

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA INSTALACIÓN DE AEROGENERADORES EN PLANTAS INDUSTRIALES Y ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD DE LA FACTIBILIDAD.

J. Cataldo¹, V. Nunes².

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo 11300, Uruguay - Tel. 598 2 7113386 – Fax 598 2 7115277
e-mail: jcataldo@fing.edu.uy

RESUMEN: La utilización del recurso eólico para generación de electricidad asociada a plantas industriales o grandes centros comerciales que disponen de un potencial eólico explotable se presenta en Uruguay como una alternativa técnica y económicamente viable. Los generadores se conectan a la red nacional y son vistos por ésta como auto-productores que comercializan sólo los excedentes de energía. En estos casos, la caracterización del lugar puede realizarse a partir de medidas de corta duración en el sitio, correlacionándolas con medidas simultáneas en estaciones meteorológicas cercanas. Se obtiene como resultado series históricas de velocidad de viento que junto con las curvas de demanda de energía eléctrica de la planta y las tarifas aplicables a la misma permiten realizar el estudio de factibilidad de la instalación de aerogeneradores. Dada la fuerte sensibilidad de los resultados económicos con el recurso disponible, un cuidadoso estudio de calidad de datos debe ser implementado. Como aplicación, se presenta el estudio realizado en diversas plantas industriales.

Palabras clave: Energía Eólica, Generación distribuida, Evaluación del potencial eólico

INTRODUCCION

La energía eólica es la energía cinética que presentan las masas de aire en movimiento. La potencia disponible en una masa en movimiento resulta directamente proporcional a la densidad del fluido, al área de la superficie que atraviesa el flujo y al cubo de la velocidad del fluido. Como consecuencia sitios ubicados a nivel del mar y en zonas frías presentarán una mayor potencia disponible que zonas de gran altitud y tibias, para las mismas velocidades. Se destaca también que el flujo de potencia de una corriente aumenta con el área de la superficie de la sección recta del tubo de corriente. Esta característica ha sido considerada por los aerogeneradores modernos los cuales presentan superficies barridas por el rotor que han sido progresivamente incrementadas. Pero el parámetro más significativo resulta la velocidad del viento, dado que el flujo de potencia depende del cubo de ese parámetro. Sin embargo, el nivel de turbulencia del flujo en el sitio actúa disminuyendo la energía disponible. Debido a esto, los sitios más adecuados para la explotación del recurso eólico resultan aquellos donde la velocidad del viento es elevada y el nivel de turbulencia moderado.

Estas peculiaridades del flujo atmosférico han llevado a seleccionar los sitios donde explotar el recurso eólico básicamente en dos tipos de terrenos. Por un lado, zonas de orografía compleja, con relativamente bajas pendientes. En estos terrenos se dispone de una velocidad de viento elevada en la cima de las colinas, mientras que si las pendientes son bajas se evita la ocurrencia de separación de capa límite y la consiguiente producción de turbulencia. Por otro lado, zonas próximas al mar, o bien, mar adentro. En este caso, debido al bajo nivel de rugosidad del terreno, se tiene, para una altura dada, una velocidad de viento mayor que la que se registraría sobre la tierra, y además una muy moderada turbulencia así como escalas integrales de la turbulencia significativamente mayores. Esta última peculiaridad, también ha llevado a tener que espaciar algo más los aerogeneradores a los efectos de evitar la interferencia aerodinámica Rados, et.al., 2001.

La explotación del recurso eólico es factible realizarla a diversas escalas. La gran escala se refiere a la explotación del recurso eólico en centrales de generación conformadas por un conglomerado de aerogeneradores a las cuales se suele denominar parques eólicos. Esta modalidad de explotación se orienta a proveer de energía eléctrica a sistemas interconectados por lo que su instalación se realiza siguiendo los indicadores presentados en el párrafo anterior, es decir, se ubican en zonas con la mayor velocidad media del viento posible y baja turbulencia. Estos proyectos suelen ser de alcance nacional para un país y deberían tener en cuenta aspectos conexos tales como los beneficios ambientales que introduce, la ocupación de mano de obra que inducen y su factibilidad se analiza comparando con otras alternativas energéticas. La denominada escala industrial, que es a la cual se refiere este trabajo, se orienta a la explotación del recurso eólico destinado a la producción de electricidad para volcarla a una instalación industrial. En este caso, la explotación del recurso eólico se efectúa próxima al sitio de utilización, los equipos se conectan a la red eléctrica de distribución y la selección y dimensionado de los mismos se debe realizar atendiendo al recurso eólico disponible en ese sitio, así como a la curva de carga de la planta industrial. Finalmente, debe citarse la denominada escala autónoma de explotación del recurso eólico, lo cual significa que la energía eléctrica generada a partir del recurso eólico disponible en el sitio se vuelca a un sistema aislado de la red eléctrica.

La tecnología eólica ha evolucionado fuertemente en los últimos años. Este avance se percibe en el incremento del diámetro de los rotores asociado al desarrollo de materiales y de metodologías constructivas que permiten lograr resistencias mecánicas compatibles con las solicitaciones que impone el viento, sin que el peso de las palas aumente significativamente.

² Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República – Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo 11300, Uruguay - Tel. 598 2 7110974 – Fax 598 2 7115277, e-mail: nunes@fing.edu.uy

Esto ha llevado al desarrollo de líneas de aerogeneradores de cierta potencia nominal con rotores de diferentes dimensiones y características aerodinámicas, lo cual permite el aprovechamiento del recurso eólico en sitios con diversos climas de viento. También se destaca el desarrollo en los sistemas de regulación de potencia incorporando la tecnología de la velocidad variable, lo cual permite que la máquina opere en condiciones de rendimiento máximo para un amplio intervalo de velocidades de viento.

CARACTERÍSTICAS DE LA EXPLOTACIÓN A ESCALA INDUSTRIAL

La principal característica de la explotación del recurso eólico a escala industrial es la fuerte heterogeneidad. Esto se verifica tanto desde el punto de vista de la curva de carga de la planta industrial, de la disponibilidad del recurso eólico en el sitio como del esquema de utilización de la energía eléctrica generada. En especial, alrededor del segundo punto se pueden identificar dos esquemas de utilización. Por un lado, el esquema denominado de autoprodutor se refiere a que el aerogenerador se instala para, básicamente, aportar la energía eléctrica a la planta industrial, tomándose de la línea de distribución de energía eléctrica los déficits o aportando a la misma los superávits. En la figura 1, se presenta en forma esquemática tal tipo de esquema de utilización.

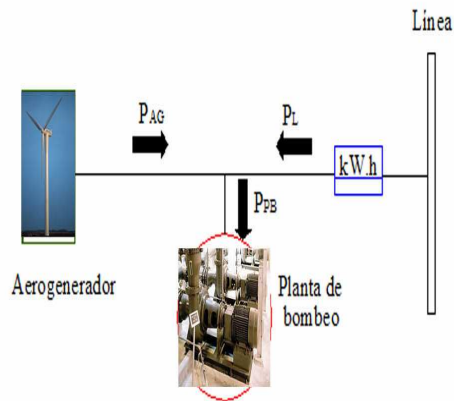


Figura 1: Esquema de autoprodutor

El otro esquema de utilización es el denominado de generación distribuida, en cuyo caso la energía eléctrica generada por el aerogenerador es aportada a la línea de distribución. En este caso, la planta industrial seguiría tomando toda la energía requerida desde la línea de distribución.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO

En general, en los sitios donde se debe evaluar el potencial eólico no se conoce el clima de viento. Por tal motivo, debe aplicarse alguna metodología para conocer el potencial eólico. Entre tales técnicas puede ser mencionada la medición de corta y de larga duración (CIEMAT, 2000), la aplicación de modelos numéricos, entre los cuales se destacan los modelos analíticos (CIEMAT, 200), los modelos de conservación de masa (Sherman, 1978) y los modelos del flujo, los modelos físicos y los modelos de tipo encajonado que utilizan diversos modelos que permiten resolver el flujo atmosférico a distintas escalas (López y Cataldo, 1993, Cataldo y López, 1995).

En los casos que se presentan se ha utilizado la medición de corta duración. Esta metodología consiste en efectuar una medición del parámetro viento con una duración de entre tres y cinco meses en el sitio donde se efectuará la evaluación del potencial eólico. La medición de módulo y dirección de viento se efectúa en un mástil cuya altura (ver figura 2), en primera instancia, debería ser igual a la altura del eje del aerogenerador que se instalará.

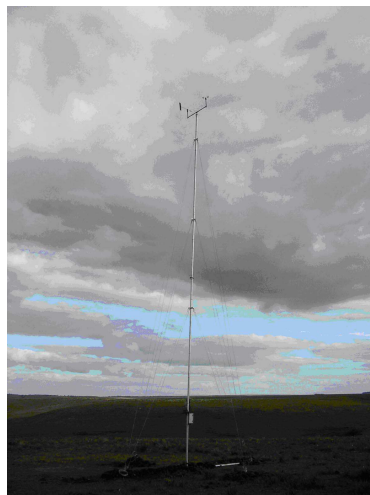


Figura 2: Anemómetro y veleta instalado en mástil

En caso que el terreno sea poco accidentado y uniforme alrededor de la instalación se podría efectuar la medición a una altura diferente. En dicho caso, el cálculo de la velocidad a diferentes alturas podría efectuarse con una ley de tipo logarítmico tal como la presentada en la ecuación 1.

$$U = \frac{u^*}{k} L \left(\frac{Z-d}{Z_0} \right) \quad (1)$$

Donde U es la velocidad media a la altura Z, u* la velocidad de fricción, d la altura del plano de desplazamiento nulo y Z₀ la longitud de rugosidad. Para dos puntos en la misma vertical se cumplirá que

$$\frac{U}{U'} = \frac{L \left(\frac{Z-d}{Z_0} \right)}{L \left(\frac{Z'-d'}{Z_0} \right)} \quad (2)$$

La evaluación del potencial eólico requiere de series históricas lo más largas posibles, no debiendo ser menores a un año y si es posible de al menos tres a cuatro años. Esto se debe a que, como se observa en el espectro de la fluctuación del viento, se observan componentes espectrales con periodos de un año y aun mayores. La forma de obtener tal serie histórica en el sitio de interés es realizar una extrapolación de la medición efectuada, correlacionando la medición con datos obtenidos, en el mismo periodo de medición, en una estación meteorológica “cercana”.

Si bien no se puede brindar una definición precisa de “cercana” en términos de distancia, significa que es posible despreciar el efecto de la aceleración de Coriolis y así suponer que tanto en la estación meteorológica como en el sitio la velocidad tendría la misma dirección. Ahora bien, esta aproximación no contempla la existencia de factores de micro escala meteorológica, tales como abras, montes de árboles u otros obstáculos que puedan afectar significativamente la dirección y módulo del viento. En caso que existan tales singularidades, se debería tener en cuenta el efecto físico que tiene el factor identificado sobre el viento, cuando se realiza la correlación. A modo de ejemplo, en caso de existir en el sitio de interés un accidente orográfico que induce una velocidad del viento en una dirección dada cuando el mismo sopla desde un cuadrante determinado, entonces se debería correlacionar los vientos de dicho cuadrante medidos en la estación meteorológica con los vientos de la dirección inducida por tal accidente en el sitio de interés. Asimismo, esta misma correlación que se plantea para los módulos debería efectuarse para las direcciones de viento con las mismas consideraciones. Comparando las figuras 3 y 4 se puede apreciar la diferencia en el resultado de la correlación.

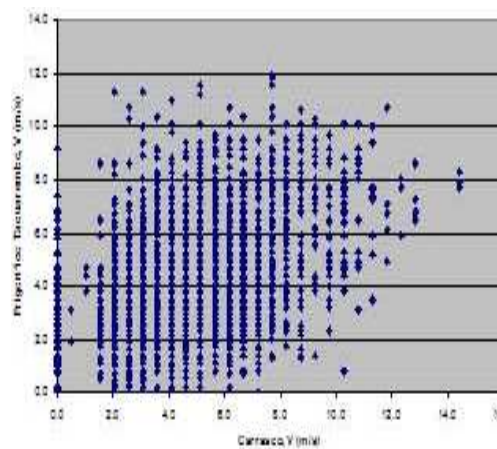


Figura 3: Correlación sin tener en cuenta accidente orográfico

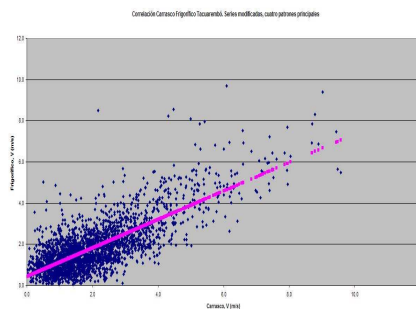


Figura 4: Correlación contemplando la existencia de accidente orográfico

$$C_j = \frac{\langle (v_{s_i}(d_j) - \langle v_{s_i}(d_j) \rangle) \rangle \langle (v_{EM_i}(d_j) - \langle v_{EM_i}(d_j) \rangle) \rangle}{\langle (v_{s_i}(d_j) - \langle v_{s_i}(d_j) \rangle) \rangle \langle (v_{EM_i}(d_j) - \langle v_{EM_i}(d_j) \rangle) \rangle}^{1/2} \quad (3)$$

La ecuación 3 presenta la forma en que se estimaría el coeficiente de correlación entre la velocidad medida en la estación meteorológica (EM) y en el sitio (s) para la dirección de viento d_j . Este parámetro es luego utilizado para extrapolar la serie histórica obtenida en el sitio a partir de la serie histórica de larga duración que se dispone en la estación meteorológica.

Conociendo la serie histórica de velocidad de viento a la altura del eje del aerogenerador es posible obtener la serie histórica de potencia eléctrica generada por el mismo y conocer los diferentes parámetros que caracterizarían tal producción. En especial, el denominado factor de capacidad (FC), que se define como el cociente entre la potencia media generada en el periodo y la potencia nominal del aerogenerador analizado. Se destaca que para ello debe conocerse la curva característica del aerogenerador. En la figura 5, se presenta una curva característica Potencia – Velocidad del viento de un aerogenerador con una potencia nominal de 500kW y una velocidad de viento nominal de 14m/s.

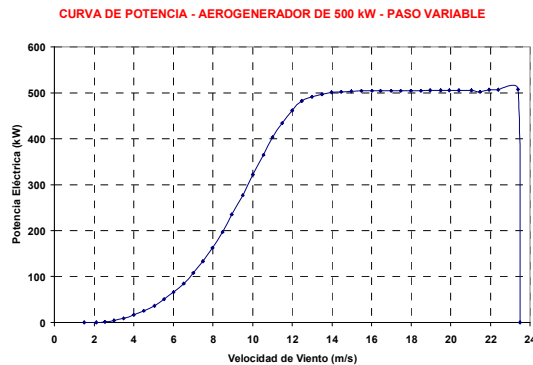


Figura 5: Curva característica potencia-velocidad del viento

SINTONIZADO DE LOS AEROGENERADORES AL RECURSO DISPONIBLE

A los efectos de seleccionar el aerogenerador que mejor se adecua a la explotación del recurso eólico en el sitio se suelen analizar dos características de los resultados. Una primera característica sería lo sintonizado que el aerogenerador se encuentra con el recurso disponible y una segunda, la energía que se generaría en ese sitio. En la figura 6, se presenta, en forma esquemática, la curva de probabilidad de viento en el sitio (P), así como curvas características de distintos aerogeneradores.

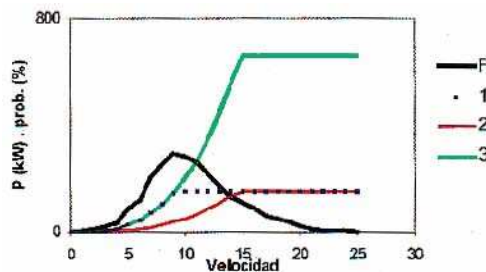


Figura 6: Análisis de sintonía

Siendo la curva P la curva de densidad de probabilidad que presentan los eventos meteorológicos de distinta velocidad media, se debería cumplir lo establecido en la ecuación 4, mientras que en la ecuación 5 se presenta el cálculo de la potencia media.

$$\int_0^{\infty} p(V) \cdot dV = 1 \quad (4)$$

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V) \cdot p(V) \cdot dv \quad (5)$$

El aerogenerador que presenta la curva (1) daría lugar a un aprovechamiento de la energía eólica con una mayor potencia media que la que se obtendría con el aerogenerador con curva (2). Como además, ambos aerogenerador presentan la misma potencia nominal, el aerogenerador con curva (1) presentaría un mayor factor de capacidad, y por lo tanto haría un

aprovechamiento más eficiente del recurso eólico disponible. Por otro lado, el aerogenerador con curva característica (3) daría lugar a una mayor generación de energía eléctrica que el aerogenerador (1), pero con un menor factor de capacidad. Los elementos antes planteados permiten visualizar lo sintonizado que se encontraría cada aerogenerador con la explotación del recurso eólico en el sitio de interés para aplicarlo en el caso considerado. Si bien existen otros parámetros que afectan la factibilidad del uso del recurso eólico como son la inversión requerida y el precio de la energía eléctrica, para que tales resultados sean atractivos el factor de capacidad debería ser en general superior al 25%. El nivel de energía generada, también afecta la factibilidad como se verá en el siguiente capítulo.

CASOS EVALUADOS

En este capítulo, se presentan tres casos a los efectos de ejemplificar la metodología planteada en los capítulos anteriores.

Un primer caso se refirió al uso de energía eléctrica de origen eólico en plantas de bombeo del sistema de saneamiento de la ciudad de Montevideo. En particular, se presenta el análisis efectuada en una de las estaciones de bombeo ubicada en la Punta Brava de las Carretas. En la figura 7 se presenta una vista en planta de la zona donde se instalarían los aerogeneradores. Obsérvese que para la mayoría de las direcciones de viento (WNW, W, WSW, SW, SSW, S, SSE, SE, ESE, E, ENE) el viento presenta una exposición tipo mar y por tal motivo presentaría elevadas velocidades de viento y bajos niveles de turbulencia. Para las demás direcciones la exposición es tipo rural o tipo urbano. En las figura 8 se presenta la curva de densidad de probabilidad de viento, así como la rosa de vientos en el sitio de interés.



Figura 7: Vista de Punta Brava e las Carretas.

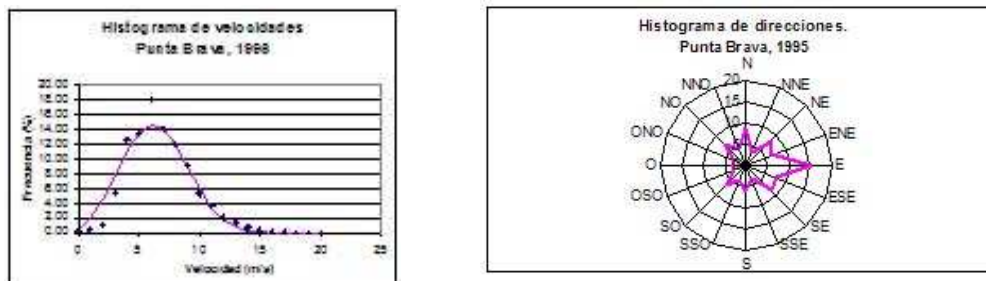


Figura 8: Característica del viento en Punta Brava de las Carretas

Obsérvese que el viento, en general, presenta direcciones correspondientes a exposición tipo mar. Se ensayó la utilización de un aerogenerador con una potencia nominal de 600kW. El factor de capacidad resultante fue del 43%. En la figura 9, se presenta la forma en la cual evolucionaría el consumo total, así como la producción total, de energía eléctrica distribuida para las diferentes horas del día.

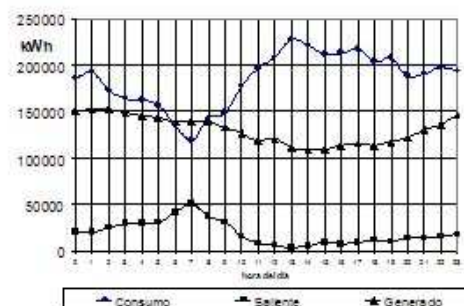


Figura 9: Resultado energético en Punta Brava de las Carretas.

Se observa que la curva de producción de energía eléctrica en el aerogenerador corta a la curva de consumo de energía eléctrica dejando áreas encerradas a ambos lados de la curva de producción. Esto significa que durante las horas que el aerogenerador produce menos energía que la consumida, el déficit se debe adquirir a la red. Por otro lado, cuando la energía generada resulta mayor que la consumida, el superávit se podría vender a la red. La posición relativa entre las curvas de consumo y producción que hacen óptimo el resultado económico depende fuertemente de los valores de compra y venta de energía eléctrica a la red así como del nivel de inversión requerida. En este caso ese óptimo implicaría tener una tasa interna de retorno del 11% con una inversión en el aerogenerador de 900US\$ por cada unidad de potencia instalada, una tarifa de compra de energía eléctrica promedio de 55US\$/MW.h y una venta con precio nulo. Además, se obtuvo que el periodo de repago de la inversión sería de entre 8 y 9 años y el costo de producción de la energía eléctrica sería de 36US\$/MW.h. En este caso particular, dada la ubicación del aerogenerador tan próxima a zonas con elevada densidad de población se analizó el impacto acústico y el impacto visual que produciría un aerogenerador instalado en ese sitio.

El segundo ejemplo consistió en analizar el recurso eólico en ZONAMÉRICA, zona franca localizada en el departamento de Montevideo. El terreno circundante resulta del tipo rural. En la figura 10, se presenta la curva de densidad de probabilidad del viento y la rosa de viento en el sitio.

Suponiendo que se instalara el mismo aerogenerador de 600kW nominales que se considerara más arriba en este sitio se tendría un factor de capacidad del 25%. La tarifa de compra de energía eléctrica en este sitio es de 33.6US\$/MW.h, lo cual resulta sensiblemente inferior al caso anterior. En la figura 11, se presentan las curvas de consumo y de producción de energía. En este caso la tasa interna de retorno presentaría un valor negativo, con un costo de generación de 70US\$/MW.h, lo cual mostraría no factible el aprovechamiento del recurso eólico en estas condiciones.

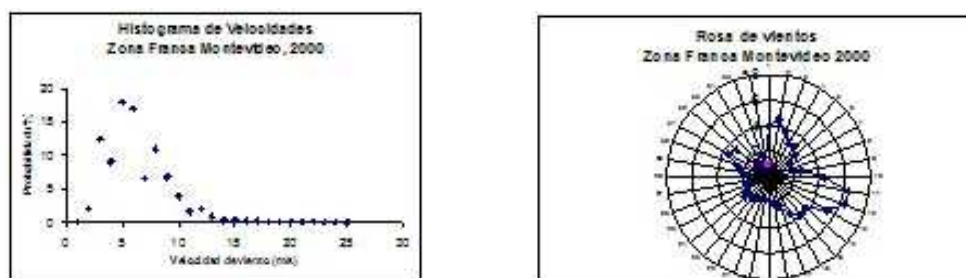


Figura 10: Características del viento en ZONAMÉRICA

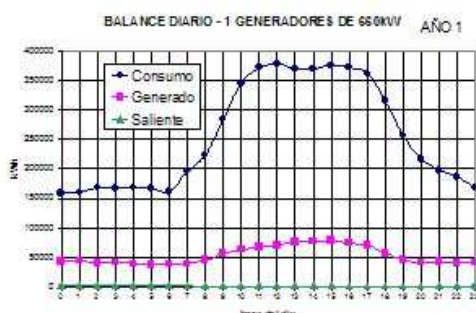


Figura 11: Producción y consumo de energía en ZONAMÉRICA

El tercer caso analizado es el de una planta industrial ubicada en la zona de sierras en el departamento de Maldonado, ubicado en la zona sur de Uruguay. En este caso, la planta industrial se localiza en terreno complejo, donde existen colinas con pendientes suaves y en donde se registran incrementos en la velocidad media del viento del orden del 50% al pasar de la llanura a la cima de las colinas. En ese sitio el aerogenerador de 600kW presenta un factor de capacidad del 53.6%, en tanto que la tarifa media por la energía eléctrica que abona la planta es de 45US\$/MW.h. La tasa interna de retorno del proyecto sería del 15%, un periodo de retorno de la inversión de entre 6 y 7 años y un costo de producción de 27US\$/MW.h

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los resultados presentados en el capítulo anterior muestran una fuerte variación en los resultados económicos frente al cambio en diversos parámetros como son el tenor del recurso eólico disponible, la tarifa de la energía eléctrica y el nivel de inversión. Se plantea entonces un análisis de sensibilidad suponiendo el uso de un aerogenerador de 500kW nominales con una curva característica como la presentada en la figura 5.

Como se mencionó en la introducción el flujo de potencia disponible depende directamente de la densidad del aire, la cual varía con la temperatura y presión ambiente. Para un cambio en la temperatura media de 0°C a 30°C, la energía media generada podría reducirse en 6%, mientras que al pasar de un sitio a nivel del mar a un sitio a 2000m de altura la reducción en la energía anual generada sería del orden de 11%. En la figura 12, se presenta en forma gráfica la forma en la cual se modificaría la energía generada al cambiar estos parámetros.

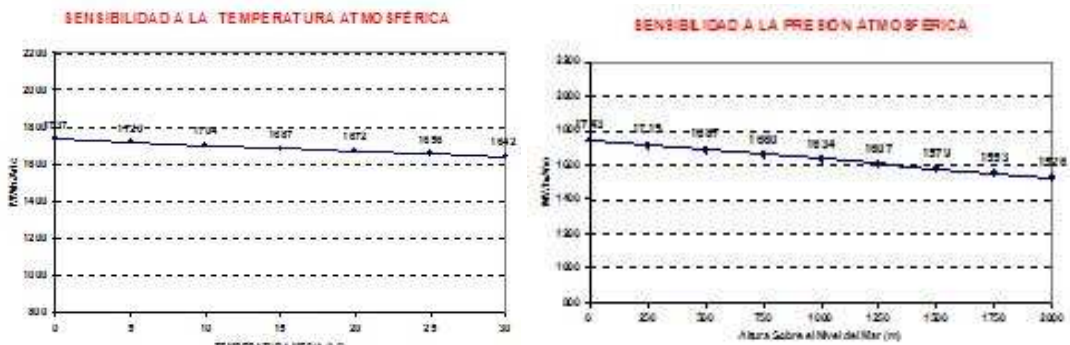


Figura 12: Sensibilidad de la producción de la energía

generada a la temperatura y presión ambientes

En la figura 13, se presenta en forma esquemática la distribución de velocidad media en altura para terrenos con diferente rugosidad.

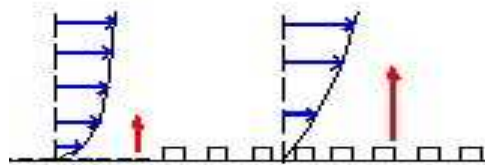


Figura 13: Distribución de velocidad media en altura para terrenos de distinta rugosidad

En la medida que se incrementa la rugosidad de un terreno plano crece el gradiente de velocidad media en la altura, por lo que la generación se hace más sensible al cambio de altura de la torre. Si la altura de la torre se incrementara de 40m a 60m se esperaría un incremento en la producción anual del orden del 10%. Se destaca que, sobre una colina, la distribución de velocidad media en altura se modifica cualitativamente respecto al terreno plano, pudiendo presentar zonas de valor constante. En dicho caso no cambiaría la producción con la altura.

La producción y otros factores afectan el resultado económico que daría la inversión en energía eólica. A los efectos de visualizar tal efecto se consideró, en primer lugar, la forma en que cambiaría el costo de producción de la energía eólica en función de la capacidad de aprovechamiento del recurso eólico disponible por parte de un aerogenerador determinado cuyo precio es de 900US\$/kW instalado, caracterizado a través del factor de capacidad y parametrizado en el costo de capital caracterizado por la tasa de interés del préstamos. Este resultado se presenta en la figura 14. Se observa que el costo de producción es fuertemente sensible con la disponibilidad de recurso, reduciéndose en un 47% al pasar el factor de capacidad del 25% al 45%. En segundo lugar, se visualiza la forma en que cambiaría dicho costo de producción en función del factor de capacidad pero ahora parametrizando en el costo de inversión del aerogenerador. Dicho resultado se presenta en la figura 15.

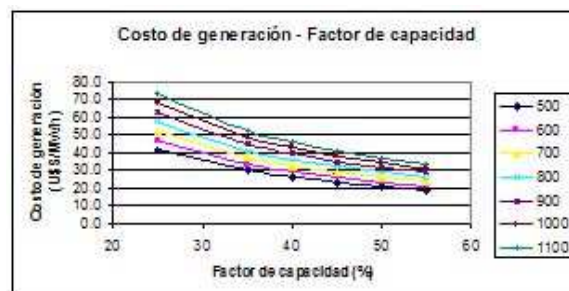
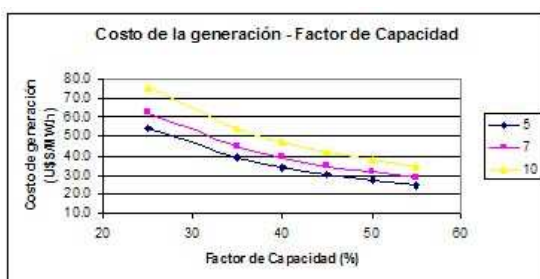


Figura 14: Sensibilidad del costo de producción

Figura 15: Sensibilidad del costo de producción con el factor de capacidad y el costo del capital

factor de capacidad y la inversión.

Se destaca que el precio del aerogenerador afecta prácticamente linealmente el costo de producción del aerogenerador.

CONCLUSIONES

Los resultados presentados en el trabajo muestran que la factibilidad del uso de la energía eléctrica de origen eólica depende, principalmente, de la disponibilidad de recurso y del precio de los equipos. Se hace necesario entonces contar con metodologías de evaluación confiables que permitan inferir el recurso disponible.

En la aplicación de la metodología de la medición de corta duración se debería tener especial cuidado en considerar los diferentes factores micro meteorológicos que afectan el flujo atmosférico.

La explotación de este recurso autóctono, de bajo impacto sobre el ambiente y con una tecnología simple, podría presentar una oportunidad de desarrollo tecnológico para el país, no sólo por aportar energía eléctrica a un precio adecuado, sino porque además se podría propiciar la instalación de plantas productoras de equipos que podrían llevar a una disminución de costos de instalación.

REFERENCIAS

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.

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.

Rados, K., Larsen, G., Barthelmie, R., Schelz, W., Lange, B., Schepers, G., Hegberg, T., Magnusson, M., (2001) "Comparison of wakes models with data for offshore wind farms", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 25(5), pp.271-280.

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

ABSTRACT: The wind power use in industrial plants or big commercial centers located in sites with high winds in Uruguay is feasible. In grid connected wind generators systems in auto producer scheme only the exceeding production is sold to the net. The wind power assessment with short time measurements can be done. Long history series in the site correlating to near weather station measurements are deduced. Quality study of the data is very important because the results are very sensible to the resource. The feasibility is studied with the calculated wind history series and the electrical tariff for the industrial plant. Several examples are presented.

Keywords: Wind Power, Distributed generation, Wind power assessment