



APLICACIÓN DE LA COMPUTACION

Procedimiento para diseñar el muestreo eólico en una región promisoría. Parte I
Teoría y algoritmo general

*Procedure to design sampling of the wind speed in a promissory region. Part I.
Theory and general algorithm*

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

Recibido: febrero de 2014

Aprobado: diciembre de 2014

Resumen/ Abstract

La utilización eficaz del potencial energético del viento en una región promisoría requiere de adecuadas mediciones de su velocidad obtenidas mediante la instalación de cierto número de torres con anemómetros; estos datos se procesan y los resultados caracterizan dicho potencial. La presente investigación tiene como objetivo resolver un importante problema práctico: dada una región, determinar cuántas torres de muestreo deben ser instaladas y dónde hacerlo para que las mediciones obtenidas constituyan un sistema de datos representativo para el estudio de la velocidad del viento y del potencial energético. Se propone un procedimiento donde a partir de información previa sobre la topográfica, la rugosidad y la velocidad del viento en la región y su entorno, se pueden obtener las coordenadas de las torres mejor ubicadas sobre la base del cálculo del error probable medio de las estimaciones puntuales sobre la región.

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

The effective use of wind energy potential in a promising region requires adequate speed measurements obtained by installing a number of towers with anemometers, these data are processed and the results characterize this potential. This research aims to solve an important practical problem: given a region, determine how many sampling towers should be installed and where to do the measurements obtained to constitute a system of representative data for the study of wind speed and energy potential. From a process where prior information on the topographical, roughness and wind speed in the region and beyond, can be obtained the coordinates best placed tower on the basis of calculating the average probable error of the point estimates of the region is proposed.

Keywords: Estimate the potential of wind energy, Roughness, Sampling wind speed, Topography, Wind speed.

INTRODUCCIÓN

El potencial de energía eólica de una región se determina siguiendo los siguientes pasos:

- Obtención de datos sobre la velocidad y dirección del viento mediante mediciones realizadas en varios puntos de prospección y a diferentes alturas
- Modelación matemática del comportamiento de la velocidad del viento mediante una Distribución de Weibull.
- Cálculo de los valores que caracterizan el potencial energético del viento en la región.

Para los fines descritos, la calidad de estos datos se puede considerar bajo dos enfoques:

1. **Precisión y exactitud.** La precisión tiene que ver con la similitud de varias mediciones del valor del viento en una coordenada espacio-temporal; la exactitud se refiere a cuán cerca esté del valor verdadero cada velocidad medida.
Este enfoque tiene que ver con la instrumentación y las técnicas de muestreo
2. **La representatividad.** Pueden ser considerados dos puntos de vista:
 - a. Que los datos sean capaces de describir el comportamiento de la velocidad del viento en la región o en alguna de sus partes.
 - b. Que los datos tengan la capacidad de generar un modelo que explique y pronostique el comportamiento espacio-temporal.
 Este segundo enfoque está muy relacionado con la decisión de donde y cuando se debe medir la velocidad del viento.

El estudio de la velocidad del viento puede considerarse un largo proceso que se realiza por etapas. La primera etapa parte del conocimiento más general sobre la circulación de los vientos en el planeta y del muestreo de la velocidad y dirección del viento en estaciones meteorológicas. Los resultados son generales y la mayoría de las veces solo constituyen aproximaciones al conocimiento del comportamiento local del viento. Luego se suceden otras etapas donde, a partir de nuevos datos y modelos más potentes, se obtiene mayor conocimiento sobre la velocidad del viento en las regiones promisorias, el cual, a la larga, proporciona los elementos para tomar las decisiones correctas que permitan la explotación eficaz y eficiente del potencial eólico. Puede decirse entonces que el estudio de las características de viento se realiza por etapas donde en cada una de ellas se obtiene un modelo de la velocidad y de la dirección del viento que constituye el Modelo Preliminar del Viento para la próxima etapa.

Durante el muestreo de la velocidad del viento en regiones promisorias, este se mide con anemómetros con un tiempo de muestreo de 10 minutos al menos durante un año con torres de hasta 100 m de altura sobre el suelo, por tanto el interés de la presente investigación se centra en establecer un diseño de muestreo que particularmente consiste en determinar donde deberán situarse las torres. Puesto que el comportamiento del viento es variable respecto a las dimensiones espaciales y temporal entonces es importante definir la posición de las torres sobre la superficie de la región asumiendo que los datos recolectados deberán reflejar adecuadamente el desarrollo local del fenómeno y, además, tener la capacidad de generar un modelo que estime adecuadamente el comportamiento espacio-temporal de la velocidad del viento. Entonces, el objetivo del presente trabajo es establecer el algoritmo general de un procedimiento para el diseño de un 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.

MATERIALES Y MÉTODOS

Conceptos Preliminares

Sea una región geográfica R con una frontera conexa no necesariamente convexa de área A_0 km² que ha sido declarada promisorio debido a que los estudios realizados acerca de su potencial eólico reconocen que la velocidad media del viento a una altura h_0 m (sobre el nivel del mar) es mayor al valor v_0 m/s. Se suponen conocidos (vea la figura 1):

- La dirección predominante α del viento (se mide referenciándola según la Rosa de los Vientos)
- Los valores de la cota z (sobre el nivel del mar) y de la velocidad media del viento v en $K \geq 0$ puntos interiores, frontera o exteriores a la frontera de R : $(x_1; y_1; z_1; v_1), (x_2; y_2; z_2; v_2), \dots, (x_K; y_K; z_K; v_K)$, situados preferentemente en la dirección barlovento del viento.

A este conjunto de K puntos se les denomina Red de Datos Preliminares (RTV) y se asume que sus datos son suficientemente confiables y bien situados, como para servir de puntos de referencias en los procesos de modelación.

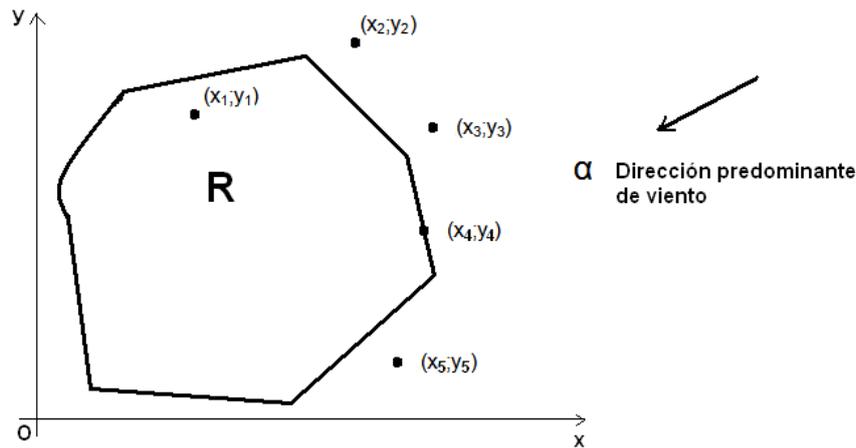


Fig. 1. Región promisoría R; α dirección predominante del viento; $K=5$ puntos de RTV donde se conocen la cota z y la dirección v del viento, en este caso colindantes respecto a R con el inicio de la dirección del viento (barlovento).

Para determinar si es realmente posible construir un parque eólico en R y en ese caso, cuáles serían las mejores características del mismo (cuántos aerogeneradores, cuáles serían sus parámetros, dónde se ubicarían, etc.), es necesario un estudio detallado del potencial eólico en R. Para ello es usual monitorear, mediante anemómetros situados a diferentes alturas en torres de medición, la velocidad del viento en ciertos puntos (x,y) de R de manera que con la menor cantidad de instrumentos se obtenga la mayor y más representativa cantidad de datos posible.

Con ese fin puede ser definida una red de n puntos (denominada Red 2D) sobre el interior y la frontera de la región R tal que cubra esta región, donde cada uno de ellos constituirá una posible ubicación para situar una de estas torres de medición. Por razones de facilidades algorítmicas, esta Red 2D de puntos debe ser rectangular y suficientemente cerrada, es decir, que la distancia δX entre dos puntos en la dirección del eje OX sea pequeña y lo mismo para la distancia δY entre dos puntos en la dirección del eje OY (ver la figura 2). Obviamente, estas distancias δX y δY no deben ser tan pequeñas que el alto número de puntos de la red rectangular haga ineficientes los procedimientos que se explican más adelante.

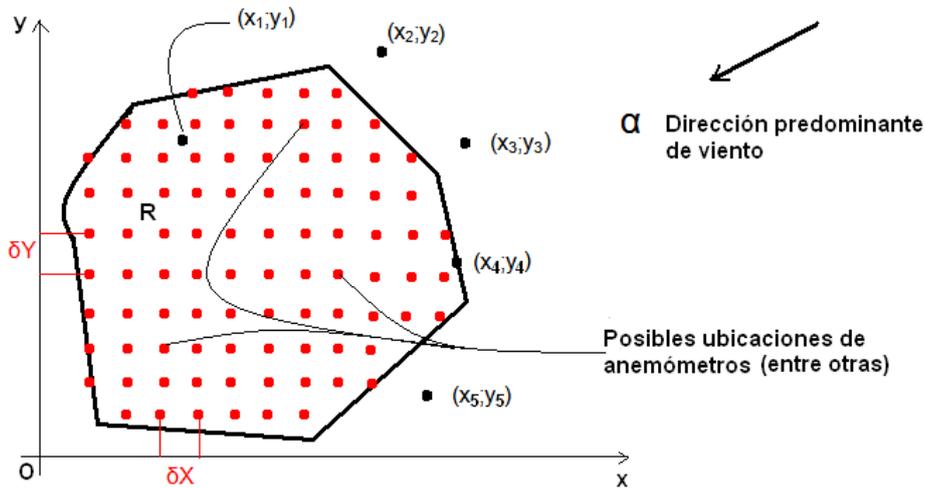


Fig. 2. Red 2D de puntos sobre la región R.

A cada punto de la Red 2D deberá ser asociado el valor de su cota z , de rugosidad r y de viento v . Cada uno estos valores en cada uno de los puntos (x,y) de la Red 2R, se obtiene evaluando (x,y) respectivamente en el Modelo Topográfico [1]; el Modelo de Rugosidad; y el Modelo Preliminar del Viento. De este modo se obtienen para la región R la malla rectangular de n puntos Red 2D+T+R+V cuyos puntos son de la forma: $(x_1; y_1; z_1; r_1; v_1)$, $(x_2; y_2; z_2; r_2; v_2)$, ..., $(x_n; y_n; z_n; r_n; v_n)$.

Modelo de Rugosidad

La rugosidad res la influencia de los obstáculos sobre el terreno que producen la ralentización del viento. Esta propiedad de cada punto de la región R se cuantifica mediante la longitud de rugosidad Z_r que es la mayor altura sobre el nivel del suelo donde la velocidad del viento es nula. Según la Asociación Danesa de la Industria Eólica [2], para obtener el valor de r se conocen las ecuaciones (1) y (2).

$$r = 1,69982301 + \frac{\ln(Z_r)}{\ln(150)}, \quad \text{si } Z_r \leq 0,03 \quad (1)$$

$$r = 3,91248929 + \frac{\ln(Z_r)}{\ln(3,33333)}, \quad \text{si } Z_r > 0,03 \quad (2)$$

El valor de Z_r en cada punto puede obtenerse usando las tablas disponibles para tal efecto [3,4], a partir de la observación de las características de los elementos del terreno.

Por otra partela ecuación (3), relaciona dos mediciones V_o y V realizadas respectivamente en las cotas z_o y z de un punto $(x;y)$.

$$V = V_o \left[\frac{\ln(z) - \ln(z_r)}{\ln(z_o) - \ln(z_r)} \right] \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

La ecuación (4), que se deduce de la ecuación (3), si se toma $V=V_1$; $z=z_1$; $\Delta V = V_o - V_1$; y se despeja el valor de z_r , también proporciona un mecanismo para calcular el valor de z_r .

$$z_r(x; y) = \left(\frac{z_1^{V_o}}{z_o^{V_1}} \right)^{\frac{1}{\Delta V}} \quad (\text{m}) \quad (4)$$

Postulados Heurísticos

Puesto que la velocidad del viento en cualquier punto e instante de tiempo es consecuencia de: el comportamiento del viento en puntos espacio-temporalmente "anteriores"; y de las características de la localidad, entonces cualquier modelo que pretenda explicar y pronosticar la velocidad del viento debe tener en cuenta:

- Su dirección así como su velocidad (dadas en el Modelo Preliminar del Viento) que junto al conocimiento disponible sobre la topografía y rugosidad del terreno conforman la Red 2D+T+R+V.
- Un conjunto de nuevos datos (NDV) sobre el comportamiento del viento en R que aumenten y precisen la información sobre las variables de interés. Estos nuevos datos se obtienen desde el modelo preliminar o en un proceso de muestreo que, como se ha dicho, debe ser eficaz (representativo) y eficiente.

Denominando **F** a un modelo matemático genérico que facilite la estimación de la velocidad del viento en el punto $(x;y)$ entonces este modelo se puede expresar mediante la ecuación (5).

$$V(x,y) = F(x,y, \alpha, RTV, NDV, \text{Red } 2D+T+R+V) \quad (5)$$

Ahora, de lo que se trata es de responder la siguiente pregunta: **¿cuál es el criterio a considerar para situar las torres de medición que proporcionen NDV útiles para el modelo F?**

La respuesta a esta pregunta no puede buscarse solo en las características del modelo F (ya que incluso este puede ser seleccionado o construido en función de no solo de α , RTV y la Red 2D+T+R+V) sino que también deben considerarse los resultados del muestreo. Sin embargo es posible tener en cuenta cuáles son los elementos que caracterizan e influyen en el error probable de estimación que se pudiera cometer cuando se aplica con estos fines el modelo F. De esta manera, el muestreo puede diseñarse con el objetivo explícito de minimizar este error a escala de toda la región R. El conjunto unión de los puntos de la RTV y el conjunto PMS de los puntos del muestreo que se seleccionan constituyen el conjunto de puntos influyentes denominado CPI; ahora pueden proponerse los siguientes criterios que resumen y amplían estudios realizados por Zuñiga y Crespo [5], Guzmán y Aguirre [6], Carrasco Díaz [7], Herrera Sánchez et al. [8], Zhu [9] y Bossavy [10]:

C1 La velocidad del viento en un punto $(x;y)$ está determinada por las características de la topografía, la rugosidad y la velocidad del viento en los puntos de CPI situados dentro de una franja de dirección paralela a la velocidad predominante del viento y con amplitud $2d_s$ (ver la figura 3).

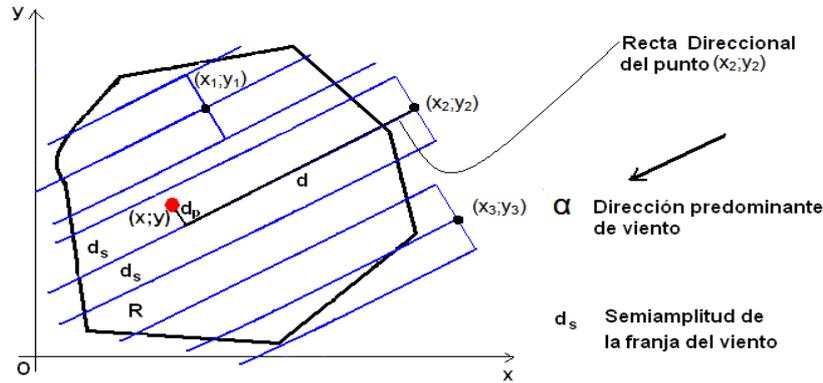


Fig. 3. Franja del viento para cada uno de los tres puntos de RTV y visualización de que el punto donde se estima V está determinado por los datos del punto de índice 2. Además se muestran las distancias: d entre el punto $(x;y)$ y el punto $(x_2;y_2)$ así como d_p , distancia entre el punto $(x;y)$ y la recta direccional del punto $(x_2;y_2)$.

C2 Las torres de medición deben estar situadas en puntos $(x_i;y_i)$ de la Red 2D que integrándose al CPI, aporten datos capaces de estimar adecuadamente la velocidad del viento en la mayor cantidad posible de puntos de R.

C3 Las cotas de los puntos situados en la franja a barlovento de cualquier punto seleccionado, en general, no debe sobrepasar la cota de este. O sea, ningún punto seleccionado debe estar en zonas mucho más bajas que las zonas desde donde les llega el viento. En la figura 4, se ilustra este criterio.

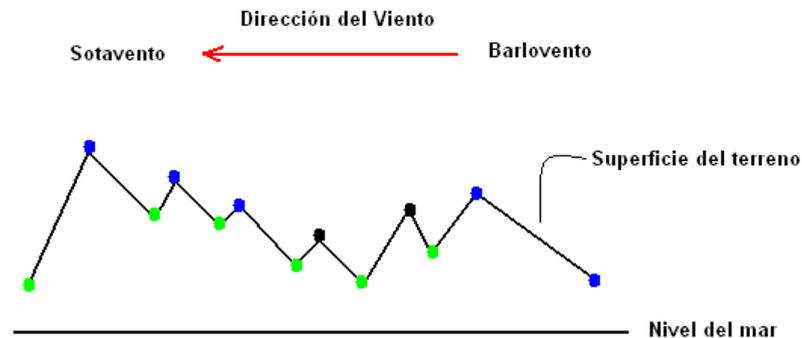


Fig.4. Vista lateral. Si los círculos representan puntos de la superficie del terreno donde podría analizarse la posibilidad de ubicar alguna torre de muestreo, entonces considerando el criterio C3: Los puntos verdes no son elegibles; los puntos negros pudieran ser elegibles a partir de un análisis particular; y los puntos azules son elegibles.

C4 Si se denomina como $e_v(x;y)$ al error probable de estimación en el punto $(x;y)$, entonces su valor está fundamentalmente condicionado por:

- a. Las distancias entre $(x;y)$ y cada uno de sus puntos CPI. A mayor distancia, mayor error probable de estimación
- b. Las distancias entre $(x;y)$ y las rectas direccionales que pasan por cada uno de los puntos influyentes de CPI
- c. Las velocidades del viento en los puntos CPI. A mayor velocidad del viento mayor probabilidad de turbulencias
- d. La altura de z en los puntos de CPI. A mayor altura menor probabilidad de error de estimación
- e. Las características de la topografía y de la rugosidad del corredor que une al punto $(x;y)$ con cada uno de sus puntos influyentes. A mayor variabilidad de estas magnitudes, mayor probabilidad de error en la estimación

C5 Cuando el punto $(x;y)$ está a barlovento de su punto influyente correspondiente de CPI, el valor numérico del error probable de estimación aumenta con respecto al mismo error si el punto estuviera a sotavento del su punto influyente (ver la figura 5). Este criterio tiene como fundamento la idea de que la información obtenida en el punto es más útil para pronosticar la velocidad del viento "hacia adelante" que "hacia atrás".

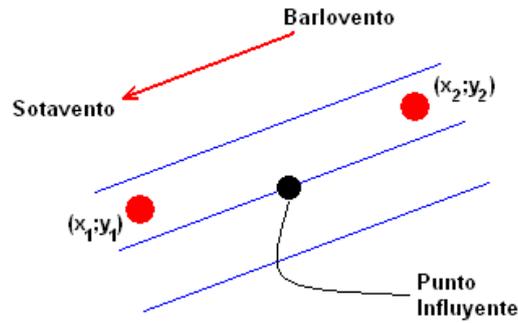


Fig.5. Vista en planta. Los puntos $(x_1;y_1)$ y $(x_2;y_2)$ están situados a la misma distancia del punto influyente y a la misma distancia de la recta direccional de la franja pero el error probable en el segundo caso debe ser algo mayor.

Formulaciones

Para calcular el Error Total de Estimación E_V del sistema de puntos CPI para la Red 2D se propone la ecuación (6).

$$E_V = \frac{\sum_{i=1}^n e_{Vi}}{n} \quad (6)$$

Donde e_{Vi} es el error en el punto $(x_i; y_i)$ del conjunto Red 2D.

Para cada punto $(x_i; y_i)$ de Red 2D es necesario encontrar en CPI su punto influyente $(x_k; y_k)$. Para ello se busca en CPI aquel punto diferente de $(x_i; y_i)$ tal que esté dentro de la franja del punto $(x_k; y_k)$ y sea mínima la distancia d . Por supuesto, algunos puntos $(x_i; y_i)$ de la Red 2D no tendrán ningún punto influyente en CPI

Si el punto $(x_i; y_i)$ está a sotavento del punto $(x_k; y_k)$ entonces el valor de e_{Vi} se calcula por la ecuación (7).

$$e_{Vi} = \frac{\lambda_D eD_V + \lambda_P eP_V + \lambda_T eT_V + \lambda_R eR_V + \lambda_Z eZ_V + \lambda_V eV_V}{\lambda_D + \lambda_P + \lambda_T + \lambda_R + \lambda_H + \lambda_V} \quad (7)$$

Y si el punto $(x_i; y_i)$ está a barlovento del punto $(x_k; y_k)$ entonces el valor de e_{Vi} se calcula por la ecuación (8).

$$e_{Vi} = \frac{\lambda_D \sqrt{eD_V} + \lambda_P \sqrt{eP_V} + \lambda_T \sqrt{eT_V} + \lambda_R \sqrt{eR_V} + \lambda_Z \sqrt{eZ_V} + \lambda_V \sqrt{eV_V}}{\lambda_D + \lambda_P + \lambda_T + \lambda_R + \lambda_H + \lambda_V} \quad (8)$$

Donde λ_D , λ_P , λ_T , λ_R , λ_Z y λ_V son parámetros positivos que ponderan casuísticamente la influencia de cada uno de las componentes del error en el punto $(x_i; y_i)$. Ahora es conveniente definir como se calculan las influencias de los factores particulares en el error e_V .

Como se ha dicho es de suponer que a medida que aumenta la distancia entre $(x; y)$ y su punto influyente $(x_k; y_k)$, el valor de e_V aumenta y si dicha distancia disminuye, entonces e_V disminuye. La influencia de la distancia en el cálculo del error de estimación se puede cuantificar asumiendo que si $(x; y)$ tiene el punto de influencia $(x_k; y_k)$ mediante la ecuación (9).

$$eD_V = \frac{\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}}{\text{Max}_{i=1}^n \left\{ \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \right\}} \quad (9)$$

Si el punto $(x; y)$ no tiene punto de influencia entonces $eD_V = 1$. Nótese que eD_V está entre 0 y 1.

Por otra parte, a medida que aumenta la distancia perpendicular entre $(x; y)$ y la recta direccional del punto influyente $(x_k; y_k)$, el valor de e_V aumenta. Si dicha distancia disminuye, e_V también disminuye. El error debido a la separación del vector direccional se mide mediante la ecuación (10).

$$eP_V = \frac{d[(x; y), \text{Recta}_k]}{\text{Max}_{i=1}^n \left\{ d[(x_i; y_i), \text{Recta}_k] \right\}} \quad (10)$$

Donde Recta_k es la recta que pasa por el punto (x_k;y_k) y tiene la dirección α. También e_{P_v} es un valor entre 0 y 1 y si el punto (x;y) no tiene punto de influencia entonces e_{R_v}=1.

El valor de e_v también depende de la cantidad e intensidad de los cambios topográficos en la franja que une al punto (x;y) con el punto influyente (x_k;y_k). Se asume para el punto influyente (x_k;y_k) la variación de la topografía según la ecuación (11).

$$VT_k = \begin{cases} \sum_{i=0}^{t-1} |z_{i+1} - z_i| & \text{si } z_{i+1} \neq z_i \\ \sum_{i=0}^{t-1} |z_{i+1}| & \text{si } z_{i+1} = z_i \end{cases} \quad (11)$$

Del conjunto resultante de la unión de la Red 2D y de la RTV se toma la sucesión ordenada de puntos P₀, P₁, P_t que forman la poligonal de longitud máxima que une a los puntos (x;y) y (x_k;y_k). Los valores de z_i se toman del modelo topográfico definido sobre la Red 2D+T+R+V (ver figura 6).

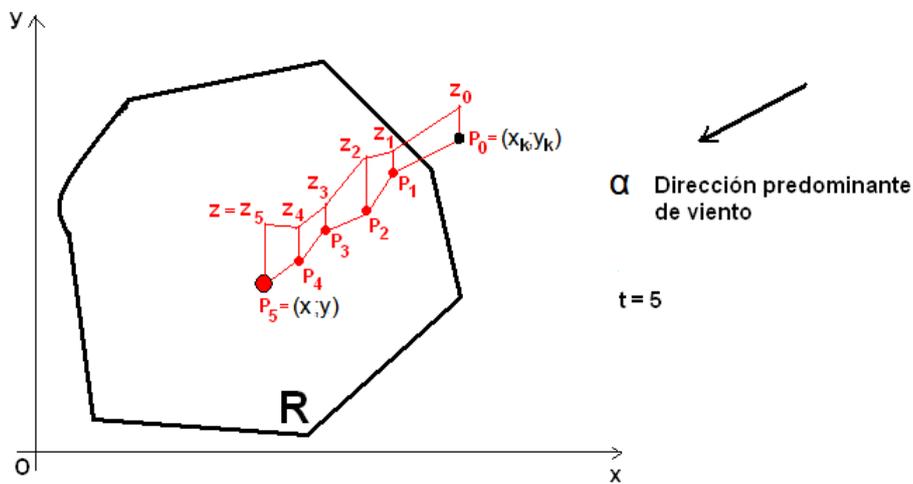


Fig.6. Sucesión de puntos para evaluar el error debido a la topografía.

También se define para este punto influyente (x_k;y_k) la variación de la topografía cambiante mediante la ecuación (12).

$$VTC_k = \sum_{i=0}^{t-1} K_i |z_{i+1} - z_i| \quad (12)$$

Donde K_i es 0 si para ese valor de i, tienen el mismo signo las diferencias de cotas: z_{i+1}-z_i y z_i-z_{i-1} y en caso contrario toma valor 1. Entonces, en el punto (x;y) se define la influencia de la topografía en el error de estimación por la ecuación (13).

$$eT_v = \frac{VTC_k}{VT_k} \quad (13)$$

Si el punto (x;y) no tiene punto alguno de influencia entonces e_{T_v}=1. Nótese que e_{T_v} es un valor entre 0 y 1. De manera análoga el valor de e_v también depende de la cantidad e intensidad de los cambios de rugosidad en la franja que une al punto (x;y) con el punto influyente (x_k;y_k). Se asume para este punto influyente (x_k;y_k) la variación de la rugosidad mediante la ecuación (14).

$$VR_k = \begin{cases} \sum_{i=0}^{t-1} |r_{i+1} - r_i| & \text{si } r_{i+1} \neq r_i \\ \sum_{i=0}^{t-1} |r_{i+1}| & \text{si } r_{i+1} = r_i \end{cases} \quad (14)$$

Los valores de r_i se toman del modelo de rugosidad definido sobre la Red 2D+T+R+V. También mediante la ecuación (15), se define para este punto influyente (x_k;y_k) la variación de la rugosidad cambiante.

$$VRC_k = \sum_{i=0}^{t-1} L_t |r_{i+1} - r_i| \quad (15)$$

L_t es 0 si para ese valor de i , tienen el mismo signo las diferencias de rugosidad: $r_{i+1}-r_i$ y r_i-r_{i-1} y en caso contrario toma valor 1. En el punto $(x;y)$ se define la influencia de la rugosidad en el error de estimación según la ecuación (16).

$$eR_V = \frac{VRC_k}{VR_k} \quad (16)$$

Si el punto $(x;y)$ no tiene punto de influencia entonces $eR_V=1$. Nótese que eR_V también es un valor entre 0 y 1. Cuando la topografía es variable y se presenta una distinción regional evidente de zonas altas y bajas, pudiera esperarse que si son seleccionados como puntos de muestreo aquellos que tienen mayor cota, los errores de estimación sean menores que si fuesen colocadas las torres en puntos de menor cota. Por eso puede definirse la influencia de la altura z_k en el punto $(x_k;y_k)$ sobre el error de estimación mediante la ecuación (17).

$$eZ_V = 1 - \frac{z_k}{z_{\max}} \quad (17)$$

Donde z_{\max} , definida mediante la ecuación (18), es la mayor cota en Red 2D+T.

$$z_{\max} = \underset{i=1}{\overset{n}{\text{Max}}}\{z_i\} \quad (18)$$

Si el punto $(x;y)$ no tiene punto de influencia entonces $eZ_V=1$ y queda establecido que eZ_V también es un valor entre 0 y 1. Finalmente, en ciertos casos el aumento de la velocidad del viento presupone el aumento de la turbulencia y por tanto, también aumenta la incertidumbre al estimar V en $(x;y)$. Puede formalizarse la influencia que tiene la velocidad del viento en el error probable de estimación mediante la ecuación (19).

$$eV_V = \frac{V_k}{V_{\max}} \quad (19)$$

Donde V_k es la velocidad del viento en el punto influyente del punto $(x;y)$ y V_{\max} es la velocidad máxima del viento para todos los puntos de CPI y se obtiene mediante la ecuación (20).

$$v_{\max} = \underset{k=1}{\overset{K}{\text{Max}}}\{v_k\} \quad (20)$$

En resumen, nótese que el error e_V es siempre un valor entre 0 y 1 y por tanto E_V también es un valor en ese intervalo.

Propuesta de Procedimiento

Ahora debe ser establecido un procedimiento para obtener cuales son los puntos de Red 2D que deben ser escogidos como puntos de muestreo (conjunto Red PMS o sea: Puntos de Muestreo Seleccionados) bajo la condición de que se minimice el valor de E_V . El procedimiento que se propone a continuación tiene una base algorítmica iterativa ya que si se quiere seleccionar un total de q puntos de muestreo se aplica el procedimiento q veces consecutivas sobre datos actualizados en cada ciclo. Su algoritmo general se muestra en la figura 7.

Puesto que para el ciclo o paso j se tienen $n-j+1$ puntos $(x_i;y_i)$ en la Red 2D y cualquiera de ellos es candidato a ser elegido entonces, se coloca temporalmente a cada uno de ellos como parte de la RedNDP y se halla el valor de E_V . Finalmente será elegido aquel punto que proporcione el valor mínimo de este índice.

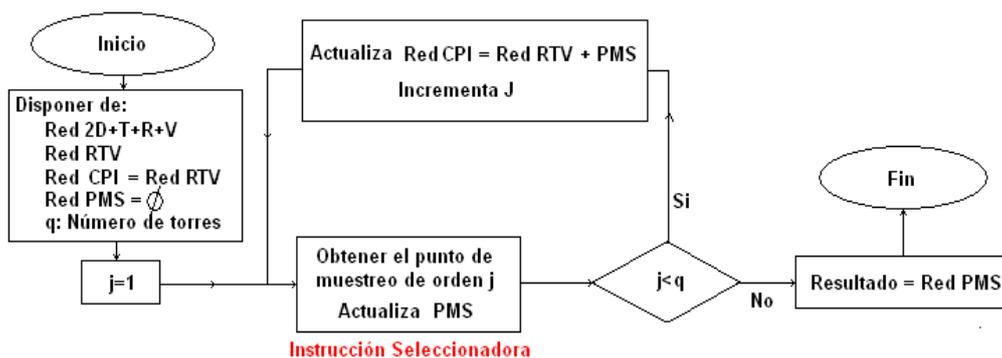


Fig.7. Algoritmo general del procedimiento iterativo para encontrar los puntos de muestreo.

CONCLUSIONES

La utilización eficaz del potencial energético del viento en una región promisoría depende en buena parte de la calidad de las mediciones de su velocidad las cuales se obtienen mediante la selección e instalación adecuada de torres con anemómetros. El diseño de esta instalación, también denominado diseño del muestreo eólico, consiste fundamentalmente en seleccionar los puntos de ubicación de las torres de manera que los datos que se obtengan sean de la mayor utilidad posible para los fines de caracterizar la velocidad y el potencial de energía eólica en la región promisoría.

En la presente investigación 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; y en el contexto fenomenológico en que se manifiesta el viento en un área geográfica. La esencia de la propuesta es un algoritmo matemático general que tiene en cuenta las regularidades del comportamiento del viento y un conjunto de parámetros cuyo manejo permite incluir las necesidades y criterios expertos de quienes lo usan.

REFERENCIAS

- [1]. LEGRÁ LOBAINA, A.A., *et al.* "Contribución al método de interpolación lineal con triangulación de Delaunay". Revista Minería y Geología, 2014, vol.30, n.2, p. 58-72, [consultado: 2 de abril del 2014], Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/907>, ISSN 1993-8012.
- [2]. Asociación Danesa de la Industria Eólica. "Manual de Referencia, Primera Parte: Conceptos sobre la energía eólica". [en línea], 2000, p. 12-13, Dinamarca, [consultado: 11 de febrero de 2013], Disponible en: http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#roughness.
- [3]. NIEBLA SOSA, Y.; *et al.*, "Propuesta de una metodología para la descripción de la rugosidad en Cuba". [en línea], Revista ECOSOLAR, 2004, p. 2-34, [consultado: 20 de septiembre de 2013], Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar27/HTML/articulo02.htm>, ISSN 1028-6004.
- [4]. LAZIC, L., *et al.*, "Wind forecasts for wind power generation using the ETA model". Renewable Energy, 2010, vol.35, n.6, p. 1236-1243, [consultado: 20 de enero de 2014], Disponible en: http://www.sepa.gov.rs/download/Wind_forecasts_Eta_model.pdf, ISSN 0960-148.
- [5]. ZUÑIGA LÓPEZ, I.; CRESPO DEL ARCO, E., "Meteorología y Climatología". Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2010, p. 34-86, [consultado: 2 de abril de 2013], Disponible: http://portal.uned.es/portal/page?_pageid=93,23377993&_dad=portal&_schema=PORTAL&_piref93_2337606_3_93_23377993_23377993.next_page=/htdocs/ficha.jsp?IdArticulo=0160502UD01A02, ISBN: 978-84-362-6082-3.
- [6]. GUZMÁN CARRANZA, C. A.; AGUIRRE SALDIVAR, R., "Aplicación de la metodología para el diseño de una red automática de monitoreo atmosférico". Informe del proyecto Sección de Ingeniería Ambiental, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, D.F, 2002, p.

- 1-13, [consultado: 3 de abril de 2013], Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaidis/mexico11/ca-3.pdf>
- [7]. CARRASCO DÍAZ, M., "Reconstrucción del campo de viento para la generación de mapas de potencial eólico a lo largo de la costa del estado de Tamaulipas, México". Tesis de Postgrado, 2013, Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional, [consultado: 15 de junio de 2013], Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/11787>.
- [8]. HERRERA SÁNCHEZ, O., *et al.*, "Modelo de análisis de cargas máximas en aerogeneradores producidas por vientos extremos". Ingeniería Mecánica, 2010, vol.13. n.2, p. 22-31, [consultado: 11 de marzo de 2013], Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/viewFile/38/358>, ISSN 1815-5944.
- [9]. Bo, Z.; *et al.*, "A prediction model for wind farm power generation based on fuzzy modeling". Procedia Environmental Sciences, 2012, vol. 12, p. 122–129, [consultado: 27 de abril de 2013], Disponible en: http://ac.els-cdn.com/S1878029612002575/1-s2.0-S1878029612002575-main.pdf?_tid=410e1804-c8c2-11e4-86b1-00000aacb35f&acdnat=1426169916_42a634364c9cd70b1422e50c1ff69d51, ISSN 1878-0296.
- [10]. BOSSAVY, A.; *et al.*, "Forecasting ramps of wind power production with numerical weather prediction ensembles". Wind Energy, 2013, vol.16, n.1, p. 51–63, [consultado: 5 de diciembre de 2013], Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.526/abstract>, ISSN 1099-1824.

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 Legrá Lobaina

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

Joel Carcassés Carcassés

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