

# PRONÓSTICO ESPECIALIZADO PARA LOS PARQUES EÓLICOS HERRADURA I Y HERRADURA II DE LA PROVINCIA LAS TUNAS

Por Lic. Wilber Ramírez Espinosa\*, Ing. Armando Carracedo Velázquez\* y Lic. Yadira Pérez Calzada\*

\*Instituto de Meteorología Centro Meteorológico Provincial Las Tunas

E-mail: wilber.ramirez@ltu.insmet.cu; armando.carracedo@ltu.insmet.cu; yadira.calzada@ltu.insmet.cu

## Resumen

En este trabajo se presenta el resultado del pronóstico especializado del viento a diferentes alturas y otras variables meteorológicas de interés, para la ejecución y puesta en marcha de los parques eólicos La Herradura I y II, de la Provincia Las Tunas. Se emplearon las velocidades de viento a partir de datos meteorológicos obtenidos de la herramienta XyGrib a una altura de 10 metros y el parámetro de rugosidad en la zona, empleando la hoja de cálculo para hallar las velocidades de viento medias a diferentes alturas, teniendo en cuenta los modelos basados en la teoría de la similitud de Monin-Obukhov (MOST), que son los utilizados con más frecuencia en los problemas aplicados del viento en la climatología eólica. Además se utilizó el programa de mareas Wxtide32 apoyado en tabla de mareas de 2018, para la estimación de la marea astronómica en la costa norte adyacente al área de los parques.

*Palabras clave:* Velocidad del viento, herramienta XyGrib, marea astronómica, Wxtide32.

---

## SPECIALIZED FORECAST FOR HERRADURA I AND HERRADURA II WIND FARMS IN LAS TUNAS PROVINCE

### Abstract

This paper presents the result of the specialized wind forecast at different heights and other meteorological variables of interest, for the execution and start-up of the La Herradura I and II wind farms, in Las Tunas Province. Wind speeds were used from meteorological data obtained from the XyGrib tool at a height of 10 meters and the roughness parameter in the area, using the spreadsheet to find the average wind speeds at different heights, taking into account the models based on the theory of similarity of Monin-Obukhov (MOST), which are the most frequently used in the wind problems applied in wind climatology. In addition, the Wxtide32 tide program based on the 2018 tide table was used to estimate the astronomical tide on the north coast adjacent to the park area.

*Keywords:* : Wind speed, XyGrib tool, astronomical tide, Wxtide32.

---

### Introducción

Cuba prioriza y promueve un mayor uso y diversificación de las fuentes renovables en su esquema energético, para lo cual cuenta con un programa dirigido a incrementar la independencia en esa rama, reducir los costos y aumentar la eficiencia y seguridad en el suministro de electricidad a todos los sectores de la economía y a la población.

La Mayor de las Antillas considera primordial su apuesta por el empleo de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) en su afán de contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, en correspondencia con los compromisos pactados en los acuerdos internacionales sobre el cambio climático.

El director de Energía Renovable del Ministerio cubano de Energía y Minas, Rosell Guerra Campaña, en la Cum-

bre internacional efectuada en La Habana, en enero de 2018, se refirió a la política aprobada para el desarrollo de las FRE y la eficiencia energética, como una de las prioridades en el proceso de actualización del modelo económico cubano, y cuya meta para 2030 es lograr 24 % de participación de dichas fuentes en la producción de electricidad del país (actualmente apenas alcanza 4,5 %) [Casado, 2016].

La instalación y operación de los Parques Eólicos La Herradura 1 y La Herradura 2 es un proyecto único en el país. Sin experiencias previas, cada tarea se ha enfrentado como parte de un cronograma de trabajo detallado.

Esta actividad ingeniera y constructiva se realiza por primera vez en Cuba y ha tenido que sortear obstáculos como la inestabilidad de un terreno cársico, el comportamiento del clima y los retos que supone asumir un proyecto millonario de este tipo en un país subdesarrollado [Reacción CUBAHORA, 2018].

Las extensas llanuras y la vegetación baja de la región, resultan ideales para aprovechar los vientos alisios que soplan desde el océano Atlántico por la costa norte. Estudios de prospección eólica, desarrollados por el Centro Provincial de Meteorología y otras instituciones nacionales, confirmaron la existencia allí de corrientes de aire sostenidas de aproximadamente 6,8 metros por segundo a más de 50 metros de altura, lo cual demostró la factibilidad de la propuesta.

Según los directivos de la obra, en La Herradura-1 emplazarán 34 máquinas de 1,5 megawatt (MW) de potencia y estará compuesto por cinco circuitos. Sus aerogeneradores, con una altura de 65 metros, cuentan con palas de 37 metros. A su vez, La Herradura-2 lo integrarán 20 equipos de 2,5 MW, casi el doble de potencia, con altura de 80 metros y aspas de 54 metros [Parra & Fernández, 2018].

Esta obra se encuentra ubicada en el litoral norte de la Provincia de Las Tunas, desde la Playa Las Azules hasta Playa Caliente, al norte-noreste del asentamiento de Chaparra, en áreas perteneciente a la Empresa Forestal; su vinculación se realizará por la carretera Lora - La Herradura y demás viales existentes [Dirección Provincial de Planificación Física, 2013].

Por todo lo expuesto anteriormente se propuso como objetivo confeccionar un pronóstico especializado del viento a diferentes alturas y otras variables meteorológicas de interés, para la ejecución y puesta en marcha de los parques eólicos, La Herradura 1 y La Herradura 2, para dotar a la DIP (como Inversionista) y a las empresas que brindarán servicios a las obras (de construcción, transportación, almacenamiento, izajes, montajes y otros) de un pronóstico de mediano y corto plazos sobre el comportamiento de las principales variables meteorológicas y del estado general del tiempo. Todo ello para planificar con mayor objetividad las actividades a realizar, prever acciones para preservar los suministros tecnológicos y hacer el uso más eficiente y seguro de los medios técnicos y recursos humanos a su disposición; anticipar (dentro de los márgenes de incertidumbres admisibles para los pronósticos) las posibles afectaciones en tiempo y reajustar con objetividad sus plazos de ejecución.

## Materiales y métodos

Para realizar esta investigación se utilizaron como fuentes de información los trabajos de Díaz, G., & Manuel, J. 2013; Lighezzolo, A., De Elía, M. E., Tauro, C., & Torres, G. A. [2014]; Gassmann, M. I. [2015]; Soler-Torres, E., Sánchez-Suárez, L. M., & Borrego-Díaz, R. [2015]; Roque-Rodríguez, A., Carrasco-Díaz, M., & Reyes-Martínez, P. [2015].

Se utilizó el modelo numérico de predicción meteorológica Sistema Global de Predicción (GFS) desarrollado por National Centers for Environmental Prediction (NCEP) USA, que corre cuatro veces al día y produce pronósticos de hasta 16 días. Básicamente el modelo corre en dos partes. La primera tiene alta resolución y pronostica 192 horas (ocho días), mientras que la segunda corre desde la hora 192 hasta la 384 (16 días) en baja resolución. La resolución del modelo varía en cada parte del modelo: horizontalmente la resolución varía desde 35 a 70 km, verticalmente divide la atmósfera en 64 capas y temporalmente produce pronósticos cada tres horas en las primeras 192 horas y cada 12 horas hasta las 384 horas. El GFS es un modelo acoplado compuesto por cuatro modelos separados, un modelo de atmósfera, un modelo de océano, un modelo de tierra/suelo y un modelo de hielo marino. Estos cuatro modelos trabajan juntos para proveer mayor precisión en la representación de las condiciones climáticas. Para inicializar los pronósticos (Análisis) el GFS utiliza información que proviene del Global Data Assimilation System (GDAS). Este el componente operativo del Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) el cual es un sistema de asimilación de datos de variacional tridimensional (3D\_VAR) [The GFS Atmospheric Model, 2003].

Se empleó la herramienta XyGrib que es un paquete de visualización de datos meteorológicos de código abierto con soporte a varios modelos de pronósticos. Este software se comunica con el servidor de archivos grib de OpenGribs, proporcionando una selección de modelos atmosféricos y de oleaje de alcance global. XyGrib; también utiliza otras fuentes gratuitas y de acceso abierto de modelos regionales de alta resolución que se encuentran en el sitio asociado OpenSkiron.org (XyGrib, GRIB, GRIB reader, weather visualization, open source, GRIB files, zygrib, n.d.).

## Resultados y discusión

Para la confección del pronóstico especializado, se fijó un área y dentro de ella se establecieron las coordenadas correspondientes a los parques eólicos La Herradura. Se emplearon las velocidades de viento a partir de datos meteorológicos obtenidos de la herramienta XyGrib (Anexo 2) a una altura de 10 metros y el parámetro de rugosidad en la zona, teniendo en cuenta la clasificación del Proyecto internacional de Evaluación del Potencial de Energía Eólica y Solar (siglas en inglés SWERA), ya que para el fin práctico de pronósticos meteorológicos y comportamiento de variables para la región de los parques eólicos, es suficiente considerar la rugosidad de las áreas que concentran la mayor cantidad de Ags, en franjas alejadas de la costa con vegetación abundante, que se ajusta aceptablemente a la Clase Rugoso, con rugosidad de 0,25.

Se empleó la hoja de cálculo Excel para hallar las velocidades de viento medias a diferentes alturas, teniendo en

cuenta los modelos basados en la teoría de la similitud de Monin-Obukhov (MOST), que son los más utilizados en los problemas aplicados del viento en la climatología eólica.

En la capa atmosférica superficial se conoce por mucho tiempo que la velocidad del viento tiende a incrementarse a medida que se asciende, y que la superficie terrestre ejerce una acción de fricción o de retardo sobre la velocidad del viento. La representación de este comportamiento de la velocidad del viento con la altura es lo que se conoce como el perfil vertical del viento o simplemente el perfil del viento, y es expresado mediante fórmulas matemáticas, unas empíricas, como los modelos exponencial y logarítmico del viento y otras, con fundamentos teóricos, como la basada en la teoría de similitud de Monin-Obukhov [1954], mejor conocida internacionalmente por la abreviación de MOST [Díaz, G., & Manuel, J. 2013].

$$V_z = V_{ref} \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_0}\right)} \quad (1)$$

Donde:

Z<sub>0</sub>: parámetro de rugosidad (Z<sub>0</sub>= 0,25 para el área del parque)

V<sub>ref</sub>: velocidad del viento a 10 m de altura

Z: altura a que se quiere estimar el viento sobre el nivel del suelo

V<sub>z</sub>: velocidad del viento a diferentes alturas

Además se utilizó el programa de mareas Wxtide32 (Anexo 3) apoyado en tabla de mareas de 2018, para la estimación de la marea astronómica en la costa norte aledaña al área de los parques.

#### Validación del pronóstico

Los datos meteorológicos utilizados en el presente trabajo han sido validados y Revisados con el Sistema Automatizado de Revisión de las Observaciones Meteorológicas (Sarom), según las normas para la realización de observaciones meteorológicas de la Organización Meteorológica Mundial, y de la metodología aprobada por el Instituto de Meteorología (Insmet). Se utilizaron datos de la estación meteorológica 78358 y se compararon con los valores pronosticados por el modelo GFS en el período comprendido desde el día 2 de octubre de 2018 hasta el 31 de enero de 2019.

#### Análisis estadístico del Viento Observado y Pronosticado para la Estación de Puerto Padre

Para realizar el análisis se tomaron 912 observaciones de octubre, noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019.

Tabla 1. Comparación de la fuerza del viento pronosticado con el observado

Mes	Superior	Inferior	Igual	Total
Octubre	147	35	2	184
Noviembre	210	21	1	232
Diciembre	189	58	1	248
Enero	205	43	0	248
Total	751	157	4	912

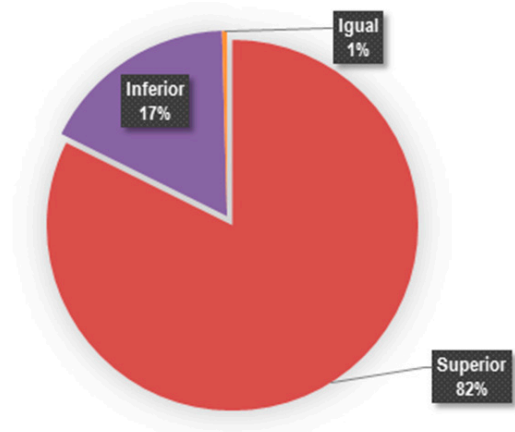


Fig. 1. Comparación de la fuerza del viento pronosticada contra la observada.

De la tabla 1 y la figura 1 se infiere que el modelo de pronóstico en la mayoría de los casos pronostica un valor de fuerza del viento superior al observado. A partir de esto se calculó el valor de la diferencia para cada observación y se promedió esta diferencia dando como resultado 1,8 m/s de diferencia promedio entre la fuerza del viento pronosticada y la observada.

#### Análisis de correlación

Se aplicó Índice de Pearson como prueba de correlación estadística para probar este tipo de relación estadística. O sea, según el valor del índice podemos inferir si un grupo de valores aumenta, disminuye o no cuando otro grupo también lo hace (tabla 2, Fig. 2).

Tabla 2. Análisis de correlación

Variables del índice	Resultado	Conclusión
Coefficiente de correlación (r)	0,722	Correlación positiva entre viento observado y pronosticado
Significación bilateral (p)	< 0,001	Los resultados alcanzados son significativos
Grados de libertad	910	

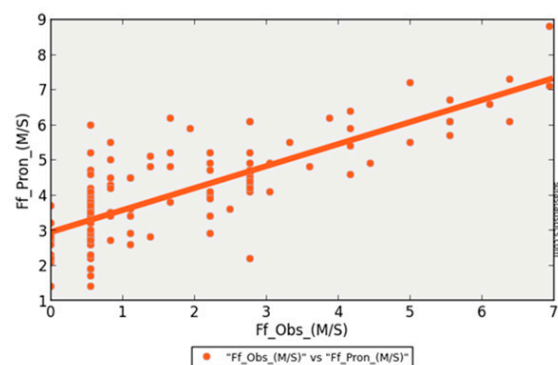


Fig. 2. Análisis de correlación.

De los resultados alcanzados con el índice de Pearson concluimos que existe correlación positiva entre la fuerza del viento observada y la pronosticada, de modo que a valores altos de viento observado corresponden valores altos en viento pronosticado, existiendo la misma correspondencia para valores bajos.

**Análisis por observaciones**

Se realizó un análisis comparando lo observado y pronosticado por horas tomando en cuenta que los valores entre observaciones varían entre sí (Fig. 3).

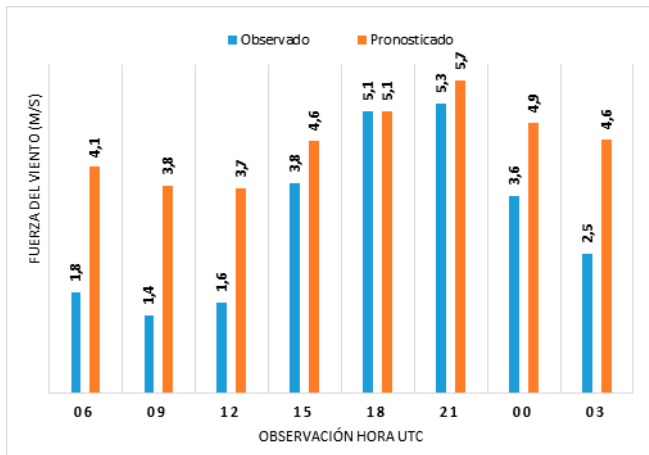


Fig. 3. Promedio de fuerza del viento por observación.

De este análisis se concluye que en los horario de 15-Z, 18-Z, 21-Z y 00-Z los valores de fuerza del viento observado y pronosticado son más cercanos entre sí que en el resto de las observaciones.

**Análisis de la dirección del viento**

Se analizó también la dirección del viento para ver cómo se correspondían los valores observados y pronosticados de esta variable, observándose un alto grado de correspondencia entre lo observado y lo pronosticado (Fig. 4).

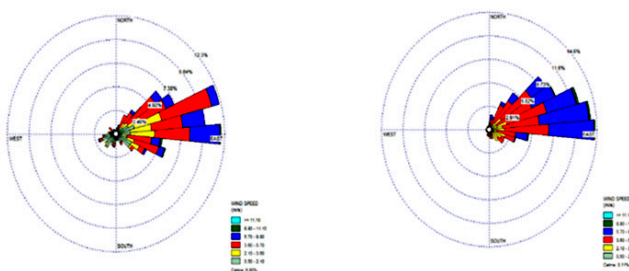


Fig. 4. Análisis de la dirección del viento.

**Aporte económico**

En cuanto a la parte económica el pronóstico especializado contribuye al ahorro de materiales (acero, cemento y otros) en el momento de la construcción de las bases, ya que se tienen en cuenta los datos de bajamar y pleamar, lo cual permite planificar las bombas de achique necesarias para mantener las bases sin agua durante todo el proceso de fundición de las bases.

El montaje mecánico de los aerogeneradores, solo se permite con velocidades de viento menor o igual a 8 m/s, lo cual se tiene en cuenta en el pronóstico de viento para el desarrollo de esta actividad.

Además permite planificar el horario de montaje, lo cual contribuye a racionalizar el tiempo, los recursos humanos y materiales, ya que todo ese personal y equipos solo permanecerían en la obra en los horarios recomendados; fuera de este horario sería un gasto innecesario de combustible, alimentación en la atención al hombre, etc.

**Conclusiones**

La realización del pronóstico sobre la velocidad del viento y la marea astronómica permitió planificar con mayor objetividad las actividades a realizar; prever acciones para preservar los suministros tecnológicos y hacer el uso más eficiente y seguro de los medios técnicos y recursos humanos a su disposición; anticipar las posibles afectaciones en tiempo y reajustar con objetividad sus plazos de ejecución.

Se constató que el modelo de pronóstico en la mayoría de los casos pronostica un valor de fuerza del viento superior al observado, siendo el promedio de la diferencia de 1,8m/s. Al realizar la correlación estadística con el índice de Pearson se comprobó que existe una correlación positiva entre la fuerza del viento observada y la pronosticada, de modo que a valores altos de viento observado corresponden valores altos en viento pronosticado, existiendo la misma correspondencia para valores bajos. Al analizar los datos por horarios se observó que durante el día los valores de fuerza del viento observado y pronosticado son más cercanos entre sí que durante la noche.

**Bibliografía**

CASADO, L. C. (2016, September 6). «Cuba en el camino de renovar su matriz energética». Opciones. Retrieved from <http://www.opciones.cu/cuba/2016-09-06/cuba-en-el-camino-de-renovar-su-matriz-energetica/>

DÍAZ, G., & MANUEL J. (2013). «Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica». *Terra*, 29 (46), 81–101.

DIRECCIÓN PROVINCIAL DE PLANIFICACIÓN FÍSICA (2013). «Reubicación del Parque Eólico Herradura No. 2 Las Tunas y Holguín (Informe Técnico)». Las Tunas.

ESTELA, L. B. L. (2017). *Pinceladas Meteorológicas*. La Habana: Ed. Científico-Técnica.

«Feria de Energía Renovable en Cuba por nuevas oportunidades de negocios» (2018). Retrieved February 5, 2018, from <http://www.cadenagramonte.cu/articulos/ver/76682:feria-de-energia-renovable-en-cuba-por-nuevas-oportunidades-de-negocios>

GARCÍA, M. I. B. G. I. B., & S. P. LITRÁN (2017). «Influencia de la rugosidad de la superficie del mar en la producción energética de los aerogeneradores marinos». Presented at the 21th International Congress on Project Management and Engineering, Cádiz.

GASSMANN, M. I. (2015). «Variabilidad del parámetro de rugosidad sobre una cobertura vegetal». *Meteorológica*, 40(2), 59–72.

Herrero Novoa, C. (2016). «Estudio de la velocidad del viento: análisis espacial y ajuste a una función de distribución (Tesis de Grado)». Universidad de Valladolid.

LIGHEZZOLO, A., M. E. DE ELÍA, C. TAURO & G. A. TORRES (2014). «Integración de modelos numéricos de predicción meteorológica en sistemas de alerta temprana a emergencias (Tesis de Maestría)». Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

PARRA, E. D., & J. A. FERNÁNDEZ (2018). «Energía eólica en Las Tunas: atrapando el viento». Periódico 26. Retrieved from <http://www.periodico26.cu/index.php/es/deporte/item/9669-energia-eolica-en-las-tunas-atrapando-el-viento-video-mapa-infografia>

REDACCIÓN CUBAHORA. (2018). «Energía eólica en Cuba: lo que trae el viento [Revista Digital]». Retrieved January 24, 2018, from <http://www.cubahora.cu/ciencia-y-tecnologia/lo-que-trae-el-viento>

ROQUE-RODRÍGUEZ, A., M. CARRASCO-DÍAZ & P. REYES-MARTÍNEZ (2015). «Características del perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba, atendiendo a la estratificación térmica de la atmósfera». Ciencias de La Tierra y El Espacio, 16(2), 189–200.

ROQUE-RODRÍGUEZ, A. E., U. MONTENEGRO-MORACÉN A. PEÑA-DE LA CRUZ (2018). «Particularidades del viento en la región oriental del país. Revista Cubana de Meteorología», 24(3), 335–348.

SANTANA, M. E. M. (2011). «Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales (Tesis de Maestría)». Universidad de Granada.

SOLER-TORRES, E., L. M. SÁNCHEZ-SUÁREZ Y R. BORREGO-DÍAZ (2015). «Caracterización del viento para evaluar su potencial energético en la Isla de la Juventud». Ciencias de La Tierra y El Espacio, 16(2), 164–175.

SOSA, Y. N. (2004). «Propuesta de una metodología para la descripción de la rugosidad en Cuba». En revista Eco Solar, 2–34, La Habana: Ed. Cubasolar.

«The GFS Atmospheric Model» (2003). Retrieved January 29, 2018, from <https://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html>

«XyGrib, GRIB, GRIB reader, weather visualization, open source, GRIB files, zygrib. (n.d.)». Retrieved February 11, 2018, from <https://opengrubs.org/en/>

## Anexos



Ilustración 1. Localización del Parque Eólico.



Ilustración 3. Construcción de la base de un Aerogenerador (Fuente: Cubahora).

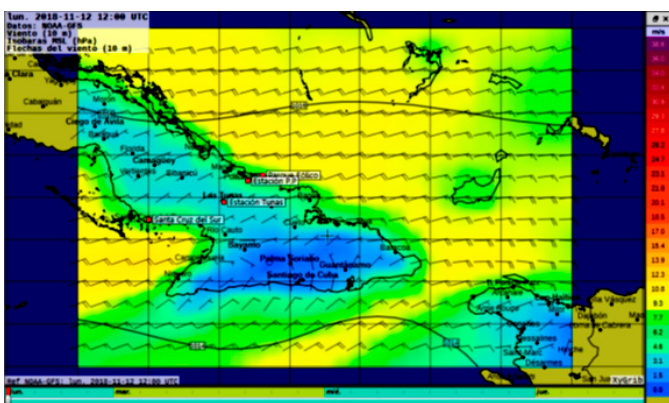


Ilustración 2. Área de Pronósticos del modelo GFS en el software XyGrib.



Ilustración 4. Vegetación predominante en el área del Parque Eólico (Fuente: Cubahora).