

Caracterización del viento para evaluar su potencial energético en la Isla de la Juventud

Edgardo Soler-Torres ^(1*), Luís M. Sánchez-Suárez ⁽¹⁾ y Reinier Borrego-Díaz ⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Centro Meteorológico Provincial. Calle 41 # 4625, e/ 46 y 54, Nueva Gerona, Isla de la Juventud, Cuba.*
E-mail: edgardo.soler@ijv.insmet.cu, luis.sanchez@ijv.insmet.cu, reinier.borrego@ijv.insmet.cu

Recibido: agosto 14, 2014	Aceptado: junio 23, 2015
---------------------------	--------------------------

Resumen

Con el objetivo de lograr una caracterización del viento para evaluar su potencial energético con aplicación en la obtención de energía eléctrica a pequeña escala en la Isla de la Juventud, se analizaron las series temporales de datos de dirección y velocidad del viento a 20 metros de altura, medidos cada 10 minutos durante un año por la red de prospección eólica territorial. Se obtuvieron los estadísticos descriptivos, el coeficiente de determinación, el comportamiento anual, el ciclo diario, la rosa de los vientos, la intensidad media de la turbulencia y la distribución de Weibull. Entre los principales resultados se encontró que los valores de velocidad media anual del viento son máximos en el este y norte de la Isla (Columbia y La Demajagua) y disminuyen hacia el sur (San Pedro), y que la intensidad media anual de la turbulencia en los tres sitios de mediciones es inferior a los umbrales establecidos, permitiendo el trabajo de aerogeneradores de categorías A y B. Se logra un ajuste con la función de Weibull cuyas desviaciones son del 1%.

Palabras clave: caracterización del viento, distribución de Weibull, potencial energético y velocidad del viento

Characterization of the wind to evaluate its energy potential in the Isle of Youth

Abstract

With the aim of achieving a characterization of the wind to evaluate its energy potential application in the production of electricity on a small scale in the Isle of Youth, time data series direction and wind speed at 20 meters of height measured every 10 minutes for one year by the network of territorial wind prospecting were analyzed. Descriptive statistics, the coefficient of determination, the annual behavior, the daily cycle, the rose of the winds, the average intensity of turbulence and the Weibull distribution were obtained. Among the main results was found that the values of annual average wind speed are highest in the east and north of the island (Columbia and La Demajagua) and decrease to the south (San Pedro), and the average turbulence intensity at the three sites of measurements is less than the thresholds, allowing wind turbines work categories A and B. Fitting a Weibull function whose deviations are 1% is achieved.

Key words: characterization of the wind, energy potential, Weibull distribution and wind speed

1. Introducción

El calentamiento desigual de la superficie de la Tierra, producto de la diferenciada distribución de las tierras y las aguas, genera zonas de altas y bajas presiones distribuidas por todo el planeta, este desequilibrio provoca desplazamientos del aire dando lugar al viento, que no es más que el aire que se mueve de un lugar a otro, bien sea debido a la brisa marina, a un anticiclón invernal o un intenso huracán.

La energía eólica es la que se obtiene del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas de energía útiles para las actividades humanas: mecánica, eléctrica.

El uso de la energía del viento a baja altura ha sido extenso en Cuba desde la primera mitad del Siglo XX, cuando las llanuras camagüeyanas alcanzaron su esplendor ganadero con los molinos de viento como tecnología energética eficiente y eficaz. En otras zonas, principalmente la oriental, también proliferaron las máquinas eólicas para el abasto de agua a la ganadería, el riego a pequeñas parcelas y el suministro de agua potable a bateyes y comunidades (Montesinos, 2007). Se estima que llegaron a funcionar en todo el país más de 6 500 molinos de viento para bombear agua. Además, de la existencia de algunos pequeños aerogeneradores para la generación de electricidad, funcionando como sistemas híbridos eólicos-solares en puntos aislados (GEPROP, 2005). En Isla de Pinos los primeros molinos de viento se instalaron en fincas propiedad de colonos norteamericanos. En la actualidad el Ministerio de la Agricultura en la Isla de la Juventud mantiene funcionando alrededor de 28 molinos de viento para bombeo de agua en vaquerías y granjas. Además, de los sistemas híbridos eólico-solares que garantizan la energía eléctrica en los centros de acopio pesquero, localizados en cayos cercanos (Moreno et al, 2007).

Estudios y aplicaciones con el objetivo de aprovechar el potencial energético del viento en Cuba se conocen desde principios de la década del 70' del Siglo XX, cuando Boytel (1972) publicó su libro *Geografía Eólica de Oriente*. Sin embargo, la expansión de la red eléctrica, combinada con la disponibilidad de generadores diésel y la crisis económica de los años 90' del pasado siglo, redujo el uso de la energía eólica para generar electricidad y bombear agua. Aunque, debe mencionarse que unido a las acciones prácticas de electrificación nacional, se crearon importantes bases científico-técnicas que hoy favorecen el desarrollo y la asimilación de tecnologías para la explotación de las fuentes renovables de energía, lo que se integra a la alta prioridad otorgada por el Gobierno Cubano a la búsqueda de fuentes nacionales de energía, con el afán de diversificar su matriz energética, hasta hoy dependiente de combustibles fósiles que escasean en el país.

Durante la primera década del presente Siglo XXI, en medio de la Revolución Energética, se obtuvieron en Cuba importantes resultados científicos en este campo, como la primera edición del Mapa Eólico de Cuba (Soltura et al, 2009) y la culminación de un estudio detallado sobre la caracterización físico – meteorológica de las capas bajas de la Atmósfera, a partir de la implementación de una red de torres altas de gradiente y su aplicación al estudio del viento como fuente de energía (Roque, 2009).

Específicamente para la Isla de la Juventud el potencial energético del viento a baja altura fue analizado para la aplicación del bombeo eólico a la ganadería en Cuba (Soltura et al, 2002), realizado con series de datos de viento a 10 metros de altura, donde se obtuvo una velocidad media del viento de 2,6 m/s que permitió catalogar de Aceptable el caudal (m³) o cantidad de agua a bombear entre 8 y 48 metros de altura. Posteriormente R. Soltura (com. pers. 2004) dirigió el estudio Evaluación del potencial eólico en Cuba. Aplicaciones del WASP: Atlas Eólico de la Isla de la Juventud, que estimó el potencial eólico a 50 metros de altura a partir de mediciones a 10 metros de las estaciones meteorológicas, y en fecha reciente se presentó el Atlas Eólico de Cuba (Roque, 2013), que representa el potencial eólico del Archipiélago Cubano a través de mapas formados por la superposición de mosaicos parcialmente solapados a alturas de 10, 30, 50 y 100 metros.

Al estar la Isla de la Juventud geográficamente separada de Cuba y no tener conexión al Sistema Eléctrico Nacional, cuenta con su propio sistema de generación, transmisión y distribución de electricidad, que demanda un trasiego marítimo de combustible diésel desde Cuba para garantizar el servicio eléctrico las 24 horas del día, lo que provoca un incremento adicional a los costos de generación eléctrica. Esta situación es una oportunidad para promover la aplicación demostrativa de diversas tecnologías de energías renovables ambientalmente inocuas (biomasa, fotovoltaica, eólica) para la generación de electricidad en este territorio (GEPROP, 2005). En lo referente a la energía eólica, un parque con seis aerogeneradores y una capacidad de generación de 1,65 MW está en funcionamiento desde 2007, y en colaboración con el proyecto internacional Producción y Comercialización de Servicios Energéticos Renovables se logró instalar en 2010 una pequeña red de prospección eólica, que permitió registrar datos de dirección y velocidad del viento a diferentes alturas cada 10 minutos en tres localidades del

territorio, con los que se ha confeccionado una base de datos que cumple las exigencias de la Red Mundial de Mediciones Eólicas (MEASNET) para los estudios de factibilidad citadas por Roque (2009). Tras la publicación de los primeros resultados, logrados mediante la ejecución del proyecto Estudio de prospección eólica con fines energéticos en la Isla de la Juventud (Soler et al, 2013), se ha solicitado continuar las investigaciones en este campo, con la finalidad de conocer el potencial energético del viento a baja altura para la generación de electricidad.

El objetivo de este trabajo es lograr una caracterización del viento a 20 metros de altura, utilizando la información brindada por la red territorial de prospección eólica, para evaluar su potencial energético con aplicación en la obtención de energía eléctrica a pequeña escala en la Isla de la Juventud.

2. Materiales y métodos

Se emplearon las series de datos registrados a 20 metros de altura cada 10 minutos en tres localidades de la Isla de la Juventud (**Tabla I**), las que se normalizaron a una longitud temporal de 365 días (52 560 registros). En este periodo de tiempo las estaciones lograron un funcionamiento óptimo, con el 100 % de las mediciones de velocidades medias registradas, transmitidas y almacenadas en la base de datos Eólica IJ versión 2.07, que contiene una tabla con todos los casos arreglados en campos definidos a partir de los ficheros originales *.csv, brindando salidas como: consultas tabuladas, gráficos dinámicos, e informes del comportamiento de la velocidad y dirección del viento.

Tabla I. Datos de la red de prospección eólica en la Isla de la Juventud

Mástiles anemométricos	Código	Elevación sobre el nivel medio del mar (m)	Alturas anemométricas (m)	Coordenadas Latitud norte (gms)	Coordenadas Longitud oeste (gms)
Columbia	Cu-1-A	15	20, 40 y 50	21° 50' 40.7"	82° 44' 07.3"
La Demajagua	Cu-1-D	22	20, 40 y 50	21° 49' 03.7"	82° 55' 52.8"
San Pedro	Cu-1-C	17	20, 40 y 50	21° 38' 57.0"	82° 52' 37.7"

La localización geográfica de los mástiles en el territorio se aprecia en el mapa (**Fig. 1**), la que se estableció como resultado de un laborioso trabajo, donde se analizó el comportamiento de diferentes elementos aportados por las expediciones de campo, realizadas en áreas de interés seleccionadas para el emplazamiento de los equipos de mediciones, con la finalidad de lograr la representatividad de la información respecto a las regiones climáticas establecidas. Además de contar con comunicación estable para el monitoreo de los datos, una vía de acceso terrestre que permitiera labores de mantenimiento y mínimas condiciones de seguridad para el equipamiento instalado. El mástil No. 1 quedó emplazado cerca de la carretera a Columbia (CB) en el nordeste de la Isla, el No. 2 en las cercanías del poblado La Demajagua (LD) región noroeste, y el No. 3 en la localidad de San Pedro (SP) en el suroeste de la Isla.

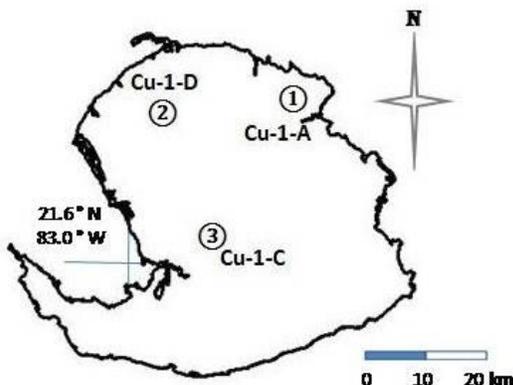


Fig. 1. Localización geográfica de los mástiles de medición, donde Cu-1-A es Columbia, Cu-1-D es La Demajagua y Cu-1-C es San Pedro

Utilizando diversas herramientas estadísticas se realizó la validación y el análisis exploratorio de los datos empleados. Las series de datos con registros perdidos de dirección del viento se rellenaron determinando la media del (sucesor + predecesor)/2, excepto cuando la dirección cambia del cuarto al primer cuadrante (350° a 1°) y en los periodos de casos perdidos consecutivos que se utilizó el dato del nivel de 40 metros de altura medido en el propio mástil anemométrico.

El viento climático observado se obtuvo con el programa de computación especializado OWC Wizard (Observed Wind Climatic), que es un utilitario del WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) con una potente herramienta matemática incorporada, capaz de brindar el comportamiento climático del viento en una localidad determinada (Mortensen et al, 2007). Otros cálculos específicos como valores medios se realizaron directamente en hojas de cálculos, o se obtuvieron de la base de datos.

3. Resultados y discusión

3.1. Parámetros estadísticos

Mediante el análisis exploratorio de las series se determinaron un grupo de parámetros estadísticos, entre ellos: la mediana, la media, desviación típica, casos de calmas y la racha máxima registrada en el periodo de estudio (**Tabla II**), siendo lo más significativo que la mediana, índice estadístico que fija el 50 % de los datos de una serie, indique que el viento sopla con valores superiores a 3,53 m/s en Columbia, 3,47 m/s en La Demajagua y 3,17 m/s en San Pedro durante un tiempo proporcional a la mitad del año, que las calmas representen menos del 1 % de los datos, que la media territorial (3,7 m/s) supere en 1,1 m/s la calculada por Soltura et al (2002) con las estaciones meteorológicas a 10 metros de altura y que la desviación típica no alcance el 20 % de la media.

Tabla II. Datos estadísticos descriptivos del periodo de estudio

Mástiles	Fecha Inicial	Fecha Final	Número Registros (casos)	Mediana (m/s)	Media (m/s)	Desviación Típica (m/s)	Calmas (casos)	Máxima Absoluta (m/s)
Columbia				3,5	3,8	0,69	66	13,4
La Demajagua	27/12/2010 12:40	27/12/2011 12:30	52 560	3,5	3,8	0,65	29	14,0
San Pedro				3,2	3,5	0,59	29	13,4

Correlaciones

Los coeficientes de correlación lineal de Pearson (R) y de determinación (R²) obtenidos para las series de mediciones a 20 metros de altura presentan su valor máximo entre La Demajagua – San Pedro, y el mínimo entre Columbia – San Pedro, demostrando su dependencia inversamente proporcional a la distancia existente entre los mástiles anemométricos (**Tabla III**).

Tabla III. Coeficientes de correlación de Pearson (R) y de determinación (R²) de las series de velocidades medias del viento a 20 metros de altura entre los mástiles anemométricos

Coeficientes de correlación de Pearson (R) y de determinación R ²	Mástiles anemométricos		
	Columbia y La Demajagua	La Demajagua y San Pedro	Columbia y San Pedro
Pearson (R)	0,85	0,89	0,83
R ²	0,72	0,79	0,69
Distancia (km)	20,4	19,5	26,2

Lo anterior demuestra la importancia de la distribución geográfica realizada durante el emplazamiento de los mástiles para lograr representatividad de los diferentes comportamientos climáticos en el nivel de estudio, donde los valores de varianza explicada entre los mástiles no alcanzan el 80 %.

Respecto a las mediciones a 10 metros de altura registradas en Santa Fe (78321), Amistad Cuba Francia (78309) y Punta del Este (78324), estaciones meteorológicas actualmente en operaciones del Instituto de Meteorología, se obtuvo que el mayor valor de R^2 fue de 0,71 entre los pares La Demajagua – Amistad Cuba Francia y San Pedro - Santa Fe, ambos representativos de la región climática interior de la Isla.

Comportamiento anual

El comportamiento correspondiente a la velocidad media mensual a 20 metros de altura en los tres mástiles anemométricos emplazados en el territorio pinero permite su caracterización anual (**Fig. 2**), marcada por el valor máximo en la temporada poco lluviosa (noviembre a abril) con 4,7 m/s reportados por Columbia en el mes de diciembre y el valor mínimo en la temporada lluviosa (mayo a octubre) con 2,2 m/s en agosto correspondiente a San Pedro. Aunque, en sentido general pueden mencionarse como particularidades del periodo el máximo secundario de junio y los valores alcanzados en diciembre, en correspondencia con el análisis de representatividad realizado con datos a 10 metros de altura

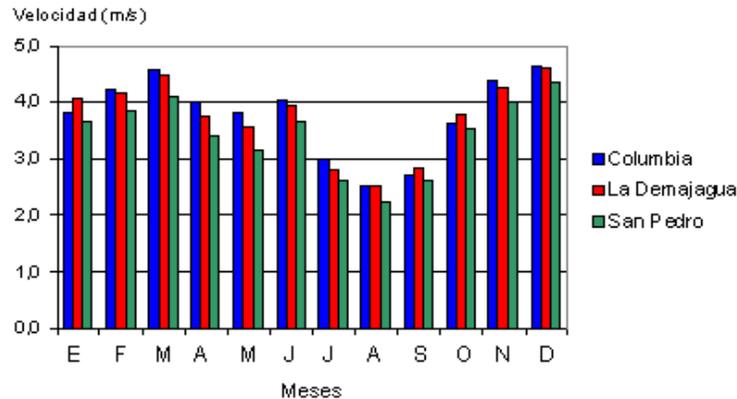


Fig. 2. Velocidad media mensual del viento a 20 metros de altura en Columbia, La Demajagua y San Pedro

Ciclo diario

Para el análisis del ciclo diario de la velocidad del viento se determinaron las medias horarias en cada emplazamiento, evidenciándose el predominio del régimen de brisas en el comportamiento de esta variable en la Isla de la Juventud (**Fig. 3**), con valores superiores a 4,0 m/s solo en el periodo entre las 09:00 y 16:00 horas y todos los máximos a las 13:00 horas, con 5,31 m/s en La Demajagua, 5,16 m/s en Columbia y 4,86 m/s en San Pedro. En tanto, los mínimos ocurrieron en periodos diferentes del día: en La Demajagua a las 02:00 de la madrugada con 2,91 m/s y las restantes lo reportan al anochecer, Columbia con 2,89 m/s a las 19:00 horas y San Pedro con 2,51 m/s a las 20:00 horas.

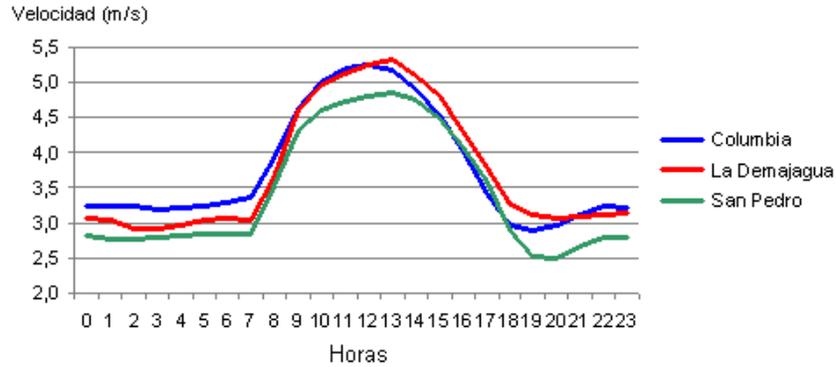


Fig. 3. Velocidad media horaria del viento a 20 metros de altura en Columbia, La Demajagua y San Pedro

Distribución de velocidades

La rosa de los vientos (**Fig. 4**) muestra la distribución detallada, para 36 direcciones, de la velocidad media del viento durante el periodo de estudio, con valores máximos entre 4 y 5 m/s para un amplio sector desde 20 a 110° en sentido general. Estando los registros de Columbia en el sector noreste – este (60 - 110°) y los de La Demajagua en el sector norte – noreste (20 - 60°). Mientras, San Pedro alcanza los 4 m/s en el sector sudeste – sur (150 – 190°).

Esta distribución de velocidades medias en la rosa de los vientos ha permitido conocer las direcciones o sectores desde los cuales es mayor la contribución del recurso eólico al sitio de mediciones, lo que tiene gran importancia cuando existe un rumbo predominante durante periodos largos de tiempo, como es el caso de la Isla de la Juventud según veremos en el epígrafe siguiente.

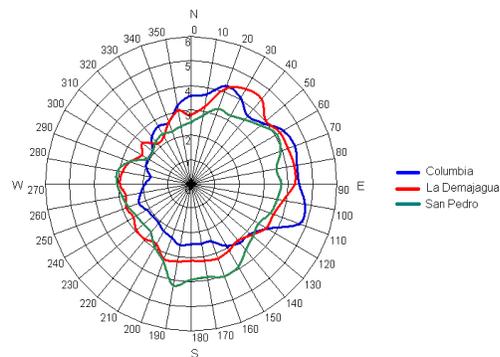


Fig. 4. Distribución de velocidades medias (m/s) a 20 metros de altura en Columbia, La Demajagua y San Pedro

Frecuencias de ocurrencia

Las áreas de la rosa de los vientos abarcadas representan las frecuencias de casos registrados por las tres veletas, indicando claramente la existencia de un rumbo dominante en cada uno de los mástiles en los meses de enero y julio (**Figs. 5 a y b**) respectivamente, demostrando los cambios estacionales en la dirección del viento durante el año. En enero los vientos predominantes tienen una frecuencia máxima de 21 %, en Columbia del este - noreste y en San Pedro del norte - noreste. Mientras, en La Demajagua alcanzan el 15 % del noreste y mantienen un amplio sector con valores cercanos al 14 % hasta el este – sudeste. En julio los tres mástiles presentan vientos predominantes del este, representando en Columbia y la Demajagua el 20 % y en San Pedro el 18 %.

Es evidente además, la escasa frecuencia con que soplan los vientos de región oeste en la Isla de la Juventud, corroborando los resultados publicados por Rego (1989) y Soler et al (2010) que utilizaron datos a 10 metros de altura de las estaciones meteorológicas y por Soler (2011) para el nivel de 50 metros con información de un periodo diferente correspondiente al mástil de Columbia.

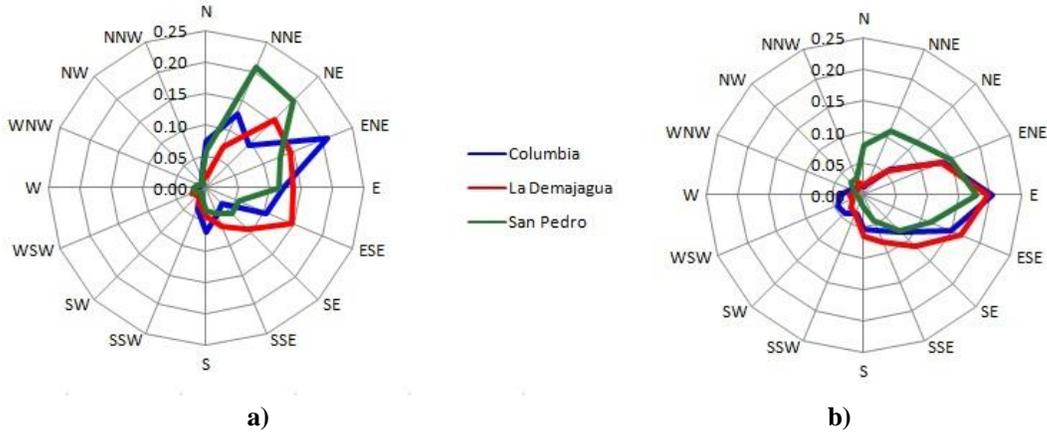


Fig. 5. Frecuencias (x100) de la dirección del viento a 20 metros de altura en Columbia, La Demajagua y San Pedro para el mes de: (a) enero y (b) julio

La distribución de frecuencias de velocidades permite conocer las veces que se repite cada valor de velocidad en una localidad analizada. En la muestra estudiada los valores de 1 a 3 m/s predominan en San Pedro, con una frecuencia máxima del 23 %. Mientras, el valor de 4 m/s es más frecuente en La Demajagua y las velocidades entre 5 y 7 m/s predominan en Columbia (Fig. 6).

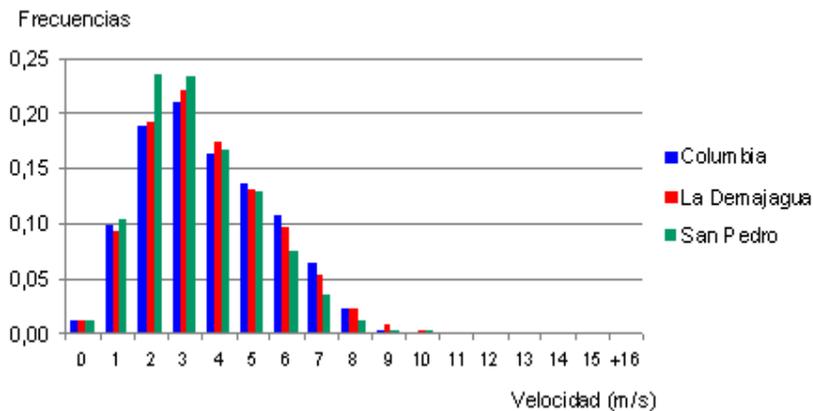


Fig. 6. Frecuencias (x100) de la velocidad media (m/s) a 20 metros de altura en Columbia, La Demajagua y San Pedro

Al estudiar las distribuciones de frecuencias de las velocidades medias del viento a 20 metros de altura por temporadas del año en la Isla de la Juventud obtuvimos que los valores inferiores a 4 m/s son más frecuentes durante la temporada lluviosa y los superiores a 4 m/s durante la temporada poco lluviosa. Además, en ambas temporadas las frecuencias de ocurrencia para velocidades ≥ 8 m/s describen un comportamiento asintótico aproximándose a cero (Fig. 7). Este comportamiento fue anteriormente reportado por Roque (2011) para las estaciones meteorológicas y torres de referencia emplazadas en Cuba con otros niveles de medición.

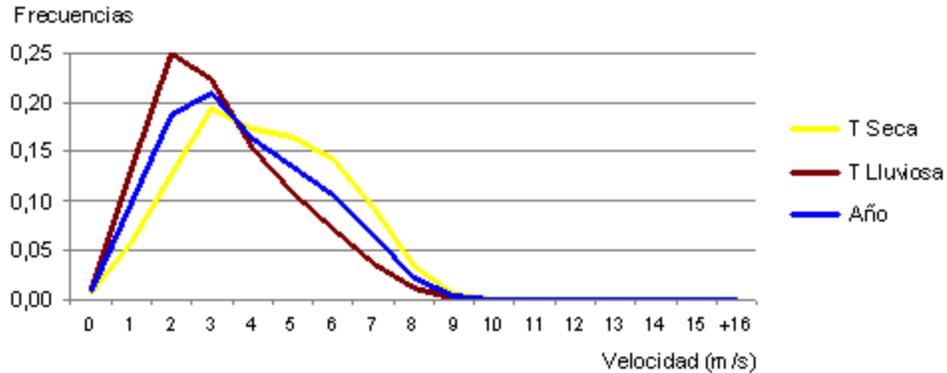


Fig. 7. Frecuencias (x100) de la velocidad media (m/s) a 20 metros de altura durante la temporada seca, lluviosa y el año en Columbia

Intensidad media de la turbulencia

A los efectos de la energía eólica, la turbulencia es un fenómeno indeseable que reduce la producción de electricidad y la vida útil de los aerogeneradores. La forma más común de expresar la turbulencia es mediante la magnitud denominada intensidad media de la turbulencia, que se define como la razón entre la desviación típica (estándar) de la velocidad del viento y la velocidad media temporal del viento en el mismo período de tiempo (Moreno et al, 2007), expresada en la ecuación:

$$I_U = \sigma_s / U_m \tag{1}$$

Donde: I_U : intensidad media de la turbulencia (adimensional), σ_s : desviación típica (m/s), U_m : velocidad media (m/s).

Podemos conocer el comportamiento de este índice de variación de la velocidad del viento a 20 metros de altura durante el periodo de estudio calculando mediante la fórmula (1) la intensidad media mensual de la turbulencia (Fig. 8), para la que se reportan los valores máximos durante la temporada lluviosa hacia el interior del territorio, con el máximo absoluto de 0,205 correspondiente al mes de agosto en San Pedro, seguido de 0,202 en mayo, junio y julio en esa propia estación. Mientras, en Columbia llegó a 0,190 en junio y en La Demajagua a 0,174 en mayo. En el periodo invernal los valores de intensidad media mensual de la turbulencia se mantienen inferiores, con el mínimo absoluto de 0,145 durante enero en La Demajagua.

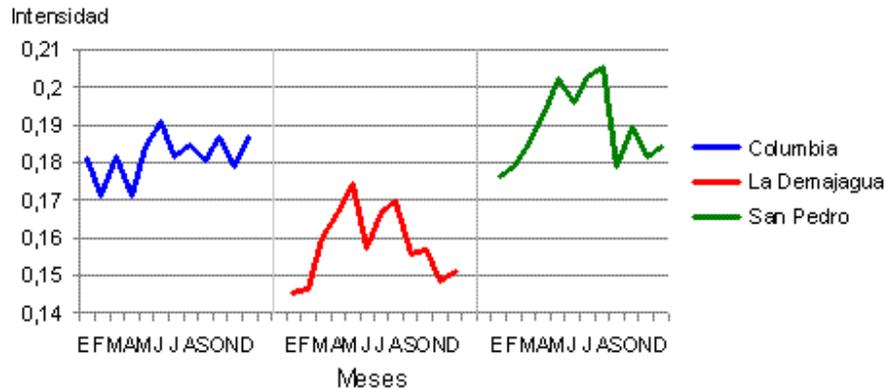


Fig. 8. Intensidad media de la turbulencia a 20 metros de altura en Columbia, La Demajagua y San Pedro

Sin embargo, según la aptitud para resistir sin deterioro excesivo la acción mecánica del viento, los aerogeneradores se agrupan en cuatro clases, y cada clase se presenta en dos categorías: A y B, según la intensidad de la turbulencia que puede soportar el aerogenerador. Entonces, la turbulencia tolerable para cada categoría de aerogeneradores se expresa por la intensidad de la turbulencia media anual I_{15} , referida a una velocidad media anual del viento igual a 15 m/s, a la altura del buje del aerogenerador (Moreno et al, 2007).

Debido a que no se cuenta con la intensidad de la turbulencia I_{15} medida para una velocidad de 15 m/s, utilizaremos la fórmula (2) para obtener I_{15} , a partir de la intensidad media anual de turbulencia I_U relativa a la velocidad media anual U_m , mediante la expresión:

$$I_{15} = I_U [a + 1/a + (15 / U_m)] \quad (2)$$

Donde: I_{15} : intensidad media de la turbulencia para a una velocidad de 15 m/s (adimensional), I_U : intensidad media de la turbulencia para la velocidad media anual (adimensional), U_m : velocidad media anual (m/s), a : parámetro que toma valores de 2 y 3 para las categorías A y B respectivamente (adimensional).

Calculando la formula (1) a partir de la velocidad media y la desviación típica (**Tabla II**) para cada mástil anemométrico y sustituyendo a I_U y U_m en la fórmula (2) se obtuvieron valores de I_{15} entre 0.08 y 0.10, inferiores a los umbrales máximos establecidos de 0.18 y 0.16 para las categorías A y B respectivamente. Por lo que podemos expresar que en los tres sitios de emplazamiento de los mástiles el nivel de intensidad media anual de la turbulencia para la altura de 20 metros permite el trabajo de aerogeneradores de categorías A y B.

Distribución de Weibull

Para el cálculo del viento climático observado utilizamos la función de densidad de probabilidades, la cual nos da la probabilidad de obtener un valor de velocidad del viento dado y coincide con la función de distribución de Weibull (Mortensen et al, 2007):

$$f(u) = k/A \cdot (u/A)^{k-1} \cdot \exp(-(u/A)^k) \quad (2)$$

Donde $f(u)$: probabilidad estadística de que ocurra la velocidad (adimensional), u : velocidad del viento (m/s), k : parámetro de forma (adimensional) y A : parámetro de escala (m/s).

La expresión de Weibull proporciona un método empírico preciso para la representación de la distribución de frecuencias de velocidades del viento. Como se ha podido observar, para el establecimiento de la expresión de la distribución de Weibull en el sitio analizado son necesarios los parámetros k y A (Moreno et al, 2007).

Las salidas del OWC Wizard para cada mástil se obtuvieron en un fichero llamado Reporte de Viento Climático Observado, que contiene los valores tabulados de la velocidad media, sus frecuencias de ocurrencia, parámetros de Weibull (A y k) y densidad de potencia media, para 16 rumbos en la rosa de los vientos. Además, de un gráfico que muestra en un mismo recuadro las frecuencias del viento por sectores de dirección (con la opción de que puede

seleccionarse el sector deseado) y otro gráfico con el histograma (o distribución de frecuencias) de velocidades del viento, que responde al sector escogido o al total de sectores. De ellos hemos seleccionado el histograma de velocidades y la curva teórica ajustada de la función de Weibull en todos los sectores (Figs. 9 a, b y c), para representar el viento climático en cada mástil anemométrico durante el periodo de estudio. También, se presentan los valores estimados de los parámetros de Weibull (A y k), la velocidad (U) y la densidad de potencia (P) que caracterizan el viento promedio en cada sitio.

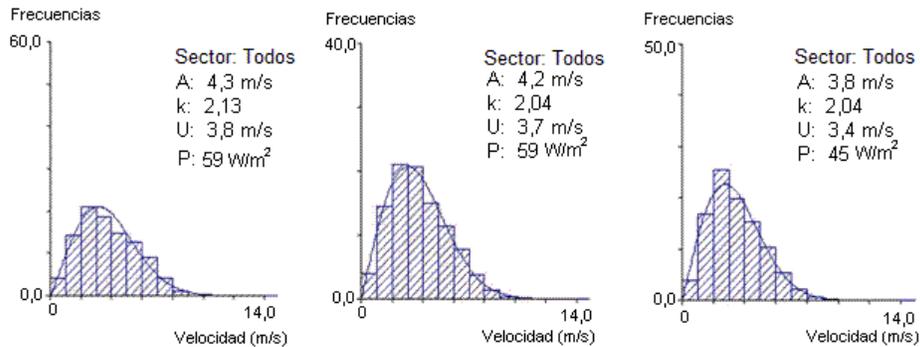


Fig. 9. Frecuencias (%) de velocidades medias (m/s) con la curva de ajuste de Weibull en (a) Columbia, (b) La Demajagua y (c) San Pedro

El parámetro de Weibull k, factor de forma de la distribución, está relacionado con la dispersión de los valores de velocidad (desviación típica) y la frecuencia con la que se presenta su valor promedio, presentando su valor máximo de 2,13 en Columbia, localidad más próxima a la costa este de la Isla (Fig. 1), donde es elevada la frecuencia de los valores de velocidades entre 6 y 8 m/s y la velocidad promedio (3,8 m/s) alcanza el 21 % de ocurrencia (Fig. 9a).

El parámetro de Weibull A, factor de escala, es un indicador del valor de la velocidad promedio y también alcanza su valor máximo en Columbia con 4,3 m/s.

Los valores medios similares, de velocidad media y densidad de potencia, obtenidos para Columbia y La Demajagua, (Figs. 9a) y (b), superiores a los de San Pedro, (Fig. 9c), evidencian que el potencial energético del viento es máximo en el este y norte, y disminuye hacia el sur de la Isla.

Tabla IV. Velocidad media, densidad de potencia media y sus discrepancias entre el cálculo con las mediciones registradas y el ajuste con Weibull

Mástiles	Variables	Cálculo con mediciones	Ajuste con Weibull	Discrepancias (%)
Columbia	Velocidad media (m/s)	3,8	3,8	0,0
	Densidad de potencia media (W/m ²)	58	59	1,0
La Demajagua	Velocidad media (m/s)	3,8	3,7	0,9
	Densidad de potencia media (W/m ²)	58	59	1,0
San Pedro	Velocidad media (m/s)	3,5	3,4	1,1
	Densidad de potencia media (W/m ²)	44	45	1,0

Finalmente se presentan las discrepancias de los valores medios de la velocidad y la densidad de potencia obtenidos para todos los rumbos (**Tabla V**), utilizando los datos registrados y el modelo de ajuste con la función de Weibull, que están en el orden del 1 % en los tres mástiles de mediciones, excepto para la velocidad media en Columbia que es cero.

Teniendo en cuenta que los mástiles de mediciones sólo brindan información de su sitio de emplazamiento, este resultado garantiza confiabilidad en la evaluación del potencial energético para otros puntos geográficos (nodos de la rejilla del modelo), localizados dentro del área de representatividad de cada mástil, proceso que se desarrollará durante la elaboración del mapa de potencial eólico para el nivel de 20 metros de altura en la Isla de la Juventud, empleando la metodología del WAsP.

Conclusiones

Los coeficientes R y R^2 obtenidos para las series de velocidades medias del viento poseen una dependencia inversamente proporcional a la distancia existente entre los mástiles.

Los vientos a 20 metros de altura son predominantes de región nordeste en enero y del este en julio sobre la Isla de la Juventud.

Los comportamientos anual y diario de la velocidad media del viento respetan la climatología establecida con series largas de datos a 10 metros de altura, presentándose los máximos en la temporada poco lluviosa y horas diurnas, y los mínimos en la temporada lluviosa y horas nocturnas.

Los valores superiores a una velocidad media del viento de 4 m/s son más frecuentes en la temporada poco lluviosa y los valores inferiores a 4 m/s predominan en la temporada lluviosa.

La intensidad media anual de la turbulencia oscila entre 0.08 y 0.10 en los sitios de emplazamiento de los mástiles anemométricos, lo que expresa un nivel de intensidad de la turbulencia permisible para el trabajo de aerogeneradores de categorías A y B.

La velocidad y densidad de potencia obtenidas con cada una de las series de datos estudiadas evidencian que el potencial energético del viento es máximo en el este y norte, y disminuye hacia el sur de la Isla.

Las discrepancias del 1 % obtenidas en los cálculos, utilizando los datos registrados y el modelo de ajuste con la función de Weibull en los sitios estudiados, garantizan resultados confiables en la evaluación del potencial energético para otros puntos geográficos localizados dentro del área de representatividad de cada mástil.

Referencias

- Boytel, F. 1972. Geografía Eólica de Oriente. Edit. Ciencia y Técnica, Santiago de Cuba, Cuba. 251 pp.
- GEPROP 2005. Proyecto de colaboración internacional Producción y Comercialización de Servicios Energéticos Renovables: Caso Isla de la Juventud. Centro de Gestión de Proyectos, CITMA, La Habana, Cuba. 62 pp.
- Montesinos, A. 2007. Historia de la energía eólica en Cuba. Cubasolar, *Rev. Energía y Tú* [en línea], Vol. 37, art. 07, enero - marzo 2007. 8 pp. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia37/HTML/articulo07.htm> [Consulta: 11 junio 2013].
- Moreno, C., J. Martínez, G. Leyva, R. Novo, A. A. Costa, C. Llanes, O. Herrera, A. Sarmiento, R. Pérez, A. Roque, M. E. Limia, A. Montesinos 2007: Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica. Edit. Cubasolar [CD-ROM], La Habana, Cuba. 55-70, 168-175, 189 pp. ISBN 959-7113.
- Mortensen, N. G., D. N. Heathfield, L. Millerup, L. Landberg y O. Rathmann 2007. Wind Atlas Analysis and Application Program: WAsP 9 Help Facility. Riso National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark. 353 topics. ISBN 978-87-550-3607-9.
- Rego, J. S. 1989. Nuevo Atlas Nacional de Cuba. Mapas de campo de presión y viento para enero y julio. Edit. Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba - Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía. RHEA, Consultores S.A., España. VI.2.3 pp.
- Roque, A., Y. Niebla, P. Reyes 2010. Perfil vertical del viento sobre Cuba en los primeros 100 m de altura sobre la superficie. Su importancia en la toma de decisión de los emplazamientos eólicos. *VI Congreso Cubano de Meteorología* [Memorias CD-ROM], La Habana, Cuba, 29 noviembre - 3 diciembre 2011. 20-22, 43 pp. ISBN 978-959-7161-29-7.

- Roque, A. 2013. Atlas Eólico de Cuba. *XII Conferencia Mundial de Energía Eólica*. WWEC 3-5 junio 2013, La Habana, Cuba. 8 pp. Disponible en: <http://meteor.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=EOLICO&TB2=WEST> [Consulta: 30 enero 2014].
- Soler, E., A. Cardoso, I. Arencibia, Y. Cardero, N. Campanioni 2010. Estudio del Viento Trihorario en la Temporada Lluviosa. *Rev. Isla, Ciencia y Tecnología* [en línea]. Año VII, Vol. 1, No 1, enero - abril 2010. 5 pp. ISSN 1813-6141. Disponible en: <http://www.gerona.inf.cu/modules.php?name=revista>
- Soler, E. 2011. Comportamiento del viento hasta 50 metros de altura en la Isla de la Juventud. *VI Congreso Cubano de Meteorología* [Memorias CD-ROM], La Habana, Cuba, 29 noviembre - 3 diciembre 2011. 10 pp. ISBN 978-959-7161-29-7.
- Soler, E., R. Rivero, Y. Rosales, J. Izquierdo 2013. Estudio de prospección eólica con fines energéticos en la Isla de la Juventud. *Rev. Eco Solar* [en línea], Vol. 44, art. 02, abril - junio 2013. 7 pp. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/ecosolar/revista44>
- Soltura, R., A. Roque, I. Rivero, A. Wallo, R. Báez, R. Vázquez, R. Rivero, L. Ayala, G. Rodríguez, H. Carrasco, A. Curbelo, A. González, O. Herrera, G. Martín, J. C. Díaz 2009. Primera edición del Mapa de Potencial Eólico de Cuba. *Rev. Eco Solar* [en línea], Vol. 21, art. 06, julio - septiembre 2007. 18 pp. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar21/HTML/articulo06.htm> [Consulta: 24 junio 2013].
- Soltura, R., R. J. Vázquez, S. I. Mon, G. Rodríguez 2002. Aplicaciones del bombeo eólico a la ganadería en Cuba. *Anais de Congressos Brasileiros de Meteorología 1980-2006* [en línea]. 5 pp. Disponible en: <http://www.cbmet.com/cbm-files/13-b952196203bc4efe537bce7007de146a.pdf>. [Consulta: 19 junio 2013].

Acerca de los autores:

Edgardo Soler-Torres: Graduado de Licenciatura en Física en la Universidad de Oriente en 1993, es Master en Ciencias y Profesor Instructor. Cuenta con más de 20 años de experiencia en la actividad científica. Ha dirigido proyectos de investigación en ciencias meteorológicas aplicados en la vida económica y social de la Isla de la Juventud, con resultados publicados. Como Especialista en Pronósticos del Tiempo destaca su contribución a la protección de la población y la economía, en el enfrentamiento a fenómenos meteorológicos peligrosos y a la difusión de la Meteorología en los medios. Actualmente dirige el Estudio de Potencial Eólico.

Luis Manuel Sánchez-Suárez: Graduado en el año 1994 de Licenciatura en Educación, en la especialidad de Física y Astronomía. Ingresó al Servicio Meteorológico Nacional en el año 2000. Ha investigado sobre la influencia de las condiciones meteorológicas locales en las infecciones respiratorias agudas y ha desarrollado un meritorio trabajo en la implementación de servicios especializados como el pronóstico hidrometeorológico para el transporte marítimo en el golfo de Batabanó y el pronóstico de viento para diversas aplicaciones. Actualmente es el Especialista Principal del Grupo de Pronósticos del Tiempo en la Isla de la Juventud.

Reinier Borrego Díaz: Graduado en el año 2006 de Licenciatura en Geografía, en la Dirección Municipal de Planificación Física asume la tarea de determinar la vulnerabilidad del fondo habitacional en el Municipio, para estimar el riesgo de desastre por afectación de huracanes intensos y sobre elevación del nivel del mar asociado al Cambio Climático. En 2011 ingresó al Servicio Meteorológico Nacional como Especialista en Meteorología del Grupo de Pronósticos del Tiempo en la Isla de la Juventud, donde ha contribuido al Estudio de Potencial Eólico mediante los análisis espaciales en SIG.