

Disminución de la rapidez del viento en la capa superficial atmosférica. Su influencia en el aprovechamiento eólico

Decrease of the wind speed in the atmospheric superficial layer. Its influence in the eolic use

Lic. **Beatriz Martínez Pérez** | beatriz@cmw.insmet.cu | Centro Meteorológico Provincial de Camagüey

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

Recibido: enero 15 de 2015; aceptado: marzo 7 de 2015

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivos describir la disminución de los valores de la rapidez del viento que tiene lugar en la capa superficial atmosférica en horas de la mañana y finales de la tarde, en dos zonas costeras de Cuba, y su influencia sobre el aprovechamiento energético del recurso eólico; mostrar la influencia del cambio de la circulación de brisas en la disminución de la rapidez del viento y analizar el comportamiento del parámetro de Richardson asociado con esta. Para ello, se utilizó la información proveniente de las torres de referencia meteorológicas del Programa Eólico Cubano, ubicadas en El Brinco y Caibarién, que consistió en los datos de la temperatura, la dirección y la rapidez del viento en los niveles de 10 m y 100 m de altura para ambas. Se constata la presencia de este fenómeno particular en todo el período seleccionado para el análisis, así como la reducción notable en la densidad de potencia eólica del viento que produjo. Otra conclusión es que esta disminución estuvo influenciada por el cambio de régimen de circulación de brisas, apreciado en los valores alcanzados por el parámetro de Richardson en horas de la mañana, en especial cuando los valores de la rapidez en 10 m y 100 m fueron similares. Estos resultados permiten profundizar en los conocimientos sobre el viento como recurso energético en

Cuba, y pueden considerarse para la planificación del mantenimiento y el funcionamiento de los parques eólicos.

PALABRAS CLAVE: Viento, eólica, circulación de brisas, Richardson, Camagüey.

Abstract

This paper aims to describe the decrease of the values of wind speed in the atmospheric surface layer in early morning hours and late afternoon hours, at two coastal zones of Cuba, and its influence in wind resource energy use; to show the influence of changing the flow of breezes in reducing wind speed and analyze the behavior of Richardson parameter associated to the same one. Information coming from Towers of Meteorological Reference for the Cuban Eolic Program, located on El Brinco and Caibarién, consisted on temperature and wind speed and direction in 10 m and 100 m levels of both was used. The presence of this particular phenomenon throughout the period selected for the analysis is verified, as well as the noticeable reduction in wind power density that it took place. Another conclusion is that this decrease was influenced by changing breezes flow regime and that it was appreciated in the values reached by Richardson parameter

in the morning, mainly when speed values of 10 m and 100 m were very similar. These results allow to deepen more in the knowledge about the wind like energy resource in Cuba, and it can be taken into account in the planning of the maintenance and operation of the eolic farms.

KEYWORDS: Wind, eolic, flow of breezes, Richardson, Camaguey.

Introducción

El uso de la energía eólica ha experimentado un ascenso notable en las últimas décadas. Esta fuente energética, contemplada entre las denominadas energías “verdes”, posee un gran número de ventajas que la han convertido en una vía de solución para problemas de índole económica, dado el ascenso de los precios del petróleo a nivel mundial, y para mitigar el cambio climático global.

En 2005, por iniciativa del Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, se impulsó el empleo de las fuentes renovables de energía, en especial la eólica; por esta razón, se tomaron algunas acciones, entre las que se destaca la elaboración del *Mapa del potencial eólico*, el cual se materializó en 2006. Los resultados obtenidos reafirmaron estudios anteriores que señalaban áreas favorables para el uso de la energía eólica y se identificaron zonas nuevas de interés. Se constató que las regiones del país que presentan las mejores condiciones para el aprovechamiento del viento se hallan en las zonas costeras y montañosas, principalmente, en las provincias orientales. Además, se concluyó que el potencial eólico de Cuba fluctúa entre 5 000 MW y 14 000 MW (Soltura *et al.*, 2006).

Con la ayuda de estos resultados comenzó la instalación de parques eólicos en las regiones favorables, con el objetivo fundamental de asimilar la tecnología, tanto en su construcción y operación, como en su mantenimiento. El primero en terminarse, en febrero de 2007, fue el de Los Canarreos, en la Isla de la Juventud, que posee seis aerogeneradores de 275 kW,

los cuales resisten la influencia de fenómenos meteorológico peligrosos. Posteriormente, en febrero de 2008, en Gibara, Holguín, se instaló un nuevo parque, dotado de una tecnología diferente, con seis aerogeneradores de 850 kW y una capacidad total de 5.1 MW. Luego, en esta misma región, se instaló un segundo parque eólico con seis máquinas Golwind, de fabricación china, cada una con potencia de 750 kW y una capacidad total de 4.5 MW. Estos tres parques, junto con el existente en Turiguanó, provincia de Ciego de Ávila, con dos aerogeneradores de 225 kW y una capacidad total instalada de 0.45 MW, hicieron que la capacidad total instalada en Cuba ascendiera a 11.7 MW.

De conjunto con la instalación de estos parques y con miras a validar los resultados del mapa, en 32 zonas de posibles emplazamientos de parques eólicos se ubicaron 82 mástiles de medición, de 50 m de altura, y se seleccionaron doce torres altas de comunicaciones para integrar la Red de Torres de Referencia Meteorológicas (RTRM), encargada de las mediciones de la rapidez y la dirección del viento hasta alturas de 100 m, además de variables meteorológicas de importancia, tales como la temperatura, la humedad y la presión en varios niveles, siguiendo el criterio de torres de gradientes ubicadas en zonas representativas de las condiciones físico-geográficas de Cuba. Esto ha permitido profundizar en los estudios de la capa superficial atmosférica en Cuba; puesto que al no existir una base experimental, muchas variables y parametrizaciones tuvieron que estimarse a partir de los datos de las estaciones meteorológicas, meteorológicas, las cuales miden el viento a una altura de 10 m y cada 3 h.

La profundización en el conocimiento del recurso eólico del país continúa siendo prioridad del Programa Eólico Cubano; en este sentido, diversos autores han llevado a cabo trabajos investigativos que tributaron a estas experiencias, entre ellos cabe mencionar a Soltura (1995), Soltura *et al.* (2006), Proenza (2004), Perigó (2007), Carrasco (2008), Carrasco *et*

al. (2007, 2009), Álvarez R. *et al.* (2009a, b, c), León (2010), Roque *et al.* (2010) y Perdigón y Rodríguez (2011). Asimismo, dado el tema inherente al presente trabajo, resultaron de interés particular los desarrollados por Carnesoltas (1986, 2002a) en lo referido a la circulación de brisas, que fueron utilizados por Carrasco (2008) para realizar una caracterización de la brisa de mar y de sus efectos en el aprovechamiento de la energía eólica en dos regiones del país para tres situaciones: a) con flujo sinóptico entrando a la costa, b) con flujo sinóptico saliendo de la costa y c) con flujo sinóptico paralelo a la costa.

Roque *et al.* (2010) observaron una disminución en la rapidez del viento en las primeras horas de la mañana y finales de la tarde, que en zonas interiores y en la costa sur ocurre de manera brusca y provoca una disminución del aprovechamiento del recurso en estos horarios. Este fenómeno particular provocó la interrogante siguiente: ¿Está influenciada la disminución de la rapidez del viento por el cambio de régimen de brisa de mar a tierra, y viceversa? Para responderla se proponen varios objetivos: a) describir la disminución de la rapidez del viento y su influencia en el aprovechamiento energético del recurso en las primeras horas de la mañana y finales de la tarde, b) mostrar la influencia del cambio de la circulación

de brisas en la disminución de la rapidez del viento, y c) analizar el comportamiento del parámetro de Richardson asociado con esta.

Materiales y métodos

Las zonas de estudio se seleccionaron de acuerdo con los mismos criterios de Carrasco (2008), puesto que este trabajo constituye una continuación de los resultados obtenidos por el autor. Se corresponden con los lugares de ubicación de la Torre de Referencia Meteorológica de El Brinco (costa sur de Matanzas), en los 22° 04' 18" N y los 81° 03' 14" W, y la de Caibarién (costa norte de Villa Clara), en los 22° 30' 02" N y los 79° 29' 02" W (Fig. 1), ambas con niveles de medición de variables meteorológicas hasta 100 m de altura.

De estas torres se escogieron los datos medidos cada 10 min en El Brinco, en 2008, y en Caibarién, de julio de 2007 a junio de 2008. Las variables utilizadas fueron la dirección y la rapidez del viento en los niveles de 10 m y 100 m de medición. Se escogieron como horarios de estudio los comprendidos entre las 05:00–11:50 y las 16:00–23:50 hora local, porque dentro de estos se produce la disminución de la rapidez del viento. Para la determinación del flujo sinóptico predominante se emplearon los mapas de reanálisis

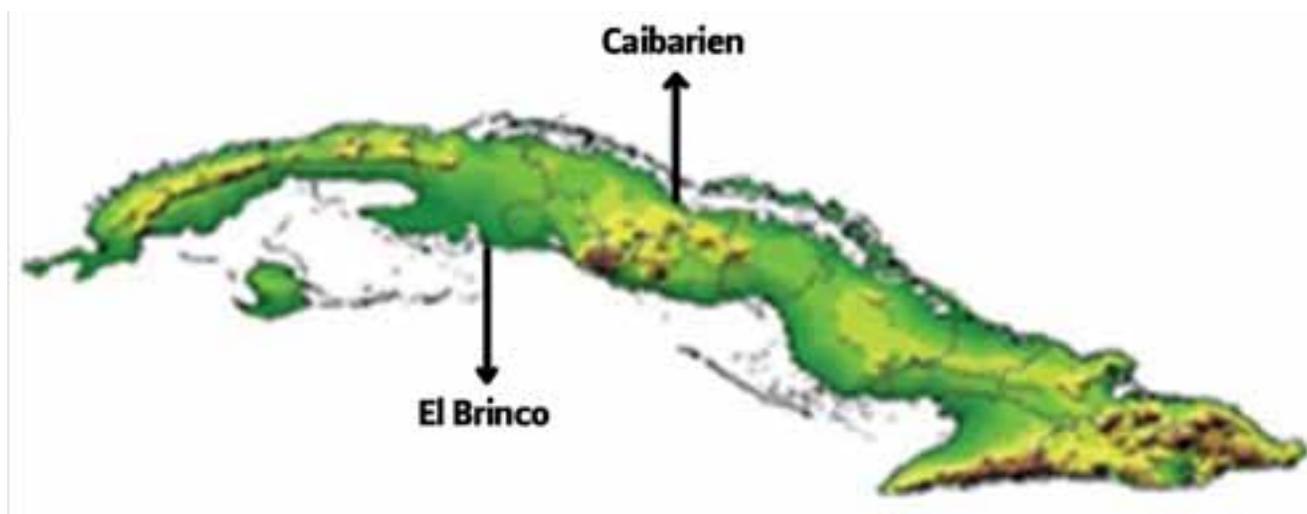


Fig. 1 Ubicación geográfica de las torres de referencia meteorológicas de Caibarién y El Brinco.

de las componentes zonal y meridional del viento (u y v) a escala sinóptica, confeccionados entre las latitudes 18–27 N, 70–90 W, y para los horarios entre las 1200 UTC y 0000 UTC. Además, se utilizaron las situaciones sinópticas correspondientes a los períodos de estudio.

La disminución de la rapidez del viento es más apreciable en el nivel de 100 m, por lo cual el estudio se centró en esa altura. Se calcularon las componentes u y v del viento medido cada 10 min, así como los valores medios horarios cada día para la rapidez del viento. Con estos, a su vez, se calcularon los valores medios mensuales y se realizaron gráficos para mostrar la oscilación diaria de la variable. El parámetro de Richardson (Ri), que caracteriza el comportamiento de un fluido (en este caso, la atmósfera) a partir de la razón entre las fuerzas de flotabilidad e inerciales, y que permite determinar si existe movimiento laminar o turbulento de las capas de aire, fue obtenido mediante la expresión siguiente:

$$Ri = \frac{\left(g \times \frac{\Delta T}{\Delta Z} + \gamma d\right)}{Tm \times \left(\frac{\Delta V}{\Delta Z}\right)^2} \quad (1)$$

Donde:

$$\left(\frac{\Delta V}{\Delta Z}\right)^2 = V_1^2 + V_2^2 - 2 \times V_1 \times V_2 \times \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (2)$$

es el gradiente vertical de la rapidez del viento, g la aceleración de la gravedad, $\gamma d = 0.0098$ °C/m es el gradiente adiabático seco, Tm es la temperatura media de la capa entre 10 m y 100 m, $\Delta T/\Delta Z$ es el gradiente de temperatura del aire, V_1 y V_2 son la rapidez del viento en 10 m y 100 m, y θ_1 y θ_2 son las direcciones del viento en 10 y 100 m.

Para asociar la influencia del comportamiento del viento con su aprovechamiento energético, en algunos intervalos de tiempo dentro de los horarios de estudio se calculó la densidad de potencia eólica, definida por la expresión siguiente:

$$Pm = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \quad (3)$$

donde: Pm es la densidad de potencia eólica, ρ es la densidad del aire y V es la rapidez del viento.

Se realizó una selección de días a los que se llamó *casos de estudio* y en los cuales la condición sinóptica prevaleciente permitiera el desarrollo de la brisa, con vistas a, conocida la dirección del flujo a escala sinóptica, analizar la interacción de flujos en cada uno de estos. Se seleccionaron aquellos en los cuales existiesen vientos variables débiles a moderados durante todo el día en las regiones Occidental y Central del país. Finalmente, se eligieron 30 casos de estudio para cada torre.

En cada caso de estudio se analizó el comportamiento de la dirección del viento en los niveles de 10 m y 100 m, así como su rapidez antes y después del mínimo de rapidez en 100 m, teniendo en cuenta la dirección del flujo sinóptico y del vector viento real mediante los valores de las componentes u y v que también fueron graficados, para, de este modo, definir la influencia de la circulación de brisas en la ocurrencia del valor mínimo de la rapidez del viento. Los casos de estudio se dividieron en tres grupos, según la dirección del vector flujo sinóptico, dado que de acuerdo con su dirección, la brisa de mar o el terral giran a favor suyo o en su contra, y pueden (o no) reforzarlo. Estos grupos son: a) con flujo sinóptico entrando a la costa, b) con flujo sinóptico paralelo a la costa y c) con flujo sinóptico saliendo de la costa. A su vez, considerando la influencia de la brisa de mar o el terral en el vector viento resultante a partir del giro producido en la dirección del viento medido por los instrumentos, cada grupo se dividió en dos subgrupos: a) días con presencia de giro en la dirección del viento y b) días sin presencia de giro en la dirección del viento.

Para fines de este artículo, solo se presentarán los resultados de los casos con flujo sinóptico entrando en la costa de Caibarién y saliendo por la costa de El Brinco, los cuales constituyeron el mayor porcentaje del total escogido.

Análisis y discusión de los resultados

Comportamiento de la rapidez del viento en El Brinco durante 2008

Los valores medios mensuales calculados para la rapidez del viento se mantuvieron sin variaciones bruscas durante la noche, y con valores promedios elevados y superiores a los alcanzados en horas de la tarde (Fig. 2) que, en algunos meses (noviembre y diciembre), sobrepasaron 8.00 m/s. Este comportamiento se debe a la influencia gran parte del año del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, el cual impone vientos con dirección del noreste al este y su circulación es reforzada por la presencia del terral con la misma dirección durante la noche.

En general, la disminución de la rapidez se inició entre las 06:00 y las 07:00 hora local, con excepción de abril y agosto, cuando comenzó desde las 05:00 hora local. El valor mínimo promedio se alcanzó en horas de la mañana, entre las 08:00 y las 09:00 hora local (Fig. 2a), aunque en enero, febrero y septiembre se produjo a las 10:00 hora local; en diciembre, la rapidez disminuyó de manera paulatina desde las 07:00 hasta las 15:00 hora local, momento en que comenzó a ascender. La magnitud de la disminución de la rapidez media fue superior a 1.0 m/s, excepto en febrero (0.97 m/s), mayo (0.88 m/s) y noviembre (0.86 m/s), llegando a alcanzar incluso valores superiores a 2.0 m/s, como fue diciembre, con 2.55 m/s; asimismo, julio constituye un ejemplo de lo planteado (Fig. 2b).

Luego de producirse los valores más bajos de la rapidez media del viento, estos comenzaron a ascender; en los horarios comprendidos desde las 12:00 hasta las 15:00 hora local se alcanzaron los valores máximos durante el día y, a partir de ese momento, volvieron a descender. Los valores promedios más bajos tuvieron lugar entre las 17:00 y 19:00 hora local (Fig. 3), con excepción de enero y octubre, cuando ocurrieron a las 16:00 horas; noviembre, a las 14:00 horas, y diciembre, a las 15:00 horas. En algunos casos,

incluso, la disminución de la rapidez se produjo en un valor superior incluso a 1.00 m/s, aunque fue más paulatina comparada con el horario de la mañana.

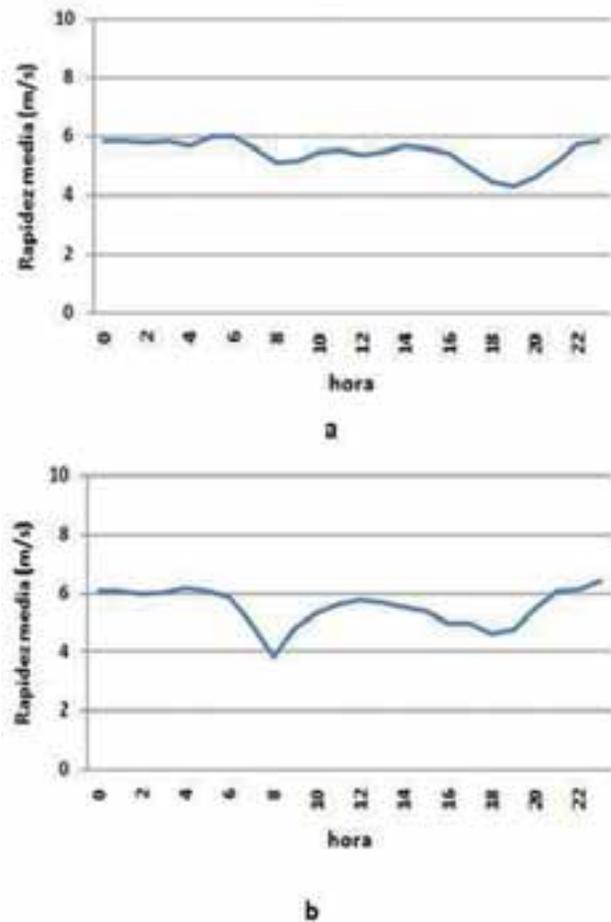


Fig. 2 Comportamiento de la rapidez media del viento en el nivel de 100 m en El Brinco: a) mayo de 2008 y b) julio de 2008.

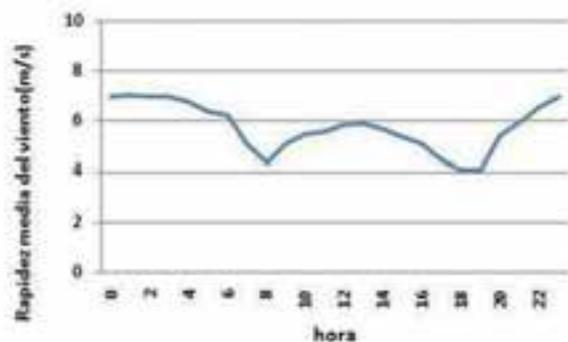


Fig. 3 Comportamiento de la rapidez media del viento en el nivel de 100 m, El Brinco, junio de 2008.

Comportamiento de la rapidez del viento en Caibarién entre julio de 2007 y junio de 2008

Los valores medios mensuales para el horario y el período de estudio mostraron que la rapidez media del viento disminuyó paulatinamente durante la noche, hasta la mañana. La disminución dentro del horario de estudio de la mañana resultó inferior a 1.0 m/s, excepto en mayo, cuando se alcanzó este valor. El valor mínimo de rapidez ocurrió, principalmente, entre las 07:00 y las 08:00 hora local (Fig. 4), con excepción de marzo, a las 06:00 hora local, y diciembre, a las 09:00 hora local.

A partir del momento en que se produjo el valor mínimo de la rapidez del viento, la tendencia de los valores de la variable fue al aumento y se manifestó en todos los meses del período estudiado. Existió cierta diversidad en la hora de ocurrencia de los valores máximos de la rapidez, pero, de manera general, esta se situó entre las 13:00 y las 16:00 hora local, excepto en diciembre y enero, cuando ocurrió a las 17:00 y 18:00 horas, respectivamente.

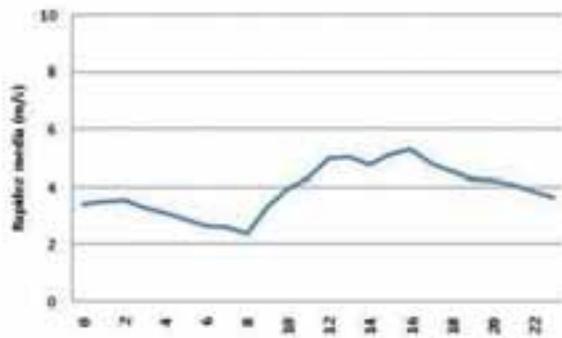


Fig. 4 Comportamiento de la rapidez media del viento en el nivel de 100 m, Caibarién, septiembre de 2007.

Los resultados obtenidos para la rapidez del viento evidencian que se mantuvieron valores más elevados en horas de la tarde en comparación con la noche. La ubicación en la costa norte de la región de estudio y las características del flujo predominante durante gran parte del año en Cuba sugieren que este compor-

tamiento se debe al reforzamiento del vector flujo sinóptico por parte de la brisa marina durante el día, y la disminución de su intensidad dada la presencia del terral en horas de la noche.

Consecuencias de la disminución de la rapidez del viento en el aprovechamiento energético del recurso eólico

Con solo analizar el comportamiento de la rapidez del viento en los períodos de estudio no es posible apreciar la magnitud de lo que representa este fenómeno desde el punto de vista del aprovechamiento del recurso eólico; por ello, se acude al cálculo de la densidad de potencia del viento en cada sitio para los horarios analizados. La figura 5 muestra los valores de la densidad de potencia eólica media en función de la disminución de la rapidez media del viento en 2008 en El Brinco, para el horario de la mañana.

Es importante hacer notar que aun cuando la diferencia entre el valor promedio inicial de la rapidez del viento en el momento de comenzar la disminución y el valor mínimo de la rapidez del viento alcanzado fue pequeño, los valores en que disminuyó la densidad de potencia del viento resultaron significativos, atendiendo a que solo se consideró para este cálculo un área de barrido de 1 m², y que la densidad de potencia es proporcional a la rapidez del viento elevada al cubo.

Para el horario de estudio de la tarde ocurrió algo similar, aunque las diferencias entre los valores de densidad de potencia al inicio y el final de la disminución fueron inferiores, como era de esperar, a causa de la menor disminución de la rapidez del viento en ese horario, comparado con el de la mañana.

En la región donde se encuentra ubicada la torre de Caibarién, los resultados solo difieren en la magnitud de la densidad de potencia del viento (Fig. 6), los cuales fueron mucho más bajos que los obtenidos para El Brinco. Fue en el horario de estudio de la tarde donde, fundamentalmente, se presentaron disminuciones

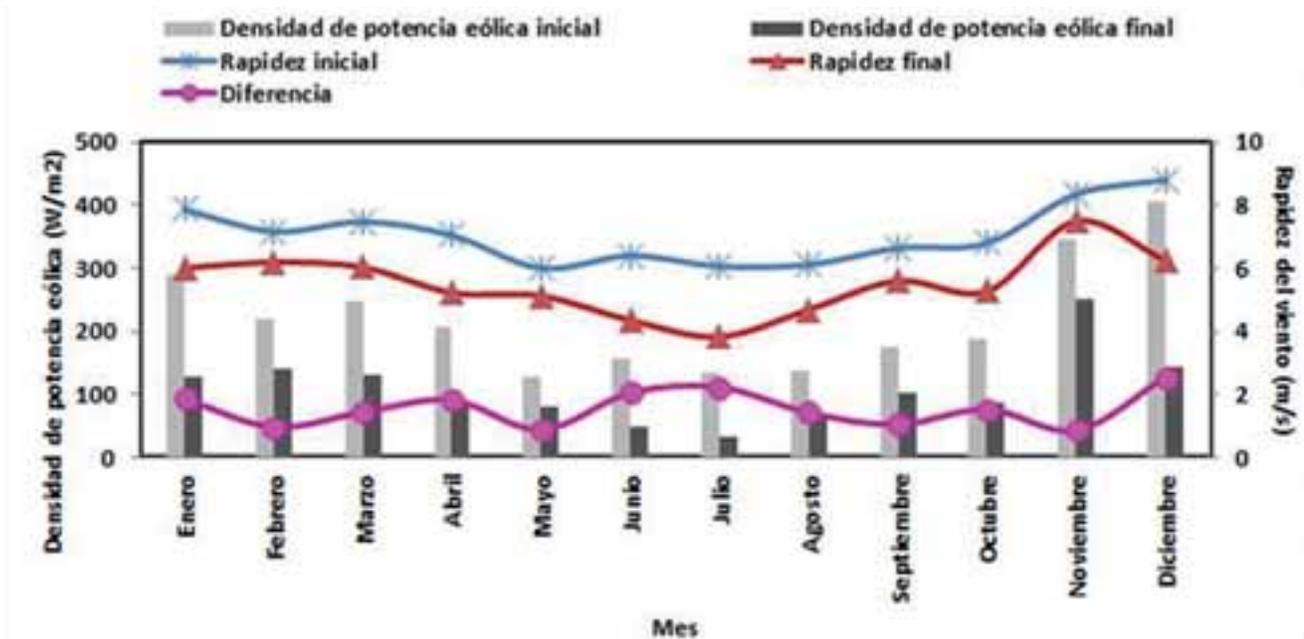


Fig. 5 Densidad de potencia eólica media en función de la disminución de la rapidez media del viento durante el horario de la mañana, El Brinco, 2008.

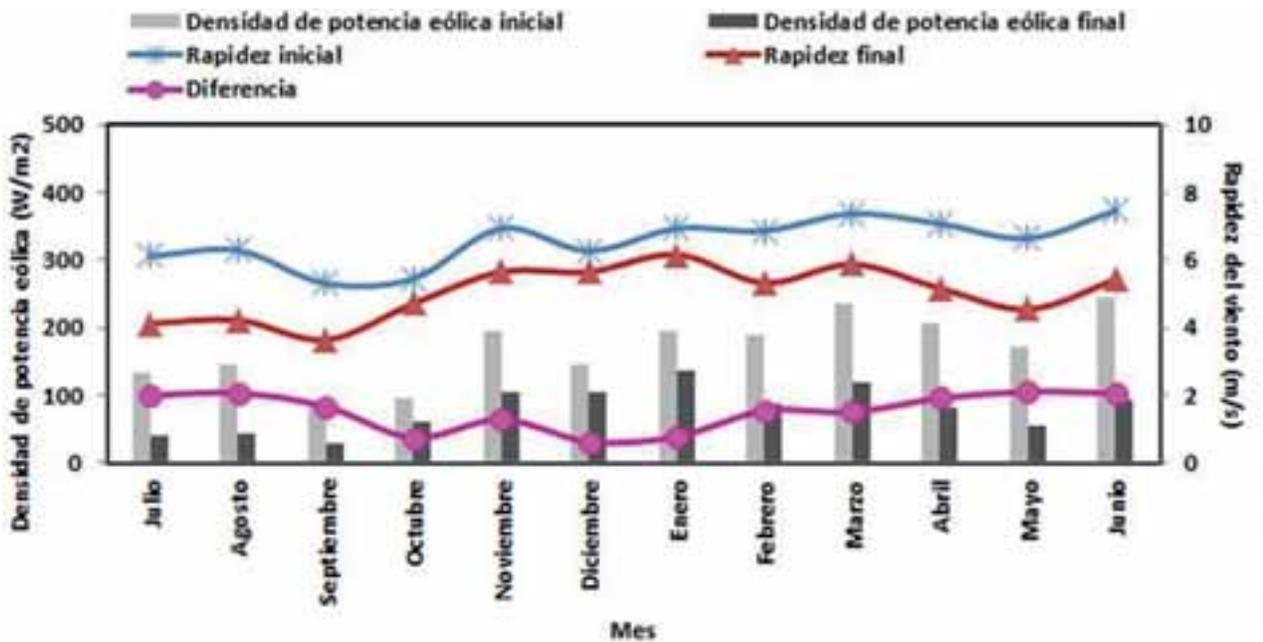


Fig. 6 Densidad de potencia eólica media en función de la disminución de la rapidez del viento en el nivel de 100 m para el período de estudio, Caibarién, horario de la tarde.

significativas de los valores de la densidad de potencia del viento que influyeron de manera negativa en las características de este elemento como recurso energético.

Lo expuesto en este epígrafe permite concluir que estas disminuciones deben tomarse en consi-

deración para el aprovechamiento energético en la producción de electricidad, dado el impacto que podría tener en el Sistema Electroenergético Nacional si se a instalase un gran parque eólico en zonas costeras.

Influencia del cambio de circulación de brisas en el vector resultante del viento

El Brinco. Flujo sinóptico saliendo de la costa

El análisis realizado, según la metodología explicada en los “Materiales y métodos”, arrojó que 23 (76.7%) de los 30 casos de estudio presentaron un flujo sinóptico saliendo de la costa; en 20 de estos, durante el horario de la mañana, pudo apreciarse que se produjo el giro en la dirección del viento contrario al flujo sinóptico (Fig. 7).

Los casos en que no se presentó giro del viento correspondieron a noviembre y diciembre. En enero y febrero, a diferencia del resto, en los que previo a los valores mínimos de la rapidez del viento, la dirección fue del primer cuadrante y posterior a la hora de ocurrencia de los valores mínimos se produjo el giro al segundo y tercer cuadrantes, se apreció que, antes de los mínimos, la dirección del viento se comportó casi paralela a la costa, durante el mínimo, fue de componente este y luego giraron al sur-sureste y al sur hasta que, en horas de la tarde, se establecieron del tercer cuadrante. El comportamiento de estos casos de estudio presentó correspondencia con la presencia del cambio de circulación de brisas.

En el horario de estudio de la tarde, 20 de los 23 casos analizados mostraron el giro a favor de la dirección del flujo sinóptico, coincidiendo todos con los de la mañana. Pudo apreciarse cómo antes de la

ocurrencia de los valores mínimos de la rapidez, el viento resultante entraba a la costa y después se produjo el giro, por lo general, hacia el primer cuadrante (Fig. 8), lo cual permite afirmar, para esta costa, que durante el día, la brisa de mar se impuso al flujo sinóptico predominante, y que en los horarios donde ocurrieron los valores mínimos de la rapidez del viento tuvo lugar el cambio de circulación de brisas.

Caibarién. Flujo sinóptico entrando a la costa

De los treinta casos analizados en la región de Caibarién, 22 (73.3%) se presentaron con un flujo sinóptico entrando a la costa; de estos, durante el horario de estudio de la mañana, 20 mostraron un giro en la dirección del viento resultante a favor del flujo sinóptico dominante (Fig. 9). En la mañana, antes de comenzar el giro en la resultante del viento, este estuvo casi paralelo a la costa, pero se comprobó que, además, estuvieron presentes días en los que antes de comenzar el giro el viento se hallaba saliendo de la costa, lo cual señala la presencia del terral; por ello, se corrobora en ese horario la ocurrencia del cambio de circulación de terral hacia la brisa de mar.

En los casos de estudio en que la dirección del viento en 100 m se mantuvo casi paralela a la costa antes de comenzar el giro del viento, en el nivel de 10 m, los gráficos de las componentes u y v mostraron que la dirección del viento coincidió con la del terral; por ello, puede afirmarse que, en ocasiones, el terral

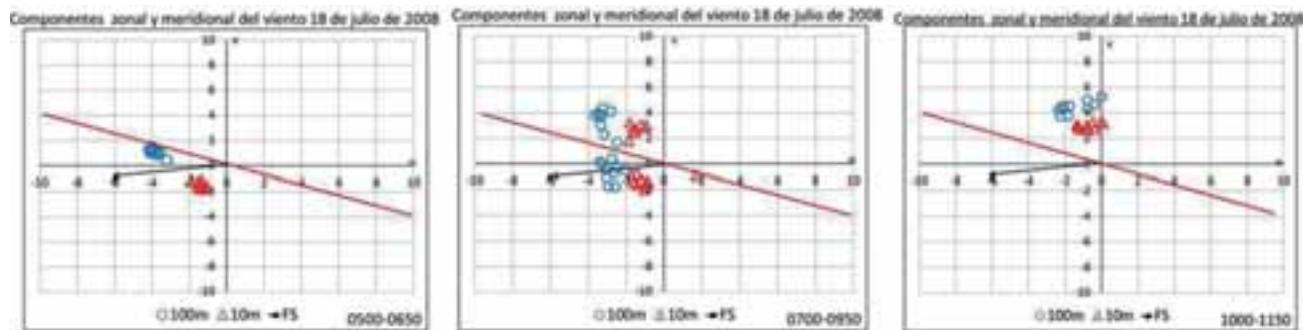


Fig. 7 Componentes zonal y meridional del viento en los niveles de 10 m (triángulos) y 100 m (círculos), El Brinco, 18 de julio de 2008. La línea transversal representa la orientación de la costa, mientras que la flecha negra indica la dirección y la intensidad del vector flujo sinóptico. En la leyenda se muestran los distintos horarios.

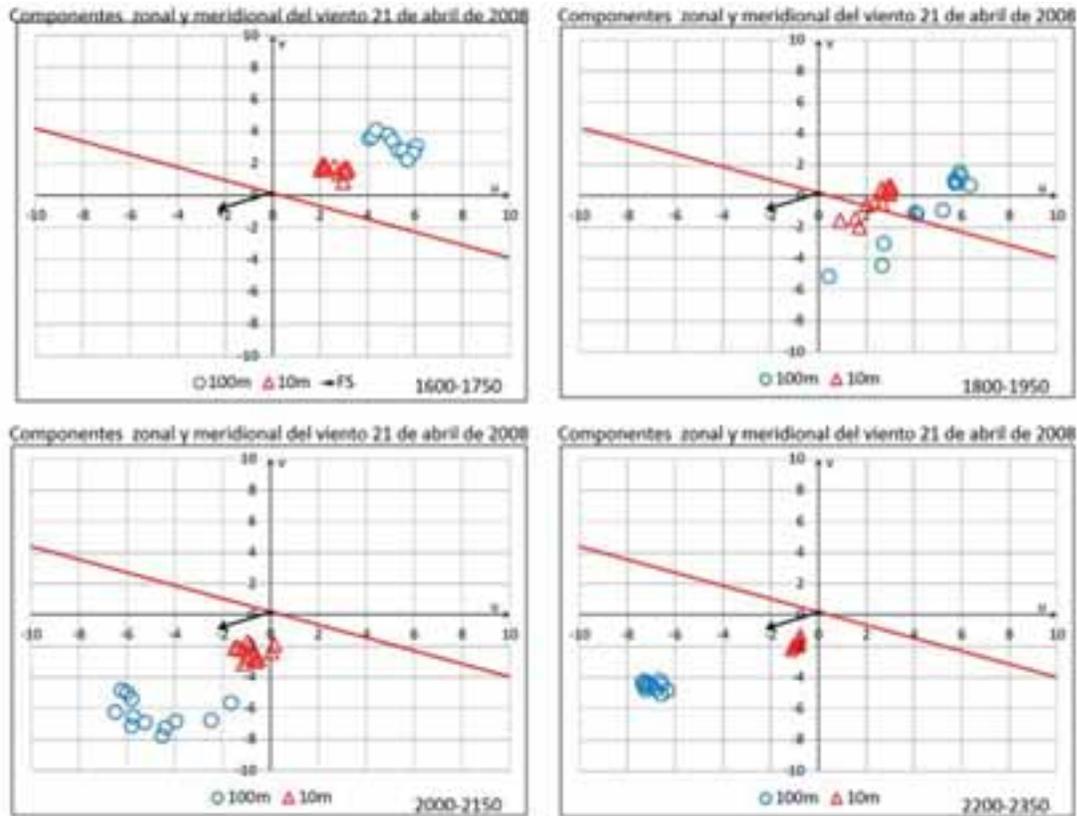


Fig. 8 Componentes zonal y meridional del viento en los niveles de 10 m (triángulos) y 100 m (círculos), El Brinco, 21 de abril de 2008. La línea transversal representa la orientación de la costa, mientras que la flecha negra indica la dirección y la intensidad del vector flujo sinóptico. En la leyenda se muestran los distintos horarios.

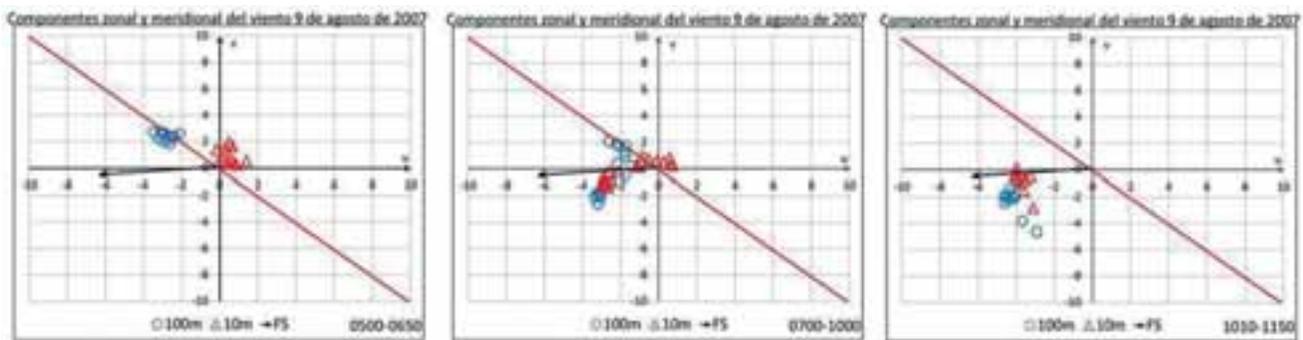


Fig. 9 Componentes zonal y meridional del viento en los niveles de 10 m (triángulos) y 100 m (círculos), Caibarién, 9 de agosto de 2007. La línea transversal representa la orientación de la costa, mientras que la flecha negra indica la dirección y la intensidad del vector flujo sinóptico. En la leyenda se muestran los distintos horarios.

fue muy débil o estuvo en presencia de un flujo sinóptico más fuerte que él, y esto provocó que el giro en ambos niveles no ocurriese de manera pareja.

Durante el horario de la tarde, 16 de los 22 casos analizados mostraron que las componentes del vec-

tor viento resultante se hallaban entrando a la costa y manifestaron un giro contrario a la dirección del flujo sinóptico en momentos cercanos a la hora de ocurrencia de los valores mínimos de la rapidez del viento. De manera similar al horario de la maña-

na, se apreció que, además de existir casos con este comportamiento (Fig. 10), también se presentaron casos en los cuales se constató la imposición del terrenal frente al flujo sinóptico.

Comportamiento del parámetro de Richardson

Los valores medios anuales calculados del parámetro de Ri mostraron que, tanto en la torre meteorológica de El Brinco, como en la de Caibarién, ocurrió turbulencia en los horarios donde los valores de la rapidez del viento fueron bajos. Por lo general, en esos horarios, la turbulencia fue mayor que en horas de la tarde, cuando el calentamiento por radiación solar es superior; por ello, decidió analizarse ese comportamiento (Fig. 11).

En El Brinco se presentaron 15 casos de estudio, mientras que en Caibarién fueron 16, con un comportamiento similar al de la figura 11. Al analizar los valores del parámetro para cada caso y los distintos componentes de la ecuación que rigen su comportamiento, se determinó que la cizalladura vertical del viento mostró un papel importante en la turbulencia que se desarrolló en esos horarios. Se determinó cuál fue el valor del parámetro de Ri más bajo y se compararon el gradiente vertical de temperatura, y la rapidez y la dirección del viento en los niveles de 10 m y 100 m, con los valores de estas variables en las horas de mayor radiación, constatándose que el gradiente de temperatura resultó mayor durante estas horas que en la mañana. Sin embargo, la rapidez

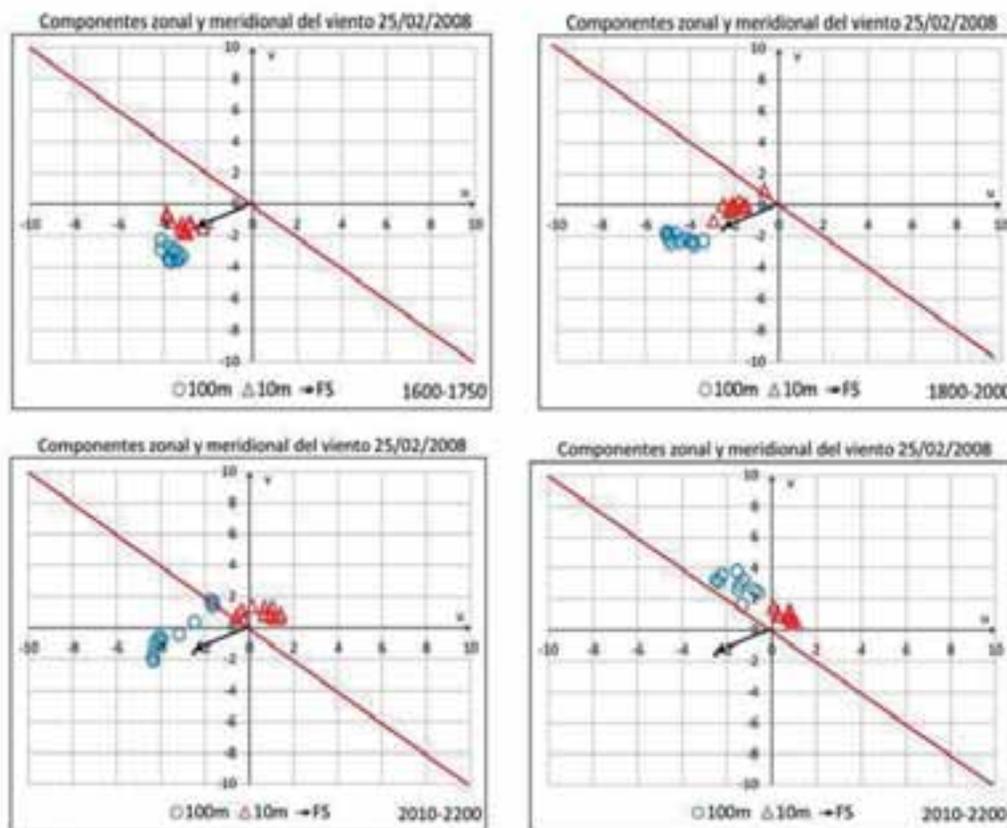


Fig. 10 Componentes zonal y meridional del viento en los niveles de 10 m (triángulos) y 100 m (círculos), Caibarién, 25 de febrero de 2008. La línea transversal representa la orientación de la costa, mientras que la flecha negra indica la dirección y la intensidad del vector flujo sinóptico. En la leyenda se muestran los distintos horarios.

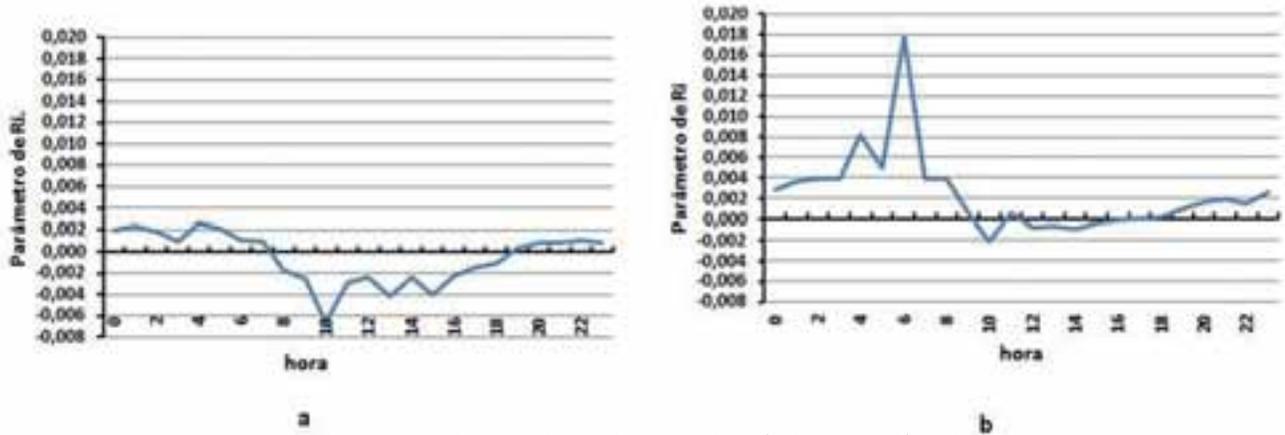


Fig. 11 Comportamiento medio del parámetro de *Ri* en el período de estudio: a) El Brinco y b) Caibarién.

y la dirección del viento evidenciaron que los valores de *Ri* que mostraron la presencia de una mayor turbulencia tuvieron lugar cuando la rapidez del viento en 10 m y 100 m fueron bajas y muy próximas entre sí; además, la dirección del viento en ambos niveles, prácticamente, coincidió, lo cual no ocurrió en los horarios de la tarde, donde los valores de la rapidez fueron más elevados y con una mayor diferencia entre sí, aunque las direcciones se comportaron bastante próximas. Esto evidencia que la cizalladura del viento fue menor durante la mañana y que, a pesar de haberse presentado un gradiente de temperatura menos pronunciado, pudo desarrollarse una inestabilidad mayor que en horas de la tarde.

No obstante, surgió la incógnita de determinar cuál de los dos elementos (rapidez o dirección del viento) fue el más importante en los valores alcanzados por el parámetro *Ri*. Esta incertidumbre pudo aclararse al comparar su magnitud el 1ro. de enero de 2008 en las regiones de emplazamiento de ambas torres (Fig. 12a).

Como puede apreciarse, el valor del parámetro fue menor en la región de Caibarién con respecto a la de El Brinco y se produjeron solo con 10 min de diferencia. En el momento en que tuvo lugar el valor más bajo del parámetro *Ri*, el gradiente vertical de temperatura (Fig. 13b) en ambas regiones fue, prácticamente, el mismo (-0.0044 °C/m en El Brinco y -0.0049 °C/m en

Caibarién) y la diferencia en la dirección del viento entre los niveles de 10 m y 100 m de medición fue de 6° en las dos zonas. Sin embargo, la rapidez del viento en El Brinco coincidió en ambos niveles (2.00 m/s), mientras que en Caibarién manifestó una diferencia de 0.40 m/s (2.20 m/s y 1.80 m/s).

El comportamiento mostrado permite sugerir que la disminución de la rapidez del viento en el nivel de 100 m, sobre todo cuando esta condujo a que los valores de la rapidez en esta altura estuviesen muy próximos a los del nivel de 10 m, provocaron que se evidenciara el comportamiento turbulento ocurrido en horas de la mañana en la capa superficial atmosférica en las regiones de El Brinco y Caibarién.

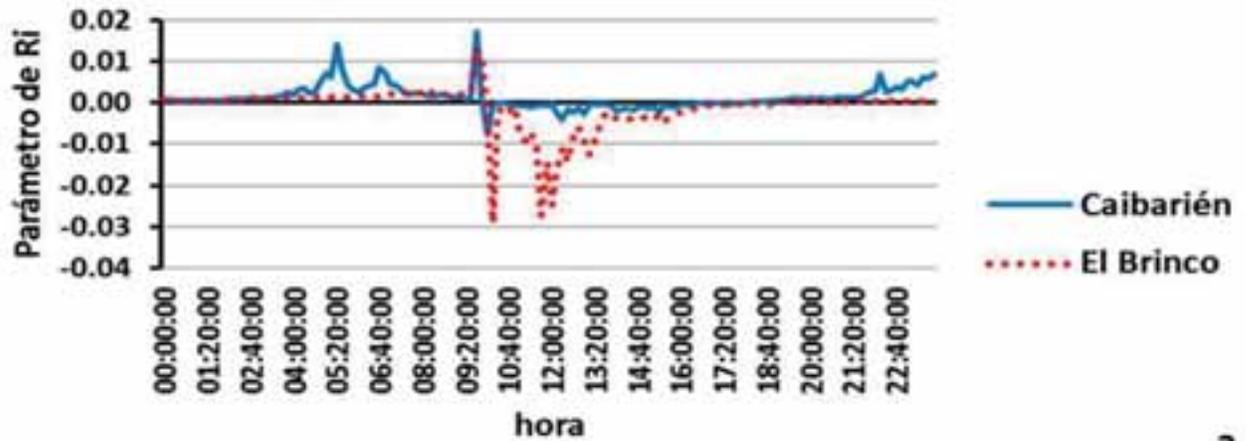
Conclusiones

Enmarcado en los horarios analizados y vinculado con la disminución de los valores de la rapidez del viento, ocurrió el cambio de régimen de la circulación de brisas.

La disminución de la rapidez del viento en los horarios estudiados provocó una disminución en la densidad de potencia del viento, la cual deberá considerarse en los emplazamientos eólicos ubicados en las costas.

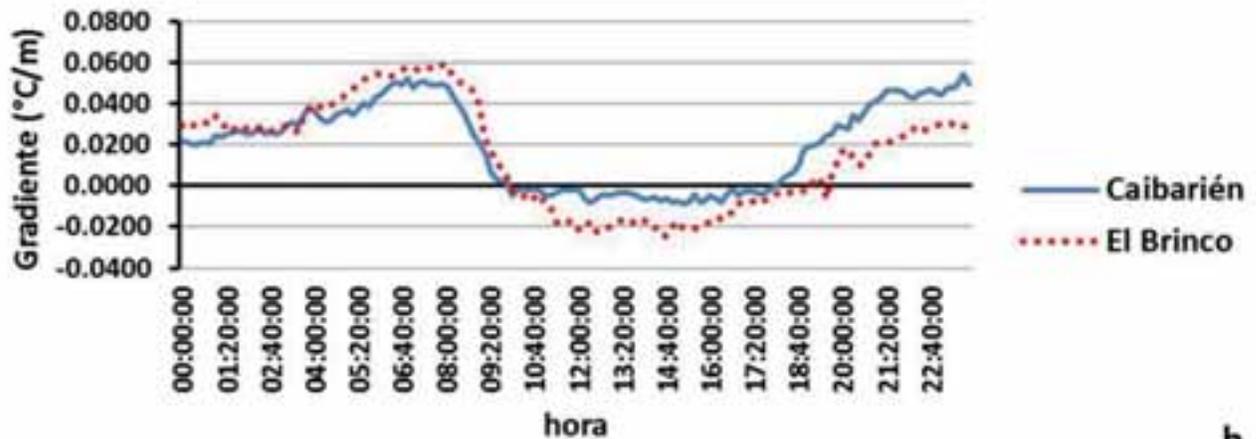
El parámetro *Ri* evidenció, en el horario de la mañana, la presencia de la disminución de la rapidez del

Comportamiento del parámetro de Ri 1 de enero de 2008



a

Comportamiento del gradiente vertical de temperatura 1 de enero de 2008.



b

viento, y mostró los valores promedio más bajos en momentos cuando la rapidez del viento, tanto en el nivel de 10 m, como en el de 100 m fueron bajas y muy próximas entre sí.

Referencias bibliográficas

ÁLVAREZ, R., ÁLVAREZ, L & AENLLE, L. 2009^a. Caracterización de las velocidades bajas del viento con vistas a la generación de energía eléctrica. Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología. Ciudad Habana, del 30 de noviembre al 4 de diciembre del

2009. Publicación electrónica, ISBN 978-959-7167-20-4, F:\Data\Trabajos completos.pdf, pp. 470 - 476.

ÁLVAREZ, R., ÁLVAREZ, L & AENLLE, L. 2009b. Metodología para el cálculo del máximo aprovechamiento del potencial eólico. Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología. Ciudad Habana, del 30 de noviembre al 4 de diciembre del 2009. Publicación electrónica, ISBN 978-959-7167-20-4, F:\Data\Trabajos completos.pdf, pp. 914 - 921.

ÁLVAREZ, R & ÁLVAREZ, L. 2009c. Cálculo de la generación eléctrica producida por una máquina eólica en el Parque de Gibara para el año 2025. Memo-

- rias del V Congreso Cubano de Meteorología. Ciudad Habana, del 30 de noviembre al 4 de diciembre del 2009. Publicación electrónica, ISBN 978-959-7167-20-4, F:\Data\Trabajos completos.pdf, pp. 906 – 913.
- CARNESOLTAS, M. 1986. La circulación local de brisa en Cuba. Tesis presentada en opción al grado de Candidato a Doctor en Ciencias. La Habana. Depositado en biblioteca. 96 pp.
- CARNESOLTAS, M. 2002^a. La brisa de Mar y Tierra. Conceptos fundamentales. Revista Cubana de Meteorología. Vol. 9, N° 1, 43 – 72.
- CARRASCO, M., CARNESOLTAS, M & ROQUE, A. 2007. La circulación local de la brisa de mar y sus efectos en el aprovechamiento de la energía eólica. Casos de estudio. Memorias del IV Congreso de Meteorología en Cuba. La Habana. Edición electrónica.
- Carrasco, M. 2008. Caracterización de la brisa de mar y sus efectos en el aprovechamiento de la energía eólica. Estudio de dos casos. Presentado como requisito para optar por el título de Licenciado en Meteorología. Edición Electrónica. 68 pp.
- CARRASCO, M & ROQUE, A. 2009: Influencia de la circulación local de brisas en la generación de energía del parque eólico Gibara I. Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología. Edición electrónica ISBN: 978-959-7167-20-4.
- LEÓN, D. 2010. Estudio de la marcha interanual del viento con vista a la prospección eólica en tres lugares diferentes de Cuba. Tesis presentada en opción al título de Licenciada en Meteorología. FAGES-INSTEC, 51pp.
- NOAA. Physical Sciences Division de la NOAA/ESRL. <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.surface.html#temp>
- PERDIGÓN, J & RODRÍGUEZ, G. 2011. Condiciones sinópticas más favorables para el aprovechamiento de la energía eólica en Cuba. Tesis presentada en opción al título de Licenciado en Meteorología. FAMA-INSTEC, 120pp.
- PERIGÓ, E. 2007. Estudio de factibilidad para el empleo de la energía eólica en el municipio Maisí. Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Ciencias Meteorológicas.
- PROENZA, V. J. 2004. Estudio del recurso eólico en la zona costera de la provincia Holguín. Tesis presentada en opción a Título Académico de Máster en Ciencias Meteorológicas.
- ROQUE, R. A., ÁLVAREZ, L., LIMIA, M., CARRASCO, M., VEGA, R., RODRÍGUEZ, Y., REYES, P., BÁEZ, R., NIEBLA, Y., ESPINOSA, J. A., VARONA, P., OSA, O., CALZADILLA, A., FERNÁNDEZ, K., SANTANA, M., CARNESOLTAS, M., SOLTURA, R., NOVO, R., ROJAS, D & OCHOA, E. 2010. Informe Final del Proyecto “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.”. Edición electrónica. 228p.
- SOLTURA, R. 1995. Atlas Eólico de Cuba. Informe Científico Técnico del Instituto de Meteorología. ACC. 200 pp.
- SOLTURA, R., ROQUE, A., RIVERO, I., WALLO, A., BÁEZ, R., VÁZQUEZ, R., RIVERO, R., AYALA, L., RODRÍGUEZ, G., CARRASCO, H., CURBELO, A., GONZÁLEZ, A., HERRERAS, O., MARTÍN, G., DÍAZ, J & HERNÁNDEZ, G. 2006. Informe del Mapa de Potencial Eólico de Cuba. Informe Científico – Técnico de Instituto de Meteorología.

Agradecimientos

Muchas gracias a Alfredo Roque, por su colaboración, su gran dedicación y la paciencia extrema que tuvo para conmigo. Asimismo, a Magdiel Carrasco, quien estuvo disponible cada vez que necesité de sus conocimientos sobre el tema. No por último menos importante, quiero agradecer de manera muy especial al doctor Mario Carnesoltas Calvo, por aportar sus conocimientos y experiencia, y por sus sugerencias críticas, pero muy constructivas, durante la elaboración de este trabajo.