



APLICACIÓN DE LA COMPUTACION

Procedimiento para diseñar el muestreo eólico en una región promisoría. Parte II. Implementación y aplicación

Procedure to design sampling of the wind speed in a promissory region. Part II. Implementation and application

Eduardo–Terrero Matos
Arístides Alejandro –Legrá Lobaina
Joel –Carcassés Carcassés

Recibido: febrero de 2014

Aprobado: diciembre de 2014

Resumen/ Abstract

En la Parte I de este artículo fue establecido el algoritmo general de un procedimiento para el diseño del muestreo de la velocidad del viento cuyos resultados tengan la capacidad de minimizar el error probable medio durante una estimación del comportamiento espacio-temporal de la velocidad del viento. En la Parte II se describe el algoritmo de selección de puntos de muestreo y el algoritmo para el cálculo del error probable de estimación. El procedimiento para diseñar las redes de muestreo eólico es implementado en una aplicación informática que facilita la aplicación del procedimiento a la selección de los puntos donde se ubicarán las torres anemométricas en una región promisoría del municipio Moa en la Provincia Holguín, Cuba. Los resultados obtenidos son comparados con el diseño obtenido en el año 2007 por la Empresa de Ingeniería y Proyectos de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas de la República de Cuba.

Palabras clave: estimación del potencial de energía eólica, muestreo de la velocidad del viento, rugosidad, topografía, velocidad del viento.

In Part I of this article was established the general algorithm of a procedure for the sampling design of the wind speed and the results have the ability to minimize the average probable error for an estimate of the conduct spatiotemporal wind speed. In Part II the selection algorithm of sampling points and the algorithm for calculating the probable error estimation is described. The procedure for the sampling design is implemented in a computer software that facilitates the application from the procedure to the selection of the points where the anemometer towers will be located in a promissory region of the municipality Moa in the province Holguín, Cuba. The results are compared with the design obtained in 2007 by the Empresa de Ingeniería y Proyectos de Electricidad of the Ministry of Energy and Mines of the Republic of Cuba.

Keywords: estimate the potential of wind energy, roughness, sampling wind speed, topography, wind speed.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento profundo del potencial energético del viento en una región promisoría depende en buena medida de la calidad de las mediciones de su velocidad que son obtenidas mediante una conveniente selección e instalación de torres con anemómetros [1,2]. El diseño del muestreo eólico consiste fundamentalmente en seleccionar los puntos de ubicación de las torres de muestreo de manera que los datos que se obtengan sean de la mayor utilidad posible durante la tarea de caracterización de la velocidad y el potencial de energía eólica en la región que se estudia [3].

En la primera parte de este artículo se ha propuesto un procedimiento para el diseño del muestreo eólico basado en:

- El principio de minimizar el error probable promedio durante cualquier estimación del comportamiento de la velocidad del viento
- Una adecuada caracterización del contexto fenomenológico en que se manifiesta el viento en un área geográfica.

La esencia de la propuesta ha sido un algoritmo matemático que tiene en cuenta las regularidades del comportamiento del viento y el manejo de un conjunto de parámetros que permiten incluir las necesidades y criterios de los expertos que desarrollen la tarea.

El objetivo del presente trabajo es describir la implementación computacional del procedimiento y aplicarla a un caso de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Implementación del procedimiento

Para implementar el procedimiento es necesario establecer un nuevo algoritmo que despliegue las acciones para ejecutar la Instrucción Seleccionadora del algoritmo general descrito en la figura 7, de la Parte I del presente artículo. Con este fin se propone el denominado Algoritmo de Selección, que se ilustra en la figura 1, cuyo objetivo es seleccionar los nuevos puntos del conjunto PMS (Puntos de Muestreo Seleccionados).

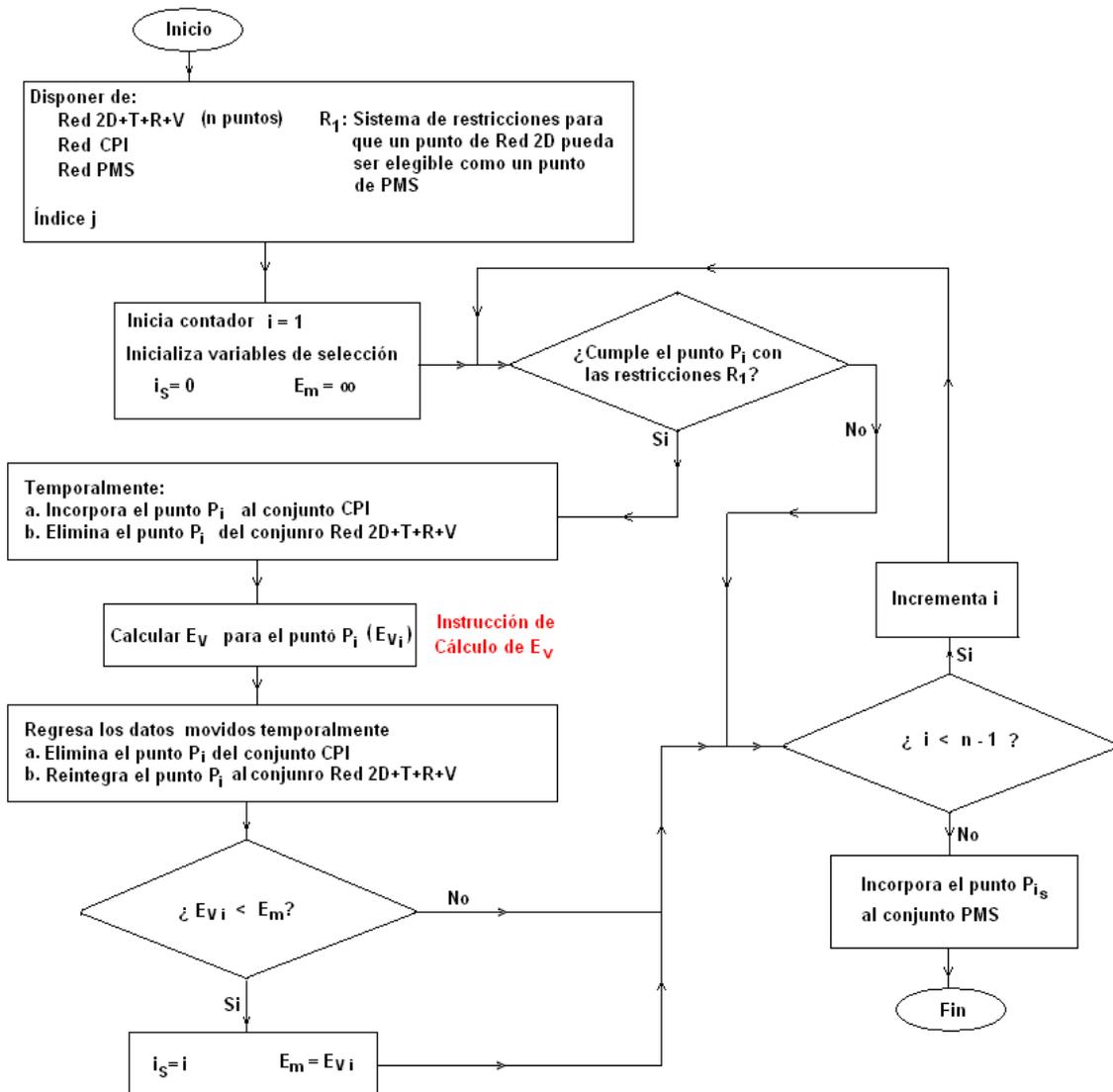


Fig.1. Algoritmo de Selección. Su objetivo es seleccionar en la Red 2D los nuevos puntos del conjunto PMS.

Para implementar el Algoritmo de Selección es necesario establecer otro algoritmo que despliegue las acciones para ejecutar la Instrucción de Cálculo de E_V descrito en la figura 1. Entonces se propone un Algoritmo de Cálculo de E_V , que se ilustra en la figura 2, cuyo objetivo es calcular el error probable de estimación. Para el cálculo de los errores se utilizan las ecuaciones (6-20) descritas en la Parte I del presente artículo.

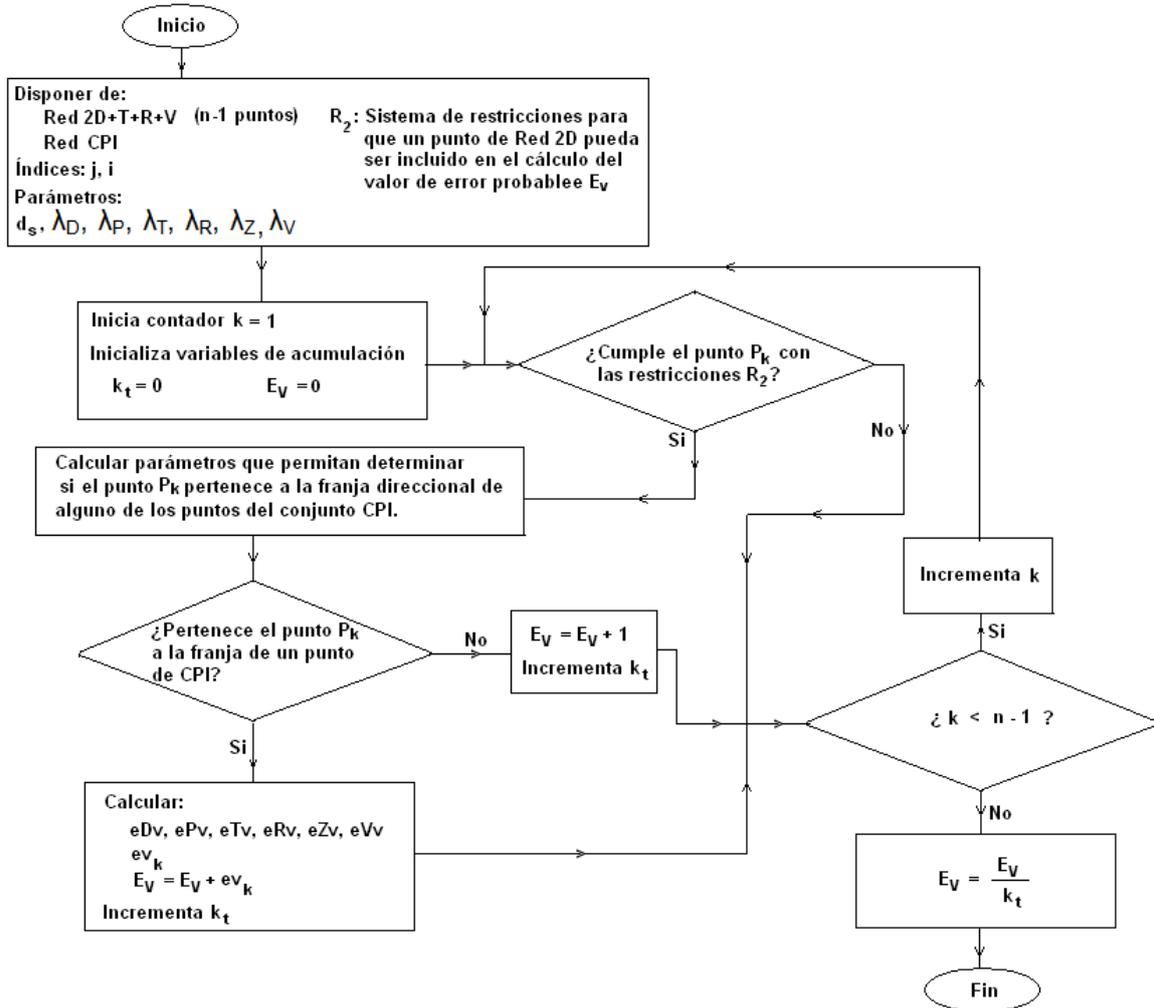


Fig. 2. Algoritmo de Cálculo de E_V . Su objetivo es obtener el valor del error probable promedio para un conjunto de puntos influyentes CPI (unión de RTV y PMS).

Estos algoritmos han sido programados en una aplicación informática o software (denominado Eólica), desarrollado en el Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM) de la Facultad de Metalurgia y Electromecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM). En el software fue implementado el siguiente conjunto de restricciones R_1 para que un punto de Red 2D sea elegible como punto de muestreo:

- R₁₁: No pertenecer a la franja de otro punto de CPI.
- R₁₂: Pertenecer al área limitada por cierta frontera F_c definida por el usuario.
- R₁₃: No tener obstáculos topográficos en la dirección barlovento.
- R₁₄: Tener rugosidad menor o igual que 0,3.
- R₁₅: La distancia hasta la recta direccional de la franja de otro punto de CPI no ser mayor que un valor d_p dado.
- R₁₆: La velocidad del viento debe estar por debajo del valor $V = V_{min} + P_v (V_{max} - V_{min})$, donde V_{min} es la velocidad mínima del viento en la región; V_{max} es la velocidad máxima; y P_v es un número entre 0 y 1. Esta restricción evita la selección de puntos donde el viento sea poco representativo por su alta velocidad.
- R₁₇: La cota del terreno estar por encima del valor $Z = Z_{min} + P_z (Z_{max} - Z_{min})$, donde Z_{min} es la cota mínima topográfica en la región; Z_{max} es la cota máxima; y P_z es un número entre 0 y 1. Esta restricción propicia la selección de puntos donde la cota sea alta.

El investigador puede configurar en los controles de la aplicación Eólica la exigencia individual de cumplimiento de cada una de estas restricciones si así lo considera pertinente.

De manera análoga se definieron y programaron dos restricciones que conforman el conjunto R_2 :

- R₂₁: En la franjas solo se adicionan punto que pertenezcan al área limitada por la frontera F_c .
- R₂₂: Solo pueden agregarse puntos a sotavento del punto de CPI o, también pueden ser agregados puntos a barlovento.

Aplicación del procedimiento

El software Eólica fue aplicado al área de estudio promisorio que se encuentra enmarcada en el Sector Playa La Vaca de la región de Moa, Holguín, Cuba, ubicado al Este del poblado de Centeno y al Oeste de la Ciudad de Moa; extendiéndose de Norte a Sur desde el límite de la costa y todo el litoral costero hasta la carretera que une los municipios Sagua y Moa, abarcando un área aproximada de 30 Km² [4,5]. Según el sistema de coordenadas Lambert el área se encuentra enmarcada entre los puntos: X (690 000; 696 000) y Y(228 000; 222 000) tal como se muestra en la figura 3.

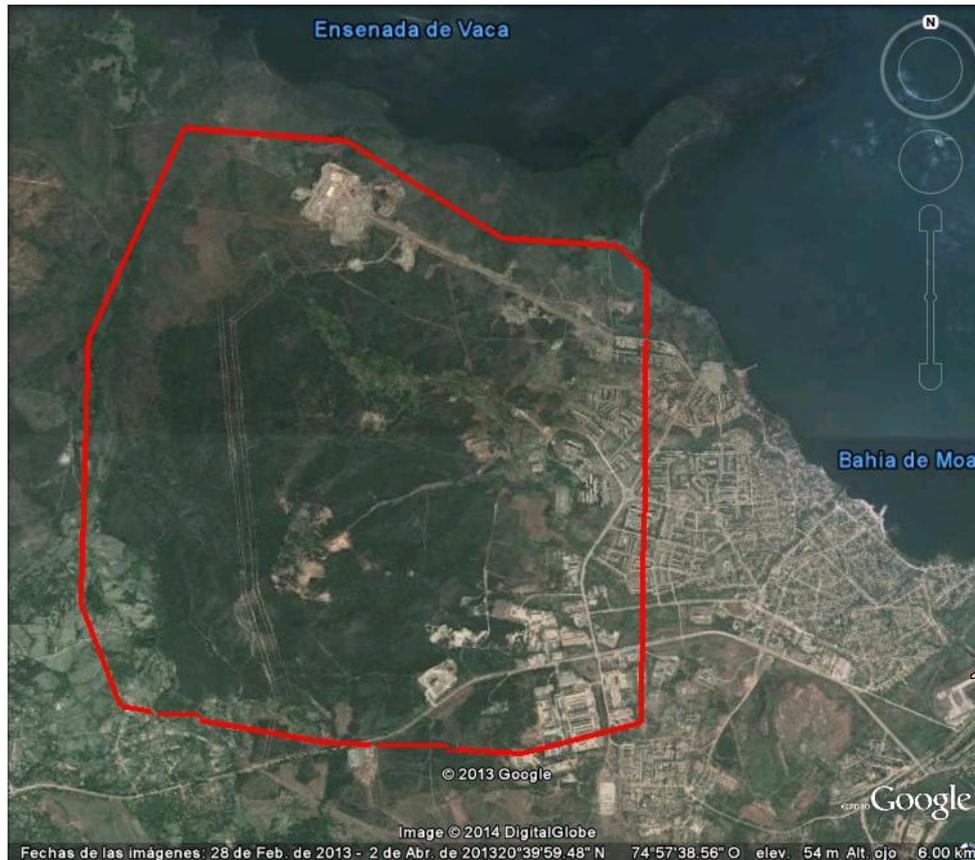


Fig. 3. Foto satelital donde es señalada la región promisorio (Fuente: Google Earth). El área de estudio está enmarcada por la curva cerrada en rojo.

Sobre esta área fue definida la Red 2D tal como se muestra en la figura 4, y sobre estos puntos se desarrollaron:

- El modelo topográfico, caracterizado por $\delta X = \delta y = 50$ m, se obtuvo considerando las normas correspondientes [6], a partir del modelo digital de Cuba a escala 1:25000 desarrollado en el año 2007 por la empresa cubana especializada GEOCUBA y disponible para sus usuarios.
- El modelo de rugosidad como resultado de un trabajo de inspección visual de las características de la flora y de los elementos constructivos [7], ubicados en el área R.
- El modelo de velocidad del viento [8,9,10], que se creó tomando como base la imagen del mapa del potencial eólico de la provincia de Holguín [4,5]. La dirección predominante del viento es 60° en referencia a la Rosa de los Vientos.

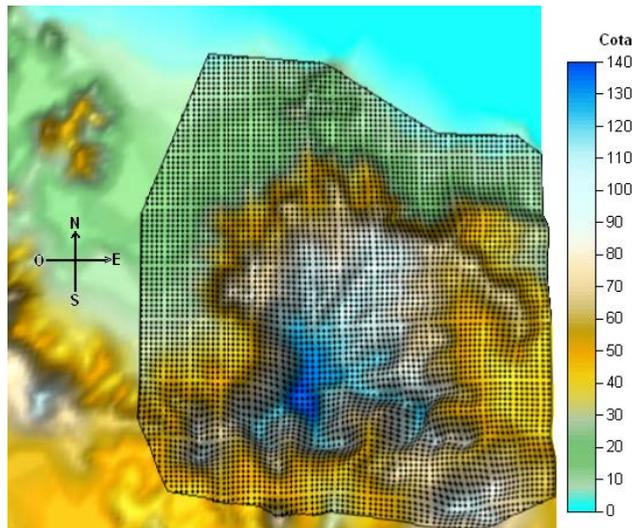


Fig.4. Red 2D sobre la región promisoría R.

En el año 2007 fueron definidos, considerando la topografía y rugosidad del terreno y teniendo en cuenta criterios de expertos de la Empresa de Ingeniería y Proyectos de Electricidad (INEL) de la República de Cuba, cinco puntos de muestreo que se muestran en la figura 5, donde también se muestra la frontera de la zona de muestreo la cual se ha seleccionado a partir del análisis heurístico de los modelos topográfico, de velocidad del viento y de rugosidad y con el criterio de seleccionar las zonas de mejores perspectivas de aprovechamiento del potencial eólico.

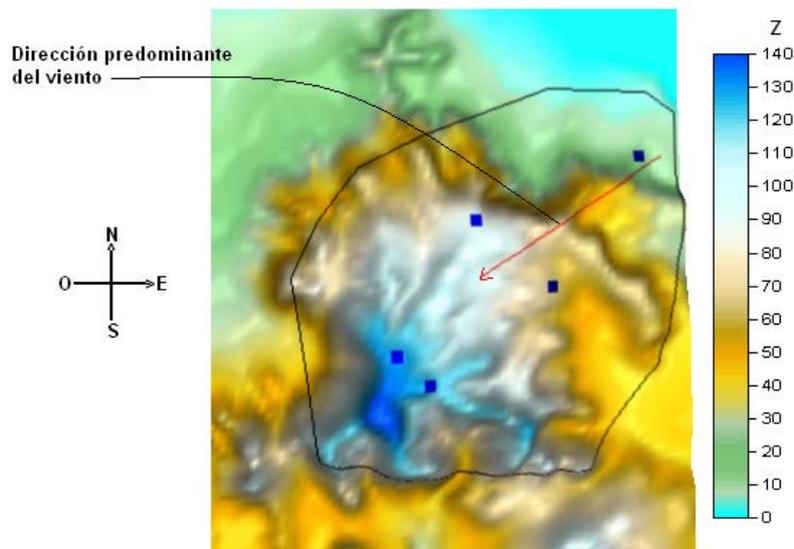


Fig.5. Puntos seleccionados para el muestreo en el año 2007.

Las coordenadas espaciales de esta selección del 2007 se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas puntos de muestreo seleccionados en el 2007.			
No	Este(m)	Norte(m)	Cota(m)
1	695770,252	225503,133	13,40
2	694011,269	223867,099	128
3	693772,668	224069,631	130
4	694993,471	224529,301	65
5	694382,708	225008,761	90

Para ese muestreo el valor correspondiente de $E_v=0,7593$ se ha calculado mediante las ecuaciones 6-19 de la Parte I del presente artículo, y asumiendo que: los cinco puntos conforman el conjunto CPI y todos los parámetros positivos

de ponderación son igual a 1. Los valores de cada error en particular son: $eD_V=0,6813$; $eP_V=0,7630$; $eT_V=0,8198$; $eR_V=0,5800$; $eZ_V=0,7553$; $eV_V=0,9565$.

El proceso propuesto para determinar en este caso de estudio los mejores puntos de muestreo, siguiendo las tendencias de la solución propuesta por INEL

En el 2007, está estructurado en tres etapas: determinar puntos cercanos a barlovento de la región; determinar puntos situados en la zona de cotas medias; y situar puntos en los puntos de mayor altura.

Para la primera etapa se asumió que $RTV=\emptyset$ y se tomaron los parámetros descritos en la tabla 2 y las restricciones descritas en la tabla 3.

Tabla 2. Parámetros para la primera etapa.							
$D\alpha$	q	λ_D	λ_P	λ_T	λ_R	λ_Z	λ_V
100 m	6	90	0	5	5	0	0

Tabla 3. Restricciones para la primera etapa.								
R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}	R_{16}	R_{17}	R_{21}	R_{22}
Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si	Si

Los seis puntos obtenidos tienen las características que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la primera etapa de selección de los puntos de muestreo.				
E (m)	N (m)	Z (m)	V (m/s)	R
696050	225500	8,84	6,8	0,13
696050	225250	11,99	6,8	0,13
696050	225750	6,69	6,8	0,13
696050	225050	30	6,8	0,13
695900	225950	5	6,8	0,13
696050	224800	26,41	6,8	0,13

El análisis visual y experto de los resultados permitió seleccionar, entre los seis puntos propuestos, el primer puntode la tabla tal como se ilustra en la figura 6.

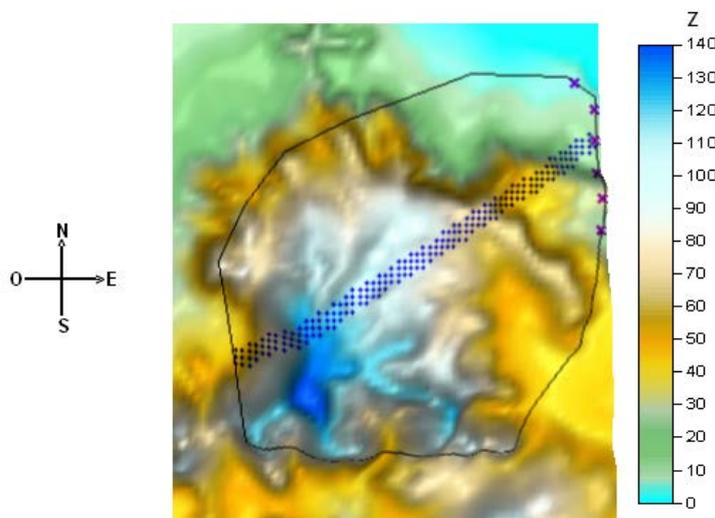


Fig.6. Selección de un punto durante la primera etapa. Se muestra la franja de puntos que lo considera influyente en la dirección predominante del viento.

Para implementar la segunda etapa se asume que RTV contiene al punto seleccionado en la primera etapa. Para obtener ocho posibles puntos se definieron los parámetros descritos en la tabla 5 y las restricciones descritas en la tabla 6.

$D\alpha$	q	λ_D	λ_P	λ_T	λ_R	λ_Z	λ_V
100 m	8	10	0	10	10	70	0

R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}	R_{16}	R_{17}	R_{21}	R_{22}
Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si	Si

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.

E (m)	N (m)	Z (m)	V (m/s)	R
695350	224900	56,46	6,2	0,13
696050	225100	30	6,8	0,13
694750	225000	80	6,2	0,22
694450	224000	115	5,6	0,2
695000	224150	69,74	5,6	0,2
694450	225000	90,1	6,2	0,16
695750	224150	60	5,95	0,27
694400	225150	80,11	6,2	0,13

De estos ocho puntos, en este trabajo se han seleccionado dos de ellos (el quinto y el sexto en el orden de la tabla) lo cual se muestra en la figura 7.

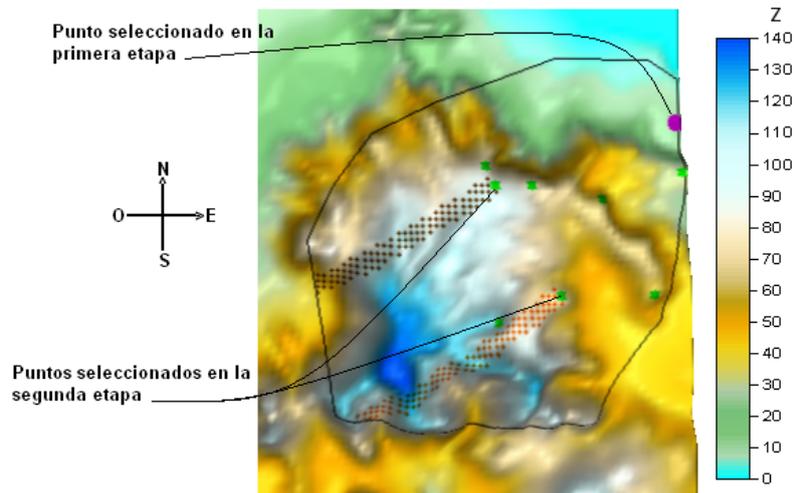


Fig.7. Selección de dos puntos durante la segunda etapa y las franjas de puntos que los consideran respectivamente influyentes. Se muestra también el punto seleccionado en la primera etapa.

Para desarrollar la tercera etapa se asume que RTV contienen a los tres puntos seleccionados en las dos etapas anteriores. Se consideraron, además, los parámetros cuantitativos que se muestran en la tabla 8.

$D\alpha$	q	λ_D	λ_P	λ_T	λ_R	λ_Z	λ_V
200 m	6	10	0	10	10	70	0

Las restricciones para la tercera etapa se configuraron según se expresa en la tabla 9.

R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₂₁	R ₂₂
Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si	No

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 10.

E (m)	N (m)	Z (m)	V (m/s)	R
693650	223650	140	5,6	0,13
693650	223850	136,73	5,6	0,13
693650	224300	123,14	5,6	0,22
694450	223650	120	5,6	0,2
693700	224750	100,25	5,6	0,22
693750	223600	140	5,6	0,13

De los puntos obtenidos fueron seleccionados dos de ellos tal como se muestra en la figura 8.

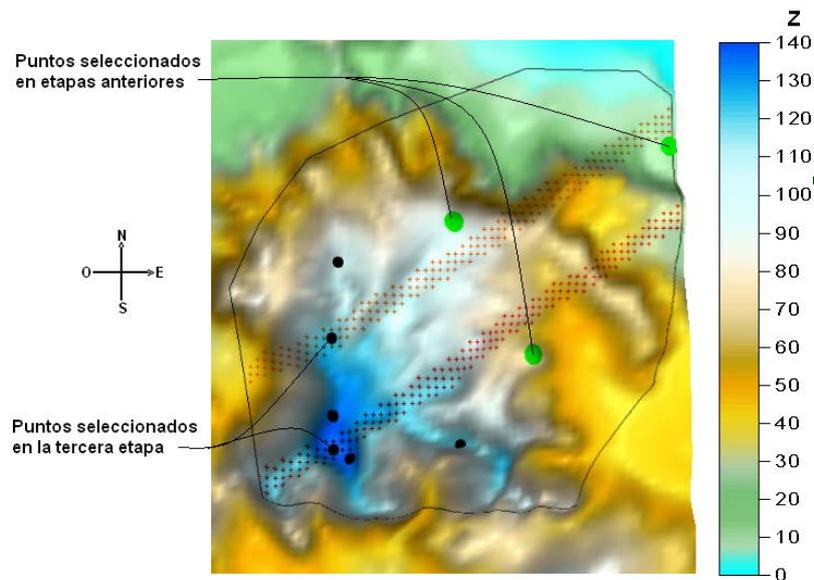


Fig.8. Selección de dos puntos durante la tercera etapa y la franja de puntos de Red 2D que los consideran respectivamente influentes. Se muestran también los puntos seleccionados en las etapas anteriores.

El valor de E_V para la propuesta de puntos de muestreo y asumiendo que todos los parámetros positivos de ponderación son igual a 1, es 0,7374. Los valores de cada componente del error son: $e_{D_V}=0,6692$; $e_{P_V}=0,7478$; $e_{T_V}=0,7885$; $e_{R_V}=0,5522$; $e_{Z_V}=0,7138$; $e_{V_V}=0,9539$.

Tal como se muestra en la tabla 11, la diferencia entre ambos resultados es solo de un 2,19 %. Nótese que para todos los componentes considerados para calcular el error probable de una estimación, la propuesta de la presente investigación está cercana pero por encima de la propuesta del 2007. Este resultado indica que ambas propuestas son válidas y que, más que la diferencia entre ellas, lo más notoriamente significativo es el procedimiento propuesto (cuya esencia es un algoritmo matemático) que tiene en cuenta las regularidades del comportamiento del viento y un conjunto de parámetros y restricciones cuyo manejo permite incluir las necesidades y criterios expertos de quienes lo usan.

Tabla 11. Comparación entre las componentes considerados para calcular el error probable de una estimación para la propuesta del 2007 (INEL) y para la propuesta del presente trabajo.

Componentes →	eDv	ePv	eTv	eRv	eZv	eVv	Ev
Selección año 2007	0,6813	0,7630	0,8198	0,5800	0,7553	0,9565	0,7593
Selección propuesta	0,6692	0,7478	0,7885	0,5522	0,7138	0,9539	0,7374
Diferencia porcentual %	1,21	1,52	3,13	2,78	4,15	0,26	2,19

En la figura 9, puede observarse una vista tridimensional desde barlovento (en referencia a la velocidad predominante del viento), de la selección de puntos de muestreo que se propone en este trabajo para la región promisoría estudiada.

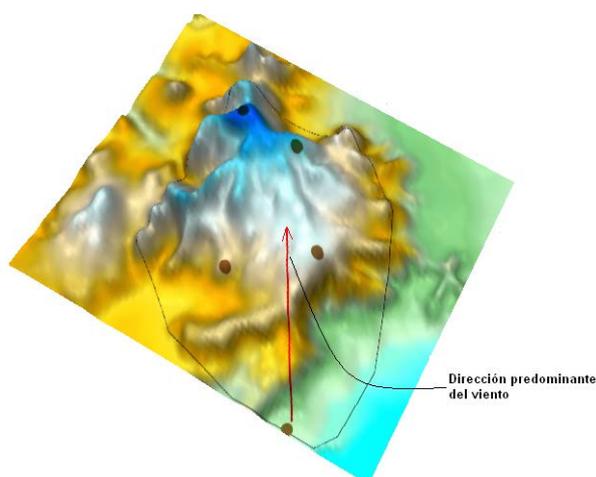


Fig.9. Vista 3D de la propuesta de cinco puntos de muestreo a partir de la aplicación del procedimiento propuesto.

CONCLUSIONES

En esta Parte II del artículo se establecen el Algoritmo de Selección y el Algoritmo de Cálculo de E_v que completan, (junto al Algoritmo General descrito en la Parte I) el sistema algorítmico, que formaliza las instrucciones del procedimiento para diseñar el muestreo eólico en una región promisoría. Como se ha argumentado, este procedimiento y su implementación computacional brindan una amplia gama de opciones para que los decisores puedan seleccionar las mejores alternativas, amparados por sus conocimientos y por los resultados de estos cálculos que tienen en cuenta las regularidades del comportamiento del viento y las características de la región de estudio.

El procedimiento es práctico y se ha mostrado una aplicación coherente y con resultados satisfactorios, al diseño de la ubicación de torres anemométricas en un área promisoría del Sector Playa La Vaca de la región de Moa, Provincia Holguín, República de Cuba. Estos resultados son de interés para establecer los análisis socioeconómicos [11] y medioambientales [12] posteriores.

AGRADECIMIENTOS

Al Lic. Rolando Soltura Morales, Especialista Principal de la Empresa de Ingeniería y Proyectos de Electricidad (INEL) y al M.Sc. Lic. Jorge Proenza Velázquez del Centro Meteorológico Provincia Holguín, Cuba, por sus permanentes apoyo, comprensión y colaboración.

REFERENCIAS

- [1]. ANAGREH, Y.; AHMAD, B., "Renewable energy potential assessment in Jordan". Renewable and Sustainable Energy Review, ELSEVIER, 2011, vol.15, n.5, p. 2232-2239, [consultado: 25 de Julio de 2013], Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000529>, ISSN 1364-0321.

- [2]. AHMED, A; *et al.*, "An assessment of wind energy resource in north central Nigeria, Plateau". Science Journal of Energy Engineering, 2013, vol.1, n.3, p. 13-17, [consultado: 10 de noviembre de 2013], Disponible en: <http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.j.sjee.20130103.11.pdf>, ISSN 2376-8126.
- [3]. ALSAAD, M.A. "Wind energy potential in selected areas of Jordan". Energy Conversion and Management, ELSEVIER, 2013, vol.65, p. 704–708, [consultado: 9 de diciembre del 2013], Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412001379>, ISSN 0196-8904.
- [4]. SOLTURA MORALES, R.; *et al.*, "Primera edición del Mapa de Potencial Eólico de Cuba". [en línea], Ecosolar, 2006, p. 1-12, [consultado: 12 de enero de 2011], Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/ecosolar/revista21.htm>, ISSN 1028-6004.
- [5]. PROENZA VELÁZQUEZ, J.; *et al.*, "Estudio del recurso eólico en la zona costera de la provincia Holguín". [en línea], Revista Ciencias Holguín, 2006, p. 2-6. [consultado: 17 de Junio del 2011], Disponible en: <http://www.ciencias.holguin.cu/index.php/cienciasholguin/article/viewFile/334/208>, ISSN 1027-2127.
- [6]. BATISTA LEGRÁ, Y.; BELETE FUENTES, O., "Consideraciones sobre la exactitud de las redes de levantamiento topográfico". Revista Minería y Geología, 2013, vol.29, n.3, p 56-64, [consultado: 2 de agosto del 2013], Disponible en: http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download/547/pdf_10, ISSN 1993-8012.
- [7]. NIEBLA SOSA, Y.; *et al.*, "Propuesta de una metodología para la descripción de la rugosidad en Cuba". [en línea], Instituto de Meteorología del CITMA y Empresa Eléctrica de la República de Cuba, 2004, p. 2-34, [consultado: 20 de septiembre de 2013], Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/ecosolar/revista27.htm> ISSN 1028-6004.
- [8]. WATTS, D.; JARA, D., "Statistical analysis of wind energy in Chile". Renewable Energy, ELSEVIER, 2011, vol.36, p. 1603-1613, [consultado: 30 de octubre de 2013], Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110004593>, doi:10.1016/j.renene.2010.10.005, ISSN 0960-1481.
- [9]. CADENAS, E.; *et al.*, "Analysis and forecasting of wind velocity in Chetumal, Quintana Roo, using the single exponential smoothing method". Renewable Energy, ELSEVIER, 2010, vol. 35, n. 5, p. 925-930, [consultado: 18 de octubre de 2012], Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109004765>, doi: 10.1016/j.renene.2009.10.037, ISSN 0960-1481
- [10]. CÓRDOVA LÓPEZ, L.F.; LAMAZARES GONZÁLEZ, R., "Simulación de los campos de viento y oleaje asociados a huracanes". Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 2012. vol.33, n.2, p. 50-65, [consultado: 7 de febrero de 2013], Disponible: <http://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/download/106/106>, ISSN 1815–591X.
- [11]. MOSTAFAEIPOUR, Ali *et al.* "An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran". Renewable and Sustainable Energy Reviews, ELSEVIER, 2014., vol. 30, p. 641–650, [consultado: 20 de febrero de 2014], Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211300765X>, ISSN 1364-0321.
- [12]. ABBASI, T.; *et al.*, "Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns". Renewable and Sustainable Energy Reviews, ELSEVIER, 2014, vol.31, p. 270–288, [consultado: 22 de febrero de 2014], Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007685>, ISSN 1364-0321.

AUTORES

Eduardo Terrero Matos

Ingeniero Mecánico, Profesor Auxiliar, Máster en Ciencias Geológicas, Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM). Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMMM). Las Coloradas. Holguín. Cuba.
e-mail: aeterrero@ismm.edu.cu

Arístides Alejandro LegráLobaina

Licenciado en Educación Especialidad Matemáticas, Profesor Auxiliar, Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM), ISMMM. Las Coloradas. Holguín. Cuba.
e-mail: alegra@ismm.edu.cu

Joel CarcassésCarcassés

Ingeniero Mecánico, Unidad Básica Minera, Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Km 8 Carretera de Moa a Baracoa, Moa, Holguín, Cuba.
e-mail: jcarcases@ecg.moa.minbas.cu