

EMA del pronóstico a corto plazo de la rapidez del viento para el parque eólico Gibara I según el TSS influyente



<https://cu-id.com/2377/v29n3e02>

MAE of the short-term wind speed forecast for the Gibara I wind farm according to the influential TSS

 Dayanis M. Patiño Avila^{1*},  Alfredo Roque Rodríguez^{1**},  Edgardo Soler Torres^{2***}

¹Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología (INSMET). Carretera del Asilo S/N. Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba

²Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud (CMP IJV). Calle 41 No. 4625 / 46 y 54 Nueva Gerona, Ap: 1448, CP 25100, Cuba.

RESUMEN: Cuba, inmersa en el uso de la energía eólica dentro de su matriz energética para la producción de electricidad, ha desarrollado pronósticos a corto plazo de la rapidez del viento para los parques eólicos de Gibara, con un Error Medio Absoluto (EMA) que, en varias ocasiones, durante la práctica operativa, supera los 3 m/s, provocando que se incremente el error en el pronóstico de potencia eólica de estos parques. Mediante el empleo del Catálogo de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS), datos de observación de la rapidez del viento proporcionados por los anemómetros instalados en los aerogeneradores y datos de pronósticos de rapidez del viento generados por el Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI), se logra conocer mejor este comportamiento del EMA bajo el TSS influyente. Los análisis se realizaron teniendo en cuenta los periodos lluvioso y poco lluvioso del año desde mayo de 2020 a abril de 2021. Se estableció una nueva clasificación cualitativa del pronóstico de rapidez del viento en **muy bueno**, **bueno**, **regular** y **malo**, en correspondencia con su posible impacto en el pronóstico de potencia eólica del parque. Con esta clasificación, se obtuvo que el **subtipo 3** (Flujo anticiclónico extendido no perturbado), fue quien más frecuencia de casos tuvo entre **muy bueno** y **bueno** en ambos periodos estacionales. El **subtipo 19** (Anticiclón migratorio en avanzado estado de transformación) fue el sistema que peores resultados arrojó, pues en más del 50% de los días en que estuvo presente, el pronóstico de rapidez del viento fue catalogado de **regular** y **malo**. Los demás subtipos que dieron **regular** o **malo**, presentaron menos del 10% de frecuencia de ocurrencia.

Palabras claves: energía eólica, error medio absoluto, pronóstico a corto plazo, rapidez del viento, tipos de situaciones sinópticas.

ABSTRACT: Cuba, immersed in the use of wind energy within its energy matrix for the production of electricity, has developed short-term forecasts of wind speed for the Gibara wind farms, with a Mean Absolute Error (EMA), which, on several occasions, in operational practice, exceeds 3 m/s, causing the error in the wind power forecast of these farms to increase. By using the Synoptic Situation Types Catalog (TSS), wind speed observation data provided by anemometers installed in wind turbines and wind speed forecast data generated by the Immediate Forecast System (SisPI), It is possible to better understand this behavior of the EMA under the prevailing TSS in this area. The analyzes were carried out taking into account the rainy and dry seasons from May 2020 to April 2021. A new qualitative classification of the wind speed forecast was established in **very good**, **good**, **regular** and **bad**, in correspondence with its possible impact on the wind power forecast of the park. With this classification, it was found that **subtype 3** (Extended undisturbed anticyclonic flow) was the one with the highest frequency of cases between **very good** and **good** in both seasonal periods. Subtype **19** (migratory anticyclone in an advanced state of transformation) was the system that produced the worst results in the dry season, since on more than 50% of the days in which it was present, the wind speed forecast was classified as **regular** and **bad**. The other subtypes that gave **fair** or **bad**, presented less than 10% frequency of occurrence.

Keywords: wind energy, mean absolute error, short-term forecast, wind speed, types of synoptic situations.

*Autor para correspondencia: dayanmario212@gmail.com

**E-Mail: alfroquerodriguez@gmail.com

***E-Mail: edgardo.soler2@gmail.com

Recibido: 19/02/2023

Aceptado: 20/05/2023

INTRODUCCIÓN

En el último reporte del Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC, 2022), se dio a conocer que el incremento de la capacidad acumulada a nivel mundial de esta tecnología para la producción de electricidad en el 2021 superó los 837 GWh, con una capacidad instalada en el último año de 93.6 GW, su segundo mejor año de la historia. Todo ello a pesar de la crisis provocada por la pandemia de la Covid-19.

Este logro se debe, principalmente, a su gran madurez tecnológica. Sin embargo, su conexión a red eléctrica ha requerido diversos esfuerzos en diferentes campos, incluyendo el desarrollo de herramientas que hagan predecible la generación eólica.

Cuba, por su parte, sigue apostando por esta fuente de energía. En el 2022, la generación total de los parques Gibara I y II, fue de 215 GW/h, lo cual equivale a 53 300 toneladas de combustible dejadas de consumir, por lo que se dejaron de emitir 161 081 toneladas de dióxido de carbono y otros gases de efectos contaminantes (Veloz, 2022).

Dadas las importantes inversiones económicas en el sector, sobre todo en esta zona de Gibara, una vez que se ha comprobado la rentabilidad de este tipo de energía, la misma depende en gran medida de una correcta predicción del viento, pues, este pronóstico constituye parte esencial del pronóstico de potencia de los parques eólicos, los cuales son utilizados en su planificación diaria por el Despacho Nacional de Carga (DNC). Por lo tanto, el éxito de la generación eléctrica en los parques eólicos, depende indirectamente de la precisión del pronóstico de la velocidad del viento. Estas son las razones por la cual se requieren pronósticos más fiables.

Actualmente, en el ámbito internacional, los pronósticos a corto plazo con fines eólicos son uno de los más empleados en el mundo. Dentro de las investigaciones dirigidas a pronosticar a corto plazo la rapidez del viento con fines energéticos, o la potencia eólica propiamente, tuvo gran relevancia el proyecto ANEMOS (Giebel *et al.*, 2011), cuyo objetivo fue el desarrollo de modelos avanzados de predicción que mejoraron sustancialmente las herramientas disponibles hasta su fecha. También se encuentran otros trabajos como: (Jiang *et al.*, 2013), (Senkal & Ozgonenel, 2013), (Xiaodan *et al.*, 2013), (Appice *et al.*, 2015), (Carpinone *et al.*, 2015), (Sapronova *et al.*, 2015), (Filik, 2016), (Li *et al.*, 2016).

En cuanto al ámbito nacional, se destacan los estudios como el de Felipe Matos (Matos *et al.*, 2008), dirigido al desarrollo del Modelo Simple para la Predicción de la Generación Eólica (MOSIMPRE), el cual basaba su desempeño en la metodología desarrollada por Antonio Fernández sobre los Procesos Sinópticos Objetivos (PSOs) (Fernández & Díaz, 2003) y la generación del parque eólico de Turiguanó. Dentro de

los principales resultados se encuentran la obtención de las curvas que relacionan la potencia generada con la velocidad del viento, así como la definición de los PSOs más favorables y desfavorables para el aprovechamiento del viento desde el punto de vista energético. El MOSIMPRE constituye el primer modelo de pronóstico para parques eólicos realizado en Cuba, empleando herramientas de la climatología sinóptica, aunque se ha aplicado a un punto específico del país.

Se encuentran demás estudios como el de Roque y colaboradores (Roque *et al.*, 2016), y otros precisamente referidos a los parques eólicos de Gibara (Roque *et al.*, 2015a; 2015b; 2016 y 2022), en este último los resultados mostraron que fueron mejores con el aumento de la resolución (último dominio anidado de 1 km) del modelo WRF, en comparación con los estudios anteriores, sin embargo, el costo computacional es alto. En el Centro de Física de la Atmósfera (CFA) perteneciente al Instituto de Meteorología, se realiza de manera operativa dicho pronóstico con una resolución de 3km, el cual arroja resultados aceptables para el pronóstico de la potencia eólica, sin embargo, ocurren días en que el pronóstico presenta errores medios absolutos (EMA) superiores a los 3 m/s y más. Dichos estudios anteriores y los pronósticos actuales, no han tenido en cuenta el comportamiento del pronóstico en función de la situación sinóptica imperante.

Teniendo en cuenta la dependencia directa de la potencia del aerogenerador con el cubo de la rapidez del viento, es fácil notar la importancia de poder pronosticar con la mayor precisión posible la rapidez del viento en el sitio de ubicación del parque eólico, lo cual motiva a indagar en las causas de ello, empezando por los TSS que influyen en la región de estudio como principal causa del origen del viento y su variabilidad en el país, situación que generó la siguiente interrogante: *¿Cómo se comporta el EMA del pronóstico a corto plazo de la rapidez del viento para el Parque Eólico Gibara I en dependencia del TSS influyente en el periodo de mayo 2020-abril 2021?*

Por tal motivo el objetivo de este trabajo fue **Caracterizar el comportamiento del EMA del pronóstico a corto plazo de la rapidez del viento en Parque Eólico de Gibara I en dependencia de los TSS influyentes en el periodo del mayo 2020-abril 2021.**

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se ubica en el municipio Gibara (Figura 1), en la provincia de Holguín, donde se ha estudiado este recurso eólico para su empleo en la producción de electricidad.

En esta zona se encuentran ubicados dos parques eólicos (Gibara I y II) en la zona costera aproximadamente 300 metros de la línea costera y presenta una altura sobre el nivel del mar de 3 metros (Roque, 2015).

DATOS UTILIZADOS

El periodo de estudio de la presente investigación, abarcó desde el 1 de mayo de 2020 hasta 30 de abril de 2021, periodo en el cual el parque eólico Gibara I (PEGI) tenían funcionando sus 6 aerogeneradores.

Para llevar a cabo dicho estudio, se utilizaron los valores horarios de la rapidez del viento proporcionados por el anemómetro ubicado en las góndolas de los aerogeneradores, cuya altura se ubica en el PEGI a 55 m. Los valores horarios de los pronósticos de rapidez del viento, fueron proporcionados por el SisPI, que incluye el modelo WRF como modelo atmosférico. Se empleó, la base datos de los subTSS diarios en el periodo de estudio, elaborados por Soler y colaboradores (Soler *et al.*, 2020), que incluye los subTSS que influyeron por día en la región oriental del país (Tabla 1). También se utilizó la información del Catálogo de TSS que influyen en Cuba, proveniente de la misma fuente, donde se encuentran ilustradas y caracterizadas estas situaciones.

Tabla 1. Subtipos de Situaciones Sinópticas utilizadas para la realización del trabajo

No	SubTSS
1	Anticiclón subtropical con flujo del primer cuadrante
2	Anticiclón subtropical con flujo del segundo cuadrante
3	Flujo anticiclónico extendido no perturbado
4	Flujo extendido en el sector divergente de ondas
5	Débil gradiente barométrico
6	Influencia de un ciclón tropical
7	Ondas y hondonadas del Este
8	Convergencia y hondonadas del Oeste
9	Baja extratropical en su sector cálido
10	Baja extratropical en su sector frío
11	Baja extratropical con prefrontal
12	Baja extratropical sin prefrontal
13	Frente frío clásico
14	Frente frío revesino
15	Sistema frontal cuasi-estacionario
16	Sistema frontal en disipación
17	Anticiclón continental migratorio
18	Anticiclón migratorio en proceso de transformación
19	Anticiclón migratorio en avanzado estado de transformación

SISTEMA DE PRONÓSTICO INMEDIATO (SISPI)

Como se había mencionado anteriormente, los datos de pronósticos de rapidez del viento fueron generados por el SisPI, el cual es un sistema que pronostica a corto plazo los diferentes fenómenos meteorológicos. Cuenta con cuatro actualizaciones diarias cada seis horas (0000, 0600, 1200 y 1800 UTC), y con tres dominios con resolución de 27, 9 y 3 km, además, tiene un alcance de pronóstico de 24 horas (Sierra *et al.*, 2017).

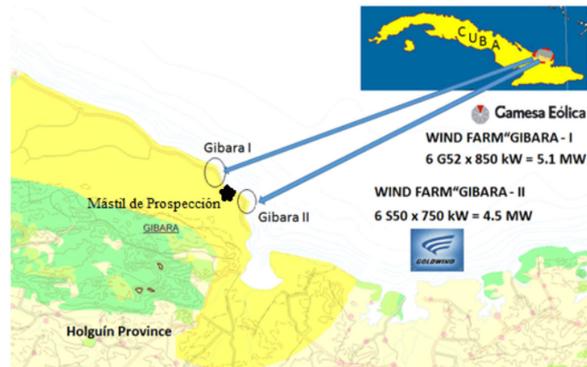


Figura 1. Ubicación de los parques eólicos Gibara I y II en la provincia de Holguín (Roque *et al.*, 2022)

Se encuentra inicializado con los datos del Global Forecast System (GFS), y configurado con el modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF), el cual es de vasto uso en las investigaciones meteorológicas aplicadas, precisamente afines con la estimación y pronóstico del recurso eólico en disímiles partes del mundo (Roque *et al.*, 2022).

ESTADÍGRAFO UTILIZADO

El estadígrafo utilizado fue el error medio absoluto (EMA), como se muestra en (1). Dicho estadígrafo es definido como la diferencia absoluta entre los valores pronosticados y los observados, con un rango de valores entre cero e infinito, siendo el pronóstico óptimo cuando alcanza el valor de cero.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{x}_i - x_i| \quad (1)$$

Donde

$x \hat{i}$: es el valor observado

x_i : es el valor del pronóstico en el tiempo i

METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta la base de datos proporcionada por Soler y colaboradores (Soler *et al.*, 2020), y el Catálogo de los TSS elaborado por la misma fuente, se determinaron los subTSS influyentes en Gibara durante el periodo de estudio y su frecuencia de ocurrencia. Primeramente, se estudió su comportamiento anual y luego se determinaron para los dos periodos característicos del año en Cuba, periodo lluvioso (PLL) y poco lluvioso (PPLL), donde además se analizaron los subTSS más predominantes.

Posteriormente, se estudió la marcha diaria de la rapidez del viento para la zona en cuestión. Posteriormente se determinó el EMA del pronóstico de rapidez del viento y se analizó el comportamiento del mismo con respecto a los subTSS.

Para poder hacer una mejor caracterización de este comportamiento, fue necesario elaborar una clasificación para el EMA en correspondencia con el impacto que pudiera tener en el pronóstico de la potencia eólica del parque (Patiño, 2022). De tal manera que el

EMA pudo ser catalogado como **muy bueno** si los valores estuvieran entre 0 y 1 m/s; **bueno** entre 1 y 2 m/s; **regular** entre 2 y 3 m/s y **malo** cuando los valores fueran mayores que 3 m/s, aspecto novedoso, el cual hizo factible el análisis de este estadígrafo con respecto a los subTSS.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis del comportamiento de la rapidez del viento en Gibara durante el periodo de (mayo de 2020-abril 2021)

La **figura 2** exhibe el comportamiento horario de los valores promedios de la rapidez del viento en Gibara, durante el periodo de estudio. En la misma se observa una tendencia a la disminución de la rapidez del viento en horas de la madrugada y las primeras horas de la mañana hasta las 7:00 hora local, aspecto que ha sido señalado por (Carrasco *et al.*, 2011); (Roque *et al.*, 2015); (Martínez *et al.*, 2015), donde explican que la interacción entre el flujo sinóptico predominante y la circulación local de brisas constituye la principal causa de esta disminución en la costa norte. A partir de ese momento, la rapidez del viento comienza a incrementarse, alcanzando su máximo valor a las 15:00 hora local, pasadas las 17:00 hora local muestra nuevamente una tendencia a su disminución. Este comportamiento, muestra el patrón típico encontrado para esta región del país por varios autores con diferentes muestras de datos (Martínez & Roque, 2019), (Roque *et al.*, 2022), (Patíño, 2022).

En dicha figura se observa, además, la preponderancia de los mayores valores medios de la rapidez del viento para el PPLL, coincidiendo con el periodo característico del paso de sistemas frontales y la presencia de los Anticiclones Continentales Migratorios, punto que fue reportado por Rodríguez & Perdigón, (2011). No obstante, los valores máximos promedios se dan en los mismos horarios, tanto en un periodo como en el otro.

Comportamiento anual de los TSS en el periodo de mayo de 2020- abril 2021

La **figura 3** muestra la frecuencia anual con que se manifestaron los subtipos de TSS del periodo estudiado. Se presentaron un total de trece subtipos de los diecinueve reportados por Soler y colaboradores en el 2020, de estos, el subtipo 3 (Flujo anticiclónico extendido no perturbado (**figura 4 (a)**)), exhibió mayor frecuencia, con un 40% aproximadamente, convirtiéndose en el más representativo del año.

Por otro lado, el subtipo 5 (Débil gradiente barométrico (**figura 4 (b)**)), se comportó con una frecuencia cerca del 24%, siendo, por tanto, el segundo subtipo más representativo del año. Los demás subtipos tuvieron frecuencias bajas de ocurrencia.

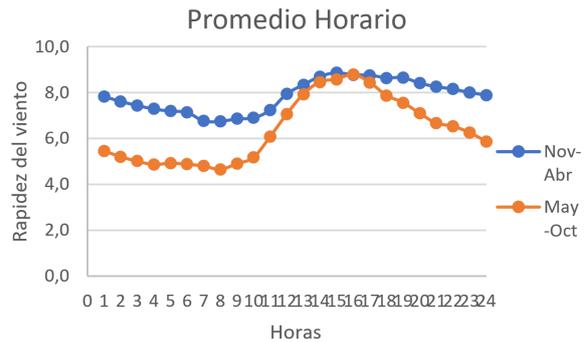


Figura 2. Marcha diaria de la rapidez del viento en PEGI en el periodo de (mayo de 2020-abril de 2021)

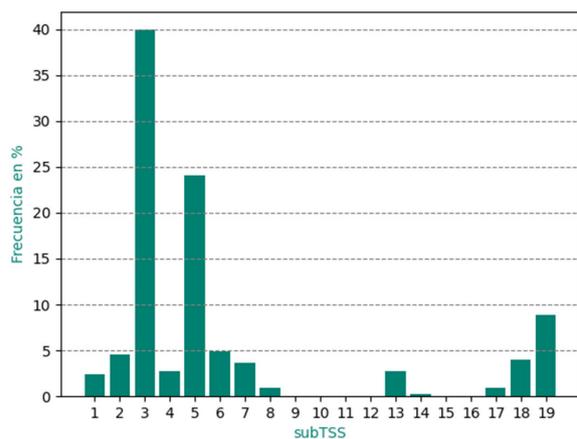


Figura 3. Comportamiento anual de los subTSS en el periodo de estudio (mayo de 2020 a abril de 2021). (Fuente: Elaboración propia)

Los subTSS que no se manifestaron fueron el (9, 10, 11, 12) de tipo VI (Bajas extratropicales) y los subtipos 15 (Sistema frontal cuasi-estacionario) y 16 (Sistema frontal en disipación), hecho que se diferencia de lo encontrado por Soler (Soler *et al.*, 2020). Esto se debe a que este tipo de sistemas, poseen baja frecuencia y al ser la etapa de la presente investigación de un año, menor que el plazo escogido por Soler (Soler *et al.*, 2020), que abarcó cincuenta años, hace indicar que la ausencia de dichos sistemas se ocasionó debido al alcance del periodo estudiado.

En la **figura 5** se muestra el comportamiento por meses de los subTSS estudiados. Se observa las diferencias estacionales que marcan a la región oriental del país. En los meses de tránsito de invierno a verano (mayo-junio), comenzaron a manifestarse los subtipos propios del PLL, subtipo 4 (Flujo extendido en el sector divergente de ondas), 6 (Influencia de un ciclón tropical) y 7 (Ondas y hondonadas del Este). Por otro lado, también exhibe la marcada transición de verano a invierno, y la pronunciación de los subtipos típicos de la temporada invernal o periodo PPLL, como es el caso de los subtipos 13 (Frente frío clásico), 14 (Frente frío reversino), 18 (Anticiclón migratorio en proceso de transformación) y 19 (Anticiclón migratorio en avanzado estado de transformación).

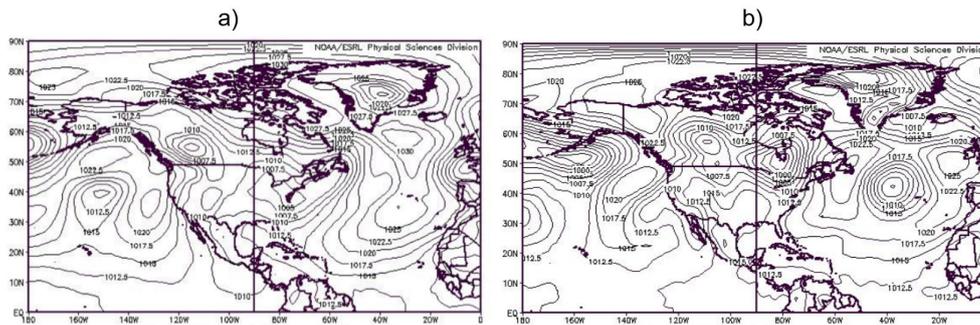


Figura 4. Representación del subtipo 3 (a) y 5 (b) en un mapa de superficie. Fuente: (Soler et al., 2020)

Descripción del periodo lluvioso (mayo-octubre 2020)

En la figura 6 se observa el comportamiento de los subTSS durante el PLL (mayo-octubre 2020), en el cual se presentaron nueve de los trece manifestados en todo el año: El anticiclón subtropical con flujo del segundo cuadrante (subTSS 2); Flujo anticiclónico extendido no perturbado (subTSS 3); Flujo extendido en el sector divergente de ondas (subTSS 4); Débil gradiente barométrico (subTSS 5); Influencia de un ciclón tropical (subTSS 6); Ondas y hondonadas del Este (subTSS 7); Convergencia y hondonadas del Oeste (subTSS 8); Anticiclón migratorio en proceso de transformación (subTSS 18); Anticiclón migratorio en avanzado estado de transformación (subTSS 19).

Como se puede apreciar, el subtipo 3 es el que más predominio mostró en dicho periodo, con una frecuencia de 54.8% de los días estudiados en esta temporada. Los demás subtipos tuvieron una frecuencia muy baja.

Descripción del periodo poco lluvioso (noviembre de 2020 a abril 2021)

En la figura 7 se observa el comportamiento de los subTSS durante el PPLL (noviembre de 2020-abril 2021), en el cual se presentaron doce de los trece manifestados en todo el año: Anticiclón subtropical con flujo del primer cuadrante (subTSS 1); El Anticiclón subtropical con flujo del segundo cuadrante (subTSS 2); Flujo anticiclónico extendido no perturbado (subTSS 3); Flujo extendido en el sector divergente de ondas (subTSS 4); Débil gradiente barométrico (subTSS 5); Influencia de un ciclón tropical (subTSS 6); Convergencia y hondonadas del Oeste (subTSS 8); Frente frío clásico (subTSS 13); Frente frío reversino (subTSS 14); Anticiclón continental migratorio (subTSS 17); Anticiclón migratorio en proceso de transformación (subTSS 18); Anticiclón migratorio en avanzado estado de transformación (subTSS 19). Nuevamente, el subtipo 3, fue el más predominante, con 25.7%.

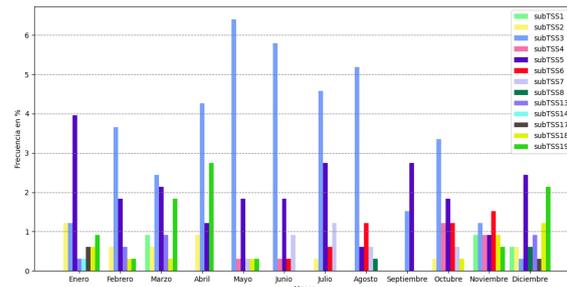


Figura 5. Comportamiento anual de los subTSS en el periodo de estudio (mayo de 2020-abril de 2021)

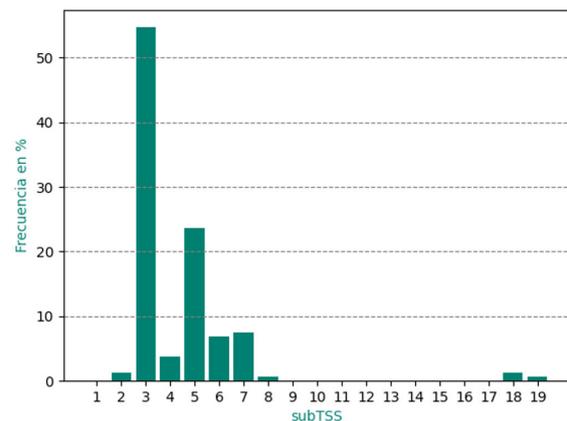


Figura 6. Comportamiento de los subtipos de TSS en el periodo lluvioso (mayo-octubre 2020)

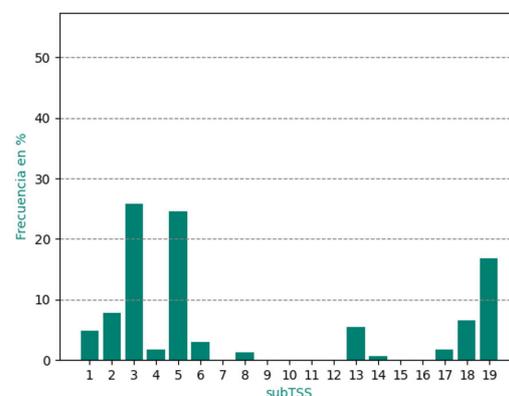


Figura 7. Comportamiento de los subTSS en el periodo poco lluvioso (noviembre de 2020-abril 2021)

Comportamiento del pronóstico de rapidez del viento en el periodo de mayo de 2020-abril 2021 mediante el análisis del EMA

Atendiendo a los valores del EMA encontrados y al interés de que este sea el menor posible, se decidió hacer una distribución de los mismos en ocho intervalos de 0.5 m/s, el cual se consideró un valor de error de pronóstico de rapidez del viento muy bajo, debido a la dependencia del cubo de la rapidez del viento con la potencia del aerogenerador. El resultado se muestra en la **figura 8**, donde se observa que en el primer intervalo no se encontró ningún pronóstico de rapidez del viento cuyo valor del EMA fuera menor que 0.5 m/s. La mayor cantidad de casos se presentó en el intervalo de 1.5 a 2 m/s, con un 30% aproximadamente, y luego en el intervalo de 1 a 1.5 m/s con 23% aproximadamente.

Se decidió entonces realizar una nueva distribución de los casos del EMA en cuatro intervalos de 1 m/s, de manera de buscar una mejor reagrupación del mismo, encontrándose lo mostrado en la **figura 9**. Esta nueva distribución permitió establecer una clasificación del pronóstico basado en los valores del EMA en cada intervalo, definiéndose como **muy bueno** para el intervalo entre 0 y 1 m/s, **bueno** entre 1 y 2 m/s, **regular** entre 2 y 3 m/s y **malo** cuando el EMA supera los 3 m/s.

La **figura 9** ilustra que los pronósticos de los casos estudiados se clasificaron de **muy buenos** el 7.3%; **buenos** el 53%; **regulares** el 29.6%, y 10.1% de los casos se clasificó como **malos**.

De manera más detallada, entre los pronósticos que resultaron **muy buenos** y **buenos** se obtuvo más del 60%, cifra que resulta muy significativa. Sin embargo, poco menos del 40% de los pronósticos restantes, se clasificó entre **regular** y **malo**, lo cual representó un porcentaje nada despreciable y centró el análisis sobre la relación o vínculo de cada subTSS con el pronóstico clasificado (**figura 10**).

Como se puede observar, en el primer intervalo (**muy bueno**) se hallaron nueve de los subTSS encontrados durante el periodo de estudio, siendo el subtipo 3 el que alcanzó mayor frecuencia con 2.4% del 7.3% hallado, mientras que el subtipo 5 representó un 2.1%.

En el segundo intervalo (**bueno**) se presentaron doce subTSS, siendo nuevamente el subtipo 3 el que alcanzó mayor predominio con el 18.9% del 53% hallado, mientras que el subtipo 5 representó el 16.5%.

En el tercer intervalo (**regular**) se manifestaron nueve de los subTSS, de los cuales reiteradamente el subtipo 3 tuvo la mayor frecuencia, siendo de 15.5% del 29.6% encontrado.

Por último, en el cuarto intervalo (**malo**) se presentaron nueve de los subTSS, resaltando el subtipo 3 con una frecuencia del 3%, aunque menor que en los intervalos anteriores.

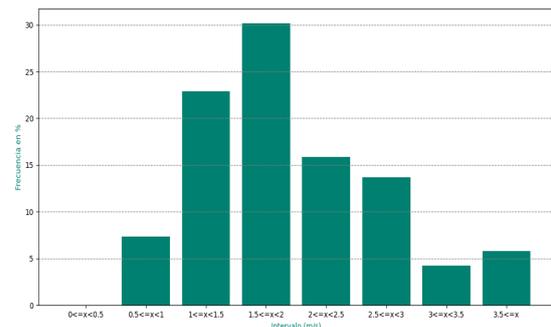


Figura 8. Frecuencia del estadígrafo EMA en 8 intervalos definidos para el PEGI

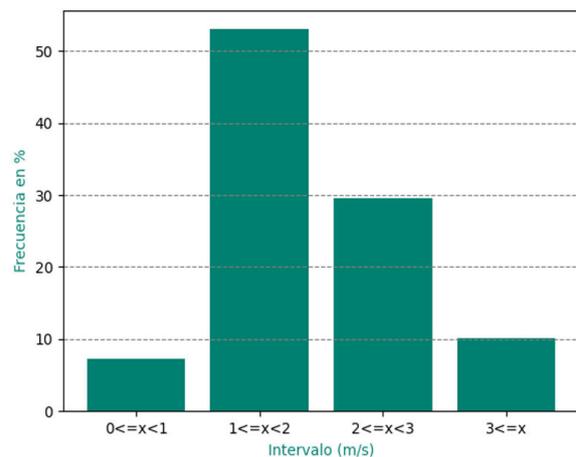


Figura 9. Frecuencia del estadígrafo EMA en 4 intervalos definidos para el PEGI

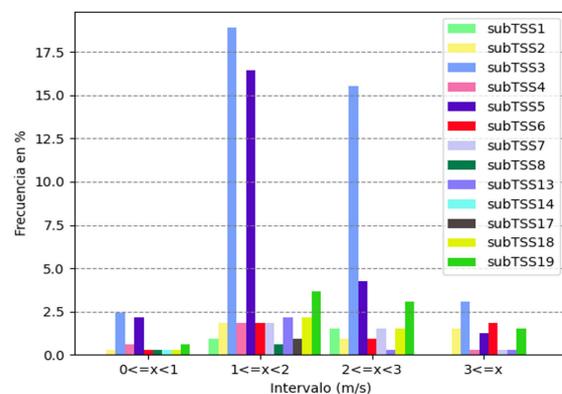


Figura 10. Frecuencia del estadígrafo EMA asociado a los subTSS en 4 intervalos

De todos los subtipos presentados durante el periodo analizado, los subtipos 8 (Convergencia y hondonadas del oeste), 14 (Frente Frio revésino) y 17 (Anticiclón continental migratorio), no mostraron valores del EMA en el rango de **regular** y **malo**. Si a ello se le agrega que los subtipos 1 (Anticiclón subtropical con flujo del primer cuadrante) y 18 (Anticiclón migratorio en proceso de transformación), el EMA nunca fue clasificado de **malo**, hace indicar el buen desenvolvimiento por parte del SisPI para representar

estos subTSS, no obstante, sus bajas frecuencias de ocurrencia.

Análisis de la asociación del EMA y los subTSS en el Periodo Lluvioso (PLL) y Poco Lluvioso (PPLL)

Periodo Lluvioso (PLL)

La figura 11 muestra la distribución de frecuencia del EMA para el PLL de mayo-octubre del 2020 en la región de estudio. La misma presentó una distribución similar a lo encontrado para el caso anual, siendo el intervalo **Bueno** ($1 \leq x < 2$) el de mayor frecuencia de ocurrencia.

Periodo Poco Lluvioso (PPLL)

La figura 12 muestra como resultó ser la asociación entre el EMA y los subTSS para el PPLL, denotando un comportamiento similar a los analizados hasta el momento, siendo nuevamente los intervalos **muy bueno** y **bueno** donde se agruparon la mayoría de los casos, con porcentajes similares al periodo anterior (mayo-octubre).

Análisis de la asociación de los valores de regular y mal del EMA con los subTSS en el Periodo Lluvioso (PLL) y Poco Lluvioso (PPLL)

Siguiendo con este análisis resultaron de interés los casos entre **regular** y **mal**, que constituyeron el 39.7% de toda la muestra estudiada. Para ello se realizó el estudio teniendo en cuenta los dos periodos estacionales del año en Cuba, a manera de poder conocer si existía alguna relación preferencial entre el comportamiento del EMA y los subTSS en algunos de los dos periodos estacionales.

Los resultados en el periodo PLL y PPLL, se muestran en la figura 13.

Análisis del PLL

En la (figura 13 a) se puede notar que, en el PLL, más del 50% de los casos agrupados con un EMA

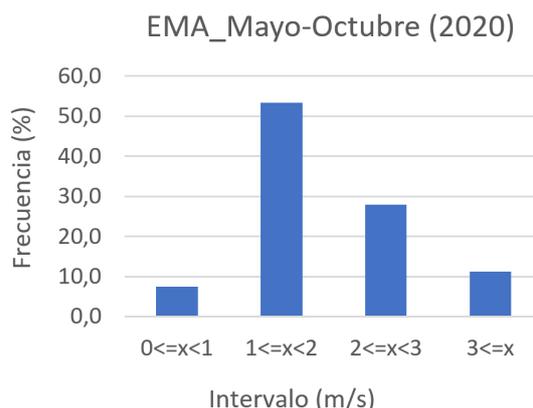


Figura 11. Distribución de Frecuencia del estadígrafo EMA en 4 intervalos definidos para el periodo Lluvioso (mayo - octubre de 2020)

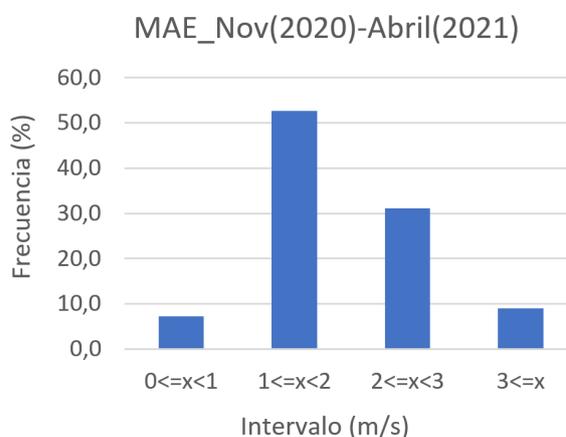


Figura 12. Distribución de Frecuencia del estadígrafo EMA en 4 intervalos definidos para el periodo poco lluvioso (noviembre 2020 - abril de 2021)

entre **regular** y **malo** pertenecen al subtipo 3, casi un 20% al subtipo 5, un 11% al subTSS 6, y los restantes casos a los subtipos (4, 7, 18) con menos del 10%. Resultó llamativo el hecho de que el subtipo 3 siguiera acaparando por mucho los casos donde el EMA fue **regular** o **malo**, al igual que lo hizo en los

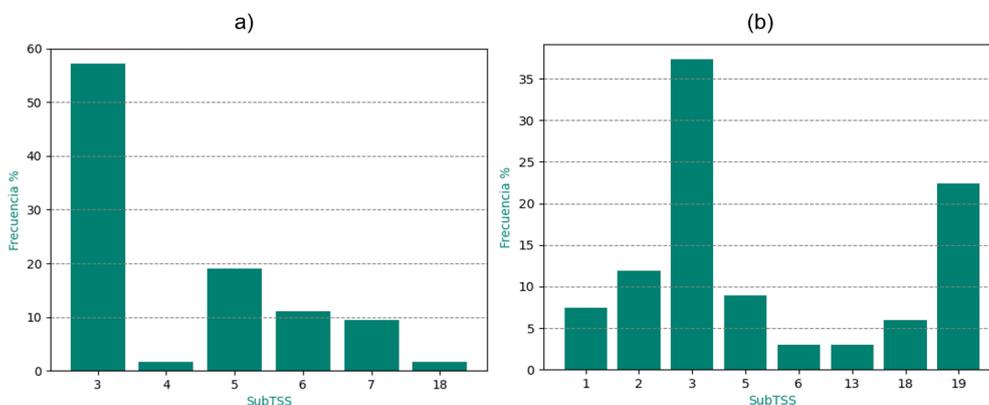


Figura 13. Distribución de Frecuencia de los casos de EMA regulares y malos por subtipos de TSS para el periodo lluvioso (a) y periodo poco lluvioso (b)

intervalos anteriores. Sin embargo, en esta ocasión, pudiera estar relacionado con la tendencia del SisPI a no pronosticar correctamente la posición de la dorsal subtropical, como bien determinó Paula (Paula, 2021), aunque dicha afirmación para este estudio requerirá de nuevos experimentos para corroborarlo.

Análisis del PPLL

Cuando se analizó en el PPLL, el comportamiento del EMA por cada subTSS para los casos de **regular** y **malo** (figura 13 b), pudo apreciarse diferencias importantes con lo encontrado hasta este momento en la investigación. Primeramente, aunque el subtipo 3 sigue predominando entre los casos **regular** y **malo**, su frecuencia disminuyó por debajo del 40%, muy inferior a lo encontrado para el PLL, lo cual parece indicativo de una mejor representación de este subtipo por parte del SisPI en este periodo del año. Sin embargo, el subtipo 19, agrupó más del 20% de los casos en que el EMA fue clasificado como **regular** y **malo**.

A pesar de la baja frecuencia del subTSS 19 en el año de estudio, este subtipo tuvo un elevado porcentaje de casos en el que el pronóstico de rapidez del viento fue clasificado, según el EMA, entre **regular** y **malo**, lo cual indica que debe prestarse atención a este subtipo por parte de los desarrolladores del SisPI y pronosticadores en general.

CONCLUSIONES

1. Los subTSS encontrados en el periodo de estudio no se diferenciaron del comportamiento climatológico encontrado por Soler y colaboradores, a excepción del subtipo 5 (Débil Gradiente Barométrico) y 19 (Anticiclón migratorio en avanzado estado de transformación) quienes tuvieron una frecuencia de ocurrencia superior a lo encontrado climatológicamente, lo que no determinó en los resultados alcanzados.
2. Los valores del EMA determinados en todo el periodo analizado no sobrepasaron los 8 m/s. Esto permitió hacer un reagrupamiento de los mismos y establecer una clasificación cualitativa del pronóstico de rapidez del viento en **muy bueno**, **bueno**, **regular** y **malo** en correspondencia con su posible impacto en el pronóstico de la potencia eólica del parque. Con esta clasificación se obtuvo que, en poco más del 60% los pronósticos de rapidez del viento fueron catalogados de **muy bueno** o **bueno**, aproximadamente 30% de **regular** y el 10% de **malo**, lo cual es un reflejo de la buena representación de la mayoría de los TSS por parte del SisPI.
3. El análisis de los casos de **regular** y **malo** para ambos periodos estacionales arrojó resultados bien diferentes, destacando el subtipo 3 (Flujo anticiclónico extendido no perturbado) que en el periodo mayo-octubre, representó más del 50 % de los ca-

sos y en noviembre-abril, poco más del 35%, siendo un reflejo de la mejora por parte del SisPI para pronosticar este subtipo en el PPLL. El subtipo 19 fue el sistema que peores resultados alcanzó, pues en más del 50% de los días en que estuvo presente, el pronóstico de rapidez del viento fue catalogado de **regular** y **malo**. Los demás subtipos que dieron **regular** o **malo**, presentaron menos del 10% de frecuencia de ocurrencia.

RECOMENDACIONES

1. Poner en manos de los desarrolladores de SisPI los resultados de esta investigación, así como de los pronosticadores del tiempo en general.
2. Profundizar en la relación entre los TSS y los errores de pronósticos, utilizando otros estadígrafos y la realización de nuevos experimentos.
3. Incorporar al pronóstico de rapidez del viento, el TSS bajo el cual se determina.
4. Extender el estudio al parque eólico Gibara II.

BIBLIOGRAFÍA

- Appice, A.; Pravilovic, S.; Lanza, A. & Malerba, D. 2015. *Very Short-Term Wind Speed Forecasting Using Spatio-Temporal Lazy Learning*.
- Carpinone, A.; Giorgio, M.; Langella, R. & Testa, A. 2015. "Markov chain modeling for very-short-term wind power forecasting". *Electric Power Systems Research.*, 122, 152-158.
- Carrasco, M.; Roque, A. & Sánchez, O. 2011. "Local Breeze Effects on the Wind Energy Generation in the Northern Coast of Cuba". *Wind Engineering*.
- Fernández, A. & Díaz, Y. 2003. "Catálogo de los procesos sinópticos en el Archipiélago cubano". *X Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología*.
- Filik, T. 2016. "Improved Spatio-Temporal Linear Models for Very Short-Term Wind Speed Forecasting". *Energies*, 168.
- Giebel, M.; Brownsword, R.; Kariniotakis, G.; Denhard, M. & Craxl, C. 2011. *The State-Of-The-Art in Short-Term Prediction of Wind Power*. A Literature Overview, 2nd Edition G. Advanced Tools for the Management of Electricity Grids with Large-Scale Wind Generation. *ANEMOS Project*, Specific Targeted Research Project Contract N°: 038692.
- GWEC. 2022. *Global Wind Report 2021*. Available: <www.gwec.net> [Consulted: February, 24, 2023].
- Jiang, Y.; Song, Z. & Kusiak, A. 2013. "Very short - term wind speed forecasting with Bayesian structural break model". *Renewable Energy*, 50, 637-647.
- Li, Q.; Hammerschmidt, C.; Pellegrino, G. & Verwer, S. 2016. *Short-term Time Series Forecasting with Regression Automata*. KDD '16 August 13-17. San Francisco, California, USA.

- Martínez, B. & Roque, A. 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, ene - jun. pp. 49 - 61, 2015.
- Martínez, B. & Roque, A. 2019. "Pronóstico energético a muy corto plazo para el Parque Eólico Gibara I utilizando un modelo autorregresivo". *Revista Cubana De Meteorología*, 25(2).
- Matos, F.; Batista, L. & Pérez, A. 2008. "Modelo Simple para la Predicción de la Generación Eólica (MOSIMPRE) utilizando los Procesos Sinópticos Objetivos (PSOs)". Aplicación al Parque Eólico Demostrativo de Turiguanó, Ciego de Ávila, Cuba. *Revista EcoSolar* (26): oct.-dic., 2008.
- Patiño, D. 2022. *Comportamiento del Error Medio Absoluto del pronóstico a corto plazo de la rapidez del viento en el parque eólico Gibara I en dependencia del TSS influyente*. Tesis presentada en opción al título de Licenciatura en Meteorología, La Habana, Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, 63 pp.
- Paula, J. 2021. *Representación del anticiclón subtropical del Atlántico norte por el SisPI y su influencia en la precisión de los pronósticos numéricos*. Tesis presentada en opción al título de Licenciatura en Meteorología, La Habana, Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, 77 pp.
- Perdigón, J. & Rodríguez, G. 2011. *Condiciones sinópticas más favorables para el aprovechamiento de la energía eólica en Cuba*. Tesis presentada en opción al título de licenciadas en Meteorología, La Habana, Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, 385pp.
- Roque, A. 2015. *Estudio comparativo de estaciones de prospección eólica, con respecto a la torre de referencia meteorológica de El Ramón, en Holguín*.
- Roque, A.; Borrajero, I.; Hernández, A. & Sierra, M. 2015a. *Pronóstico energético a corto plazo para los parques eólicos de Gibara I y Los Canarreos*. Informe Científico Técnico de proyecto "Elaboración de pronósticos energéticos a muy corto plazo para parques eólicos". *Revista Cubana de Meteorología*. La Habana.
- Roque, A.; Carrasco, M. & Reyes, P. 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), 189-200pp.
- Roque, A.; Ferrer, A.; Sierra, M. & Borrajero, I. 2022. "Pronóstico numérico a corto plazo de la rapidez del viento para los parques eólicos de Gibara I y II". *Revista Cubana De Meteorología*, 28(2).
- Roque, A.; Hernández, A.; Borrajero, I.; Sierra, M. & Valdéz, A. 2016. "Pronóstico de viento a corto plazo utilizando el modelo WRF en tres regiones de interés para el Programa Eólico Cubano". *Revista Cubana De Meteorología*, 22(2), 164-187.
- Roque, A.; Sierra, M.; Borrajero, I. & Ferrer, A. 2015b. *Pronóstico de viento a corto plazo en torres de referencia meteorológica para el programa eólico cubano*. Informe Científico Técnico de proyecto "Elaboración de pronósticos energéticos a muy corto plazo para parques eólicos". La Habana.
- Sapronova, A.; Meissner, C. & Mana. 2015. *Short-time ahead wind power production forecast*. Proyecto ENERGIX 2015-2016. Available: <https://windeurope.org/summit2016/conference/submit-anabstract/pdf/246989398891.pdf> [Available: February, 24, 2023].
- Senkal, S. & Ozgonenel, O. 2013. "Performance Analysis of Artificial and Wavelet Neural Networks for Short Term Wind Speed Prediction". *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, 2013. 196-198 pp. doi: [10.1109/ELECO.2013.6713830](https://doi.org/10.1109/ELECO.2013.6713830).
- Sierra, M.; Borrajero, I.; Ferrer, A.; Morfa, Y.; Morejón, Y. & Hinojosa, M. 2017. *Estudios de sensibilidad del SisPI a cambios de la PBL, la cantidad de niveles verticales y las parametrizaciones de microfísica y cúmulos a muy alta resolución*. La Habana: Centro de Física de la Atmósfera, INSMET.
- Soler, E.; Lecha, L.; Sánchez, L. & Naranjo, Y. 2020. *Catálogo de los tipos de situaciones sinópticas que influyen sobre Cuba*. Nueva Gerona, Isla de la Juventud: Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud, INSMET.
- Veloz, G. 2022. *Propósito claro: "Generar electricidad porque el país lo necesita"*. *Revista Granma*.
- Xiaodan, W.; Wenying, L.; Ningbo, W & Yanhong, M. 2013. "Short-term wind power prediction based on time series análisis model". *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013)*.

Conflicto de intereses: Los autores del artículo científico, declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Concepción de la idea: Alfredo E. Roque Rodríguez, Dayanis M. Patiño Avila.

Análisis de los datos: Dayanis M. Patiño Avila, Alfredo E. Roque Rodríguez, Edgardo Soler Torres.

Investigación: Dayanis M. Patiño Avila, Alfredo E. Roque Rodríguez, Edgardo Soler Torres. **Supervisión:**

Alfredo E. Roque Rodríguez. **Validación de los resultados:** Dayanis M. Patiño Avila, Alfredo E. Roque

Rodríguez, Edgardo Soler Torres.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)