

METODO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO EN UN ÁREA DE TOPOGRAFÍA COMPLEJA TENIENDO EN CUENTA LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA

Oscar A. Frumento, Juan C. Labraga, Mónica López

Centro Nacional Patagónico - CONICET - Boulevard Brown s/n - (9120) Puerto Madryn - Chubut
Tel: (0965) 51024/51375 - Fax: (0965) 51543 - Email: fisica@cenpat.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se describe un procedimiento de modelado numérico para extrapolar observaciones de vientos obtenidos en un sitio dado a toda la región circundante incorporando el efecto de la estabilidad atmosférica en la determinación del flujo de aire sobre una región topográficamente irregular. El método es aplicado a la identificación de sitios con máximo potencial para la instalación de turbinas eólicas. Estadísticamente se evalúa la reducción del error en la estimación de la potencia.

INTRODUCCIÓN

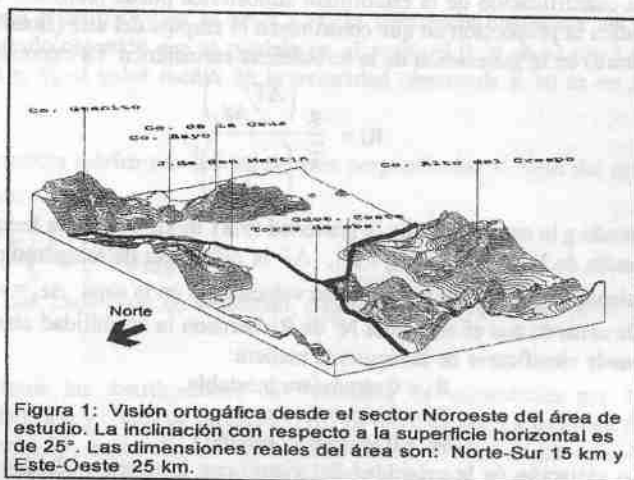
El flujo de aire en las cercanías del suelo está fuertemente influenciada por diversos factores como las características topográficas, el tipo de vegetación que cubre la superficie, los obstáculos antropogénicos, etc. Superpuesto a estos factores, la estabilidad atmosférica juega un rol predominante en la manera en que el viento varía con la altura y en el curso del día en las capas bajas de la atmósfera (región en la cual se desarrollan la mayoría de las actividades humanas). La estabilidad es una cualidad de la atmósfera atribuible a factores termodinámicos y dinámicos que se evidencia en la capacidad de amplificar (inestabilidad) o amortiguar (estabilidad) movimientos verticales de pequeña amplitud inicial.

En el caso particular de la generación de energía eléctrica por medio de máquinas convertoras de energía eólica, incluir el efecto de la estabilidad atmosférica en la estimación del campo de viento permite desarrollar metodologías que optimizan, no solo la evaluación del recurso (potencia del viento), sino además la estrategia a aplicar (selección de sitios y máquinas, estimación de costos de energía, etc.) en emprendimientos energéticos de envergadura.

Se describe a continuación el desarrollo y la aplicación experimental de un método objetivo para la estimación de la potencia del viento, en el cual se incorpora el efecto de la estabilidad atmosférica, y se analizan sus resultados.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

En la localidad de Gobernador Costa, Prov. del Chubut (aproximadamente 70° O, 44° S), se efectuó durante el período Abril 1994 - Abril 1995 una campaña de mediciones de velocidad y dirección del viento y temperatura del aire con el objetivo de evaluar la potencialidad de un emprendimiento eólico en la zona [1]. La topografía del lugar (figura 1) está caracterizada por un amplio valle orientado en la dirección Este-Oeste de aproximadamente 5 km de ancho. Sobre el mismo se desplaza el cauce del arroyo Genoa hacia el Este, con una pendiente no superior al 5%. Hacia ambos lados del valle se desarrollan colinas con pendientes suaves cuyo desnivel medio con respecto al nivel del valle es de 400 m. La localidad de Gobernador Costa, a 700 m sobre la superficie del mar (ssm), está al Norte de un conjunto de cerros que culminan en el cerro de la Cruz de 1300 m. A 11 km hacia el Este, el valle gira hacia el Sur. En ese lugar está ubicada la localidad de General San Martín. Ambas localidades están interconectadas eléctricamente.



MÉTODO EXPERIMENTAL

En el sitio experimental fue instalada una torre telescópica portátil de 30 m sobre el cual fueron colocados tres sensores de velocidad y dirección del viento y tres sensores de temperatura. Las mediciones de velocidad se efectuaron a 10, 20 y 30 m sss y las mediciones de temperatura a 1.5, 10 y 20 m sss. Un sistema automático de adquisición de datos tomó muestras de cada parámetro cada 10 s. Se efectuaron luego promedios horarios con lo cual se obtuvo un *data-set* de más de 70000 datos para todo el período. La torre fue instalada en un sitio representativo, horizontal y homogéneo, cubierto con la vegetación típica del lugar cuya altura media es de 0.4 m. El equipo de adquisición de datos utilizado tiene la capacidad de almacenar la información durante tres horas, para luego transmitirla vía satélite a una estación terrena receptora ubicada en Wallops Island (EUA). En este caso en particular, la información se transfirió periódicamente vía módem al Centro Nacional Patagónico, lo que permitió efectuar un seguimiento continuo del funcionamiento de todo el sistema.

MÉTODO ANALÍTICO

El método de evaluación del recurso eólico empleado incluye tres etapas. Primero se determinan las estadísticas básicas locales del viento, su variación diurna y estacional y su variación con la altura. Segundo, se utiliza un modelo numérico de simulación del flujo del aire para extrapolar espacialmente las observaciones. Esto permite determinar zonas con mayor potencialidad para el aprovechamiento del recurso. Finalmente, se aplica la técnica denominada *Análisis de costo por ciclo de vida* la cual contempla el impacto de las principales variables económicas involucradas en un proyecto de envergadura en la determinación del costo unitario de la energía. Se presentan a continuación aspectos relativos a las dos primeras etapas.

Las estadísticas básicas del viento se refieren, además del cómputo del valor medio y el desvío estándar a partir de las observaciones efectuadas en el sitio, a la determinación de la distribución conjunta de frecuencias por clases de velocidad y de dirección y a los cálculos de los parámetros de la distribución de probabilidad teórica de Weibull por distintos métodos. Esta distribución teórica ajusta adecuadamente las observaciones de viento en variados regímenes, y permite eliminar irregularidades propias de un período corto de mediciones.

El modelo numérico utilizado para extrapolar espacialmente las observaciones de viento está basado en el principio de conservación de la masa, siendo el forzante principal la topografía de la región [2]. Para su aplicación es necesario disponer de un mapa digitalizado de la topografía de la zona de estudio, y de observaciones de viento en superficie o en altura en uno o más sitios del lugar. La utilización del modelado numérico requiere una adecuada representación paramétrica de los principales procesos físicos (forma del perfil de viento, altura de la capa de superficie, etc.) y la elección de parámetros geométricos del modelo (resolución horizontal y vertical, dimensiones del dominio, etc.).

Con cada medición del viento puede realizarse una simulación numérica y obtener el campo de esta variable para toda la región. Sin embargo, el tiempo computacional necesario aún para una región pequeña (100 km²) es excesivo si se pretende simular los campos horarios de todo un año de mediciones. No obstante, la combinación de estadísticas climáticas y un número limitado de simulaciones numéricas con un método desarrollado en el CENPAT denominado recomposición de campos [3] permite reducir notablemente el costo computacional.

ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA Y LOS PERFILES VERTICALES DEL VIENTO

La estabilidad atmosférica, que cumple localmente un ciclo diurno y un ciclo estacional, puede calcularse también con métodos simples a partir de observaciones de perfiles de temperatura y velocidad del viento.

La cuantificación de la estabilidad atmosférica puede realizarse por medio del número (adimensional) de Richardson, que indica la proporción en que contribuyen el empuje del aire (flotabilidad) y la cortante del viento (variación del viento con la altura) en la generación de la turbulencia atmosférica. La expresión del número de Richardson es:

$$Ri = \frac{g}{\bar{T}} \frac{\left(\frac{\Delta T}{\Delta z_1}\right)}{\left(\frac{\Delta v}{\Delta z_2}\right)^2};$$

siendo g la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²), \bar{T} (°K) la temperatura media de la capa $\Delta z_1 = z_{T2} - z_{T1}$, ΔT la diferencia de temperaturas en la misma capa y Δv la variación de velocidades en la capa $\Delta z_2 = z_{v2} - z_{v1}$.

De acuerdo con el signo del N^o de Richardson la estabilidad atmosférica puede clasificarse de la siguiente manera:

$Ri < 0$ atmósfera inestable;

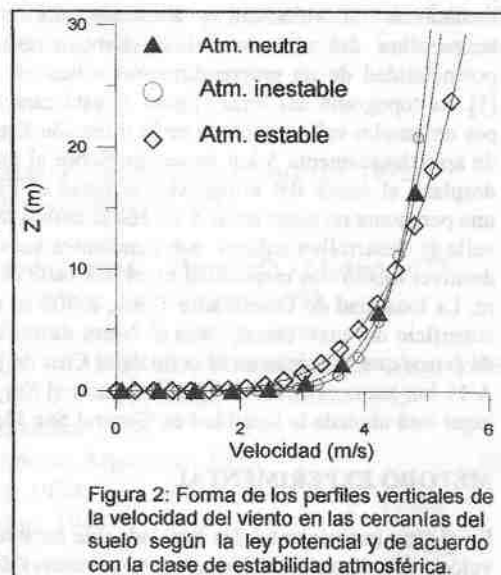
$Ri = 0$ atmósfera neutra;

$Ri > 0$ atmósfera estable.

La variación de la velocidad del viento con la altura en la denominada "capa de superficie" (capa en la que predomina la fuerza de fricción) puede describirse por medio de una ley potencial, cuya expresión general es:

$$u(z) = u(z_0) \left(\frac{z}{z_0}\right)^\beta;$$

siendo $u(z)$ la velocidad en el nivel z , $u(z_0)$ la velocidad en un nivel de referencia z_0 y β un parámetro que depende, fundamentalmente, de la estabilidad atmosférica (figura 2). Empíricamente puede determinarse la variación de β en función del número de Richardson.



RESULTADOS

Para cada una de las observaciones horarias fue calculado el número de Richardson, empleando los gradientes de temperatura medidos entre los niveles 1.5 y 10 m sss y los gradientes de velocidad entre los niveles 10 y 30 m sss. Aplicando cuadrados mínimos, se calcularon los valores del coeficiente β para los tres criterios de estabilidad ($Ri > 0$, $Ri < 0$ y $Ri = 0$). Como el perfil potencial asume un incremento monótono del viento con la altura, las observaciones que no satisfacían esta condición no intervinieron en el cálculo de β (casos de estabilidad extrema, congelamiento de sensores y vientos cercanos a la calma).

Los valores de β obtenidos fueron :

atmósfera inestable	$\beta = 0.11;$
atmósfera estable	$\beta = 0.21;$
atmósfera neutra	$\beta = 0.14.$

Utilizando el modelo numérico de flujo del aire se simularon los campos tridimensionales de velocidad que resultan de imponer, como dato de ingreso en el sitio de observación y a 10 m de altura sss, una velocidad unitaria (1 m/s), y de considerar que la variación del viento con la altura en la capa de superficie sigue una ley potencial. Se efectuaron simulaciones unitarias para cada una de las ocho direcciones principales (N, NNE, NE, ESE, E, ESE, SE y SSE) y para cada uno de los valores de β . Siendo lineal la ecuación del modelo que se resuelve, los resultados de las simulaciones que se efectúan considerando vientos del sector Norte son, en valor absoluto, iguales a las que se efectúan considerando vientos del sector Sur.

El modelo fue aplicado en los alrededores de las localidades de Gobernador Costa y Gral. San Martín, sobre un área de 25 km en la dirección Este-Oeste por 15 km en la dirección Norte-Sur. El espacio fue discretizado en la horizontal por medio de celdas cuadradas, nodos (i,j) , de 150 m por 150 m. Se consideraron siete niveles en la vertical, con un espaciamiento creciente con la altura (mayor resolución cerca de la superficie). Los niveles no son horizontales, ellos siguen la forma del terreno, constituyendo lo que se conoce como representación conforme.

Para obtener el campo de velocidades medias climáticas en cada punto de la región se efectúa una combinación lineal de los campos simulados para cada dirección principal. Los coeficientes de la combinación lineal son las frecuencias observadas en cada una de las direcciones. Como factor de escala se aplica la velocidad media observada en cada dirección a 10 m de altura (dado que el modelo ha sido inicializado considerando velocidades unitarias a 10 m). La expresión de esta combinación lineal (en cada nivel de resolución vertical k) es:

$$v^k(i,j) = \sum_{d=1}^{16} f_d Q_{d(i,j)}^k v_d;$$

siendo $v^k(i,j)$ los valores de la velocidad media en cada nodo (i,j) y en el nivel k , f_d la frecuencia observada en la dirección d ($d = N, NNE, EN, \dots$) a 10 m, $Q_{d(i,j)}^k$ el resultado obtenido con el modelo en el punto (i,j) y en el nivel k , inicializado con una velocidad unitaria y una dirección d y, v_d el valor medio de la velocidad observada a 10 m en la dirección d .

Para el cálculo de la potencia media, la expresión de la potencia teórica por unidad de área perpendicular al flujo del aire $P/A = \frac{1}{2} \rho v^3$ (ρ densidad del aire) puede aproximarse por:

$$P_{(i,j)}^k = a \sum_{c=1}^{24} \sum_{d=1}^{16} \left[f_{cd} \left(c Q_{d(i,j)}^k \right)^3 \right];$$

siendo $a = 0.65$, f_{cd} las frecuencias conjuntas de dirección por cada clase de velocidad, c cada clase de velocidad ($c=1, 2, 3, \dots, 24$) y $Q_{d(i,j)}^k$ como en la fórmula anterior.

Para cada uno de los criterios de estabilidad, se obtuvieron las distribuciones de frecuencia de velocidades por 16 direcciones f_d y frecuencias conjuntas por clases de velocidad (24) y clases de dirección (16) f_{cd} a 10 m sss. La cantidad de observaciones correspondientes a una atmósfera neutra fueron 39, a una atmósfera inestable fueron 1718, y a una estable 2603. Los campos medios de velocidad y potencia meteorológica a 30 m sss fueron calculados, primero, interpolando los resultados de las simulaciones en los niveles conformes a un nivel de 30 m constante sobre la superficie del terreno, y luego como una media pesada (por el número de observaciones) de los resultados de esta interpolación para cada clase de estabilidad.

En la Tabla I se muestran las velocidades medias observadas y computadas a 30 m por dos procedimientos. El método 1 que desconoce el efecto de la variación de estabilidad atmosférica y emplea un único valor de β , y el método 2 que considera tres clases de estabilidad. En la Tabla II se muestran los correspondientes resultados de las potencias medias meteorológicas computadas con los métodos 1 y 2 y la potencia media calculada a partir de las observaciones.

Tabla I

Velocidad (m/s) observada y computadas en el sitio de mediciones	
Observación a 30 m sss	8.8
Comp. 30 m (método 1)	8.2
Comp. 30 m (método 2)	8.4

Tabla II

Potencia meteorológica (W/m^2) observada y computadas en el sitio de mediciones	
Observación a 30 m sss	588
Comp. 30 m (método 1)	382
Comp. 30 m (método 2)	410

DISCUSIÓN

La necesidad de conocer como se distribuye el campo de viento en las proximidades del suelo en áreas con topografías irregulares (no solo para estudios del recurso eólico, sino también para estudios de difusión atmosférica, por ejemplo) hace aconsejable utilizar modelos de flujo que tengan en cuenta los efectos del terreno y la estabilidad atmosférica sobre la circulación del aire. Esto resuelve la imposibilidad física de efectuar mediciones "continuas" que reflejen cuantitativamente el comportamiento espacial y temporal del flujo del aire.

Sin embargo, existe una limitación en el uso del modelado numérico que consiste en el tiempo de computación necesario para efectuar las simulaciones (8760 simulaciones en el caso de considerar un año de observaciones horarias). Este tiempo depende además del tamaño y de la discretización del área de estudio y de otros parámetros propios del método numérico de resolución.

Como se indicó en el punto precedente, el método aquí empleado, la denominada técnica de recomposición de campos de viento, combina un número reducido de simulaciones numéricas con estadísticas obtenidas de las observaciones de viento (frecuencias por dirección y frecuencias conjuntas por dirección y velocidad) y temperatura.

Para obtener una estimación de la exactitud de los campos de velocidad extrapolados, la velocidad media computada con este método en el sitio de medición y a un nivel de 30 m fue comparada con la velocidad media observada. El procedimiento es válido ya que solo las estadísticas a 10 m intervienen directamente en el procedimiento de extrapolación.

El valor medio de la velocidad obtenido con el método 2 se aproxima más al valor observado que el obtenido con el método 1. Esta mejora se debe al hecho de considerar tres clases de estabilidad atmosférica, dado que los perfiles verticales del viento en función de la estabilidad describen más adecuadamente el comportamiento del viento en las capas bajas de la atmósfera.

Por otra parte, el cómputo de la potencia meteorológica por ambos métodos, tiende a subestimar el valor de la potencia media meteorológica observada. La diferencia en el método 1 es del 35 %, y en el método 2 se reduce al 30 %.

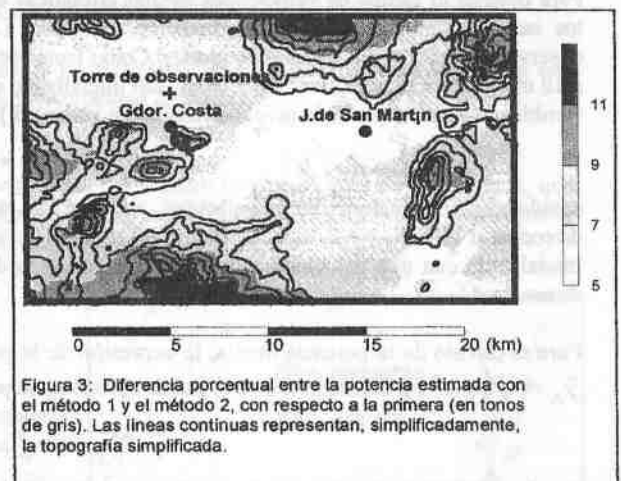
En la figura 3 se observa la distribución espacial de las diferencias porcentuales entre la potencia estimada con el método 2 y el método 1 con respecto a esta última. Se observa que diferencias superiores al 11% se corresponden con las topografías más altas, zonas, por otra parte, que se muestran como las más favorables para el aprovechamiento del recurso eólico.

Es conveniente recordar que en esta validación del método de estimación de los campos de velocidades y potencias se excluyeron velocidades de viento próximas a cero. En estos casos (períodos de calma o congelamiento de sensores), la variación vertical del viento no se ajusta a un perfil potencial, motivo por el cual fueron excluidos. Esto explica diferencias con valores reportados en [1].

Actualmente se investiga la utilización de otras fórmulas empíricas de variación del viento con la altura que permitan considerar todas las observaciones válidas de viento.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el método utilizado para la estimación de la potencia meteorológica en áreas con topografías complejas, variable fundamental en estudios de factibilidad de emprendimientos eólico-energético, al incorporar el efecto de la estabilidad atmosférica mejora apreciablemente los resultados.

No obstante, una verificación exhaustiva requeriría efectuar una campaña de mediciones de corta duración, con observaciones en varios puntos de la región y en varios niveles, especialmente en los sitios más favorables para el aprovechamiento del recurso (sitios por otro lado determinados gracias a una aplicación preliminar del método).



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Labraga J.C. y Frumento O.A. (1995) *Evaluación del recurso energía eólica en Gobernador Costa*, 151 pp, Centro Nacional Patagónico - CONICET, Puerto Madryn.
- [2] Traci R.M., Phillips G.T. and Patnaik P.C. (1978) *Developing a site selection methodology for wind energy conversion system*, DOE/ET/20280-79/3, NTIS, Springfield, Virginia.
- [3] Barros V.R., Labraga J.C. and Frumento O.A. (1990) *Statistics estimate of the near surface wind over complex topographies*, Wind Engineering, Vol XIV, N° 4, 275-285, Multi-Science Publishing Co, Essex.

INTRODUCCIÓN

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovables más abundantes y limpias que existen. Su aprovechamiento para la generación de electricidad y el calentamiento de agua es una de las alternativas más viables y rentables para el desarrollo sostenible de un país. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el recurso eólico en la zona de Gobernador Costa, provincia de Santa Cruz, Argentina, a fin de determinar su potencial y su idoneidad para la explotación energética.

Para ello se han seguido los siguientes pasos:

1. Caracterización del área de estudio.

Se ha realizado un estudio detallado de la zona de estudio, considerando sus características geográficas, topográficas y climáticas. Se ha obtenido información sobre la ubicación geográfica, el relieve, la vegetación y el clima de la zona.

2. Metodología.

