

Características del perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba, atendiendo a la estratificación térmica de la atmósfera

Alfredo Roque-Rodríguez *, Magdiel Carrasco-Díaz y Pablo Reyes-Martínez

Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba
alfredo.roque@insmet.cu

Recibido: diciembre 22, 2014

Aceptado: junio 15, 2015

Resumen

En el presente trabajo se presentan los perfiles verticales medios de la rapidez del viento para distintas estratificaciones térmicas de la atmósfera y diferentes condiciones física-geográficas en el periodo de mediciones 2007-2009, obteniéndose como principales resultados, la fuerte estabilidad de las horas nocturnas y primeras horas de la mañana para toda Cuba, así como la fuerte inestabilidad que se presenta en las horas del mediodía. La oscilación diurna del viento presenta una notable diferencia de norte a sur, estando los máximos valores de rapidez del viento en la costa norte en los horarios del mediodía, lo cual es totalmente contrario en la costa sur. Se obtuvieron los valores de la velocidad de fricción u_* y del parámetro de rugosidad z_0 para condiciones neutrales y el valor del exponente α de la ley de potencia del viento para las distintas estratificaciones térmica de la atmósfera encontradas.

Palabras clave: Estabilidad atmosférica, oscilación diurna del viento, perfil vertical del viento

Characteristics of wind vertical profile in the atmospheric surface layer on Cuba, based on the thermal stratification of the atmosphere

Abstract

In this paper are show the vertical mean profiles of wind speed for different thermal stratification of the atmosphere and different physical – geographical conditions in period 2007-2009, obtaining as main results, strong stability at night hours and early in the morning for the whole Cuba, as well as strong instability in the midday hours. The diurnal oscillation of wind has a noticeable difference from north to south, being the maximum values of wind speed on the north coast in times of noon, which is totally contrary to the south coast. The values of friction velocity u_* and the roughness parameter z_0 for neutral conditions and the exponent α of the wind power law for different thermal stratifications of the atmosphere were obtained.

Keywords: Atmospheric stability, diurnal oscillation of wind, wind vertical profiles

1. Introducción

La capa superficial atmosférica definida como la capa próxima a la superficie terrestre donde los flujos turbulentos (cantidad de movimiento, el calor y la humedad) varían menos del 10% del valor que tienen en la superficie es de suma importancia en las investigaciones meteorológicas aplicadas, en las que revisten particular importancia las relacionadas con la contaminación atmosférica y el estudio del viento en dicha capa para su aplicación como fuente renovable de energía.

Entre las características de la capa superficial atmosférica se encuentran su fuerte variación diaria; durante las horas de sol, se caracteriza por un gradiente superadiabático, un decrecimiento de la humedad con la altura y una gran cizalladura del viento. Además, la turbulencia es de carácter térmico y mecánico (Stull, 1994). Por la noche, la capa superficial atmosférica se caracteriza por una fuerte estabilidad que inhibe los movimientos verticales de las masas de aire, mostrando generalmente turbulencia de carácter mecánico exclusivamente. En este trabajo, además de mostrar el comportamiento de variables como la temperatura y la densidad del aire, se hará especial énfasis en mostrar las características del perfil vertical del viento bajo diferentes estratificaciones térmicas de la atmósfera por ser la característica más importante de esta capa para la generación de energía proveniente del viento y para la modelación de la dispersión de contaminantes.

Es importante señalar que el crecimiento de la altura del rotor de los modernos aerogeneradores, así como la altura de la chimenea de las termoeléctricas, requiere una investigación cuidadosa de la estructura de la capa fronteriza, en primer lugar, para describir los perfiles de viento correctamente. Alturas de 80m y más, están usualmente por encima de la capa superficial y la ley de potencia y perfil logarítmico del viento son estrictamente válidos solo en la capa superficial atmosférica (Emeis, 2013).

La característica más importante de la capa superficial atmosférica y que determina el uso del viento en la producción de energía, es el incremento con la altura de la rapidez del viento. Este comportamiento se ha descrito fundamentalmente mediante la expresión clásica del perfil logarítmico del viento (ecs. 1 y 2), aunque la expresión empírica de la ley de potencia (ec. 3) ha sido también ampliamente utilizada (Emeis, 2013).

Perfil Logarítmico del viento

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad \text{estratificación neutral} \quad (1)$$

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left(\ln \left(\frac{z}{z_o} \right) - \psi_m \left(\frac{z}{L_*} \right) \right) \quad \text{estratificación} \neq \text{neutral} \quad (2)$$

donde u^* velocidad de fricción
 z_o longitud de rugosidad
 k constante de von Karman
 ψ función de estratificación térmica
 L longitud de Monin - Obukhov

Ley de Potencia del Viento

$$u(z) = u_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (3)$$

donde α es el coeficiente de variación vertical del viento o exponente de Hellmann.

En la ec. 3 α depende de la rugosidad superficial y de la estabilidad térmica, la que en nuestro caso se determinó atendiendo a las categorías de estabilidad propuesto por Pasquill (1961). La ley de potencia del viento

tiene la misma validez que la del perfil logarítmico para terrenos planos o poco complejo, no siendo así para terrenos con orografía compleja, lo que no es nuestro caso.

Por tal motivo el objetivo principal de este trabajo es caracterizar el perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba para diferentes condiciones de estratificación térmica de la atmósfera, a partir de datos reportados por torres altas de gradiente que forman parte de la Red de Torres de Referencia Meteorológica para el Programa Eólico Cubano, con lo cual se obtendrá información relevante tanto para el estudio del viento como fuente renovable de energía, como para la modelación de dispersión de contaminantes, los estudios relacionados con los incendios forestales, para mejorar las parametrizaciones en los modelos numéricos del tiempo utilizados en Cuba, etc.

2. Materiales y métodos

2.1. Datos utilizados

Para la realización de este trabajo se seleccionaron tres de las torres que conforman la Red de Torres de Referencia Meteorológicas (Fig. 1) para el programa eólico cubano, El Brinco (BRI), Caibarién TV (CAI) y Camagüey TV (CAM), por ser las que más se ajustan al objetivo de este trabajo, estando cada una de ellas en condiciones física – geográficas diferentes y expuestas a situaciones meteorológicas diversas.

Otro motivo de la selección obedece a trabajos anteriores realizados por Carrasco et al. (2011 y 2012) con relación al estudio de la circulación de brisas, es decir, este trabajo amplía y profundiza el conocimiento de la capa superficial atmosférica para nuestro país.

Las variables que se midieron en cada una de las torres son las siguientes: Rapidez (FF) y dirección del viento (DD), temperatura (T), humedad (H) y presión (P). Detalles de la ubicación de los niveles en las torres se muestra en la **tabla I**.

Los datos registrados son promedios cada 10min, aunque para nuestro trabajo se trabajó con las medias horarias de las variables medidas. El período de observaciones abarcó los años comprendidos entre el 2007-2009.



Fig. 1. Torres de Referencia Meteorológica seleccionadas: El Brinco en la costa sur (BRI), Caibarién TV en la costa norte (CAI) y Camagüey TV (CAM) en una zona interior

Tabla I. Niveles de medición y variables medidas en la Red de Torres de Referencia Meteorológica.

Torres	Niveles de Medición (m)			
	10	30	50	100
El Brinco. Matanzas	FF, DD, T, H, P	FF, DD	FF, DD	FF, DD, T, H
Caibarién TV. Villa Clara	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

La metodología de trabajo empleada fue la siguiente: a) Primero se determinaron las categorías de estabilidad por horas para cada una de las torres; b) Se determinaron los perfiles verticales del viento correspondiente a cada estratificación y se promediaron de acuerdo a la estratificación, estable, neutro e inestable; c) se calcularon los valores de u^* y z_0 , teniendo en cuenta el perfil neutral; d) se determinó el valor del parámetro alfa, para cada una de las estratificaciones encontradas.

2.2 Determinación de las categorías de estabilidad de la atmósfera.

Las condiciones de estratificación térmica de la atmósfera se determinaron teniendo en cuenta la clasificación proporcionado por Pasquill (1961) y haciendo uso del gradiente vertical de temperatura (Tabla II) y del uso combinado del gradiente vertical de temperatura y de la velocidad del viento (Tabla III), cuando la determinación de la estabilidad por la tabla II, indicaba muchos casos de neutralidad.

Según Pasquill, la estratificación térmica de la atmósfera puede clasificarse en:

- A: Extremadamente inestable
- B: Moderadamente inestable
- C: Ligeramente inestable
- D: Neutral
- E: Ligeramente estable
- F: Moderadamente estable

Tabla II: Categorías de estabilidad atmosférica según el gradiente vertical de temperatura

Categoría de estabilidad	$\Delta T/\Delta Z(^{\circ}\text{K}/100\text{ m})$, medidos entre 20 y 120 m de altura
A	<-1.9
B	$-1.9 < -1.7$
C	$-1.7 < -1.5$
D	$-1.5 < -0.5$
E	$-0.5 < 1.5$
F	>1.5

Tabla III: Categorías de estabilidad atmosférica según el gradiente vertical de temperatura y la velocidad del viento

Velocidad del viento (m/s a 10m)	$\Delta T/\Delta Z(^{\circ}\text{K}/100\text{ m})$, medidos entre 20 y 120 m de altura						
	≤ -1.5	-1.4/-1.2	-1.1/-0.9	-0.8/-0.7	-0.6/0.0	0.1/2.0	> 2.0
0-1	A	A	B	C	D	F	F
1-2	A	B	B	C	D	F	F
2-3	A	B	C	D	D	E	F
3-5	B	B	C	D	D	D	E
5-7	C	C	D	D	D	D	E
>7	D	D	D	D	D	D	D

En el caso de que no se pudo determinar alguna estratificación diferente a la neutral por los métodos seleccionados, se utilizó el criterio del comportamiento de la temperatura potencial virtual () en la capa superficial atmosférica como sigue (Emeis, 2013):

Θ_v - En la estratificación neutral se mantiene constante con la altura.

Θ_v - En la estratificación estable aumenta con la altura.

Θ_v - En la estratificación inestable disminuye con la altura.

La expresión para Θ_v viene dado por (Haltiner and Martin, 1957):

$$\Theta_v = T_v \left(\frac{P_o}{P} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (4)$$

Donde C_p es el calor específico del aire a presión constante

R es la constante de los gases para el aire seco

T_v es la temperatura virtual = $T (1 + 0.61m)$ y m la razón de mezcla

P es la presión y P_o generalmente se toma como 1000mb.

Para una mejor representación de los casos de estratificación encontrados, estos se agruparon en tres grupos, estable (E y F), neutro (D) e inestable (A, B, C).

2.3 Cálculo de parámetros de la capa superficial atmosférica.

2.3.1 Parámetro de rugosidad z_o y velocidad de fricción u_* .

Estos parámetros están íntimamente relacionados en la capa superficial atmosférica a través de la expresión del perfil logarítmico en una atmósfera neutral para representar el viento en la vertical en la capa superficial atmosférica (Emeis, 2013).

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (5)$$

donde u_* es la velocidad de fricción

z_o es la longitud de rugosidad

k es la constante de von Karman

Esta se ajustó a la ecuación de una línea recta de la forma

$$Y = AX + B$$

donde $A = k / u_*$ es la pendiente de la recta y $B = \ln(z_o)$ 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 uno de los sitios donde se encuentran enclavadas las torres.

2.3.2 Exponente alfa de variación vertical del viento con la altura

El cálculo del exponente alfa se realizó utilizando la expresión, a partir del perfil vertical medio del viento en la capa superficial atmosférica para los casos estable, neutro e inestable.

$$\alpha [a \text{ dim}] = \frac{\ln \left[\frac{\bar{v}(z_2)}{\bar{v}(z_1)} \right]}{\ln \left[\frac{z_2}{z_1} \right]} \quad (6)$$

donde $\bar{v}(z_2)$ y $\bar{v}(z_1)$ son las velocidades medias a las alturas z_2 y z_1

3. Análisis de los resultados.

3.1 Categorías de estabilidad atmosférica encontradas.

La Tabla IV, muestra las categorías de estabilidad encontradas en los sitios de emplazamientos de las torres de gradiente seleccionadas. Al observar las estratificaciones encontradas se manifiesta la gran estabilidad de las horas de la noche, madrugada y primeras horas de la mañana, denotado por las categorías E y F.

Por otra parte, la estratificación neutral, típica de los períodos de tránsito de la estabilidad a la inestabilidad y viceversa se pone de manifiesto en la generalidad de los casos en el momento de ruptura de la inversión superficial en la mañana y en sus orígenes comenzando el anochecer, no manifestándose de esta manera por la metodología empleada para la Torre de Caibarién donde se manifestó en las horas de mayor insolación, lo cual no era esperado. Esto quizás puede deberse a la ubicación de la misma, donde se encuentra sometida al régimen de brisa marina en esos horarios en unión del flujo predominante del Este (Carrasco et al., 2011), lo que pudo muy bien haber contribuido a la creación de una capa estratificada neutralmente. En tal sentido para esta torre fue utilizado el criterio de la temperatura potencial virtual para tratar de definir mejor los horarios en que se encontró neutralidad.

Tabla IV. Categorías de estabilidad de la atmósfera que se manifestaron en los sitios de emplazamientos de las Torres de Referencia Meteorológicas

Hora	BRI	CAI	CAM
0	F	E	F
1	F	E	F
2	F	E	F
3	F	F	F
4	F	F	F
5	F	F	F
6	F	F	F
7	F	F	F
8	E	E	E
9	D	E	D
10	D	E	C
11	C	D	C
12	A	D	C
13	A	D	C
14	A	D	C
15	A	D	C
16	B	D	D
17	D	E	D
18	D	E	D
19	E	E	E
20	E	E	E
21	E	E	E
22	E	E	F
23	E	E	F

Llama la atención que, para la estación de El Brinco, ubicada en la costa sur, fue donde más categoría de estabilidad se presentaron con 5, y donde además únicamente ocurrió el tipo A, es decir, extremadamente inestable, la que no se presentó en ninguna de las otras dos torres.

La figura 2, muestra el comportamiento de la temperatura potencial virtual (Tpv) para la torre de Caibarién TV. En la misma se aprecia claramente una disminución de la Tpv al final de la tarde que se prolonga hasta las primeras horas de la mañana, denotando una gran estabilidad atmosférica en esos horarios, lo que trae aparejado la ya mencionada inversión superficial de temperatura, cuya ruptura se produce con el calentamiento diurno, el cual se incrementa durante las horas del mediodía, dando lugar a la disminución de la Tpv y por tanto a una

estratificación inestable. De la figura es fácil apreciar los horarios de estabilidad neutral (punto de intersección de las curvas) asociado a la aparición y ruptura de la inversión de temperatura superficial.

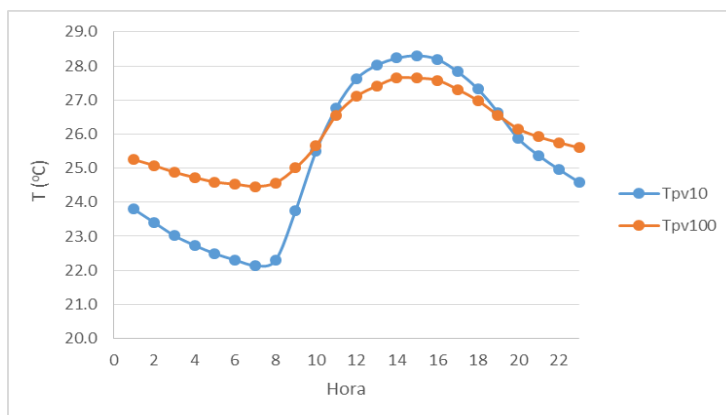


Fig. 2. Comportamiento de la temperatura potencial virtual media en los niveles de 10 y 100m en la Torre de Referencia Meteorológica de Caibarién TV

Este comportamiento de Tpv, lo cual es típico para los demás lugares de emplazamiento de las torres se ve reflejado de igual manera en la oscilación diurna del viento como se muestra en la figura 3.

Importante característica de cada figura es la disminución de la rapidez del viento en el momento de ruptura de la inversión, lo cual fue explicado por Martínez (2015). Sin embargo, vale resaltar el comportamiento desigual en la oscilación diaria, lo cual es un reflejo del comportamiento del viento de norte a sur. Si bien los máximos valores de rapidez del viento en la costa norte se manifiestan en las horas del mediodía en la costa sur, sucede todo lo contrario y esto viene dado por el comportamiento del régimen de brisas en ambas costas en unión del flujo sinóptico imperante, lo cual fue muy bien explicado por Carrasco et al. (2011).

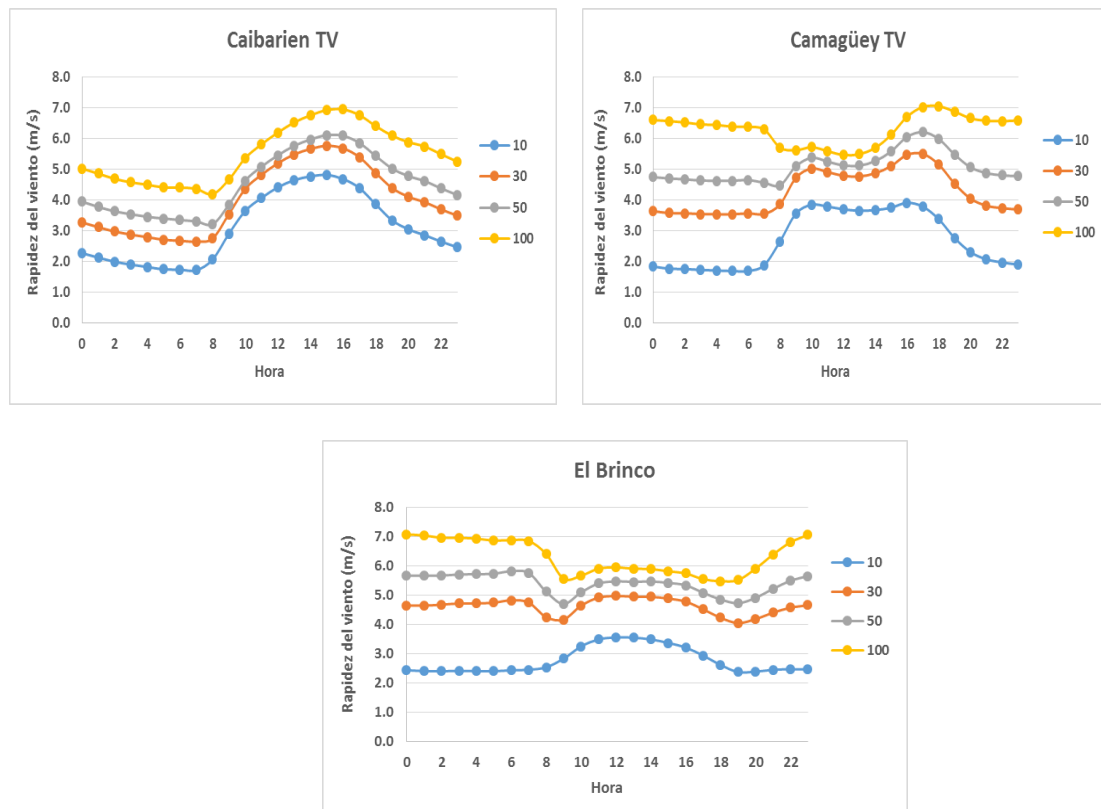


Fig. 3. Oscilación diurna del viento medio para los distintos niveles de medición en las torres. 10, 30, 50 y 100m de altura sobre la superficie terrestre

Otra manera de ver este comportamiento del viento es a través del perfil vertical medio del viento en diferentes horarios como se muestra en la figura 4 para la torre de Camagüey TV.

Como puede apreciarse en la figura, el perfil vertical del viento varía para los diferentes horarios, siendo esto una manifestación del comportamiento de la estabilidad atmosférica en el transcurso del día, de ahí la importancia de conocer como es el perfil vertical del viento en dependencia de la estratificación térmica.

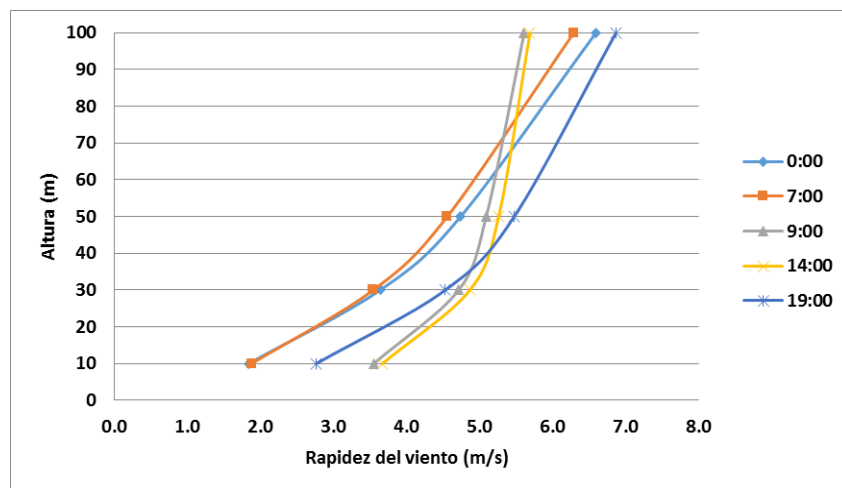


Fig. 4. Perfil vertical medio del viento para diferentes horarios en la Torre de Camagüey TV

3.2 Perfil vertical del viento bajo condiciones diferentes de estratificación térmica de la atmósfera.

Como pudo apreciarse la estabilidad atmosférica no es la misma durante todo el día y por tanto el perfil vertical del viento también sufre cambios, por lo que resulta determinante su comportamiento en función del tipo de estabilidad que está presente a determinada hora.

La figura 5 muestra los perfiles verticales medios para los distintos tipos de estratificación determinados en los sitios de emplazamientos de las torres. Estos perfiles son típicos para esas condiciones física – geográficas como mostró Roque et al. (2010) en otras regiones del país.

Estos perfiles están muy relacionados con el comportamiento medio en los distintos horarios. Mientras en la costa norte, los perfiles verticales medios mantienen un comportamiento homogéneo en toda la capa durante todo el día, esto no ocurre para las otras torres analizadas (fig. 5). En el caso de una zona interior como lo es el lugar de emplazamiento de la torre de Camagüey TV, los perfiles medios para los distintos tipos de estratificación térmica se comportan de manera similar hasta el nivel de 50m. Por encima de este nivel el comportamiento es diferente, las curvas se entrelazan y los valores medios de rapidez del viento correspondientes al perfil inestable disminuyen con respecto a los perfiles medios estable y neutral hacia el tope de la capa superficial. Los perfiles medios estable y neutral se unen en el nivel de 100m, que aproximadamente es el tope de la capa superficial atmosférica (CSA). En teoría los tres perfiles deberían haberse unido en el tope de la CSA, indicando con ello la frontera entre la CSA y la capa de EKMAN (Emeis, 2013). Algo similar ocurre para la torre de El Brinco, aunque las alturas donde se cruzan unos perfiles con otro son más bajas. En todos los casos, el cambio de rugosidad, que para las zonas costeras es muy brusco, provocan la aparición de una capa límite interna que con la interacción del viento local (por desigual calentamiento y cambio de orografía) y el flujo sinóptico predominante modifican los perfiles verticales de viento en un determinado sitio.

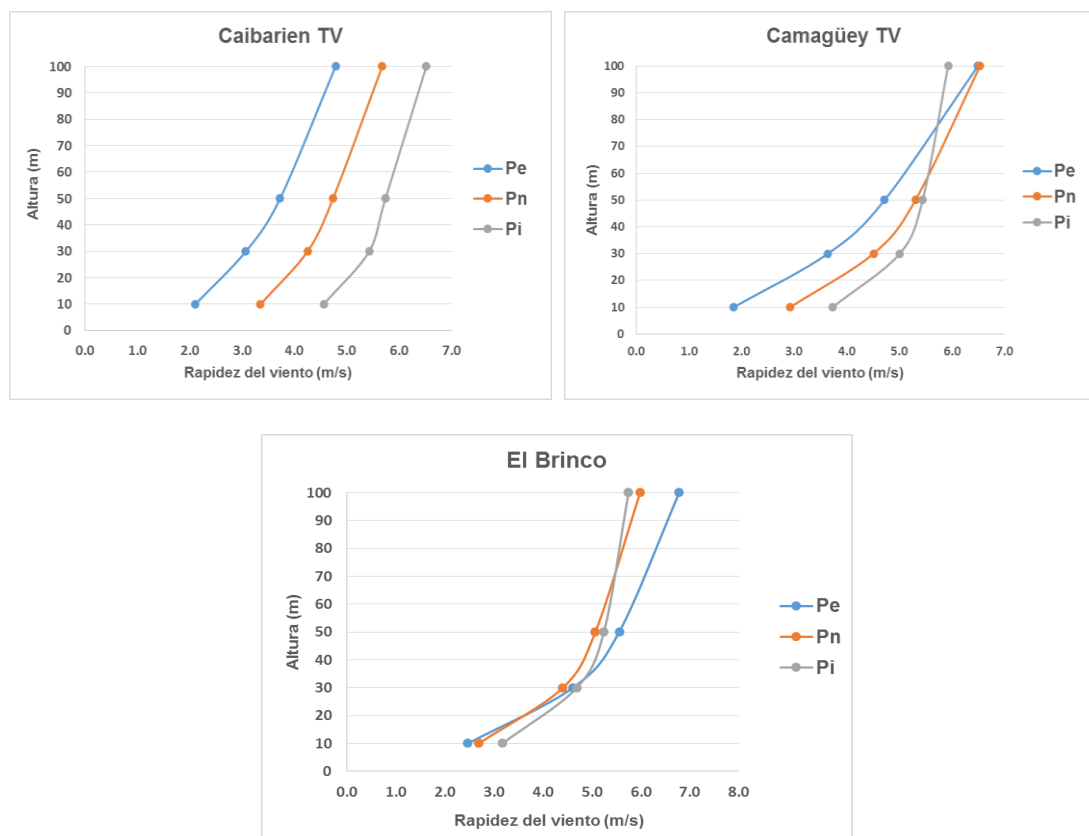


Fig. 5. Perfil vertical del viento para las estratificaciones estable (Pe), neutral (Pn) e inestable (Pi) en los sitios de emplazamiento de las torres

La altura de esta capa interna, a pesar de que se ha estudiado por décadas, aun no tiene una formulación única y algunos trabajos recientes así lo atestiguan (Savelyev y Taylor 2005, Floors et al., 2011), por lo que será tema de análisis en próximos trabajos.

3.3 Exponente alfa de variación vertical del viento con la altura

El haber determinado los perfiles medios para los distintos tipos de estratificación térmica de la atmosfera (Pe-perfil estratificación estable, Pn-estratificación neutra y Pi-estratificación inestable) permite determinar el valor del exponente alfa de la ley de potencia del viento para las distintas estratificaciones. Los valores calculados se muestran en la tabla V y los resultados son consistentes con lo mostrado por Emeis (2013), en cuanto a que los valores de alfa para la estratificación inestable son mucho más pequeños que las otras dos estratificaciones y que para los casos de estratificación estable presenta los valores más altos.

Tabla V. Exponente alfa de variación vertical del viento en las Torres de Referencia Meteorológicas para diferentes tipos de estratificación térmica

Torre	El Brinco			Caibarién TV			Camagüey TV		
	Pe	Pn	Pi	Pe	Pn	Pi	Pe	Pn	Pi
α	0.47	0.37	0.27	0.35	0.21	0.13	0.53	0.30	0.19

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 10m. Esto facilita obtener el valor de rapidez del viento a la altura del buje del aerogenerador que se escoja, o la de un molino de viento seleccionado e incluso a la altura de una chimenea cuya altitud este en el entorno de los 100m o menos.

3.4 Velocidad de fricción y longitud de rugosidad

La figura 6 muestra el plot de los datos de $\ln(z)$ vs $u(z)$ para la torre de Caibarién TV, los que son unidos por una recta, determinándose el intercepto y la pendiente de la curva de donde se obtienen los valores de u^* y z_0 .

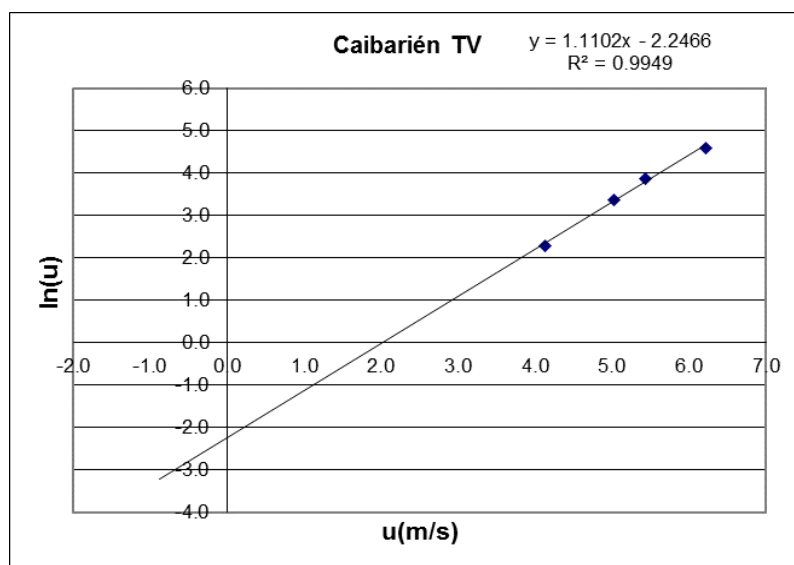


Fig. 6. Curva de ajuste de los datos de $\ln(z)$ vs $u(z)$ para la torre de Caibarién TV

Este procedimiento se realizó para las demás torres y se determinaron los valores que se muestran en la tabla VI.

Tabla VI. Valores de la velocidad de fricción y el parámetro de rugosidad en los distintos sitios de ubicación de las Torres de Referencia Meteorológicas

Torre	El Brinco	Caibarién TV	Camagüey TV
z_0	0.28	0.11	0.38
u^*	0.37	0.36	0.45

Deben plantearse que estos valores tienen un carácter muy local y que para su generalidad será necesario un número mayor de mediciones en la capa superficial atmosférica en diversas condiciones físicas – geográficas a lo largo y ancho de todo el país. No obstante, sirvió para mostrar algunos valores de estos parámetros difíciles de obtener en la práctica y al menos resultan orientativos para su uso en diversas aplicaciones meteorológicas.

Conclusiones

El análisis de la información de viento procedente de tres torres pertenecientes a la red torres de referencia meteorológica, ubicadas en la costa norte, costa sur y región interior de Cuba permitió arribar a las siguientes conclusiones:

Las categorías de estratificación térmica encontradas confirman la fuerte estabilidad de las horas nocturnas y primeras horas de la mañana para todo el país. Asimismo, una fuerte inestabilidad se presenta en las horas del mediodía. Esto fue solo posible de visualizar por las torres de gradiente ubicadas en diferentes sitios.

La oscilación diurna del viento presenta una notable diferencia de norte a sur, estando los máximos valores de rapidez del viento en la costa norte en los horarios del mediodía, lo cual es totalmente contrario en la costa sur. Este detalle es importante en las proyecciones sobre el empleo del recurso eólico en nuestro país. Para las zonas interiores, resulta un comportamiento intermedio y lo máximos solo se alcanzan al final de la tarde y primeras horas de la noche.

Para las zonas interiores y costa sur occidental se produce una inversión en los valores de rapidez del viento durante el horario diurno en la capa 30-100m y 50-100m, para la costa sur y zona interior respectivamente.

El perfil vertical del viento para diferentes condiciones de estratificación térmica de la atmósfera y para condiciones físicas – geográficas también distintas fue determinado, encontrándose diferencias entre las distintas regiones analizadas atribuibles a la capa límite interna que se origina por el cambio de rugosidad en interacción con el viento local (por desigual calentamiento y cambio de orografía) y el flujo sinóptico predominante.

Los valores del parámetro alfa obtenidos para las distintas zonas, se corresponden con los obtenidos en otros estudios internacionales para las distintas estratificaciones térmicas de la atmósfera.

La determinación del perfil vertical del viento para condiciones neutrales de la atmósfera permitió también el cálculo de los valores de Z_0 , U^* , para los sitios de emplazamientos de las torres seleccionadas.

Referencias Bibliográficas

- Carrasco, M., A. Roque, O. Montarte, D. Rivas 2011. Local Breeze Effects on the Wind Energy Generation in the Northern Coast of Cuba. **WIND ENGINEERING** Vol. 35, No. 6, 2011.
- _____, A. Roque, M. Carnesoltas 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. ISBN 978-3-642-30523-8 (eBook) DOI 10.1007/978-3-642-30523-8
- Floors, R., S.-E. Gryning, A. Peña, E. Batchvarova 2011. Analysis of diabatic flow modification in the internal boundary layer. *Meteorol. Z.* 20, 649–659 (2011)
- Haltiner G., F. Martin 1957. *Meteorología Dinámica y Física*. McGraw Hill Book\ Company SA. New York, Londres, Toronto
- Martínez B. y A. Roque 2015. Disminución de la rapidez del viento en la capa superficial atmosférica. Su influencia en el aprovechamiento eólico. *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 21, no. 1, 2015.
- <http://meteoro.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=REVISTA&TB2=/contenidos/biblioteca/revistas/2015/Vol21%20No1.htm>
- Pasquill, F. 1961. The estimation of the dispersion of wind-borne material. *Meteorological Magazine.*, 90, 33-49.
- Roque, A, Y. Niebla, M. Carrasco, P. Reyes 2010. Perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba. Aplicación al estudio del viento como fuente de energía. *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 21, no. 1, 2015.
- <http://meteoro.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=REVISTA&TB2=/contenidos/biblioteca/revistas/2015/Vol21%20No1.htm>
- Savelyev, S.A., P.A. Taylor: *Internal Boundary Layers* 2005. I. Height Formulae for Neutral and Diabatic Flows. *Bound.-Lay. Meteorol.* 115, 1–25 (2005)]
- Stull, R.B., 1994. *An introduction to boundary layer meteorology*. Ed. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

Acerca de los autores:

Alfredo Roque-Rodríguez: Licenciado en Física, Investigador Auxiliar, del Centro de Física de la Atmósfera. Ha realizado en los últimos 10 años 6 investigaciones (3 como autor principal), ha participado en 24 eventos científicos (21 internacionales), ha publicado 14 publicaciones científicas (1 libro). Profesor Auxiliar, imparte cursos de postgrados, se desempeña como profesor de la carrera de Lic. en Meteorología y del Diplomado de Física de la Atmósfera. Ha participado en tribunales de Tesis, de Fórum, realizado oponentía a Tesis de Diploma, ha recibido numerosos reconocimientos incluyendo el premio Academia de Ciencias en el año 2004.

Magdiel Carrasco-Díaz: Licenciado en Meteorología y Master en Tecnología Avanzada, del Instituto de Meteorología, de Cuba. Ha tenido como línea de trabajo los estudios con fines del aprovechamiento del recurso eólico. Ha cursado dos diplomados sobre Evaluación de riesgos ecológicos y climáticos y de Energía eólica respectivamente. Ha sido autor o coautor de 4 resultados científicos relacionados con el aprovechamiento eólico y uno de evaluación de modelos numéricos. Ha participado en 14 eventos nacionales y 10 congresos internacionales. Tiene publicado 3 artículos en revistas arbitradas y uno en una revista de alto impacto internacional.

Pablo Reyes-Martínez: Licenciado en Geografía, trabaja en el Instituto de Meteorología, Ha tenido como línea de trabajo los estudios relacionados con la capa fronteriza planetaria y desde el 2006, los estudios relacionados con el viento como recurso energético. Ha cursado diversos postgrados y ha sido coautor de varios resultados científicos, los cuales también han sido publicados. Ha participado en 20 eventos nacionales y 5 congresos internacionales.