

Despacho de parques eólicos: primeros avances sobre predicción de corta duración

A. Gutiérrez, P. Santoro, V. Nunes, *senior member, IEEE*, y J. Cataldo

Resumen— Dadas las características aleatorias peculiares del recurso eólico, el despacho de energía eléctrica proveniente de esa fuente presenta diferencias importantes con el despacho de la originada en fuentes convencionales. A efectos de profundizar la utilización de este recurso en la matriz energética nacional, es conveniente disponer de herramientas que permitan la predicción de corta duración, 24 a 72 horas, y de muy corta duración, en el entorno de tres horas. En este trabajo, se presentan los primeros avances en el desarrollo de una herramienta de predicción que se está realizando en la UDELAR.

Se describe las principales características del recurso en el país así como la modelación de la capa límite atmosférica que se utiliza en los distintos casos de interés. Se analiza el estado del arte en la predicción de la energía eléctrica generada de origen eólico y se describe la herramienta a desarrollar así como la estrategia elegida para la convalidación de la misma y la metodología de análisis de los resultados. Se presentan los primeros resultados obtenidos.

Palabras clave—energía eólica, despacho de parques eólicos, predicción de vientos de corta y muy corta duración.

I. INTRODUCCIÓN

El despacho de energía eléctrica proveniente de parques eólicos tiene características peculiares que dependen de la naturaleza aleatoria del recurso. Si bien la energía generada puede considerarse firme en períodos de por lo menos dos años, no es de potencia firme en el sentido atribuido a las energías convencionales.

Una primera condición es que la energía de origen eólico debe ser despachada cada vez que esté disponible. En ese sentido, los parques de muy pequeño porte se introducen en la red de distribución donde esa condición se cumple naturalmente. Los parques de gran porte, que aparecen cuando se profundiza la participación de este recurso en la matriz energética, se despachan con las otras centrales y su introducción en un sistema hidrotérmico como el de Uruguay, requiere cambios en la metodología de despacho que, en términos generales, han generado cierta resistencia en otros países al implementarse.

En efecto, en el caso de las plantas termoeléctricas, la decisión de la generación está sujeta a la disponibilidad del combustible y de la máquina, la generación pasa a ser una variable de control. Se recurre a las plantas de generación termoeléctricas para cubrir el déficit de generación de las centrales hidráulicas y eólicas.

La generación hidráulica depende de las precipitaciones en las cuencas y de la capacidad de regulación del lago. La cantidad de energía acumulable depende de la capacidad de acumulación de agua en los embalses. La generación de energía de las centrales hidráulicas tiene una alta variabilidad interanual, pudiendo los caudales medios llegar a variar hasta

un 60% de un año al otro tanto en el río Uruguay como en el Negro.

El disponer de herramientas razonablemente confiables que permitan la predicción de energía de origen eólico de corta duración, 24 a 72 horas, y de muy corta duración, en el entorno de tres horas, es muy deseable y útil para realizar el despacho de manera óptima. En este trabajo, se presenta los avances realizados en la formulación de una herramienta de predicción.

II. FLUJO ATMOSFÉRICO Y FENÓMENOS LOCALES

El potencial eólico de un sitio en particular se describe a partir de los parámetros significativos que caracterizan el flujo atmosférico o sea la velocidad media, la distribución de probabilidades de velocidad y dirección de viento, y la turbulencia (CIEMAT Martín, 1997), que constituyen el clima de vientos. Asimismo es necesario caracterizar la interacción entre este flujo y un aerogenerador que se instale, haciendo hincapié en la energía eléctrica generada e inyectada a una red eléctrica. Desde el punto de vista del recurso eólico interesa conocer las características del flujo en la capa límite atmosférica ya que los aerogeneradores de mayor porte y potencia construidos en la actualidad para aprovechamientos conectados a la red, que se encuentran en una etapa de desarrollo comercial disponen de torres de entre 30 y 160 metros de altura.

En este sentido será de relevancia disponer de información sobre las características del flujo en capa límite atmosférica, sobre todo para alturas correspondientes al área barrida por las palas del aerogenerador. La forma en que la velocidad del viento varía con la altura depende del transporte vertical de cantidad de movimiento de las capas altas de la atmósfera hacia las bajas, lo cual se produce por medio de la turbulencia atmosférica, la cual depende a su vez del estado termodinámico de la atmósfera y de la rugosidad de la superficie del terreno. Muchas aplicaciones de la energía eólica son factibles debido a la existencia de fenómenos locales, los cuales provocan un aumento de la velocidad media en algunas zonas del terreno. Tanto la existencia de topografía compleja, así como de diferencias de rugosidades en el entorno de un sitio o diferencias en propiedades termodinámicas, pueden generar condiciones favorables para la explotación del recurso eólico.

Un fenómeno significativo en la determinación del recurso eólico en Uruguay es la brisa marina, este fenómeno es causado por la diferencia que existe entre la capacidad calorífica del Río de la Plata o el Océano Atlántico y la del

continente terrestre. Al salir el sol, la temperatura de la masa terrestre comienza a elevarse a una rapidez superior que la masa de agua. Luego de un cierto tiempo en torno a medio día, el aire que está sobre la masa terrestre comienza a elevarse succionando el aire más frío que está sobre la masa de agua cercana. Durante la noche la temperatura de la masa terrestre desciende más rápidamente que la de la masa de agua por lo cual luego de algunas horas desde la puesta del sol, el aire sobre la masa oceánica comienza a elevarse circulando un flujo de aire frío desde la tierra hacia el mar.

Singularidades topográficas tales como quebradas, pueden provocar una contracción del flujo en ciertas direcciones. La presencia de una colina transversal a las direcciones de viento más probables provoca la contracción de las líneas de flujo y por consiguiente un incremento de la velocidad media. Asociados a sitios de topografía compleja, debido a las contracciones de flujo para las distintas direcciones, se generan gradientes de velocidades dependientes de la dirección del viento, pudiéndose producir vórtices y turbulencia las cuales resultan no deseables para el aprovechamiento energético.

La modelación de sitios de topografía compleja resulta de utilidad para la evaluación del recurso eólico. El efecto que la colina produce sobre el flujo se caracteriza a través del coeficiente de incremento de velocidad (speed up) (Scanlan, 1985). Este incremento cambia con la dirección del viento, como se puede ver en la figura 1, y en (1).



Fig 1. Sierra de los Caracoles, sitio donde se instalará un parque de 10 MW.

$$S_i = \frac{V_{colina}}{V_{llanura}} \quad (1)$$

Dichos factores de incremento de velocidad pueden ser deducidos a partir de la modelación física en túnel de viento (Cataldo, 1994).

III. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL RECURSO EÓLICO

La caracterización del funcionamiento de un aerogenerador en términos de la generación de energía eléctrica, se representa a través de su curva característica. En la misma, se presentan los valores de potencia en función de la velocidad media a la altura del eje. Para la determinación de estas curvas de potencia se dispone de la norma IEC 61400-12. La curva característica se define para un valor de velocidad media a la altura del eje, pero sobre la superficie de barrido del rotor de

un aerogenerador se tiene una distribución de velocidades la cual si bien en dirección horizontal podrá ser uniforme en la vertical suele no serlo. En un instante dado, la potencia generada dependerá de esa distribución de velocidades. La energía por unidad de volumen de corriente de aire que circula a una velocidad v es igual a la energía cinética.

$$e = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

La potencia disponible en un flujo de aire que circula a una velocidad v , través de una cierta superficie A es igual a:

$$P_d = \int_A \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot \vec{v} \cdot d\vec{s} \quad (3)$$

Suponiendo que v es uniforme en A , se tiene que la potencia disponible es igual a:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4).$$

En el caso de un aerogenerador, se tiene que la energía que potencialmente se encuentra disponible en un cierto periodo de tiempo es igual a:

$$E = \int_{\Delta t} \frac{1}{2} \rho A v^3 dt \quad (5)$$

Se tiene entonces que la potencia media disponible en un cierto periodo de tiempo Δt es igual a:

$$\overline{P_d} = \frac{1}{2} \rho A \overline{v^3} \quad (6)$$

Siendo A el área barrida por las palas. Si la velocidad del viento en un instante dado, se escribe como velocidad media más una fluctuación

$$v = \bar{v} + v' \quad (7)$$

se tiene que

$$\overline{v^3} = \bar{v}^3 + 3\bar{v}\overline{v'^2} + \overline{v'^3} \quad (8).$$

La media de la velocidad al cubo, puede ser menor que el cubo de la velocidad media. Se define el coeficiente de potencia (Le Gourieres, 1982), C_p para un aerogenerador como:

$$C_p = \frac{Mw}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (9).$$

IV. LA PREDICCIÓN Y SU APOORTE AL DESARROLLO DE LA ENERGÍA EÓLICA

La generación de energía eléctrica a partir de la energía eólica, presenta variaciones muy bajas en términos inter anuales y grandes fluctuaciones horarias. Esta peculiaridad, es la que justifica la aplicación de herramientas de predicción

para bajar la incertidumbre y planificar el despacho de las centrales diariamente. El desarrollo de la predicción permite aumentar el índice de penetración (Ackermann, 2005) de la energía eólica en el sistema. A los efectos de visualizar la permanencia anual y las fluctuaciones de la energía eólica se presenta, en la figura 2, la velocidad media anual en el aeropuerto de Carrasco Montevideo, desde 1992 hasta 2002, y por otro lado, en la figura 3, la modelación de la generación horaria de un parque eólico de 14,5 MW en la Sierra de los Caracoles.

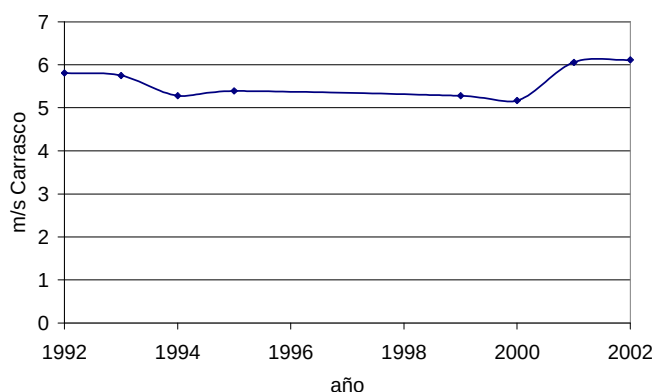


Fig 2. Velocidad media anual en Aeropuerto Carrasco, Montevideo.

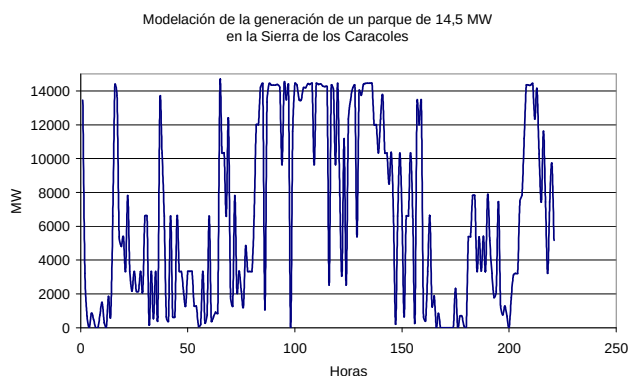


Fig 3. Modelación de la generación horaria de un parque de 14,5 MW a partir de datos de viento a altura del eje en Sierra de Caracoles.

En la modelación de la generación del parque eólico se utilizaron los coeficientes de speed up, calculados a partir de un modelo físico en túnel de viento y por otro lado se utilizaron curvas de generación de distintos aerogeneradores. La caída de la generación por el fenómeno de estela se modeló como una pérdida de cantidad de movimiento y una consiguiente atenuación en la velocidad media (Han, 2006).

V. ESTADO DEL ARTE EN LAS HERRAMIENTAS DE PREDICCIÓN

La necesidad de lograr mayores niveles de penetración de la energía eólica en los sistemas, en el marco de la situación actual, ha motivado la realización de importantes esfuerzos en los países con más utilización de esta fuente, para desarrollar

herramientas de predicción. Un ejemplo significativo es el proyecto ANEMOS (ANEMOS, 2007), desarrollado dentro de la Unión Europea con el objeto de lograr predicciones de corta duración (short-term forecasting).

El horizonte temporal es muy importante en la modelación, se tienen las predicciones: de corta duración (24-48-72 horas) y las de muy corta duración (hasta 3 horas). En el caso de corta duración, se utilizan modelos numéricos de base física como el WRF con posterior procesamiento estadístico (Model Output Statistics, MOS). En el caso de las predicciones de muy corta duración, se tienen los modelos puramente estadísticos que se basan en la persistencia de condiciones meteorológicas. (Lange, 2005).

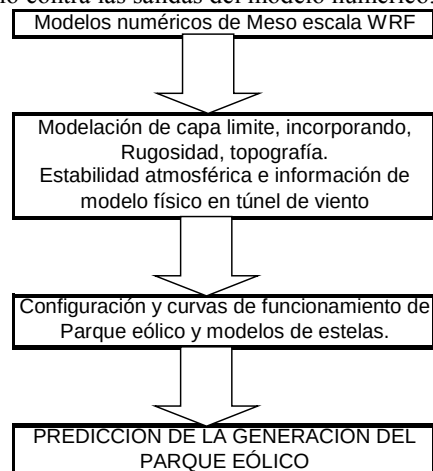
Por otro lado a partir del conocimiento de ciertos fenómenos físicos tales como la estratificación de la capa límite, o el conocimiento de los factores de speed up, se pueden corregir las relaciones estadísticas de los MOS.

VI. ESTRATEGIA ASOCIADA AL DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE PREVISIÓN

Se plantea seguir la estrategia de avanzar el conocimiento de la modelación de los fenómenos físicos en particular en la capa límite, y por otro lado verificar la posibilidad de corregir las salidas del WRF, mediante modelos MOS.

Se seleccionarán tres tipos de sitio con peculiaridades: terreno plano, un sitio donde se presente el fenómeno de brisa marina, y terreno con topografía compleja.

Para la validación de la herramienta de predicción, se instalarán torres de medición en los tres tipos de sitio de manera de disponer de datos de velocidad de viento, gradiente de temperaturas y velocidad, para calcular el número de Ri y L. Por otro lado en el caso del sitio de topografía compleja se plantea una modelación en túnel de viento de tal forma de disponer de información sobre el flujo en dicha topografía y contrastarlo contra las salidas del modelo numérico.



La vinculación entre el viento geostrófico y el flujo en la capa

límite está dada por la velocidad de fricción u_* (Lange, 2005). El viento geostrófico se calcula como (10), siendo (11) la amplitud y (12) la diferencia entre la dirección del viento en la capa límite y (18).

$$\vec{G} = \frac{1}{f\rho} (\nabla p \times \vec{k}) \quad (10)$$

$$|G| = \frac{u_*}{k} \sqrt{\left(\ln \left(\frac{u_*}{fz_o} \right) - A \right)^2 + B^2} \quad (11)$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{-Bu_*}{k|G|} \quad (12)$$

A y B son constantes que dependen de las características locales, para el caso del European Wind Atlas se toma $A = 1.8$ y $B = 4.5$.

VII. PRIMEROS RESULTADOS OBTENIDOS.

Se compararon mediciones de la intensidad y dirección del viento en Sierra de Caracoles con pronósticos cada tres horas y con un horizonte temporal de 96 horas obtenidos a partir del modelo WRF (Skamarock, 2005). Se observó que el pronóstico no se deteriora sustancialmente con la antelación (24-48-72 horas). Se obtuvo una muy buena representación de la dirección del viento. En cuanto a la intensidad, se realizó en primera aproximación un ajuste lineal para cada hora del día, durante enero 2007. El mismo se aplicó a las componentes, meridional (Norte-Sur) y zonal (Este-Oeste) pronosticadas, luego a partir de éstas se calculó la intensidad “corregida”.

En las figuras 4 y 5, se presentan las series de intensidad y dirección de viento durante enero de 2007 medidos en Sierra de Caracoles y pronosticados por el modelo. Luego de aplicar el ajuste lineal mencionado, la representación obtenida es satisfactoria. La correlación entre las series medidas y ajustadas para cada hora del día muestran valores siempre superiores a 0,7.

Sin embargo, estos resultados son preliminares y constituyen una primera aproximación a la corrección por MOS. Existe la necesidad de estudiar la validez de los coeficientes de calibración obtenidos aplicados a otras muestras (verificar que no se tiene un “skill artificial”), y a su vez es posible considerar otras técnicas de corrección.

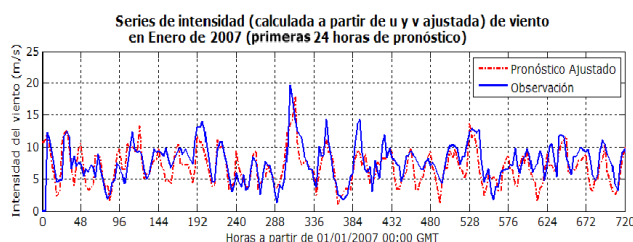


Fig 4. Medidas y modelo de intensidad de velocidad de viento en Sierra de Caracoles.

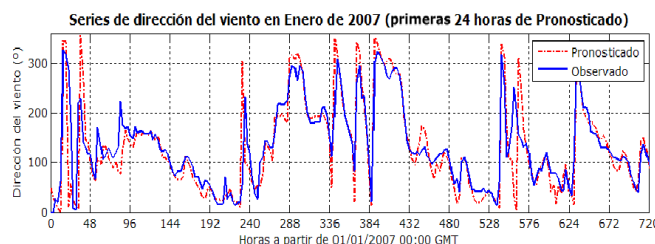


Fig 5. Medidas y modelo de la dirección de velocidad de viento en Sierra de Caracoles.

VIII. CONCLUSIONES.

La validación de una herramienta de predicción de la generación de un parque eólico se puede realizar a partir series históricas de medidas de velocidad y dirección de viento contrastadas con las salidas de un modelo numérico de base física al cual se le hace un post procesamiento estadístico de MOS.

La aplicación de una primera aproximación de MOS que consistió en un ajuste lineal para cada hora del día a los pronósticos de viento en 10m obtenidos con el modelo WRF muestra una predicción satisfactoria de la intensidad y dirección del viento. Se destaca la buena predicción en la dirección del viento (sobre la cual no se aplicó ninguna corrección), esto facilita la posible aplicación de la modelación en túnel de viento.

La correlación entre la predicción del MOS en términos de la intensidad de la velocidad de viento y los valores medidos para cada hora del día es siempre superior a 0,7.

La Utilización de la Modelación Física en Túnel de Viento en sitios de topografía compleja sobre las salidas del Modelo WRF, requiere profundizar el análisis de la relación entre la capa límite simulada y la real en el sitio.

Se plantea a partir de los coeficientes de correlación lineal horarios obtenidos, evaluar la capacidad de predicción del modelo WRF, con estos parámetros o a partir de una actualización de los mismos atendiendo a las observaciones realizadas al final de la sección 6.

IX. BIBLIOGRAFÍA.

Reportes Técnicos

1. J. Cataldo V. Nunes y otros, “Cuantificación del potencial eólico del Uruguay Aplicable a la generación eléctrica en gran escala” Convenio UDELAR-UTE 1994.
2. ANEMOS, “The State-Of-The-Art in Short-Term Prediction of Wind Power A Literature Overview”, 2001, UE
3. ANEMOS Estudio sobre la predicción de energía eólica en la UE, Mayo 2007, IDAE, España
4. Informe de Pasantía-Ingeniería Civil Perfil Hidráulico Ambiental, UDELAR. Pablo Santoro. Tutores: Ing. Gabriel Cazes. Ing. Gabriel Usera 2007.
5. IEC 61400-12, “Wind turbine generator systems. Wind turbine power performance testing”, 1ª Edición. 1998-02.

Libros

6. Matthias Lange, Ulrich Focken, "Physical Approach to Short-Term Wind Power Prediction" 2005 Springer, Oldenburg, Germany.
7. Désiré Le Gourieres: "Energie Eolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations" 10^e Edition, 1982, EYROLLES, Paris, Francia.
8. Plate, "Engineering Meteorology" 1982, New York, USA.
9. CIEMAT, Serie Ponencias: Principios de Conversión de la Energía Eólica. 2^o Edición, 1997, Madrid, España.
10. Burton, Sharpe, Jenkins ; Bossanyi ; " Wind Energy Handbook" 2001, JOHN WILEY & SONS, LTD
11. RISO " Guideline for design wind turbines" 2002, Denmark.
12. Skamarock, Klemp, Dudbia, Gill, Barker, Wang, Powers, "A description of the Advanced Reserch WRF Version 2" June 2005, NCAR Technical Notes
13. Erich Han, "Wind turbines", 2006, Springer, Germany.
14. Thomas Ackermann, "Wind power in power systems" 2005, Jhon Wiley & Sons, England.
15. R. Gasch, J. Tvele: "Wind Power Plants, Fundamentals, Design, Construction and Operatió". 2002. SOLARPRAXIS, Berlin, Alemania.
16. C. G. Justus: "Wind and Wind System, Performance".1978. THE FRANKILN INSTITUTE PRESS, Pennsylvania, USA.
17. Roland B. Stull: "Meteorology for Scientists and Engineers". 2^o Edición. 2000, BROOKS/COLE, USA

X. BIOGRAFÍAS

Alejandro Gutiérrez nació en Salto Uruguay el 6 de agosto de 1976. Obtuvo el Título de Ingeniero Industrial Mecánico en el año 2002.

Participo del equipo de la Dirección Nacional de Energía del Ministerio de Industria Energía y Minería durante el periodo 2005-2008.

Desde el año 2000 hasta la fecha desempeña tareas en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería

Pablo Santoro nació en Montevideo Uruguay el 16 de abril de 1984. Obtuvo el Título de Ingeniero Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en el año 2008.

Desde el año 2007 hasta la fecha desempeña tareas como ayudante en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería.

Ventura Nunes (M'1992, S'2005) es egresada de la Facultad de Ingeniería, UDELAR, con el título de Ingeniero Industrial que revalidó posteriormente por el de Ingeniero Electricista. En la actualidad, es Profesora Titular del Instituto de Ingeniería Eléctrica y corresponsable del Grupo de Trabajo en Energías Renovables. Ha dirigido diversos proyectos con financiación nacional e internacional sobre energía y energización rural.

José Cataldo. Nació en Montevideo, Uruguay el 24 de agosto de 1961. Se graduó de Ingeniero Industrial, opción Mecánica en 1986 e inició su actividad en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República donde ocupó cargos de Asistente, Adjunto, Agregado y Profesor Titular en Régimen de Dedicación Total. Realizó la Maestría y el Doctorado en Mecánica de los Fluidos Aplicada en la misma Facultad. Su especialidad es Hidromecánica e Ingeniería del Viento. Es responsable de las actividades que se desarrollan en la Facultad de Ingeniería en Ingeniería del Viento y Energías Renovables, contándose entre los proyectos realizados el diseño y construcción de un túnel de viento, la realización de ensayos aerodinámicos y aeroelásticos de estructuras, estudios de confort eólico, estudios de evaluación del potencial eólico, estudio de vibraciones en turbomáquinas. Su actividad en el ambiente profesional se desarrolla en el área de dispersión de contaminantes atmosféricos y en el estudio de procesos con movimiento de aire como **son** el secado y la ventilación de grandes ambientes.