

Evaluación del recurso eólico marino en la isla de Lanzarote, España

Offshore wind resource assessment on the island of Lanzarote, Spain

Dr. Ángel Guillemes Peira

Facultad del Mar y Medio Ambiente. Universidad Del Pacífico. Vía a la costa
km 7 ½, Guayaquil, Ecuador.

angel.guillemes@upacifico.edu.ec

Resumen. En el presente artículo se realiza un estudio del recurso eólico marino existente en la isla de Lanzarote (España). Para llevar a cabo el mismo, se han empleado los datos obtenidos a partir de la información de la red WANA, la cual se compone de un conjunto de nodos de las mallas de cálculo del modelo de generación de oleaje WAM, que ha sido forzado por campos de viento generados por el modelo meteorológico HIRLAM. Se han tenido en cuenta nueve nodos WANA que envuelven a toda la isla, cuyo volumen de datos se considera suficiente para evaluar el potencial eólico de la zona de estudio. La valoración final ha sido realizada en base a la media calculada de los valores obtenidos, principalmente, el parámetro de horas equivalentes, aunque también se han tenido en cuenta las velocidades medias, el rendimiento medio horario y la altura significativa del oleaje.

Palabras Claves: recurso eólico, WANA, modelo meteorológico, Lanzarote, horas equivalentes.

Abstract. This article is a study of the existing offshore wind resource on the island of Lanzarote (Spain). To carry out this task, it has been used the data obtained from the network information WANA, which consists of a set of nodes of mesh model calculating WAM wave generation, which was forced by wind fields generated by the meteorological model HIRLAM. It was taken into account WANA nine nodes that surround the island, where the volume of data is considered sufficient to assess the wind potential of the study area. The final assessment was made based on the calculated average of the values obtained mainly equivalent hours parameter, but also took into account the average speed, the average performance schedule and significant wave height.

Key words: wind resource, WANA, meteorological model, Lanzarote, equivalent hours.

1 Introducción

El empleo de combustibles fósiles como fuente de obtención de energía, ha sido el motor del desarrollo industrial desde el siglo XIX y durante el siglo XX, pero las circunstancias climáticas que se dan en el planeta hacen que el siglo XXI presente diversas razones que nos llevan a la conclusión de que es necesario replantear esta política energética, ya que la sostenibilidad del medio ambiente, la agotabilidad de los recursos naturales utilizados y el aumento de la temperatura, hacen inviable su prolongación en el tiempo. El impacto medioambiental que provoca la producción y consumo de energía obtenida a través de la utilización de combustibles fósiles cuya energía es extraída por combustión, genera, aparte de los gases típicos de la combustión del petróleo (CO_2 , NO_x , SO_2) [11], y siempre en función de la temperatura, diversas cantidades de dioxinas, furanos y compuestos clorados contenidos en las emisiones gaseosas [7], que junto a los residuos sólidos de rechazo, producen un terrible deterioro de nuestro hábitat.

Ante esta posibilidad real de agotamiento de los recursos existentes a medio y largo plazo y como consecuencia de la dependencia de países inestables política, social y económicamente y de un progresivo deterioro de nuestro medio ambiente, es necesario adoptar medidas que permitan la utilización de fuentes de energías limpias, estables y perennes.

Todo modelo de desarrollo energético sostenible ha de basarse en el fomento del ahorro y la eficiencia energética, la cogeneración y el uso generalizado de las energías renovables. La eficiencia energética se traduce en la cantidad de bienes y servicios obtenidos a partir de una determinada cantidad de energía. Su mejora está asociada al aumento del valor añadido y a la reducción del impacto ambiental. Esto debe producirse en cada una de las cuatro fases del ciclo energético: aprovisionamiento, transformación, transporte y consumo.

Lanzarote es la isla más septentrional del archipiélago de Canarias (España), está situada entre los paralelos $29^\circ 25'$ y $18^\circ 50'$ de latitud norte y entre los meridianos $13^\circ 20'$ y $14^\circ 57'$ de longitud oeste, ocupando una superficie total de 862 km^2 [1].

En relación con el recurso eólico, Lanzarote, al igual que las restantes islas orientales del archipiélago, se caracteriza por ser una isla ventosa, con vientos regulares y constantes a lo largo del año, con picos de viento en los meses de verano. La dirección predominante del viento es noreste, con frecuentes invasiones de aire subsahariano cargado de polvo en suspensión, fenómeno conocido en las islas como “calima” o “siroco” [4].

El presente artículo constituye la descripción del recurso eólico en el litoral de la isla de Lanzarote, espacio físico sobre el que se evalúa el mismo con el objetivo de

identificar y valorar las zonas más viables sobre las que se pueda aprovechar el recurso eólico.

2 Metodología

Los datos utilizados para realizar el estudio que se presenta en este artículo, han sido obtenidos a partir de la información procedente de la Red WANA, perteneciente al Organismo Público Puertos del Estado del Ministerio de Fomento de España [5]. Esta red está constituida por un conjunto completo de nodos de las mallas de cálculo del modelo de generación de oleaje WAM [6], forzado por campos de viento generados por el modelo meteorológico HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*) [17], desde el 2000 hasta 2010.

El conjunto de datos WANA está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje, procedentes del modelado numérico. Son, por lo tanto, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza. Las series WANA proceden del sistema de predicción del estado de la mar. No obstante, los datos WANA no son datos de predicción sino datos de diagnóstico o análisis [5]. Esto supone que para cada instante, el modelo proporciona campos de viento y presión consistentes con la evolución anterior de los parámetros modelados y con las observaciones realizadas.

Las series de viento y oleaje del conjunto WANA no son homogéneas, pues el modelo de vientos se modifica de modo periódico. El modelo numérico utilizado para generar los campos de vientos es el HIRLAM. Se trata de un modelo atmosférico mesoscalar e hidrostático cuya resolución es de 0,5 grados en el océano Atlántico y 0,2 grados en el mar Mediterráneo. Dicho modelo incluye asimilación de datos instrumentales [3]. Los datos de viento facilitados son promedios horarios a 10 m de altura sobre el nivel del mar [5].

Debido a la resolución con la que se ha integrado el modelo de atmósfera, los datos de viento no reproducen ni efectos orográficos de escala inferior a 15 km, ni procesos con escala temporal inferior a 6 horas [12]. No obstante, el modelo reproduce correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía. Por otro lado, de modo general, será más fiable la reproducción de situaciones con vientos procedentes del mar [13].

En definitiva, el conjunto de datos WANA proporciona descripciones del clima de viento y oleaje, que en general, son adecuadas en todo el entorno litoral español.

2.1 Conjunto de datos utilizados

Con el objetivo de evaluar el potencial eólico del litoral de la isla de Lanzarote, se han tenido en cuenta los datos aportados por los nodos WANA que se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 1: Localización de los nodos WANA, (coordenadas en decimales). [5]

Nodo	Localización	
	Longitud	Latitud
1024016	-14.000	29.000
1025015	-13.750	28.750
1026015	-13.500	28.750
1027016	-13.250	29.000
1025017	-13.750	29.250
1025018	-13.750	29.500
1026018	-13.500	29.500
1027017	-13.250	29.250
1027018	-13.250	29.500

La siguiente figura ilustra la ubicación espacial de los nodos, relacionados en la tabla anterior en el área marina objeto de estudio.

2.2 Evaluación del potencial eólico

El régimen medio direccional de velocidad del viento es el factor crítico que permite evaluar el recurso eólico de un determinado emplazamiento. A partir del régimen medio direccional, es posible efectuar un análisis de persistencias que, aplicado a un tipo concreto de aerogenerador permite realizar la evaluación del potencial eólico [19].

Para el presente estudio se ha tenido en cuenta el aerogenerador Siemens 3.6 MW B52, diseñado para funcionamiento offshore, de potencia nominal 3,6 MW, con una velocidad de arranque de 3 ms^{-1} , de corte en 25 ms^{-1} y con la curva de potencia representada en la Figura 2.

Para realizar la evaluación del potencial eólico existente en la zona, se ha procedido a elevar, a una altura de 100 m sobre el nivel de mar, las velocidades medias tri-horarias obtenidas para cada nodo WANA, mediante un perfil logarítmico de viento del tipo [12]:

$$u_z = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right) - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right], \quad (\text{ec. 1})$$

siendo u_z la velocidad media a la altura z , u^* la velocidad de fricción, k la constante de Von Karman, z_0 el parámetro de rugosidad y L la longitud de Monin-Obukhov.

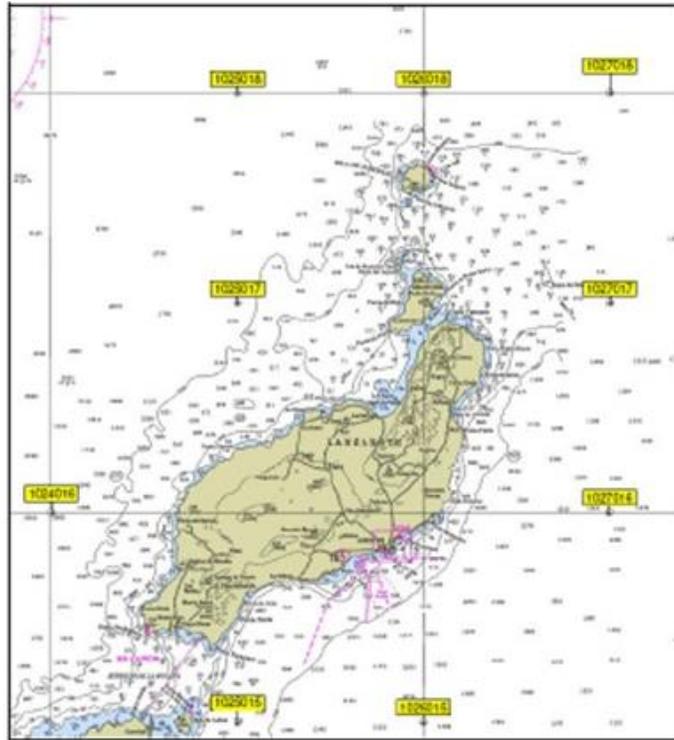


Figura 1: Localización de los nodos WANA estudiados [16].

Curva de potencia Siemens 3.6

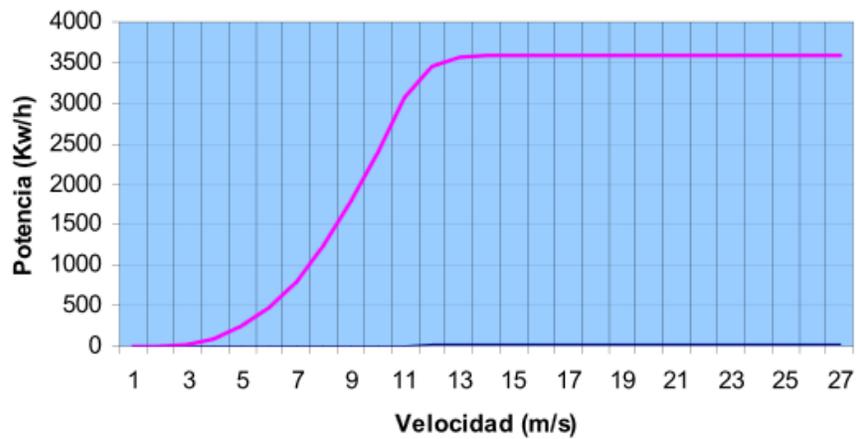


Figura 2: Curva de potencia del aerogenerador Siemens 3,6 MW.

La expresión $\Psi_m(z/L)$ introduce en el perfil las turbulencias de origen térmico; en el caso estudiado, se ha elegido un perfil de viento con estratificación neutra, una rugosidad $z_0 = 0,0001$ m, correspondiente a un mar en calma tipo 2, y un valor $k = 0,4$.

Si se representan los datos en forma de histograma no acumulado, el régimen medio vendría definido por aquella banda de datos en la que contiene la masa de probabilidad que hay en torno al máximo del histograma.

El régimen medio se describe, habitualmente, mediante una distribución teórica que ajusta dicha zona media o central del histograma. Es decir, no todos los datos participan en el proceso de estimación de los parámetros de la distribución teórica, sino que solo lo hacen aquellos datos cuyos valores se sitúan en la zona media del histograma.

Para describir el régimen medio de las series de viento se ha elegido la distribución Weibull triparamétrica, cuya expresión es la siguiente [6]:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^{\gamma}\right] \quad (\text{ec. 2})$$

donde el parámetro α es conocido como parámetro de centrado y su valor debe ser menor que el menor de los valores ajustados, β es el parámetro de escala (que ha de ser mayor que 0) y, por último, γ es el parámetro de forma y suele oscilar entre 0,5 y 3,5.

El régimen medio está directamente relacionado con lo que se denominan condiciones medias de operatividad; es decir, caracteriza el comportamiento probabilístico del régimen deviento en el que, por término medio, se va a desarrollar una determinada actividad.

Ajustar los datos a una distribución teórica, permite obtener una expresión compacta que suaviza e interpola la información proporcionada por los registros de viento.

2.3 Influencia del oleaje y de la estabilidad atmosférica

Por otro lado, se ha estudiado la influencia de los parámetros más representativos del perfil logarítmico diabático, z_0 usualmente parametrizado en el mar como una función del oleaje [9].

$$z_0 = a \left(\frac{u_*^2}{g}\right) \quad (\text{ec. 3})$$

siendo “ a ” la constante de Charnock, que integra en la expresión la altura significativa del oleaje, con un valor de $a = 0,015$ para un mar completamente desarrollado, se ha fijado en dos valores: la rugosidad elegida para el perfil aplicado, $z_0 = 0,0001$, y otro valor de z_0 característico de oleajes de viento en zonas costeras

$\alpha_0 = 0,001$; se han considerado también las categorías de estabilidad atmosférica (D: neutra, F: estable, B: inestable) mediante las expresiones de Businger-Dyer [18, 14].

La valoración se realizará en base a la media calculada de los valores obtenidos, para el parámetro horas equivalentes y según los criterios que se exponen a continuación.

Tabla 2: Valoración según las horas equivalentes.

Valoración	Horas Equivalentes
Inviabile	< 2750
Medio Bajo	2750 < valor < 3000
Viabile	3000 < valor < 3500
Muy Bueno	> 3500

Las horas equivalentes indican el número de horas que el aerogenerador tendría que funcionar a plena carga (potencia nominal), para generar la cantidad de energía vertida a la red [15].

3 Resultados

En la Tabla 3 se presentan algunos datos resultantes de las simulaciones realizadas, el mayor incremento de la velocidad del viento (normalizada a 1) corresponde a situaciones de estabilidad ($L = 5,5$ m) [18], con valores alejados de lo aceptable en el mar; las situaciones de atmósfera estable (la más probable), con un incremento en el perfil de un 25% en la velocidad al ascender de 10 a 100 m de altura, y de un 3% en el caso de inestabilidad, siempre considerando $\alpha_0 = 0,001$, se encuentran dentro de lo asumible.

Tabla 3: Influencia de la rugosidad del mar y de la estabilidad atmosférica.

um	zm	zh	z0	k	stab.	B-D	x	u*	uzh
1	10	100	0,001	0,35	D	0,000		0,038	1,250
1	10	100	0,0001	0,35	D	0,000		0,030	1,200
1	10	80	0,001	0,35	D	0,000		0,038	1,226
1	10	80	0,0001	0,35	D	0,000		0,030	1,181
1	10	100	0,001	0,35	F	84,600		0,038	10,435
1	10	100	0,0001	0,35	F	84,600		0,030	8,548
1	10	80	0,001	0,35	F	67,680		0,038	8,574
1	10	80	0,0001	0,35	F	67,680		0,030	7,056

1	10	100	0,001	0,35	B	-2,026	2,95	0,038	1,030
1	10	100	0,0001	0,35	B	-2,026	2,95	0,030	1,024
1	10	80	0,001	0,35	B	-1,880	2,8	0,038	1,022
1	10	80	0,0001	0,35	B	-1,880	2,8	0,030	1,017

Los resultados obtenidos para cada uno de los nodos WANA que han sido estudiados se presentan a continuación.

Tabla 4: Resultados obtenidos para cada nodo WANA analizado.

Nodo	Horas Equivalentes	Velocidad Media (ms ⁻¹)	Rendimiento medio horario (kWh)
1024016	3.110,90	7,43	1.354,20
1025015	3.101,70	7,44	1.351,40
1026015	3.246,40	7,62	1.414,70
1027016	3.447,20	7,83	1.502,00
1025017	3.296,70	7,65	1.434,80
1025018	3.443,70	7,82	1.497,90
1026018	3.483,40	7,85	1.515,70
1027017	3.535,40	7,92	1.540,00
1027018	3.639,00	8,03	1.584,40

Las medias aritméticas de los parámetros relacionados en la tabla anterior son las siguientes:

- Media de Hora Equivalente: 3.367,15 horas
- Media de Velocidades: 7,732 ms⁻¹
- Media de Rendimientos: 1.466,12 kWh

A la vista de los resultados obtenidos, se aprecia que hay ciertas diferencias entre las medias aritméticas de los parámetros calculados para la zona Suroeste (SO) de la isla y los calculados para la zona Nordeste (NE) de la misma.

A continuación se presentan las medias aritméticas de los parámetros calculados en la tabla 4 para cada una de estas dos zonas.

Zona Suroeste (SO)

- Media de hora equivalente: 3.188,78 horas
- Media de Velocidades: 7,5 ms⁻¹
- Media de Rendimientos: 1.388,78 kWh

Zona Nordeste (NE)

- Media de hora equivalente: 3.509,74 h
- Media de Velocidades: 7,9 ms⁻¹
- Media de Rendimientos: 1.528 kWh

En la tabla 5 se exponen los resultados obtenidos con respecto a la altura significativa y a la excedencia de oleaje (2, 4 y 6 m) en porcentaje.

Tabla 5: Altura significativa y excedencia de oleaje (2, 4 y 6 m) para cada nodo WANA analizado.

Nodo	Altura Significativa (m)	Excedencia oleaje 2 m (%)	Excedencia oleaje 4 m (%)	Excedencia oleaje 6 m (%)
1024016	2,56	38,08	3,21	0,24
1025015	2,63	0,65	0,00	0,00
1026015	2,83	1,82	0,00	0,00
1027016	3,04	21,77	0,62	0,00
1025017	2,67	39,94	3,51	0,24
1025018	2,91	46,90	4,51	0,30
1026018	2,99	46,96	4,52	0,30
1027017	3,03	30,56	1,42	0,02
1027018	3,13	47,66	4,68	0,32

3.1 Velocidades medias

Como se ha comentado anteriormente, el perfil elegido para elevar la velocidad del viento de los 10 m de altura de salida del modelo HIRLAM, a los 100 m estimados de altura del buje del aerogenerador, es un perfil logarítmico con estratificación neutra y una rugosidad $z_0 = 0,0001$ m, correspondiente a un mar en calma. El valor de k se ha fijado en 0,4.

A partir de los registros tri-horarios de viento de cada nodo WANA, se obtiene la serie temporal de los registros correspondiente a una altura de 100 m, a los que se les aplica un modelo probabilístico para obtener su régimen medio. Este se puede definir como el conjunto de “estados de viento” que más probablemente se pueden encontrar.

Como ya se dijo en la metodología, la distribución elegida para describir el régimen medio de las series de viento ha sido la distribución de Weibull triparamétrica.

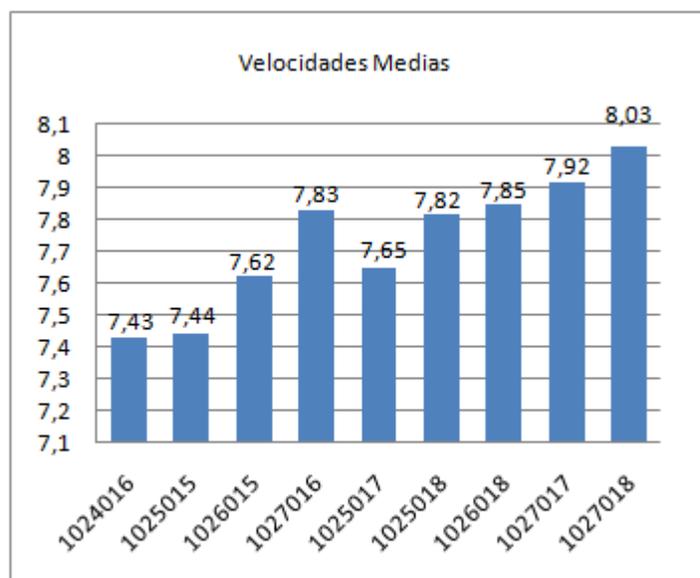


Figura 3: Gráfico de velocidad media (en ms⁻¹).

3.2 Rendimiento medio horario

Se define como rendimiento medio horario la energía eléctrica producida de media cada hora, según la curva de potencia del aerogenerador Siemens 3,6 MW.

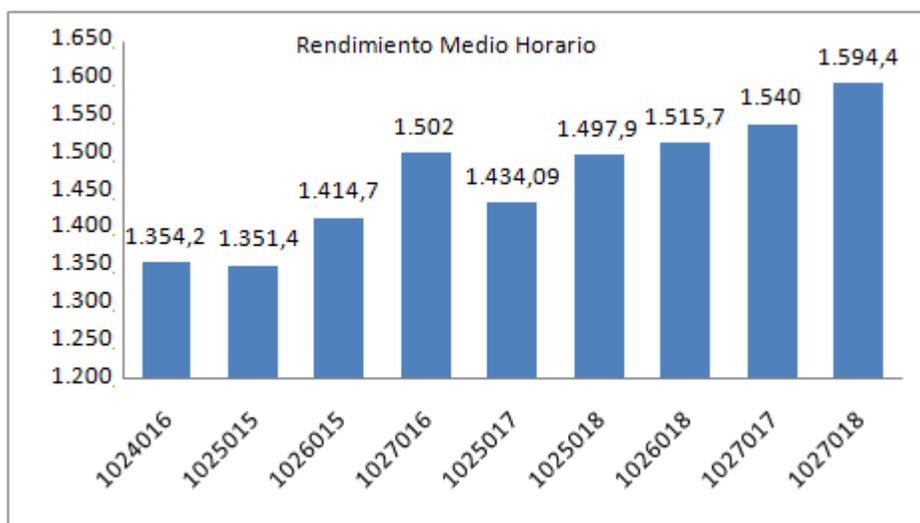


Figura 4: Gráfico del rendimiento medio horario (en kWh).

3.3 Horas equivalentes

A partir de la curva de potencia del aerogenerador Siemens 3,6 MW, se han calculado, para cada nodo WANA, el número de horas que tendría que haber estado funcionando el aerogenerador a potencia nominal para producir la cantidad de energía estimada en un año.

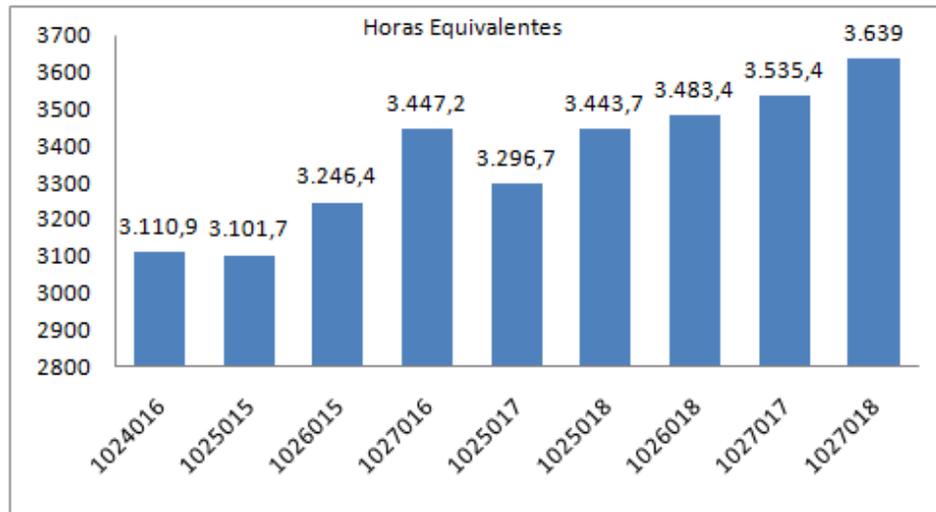


Figura 5: Gráfico de las horas equivalentes.

3.4 Excedencias sobre 3 ms⁻¹ de velocidad

Se presenta a continuación, para cada nodo WANA considerado, el tanto por ciento del tiempo en el que el viento circula a velocidades superiores a la velocidad de corte del aerogenerador Siemens 3,6 MW.

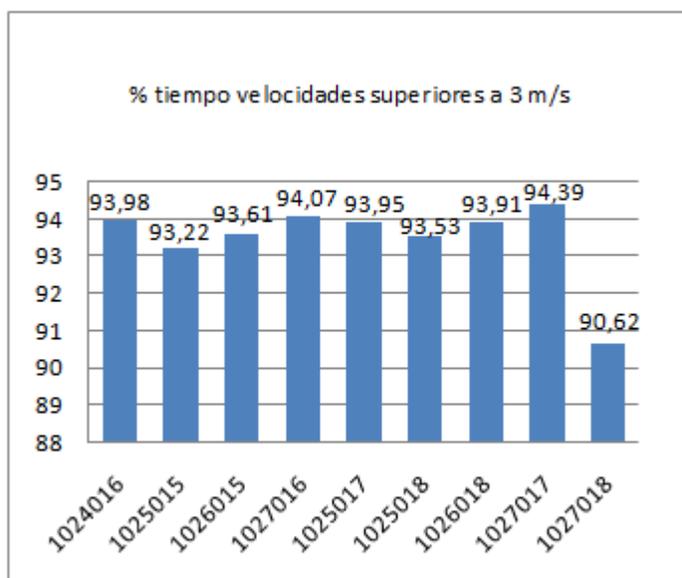


Figura 6: Gráfico del porcentaje de tiempo sobre 3 ms⁻¹.

3.5 Excedencias sobre 9 ms⁻¹ de velocidad

Se presenta a continuación, en tanto por ciento para cada nodo WANA analizado, el tiempo que se mantiene el viento circulando por encima de los 9 ms⁻¹.

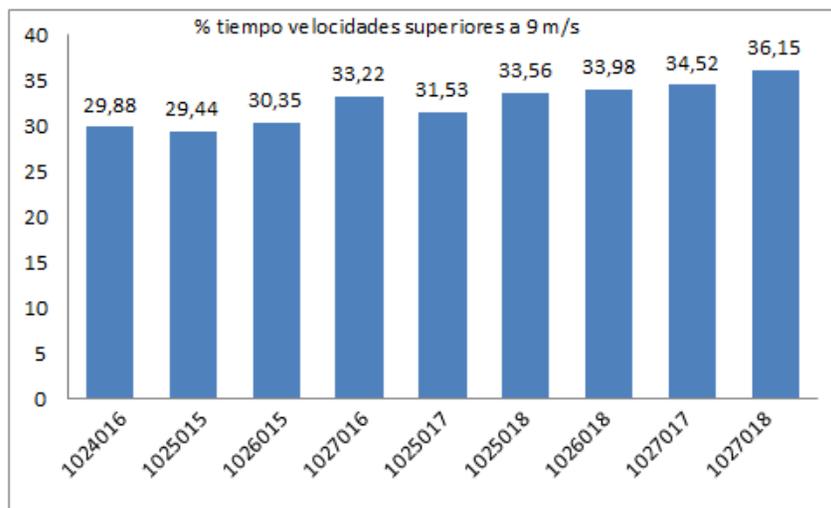


Figura 7: Gráfico del porcentaje de tiempo sobre 9 ms⁻¹.

3.6 Altura significativa del oleaje

En el caso del oleaje, el parámetro estudiado es la Altura Significante (H_s). Este parámetro es un indicador usual del grado de severidad del oleaje, se define como la media del tercio de la altura de las mayores olas que durante un periodo de 30 minutos se propagan a través de una cierta zona.

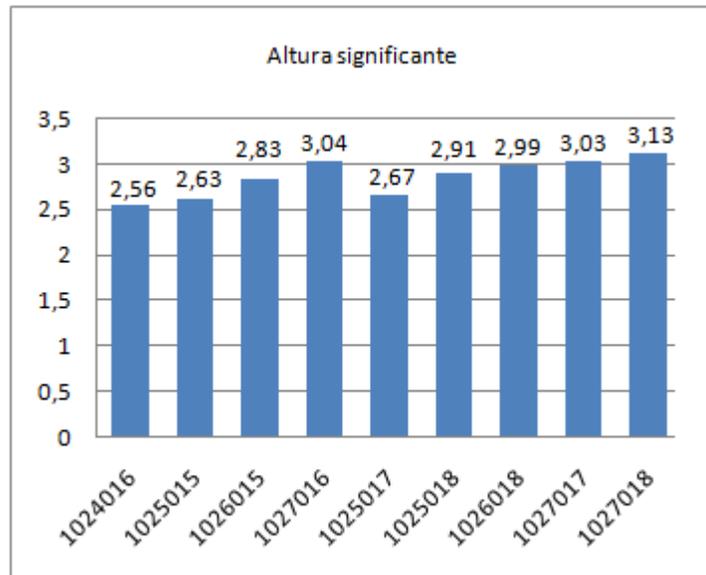


Figura 8: Gráfico de la altura significativa (m).

3.7 Excedencias del oleaje sobre 2 m

La excedencia del oleaje sobre 2 m representa, en tanto por ciento, el tiempo en el que el oleaje se sitúa por encima de los 2 m de altura.

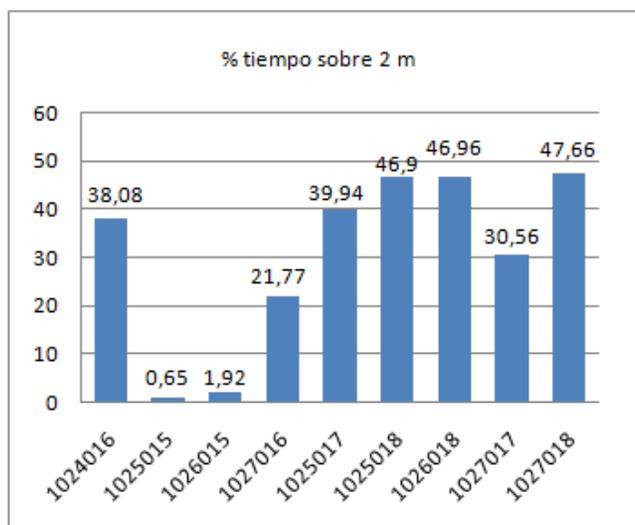


Figura 9. Gráfico del porcentaje de tiempo sobre 2 m.

3.8 Excedencias del oleaje sobre 4 m

La excedencia del oleaje sobre 4 m representa, en tanto por ciento, el tiempo en que el oleaje se sitúa por encima de los 4 m de altura.

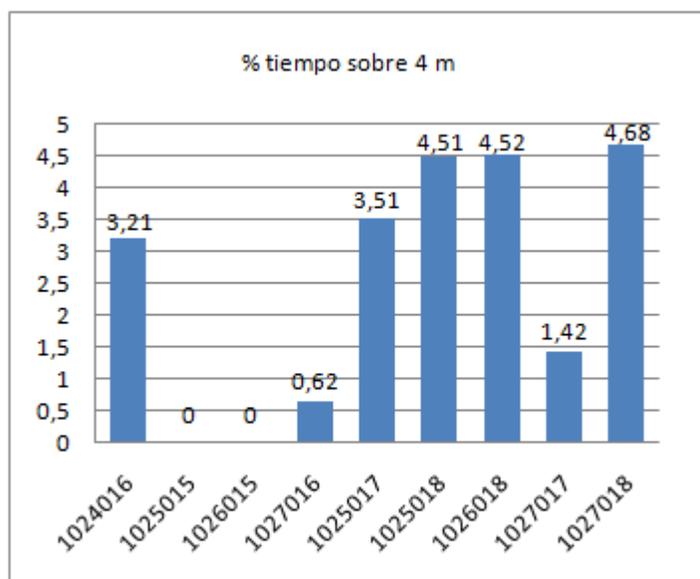


Figura 10. Gráfico del porcentaje de tiempo sobre 4 m.

3.9 Excedencias del oleaje sobre 6 m

La excedencia del oleaje sobre 6 m representa, en tanto por ciento, el tiempo en que el oleaje se sitúa por encima de los 6 m de altura.

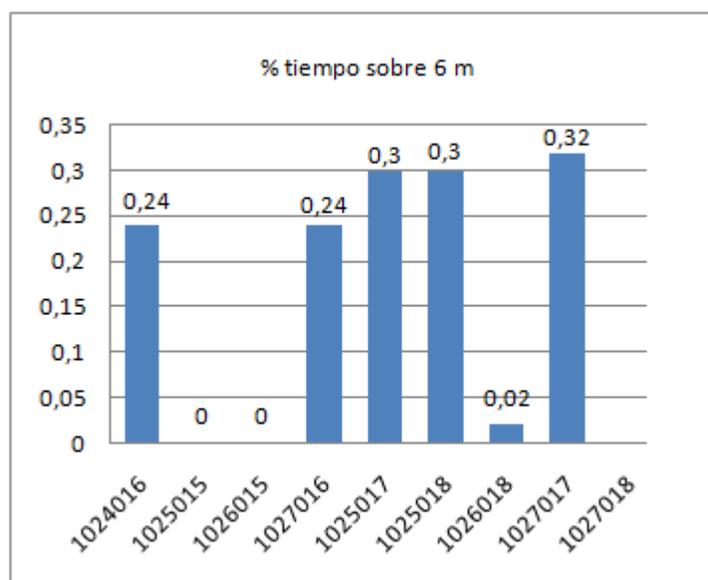


Figura 11. Gráfico del porcentaje de tiempo sobre 6 m.

4 Conclusiones

La valoración del recurso eólico se ha realizado en base a la media calculada de los valores obtenidos para el parámetro horas equivalentes. Para el tipo de aerogenerador que se ha empleado en este estudio, el aprovechamiento de la energía eólica offshore puede considerarse viable a partir de un valor de horas equivalentes de 2.750. La zona establecida al suroeste (SO) de la isla de Lanzarote dio una media en horas equivalentes de 3.188,78, que según los criterios establecidos se puede considerar como viable bueno. La zona situada al nordeste (NE) de la isla dio una media de horas equivalentes de 3.509,74, que según el criterio seguido se puede considerar como viable muy bueno.

La media de las velocidades se sitúa en torno a los $7,9 \text{ m s}^{-1}$ para la zona del nordeste (NE) de la isla de Lanzarote. Todo el archipiélago está influenciado por los vientos alisios, procedentes del norte y nordeste, siendo la isla de Lanzarote la primera que encuentran a su paso. Por lo tanto, es lógico que el nordeste (NE) posea velocidades mayores a las del suroeste (SO), ya que presentará modificaciones regionales como consecuencia de la peculiar orografía que presenta la isla.

La altura significativa del oleaje es mayor en el nordeste (NE), siendo un buen indicador del grado de severidad del oleaje, lo cual afectará a la rugosidad de la superficie marina. Como en el caso anterior, los vientos alisios transfieren parte de su energía cinética a la superficie marina. Por otra parte, se ha observado una marcada variación estacional que puede llegar a superar los 2 m de altura significativa de ola, entre los meses de verano y los de invierno.

5 Bibliografía

- [1] ACOSTA, J. y PETER, C. *Geophysics of the Canary Islands*. Springer, 2005, ISBN 978-1-4020-4352-9.
- [2] BAÑUELOS, F., CAMACHO, C., SERRANO, J. y MUCIÑO, D. Análisis y validación de Metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. 2008.
- [3] BELDA, F. Predicción Meteorológica, problemas clásicos y nuevos retos. Agencia Estatal de Meteorología. 2012.
- [4] COUÑAGO, B. y BARTUREN, R. Estudio técnico-financiero sobre la construcción de un parque eólico marino flotante en el litoral español. Archivo digital de la Universidad Politécnica de Madrid. 2010.
- [5] Disponible en Web: Puertos del Estado de España, <http://www.puertos.es/> [Consulta: 10 de abril de 2013].
- [6] DODSON, B. *The Weibull Analysis Handbook*. 2da ed. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press, 2006.
- [7] ELÍAS, X. y RUÍZ, F. *Los contaminantes y la destrucción térmica*. Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 2005, 97 p, ISBN: 9788499691282.
- [8] ESTÉVEZ, H. Aplicación de métodos estadísticos en el sector eólico. *Revista Índice*. 2008.
- [9] FAIRALL, C, et al. Wind, wave, stress, and surface roughness relationships from turbulence measurements made on flip in the scope experiment. Environmental Technology Laboratory. 1996.
- [10] HASSELMAN, K. y BAUER, E. The WAM Model – A third Generation Ocean Wave Prediction Model. American Meteorological Society. 1988.
- [11] LLUCH, J. *Tecnología y margen del refino del petróleo*. Instituto Superior de la Energías. Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 2008, 464 p, ISBN: 9788479788759.

-
- [12] MESTRE, A. Agrometeorología. Agencia Estatal de Meteorología. 2010.
- [13] PALOMARES, A. Caracterización del régimen de vientos y desarrollo de un modelo de predicción eólica a escala local en el estrecho de Gibraltar. Universidad Complutense de Madrid. 2002.
- [14] PASQUILL, F. and SMITH, F. Atmospheric Diffusion. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2006.
- [15] PELLUZ, D. ¿Cómo se entiende la producción de un parque eólico? Infopower, 2012.
- [16] REDMIC. Repositorio de Datos Marinos Integrados de Canarias. Disponible en Web: <http://www.redmic.es> [Consulta: 21 de marzo de 2013].
- [17] RODRÍGUEZ, E. y GARCÍA, J. El modelo HIRLAM de predicción del INM. Instituto Nacional de Meteorología. 1996.
- [18] STEENEVELD, G. y HOLTSLAG, A. Fluxes and gradients in the convective surface layer and the possible role of boundary-layer depth and entrainment flux. Meteorology and Air Quality, Wageningen University. 2005.
- [19] ZUÑIGA, I. y CRESPO, E. *Meteorología y Climatología*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2010, 251 p, ISBN: 9788436259070.