

RED DE TORRES METEOROLÓGICAS DE REFERENCIA PARA EL PROGRAMA EÓLICO CUBANO. RESULTADOS PRELIMINARES DEL ESTUDIO DEL VIENTO CON FINES ENERGÉTICOS.

Autores:

Alfredo Roque Rodríguez, Rolando Soltura Morales, Reinaldo Báez Altamirano, Alain Calzadilla, Karelia Fernández, Bladimir de la Hoz Matveeva, Isrel Serrat, Pablo Reyes, Pablo Varona, Orlando Osa, Mayra Santana.

Institución: Instituto de Meteorología
Dirección: Loma de Casablanca s/n, Regla, Ciudad de La Habana, Cuba
Fax: (537) 866 80 10
E-mail: alfredo.roque@insmet.cu

Resumen

El empleo de la energía eólica en Cuba ha cobrado un nuevo impulso en los dos últimos años debido a la decisión de la máxima dirección del país de incrementar el uso de las fuentes renovables de energía y en especial la eólica, para lo cual fue creado el Grupo Eólico Nacional (GEN). Como parte de las acciones emprendidas por este grupo se creó la Red de Torres Meteorológicas de Referencia con la finalidad de monitorear las principales variables meteorológicas en varios niveles de altura sobre la superficie terrestre hasta los 100m, en especial la variable viento.

A partir de la información recopilada en el primer año de funcionamiento, se calcularon los valores medios mensuales del viento y su distribución por rumbos. Se determinaron los perfiles verticales, el exponente alfa de variación vertical del viento con la altura y los valores de Z_0 y U_* , pudiendo caracterizarse preliminarmente el viento en la capa superficial y brindar al mismo tiempo información sobre las posibilidades del mismo como recurso energético en el período seleccionado.

Esta información sirve de base a la toma de decisiones sobre los sitios de emplazamiento de parques eólicos.

Toda esta información se encuentra soportada en un sistema automatizado de gestión de base de datos y puede ser consultada a través de un cliente - servidor web.

Introducción

La energía eólica ha constituido en los últimos años la fuente renovable de más rápido crecimiento en el mundo, motivado en gran medida por el estado de madurez de su tecnología, la cual se encuentra ampliamente difundida por todo el mundo, con precios del kwh competitivos con respecto a las fuentes convencionales, las cuales al mismo tiempo se encuentran en plena etapa de agotamiento con el consiguiente incremento de los precios del petróleo. Esto ha motivado que países como Cuba hayan tenido la necesidad de impulsar la aplicación y desarrollo de las fuentes renovables de energía y en especial la eólica.

Por tal motivo hace aproximadamente dos años fue creado el Grupo Eólico Nacional con el objetivo de establecer e implementar todas las acciones necesarias para la aplicación de la energía eólica.

Como parte de este grupo de acciones se creó a propuesta del INSMET la Red de Torres Meteorológicas de Referencia con el principal objetivo de monitorear el viento hasta a alturas de 100m en diferentes condiciones físicas-geográficas del país, permitiendo hacer una mejor estimación del recurso eólico y proporcionar una información relevante para la elaboración de pronósticos meteorológicos a corto plazo.

La creación de esta Red de Torres Meteorológicas de Referencia, se realizó bajo la concepción de implementación de torres de gradiente, de amplio uso en los estudios micrometeorológicos de la capa superficial atmosférica (CSA) (~ 100m de altura sobre la superficie terrestre), cuyas mediciones no se limitan únicamente a la medición de la rapidez y dirección del viento, sino también a la medición de otras variables meteorológicas, como temperatura, humedad y presión en distintos niveles dentro de la propia capa superficial

atmosférica.

Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es mostrar las características de esta Red y proporcionar un estudio preliminar del viento a partir de la información registrada en las mismas, incluyendo la información energética para el sitio.

Materiales y métodos

La conformación de la Red se hizo atendiendo a la poca variabilidad del viento en el nivel de 1000 hPa para Cuba, según los datos de reanálisis para el período 1971-2000 (NCEP/NCAR), y por tanto no era necesario un número voluminoso de torres para caracterizar la capa superficial, sino solo cubrir aquellas zonas que por sus características geográficas, topográficas y climáticas sean las más representativas para nuestro país. Especial atención se hizo para las regiones montañosas donde los modelos resultan ser bastante inexactos a la hora de estimar o predecir cualquier variable.

Atendiendo a lo expresado en el párrafo anterior se seleccionaron regiones con costas, tanto en la parte norte como en la sur, regiones interiores, preferiblemente llanuras y regiones montañosas, en todos los casos tratando cubrir tanto la región

occidental como la región oriental, las cuales se encuentran sometidas en la mayor parte del año a diferentes situaciones sinópticas.

De particular importancia es el equipamiento empleado para conformar la red, la que está compuesta por sensores de medición de respuesta rápida que operan en alta frecuencia, suficiente para estudiar los fenómenos meteorológicos de menor escala que ocurren en el interior de la CSA

Es importante hacer notar que para la conformación de esta red se dependía en gran medida de la existencia de torres altas de comunicaciones en los lugares señalados y que además cumplieran los requisitos mínimos para la medición del viento, lo cual pudo satisfacerse en un alto por ciento.

Niveles de medición en las torres y características de los sensores de medición

Las variables que se miden 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 siguiente tabla:

| Torres | Niveles de Medición (m) | | | | | |
|--|-------------------------|--------|--------|--------------|--------------|--------------|
| | 10 | 30 | 50 | 60 | 75 | 100 |
| Guanito TV. Pinar del Río | FF, DD, T, H, P | FF, DD | FF, DD | | FF, DD, T, H | |
| Sta Cruz Norte. La Habana | FF, DD, T, H, P | FF, DD | | FF, DD, T, H | | |
| COCC Jagüey. Matanzas | FF, DD, T, H, P | FF, DD | | FF, DD, T, H | | |
| El Brinco. Matanzas | FF, DD, T, H, P | FF, DD | FF, DD | | | FF, DD, T, H |
| Caibarién. Villa Clara | FF, DD, T, H, P | FF, DD | FF, DD | | | FF, DD, T, H |
| Camagüey TV. Camagüey | FF, DD, T, H, P | FF, DD | FF, DD | | | FF, DD, T, H |
| Cueva Arriba. Guantánamo | FF, DD, T, H, P | FF, DD | FF, DD | | | FF, DD, T, H |
| Punta Tabacal. Santiago de Cuba | FF, DD, T, H, P | FF, DD | | FF, DD, T, H | | |

Características de los sensores de medición

Anemómetro Primera Clase. (Thies/Germany)

Rango de medición: 0,3 – 75 m/s.

Resolución: 0,05 m/s.

Velocidad de supervivencia: 85 m/s (Máx. 30min).

Temperatura ambiente: -50.....80°C.

Sensor de presión

Rango de medición (hPa): 800.....1060

Veleta Compacta

Rango de medición: 0...360°

Exactitud: +/- 2°

Resolución: 1°

Velocidad de supervivencia: 60 m/s
Temperatura ambiente: -30°.....+70°

Sensor de Temperatura y Humedad

Rango de medición (T): -30.....+70°C

Rango de medición (H) 0...100 %

Voltaje: 5V

Guanito TV

Ubicación geográfica: Está situada al Noroeste de la Ciudad de Pinar del Río a unos 12km aproximadamente de esta, en la Sierra de los Órganos. Sus coordenadas son: Longitud = 83° 46' 54" y Latitud = 22° 27' 08", a una altura sobre el nivel del mar (HSNM) =212m.

Características Físicas – Geográficas: Se encuentra sobre alturas premontañas ligeramente diseccionadas. En esta área se destacan los suelos Pardos con carbonato y poco evolucionados. Rodeada por una vegetación de Bosques tropicales que incluye variedad de pinos, matorrales, cultivos sabanas naturales, plantaciones forestales y arboles frutales.

Santa Cruz del Norte

Ubicación geográfica: Está situada al norte de la provincia de La Habana a una distancia aproximada de la costa de 960m. Sus coordenadas son: Longitud = 81° 55' 58" y Latitud = 23° 09' 00". Está ubicada a una HSNM= 70m.

Características Físicas – Geográficas: Se encuentra en la Región Alturas del Norte de la Habana-Matanzas sobre alturas aterrazadas carsificadas En esta área se destacan los suelos fersialíticos y está rodeada por una vegetación de matorrales tropicales, sabanas y focos de cultivos.

COCC Jagüey

Ubicación geográfica: Está situada próxima a la ciudad del mismo nombre hacia el Norte. Sus coordenadas son: Longitud = 22° 33'39" y Latitud = 81° 05'44". Está ubicada a una HSNM=10m.

Características Físicas – Geográficas: Se encuentra sobre una llanura abrasiva acumulativa ligeramente ondulada. En esta área se destacan los suelos ferralíticos rojos y esta rodeada por una vegetación de cultivos avícolas, matorrales y comunidades herbáceas y sabanas naturales.

Todas las observaciones se realizan cada 10min y son grabados en un equipo registrador de datos y enviados a la sede del INSMET vía GSM donde son almacenados, validados y guardados en formato de base de datos.

La ubicación de las torres que conforman la red, así como una breve descripción física-geográfica de los sitios donde encuentran enclavadas se muestra a continuación.

El Brinco

Ubicación geográfica: Está situada muy próxima a Playa Girón y a una distancia aproximada de la costa de 206m. Sus coordenadas son: Longitud = 81° 03'14" y Latitud =22° 04' 18", a una HSNM = 1m.

Características Físicas – Geográficas: Se encuentra sobre una llanura abrasiva y acumulativa parcialmente cenagosa En esta área se destacan los suelos húmicos calcimórficos y está rodeada por una vegetación de monte seco costero y subcostero así como de manigua costera.

Caibarién

Ubicación geográfica: Está situada en la periferia de la ciudad del mismo nombre a una distancia aproximada de la costa de 2500m. Sus coordenadas son: Longitud = 79° 29' 02" y Latitud = 22° 30' 02" a una HSNM = 20m.

Características Físicas – Geográficas: Se encuentra sobre una llanura plana acumulativa y parcialmente cenagosa. En esta área se destacan los suelos hidromórficos y está rodeada por una vegetación de cultivos agrícolas con focos de pastos y sabanas tropicales.

Camagüey TV

Ubicación geográfica: Esta situada al este de la ciudad del mismo nombre. Sus coordenadas son: Longitud = 77° 52' 32" y Latitud = 21° 21'50", a una HSNM = 110m.

Características Físicas – Geográficas: Se encuentra sobre una llanura denudativa -erosiva ondulada. En esta área se destacan los suelos pardos sin carbonatos y esta rodeada por una vegetación de cultivos agrícolas con focos de pastos y sabanas naturales.

Caracterización del viento

Atendiendo a que el montaje de la red se hizo de manera progresiva no todas las torres cuentan con el mismo período de medición, por tal motivo se muestran solamente los resultados de 5 de las 12 torres de referencia: Guanito TV, Santa Cruz del Norte, Caibarién, Camagüey TV y Punta Tabacal.

Los datos registrados en estas torres permitieron calcular el valor medio mensual de la rapidez del viento para cada uno de los niveles, el rumbo y dirección del viento en el primer y último nivel, aunque por razones de espacio solo se muestra el último nivel, los que permitieron la construcción del perfil vertical del viento y la determinación del exponente alfa del mismo, la oscilación diurna y anual y la distribución de frecuencia del viento (con el objetivo de conocer el por ciento de casos que está por encima de los 4 m/s, generalmente la velocidad de arranque de los aerogeneradores) y el ajuste con la distribución Weibull, (OMM, 1984), la cual había sido ya comprobada para nuestro país (Soltura et. al, 1997).

El *exponente* α de la ley de potencia del viento (Haltiner and Martin, 1952) se obtiene a partir de la expresión (1):

$$\alpha[a \text{ dim}] = \frac{\ln\left[\frac{\bar{V}(Z_2)}{\bar{V}(Z_1)}\right]}{\ln\left[\frac{Z_2}{Z_1}\right]} \quad (1)$$

Z_1 y Z_2 son las alturas, $\bar{V}(Z_1)$ y $\bar{V}(Z_2)$ son las velocidades medias resultantes de las mediciones en Z_1 y Z_2 .

Distribución de Weibull $f(u)$

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

A: Parámetro de escala
k: parámetro de forma

Cálculo de u_* y Z_0

Para el cálculo de la velocidad de fricción (u_*) y del parámetro de rugosidad Z_0 , se ajustó la ley del perfil logarítmico del viento a la ecuación de una línea recta de la forma

$$Y = AX + B$$

donde $A = k/u_*$ es la pendiente de la recta y $B = \ln(Z_0)$ el intercepto. Utilizando los valores del perfil vertical del viento para los distintos niveles de medición se calcularon estos parámetros para los 16 rumbos del viento, lo que permitió obtener una curva de ajuste de dependencia de Z_0 con u_* para cada uno de los sitios donde se encuentran enclavadas las torres.

Cálculos energéticos

Las variables que se calcularon a partir de la información proporcionada por las torres y la información de la curva de potencia de varios aerogeneradores comerciales con potencias entre 275 KW y 2 MW y utilizando como modelo de cálculo el modelo de microescala WA^{SP} (Petersen and Troen, 1986), fueron la densidad de potencia del viento, la producción mensual de energía y el factor de capacidad.

Densidad de Potencia (P):

$$P[\text{Watt} / m^2] = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 \quad (3) \quad \rho \text{ es la}$$

densidad del aire, cuyas unidades se expresan en kg/m^3 , y \bar{V}^3 es la media del cubo de la velocidad del viento medida en un sitio dado.

Factor de Capacidad FC[%]

$$FC[\%] = \frac{EPT[MWh]}{EPT_{CAP.NOMINAL}[MWh]} * 100 \quad (4)$$

$EPT[MWh]$ es la energía producida por la turbina

$EPT_{CAP.NOMINAL}[MWh]$ es la energía producida por la turbina a su capacidad nominal

Toda la información se muestra en gráficos y tablas que facilitan su comprensión.

Análisis de los resultados

Perfil vertical del viento

El comportamiento del perfil vertical medio del viento, presenta características similares para todos los sitios estudiados (figs. 1), confirmando el perfil logarítmico del viento (Haltiner and Martin, 1952). Resultado que ha sido confirmado en otras regiones del mundo (Petersen and Troen, 1986).

Sin embargo debe notarse que la torre de Punta Tabacal muestra los valores de rapidez del

viento más bajos entre todos los perfiles, con la particularidad además que los valores de los niveles 30m y 60m son muy similares.

De igual manera resulta significativo el perfil obtenido para el mes de marzo, en que ocurrieron los valores más altos de la rapidez del viento, excepto en Camagüey TV donde los valores del mes de enero fueron ligeramente superiores. Este comportamiento del perfil se correspondió con el comportamiento del viento a escala sinóptica (fig. 2). La figura muestra que los valores de rapidez del viento para marzo del 2007 (NCEP/NCAR, 2007) superan entre 3 y 4 m/s los valores históricos para ese mes.

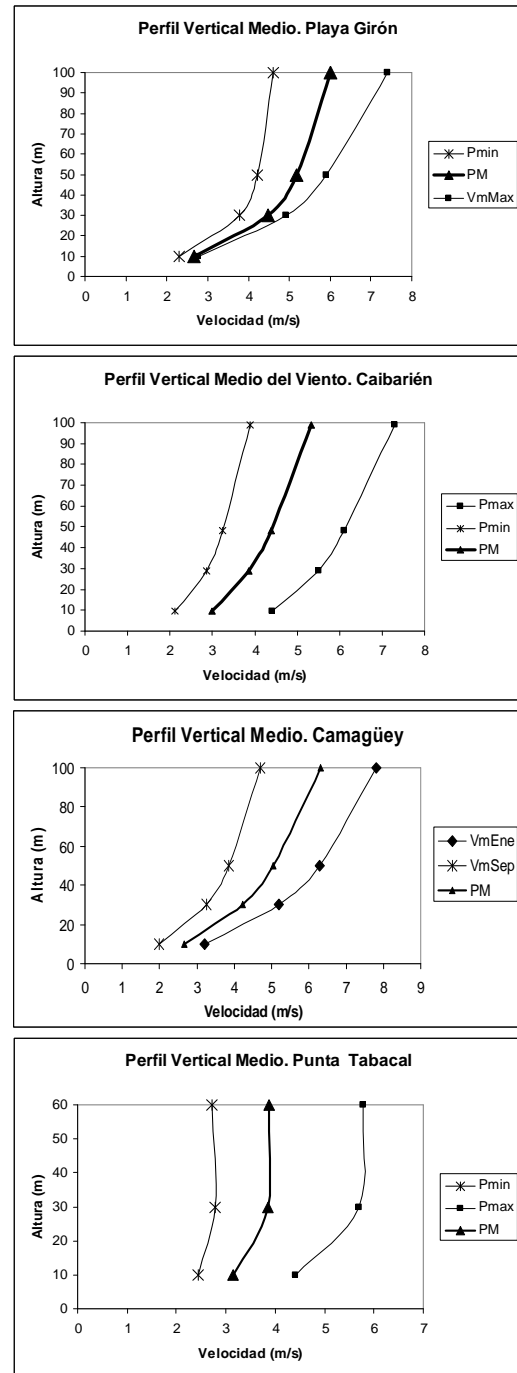
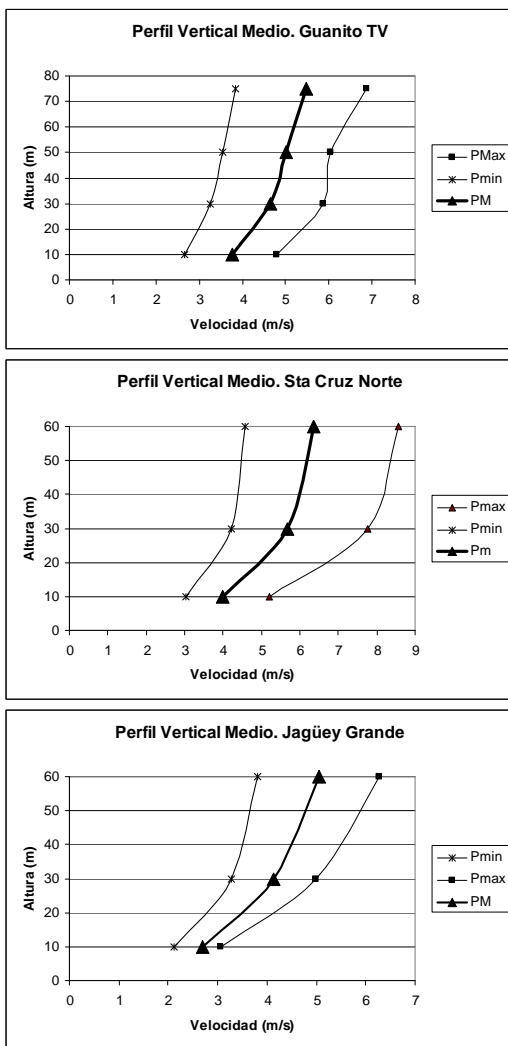
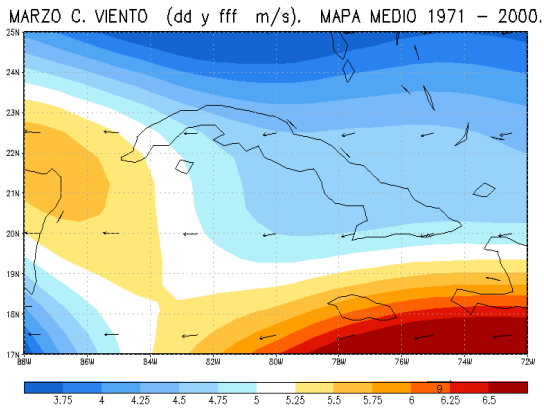


Fig. 1. Comportamiento del perfil vertical medio del viento para las estaciones seleccionadas.

a)



b)

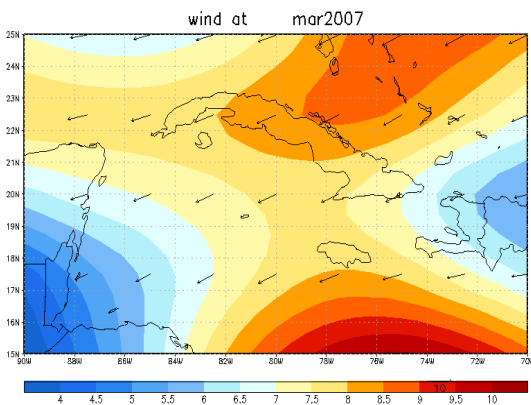


Fig. 2. Comportamiento del viento en el nivel de 1000 hPa para el mes de marzo: a) Período 1971-2000; b) Año 2007.

En general para todos los meses los perfiles se correspondieron con el comportamiento del viento a escala sinóptica. Los valores mínimos se presentaron durante los meses de junio y julio.

Vinculado a este comportamiento se calculó el exponente alfa del perfil logarítmico del viento (Tabla 1), cuya importancia radica en poder calcular el valor de la rapidez del viento en cualquier nivel dentro de la capa superficial, a partir del valor en el nivel de 10m (Hsu, 1982). Los resultados muestran que este valor fue mayor para la torre de Camagüey TV, mientras el menor se obtuvo para la torre de Punta Tabacal. Hay que señalar que este valor sufre variaciones de mes a mes y por hora, por lo que es recomendable aumentar la muestra con el objetivo de mejorar su estimación. Estos valores están en correspondencia con los obtenidos por

otros autores para otras regiones del mundo (Petersen and Troen, 1986).

| | Guanito TV | Santa Cruz Norte | Jagüey |
|----------|-------------------|-------------------------|---------------|
| α | 0.18 | 0.26 | 0.35 |

| Brinco | Caibarién | Camagüey TV | Punta Tabacal |
|---------------|------------------|--------------------|----------------------|
| 0.24 | 0.26 | 0.33 | 0.12 |

Tabla 1. Valor del exponente α del perfil vertical para los sitios analizados.

Comportamiento de los valores medios mensuales de la rapidez el viento por niveles

El comportamiento por meses de los valores medios de la rapidez del viento por niveles se muestra en la fig. 3. Se muestran solo los dos últimos niveles de cada torre por ser los que más interesan desde el punto de vista de su aplicación como recurso energético.

En ellos se muestra un claro comportamiento en correspondencia con la época del año. Los valores máximos se alcanzan en los meses del período invernal o período poco lluvioso. El descenso mostrado en los meses del período lluvioso está bien reflejado en el comportamiento histórico de las estaciones de superficie de la red de observaciones que comprende el Servicio Meteorológico Nacional. Los valores promedios por nivel se muestran en la tabla 2 a y b.

Tabla 2 a) y b). Valores promedios por nivel de la rapidez del viento para las torres seleccionadas

a)

| Nivel (m) | Guanito TV* | Santa Cruz Norte** | Jagüey | El Brinco |
|------------------|--------------------|---------------------------|---------------|------------------|
| 10 | 3.8 | 4.0 | 2.7 | 2.7 |
| 30 | 4.7 | 5.7 | 4.1 | 4.5 |
| 50 | 5.0 | 6.4 | 5.0 | 5.2 |
| 100 | 5.5 | | | 6.0 |

b)

| Nivel (m) | Caibarién | Camagüey TV | Punta Tabacal** |
|------------------|------------------|--------------------|------------------------|
| 10 | 3.0 | 2.6 | 3.1 |
| 30 | 3.9 | 4.2 | 3.8 |
| 50 | 4.4 | 5.1 | 3.9 |
| 100 | 5.4 | 6.3 | |

* Último nivel de medición: 75m

** Último nivel de medición: 60m

Resulta llamativo los valores promedios para Santa Cruz del Norte tanto en 30m como en

60m, confirmando a este sitio como muy prometedor para el empleo de la energía eólica.

Distribución de frecuencia de la rapidez del viento y el ajuste de la Distribución Weibull.

En este trabajo solo se mostrará por su importancia para la aplicación de la energía eólica los resultados correspondientes al último nivel de cada torre.

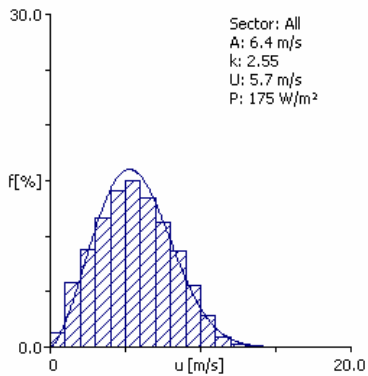


Fig. 1 Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Guanito TV.

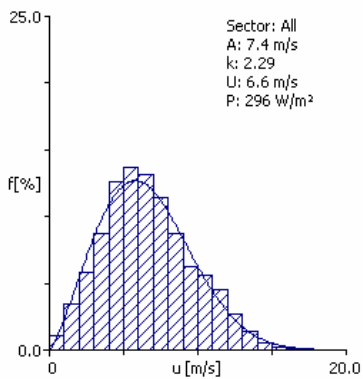


Fig 2. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Sta Cruz Norte.

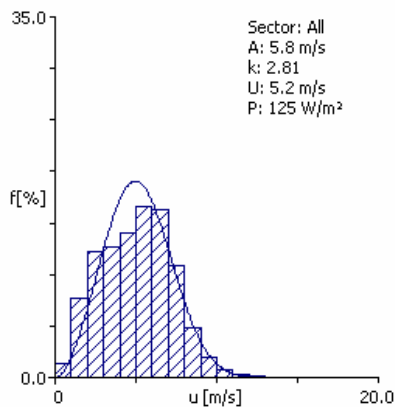


Fig 3. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Jagüey.

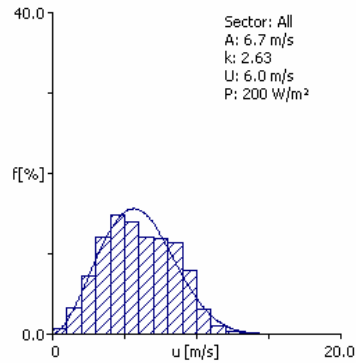


Fig 4. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en El Brinco.

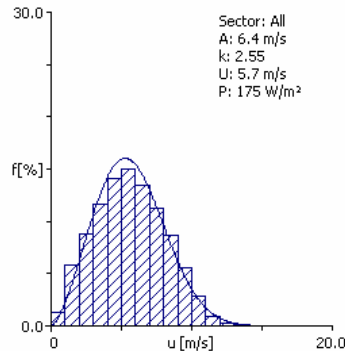


Fig 5 Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Caibarién.

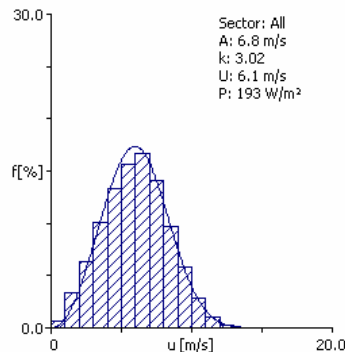


Fig 6. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Camagüey.

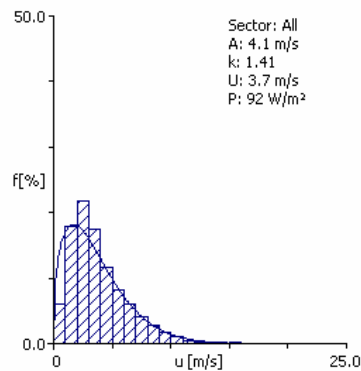


Fig 7. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Punta Tabacal.

Cálculo de U_* y Z_0

Como se planteó en materiales y métodos haciendo uso del perfil logarítmico del viento y mediante un ajuste realizado por la ecuación de la línea recta se determinó para cada sitio un ajuste potencial que relaciona ambos parámetros y cuyo coeficiente de correlación fue superior a 0.85 en casi todos los casos.

Las curvas de ajustes así como las ecuaciones de ajustes para cada sitio se muestran a continuación:

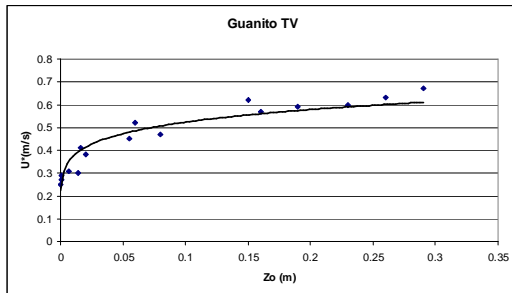


Fig 8. Relación Z_0 vs U_* para la estación de Guanito TV.

$$Y = 0.7302 X^{0.14448} \quad R^2 = 0.9044$$

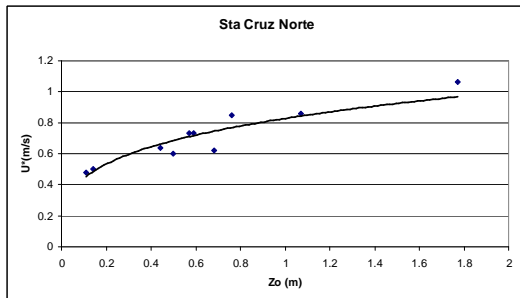


Fig 9. Relación Z_0 vs U_* para la estación de Santa Cruz del Norte.

$$Y = 0.8276 X^{0.2728} \quad R^2 = 0.8612$$

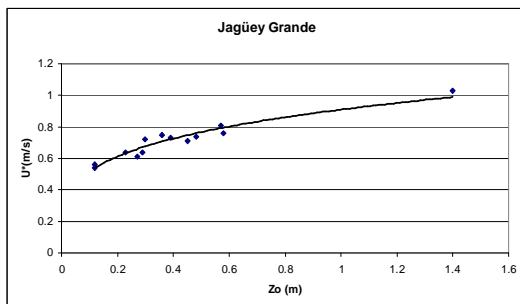


Fig 10. Relación Z_0 vs U_* para la estación de Jagüey Grande.

$$Y = 0.9099 X^{0.2466} \quad R^2 = 0.9274$$

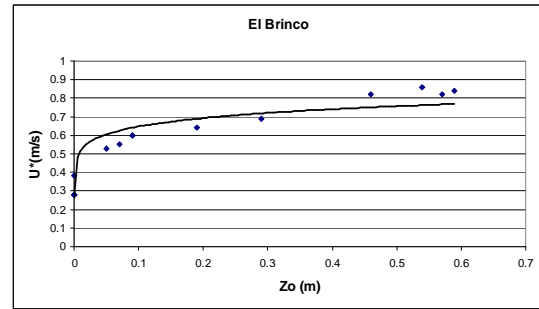


Fig 11. Relación Z_0 vs U_* para la estación de El Brinco.

$$Y = 0.8099 X^{0.0972} \quad R^2 = 0.9532$$

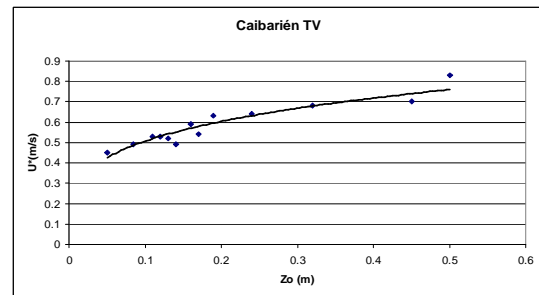


Fig 12. Relación Z_0 vs U_* para la estación de Caibarién TV.

$$Y = 0.9011 X^{0.2522} \quad R^2 = 0.8771$$

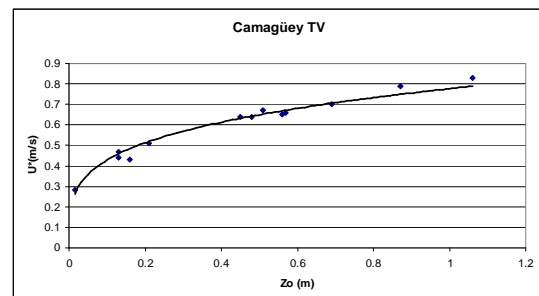


Fig 13. Relación Z_0 vs U_* para la estación de Camagüey TV.

$$Y = 0.7768 X^{0.2585} \quad R^2 = 0.974$$

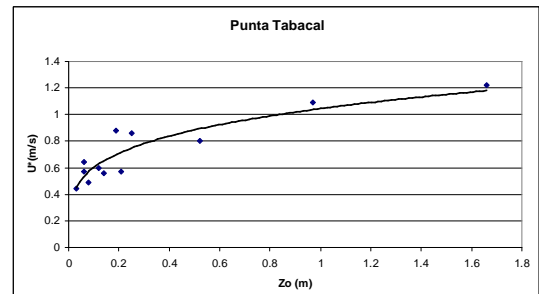


Fig 14. Relación Z_0 vs U_* para la estación de Punta Tabacal.

$$Y = 1.0444 X^{0.2403} \quad R^2 = 0.7979$$

De las ecuaciones se aprecia que el mejor ajuste se encontró para la torre de Camagüey TV (0.97) y más bajo para la torre de Punta Tabacal (0.8).

Cálculos energéticos

Las figs. 6 y 7 muestran el comportamiento en el período del FC y la energía producida para cada sitio. Par este análisis se simularon varias máquinas comerciales (tabla 3), incluyendo las que componen el parque eólico de la Isla de Juventud (Vergnet) y el recientemente inaugurado parque eólico de Gibara (Gamesa).

Tabla. 3. Tipos de máquinas empleadas para la simulación de los sitios.

| Tipo de Máquina | Veloc. de arranque (m/s) | Potencia Nominal (kw) |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|
| Vergnet MP 32/2 | 4 | 275 |
| Gamesa G52 | 4 | 850 |
| Neg-Mikon | 4 | 900 |
| Bonus | 4 | 1000 |
| Nordex N60 | 4 | 1300 |
| Vestas V80 | 4 | 2000 |

Puede apreciarse que el aprovechamiento energético del viento en Cuba está muy estrechamente vinculado a su comportamiento estacional, siendo la temporada invernal (Nov-Abril), donde deben esperarse los mayores aportes de este recurso al Sistema Electroenergético Nacional.

Los resultados alcanzados hasta el presente aseveran la afirmación anterior, especialmente en la región de Santa Cruz del Norte donde incluso en el mes de marzo se alcanzaron valores de FC de más del 50 % para todas las máquinas simuladas, valores realmente excepcionales para cualquier lugar del mundo, aún teniendo en cuenta el comportamiento anómalo de este mes durante el año 2007.

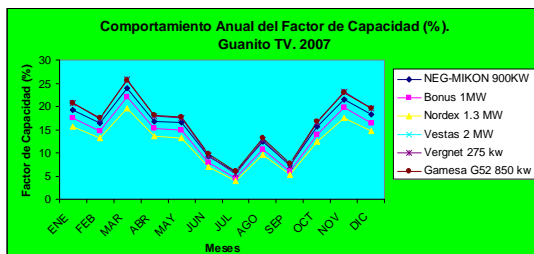


Fig. 15. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Guanito TV.

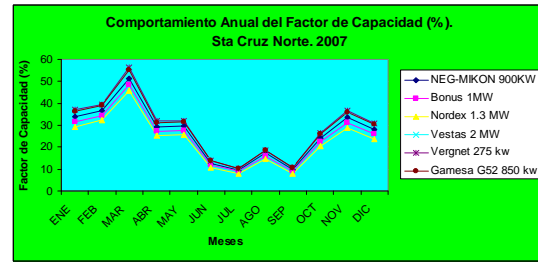


Fig. 16. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Santa Cruz del Norte.

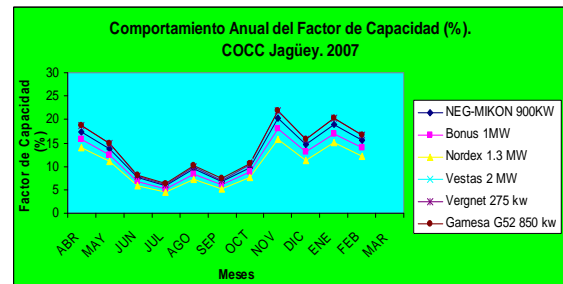


Fig. 17. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Jagüey Grande.

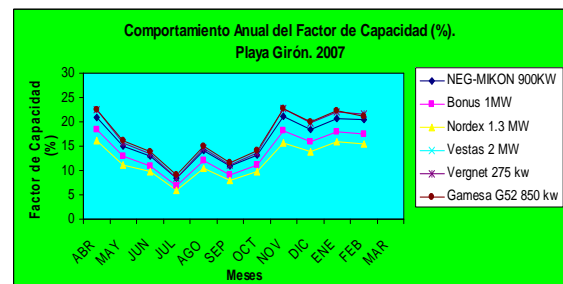


Fig. 17. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en El Brinco.

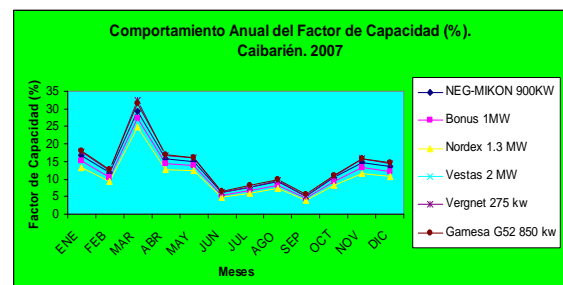


Fig. 18. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Caibarién TV.

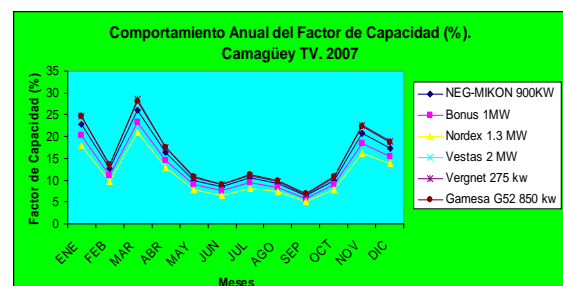


Fig. 19. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Camagüey TV.

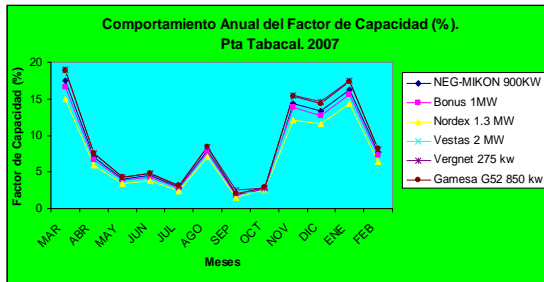


Fig. 20. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Punta Tabacal.

Conclusiones

Los resultados mostrados en este trabajo, aunque preliminares muestra la importancia de la red de torres de referencias para el programa eólico cubano contribuyendo de manera notable al monitoreo del viento como recurso energético en todo el país y que permite complementar la actividad de prospección que simultáneamente se lleva a cabo en varios puntos del país. Entre las principales conclusiones encontradas están:

- 1- El comportamiento del viento a escala sinóptica en el nivel de 1000 hPa está siendo bien representada por las torres de referencia.
- 2- La medición de las variables meteorológicas principales en varios niveles permiten el conocimiento de los parámetros que caracterizan la capa superficial atmosférica y contribuirá a la confirmación de las parametrizaciones que hoy en día se utilizan en el mundo o la formulación de otras nuevas acorde con nuestras condiciones físico-geográficas.
- 3- Los datos de viento reportados por las torres en el período de medición han seguido las variaciones que climatológicamente están reportadas por las estaciones meteorológicas de superficie. Los meses de marzo y agosto presentaron anomalías positivas en cuanto a los valores históricos de rapidez del viento mostrados por los datos de reanálisis del período 1970-2000.
- 4- El ajuste de la distribución de frecuencias del viento por la distribución de Weibull, fue muy bueno con una desviación máxima del 3 %, aunque en casi todos los casos estuvo por debajo del 1 %.
- 5- Se pudo encontrar con buena aproximación la relación entre Z_0 y U_* para todos los sitios, lo cual contribuirá a obtener una ecuación generalizada para todo el país, teniendo en cuenta las diferentes condiciones físico-geográficas y climatológicas.
- 6- Respecto a los resultados encontrados la región de Santa Cruz del Norte muestra hasta el presente los valores más notables por el

aprovechamiento energético del viento con factores de capacidad que en la etapa invernal sobrepasan el 30 %, valor altamente competitivo.

7- La simulación combinada de varias máquinas para un mismo sitio permite la comparación en cuanto a rendimiento de las mismas y se sugiere ir incorporando al análisis aquellas máquinas que formarán parte de los futuros parques eólicos de Cuba.

8- Todos los resultados mostrados aquí resultan ser novedosos para Cuba.

Bibliografía

NCEP/NCAR (2007): Datos de reanálisis obtenidos del sitio web: www.ncep.noaa.gov

Haltiner G., F. Martín, (1957): Meteorología Dinámica y Física. McGraw Hill Book Company SA. New York, Londres, Toronto

OMM (1984): Aspectos Meteorológicos de la utilización del viento como fuente de energía. Nota Técnica No. 175, OMM-No. 575. Ginebra Suiza.

Soltura R., Mon S., Rodríguez G., Roque A. y Ayala L. (1997): Atlas Eólico de Cuba. Estadística y climatología. Potenciales de generación Eolo-eléctrico y bombeo eólico. Revista Solar No. 33. Primavera 1997. México.

Hsu, S. A. (1982): Determination of the power law wind profile exponent on tropical coast. L. Appl. Meteor., 21, No. 8, pp. 1167-1190.

Petersen, E.L y Troen, I. (1986): European Wind Atlas. European Wind Energy Association, Conference and Exhibition, Roma, Italy.