

## **Caracterización de la brisa de mar y el terral para un mejor aprovechamiento de la energía eólica**

Magdiel Carrasco-Díaz\*, Alfredo Roque-Rodríguez y Mario Carnesoltas-Calvo

*Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Ciudad Habana, Cuba  
E-mail: magdiel.carrasco@insmet.cu*

Recibido: octubre 17, 2011

Aceptado: mayo 25, 2012

### **RESUMEN**

Con el objetivo de determinar la influencia de la circulación de la brisa de mar y el terral en el aprovechamiento energético del viento, se analizó la información proveniente de la Torre Meteorológica de Referencia El Brinco ubicada en Playa Girón, en el periodo lluvioso 2007. Para un mejor entendimiento del proceso, se decidió dividir la muestra en dos grupos: las horas comprendidas bajo el régimen del terral y las de la brisa de mar. Se construyeron los perfiles verticales del viento para cada muestra y se obtuvieron los histogramas de frecuencia de la velocidad y la distribución de frecuencia por rumbos en el nivel de 100m. Por último, para establecer una comparación entre las muestras en el aprovechamiento energético, se calculó la densidad de potencia media del viento diaria para cada grupo. Entre los principales resultados se encontró que en presencia de la brisa de segunda especie, tanto en el terral como en la brisa de mar, la mayor densidad de potencia se alcanzó durante los días en que la influencia de dicha brisa es débil, manteniéndose la persistencia de los vientos por encima de 4 m/s más del 85% del día.

**Palabras clave:** brisa de mar, recurso eólico, terral

## **Characterization of sea and land breeze to the best use of wind power**

### **ABSTRACT**

With the aim to determine the influence of sea breeze circulation in wind power generation, information from the Meteorological Tower of Reference located at El Brinco was analysed in the rainy season of 2007. To better understand the process, the sample was divided in two groups, comprising the hours of sea and land breeze. Wind vertical profiles for each sample were constructed and the frequency histograms for direction and wind speed at 100m height were obtained. Finally, to establish a comparison between the samples regarding power generation capability, the daily average power density of wind was calculated for each group. Among the main results it is found that in presence of both, land and sea breeze of second type, the highest wind power density occurred on days of weak breeze, with values of wind speed over 4 m/s holding for more than 85 % of the day.

**Key words:** land breeze, sea breeze, wind resource

### **1. Introducción**

En Cuba, a partir de la crisis energética que vive hoy el mundo, debido en gran medida al ascenso del precio de petróleo y el agotamiento de las reservas de combustibles convencionales, la dirección del país decidió dar un nuevo impulso a la aplicación de las energías renovables, en particular la eólica. En el 2006 se reanudaron los estudios de potencial eólico, donde se elaboró una nueva versión del mapa de potencial eólico de Cuba (Soltura et al., 2006), lo que permitió determinar que los principales lugares con características favorables para la obtención de energía eólica se ubican en las costas y zonas montañosas.

En cualquier zona costera la circulación local de brisas puede cambiar el régimen del viento predominante. Los sistemas de brisas de mar y tierra en las costas cubanas presentan peculiaridades bien diferenciadas. Mientras en la costa Norte la brisa de mar es reforzada casi siempre por los vientos de la componente general del flujo, en la costa Sur el avance del frente de la brisa de mar está limitado, al no coincidir las direcciones del flujo a escala sinóptica con el flujo de la circulación local. Pero en el caso de la brisa de tierra o Terral, sucede el proceso inverso: en la costa Norte el Terral se manifiesta sólo de forma leve, por una ligera inclinación de la resultante del viento hacia el segundo cuadrante (Este – Sur), mientras que en la costa Sur, en horas de la noche el Nordeste sopla con apreciable intensidad y extensión (Lecha, 1994).

Dentro del sistema de la circulación de brisas en las costas, uno de los aspectos relevantes lo constituye la formación del frente de la brisa de mar, conocido en la literatura internacional como brisa de segunda especie (Carnesoltas, 2002a). Esta condición se genera en una escala muy local y es parte importante dentro del grupo de componentes que conforman el viento resultante medido por las estaciones meteorológicas, principalmente las ubicadas en zonas costeras.

Cuando se presentan las condiciones de brisa de segunda especie, estas pueden ser un inconveniente para el aprovechamiento del recurso eólico en las costas. Por tal motivo, surge una interrogante por resolver: ¿Cómo el régimen de la circulación local de brisas influye en la resultante del viento?

Las descripciones de la circulación de brisas aparecen en los relatos de los libros más antiguos, pero sus definiciones con carácter científico comenzaron a principios del siglo XX. La primera definición aceptada con este carácter fue presentada por Conrad (1928), quien la llamó “brisa menor de mar”, definiéndola como la circulación en las inmediaciones de la costa, que precede a la brisa mayor que se desarrolla de forma gradual, tanto horizontal como verticalmente a medida que continúe el calentamiento del aire sobre tierra, bajo las condiciones de viento en calma o muy débil. Luego Koschmieder (1941), percatándose de que tal definición no siempre se cumplía, plantea una segunda definición para la brisa que se produce por la acumulación de aire frío sobre el mar empujado por el aire caliente que sale desde tierra en días con un viento sinóptico de cierta intensidad. En la actualidad se reconocen ambas definiciones, puesto que ocurrirá una u otra en dependencia de la dirección del viento con respecto a la costa, y para diferenciarlas se les denomina brisa de primera especie a la que ocurre con viento débil, y de segunda especie a la que forma frente.

El término de “frente de la brisa” puede encontrarse en los trabajos de Wexler (1946), Leopold (1949), Defant (1950), Donn (1956), Warner (1978), Bornstein y Thompson (1981). En Cuba varios autores han tratado sobre la brisa, entre ellos se pueden mencionar a Rivero (1978), Lecha et al. (1979), Osorio et al., (1980), Hernández y Elizalde (1981), Saenz (1981), Rey (1982), Batista (1984), Fernández y Pazos (1998), Portela (2002) y Carnesoltas (1986, 2002a).

En resumen sería muy difícil determinar o medir con algún instrumento la circulación de las brisas, además es riesgoso plantear cualquier comportamiento de la brisa con métodos estadísticos partiendo sólo de las mediciones de los instrumentos, si antes no se tiene una claridad de los factores que intervienen en el proceso, Carnesoltas (2002a). Este mismo autor plantea que de acuerdo a la teoría, existen diferenciaciones entre las brisas. Esto se refiere a la brisa de desarrollo gradual en días con flujo sinóptico en el mismo sentido de esta y la brisa frontal en días con un viento sinóptico de cierta intensidad soplando en sentido contrario al flujo local de la brisa.

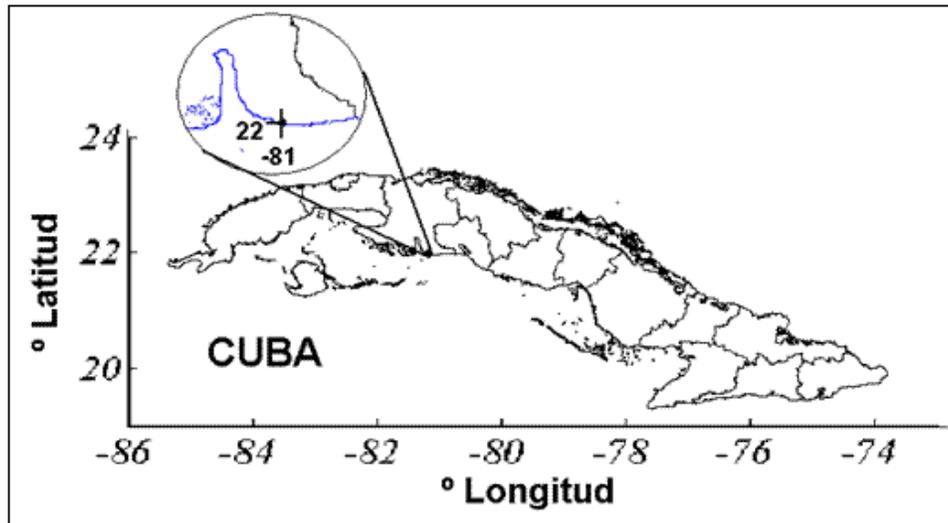
El primer tipo, o brisa de primera especie, es la que comienza como una pequeña circulación en la vecindad de la costa, inmediatamente después de que el aire sobre tierra empiece a calentarse más que sobre el agua y más tarde se desarrolla horizontal y verticalmente a medida que continúe el desigual calentamiento entre la tierra y el mar, interactuando con un flujo sinóptico en su mismo sentido de dirección. El segundo tipo, o brisa de segunda especie es la brisa frontal (frente de brisa) y se produce por la acumulación de aire frío sobre el mar empujado por el aire caliente que sale desde tierra. Se puede considerar como un caso particular de la brisa de primera especie (Carnesoltas, 2002a).

Estos autores anteriormente mencionados, han descrito la circulación local de las brisas de forma conceptual, o a partir de perfiles verticales realizados por sondeos, los cuales muestran las condiciones atmosféricas en una columna vertical durante una hora determinada. Carrasco et al. (2007) en un trabajo preliminar mostró como se manifestaba este proceso tanto en la costa Norte como en la costa Sur de Cuba y la importancia de considerarlo en la estimación del recurso eólico, fundamentalmente en la elaboración de pronósticos energéticos para parques eólicos ubicados en las costas. Hasta el momento no se ha podido encontrar otras referencias que profundicen en los efectos que provoca el régimen de brisas sobre la resultante de viento en el aprovechamiento de la energía eólica.

El objetivo del presente trabajo es determinar la influencia de la circulación de la brisa de mar y el terral en el aprovechamiento energético e implementar una metodología de trabajo aplicable a todas las zonas costeras de Cuba.

## 2. Materiales y métodos

En la investigación se tomaron los registros de la Torre Meteorológica de Referencia denominada “El Brinco”, ubicada en Playa Girón (región occidental de Cuba), municipio Ciénaga de Zapata, al Sur de la provincia de Matanzas. Esta torre se encuentra aproximadamente a 200m de la costa, con la línea costera orientada Oestenoroeste – Estesudeste con el mar hacia el Sursuroeste (**Fig. 1**).

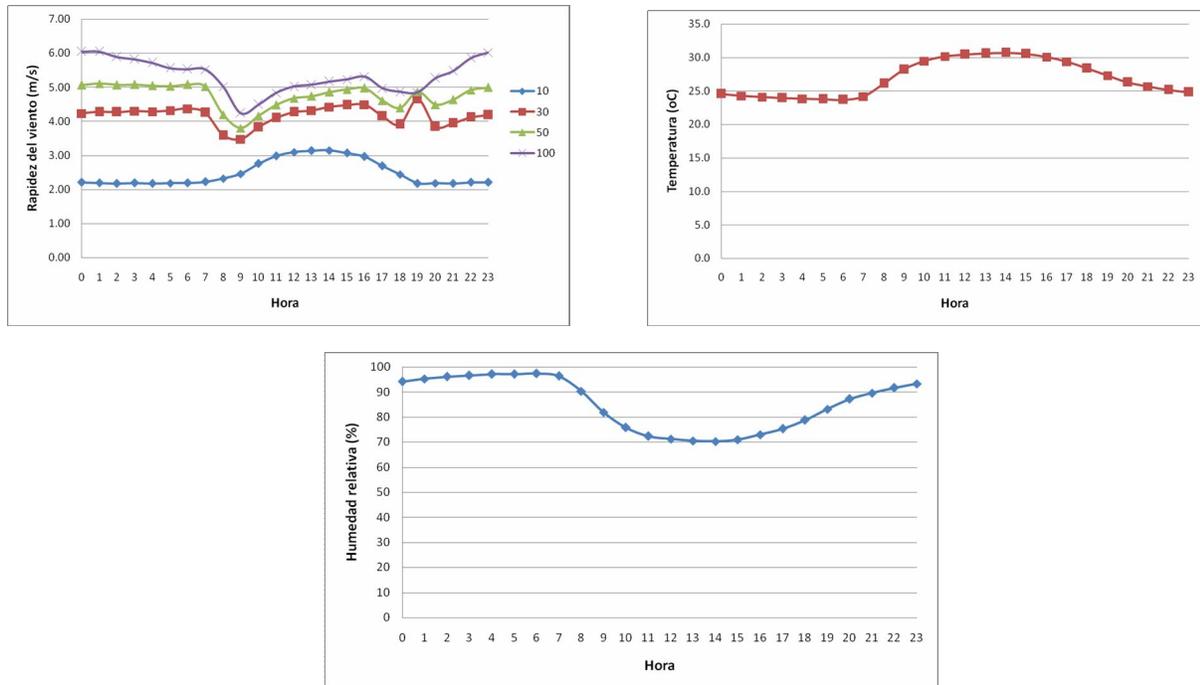


**Fig. 1:** Ubicación de la torre Meteorológica de Referencia denominada “El Brinco”, ubicada en Playa Girón (región occidental de Cuba) a los 22.07 de latitud Norte y 81.05 de longitud Oeste.

Del período lluvioso (mayo – octubre) del 2007, se analizaron los datos registrados cada 10 minutos de las siguientes variables meteorológicas: la rapidez del viento en los niveles de 10, 50 y 100 m de altura, la dirección del viento en los niveles de 10 y 100 m, así como la temperatura y la humedad relativa en el nivel de 10m.

Se utilizaron los mapas sinópticos de reanálisis de las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento en un dominio comprendido entre 15° Norte con 30° Norte y 90° Oeste con 70° Oeste, así como el campo de presión en superficie en un dominio comprendido entre 10° Norte con 50° Norte y 110° Oeste con 50° Oeste (Web de la NOAA), tomando como referencia los horarios 0600 y 1800 UTC (0100 y 1300 hora local) por ser representativos para analizar las condiciones sinópticas en presencia de terral y brisa de mar respectivamente. A partir de los mapas de las componentes u y v del viento, se determinó la dirección del régimen de viento a escala sinóptica que predominaba en la zona de estudio. Esto permitió saber cuándo el flujo sinóptico entraba o salía de la costa, para así poder determinar qué tipo de brisa influía (primera o segunda especie) en el proceso de la circulación de brisa de mar y el terral.

Se elaboraron los gráficos de la marcha diaria de la velocidad del viento para los cuatro niveles de medición, así como la temperatura y la humedad relativa para el nivel de 10m, lo que permitió caracterizar el proceso en su conjunto y poder distinguir los momentos de cambios de régimen, es decir el paso del terral a la brisa de mar y viceversa. **Fig.2**



**Fig. 2: Marcha diaria de la rapidez del viento por niveles, temperatura y humedad en 10m para la Torre de El Brinco. Mayo- Octubre 2007.**

Para un mejor entendimiento del proceso, se decidió dividir la muestra en dos grupos: las horas comprendidas bajo el régimen del terral y las de la brisa de mar. La hora de comienzo y final de las brisas no se encuentran bien definidas. Defant (1951) por su parte plantea que la brisa marina por lo general comienza entre las 1000 y 1100 hora local, con máximo de velocidad alrededor de las 1300 a 1400 hora local y disminuye entre las 1400 y hasta 2200 hora local, siendo reemplazada por la brisa nocturna de tierra, variando estos momentos con la época, la latitud y con varios factores locales. Por otra parte Carnesoltas (2002a) plantea “como en cualquier proceso continuo a la hora de estudiarse, puede elegirse un punto arbitrario como origen. Para el caso de la brisa de mar y tierra se asume por la mayoría de los autores que el comienzo de todo el mecanismo ocurre con el calentamiento del aire por la radiación terrestre en horas de la mañana.” En el presente estudio se decidió analizar el horario comprendido entre las 1900 y las 0900 hora local (meridiano 75° Oeste) para el análisis del terral, que comprenden las horas de la noche anterior y la madrugada del día analizado, así como las 0600 y 2100 hora local para el análisis de la brisa de mar. Estos intervalos se solapan entre los horarios de la mañana de 0600 y 0900 (hora local) y en la tarde entre 1900 y 2100 (hora local), con el objetivo de tener en cuenta los tiempos de transición entre los cambios de mecanismo del terral a brisa mar o viceversa.

Al calcularse las componentes  $u$  y  $v$  (10 y 100m) de la velocidad resultante del viento medida, se obtuvo la dirección del vector resultante del viento gráficamente cada 10 minutos. Cabe destacar que el viento medido por los instrumentos meteorológicos no es más que la resultante de varias componentes que intervienen entre si. No sería valido determinar las magnitudes de las componentes sinópticas a partir de métodos no matemáticos, pero sí se pudiera obtener la dirección del flujo general teniendo en cuenta los mapas de reanálisis antes mencionado. Fueron excluidos de la muestra los casos de influencia regional de sistemas sinópticos como frente fríos, líneas prefrontales activas y ciclones tropicales. La componente orográfica fue despreciada debido a la homogeneidad del terreno circundante. Los días reportados con tormentas locales fueron excluidos del análisis, minimizando los efectos de las componentes locales. Los efectos de la turbulencia, fuerza de desviadora de Coriolis y de fricción, fueron despreciados debido a ser componentes de menor orden de magnitud. Por tanto, para este estudio se determinó el nivel de influencia en dependencia del tipo brisa (primera o segunda especie) que correspondiera con la dirección del flujo sinóptico imperante.

Se dividió el análisis del terral y de la brisa de mar en tres subgrupos, con el objetivo de poder evaluar la afectación que provocó el tipo de brisa en la resultante del viento (**Tabla I**). Esta clasificación se realizó teniendo en cuenta, qué por ciento de tiempo se había desviado la dirección del vector resultante del viento con respecto a la

dirección del flujo sinóptico estimado a partir de los mapas de reanálisis, tomando como referencia la orientación de la línea costera.

**Tabla I.** Forma de evaluación de acuerdo al nivel de influencia que provocó cada tipo de brisa sobre la resultante del viento

Proceso de circulación	Tipo de brisa	Nomenclatura	Nivel de influencia	Descripción
<b>Terral</b>	Primera especie	TD1	Débil	Más del 50% del tiempo con giro del viento hacia la tierra
		TM1	Moderada	Menos del 50% del tiempo con giro del viento hacia tierra
		TF1	Fuerte	0% del tiempo con giro del viento hacia tierra
	Segunda especie (frente de brisa)	TD2	Débil	0% del tiempo con giro del viento hacia el mar
		TD2	Moderada	Menos del 50% del tiempo con giro del viento hacia el mar
<b>Brisa de Mar</b>	Primera especie	TD2	Fuerte	más del 50% del tiempo con giro del viento hacia el mar
		MD1	Débil	Más del 50% del tiempo con giro del viento hacia el mar
		MM1	Moderada	Menos del 50% del tiempo con giro del viento hacia el mar
	Segunda especie (frente de brisa)	MF1	Fuerte	0% del tiempo con giro del viento hacia el mar
		MD2	Débil	0% del tiempo con giro del viento hacia tierra
		MD2	Moderada	Menos del 50% del tiempo con giro del viento hacia tierra
		MD2	Fuerte	más del 50% del tiempo con giro del viento hacia tierra

Teniendo en cuenta estos criterios, se construyeron los perfiles verticales del viento con el promedio de la velocidad resultante en los cuatro niveles de medición para cada muestra. A su vez, con el fin de determinar la influencia de la brisa sobre el patrón de viento en la zona de estudio, se obtuvo el histograma de la velocidad resultante y la distribución de frecuencia por rumbos en el nivel de 100m. Por último, para poder establecer una comparación con el aprovechamiento energético, se calculó con el utilitario OWC Wizard de WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) la densidad de potencia media del viento en el nivel de 100m de acuerdo a la influencia de cada tipo de brisa.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Análisis del terral

Como ya se planteó anteriormente, la línea costera en El Brinco tiene una orientación Oestenoeste – Estesudeste con el mar hacia el Sursuroeste. De los 184 noche- madrugadas (n-m) analizados, el 71% (130 n-m) de estas las componentes del viento sinóptico estuvieron entre el Noroeste y el Este, saliendo de la costa, dando lugar a la probabilidad de formación de la brisa de primera especie. Sin embargo, solo un 29% de los casos, el flujo sinóptico fue entrando a la costa entre el Sureste y el Oeste, disminuyendo de esta forma la probabilidad de formación de brisa de segunda especie.

Fueron excluidos del análisis varias noche - madrugadas que estuvieron bajo influencia regional de sistemas sinópticos. En el mes de junio se eliminaron dos casos debido a la cercanía de la Tormenta Tropical Barry. En el mes de agosto se descartaron dos casos por estar asociado a la proximidad del Huracán Dean. En octubre se excluyeron siete casos, cuatro vinculado con la afectación de la Tormenta tropical Noel y tres con la influencia de un Frente Frío

casi estacionario en el occidente del país. Durante el periodo analizado no se reportó ningún caso de Tormenta Local Severa. Por tanto, la muestra de datos quedó con 173 casos para estudiar, 121 (70%) con flujo sinóptico saliendo de la costa y 52 (30%) entrando a la costa.

### 3.1.1 Análisis de la brisa de primera especie

El perfil vertical del viento describe una marcada diferencia entre los promedios de velocidad del viento para cada altura de medición (Fig. 3). Durante los casos en que la brisa de primera especie tuvo una fuerte influencia (TF1) se registraron promedios de velocidades del viento muy superiores con respecto a los demás grupos, observándose una marcada cizalladura del viento entre los niveles bajos y altos. Sin embargo, bajo una débil y moderada influencia de esta brisa (TD1 y TM1) el viento se comportó más débil. Al encontrarse el vector del terral en el mismo sentido del flujo sinóptico se produce un incremento en la resultante de viento medido, más aun si existe una fuerte influencia de la brisa de primera especie como representa el perfil vertical del viento.

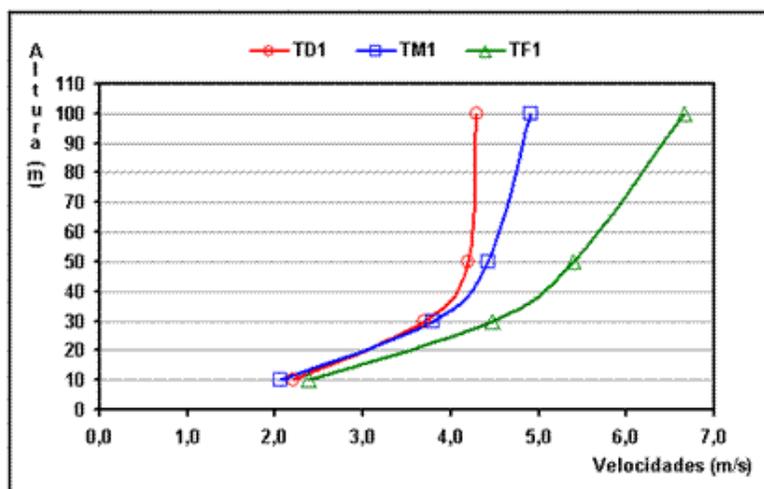


Fig. 3: Perfil vertical del viento para los cuatro niveles de medición (10, 30, 50 y 100m) en El Brinco, según la influencia de la brisa de tierra de primera especie.

Al realizar la distribución de frecuencia de la velocidad del viento teniendo en cuenta los grupos anteriores (Fig. 4), se pudo observar que con una débil influencia de la brisa de primera especie, los valores no superaron los 8 m/s, presentándose su máximo de ocurrencia entre 5 y 6 m/s y sólo manteniéndose por encima de 4 m/s el 60% del tiempo. Estas condiciones tienen muy baja probabilidad de ocurrencia pues de toda la muestra sólo se encontró un caso con estas características.

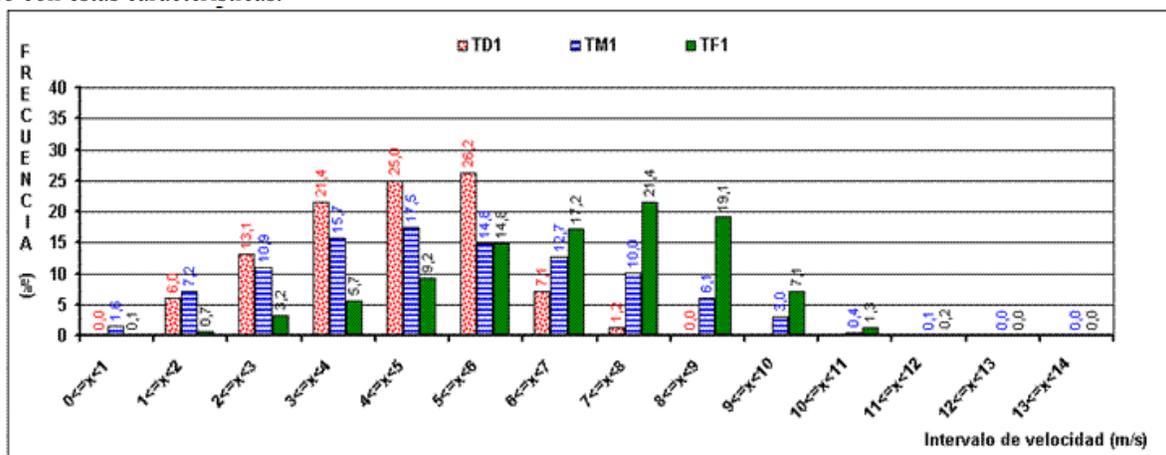
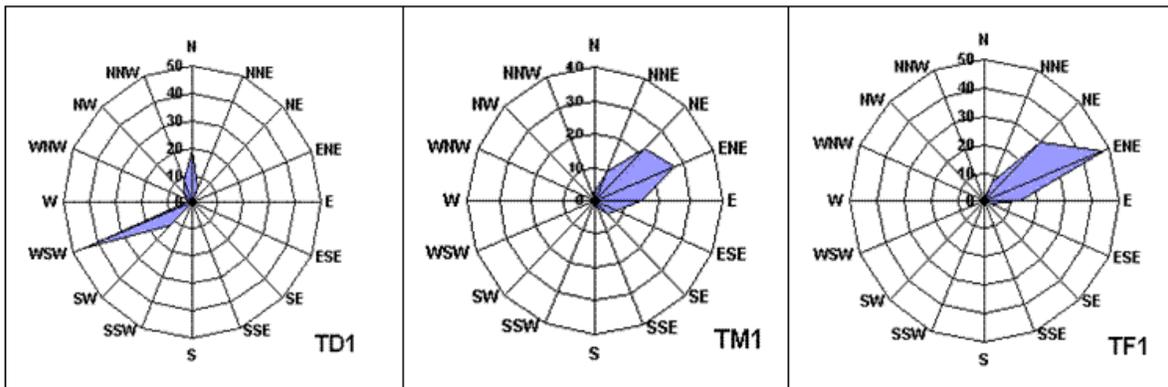


Fig. 4: Distribución de frecuencia de la velocidad del viento en el nivel de 100m con respecto a los grupos analizados.

Con una moderada influencia de la brisa de primera especie, se registraron valores puntuales entre 10 y 14 m/s, presentándose más concentradamente por debajo de los 9 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 4 y 5 m/s, manteniéndose por encima de 4 m/s el 65% del tiempo.

Con fuerte influencia de la brisa de tierra de primera especie los valores registrados no superaron los 14 m/s, con el máximo de ocurrencia comprendido entre 7 y 8 m/s, lográndose mantener los valores por encima de 4 m/s en el 90% del tiempo. Al encontrarse el vector de la brisa de tierra en el mismo sentido que el flujo sinóptico, esto conlleva a que dicho flujo se vea incrementado por la brisa. Por tanto, si no se tienen en cuenta estas condiciones locales a la hora de pronosticar la intensidad del viento, es posible que se subestime los valores previstos.

En la distribución de frecuencia por rumbos para cada grupo (**Fig. 5**), se puede observar claramente como varía la dirección del viento en dependencia del tipo de influencia ejercida por la brisa de primera especie. El único día que la influencia de esta brisa fue débil, el gradiente de presión era tan débil que la dirección del viento dependió totalmente de los efectos locales (TD1). Al presentarse una influencia de este tipo de brisa, la dirección del viento varió entre el primer y segundo cuadrantes (TM1 y TF1), siendo mucho más pronunciado la frecuencia del primer cuadrante en los casos de fuerte influencia.



**Fig. 5: Distribución de frecuencia por rumbo en función del tipo de influencia de la brisa de tierra de primera especie.**

Se calculó la densidad de potencia media para cada uno de estos grupos (**tabla II**) obteniéndose de esta forma, que la mayor densidad de potencia media ( $222 \text{ W/m}^2$ ) se alcanzó durante los días en que hubo fuerte influencia de la brisa de primera especie. Sin embargo, durante los días en que hubo influencia moderada de dicho proceso, los rendimientos eólicos disminuyeron casi el doble, obteniéndose una densidad de potencia media de  $117 \text{ W/m}^2$ , mientras que el día con débil influencia de la brisa de primera especie los resultados fueron mucho más bajos con valores de  $61 \text{ W/m}^2$ . Estas circunstancias están originadas debido a todo lo explicado anteriormente.

**Tabla II. Densidad de potencia media obtenida para cada grupo ( $\text{W/m}^2$ )**

TD1	TM1	TF1
61	117	222

### 3.1.2 Análisis de la brisa de segunda especie

Al analizar el perfil vertical del viento para cada nivel de influencia del Fbt (**Fig. 6**), se pudo observar una diferencia considerable entre los tres grupos. Durante los días donde la influencia del Fbt fue débil, los promedios de velocidad del viento fueron superiores en comparación a los días en que el Fbt desempeñó alguna influencia sobre la resultante del viento, con una marcada cizalladura del viento en los niveles próximos a la superficie.

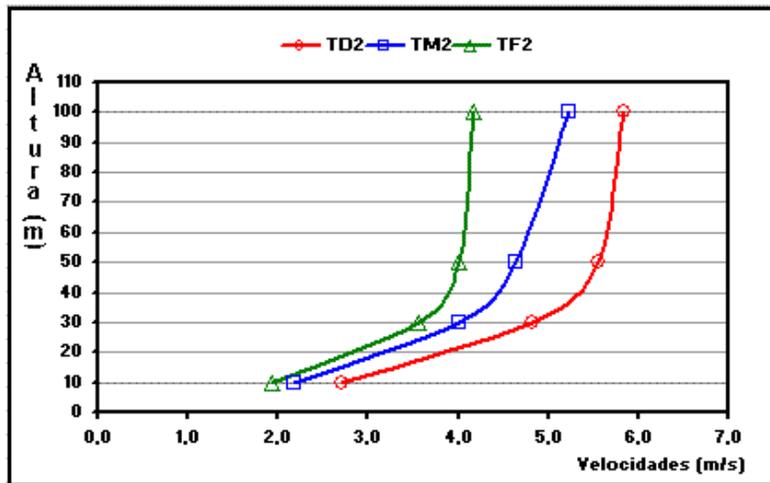


Fig. 6: Perfil vertical del viento con un flujo entrando a la costa, en dependencia de la influencia de la brisa de tierra de segunda especie, para los cuatro niveles de medición (10, 30, 50 y 100m).

Lo anteriormente descrito se debe a que durante los días con débil influencia, la resultante del viento se mantuvo con el mismo sentido del flujo sinóptico. Por tanto, los valores registrados estarán condicionados por las características sinópticas de cada día, sin la presencia de una componente en sentido contrario como el terral. Sin embargo, ya al presentarse cierta influencia de esta brisa, el flujo sinóptico se verá obstaculizado por una componente en sentido contrario. Al mantenerse durante más tiempo el predominio del Fbt, la dirección del viento se estabiliza en un mismo sentido, dependiendo los valores de la resultante del viento, de la intensidad de esta masa de aire.

En el histograma de velocidad del viento para cada muestra (Fig. 7) se pudo observar más claramente las diferencias entre los grupos explicados en el perfil vertical del viento. En los casos donde la influencia del Fbt fue débil, las velocidades del viento en el nivel de 100m llegaron a registrar valores hasta de 16 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 6 y 7 m/s. Los valores por encima de 4 m/s (velocidad de arranque más frecuente de los aerogeneradores) se mantuvieron más del 85% del tiempo. En estos casos, al permanecer imperando el flujo sinóptico, los registros de velocidad del viento estuvieron condicionados por las características sinópticas de cada día.

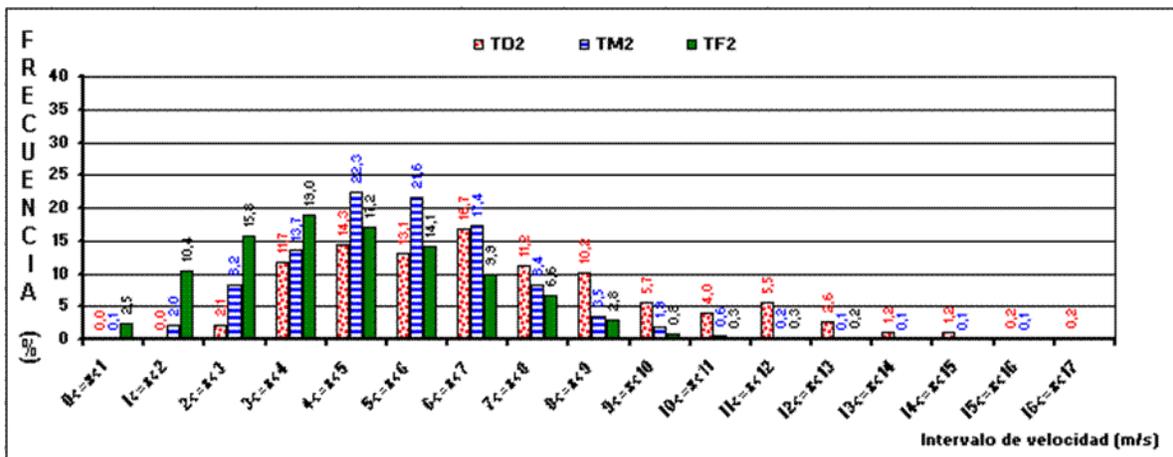


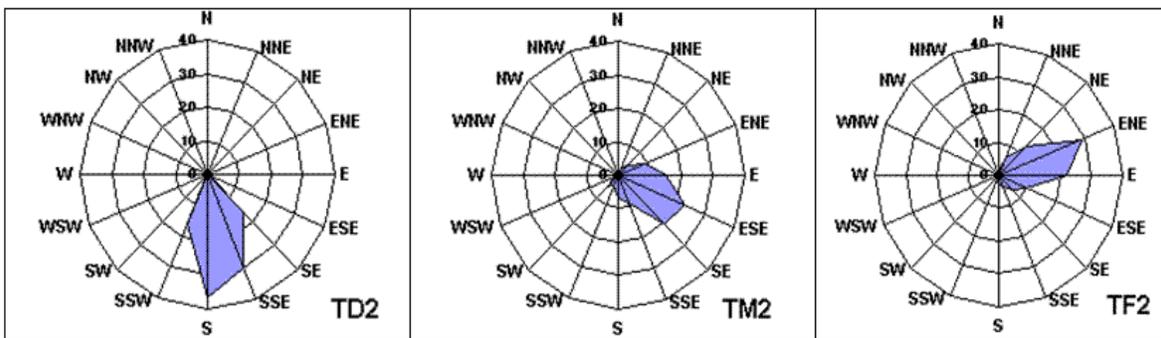
Fig. 7: Distribución de frecuencia de la velocidad del viento en el nivel de 100m con respecto a los grupos analizados.

Los días donde la influencia del Fbt fue moderada, llegó a registrarse valores hasta de 15 m/s, pero estos estuvieron más concentrados por debajo de los 9 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 4 y 5 m/s, manteniéndose los valores por encima de 4 m/s menos del 75% del tiempo. Los valores por encima de 9 m/s ocurrieron durante poco

tiempo debido a la inestabilidad que provoca la influencia del Fbt. Al mantenerse variando la dirección del viento, como consecuencia de la entrada y salida del frente de brisa, y no permanecer un régimen determinado durante el día, trae consigo que las velocidades del viento no se estabilicen, siendo esto desfavorable para el aprovechamiento de la energía eólica.

Los días en los cuales la influencia del Fbt fue fuerte, no se registraron valores superiores a 13 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 3 y 4 m/s, manteniéndose los valores por encima de 4 m/s por debajo del 50% del tiempo. Al imponerse el flujo de la brisa de tierra de segunda especie al flujo sinóptico durante más tiempo en el día, trajo como consecuencia que las velocidades del viento no aumentaran considerablemente, pues estaban condicionadas por la relación entre la intensidad del flujo general y la brisa de tierra. Sin embargo, se mantuvieron más estables.

En la distribución de frecuencias por rumbos para cada grupo (**Fig. 8**), se puede observar claramente como varía la dirección del viento en dependencia del tipo de influencia ejercida por el flujo local detrás del Fbt. Mientras que la influencia de dicho flujo fue débil, la dirección predominante del viento se encuentra del segundo y tercer cuadrante (TD2). Al presentarse una influencia moderada de la brisa, la dirección del viento varío en el primero, segundo y tercer cuadrantes (TM2). Sin embargo, al establecerse el flujo después del Fbt durante un mayor tiempo, la mayor frecuencia de la dirección del viento se establece entre el primer y segundo cuadrante (TF2).



**Fig. 8.** Distribución de frecuencia por rumbo en función del tipo de influencia de la brisa de tierra de segunda especie.

Lo explicado anteriormente es confirmado cuando se calcula la densidad de potencia media para cada uno de estos grupos (**tabla. III**). De esta forma se obtuvo, que la mayor densidad de potencia media ( $155 \text{ W/m}^2$ ) se pudo alcanzar durante los días en que no hubo influencia de la brisa de tierra de segunda especie. Sin embargo, durante los días en que hubo alguna influencia de dicho flujo, los valores de la densidad de potencia media estuvieron determinados por el nivel de influencia de la brisa, obteniéndose una mayor densidad de potencia media durante los días de moderada influencia con respecto a los de fuerte influencia ( $120$  y  $79 \text{ W/m}^2$  respectivamente).

**Tabla III.** Densidad de potencia media obtenida para cada grupo ( $\text{W/m}^2$ )

TD2	TM2	TF2
155	120	79

### 3.2 Análisis de la brisa de mar

De los 184 días analizados, el 79% de los días (145 días) se presentaron con flujo sinóptico saliendo de la costa, dando lugar a una alta probabilidad de brisa de segunda especie (frente de brisa). Mientras que con flujo entrando a la costa se presentó el 21% de los días (39 días), disminuyendo la probabilidad de formación de brisa de primera especie.

En el mes de junio se eliminaron dos casos debido a la cercanía de la Tormenta Tropical Barry. En el mes de agosto se descartaron dos casos por estar asociado a la proximidad del Huracán Dean. En octubre se excluyeron siete casos, cuatro vinculado con la afectación de la Tormenta tropical Noel y tres con la influencia de un Frente Frío casi estacionario en el occidente del país. Durante el periodo analizado no se reporto ningún caso de Tormenta Local Severa. Por tanto, la muestra de datos quedó con 173 casos para estudiar, 136 (79%) con flujo sinóptico saliendo de la costa y 37 (21%) entrando a la costa.

### 3.2.1 Análisis de la brisa de primera especie

De la muestra analizada no se encontró ningún caso con débil influencia de la brisa de mar de primera especie (MD1). El perfil vertical del viento para el resto de los grupos describió una diferencia entre los promedios de velocidad del viento para cada altura de medición (Fig. 9). Durante los días en que la brisa de primera especie tuvo una fuerte influencia (MF1), el flujo sinóptico se vio incrementado por esta brisa, trayendo consigo que la cizalladura vertical del viento fuese superior con respecto a los días en que ocurrió moderada influencia (MM1).

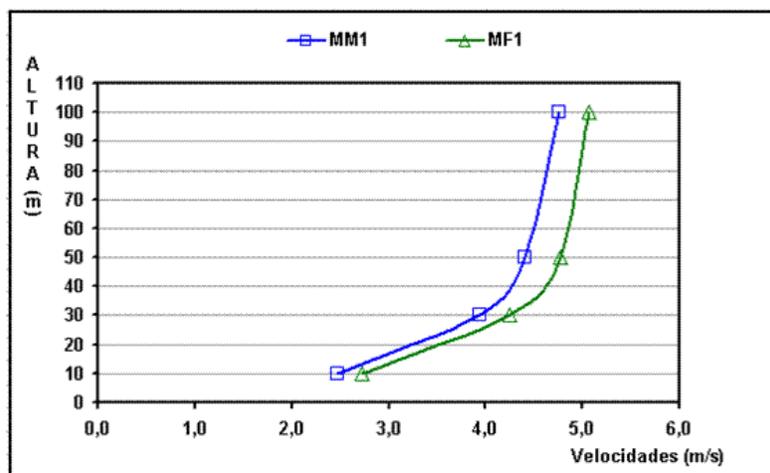


Fig. 9: Perfil vertical del viento con un flujo entrando a la costa de El Brinco, en dependencia de la influencia de la brisa de mar de primera especie, para los cuatro niveles de medición (10, 30 y 100m).

En la distribución de frecuencia de la velocidad del viento teniendo en cuenta los grupos anteriores (Fig. 10), se pudo observar que durante los días con moderada influencia de la brisa de primera especie, se registraron valores entre 10 y 16 m/s durante cortos intervalos de tiempo, observándose una mayor frecuencia por debajo de 8 m/s. Los máximos de ocurrencia estuvieron entre 4 y 5 m/s, manteniéndose por encima de 4 m/s el 62% del tiempo.

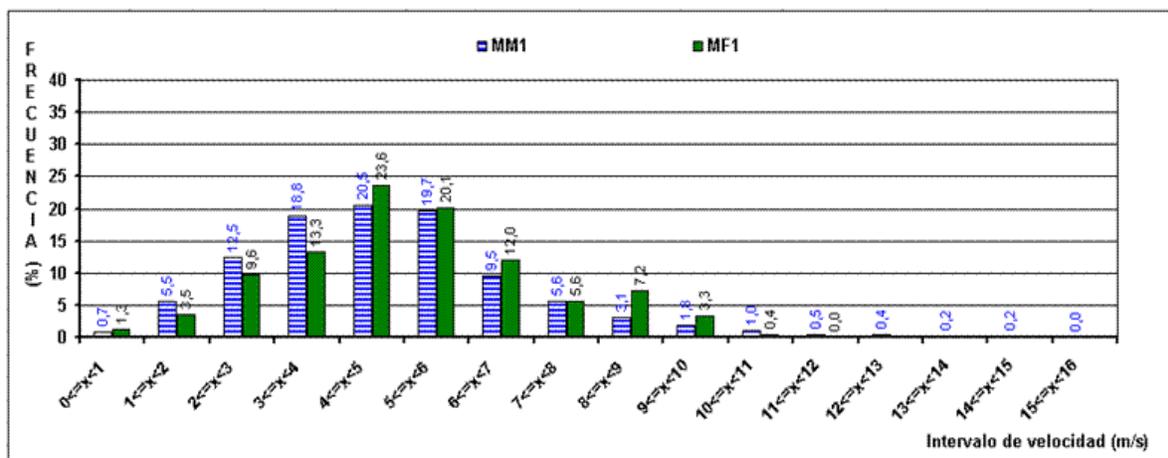


Fig. 10: Distribución de frecuencia de la velocidad del viento en el nivel de 100 m con respecto a los grupos analizados.

Sin embargo, con fuerte influencia de la brisa de mar de primera especie los valores registrados no superaron los 12 m/s, siendo más concentrados por debajo de los 10 m/s. El máximo de ocurrencia estuvo comprendido entre 4 y 5 m/s, lográndose mantener los valores por encima de 4 m/s el 72% del tiempo.

Con la distribución de frecuencia por rumbos para cada grupo (Fig. 11), se puede observar claramente cómo varía la dirección del viento en dependencia del tipo de influencia ejercida por la brisa de primera especie. Al presentarse una influencia moderada de este tipo de brisa, la dirección del viento varía entre el primer, segundo y tercer

cuadrante, en cambio, si la influencia de esta brisa es fuerte, la dirección predominante del viento se encuentra fundamentalmente en el segundo cuadrante.

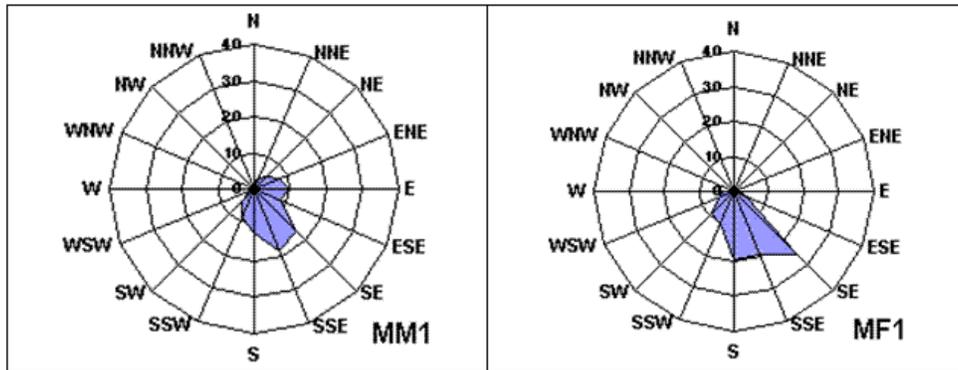


Fig. 11: Distribución de frecuencia por rumbo en función del tipo de influencia de la brisa de mar de primera especie.

Con este flujo se obtuvo, que la mayor densidad de potencia media ( $117 \text{ W/m}^2$ ) se alcanzó durante los días en que hubo una influencia fuerte de la brisa de primera especie. Sin embargo, durante los días en que la influencia fue moderada, los rendimientos eólicos disminuyeron, obteniéndose una densidad de potencia media de  $109 \text{ W/m}^2$  (tabla IV).

Tabla IV. Densidad de potencia media obtenida para cada grupo ( $\text{W/m}^2$ )

MM1	MF1
109	117

### 3.2.2 Análisis de la brisa de segunda especie

Al analizar el perfil vertical del viento (Fig. 12) para cada nivel de influencia de la brisa de mar de segunda especie (F<sub>bm</sub>), se pudo observar una diferencia considerable entre los días con débil influencia y aquellos donde se presentó alguna influencia. Durante los días donde la influencia del F<sub>bm</sub> fue débil, el perfil muestra una marcada cizalladura vertical entre los niveles bajos y altos. Sin embargo, durante los días con alguna influencia de la brisa, la cizalladura no es tan pronunciada, mostrando una mayor diferencia entre los niveles de 10 y 30m, disminuyendo con la altura. Durante los días con moderada influencia los promedios de velocidad en los niveles altos fueron más elevados que los días con fuerte influencia. Estas diferencias se deben a que cuando hay una débil influencia la cizalladura vertical es alta, puesto que la rugosidad, y por tanto, la fricción en esta zona es alta. La vegetación en esta zona es de bosque con altura superior a los 5 m.

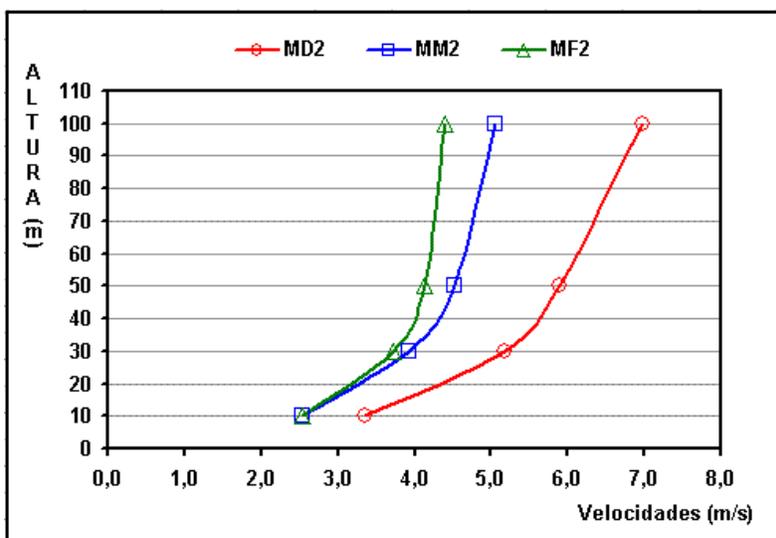


Fig. 12: Perfil vertical del viento con un flujo saliendo de la costa de El Brinco, en dependencia de la influencia de la brisa de mar de segunda especie, para los cuatro niveles de medición (10, 30, 50 y 100m)

La distribución de frecuencia de velocidad del viento para cada muestra (Fig. 13) mostró más claramente las diferencias expresadas anteriormente. En los casos donde la influencia del Fbm fue débil, llegaron a registrarse velocidades del viento en el nivel de 100m hasta 13 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 7 y 8 m/s, manteniéndose por encima de 4 m/s el 95% del tiempo.

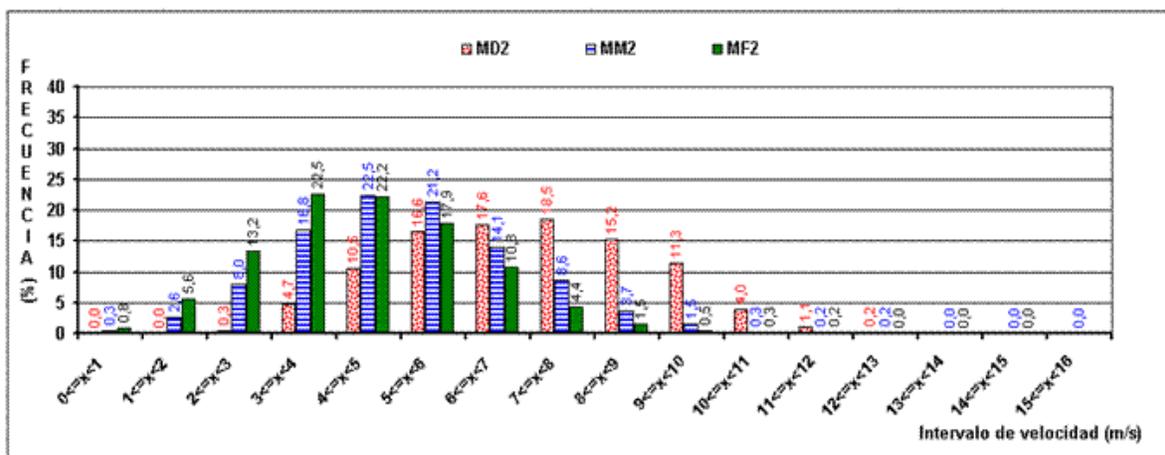


Fig. 13: Distribución de frecuencia de la velocidad del viento en el nivel de 100 m con respecto a los grupos analizados.

Los días donde la influencia del Fbm fue moderada, llegaron a registrarse valores aislados hasta 16 m/s, pero los valores estuvieron más concentrados por debajo de los 8 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 4 y 5 m/s; manteniéndose los valores por encima de 4 m/s el 72% del tiempo.

Durante los días en los cuales la influencia de esta brisa fue fuerte, se registraron valores entre 10 y 14 m/s pero fueron muy ocasionales. Las velocidades se encontraron más concentradas por debajo de los 8 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 3 y 4 m/s, manteniéndose los valores por encima de 4 m/s el 58% del tiempo.

En la distribución de frecuencia por rumbos para cada grupo (Fig. 14), se pudo observar claramente como varió la dirección del viento en dependencia del tipo de influencia ejercida por la brisa de mar de segunda especie. Mientras que la influencia de esta brisa fue débil, la dirección predominante del viento se encontró del primer cuadrante. Al presentarse una influencia moderada de la brisa, la dirección del viento varió entre el primer y el

segundo cuadrantes, siendo mayor la frecuencia hacia el primer cuadrante. Sin embargo, cuando la brisa se mantuvo más tiempo, la mayor frecuencia de la dirección del viento fue entre el segundo y el tercer cuadrante.

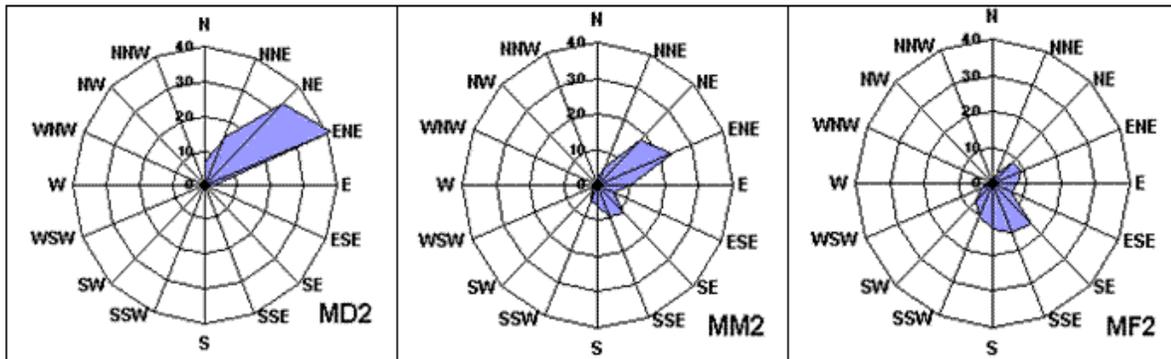


Fig. 14: Distribución de frecuencia por rumbo en función del tipo de influencia de la brisa de mar de segunda especie.

Luego de caracterizado el efecto del Fbm en función del nivel de influencia, se determinó la densidad de potencia media para cada uno de los grupos (tabla. V). La mayor densidad de potencia media ( $254 \text{ W/m}^2$ ) se alcanzó durante los días en que no hubo influencia de la brisa de segunda especie. Sin embargo, durante los días en que hubo alguna influencia de dicho proceso, los valores estuvieron determinados por el nivel de influencia de la brisa, obteniéndose una mayor densidad de potencia media durante los días de moderada influencia con respecto a los de fuerte influencia ( $111$  y  $78 \text{ W/m}^2$  respectivamente).

Tabla V. Densidad de potencia media obtenida para cada grupo ( $\text{W/m}^2$ )

MD2	MM2	MF2
254	111	78

## Conclusiones

- En presencia de la brisa de segunda especie, tanto en el terral como en la brisa de mar, la mayor densidad de potencia se alcanzó durante los días en que la influencia de dicha brisa es débil, manteniéndose la persistencia de los vientos por encima de  $4 \text{ m/s}$  más del 85% del día.
- A pesar de que una fuerte influencia de la brisa de primera especie favorece al flujo sinóptico, esta no superó durante el día los rendimientos obtenidos con una débil influencia de la brisa de segunda especie, manteniéndose las velocidades del viento por encima de  $4 \text{ m/s}$  menos del 90% del día bajo los dos regímenes.
- Es necesario estudiar con mayor profundidad la brisa de segunda especie, debido a que es cierto que con una débil influencia se obtiene el mayor aprovechamiento eólico en ambos regímenes, pero al aumentar la influencia de esta brisa los rendimientos bajan considerablemente.
- El método empleado en la presente investigación constituye una nueva metodología para evaluar la influencia de la circulación local de las brisas para zonas costeras y su aplicación contribuye a una mejor evaluación del recurso eólico.
- La metodología debe ser aplicada para zonas costeras donde el viento no sea perturbado por la orografía y durante días sin la afectación de Tormentas Locales Severas o grandes sistemas sinópticos.

**Agradecimientos:** A los compañeros del grupo Eólico (INSMET) especialmente a la técnica Leticia Muñiz, por toda la colaboración brindada.

## Referencias

- Batista, T. L. (1984):** Algunas consideraciones sobre la zona de convergencia de brisas en el Polígono Meteorológico de Camagüey y su influencia en el comportamiento de las precipitaciones. Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Camagüey y Ciego de Avila. Academia de Ciencias de Cuba. Inédito, 8 pp.
- Bornstein, R. and W. Thompson (1981):** Effects of Frictionally Retarded Sea Breeze and Synoptic Frontal Passages on Sulfur Dioxide Concentrations in New York City. *J. A. M.* Vol. 20, No. 8, August 1981.
- Carnesoltas, M. (1986):** La circulación local de brisa en Cuba. Instituto de Meteorología, La Habana [Tesis Doctoral], 96 p.
- Carnesoltas, M. (2002a):** La brisa de Mar y Tierra. Conceptos fundamentales. *Revista Cubana de Meteorología.* Vol. 9, N° 1, 43 – 72.
- Carnesoltas, M. (2002b):** El Frente de la Brisa de Tierra. *Revista Cubana de Meteorología.* Vol. 9, N° 2, 83 – 89.
- Carrasco, M., M. Carnesoltas y A. Roque (2007):** La circulación local de la brisa de mar y sus efectos en el aprovechamiento de la energía eólica. Casos de estudio. En: IV Congreso de Meteorología en Cuba [Memorias], La Habana, Cuba, 4-8 diciembre, ISBN 978-959-7167-12-9
- Conrad, V. (1928):** Beobachtungen übre den Seewinden einen flacha Sandstrand. *Ann. Hydrogr.,* Berlin, 56, 1 – 3.
- Defant, F. (1950):** Theorie der Land – und Seewinde. *Arch. Meteor. Geophys. Biokl.,* 2 (A): pp. 404- 425.
- Defant, F. (1951):** Local winds. *Compendium of Meteorology,* Amer. Met. Soc. Pp. 655- 672.
- Donn, W. L., P. Milic and R. Brillant (1956):** Gravity Waves and the Tropical Sea Breeze. *J. Meteor.,* 13, 356- 361.
- Fernández, A. y A. C. Pazos (1998):** Pronóstico trihorario del viento en la provincia de Ciego de Avila. Editorial Academia. La Habana. 33 pp.
- Hernández, S. R. y H. Elizarde (1981):** Climatología de las brisas en la costa norte de la provincia de Matanzas. Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Matanzas. Academia de Ciencias de Cuba. Inédito.
- Koschmieder, H. (1941):** Danziger Seewindstudien. *Forsch. Arl. Meteor. Inst. Danzig,* 8, 1 – 44, 10, 1 39.
- Lecha, E. L., A. Fernández y R. Bueno (1979):** Distribución de la precipitación en la parte central de Cuba y su relación con el campo de viento a mesoescala y a escala sinóptica. Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Villa Clara. Academia de Ciencias de Cuba. Depositado en biblioteca. 28 pp.
- Lecha, E. L., L. Paz y B. Lapinel (1994):** El clima de Cuba. Editorial Academia. La Habana. 186 pp.
- Leopold B. (1949):** The interaction of trade wind and sea breeze, Hawai. *J. Meteor.,* Vol. 6, pp. 312- 320.
- OMM (1992):** Vocabulario Meteorológico Internacional. OMM / No. 182, Secretaría de la OMM, Segunda Edición, ISBN92 – 63 – 02182 – 1.
- Osorio, M. y J. Rego (1980):** Estudio climático de la brisa en la estación de Casa Blanca. Departamento de Climatología del Instituto de Meteorología. 8 pp.
- Portela, S. M. (2002):** Pronóstico de la ocurrencia de “brisote sucio” en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología.* Vol. 9, N° 2, 49 – 53.
- Rey, O. (1982):** Características de la brisa en la localidad de Cienfuegos y su relación con la ocurrencia de precipitaciones. Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Santa Clara. 10 pp.
- Rivero, V. R. (1978):** Características sinóptico – climatológicas de las provincias de Camagüey y Ciego de Ávila. Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Camagüey. Academia de Ciencias de Cuba. 14 pp.
- Saenz, R. (1981):** Comportamiento de la brisa y su relación con la ocurrencia de las precipitaciones en la localidad de Jibaro. Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Santa Clara. 14 pp.
- Soltura, R., A. Roque. I. Rivero, A. Wallo, R. Báez, R. Vázquez, R. Rivero, M. Ayala, G. Rodríguez, H. Carrasco, A. Curbelo, A. González, O. Herrerías, G. Martín, J. Díaz y G. Hernández (2006):** Informe del Mapa de Potencial Eólico de Cuba. Informe Científico – Técnico de Instituto de Meteorología.
- Warner, T. T. (1978):** Numerical Simulation with Three- Dimensional Mesoscale Model. *M. W. R.* Vol. 106, No. 8, 1978, pp. 1079- 1099.
- Web de la NOAA (2010):** Physical Sciences Division de la NOAA/ESRL [en línea]. Consulta: julio- diciembre 2010. Disponible en: [http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.surface.html#temp\\_](http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.surface.html#temp_)
- Wexler, R. (1946):** Theory and observations of land and sea Breezes. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 27, pp. 272- 287.

