del viento a 80 m en la boya NDBC-51004



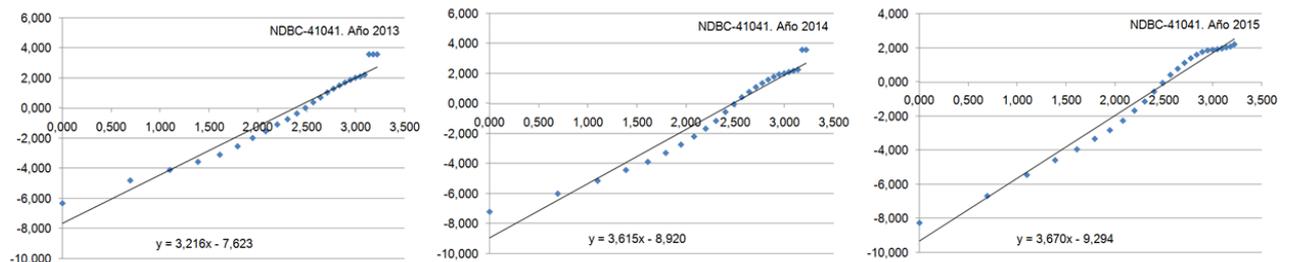
En la figura 5 se comprueba que la recta de regresión se ajusta a los datos obtenidos del viento a la cota de 80 m. Por tanto, la distribución de probabilidad de Weibull es representativa de la velocidad del viento.

Figura 5: Recta de regresión con datos de la plataforma FINO3



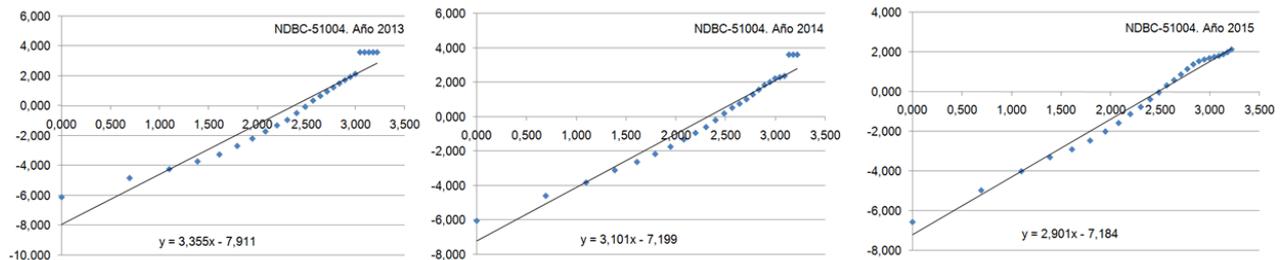
En la figura 6 se comprueba que la recta de regresión no se ajusta a los datos obtenidos del viento a la cota de 80 m. Por tanto, la distribución de probabilidad de Weibull, en general, no es representativa de la velocidad del viento en el emplazamiento.

Figura 6: Recta de regresión con datos de la boya NDBC-41041



En la figura 7 se comprueba que la recta de regresión no se ajustan a los datos obtenidos del viento a la cota de 80 m. Por tanto, la distribución de probabilidad de Weibull, en general, tampoco es representativa de la velocidad del viento en el emplazamiento.

Figura 7: Recta de regresión con datos de la boya NDBC-51004



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, siendo conocidas las curvas de potencia y del coeficiente de potencia, proporcionadas por el fabricante.

En la tabla 4 se indican los parámetros de funcionamiento equivalentes FC y HE en la plataforma FINO3, para la velocidad del viento a la altura del buje obtenidas con la ecuación potencia y la distribución de Weibull y con los datos experimentales medidos a la altura del buje, para varios años.

La mayor variación de la distribución de Weibull con respecto a los datos medidos no supera el 5%. Asimismo, la ecuación potencial sobreestima la velocidad del viento en el

emplazamiento y su mayor variación con respecto a la distribución de Weibull no supera el 6%. Por tanto, se puede afirmar que dicha distribución es representativa de la velocidad del viento en el emplazamiento.

Tabla 4. Comparación de los parámetros de funcionamiento en la plataforma FINO3

FINO3	Año 2013		Año 2014		Año 2015	
	Eficacia: 89,0%		Eficacia: 92,4%		Eficacia: 95,1%	
Parámetros	FC	HE	FC	HE	FC	HE
Vel. viento a 80 m	(-)	(h/a)	(-)	(h/a)	(-)	(h/a)
Ecuación potencial, con $\alpha = 0,14$	0,490	4.296	0,526	4.607	0,536	4.693
Distribución de Weibull	0,478	4.191	0,502	4.401	0,531	4.650
Datos medidos	0,466	4.079	0,492	4.312	0,502	4.398

En la tabla 5 se indican los parámetros de funcionamiento del aerogenerador en la boya NDBC-41041, para la velocidad del viento a la altura del buje obtenidas con la ecuación potencia y la distribución de Weibull, durante varios años.

La mayor variación de la distribución de Weibull con respecto a los datos de la ecuación potencial se produce en el año 2013 con una diferencia del 18% y le sigue el año 2014 con una diferencia del 11%. Luego, para dicho emplazamiento la distribución de Weibull no representa de forma adecuada la distribución del viento, ya que daría errores apreciables en la estimación de la producción energética.

Tabla 5. Comparación de los parámetros de funcionamiento en la boya NDBC-41041

NDBC-41041	Año 2013		Año 2014		Año 2015	
	Eficacia: 97,9%		Eficacia: 97,8%		Eficacia: 94,4%	
Parámetros	FC	HE	FC	HE	FC	HE
Vel. viento a 80 m	(-)	(h/a)	(-)	(h/a)	(-)	(h/a)
Ecuación potencial, con $\alpha = 0,14$	0,617	5.408	0,680	5.959	0,659	5.771
Distribución de Weibull	0,506	4.435	0,604	5.291	0,639	5.598

En la tabla 6 se indican los parámetros de funcionamiento equivalentes del aerogenerador V90-3,0MW en la boya NDBC-51004, para la velocidad del viento a la altura del buje obtenidas con la ecuación potencia y la distribución de Weibull, durante varios años.

La mayor variación de la distribución de Weibull con respecto a los datos de la ecuación potencial se produce en el año 2013 con una diferencia del 24% y le sigue el año 2014 con una diferencia del 20%. Así pues, con dichas diferencias se puede afirmar que en dicho emplazamiento la distribución de Weibull no es representativa.

Tabla 6. Comparación de los parámetros de funcionamiento en la boya NDBC-51004

NDBC-51004	Año 2013		Año 2014		Año 2015	
	Eficacia: 99,6%		Eficacia: 80,6%		Eficacia: 99,6%	
Parámetros	FC	HE	FC	HE	FC	HE
Vel. viento a 80 m	(-)	(h/a)	(-)	(h/a)	(-)	(h/a)
Ecuación potencial, con $\alpha = 0,14$	0,666	5.833	0,477	4.183	0,641	5.615
Distribución de Weibull	0,508	4.446	0,380	3.330	0,593	5.193

5. Conclusiones

Se ha presentado un método para comprobar si una distribución de probabilidad de Weibull es representativa de la velocidad del viento en un emplazamiento marino. En caso afirmativo se reduciría la campaña de mediciones en alta mar para una extensa área geográfica antes de las implantaciones de pp.ee.mm. En caso negativo habría que buscar otras funciones estadísticas que se ajustarán a la distribución de la velocidad del viento, o bien hacer una campaña completa de mediciones; todo ello para asegurar que el estudio de viabilidad energética se ciñe a la realidad.

Los resultados se han obtenido a partir de los datos medidos en alta mar y se han presentado de forma tabular y gráfica, para comprobar si existe ajuste de la distribución de Weibull en el emplazamiento citado.

Los parámetros estadísticos de Weibull se determinaron por MC, dicho método también permite comprobar si la recta de regresión se ajusta o no a los datos experimentales obtenidos a la altura del buje del aerogenerador seleccionado, antes de los cálculos energéticos.

Y en la última parte se realiza la comparación de los parámetros de funcionamiento del aerogenerador Vestas V90-3,0 MW con el fin de cuantificar las desviaciones.

Aunque habría que hacer un estudio más general, la distribución de Weibull tiene un comportamiento distinto según la latitud del hemisferio Norte considerada, así en la región de vientos alisios no parece ser representativa como lo demuestran las mediciones en las boyas NDBC-41041 y NDBC-51004.

6. Referencias

- AENOR (2010). Aerogeneradores. Parte 3: Requisitos de diseño para aerogeneradores marinos. UNE-EN 61400-3. Madrid.
- Canavos, G.C. (1994). Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos. Ed. McGraw-Hill. Madrid.
- Carta, J.A. & Ramírez, P. (2007). Analysis of two-component mixture Weibull statistics for estimation of wind speed distributions. *Renewable Energy*, 32, 518-531.
- FINO database. http://www.bsh.de/en/Marine_data/Projects/FINO/index.jsp [15-01-2017].
- Gasch, R. & Twele, J. (2012). Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation. 2ª edición. Berlín: Springer.
- 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.
- Morgan, E.C., Lackner, M., Vogel, R.M., et al. (2011). Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management*, 52, 15-26.
- NDBC. National Data Bouy Center. NOAA. <http://www.ndbc.noaa.gov/obs.shtml> [20-01-2017].
- 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.
- Troen I. & Petersen, E.L. (1989). European Wind Atlas. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.