

# Tema 5 - Energía eólica, geotermia, biomasa y otras energías no convencionales

## APLICACIÓN DE LA MODELACIÓN FÍSICA EN LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS EN ZONAS DE TOPOGRAFÍA COMPLEJA

J.Cataldo<sup>1</sup>, V.Nunes<sup>2</sup>.

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

Julio Herrera y Reissig 565, 11200 Montevideo, Uruguay

Tel. 598 2 7113386 – Fax 598 2 7115277 e-mail: [jcataldo@fing.edu.uy](mailto:jcataldo@fing.edu.uy)

**RESUMEN** Para caracterizar el viento en zonas de interés, se realizan mediciones en un sitio de dicha zona. En ese sitio se caracteriza el clima de viento, correlacionando el resultado con medidas simultáneas en estaciones meteorológicas “cercanas”. El modelo físico de la zona considerada operado en túnel de viento permite conocer el efecto que producen las colinas sobre el viento, determinándose el incremento que sufriría el viento al pasar de un sitio de llanura a otro ubicado sobre la colina, así como la intensidad de la turbulencia que presentaría el flujo. Empleando los resultados de la modelación física y la caracterización del lugar de medición se caracteriza cada sitio. La modelación física, anidada con una modelación numérica, fue utilizada en una primera evaluación del potencial eólico nacional y los resultados obtenidos fueron verificados con numerosas mediciones de campo. Se presenta la evaluación realizada para la sierra de Caracoles, departamento de Maldonado.

**Palabras claves:** Energía eólica, Evaluación el potencial eólico, localización detallada de aerogeneradores en parque eólico

### INTRODUCCIÓN

Dentro de la política de diversificación de la matriz energética nacional, se ha propiciado la incorporación de la energía eólica como fuente para la generación de electricidad. Los estudios de evaluación de potencial eólico han cobrado importancia y el Grupo de Trabajo en Energías Renovables (GTER) ha retomado con intensidad este tema en el cual había realizado ya diversos estudios. Entre los mismos, se cita la evaluación del potencial eólico en Uruguay (Guarga et.al., 1990), utilizando una metodología de tipo anidado. En Cataldo y Nunes (1993) se presenta el mapa eólico correspondiente a viento de llanura que fuera completado en un segundo acuerdo firmado entre la empresa eléctrica nacional uruguaya (UTE) y la Universidad de la República. El programa de evaluación del potencial eólico a gran escala se completó con la ejecución de un proyecto financiado por el Programa BID-CONICYT (Nunes, et.al., 2001) que tuvo por objeto introducir la tecnología eólica al Uruguay, habiéndose instalado un aerogenerador de 150kW nominales, el cual fue adquirido, instalado, ensayado, operado y mantenido por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. En Cataldo y Nunes, 1996 se presenta un resumen de estas actividades. El GTER ha llevado adelante, al tiempo y luego de haber desarrollado el programa antes descrito, la evaluación del potencial eólico en varios sitios donde se analizó la factibilidad de instalación de aerogeneradores asociados a plantas industriales o emprendimientos comerciales utilizando medidas de corta duración.

### EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO EN URUGUAY

La determinación del potencial eólico en un sitio o una zona implica la caracterización del clima de viento en ese lugar. Usualmente, salvo raras excepciones, no se dispone de información meteorológica en los sitios adecuados para explotar el recurso eólico. Por tal motivo, surgen una serie de metodologías destinadas a caracterizar el clima de vientos en el lugar. Entre tales metodologías se destacan la medición en sitio, la metodología denominada Wind Atlas (CIEMAT, 2000), la aplicación de modelos numéricos, la aplicación de modelos físicos (Cataldo, 1990), o bien la aplicación en forma conjunta de ambos (López y Cataldo, 1993; Cataldo y López, 1995).

Entre las metodologías numéricas se identifican la aplicación de modelos de conservación de masa (Sherman, 1978), soluciones particulares del flujo en situaciones especiales (CIEMAT, 2000) y la modelación de flujos turbulentos.

La modelación física permite describir en forma acabada el flujo alrededor de zonas de topografía compleja, pero requiere de datos de campo que permitan deducir los valores de velocidad en los sitios que se analicen.

Respecto a las técnicas anidadas utilizan diferentes herramientas que permiten resolver el flujo a diferentes escalas.

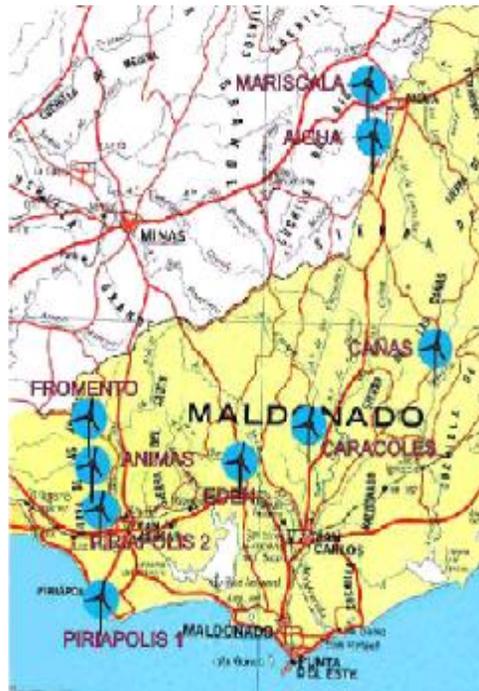
Para este estudio, se empleó una metodología desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República de tipo anidado. Se utiliza un modelo numérico de conservación de masa, que permite resolver el flujo a meso escala meteorológica, mientras que un modelo físico lo hace a la micro escala meteorológica. Se corre primero el modelo numérico y su salida se utiliza como condición de frontera del modelo físico. Esta metodología tiene como ventaja que,

además de permitir describir el flujo tanto a través de los valores medios como fluctuantes, posibilita cubrir grandes superficies sin que se deban realizar mediciones, así como reducir significativamente los tiempos requeridos para conocer el potencial eólico en extensas regiones respecto a lo que se requeriría si se efectuaran mediciones.

La aplicación del modelo numérico posibilitó conocer el viento de llanura en diversas regiones del Uruguay. Este modelo utilizó como dato la velocidad del viento relevada en estaciones meteorológicas de la Dirección Nacional de Meteorología de Uruguay y estaciones meteorológicas de diversas localidades de Argentina.

Este trabajo se inició con un análisis de calidad de los datos disponibles. Como resultado del mismo, se corrigieron series históricas de algunas estaciones y se dejaron de considerar otras. Se destaca que las mediciones de viento realizadas tanto por el GTER como por la Dirección Nacional de Energía verifican lo establecido en el mapa de vientos obtenido a partir de la aplicación del modelo numérico.

Para la evaluación del potencial eólico en zonas de topografía compleja, se utilizó la técnica de la modelación física a los efectos de conocer el efecto que producen las colinas sobre el viento. Se identificaron las colinas existentes, básicamente en el sur del país, que es donde se tienen las mayores velocidades medias de viento de llanura y que tuvieran laderas expuestas a los vientos de mayor frecuencia. Las zonas elegidas y modeladas se indican en la figura 1.



*Figura 1 – Zonas de topografía compleja analizadas.*

Para cada zona, se identificaron una serie de sitios en cada uno de los cuales podría ser instalado un aerogenerador. El espaciamiento de los puntos se eligió en el orden de 100m en la dirección perpendicular a la dirección de viento más frecuente y de 700 en dicha dirección. Operando el modelo físico en un túnel de viento, se dedujo el incremento que sufriría el viento al pasar de un sitio de llanura al sitio ubicado sobre la colina, para cada dirección de viento y para cada uno de los sitios seleccionados, para una altura de 30m sobre el terreno.

En la zona denominada Caracoles se hallaron incrementos de la velocidad media al pasar de la llanura a la cima de la colina del orden de 1.7, en la zona denominada Ánimas tales incrementos fueron del orden de 1.6 y en las demás colinas se encontraron valores por encima de 1.3.

En la figura 2, se muestra una comparación entre el histograma de velocidades medias calculadas a partir de la metodología aquí descrita y por otro lado a partir de mediciones realizadas in situ, durante una campaña conducida por la Dirección Nacional de Energía. Asimismo, se destaca que la velocidad media estimada a partir de la aplicación de la metodología y la calculada a partir de mediciones in situ, en Caracoles fueron 28km/h y 29.5km/h respectivamente,

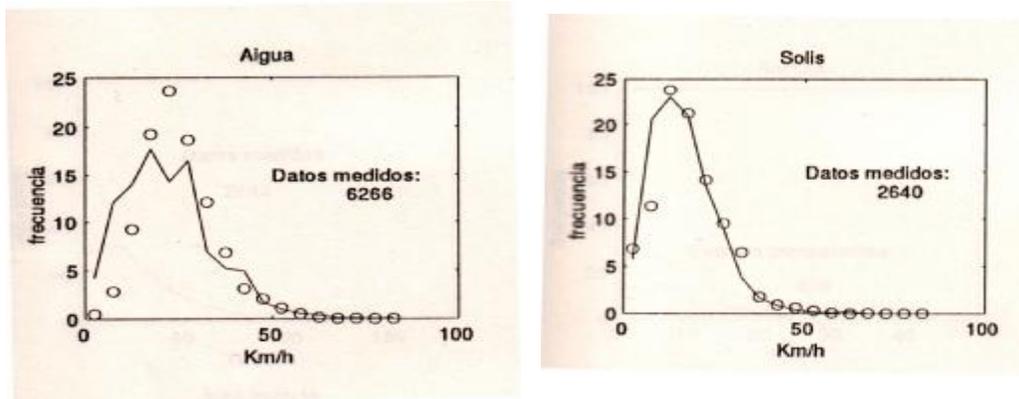


Figura 2 - Comparación entre histogramas.

mientras que en Sierra de Ànimas fueron 25.6km/h y 25.3km/h respectivamente.

En forma alternativa, el uso de los resultados en modelo físico podría combinarse con la realización de mediciones en un sitio de la zona de interés, en principio a una altura cualquiera sobre el terreno. Correlacionando el resultado de esta medición con el obtenido en una estación meteorológica cercana en forma simultánea, se podría luego extrapolar en el tiempo la medición en el sitio y así obtener una serie histórica de velocidad de viento. Asimismo, sería posible extrapolar en el espacio, pues el resultado en el túnel de viento permite conocer, para cada dirección de viento la relación entre el módulo de velocidad en diversos sitios, así como en diferentes posiciones en la vertical. En la figura 5, se presenta la distribución de velocidad media en altura para un sitio de la zona denominada Caracoles.

La modelación física de los flujos atmosféricos efectuada en túnel de viento presenta como principal restricción el simular una realidad con la misma realidad. En el caso de los flujos turbulentos, en especial cuando se analiza el escurrimiento de aire alrededor de una colina interesa modelar adecuadamente el flujo medio por consiguiente es necesario modelar en forma adecuada las componentes turbulentas que extraen potencia del flujo medio, es decir los vórtices que contienen energía. Como consecuencia, también se simula correctamente la intensidad de turbulencia, parámetro en extremo relevante para la explotación del recurso eólico. Esto lleva a adoptar como compromiso, por ejemplo, que las pequeñas escalas de la turbulencia no sean adecuadamente modeladas pero, dado que no interesa en esta oportunidad, conocer los efectos del flujo sobre componentes estructurales, no sería requerido modelarlas.

En Cataldo y Farell, 1992 se presenta el resultado de la modelación a escala 1/6000 de un flujo similar al viento que escurriría sobre un terreno tipo rural. En un terreno de este tipo a 30m de altura se tendría una intensidad de turbulencia de entre 15% y 16%, mientras que la escala de los vórtices que contienen energía a 120m de altura sería de 200m. En la mencionada modelación a una altura de 30m, a escala de prototipo, resulta una intensidad de turbulencia del 14% y los vórtices que contiene energía a 120m de altura, a escala de prototipo, tendrían una escala de 220m. Esta adecuada simulación permite concluir la adecuada simulación del proceso que el viento al escurrir alrededor de una colina.

## EVALUACIÓN DE POTENCIAL EN SIERRA DE CARACOLES

Con vistas a la instalación de un parque eólico de 10MW de potencia nominal, el GTER realizó medidas de viento en el cerro Caracoles durante un año para caracterizar el recurso eólico en ese punto. El anemómetro utilizado se instaló a 10m sobre el suelo y presentaba una constante de longitud de 5m, lo cual permitió caracterizar la componente turbulenta para velocidades medias por encima de 2m/s. Se utilizó una frecuencia de muestreo de 1Hz. El anemómetro fue adquirido ya calibrado.

En la figura 3, se presenta la distribución de frecuencias de ocurrencia de módulo y la rosa de vientos, así como un histograma de intensidad de turbulencia. En esta ocasión se midió una velocidad media en el periodo de medición de 8.8m/s. Las direcciones más probables resultaron la ESTENORESTE y la SUROESTE. La intensidad más probable sería del orden del 12%

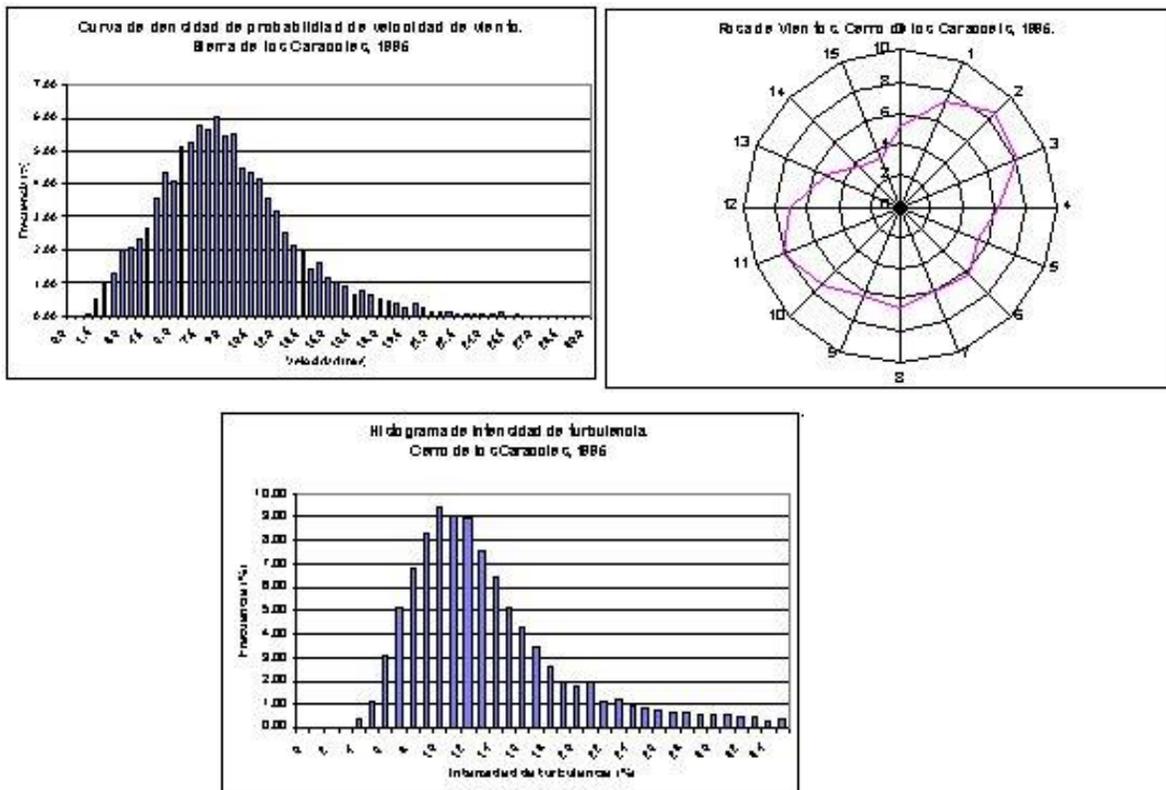


Figura 3 – Histograma de velocidades medias, rosa de viento y histograma de intensidad de turbulencia obtenido en el Cerro de los Caracoles en 1996

La extrapolación temporal de los resultados de las mediciones efectuadas en el Cerro Caracoles se realizó utilizando información obtenida en la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto de Laguna del Sauce.

Para la caracterización de la zona, se empleó la metodología desarrollada por el GTER. Se utilizó un modelo numérico del tipo de conservación de masa a los efectos de resolver el flujo en la meso escala meteorológica, en una grilla de 15km de paso y un modelo físico a escala 1/6000 para resolver el flujo a la micro escala meteorológica, al que se hiciera referencia en el capítulo anterior.

En el modelo físico, se dedujo el factor de incremento de velocidad al pasar de un sitio de llanura a un sitio sobre la cima del cerro para un punto a 30m del suelo, para cada dirección de la rosa de vientos, así como la intensidad de turbulencia. Sobre la cima se identificaron sitios separados una distancia de 93m en la dirección longitudinal de la Sierra como se muestra en la figura 4.

En la tabla 1, se consignan las distancias respecto al Cerro de los Caracoles (punto 24), el cual se supuso origen, en tanto que el sentido positivo se eligió hacia el NORNORESTE.

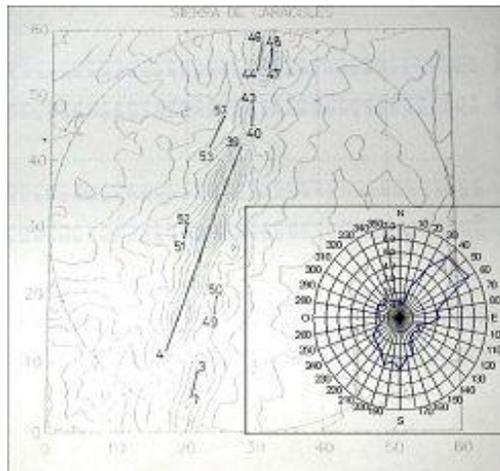


Figura 4 – Sitios donde se efectuó la medición en el modelo físico

4	-1877	16	-764	28	392
5	-1784	17	-671	29	485
6	-1691	18	-578	30	578
7	-1598	19	-485	31	671
8	-1505	20	-392	32	764
9	-1412	21	-279	33	857
10	-1319	22	-186	34	950
11	-1226	23	-93	35	1043
12	-1133	24	0	36	1133
13	-1043	25	93	37	1226
14	-950	26	186	38	1319
15	-857	27	279	39	1412

Tabla 1 – Ubicación de los sitios de medición.

Para cada uno de los sitios de interés definidos en la tabla 1, se calculó la distribución de probabilidad de ocurrencia de velocidad de viento.

En el modelo físico se relevó la distribución de velocidades media en altura. En la figura 5, se presenta el resultado de dicha medición, en la cual se observa que la velocidad media para alturas de entre 10m y 120m resulta sensiblemente constante, por lo que las distribuciones de velocidad calculadas podrían utilizarse para cualquier altura en el mencionado intervalo que cubre las alturas de eje de la mayoría de los aerogeneradores que se instalan en la actualidad.

Se destaca que una nueva medición efectuada en el mismo sitio donde se midiera y calculara la velocidad, pero a una altura de 40m sobre el suelo, da lugar a una velocidad media de 7.9m/s, lo cual resulta próximo a los valores antes referidos corroborando la distribución de velocidad media en la altura.



Figura 5 – Distribución de velocidad en altura sobre el Cerro de los Caracoles

## CONCLUSIONES

La metodología desarrollada por el GTER es una herramienta muy útil para la evaluación de potencial eólico en zonas de topografía compleja extendidas, donde la realización de campañas de mediciones no es aplicable por el tiempo necesario y está pensada en función de la información e instalaciones de laboratorio disponibles en el país.

La modelación física logra simular adecuadamente el flujo atmosférico que evoluciona alrededor de una colina.

A través de numerosas medidas de campo se han comprobado los resultados de la primera evaluación de potencial eólico de una vasta zona del país. La información que se presenta para el caso particular de Sierra de Caracoles permite realizar estudios de factibilidad de parques eólicos.

## BIBLIOGRAFÍA

Guarga, R. y Cisa, A., (1990), "Evaluación del potencial eólico nacional", Informe del acuerdo firmado entre la UTE y la Facultad de Ingeniería, IMFIA – IIE, Facultad de Ingeniería.

Cataldo, J., (1990) "Simulación de un flujo tipo capa límite atmosférica", XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo, Uruguay, 1990.

Cataldo, J. y Farrell, C., (1992), "Comparación entre simulaciones de flujos tipo Capa Límite Atmosférica a Escalas 1/500 y 1/6250", Cataldo, J., XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena, Colombia, 8-12 de setiembre de 1992.

Cataldo, J. and López, C., (1995), "Methodology developed for the wind power assessment in Uruguay", III Congreso Internacional sobre Energía, Ambiente e Innovación Tecnológica, Caracas, Venezuela, 8-11 de noviembre de 1995.

Cataldo, J., Nunes, V. (1993) "Evaluación del Potencial Eólico en el Uruguay a escala Industrial" Informe del acuerdo firmado entre la U.T.E y la Facultad de Ingeniería, IMFIA - IIE, 1992 – 1993

Cataldo, J. and Nunes, V., (1996), "Wind Power Assessment in Uruguay", Congress of WREN, Denver, USA, Junio, 1996.

CIEMAT (2000), Principios de conversión de la Energía Eólica”, Ed. CIEMAT, Madrid, pp.7.1-7.29.

López, C. y Cataldo, J., (1993), "Determination of the hourly wind speed field over complex terrain in Southern Uruguay", 1993 ECWEC, Lübeck - Tranemünden, Alemania, 8-12 de marzo de 1993.

Nunes, V. y Cataldo, J. (2001), Proyecto BID-CONICYT No 116 "Estudio de la factibilidad del uso de la energía de origen eólico: Implementación de una planta eólica piloto", 1996 -2001.

Sherman, C., (1978), "MATHEW – A mass consistent model for wind fields over complex terrain, Journal Applied Meteorology.

**ABSTRACT:** The wind velocity in zones of interest implies the measurement at one site inside it. The wind climate at this site with the correlation of "near" weather station is made. Running the physical model of the zone in an atmospheric wind tunnel the effect of gentle hill over the wind is deduced. The speed up for each site and for each wind direction is guessed. A first national wind power assessment, nesting the physical modeling in a mass conservative numerical model was performed. Several measurements campaigns results verified the aforementioned results. As alternative, wind measurement at one site could be used as alternative to the numerical model. The wind power assessment at Caracoles site, located in Maldonado department, is shown.

**Keywords:** Wind Power, Wind power assessment, Micrositing

## **1 - INTRODUCCIÓN**

## **2 - EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO EN URUGUAY**

## **3 - EVALUACIÓN DE POTENCIAL EN SIERRA DE CARACOLES**

## **4 - CONCLUSIONES**

## **5 - BIBLIOGRAFÍA**