

Perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba. Aplicación al estudio del viento como fuente de energía

Wind vertical profile on atmospheric surface layer above Cuba. Application to wind study as energy source

Lic. Alfredo Roque Rodríguez | alfredo.roque@insmet.cu | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Lic. Yadiery Niebla Sosa | yadiery.niebla@insmet.cu | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

MSc. Magdiel Carrasco Díaz | magdiel.carrasco@insmet.cu | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Lic. Pablo Reyes Martínez | pablo.reyes@insmet.cu | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Recibido: diciembre 2 de 2014; aceptado: febrero 5 de 2015.

Resumen

En 2005 se inició en Cuba, casi al unísono con la revolución energética, un nuevo impulso hacia el empleo de las fuentes renovables de energía, en especial, la eólica; desde entonces, se han efectuado numerosas acciones para lograr su materialización, incluido el montaje de casi cien torres o mástiles de medición de la variable *viento*, con miras a conocer en profundidad el comportamiento de esta variable en el país, lo cual resulta de gran ayuda en la toma de decisiones para el emplazamiento de los parques eólicos a mediana y gran escalas.

El trabajo actual presenta los resultados alcanzados en tres **años de mediciones (2007-2009)**, entre los cuales se destaca la obtención de: a) los perfiles verticales medios para la rapidez del viento en diferentes meses del año, b) el exponente de variación vertical de este y c) los ciclos diario y anual del viento. Asimismo, se muestran otros parámetros de la capa superficial: la velocidad de fricción y el parámetro de rugosidad, la distribución de frecuencia de la rapidez del viento y las rosas de los vientos, atendiendo en todos los casos a diferentes condiciones físico-geográficas. Por vez primera, se poseen en Cuba los datos de

las variables meteorológicas con una alta resolución temporal en la capa superficial atmosférica.

PALABRAS CLAVE: Perfil vertical del viento, velocidad de fricción, parámetro de rugosidad, energía eólica, Cuba.

Abstracts

In 2005 a new impetus towards the use of renewable energy sources, especially wind energy began in Cuba, almost in unison with the energy revolution. Since then, numerous actions have been undertaken to achieve its realization, including the assembly of nearly one hundred towers or masts for measuring wind variable, to further knowledge of the behavior of this variable in our country, being of great help in decision making for the emplacement to medium and large scale wind farms. In this paper, the results achieved during three years of measurements (2007-2009) are presented, highlighting among others, the means of vertical wind profiles for different months, the exponent vertical variation of wind and the daily and annual cycles of the wind. Likewise, others surface layer parameters are shown, such as, friction velocity and roughness parameter, the frequency distribution of wind speed and wind roses, taking in all

cases to different physical-geographical conditions. For the first time to Cuba is achieved data on meteorological variables with high temporal resolution in the atmospheric surface layer.

KEYWORDS: Vertical wind profile, friction velocity, roughness parameter, wind energy, Cuba.

Introducción

Como parte del programa de energía eólica iniciado en 2005, con fines de monitoreo, se implementó la Red de Torres de Referencia Meteorológicas, con miras a obtener una climatología del viento hasta 100 m de altura en el país, lo cual complementa los estudios de prospección que se realicen, en especial, sobre la base del criterio de torre de gradiente, de amplio uso en los estudios de la capa superficial atmosférica (CSA), además de proporcionar una información relevante en aras de la elaboración de pronósticos meteorológicos a corto plazo.

La Red de Torres de Referencia Meteorológicas, junto con la también implementada Red de Prospección Eólica, permitieron conocer mejor el comportamiento del viento en Cuba con fines eólicos y responder preguntas tales como: ¿cuál es el viento medido a 100 m de altura?, ¿en cuánto se incrementa el viento por encima de 50 m de altura?, ¿es la oscilación diaria observada en las estaciones de superficie igual para niveles superiores e igual para todas las regiones del país? Y quizá la más importante de estas interrogaciones —aunque, de alguna manera, la respondieron las estaciones de superficie—: ¿cuáles son las mejores zonas de aprovechamiento del recurso eólico en el territorio cubano para la generación de electricidad a gran escala?

El desarrollo impetuoso del uso de la energía eólica ha estado muy vinculado con el desarrollo y la investigación de su componente principal: el viento, sobre todo el que se origina en la capa superficial atmosférica (~ 100 m sobre la superficie terrestre). La

capa superficial atmosférica, definida como aquella próxima a la superficie terrestre, en la cual los flujos turbulentos (la cantidad de movimiento, el calor y la humedad) varían menos de 10 % del valor que tienen en la superficie, es de suma importancia en las investigaciones meteorológicas aplicadas, donde revisten una importancia particular las relacionadas con la contaminación atmosférica y el estudio del viento en esta capa con miras a su aplicación como fuente renovable de energía. Precisamente, el objetivo del presente trabajo se centra en el estudio de esta capa con vistas a su aplicación en las investigaciones concernientes al empleo de la energía eólica.

La energía eólica ha experimentado un crecimiento vertiginoso; en las últimas décadas, resulta de la mayor aplicación entre las energías renovables. A nivel mundial, el liderazgo en el empleo de esta energía lo encabezan China y los Estados Unidos (WWEA, 2014), aunque otros países de economías emergentes también han tenido un significativo incremento.

Según se aprecia en el reporte de junio de 2014 para el comportamiento de la capacidad eólica instalada por países y regiones, anual y acumulativo, hasta esa fecha, se hallaban instalados más de 336 000 MW.

Desde 2005, Cuba ha desarrollado un programa que le ha permitido incursionar en el empleo de esta energía. Como parte de estas acciones, en varios puntos del país, se instalaron casi cien torres de medición del viento en varios niveles, las cuales permiten un mejor conocimiento acerca de esta variable (Soltura, 2001 y 2006; Roque, 2009; Carrasco 2011 y 2012).

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es *caracterizar el perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica a partir de los datos reportados por la Red de Torres de Referencia Meteorológicas* y, de este modo, ampliar los conocimientos del recurso de energía del viento en el país. Otro objetivo —no menos importante— es poner en conocimiento de los especialistas, dedicados o no a la meteorología, el comportamiento de ciertas variables en la capa su-

perficial atmosférica, que pueda tener una aplicación más allá del tema de la energía eólica; por ejemplo, las investigaciones sobre la dispersión de contaminantes atmosféricos, los estudios relacionados con los incendios forestales, el cálculo de las cargas de vientos sobre las estructuras, la parametrización en los modelos numéricos del tiempo, etcétera.

Materiales y métodos

Datos utilizados

Se utilizaron los datos reportados por la Red de Torres de Referencia Meteorológicas (RTRM) (Fig. 1), instalada para su aplicación en los estudios relacionados con el viento como recurso energético, insertos en el Programa Eólico Cubano.

La ubicación de estas torres obedeció al criterio de cubrir solo aquellas zonas que, por sus características geográficas, topográficas y climáticas, fuesen las

más representativas del país, dada la poca variabilidad del viento en 1 000 hPa (entre 120 m y 130 m). Se hizo énfasis en las regiones montañosas donde los modelos resultan inexactos con miras a estimar o predecir cualquier variable (Roque *et al.*, 2009).

Las variables que se midieron en cada torre son las siguientes: la rapidez FF y la dirección del viento DD , la temperatura T , la humedad H y la presión P . La tabla 1 muestra los detalles de la ubicación de los niveles en las torres; los datos registrados son promedios cada 10 min y las observaciones abarcaron el período 2007–2009.

Cálculo de parámetros de la capa superficial atmosférica

PARÁMETRO DE RUGOSIDAD Z_0 Y VELOCIDAD DE FRICCIÓN U_* :

Estos parámetros están íntimamente relacionados en la capa superficial atmosférica por mediación de la expresión del perfil logarítmico en una atmósfera



Fig. 1 Red de Torres de Referencia Meteorológicas.

TABLA 1

Niveles de medición y variables medidas en la Red de Torres de Referencia Meteorológicas

Torres	Niveles de medición (m)					
	10	30	50	60	75	100
Guanito TV, Pinar del Río	FF, DD, T, H, P	FF, DD	FF, DD		FF, DD, T, H	
Santa Cruz del Norte, La Habana	FF, DD, T, H, P	FF, DD		FF, DD, T, H		
COCC Jagüey, Matanzas	FF, DD, T, H, P	FF, DD		FF, DD, T, H		
El Brinco, Matanzas	FF, DD, T, H, P	FF, DD	FF, DD			FF, DD, T, H
Caibarién, Villa Clara	FF, DD, T, H, P	FF, DD	FF, DD			FF, DD, T, H
Ciego TV, Ciego de Ávila	FF, DD, T, H, P	FF, DD	FF, DD			FF, DD, T, H
Camagüey TV, Camagüey	FF, DD, T, H, P	FF, DD	FF, DD			FF, DD, T, H
Tunas TV, Las Tunas	FF, DD, T, H, P	FF, DD	FF, DD			FF, DD, T, H
El Ramón, Holguín	FF, DD, T, H, P	FF, DD	FF, DD			FF, DD, T, H
Punta Tabacal, Santiago de Cuba	FF, DD, T, H, P	FF, DD		FF, DD, T, H		

neutral para representar el viento en la vertical en la capa superficial atmosférica (Emeis, 2013).

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

donde: u_* es la velocidad de fricción, z_0 es la longitud de rugosidad y k es la constante de Von Karman.

Esta se ajustó a la ecuación de una recta de la forma siguiente:

$$Y = AX + B$$

donde: $A = k/u_*$ es la pendiente de la recta y $B = \ln(z_0)$ es el intercepto. Utilizando los valores medios del perfil vertical del viento para los distintos niveles de medición y uniéndolos por medio de una recta se obtuvieron los distintos valores para cada sitio donde se encuentran enclavadas las torres.

EXPONENTE ALFA DE VARIACIÓN VERTICAL DEL VIENTO CON LA ALTURA:

El cálculo del exponente alfa se realizó, a partir del perfil vertical medio del viento en la capa superficial atmosférica, utilizando la expresión siguiente.

$$\alpha [a \text{ dim}] = \frac{\ln\left[\frac{\bar{v}(z_2)}{\bar{v}(z_1)}\right]}{\ln\left[\frac{z_2}{z_1}\right]} \quad (3)$$

donde $v(z_2)$ y $v(z_1)$ son las velocidades medias a las alturas z_2 y z_1

DENSIDAD DEL AIRE:

Otra de las variables calculadas fue la densidad del aire, mediante la expresión siguiente:

$$\rho = \frac{pv}{RT_v} \quad (4)$$

donde: $R = 2.8705$ es la constante universal de los gases, $T_v = T(1 + 0.61m)$ es la temperatura virtual y m es la razón de mezcla.

PERFIL VERTICAL DEL VIENTO:

Para la determinación del perfil vertical del viento se utilizaron las medias reportadas, cada 10 min, en cada nivel de las torres.

DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA DE LA RAPIDEZ DEL VIENTO. VALORES DE A Y K DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL:

Esta se realizó teniendo en cuenta la distribución bi-paramétrica de Weibull con parámetros A y K (Petersen and Troen, 1986).

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) \quad (6)$$

donde: A es el parámetro de escala y k es el parámetro de forma.

ROSA DE LOS VIENTOS:

Las rosas de los vientos se realizaron solo para el nivel

de 100 m, con los valores reportados cada 10 min; se confeccionaron las rosas horarias y anuales para cada torre.

DENSIDAD MEDIA ANUAL DE POTENCIA DEL VIENTO Y FACTOR DE CAPACIDAD:

La densidad media anual de potencia del viento y el factor de capacidad se calcularon mediante las expresiones siguientes (Technical Note 175, WMO, 1981):

DENSIDAD DE POTENCIA DEL VIENTO P:

$$P \left[\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \right] = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 \quad (7)$$

donde: ρ es la densidad del aire [kg/m^3] y \bar{V}^3 es la media del cubo de la velocidad del viento medida en un sitio dado.

FACTOR DE CAPACIDAD FC [%]:

$$FC[\%] = \frac{EPT[\text{MWh}]}{EPT_{\text{CAP. NOMINAL}}[\text{MWh}]} * 100 \quad (7)$$

donde: EPT [MWh] es la energía producida por la turbina y $EPT_{\text{CAP. NOMINAL}}$ [MWh] es la energía producida por la turbina a su capacidad nominal.

La tabla 2 muestra las clases de energía del viento utilizadas a propuesta de la Organización Meteorológica Mundial en su *Nota técnica* no. 175, 1981 (versión en inglés).

Análisis de los resultados

Análisis estadístico y climatológico de la información procedente de las torres de gradiente

Perfil vertical del viento

La figura 2 muestra el comportamiento del perfil vertical del viento para el período seleccionado. Se evidencia la cizalladura del viento en los niveles próximos al suelo y el incremento del viento con la altura para la capa superficial atmosférica.

Del análisis de la figura puede deducirse lo siguiente:

1. En la costa norte, en las torres de Santa Cruz del Norte y El Ramón se alcanzan valores notables de la rapidez del viento, favorables para la producción de electricidad a gran escala. Las torres de prospección ubicadas en esos sitios cercanos confirman esta aseveración (Soltura, 2011).
2. Para regiones interiores, resulta llamativo el agrupamiento de los perfiles verticales, lo cual indica su comportamiento homogéneo tierra adentro, aunque solo en alturas cercanas a 100 m se registran valores del viento aprovechables para la producción de electricidad a mediana y gran escalas, sobre todo en la región centro-oriental del país (Ciego de Ávila-Holguín).
3. Para la costa sur, la zona oriental no parece tener valores llamativos —esto fue, asimismo, corroborado por la red de prospección eólica—, con excepción

TABLA 2

Clases de energía del viento utilizadas

Clases de Energía	Clasificación	Altura: 10 m		Altura: 50 m	
		Velocidad media (m/s)	Densidad de Potencia (W/m ²)	Velocidad media (m/s)	Densidad de Potencia (W/m ²)
1	Pobre	0-4.4	0-100	0-5.6	0-200
2	Marginal	4.4-5.1	100-150	5.6-6.4	200-300
3	Moderado	5.1-5.6	150-200	6.4-7.0	300-400
4	Bueno	5.6-6.0	200-250	7.0-7.5	400-500
5	Excelente	6.0-6.4	250-300	7.5-8.0	500-600



Fig. 2 Perfil vertical medio del viento para las torres de las costas norte y sur, y las regiones interiores. Santa Cruz del Norte (SCN), Caibarién (CAI), El Ramón (RAM), El Brinco (BRI), Punta Tabacal (TAB), Jagüey Grande (JAG), Ciego TV (CIE), Camagüey TV (CAM), Tunas TV (TUN).

de algún punto muy local. En la zona occidental, la torre de El Brinco permite inferir que el empleo del viento a gran escala con miras a la producción de electricidad tendría que utilizar aerogeneradores con alturas cercanas o superiores a 100 m.

Uno de los aportes obtenidos con el análisis estadístico-climatológico de la información procedente de

las torres de gradiente es la posibilidad de mostrar en cuánto se incrementa el viento por encima de 50 m de altura y hasta 100 m, lo cual resulta de interés para los estudios de prospección, puesto que la red en la que se basa su estudio solo comprende torres de 50 m de altura. De manera general, se encontró que el incremento del viento por encima de 50 m estuvo en 53 % de los casos estudiados (297 766 datos), por debajo de 1 m/s y en 70 % por debajo de 1.5 m/s (Fig. 3). Los casos notables de incremento de esta variable (no mostrados) estuvieron vinculados con la influencia de los huracanes Gustav e Ike.

Para cada torre (El Brinco, Caibarién TV, Ciego TV, Camagüey TV, Tunas TV y El Ramón) el comportamiento es similar (Roque *et al.*, 2010). Este incremento de la rapidez del viento entre 50 m y 100 m pone en duda la necesidad de aumentar la altura del rotor de los aerogeneradores en Cuba con vistas a aprovechar mejor la energía del viento, aunque podría obtenerse una conclusión definitiva con un estudio de factibilidad en cierto lugar para el posible emplazamiento de un parque eólico.

Oscilación diaria de la rapidez del viento

El comportamiento horario u oscilación diaria del viento se muestra en las figuras 4a, b, c; 5a, b, c, d y e; y 6a y b. Se aprecia la evolución temporal del perfil, y se denota denotándose el incremento de los valores medios en las horas del día para la costa norte, lo cual no ocurre en la costa sur ni en las zonas interiores para los niveles altos, sobre todo en 50 m y 100 m sobre la superficie.

COSTA NORTE:

La figura 4 presenta los valores máximos del valor medio de la rapidez del viento para las torres ubicadas en la costa norte, los cuales se alcanzan en el último nivel de cada torre a las 1500 hora local y superan 6 m/s —incluso, en Santa Cruz del Norte y El Ramón rebasan 7 m/s— y es, por tanto, donde deben

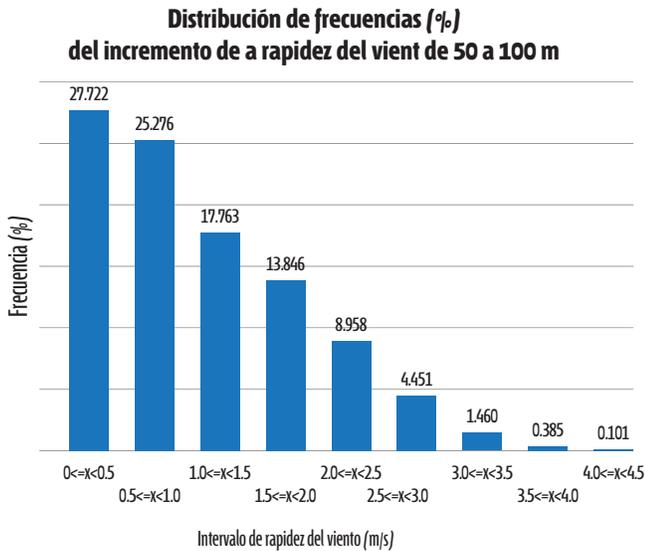


Fig. 3 Distribución de frecuencia (porcentaje) del incremento de la rapidez del viento de 50 m a 100 m de altura en la muestra analizada.

esperarse los mejores rendimientos de los aerogeneradores que se instalen en estas zonas.

ZONAS INTERIORES

Para las zonas interiores (Fig. 5), excepto Guanito TV, cuya orografía puede catalogarse de compleja, las demás torres mostraron un comportamiento similar; se obtuvieron, al igual que para la costa norte, los valores máximos del valor medio de la rapidez del viento a las 1700 hora local. En Ciego TV, Camagüey TV y Tunas TV, estos máximos igualan o superan en 100 m de altura, 7 m/s. En la torre de COCC Jagüey Grande es posible registrar un valor similar a 100 m, porque a 60 m de altura su valor es alrededor de 6 m/s, que es el valor aproximado de las torres anteriores a 50 m.

COSTA SUR

En la torre de El Brinco (Fig. 6), ubicada en la costa sur occidental, los máximos registros del valor medio para la rapidez del viento se alcanzan en las horas de la noche y la madrugada; casi todo ese período se mantienen próximos o ligeramente superiores a 7 m/s en 100 m de altura, lo cual la diferencia de lo visto anteriormente.

En la torre de Punta Tabacal, situada en la costa sur oriental, se obtiene un comportamiento similar, aunque su patrón es más semejante al obtenido en Guanito TV, lo que hace suponer que esta conducta es típica de una orografía compleja.

Algo importante que muestran estas gráficas es el comportamiento de los valores de la rapidez del viento para diferentes horarios. En las torres ubicadas en la costa norte, en la horas de madrugada y primeras de la mañana se produce un descenso de la rapidez del viento, que cesa entre las 08:00 y las 09:00 hora local; coincidentemente, en estos horarios también cesa la inversión superficial de la temperatura (Fig. 7). A partir de este horario, los valores de la rapidez del viento comienzan a experimentar un ascenso marcado, que alcanza sus máximos valores entre las 1300 y las 1500 hora local.

En El Ramón, no es posible mostrar la inversión de temperatura por solo poseer datos en el nivel de 100 m, aunque dado el comportamiento de la temperatura en las demás torres, no debe descartarse la ocurrencia de una inversión de temperatura en este sitio.

En las zonas interiores (COCC Jagüey Grande, Ciego TV, Camagüey TV y Tunas TV), el comportamiento diario del viento presenta características similares entre las distintas regiones; a diferencia de las torres ubicadas en la costa norte, en estas de regiones interiores, en la madrugada, los valores de rapidez del viento se mantienen casi constantes hasta las 0700 hora local, cuando estos valores sufren un descenso brusco en los niveles de 50 m y 100m, que se manifiesta durante un período corto de alrededor de 2 h (o sea, hasta las 0900 hora local) y luego los valores de la rapidez del viento permanecen casi constantes hasta las 1500 hora local, en que experimentan un ascenso rápido, cuyo máximo se obtiene alrededor de las 1700 hora local, es decir, aproximadamente 2 h posteriores al horario en que se alcanza el máximo para la costa norte.

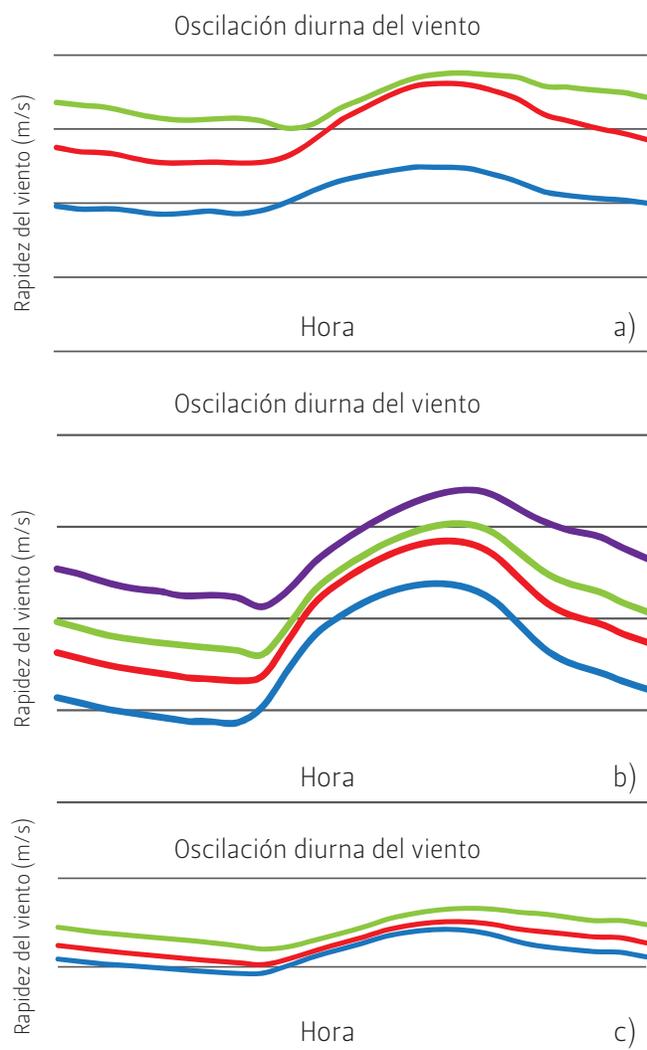


Fig. 4 Oscilación diaria de la rapidez del viento en las torres de la costa norte: a) Santa Cruz del Norte, b) Caibarién TV y c) El Ramón.

Este descenso brusco registrado para los niveles de 50 m y 100 m, asimismo, coincide con la ruptura de la inversión en esos horarios (Fig. 8).

En la costa sur occidental sucede algo similar a lo que ocurre en las zonas interiores, solo que después del descenso brusco producido en las primeras horas de la mañana, los valores de la rapidez del viento se mantienen constantes todo el horario diurno, hasta las 2000 hora local, cuando comienza un ascenso mantenido de estos valores hasta las 0700 hora local, horario en que se mantienen constantes hasta el

momento de la ruptura. Al igual que en las demás torres analizadas, el horario de descenso coincide con la ruptura de la inversión superficial de temperatura (Fig. 9).

En la torre de Punta Tabacal, ubicada en la costa sur oriental, si bien no es notable la amplitud de la oscilación del comportamiento diario de la rapidez del viento, como sí es evidente El Brinco, se aprecia un ligero descenso en el nivel de 60 m para el mismo horario (0700-0900 hora local), pero el máximo se alcanza alrededor de las 1500 hora local. Sin embargo, no se manifiesta una inversión superficial de la temperatura, sino que, entre las 2000 y 0700 horas de la mañana siguiente, los valores de temperatura media son muy similares, lo cual propone que la capa tiene un comportamiento casi isotérmico (ver Fig. 9). Una situación similar ocurre para la torre de Guanito TV, en Pinar del Río; de modo que tal vez en ambos casos la situación esté motivada por la orografía de ambos sitios.

Aunque en este análisis se ha hecho una vinculación marcada con las inversiones superficiales de temperatura, no debe obviarse un fenómeno más importante, causante de tal conducta en la oscilación diaria del viento: la circulación local de las brisas, el cual fue analizado en Carrasco *et al.* (2010).

Oscilación anual del viento

Las figuras 10 y 11 permiten apreciar el comportamiento anual de la rapidez del viento en el nivel de 100 m (los demás niveles poseen igual conducta). Para todas las torres, el comportamiento refleja el patrón anual mostrado por las estaciones de superficie (Soltura *et al.*, 2006), es decir, los valores máximos se alcanzan en el semestre noviembre-abril (período poco lluvioso), mientras que los valores mínimos se reportan en el semestre mayo-octubre (período lluvioso). En El Ramón, aunque solo se graficó 2008, su patrón no se diferencia mucho de lo reportado para las estaciones de superficie del oriente del país (Sol-

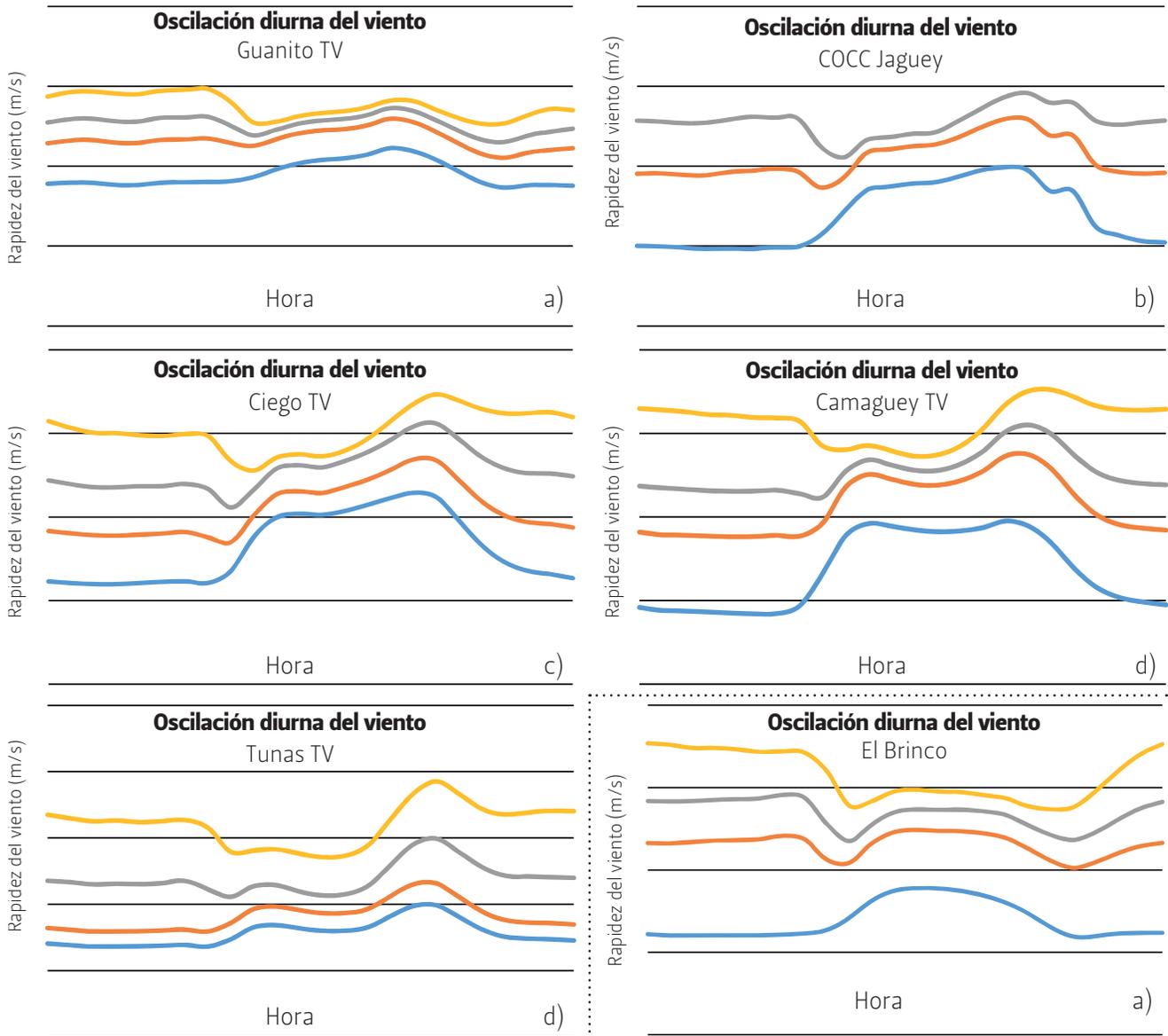


Fig. 5 Oscilación diaria de la rapidez del viento en las torres de las zonas interiores: a) Guanito TV, b) COCC Jagüey Grande, c) Ciego TV, d) Camaguey TV y e) Tunas TV.

tura *et al.*, 2006), en particular, el obtenido para la estación de superficie de Punta Lucrecia, con una serie de datos larga, por lo cual es de suponer que este patrón está cercano al real que debe obtenerse para este sitio. Es decir, a diferencia de las demás torres, presenta los máximos en noviembre y diciembre, pero en julio y agosto también se registran valores de la rapidez del viento comparables con los

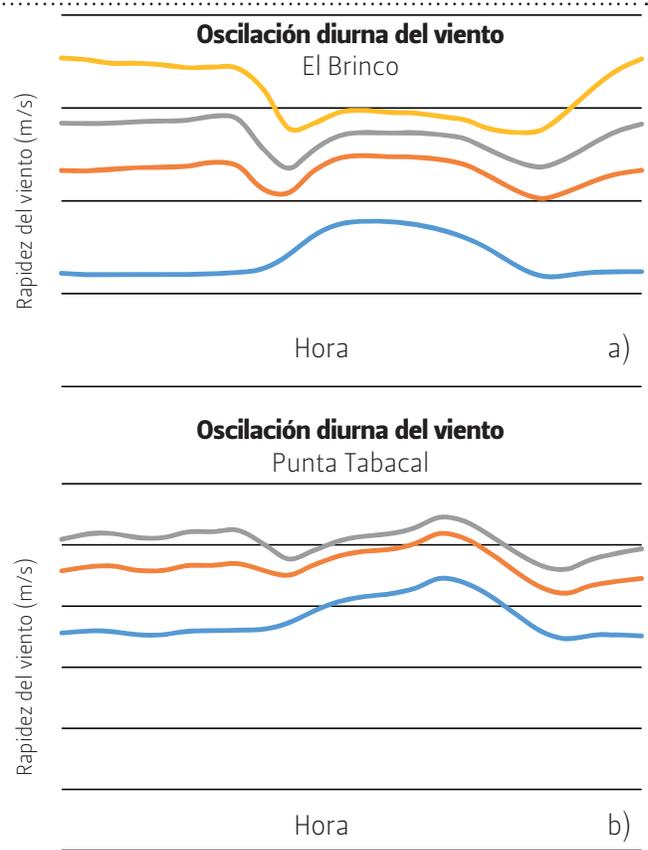


Fig. 6 Oscilación diaria de la rapidez del viento en las torres de la costa sur: a) El Brinco y b) Punta Tabacal.

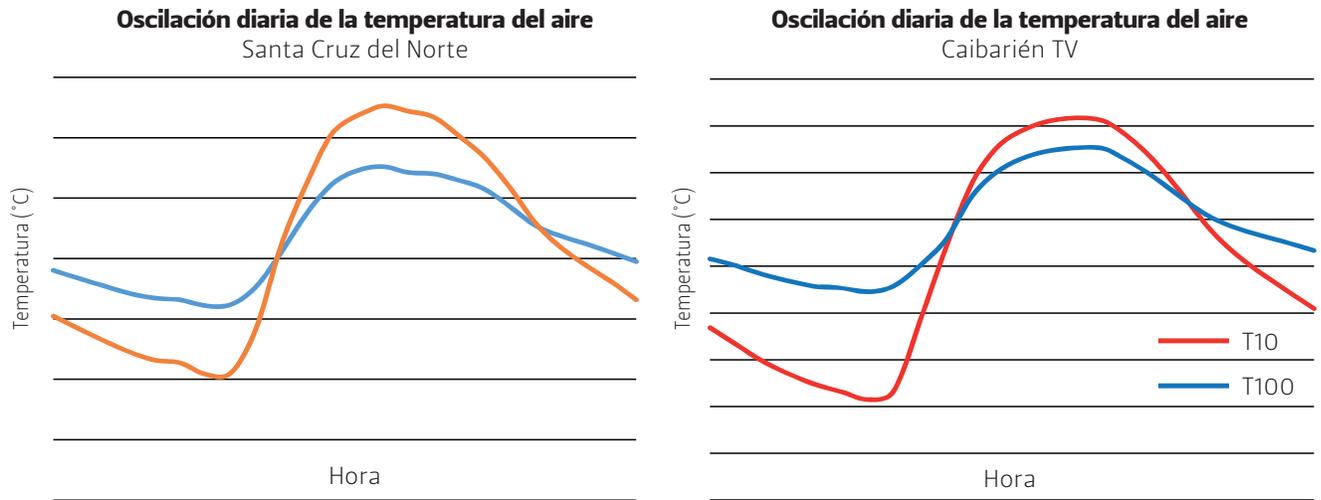


Fig. 7 Oscilación diaria de la temperatura para las zonas de las torres de Santa Cruz del Norte y Caibarién TV.

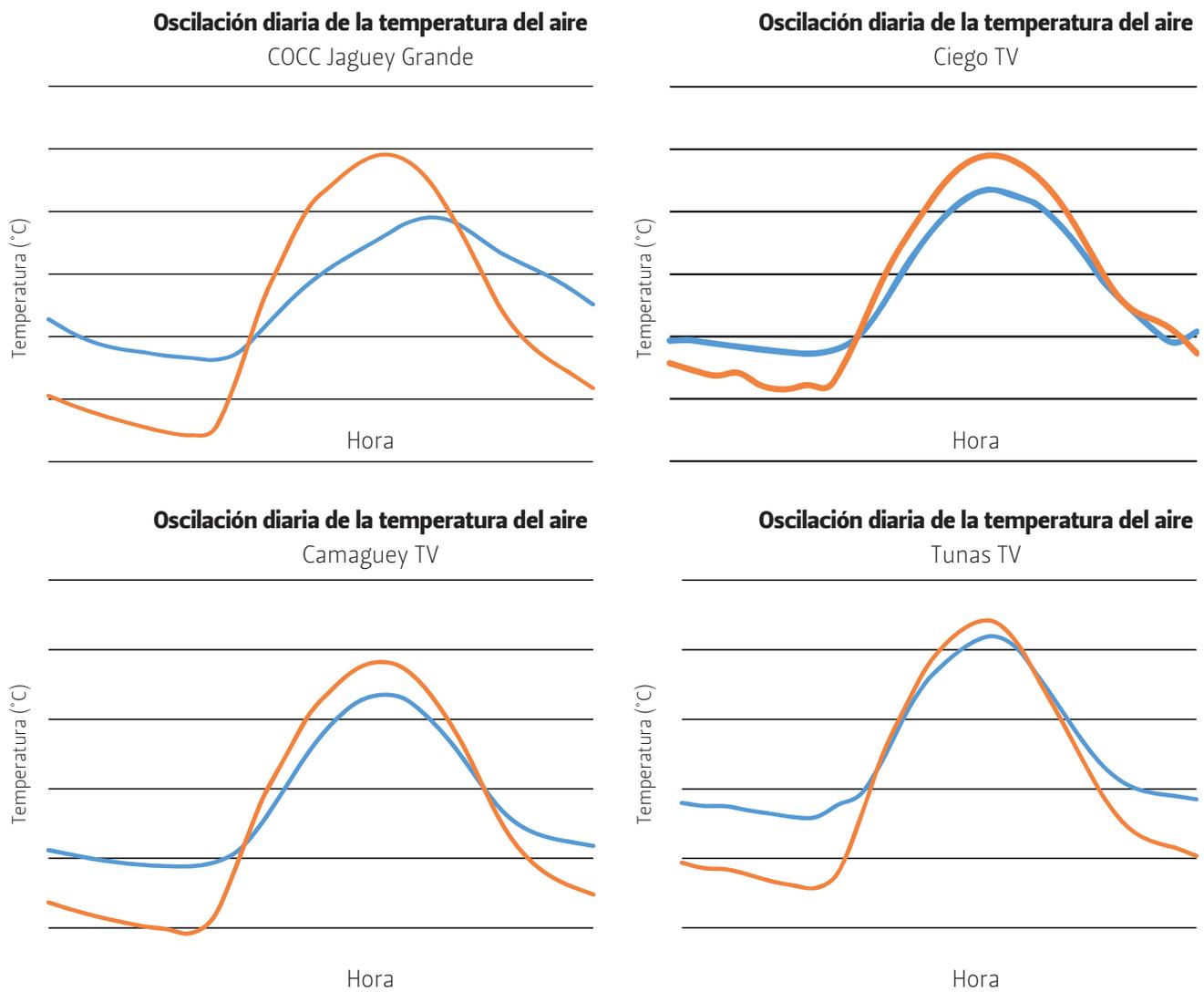


Fig. 8 Oscilación diaria de la temperatura en las zonas de las torres de COCC Jagüey Grande, Ciego TV, Camagüey TV y Tunas TV.

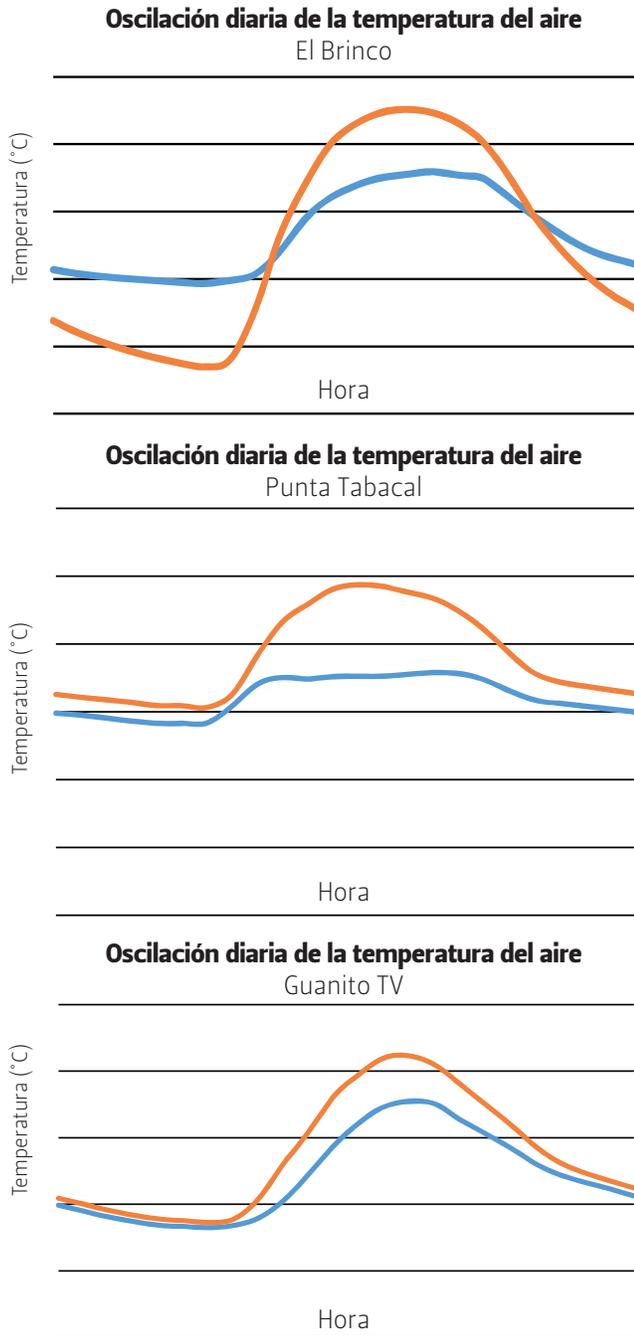


Fig. 9 Oscilación diaria de la temperatura en las zonas de las torres de El Brinco, Punta Tabacal y Guanito TV.

obtenidos para esos meses, lo cual convierte a esta región como muy prometedora para el uso de la energía eólica todo el año.

Este comportamiento de la torre de El Ramón se aprecia mejor cuando se compara el nivel de 10 m con los datos reportados por la estación de superficie de

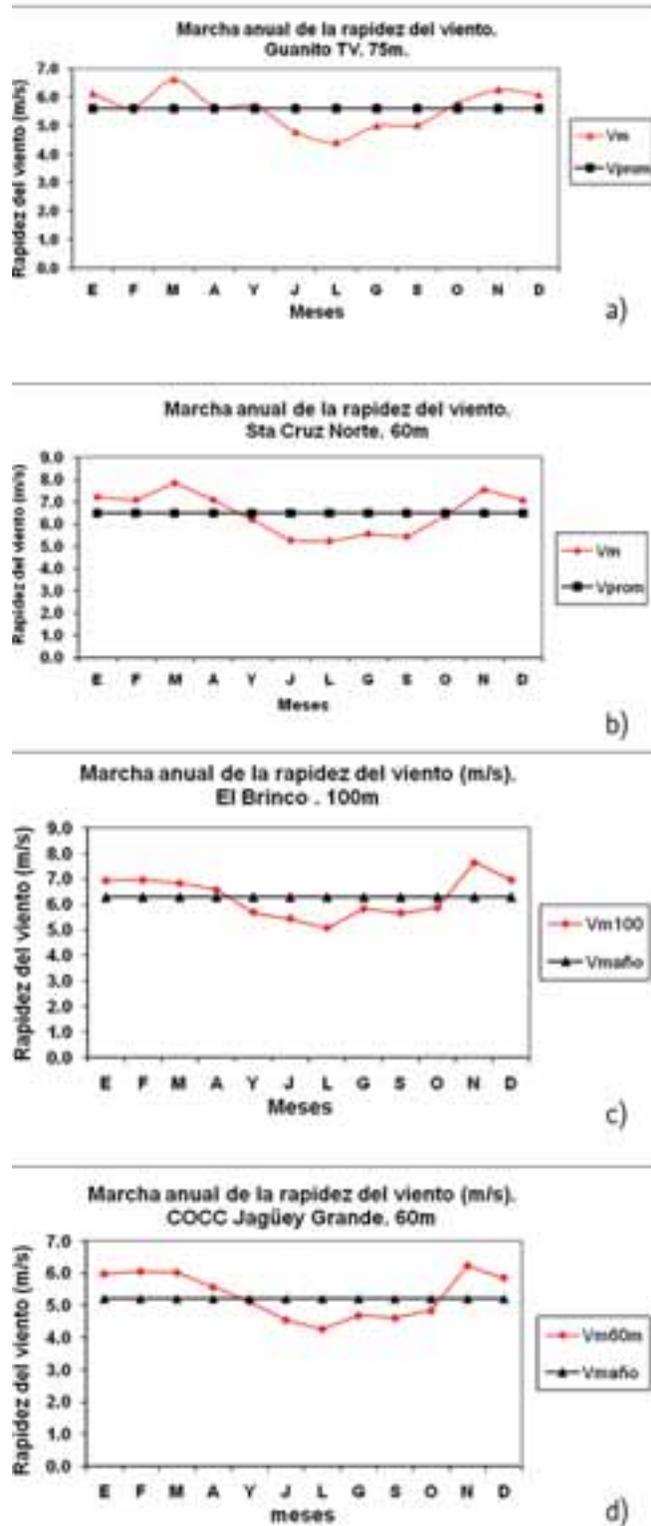


Fig. 10 Marcha anual de la rapidez del viento para las torres: a) Guanito TV, b) Santa Cruz del Norte, c) El Brinco y d) Jagüey Grande.

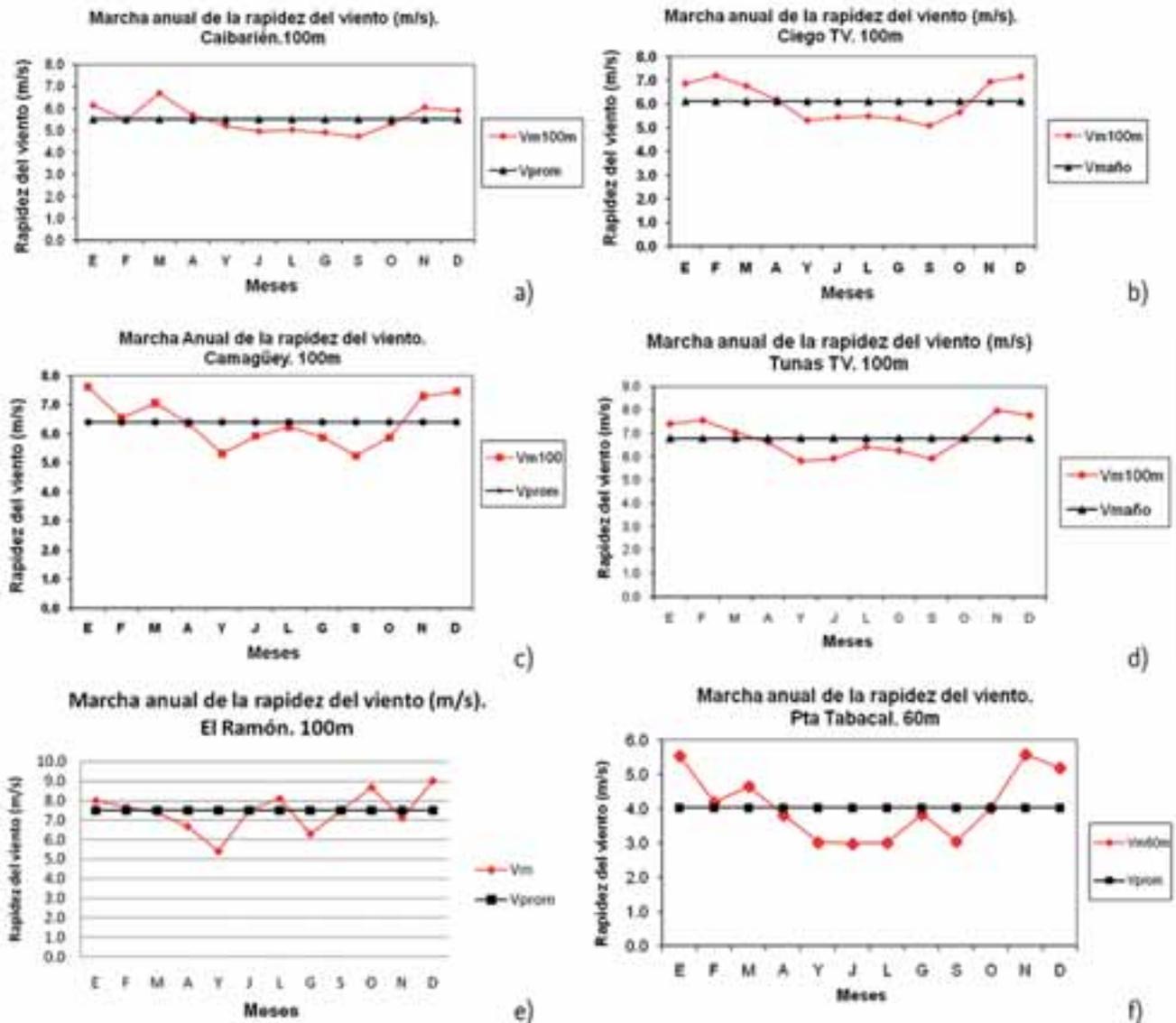


Fig. 11 Marcha anual de la rapidez del viento para las torres: a) Caibarién TV, b) Ciego TV, c) Camagüey TV, d) Tunas TV, e) El Ramón y f) Punta Tabacal.

Punta Lucrecia los años en que existieron mediciones comunes (Fig. 12).

La rosa de los vientos anual para los distintos sitios de emplazamiento de las torres (Fig. 13) mostró mucha similitud con los rumbos más frecuentes reportados por las estaciones meteorológicas de superficie. Es decir, se muestra un comportamiento típico de las zonas costeras y las zonas interiores, desde occidente a oriente, tal como lo reflejan las estaciones de superficie.

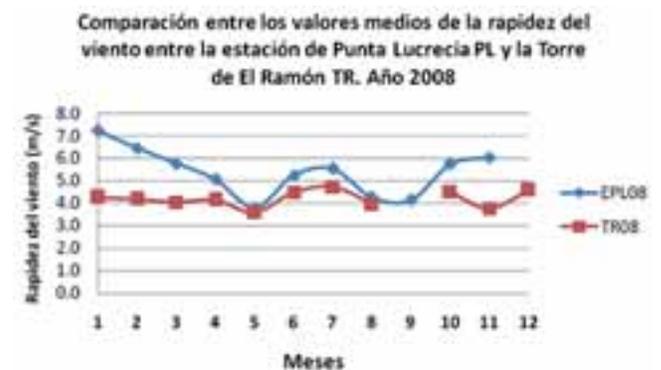


Fig. 12 Comparación entre los valores de la rapidez del viento a 10 m entre la estación de Punta Lucrecia y la Torre de El Ramón.

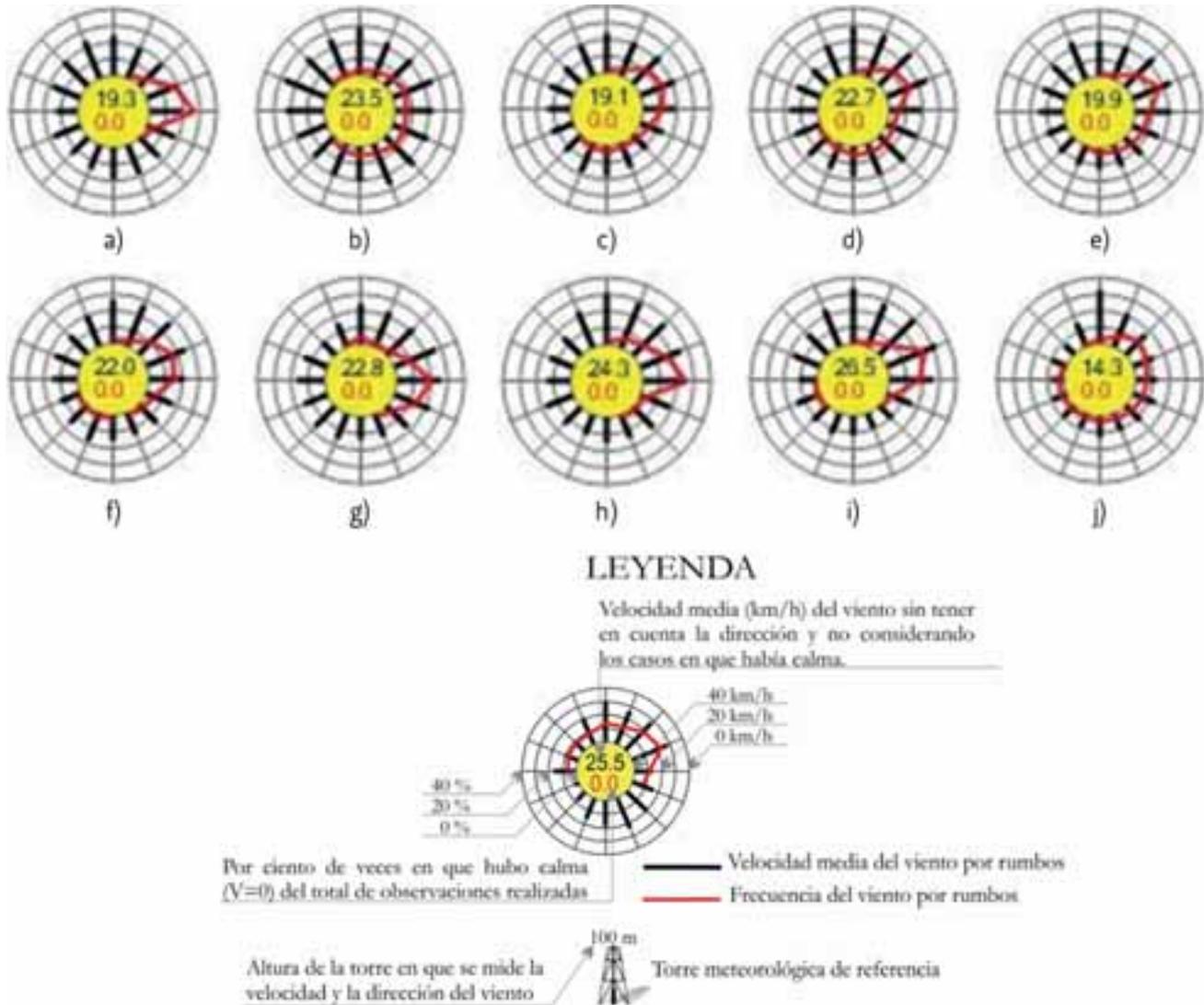


Fig. 13 Rosa de los vientos anual para los sitios de emplazamientos de las torres: a) Guanito TV, b) Santa Cruz del Norte, c) COCC Jagüey Grande, d) El Brinco, e) Caibarién TV, f) Ciego TV, g) Camagüey TV, h) Tunas TV, i) El Ramón y j) Punta Tabacal.

En las figuras se muestra la prevalencia de los rumbos entre el noreste (NE) y el este (E), como es típico de casi todo el año en Cuba, debido, en lo fundamental, a la influencia del Anticiclón Subtropical del Océano Atlántico.

Distribución de frecuencia de la rapidez del viento.

Distribución de Eiebull

Una de las informaciones más importantes para los estudios del potencial eólico es la distribución de frecuencias del viento, puesto que permite conocer

cuáles son los valores más aprovechables energéticamente.

En la actualidad, una amplia gama de los aerogeneradores que se comercializan en el mundo comienzan su funcionamiento a partir de 4 m/s; por ello, resulta vital conocer la frecuencia de la rapidez del viento por encima de este valor y, de este modo, el porcentaje de tiempo anual en que el aerogenerador estará produciendo.

Las figuras 14 y 15 muestran la distribución de frecuencia y los valores A y K de la distribución de Wei-

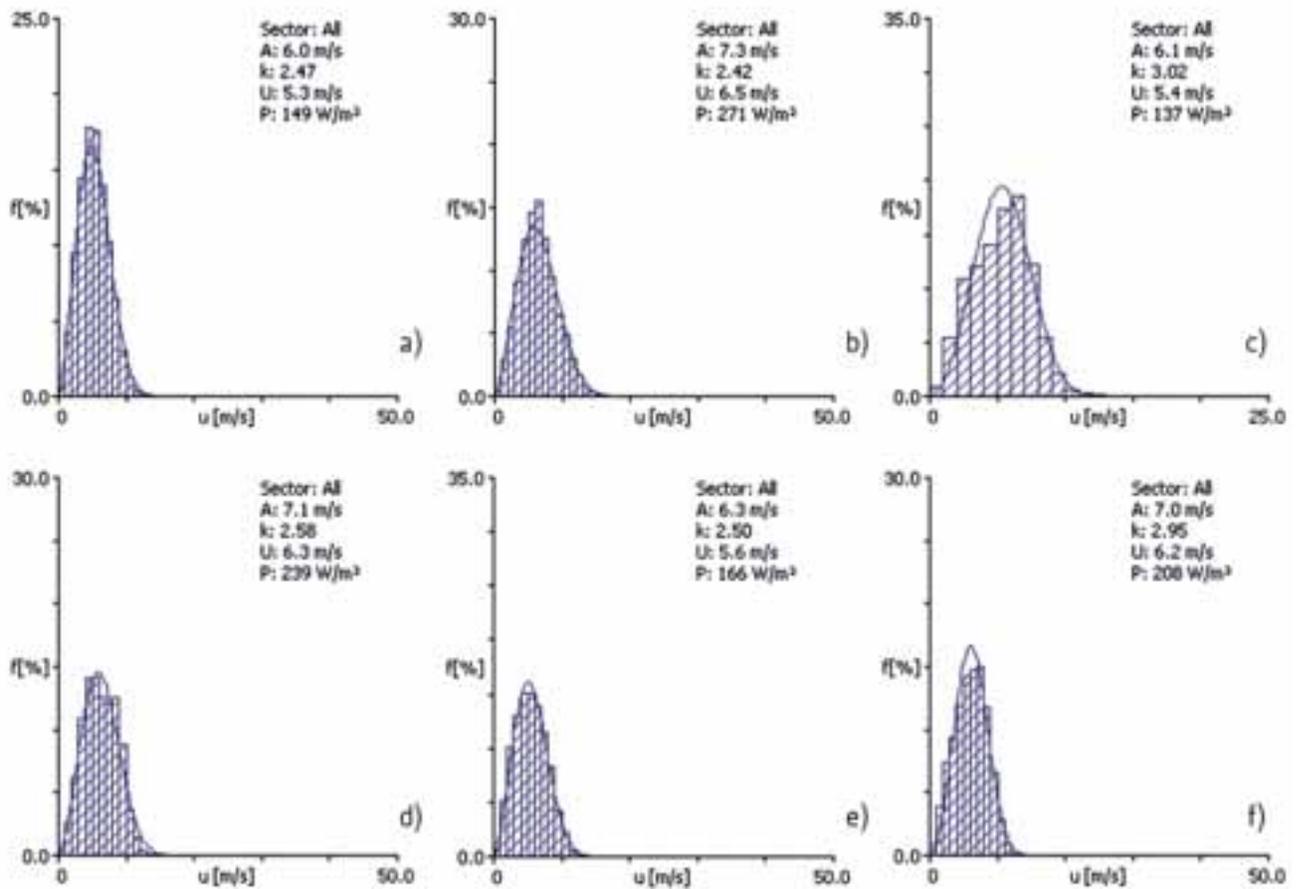


Fig. 14 Distribución de frecuencia del viento en las torres: a) Guanito TV (75 m), b) Santa Cruz del Norte (60 m), c) Jagüey Grande (60 m), d) el Brinco (100 m), e) Caibarién (100 m) y f) Ciego TV (100 m).

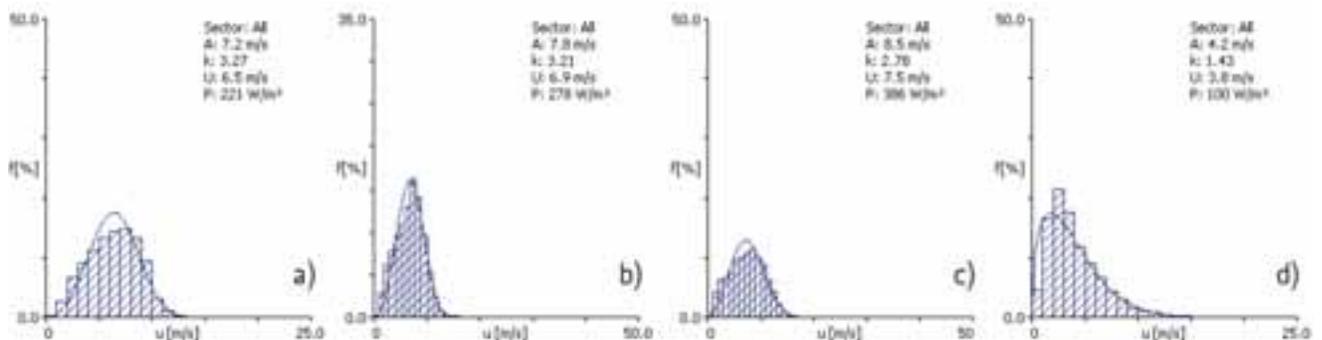


Fig. 15 Distribución de frecuencia del viento en las torres: a) Camagüey TV (100 m), b) Tunas TV (100 m), c) El Ramón (100 m) y d) Punta Tabacal (60 m).

bull, así como la densidad de potencia del viento para el sitio. Se confirma el buen ajuste de esta distribución para las valores de la rapidez del viento, con diferencias entre el valor medio estimado por la distribución de Weibull y el valor real de la distribución del sitio

inferiores a 1 %. El uso de esta distribución en los datos de las estaciones de superficie para la elaboración del **Mapa del potencial eólico** arrojó diferencias entre 10 % y 20 % (Soltura, 2006), lo cual avala las mediciones realizadas con este equipamiento novedoso.

Al agrupar los valores de A y K para cada torre (Tabla 3) se aprecia que los registros mayores se hallan para las torres del interior del país, mientras que los menores se localizan en las zonas costeras, con excepción de Guanito TV. Las estaciones utilizadas en la elaboración del *Atlas eólico europeo* mostraron un comportamiento similar (Petersen, E. L. y Troen, I. 1986).

De la tabla también se constata hacia dónde se ubican las mejores zonas para el aprovechamiento del recurso eólico. Se aprecia que la torre de El Ramón, ubicada en la zona norte de la provincia de Holguín, arroja densidades de potencia DP superiores a 300 W/m^2 , lo cual se confirma con los estudios de prospección en esta zona (Soltura *et al.*, 2009). Asimismo, se corrobora lo obtenido en el perfil vertical medio del viento para la zona de Punta Tabacal, al registrarse valores de la densidad de potencia media del viento de solo 100 W/m^2 .

Exponente alfa de variación vertical del viento con la altura

El exponente *alfa* fue otro parámetro calculado que se deriva de los resultados del epígrafe anterior; este

se determinó mediante el perfil vertical de viento para condiciones neutrales (Tabla 4). La importancia de este parámetro es poder calcular la rapidez media del viento en cualquier nivel a partir de un valor de referencia medido (generalmente la rapidez del viento a 10 m), lo cual facilita obtener el valor de rapidez del viento a la altura del buje del aerogenerador seleccionado o la de un molino de viento dado e, incluso, a la altura de una chimenea cuya altitud ronde el entorno de 100 m .

Velocidad de fricción y longitud de rugosidad

A continuación, se presenta un ejemplo de la aplicación de la metodología para el cálculo de ambos parámetros. La figura 16 muestra el ploteo de los datos de $\ln(z)$ en función de $u(z)$ para la torre de Camagüey TV, los cuales están unidos por una recta; se determina el intercepto y la pendiente de la curva, y se obtienen los valores de u_0 y z_0 . Este procedimiento se realizó para todas las torres y se obtuvieron los valores recogidos en la tabla 5.

TABLA 3

Valores de A y K obtenidos con la distribución de Weibull y densidad de potencia del viento DP en el último nivel de medición para las zonas de las torres

Torres	Guanito TV	Santa Cruz del Norte*	COCC Jagüey Grande*	El Brinco	Caibarién TV	Ciego TV	Camagüey TV	Tunas TV	El Ramón	Punta Tabacal*
A	6.0	7.3	6.1	7.1	6.3	7.0	7.2	7.8	8.5	4.2
K	2.47	2.42	3.02	2.58	2.5	2.95	3.27	3.21	2.78	1.43
DP (W/m ²)	149	271	137	239	166	208	221	278	386	100

TABLA 4

Exponente alfa de variación vertical del viento para las torres

Torre	Gua. TV	Scn	Jag	Bri	Cai. TV	Cie. TV	Cam. TV	Tun. TV	Ram	Tab
alfa	0.22	0.27	0.24	0.30	0.18	0.31	0.22	0.23	0.17	0.10

TABLA 5

Valores de la velocidad de fricción y el parámetro de rugosidad para las distintas zonas de las torres

Torre	Guanito TV	SCN	COCC JG	El Brinco	Caibarién TV	Ciego TV	Camagüey TV	Tunas TV	Punta Tabacal
z_0	0.44	0.37	0.38	0.28	0.35	0.37	0.33	0.29	0.17
u^*	0.41	0.45	0.43	0.37	0.40	0.50	0.44	0.38	0.01

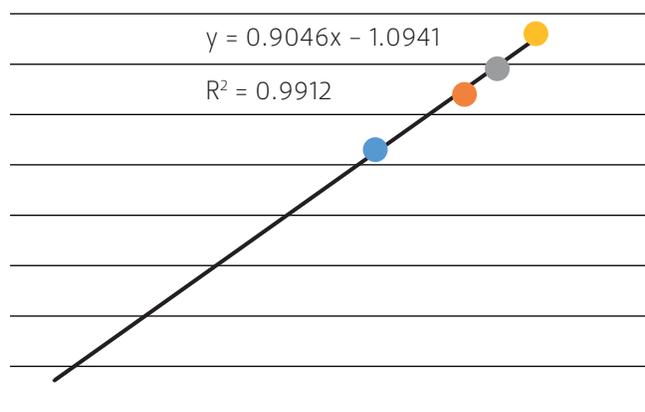


Fig. 16 Curva de ajuste de los datos de $\ln(z)$ en función de $u(z)$ para la torre de Camaquëy TV.

$$Fu^* = A = 0.4/0.904 = 0.44$$

$$z_0 = \exp(-1.094) = 0.33$$

Al igual que el parámetro *alfa*, estos parámetros permiten calcular para un sitio dado, conociendo u y z , cuál será la rapidez del viento en cualquier nivel dentro de la capa superficial atmosférica.

Comportamiento de la densidad del aire

Otro parámetro importante en los estudios de la capa superficial atmosférica es la densidad del aire, la cual había visto limitado su estudio en las investigaciones mencionadas en la Introducción de este trabajo. El hecho de contar con mediciones en diferentes condiciones físico-geográficas permite ampliar el conocimiento sobre esta variable en la CSA sobre Cuba. La proporcionalidad entre la densidad de potencia del viento y la densidad del aire, hace que el comportamiento de esta variable influya en el rendimiento de los aerogeneradores en los sitios de emplazamientos.

La figura 17 presenta la oscilación diaria de este parámetro en la capa superficial atmosférica para la torre de El Brinco, la cual es similar para todas las torres (Roque *et al.*, 2010) y no se muestran por motivos de espacio. La primera característica es que sus valores no alcanzaron 1.222 g/m^3 , utilizado como es-

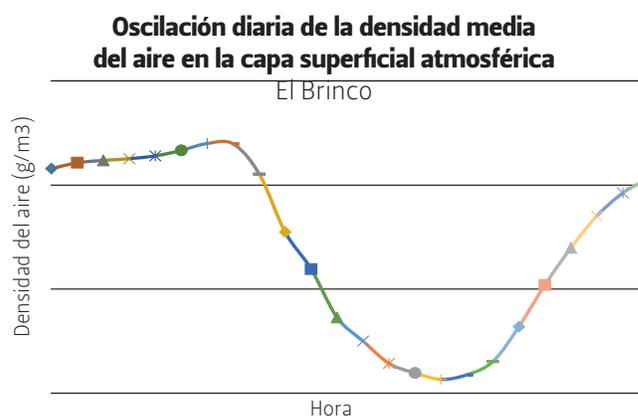


Fig. 17. Oscilación diaria de la densidad media del aire en la capa superficial atmosférica en la torre de El Brinco.

tándar en los estudios atmosféricos.

El comportamiento de este parámetro exhibe, en el día, una oscilación similar a la de la temperatura y el mínimo en los horarios del mediodía, debido a la fuerte convección en esos horarios, que eleva el contenido de humedad de las capas bajas de la atmósfera a las capas superiores, y se produce una disminución de la densidad en esos horarios. Los valores mínimos estuvieron en el entorno de 1.145 g/m^3 y los máximos se hallaron alrededor de 1.196 g/m^3 .

Conclusiones

El análisis de la información de viento procedente de las torres de referencia meteorológicas y los mástiles de prospección, junto con los registros de las estaciones de superficie del Instituto de Meteorología, permitieron arribar a las conclusiones siguientes:

4. Por vez **primera**, en Cuba, se obtienen datos de variables meteorológicas con una resolución alta en la capa superficial atmosférica.
5. Se obtuvo el perfil vertical del viento para diferentes condiciones físicas.
6. La determinación del perfil vertical del viento en condiciones neutrales de la atmósfera permitió el

cálculo de los valores de Z_0 , U^* y el exponente *alfa* de variación vertical con la altura, para diferentes condiciones físico-geográficas de Cuba.

7. El perfil vertical medio del viento confirmó que los valores más altos de la rapidez del viento se alcanzan en la costa norte de la zona oriental de Cuba.
8. El incremento de la velocidad del viento por encima de 50 m de altura y hasta 100 m estuvo en más de 70 % de los casos por debajo de 1.5 m/s.
9. La oscilación diaria del viento mostró diferencias entre las torres ubicadas en la costa norte, las zonas interiores y la costa sur. En las zonas interiores y la costa sur occidental se produce una inversión en los valores de rapidez del viento durante el horario diurno para los niveles de 50 m y 100 m.
10. La marcha anual de la rapidez del viento confirma el patrón encontrado por las estaciones de superficie, donde los mayores valores de la rapidez del viento se alcanzan en noviembre-abril.
11. La rosa de los vientos para cada torre corroboró el rumbo predominante para el viento en Cuba: entre el noreste (NE) y el este (E).
12. Las categorías de estabilidad encontradas denotan una gran estabilidad para los horarios de la noche, la madrugada y las primeras horas de la mañana debido, en lo fundamental, a la ocurrencia de inversiones superficiales de temperatura o capas de isotermas.
13. La densidad del aire presenta una disminución en las horas del mediodía y los valores medios máximos nunca sobrepasaron 1.2 g/m³.
14. La distribución de frecuencia de los valores de la rapidez del viento son bien ajustados por la distribución biparamétrica de Weibull. El error del ajuste es inferior a 1 %, y esto lo diferencia de lo obtenido para las estaciones de superficie utilizadas en la elaboración del **Mapa de potencial eólico**, donde el error del ajuste estuvo entre 10 % y 20 %.
15. La distribución de frecuencia de los valores de la rapidez del viento para la torre de El Ramón de-

muestra que la zona norte oriental se encuentra entre las mejores para el empleo de la energía eólica con miras a la producción de electricidad.

Referencias bibliográficas

- CARRASCO, M., ROQUE, A., MONTARTE, O. & RIVAS, D. 2011. Local Breeze Effects on the Wind Energy Generation in the Northern Coast of Cuba.. *WIND ENGINEERING*, 35.
- , ROQUE, A & CARNESOLTAS, M. 2012. Caracterización de la brisa de mar y el terral para un mejor aprovechamiento de la energía eólica. *Ciencia Tierra y Esp.*, II Época, Vol. 13/ No. 2/ julio-diciembre /2012 / p.43-56, ISSN 1729-3790.
- EMEIS, S. 2013. *Wind Energy Meteorology. Atmospheric Physics for Wind Power Generation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.*
- GOLDER, D. 1972. Relation among stability parameters in the surface layer. *Boundary Layer Meteor.* 3, 47-58.
- HALTNER, G. & MARTIN, F. 1957. *Meteorología Dinámica y Física.* McGraw Hill Book\ Company SA. New York, Londres, Toronto.
- MONIN, A. S. & ZILITINKEVICH, S. S. 1974. Similitary theory and resistance laws for the planetary boundary layer. *Bound. Layer Meteor.* 7, 391-397.
- PETERSEN, E. L. & TROEN, I. 1986. *European Wind Atlas. European Wind Energy Association, Conference and Exhibition, Roma, Italy.*, Copyright por Riso National Laboratory.
- ROQUE, A. Caracterización física-meteorológica de la capa superficial atmosférica sobre cuba y su aplicación al estudio del viento con fines energéticos. *Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología.*, 2009. Ciudad Habana.
- , 2010. Caracterización física-meteorológica de las capas bajas de la atmosfera a partir de la implementación de una red de torres altas

de gradiente y su aplicación al estudio del viento como fuente de energía. Informe Científico-Técnico, Instituto de Meteorología, 220 pp.

SOLTURA, R., MON, S., RODRÍGUEZ, G., AYALA, L. & BÁEZ, R. 2001. Actualización de los modelos físicos y estadísticos del atlas eólico de Cuba, *Revista Cubana de Meteorología*, 8, 83-95.

_____, ROQUE, A., RIVERO, I., WALLO, A., BÁEZ, R., VÁZQUEZ, R., RIVERO, R., AYALA, L., RODRÍGUEZ, G., CARRASCO, H., CURBELO, A., GONZÁLEZ, A., HERRERA, O., MARTÍN, G., DÍAZ, J., HERNÁNDEZ, G. 2006. Mapa de potencial eólico de cuba. Aplicación de un modelo de microescala (Wa^sp). Informe Científico-Técnico, Instituto de Meteorología, 49.

_____, GONZÁLEZ, A., NOVO, R., LEIVA, G.,

VERA, O., OCHOA, E. 2011. Resultados del Programa de Prospección Eólica 2005-2010. Certificación de los datos de viento y optimización de la red. CIER 2011, Palacio de las Convenciones de La Habana.

Technical Note No. 175. 1981. Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an Energy Source. World Meteorological Organization. WMO-No. 575. 1981. <http://catbiblio.uv.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=172760>

Agradecimientos

A los técnicos e instrumentistas de todo el Servicio Meteorológico Nacional y a las empresa Radiocuba y ETECSA, por el apoyo brindado para el montaje y la reparación de las averías presentadas en los instrumentos meteorológicos colocados, durante el período de medición, en las torres de televisión seleccionadas.