



Evaluación preliminar de la penetración eólica en el sistema eléctrico de la Isla de la Juventud

Preliminary evaluation of wind energy penetration at Young Island Electric System

Miguel Castro - Fernández

Recibido: Octubre del 2008

Aprobado: Diciembre del 2008

Resumen/ Abstract

El presente trabajo trata, a partir de un análisis preliminar en un territorio del archipiélago cubano, la Isla de la Juventud, ofrecer una visión sobre el tema de la penetración eólica a partir del análisis de los conceptos más aceptados de este concepto a nivel internacional, así como trata de llamar la atención de que la aplicación del concepto de penetración eólica no es tan simple y tiene a su alrededor conceptos y formas de operación de la red conformada que van más allá de la propia potencia eólica insertada.

Palabras claves: energía eólica, penetración eólica

At many countries there is great areas where wind resource are very grateful but the electrical network is weak. At these areas the network capacity could be a limit to exploitation of wind resource. There are two main problems related with the associated power of wind resurge and the network weak. First, it is related with steady state voltage level: when demand is low the voltage level could increase more than permitted limits if the energy production is high. The second problem is related with flicker voltage: the wind resource is not constant and the disconnection of the wind turbines could cause flicker voltage more than permitted limits. In Cuban electric system the presence of weak network is normally and different problems like hurricanes or work this electric system require to divide on electric subsystems with possible high contribution of wind generation. The preliminary analysis at one zone of Cuban's archipelago from the point of view of wind penetration is presented in this paper.

Key words: wind farms, hybrid systems, wind penetration

INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica a partir del viento es una forma de generación que tiene aspectos muy beneficiosos tanto para el consumidor como para el medio ambiente; por lo general requiere de un tiempo de construcción menor y sus costos son actualmente competitivos con otras fuentes convencionales

de generación, por lo que se ha convertido en una de las fuentes más competitivas de energía renovables. Sin embargo tiene algunas desventajas como son:

- La potencia del viento es considerada una fuente de potencia intermitente debido a que el viento no fluye constantemente en el tiempo.
- Los sitios de vientos superiores están generalmente localizados en áreas remotas por lo que se requiere una infraestructura adecuada para llevar la potencia generada por el viento a los centros de carga.
- En su gran mayoría los generadores eólicos son generadores de inducción; los generadores de inducción consumen potencia reactiva durante su operación normal, lo cual puede provocar caídas de tensión en los sistemas de potencia.
- Al integrar a los sistemas eléctricos parques eólicos en gran escala, los flujos de potencia y las características dinámicas del sistema cambian por regla general, para lo cual se requiere realizar estudios de ingeniería que permitan evaluar, tanto para condiciones normales de operación como ante situaciones de contingencia, la sobrecarga potencial de las líneas de transmisión, así como chequear los niveles de cortocircuito, los cuales deben ser calculados antes y después de la introducción de los parques eólicos en la red, con el objetivo de valorar las mejoras necesarias a ejecutar en la misma. Por otro lado, se requiere también realizar estudios sobre la estabilidad dinámica del sistema.

En las condiciones de Cuba, la presencia de un sistema eléctrico que funcionará bajo el concepto de la Generación Distribuida (GD), con una alta penetración de Grupos Electrónicos (GE) para alimentar la carga base, permite no sólo incrementar el posible uso de la energía eólica a través de la presencia de parques de determinada envergadura, a los cuales pudieran llamarse parques eólicos grandes (mas de 15 MW) ya que requieren de utilizar niveles de tensión de transmisión (110 y 220 kV) para inyectar dicha generación en la red, sino permite también la introducción de parques eólicos más pequeños en cuanto a capacidad (desde unos cientos de kW hasta unos 10 - 15 MW máximos), pero que convenientemente ubicados en el sistema pueden disminuir los consumos de combustibles fósiles que utilizan los GE para su trabajo normal supliendo la carga base del sistema.; esta última variante da lugar a lo que se ha llamado como Sistema Híbrido (SH) de

generación, y que permite aprovechar las posibilidades de uso de fuentes renovables de energía de diferentes tipos, así como complemento de las fuentes convencionales con el objetivo ya señalado.

En la conformación de un SH, normalmente, en una red cuya energía se fundamenta en la generación a partir de GE, el consumo de combustible estará en correspondencia directa con la potencia generada, lo que indica que el uso del combustible será proporcional a la carga que se alimenta; el efecto de incorporar sistemas de generación basados en energía renovables (energía eólica, por ejemplo) sería el de reducir la carga que es llevada por los GE, llegando incluso a existir cero consumo del combustible por ellos utilizados, si existiera una completa relación entre la carga y las posibilidades de generación por energías renovables.

De lo anterior se derivan algunas cuestiones básicas en el diseño de los SH:

- La máxima energía que deben aportar la fuente energética renovable está limitada por la carga.
- El uso de las fuentes energéticas renovables en un sistema híbrido estará limitada por la relación carga – fuente renovable; en la realidad, el uso del combustible de los GE no está en proporción exacta con la carga, ya que la eficiencia de los mismos decrece con el decrecimiento de la carga, por lo que el uso de la fuente energética renovable permitiría incrementar la eficiencia del sistema al sustituir los GE que pudieran estar operando en un régimen no adecuado.
- El máximo beneficio posible de obtener en la operación del SH partiría de lograr una estrategia de control y operación del sistema que aproxime el uso de los GE de forma proporcional a la carga servida, con las fuentes energéticas renovables como elemento de apoyo para lograr este objetivo.
- Los SH deben cumplimentar requerimientos desde el punto de vista de la operación de la red:
- No deben provocar variaciones de tensión más allá de las que se permite en la red a la cual se conecte, en caso de estarlo.
- Debe poseer una respuesta adecuada (desconexión/reconexión/sincronización) , así como un monitoreo constante, a los

disturbios de tensión y frecuencia que se originen en el sistema de distribución al cual esté conectado.

- La calidad de la energía que entregue debe estar de acuerdo a lo establecido en el sistema de distribución.

El dimensionamiento y la estrategia de control de estos SH son cuestiones fundamentales a resolver en el diseño de los mismos, por lo que el evaluar hasta donde puede penetrarse en un sistema eléctrico con un determinado tipo de energía renovable se convierte en una de las cuestiones esenciales del problema, si se requiere realmente obtener un máximo de eficiencia en el diseño. Por tal razón, y a partir de una base de datos obtenidas en el desarrollo de un trabajo de diploma realizado en el CIPEL sobre el SH diesel – eólico de la Isla de la Juventud [1], se ha realizado una evaluación preliminar de los posible niveles de penetración eólica en dicho sistema.

PENETRACIÓN EÓLICA

Conceptualización del problema

Internacionalmente existen tres definiciones diferentes con respecto al concepto de penetración eólica; estas definiciones son según la referencia 2:

- *Penetración de capacidad instalada:* Es la relación entre la capacidad total de los generadores eólicos instalados y la capacidad total de todo el sistema eléctrico del cual forma parte. O sea:

$$PCI = \frac{\text{Capacidad total de generación eólica}}{\text{Capacidad total del sistema eléctrico}}$$

... (1)

- *Penetración de Potencia:* Es la relación entre la potencia total entregada en un instante al sistema y la demanda total del sistema en ese mismo instante.

$$PP = \frac{\text{Potencia entregada por generación eólica en el tiempo } t}{\text{Demanda total del sistema en el mismo tiempo } t}$$

... (2)

- *Penetración de Energía:* Es la relación entre toda la energía eléctrica

suministrada por los generadores eólicos en un año y el consumo total de energía del sistema en ese mismo año.

$$PE = \frac{\text{Energía eléctrica entregada vía generación eólica en un año}}{\text{Energía total consumida por el sistema ese mismo año}}$$

...(3)

En la referencia 3 se hace una valoración de lo que representan cada una de estas expresiones; la primera expresión sólo permite elaborarse una idea de la máxima potencia que puede entregarse por el SH, a partir del viento, en relación con la máxima potencia que puede suministrar el sistema. Debido a la variabilidad del viento, el factor de utilización real de esta potencia por cada generador rara vez sobrepasa el 35 %, y teniendo en cuenta esto se comprende que es muy poco probable que la generación eólica en un instante sea del por ciento dado por este parámetro, siendo siempre inferior.

La segunda expresión ofrece una variable dinámica y define, en cada instante, que por ciento de la potencia demandada por los consumidores es entregada a partir del viento. Para ilustrar este concepto, en la figura 1 se muestra el gráfico de la demanda en MW y la generación eólica en función de la hora en las empresas de energía eléctrica de Dinamarca Occidental durante el mes de enero del 2006 [4].

Puede apreciarse que en algunos instantes la generación eólica es casi nula, en otros cubre un determinado por ciento de esta demanda e, inclusive en algunos muy puntuales, llega a cubrir toda la demanda. La relación entre estas dos magnitudes es la penetración eólica de potencia.

La última expresión es la definición más importante desde el punto de vista económico, si se tiene en cuenta que el objetivo de la generación eólica en los SH no es cubrir la demanda pico (lo cual resulta imposible por la aleatoriedad del viento), sino ahorrar energía. Este factor da una idea del por ciento de energía que se ahorra.

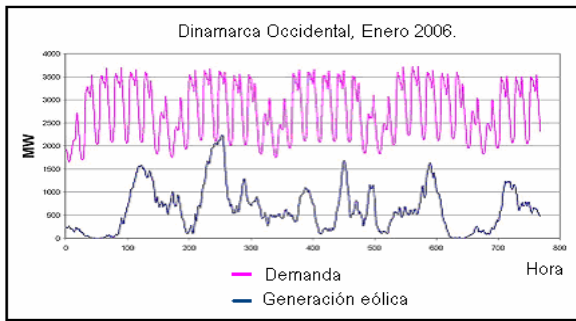


Fig. 1. Penetración Eólica en Dinamarca Occidental.

NIVELES DE PENETRACIÓN EÓLICA

No existe, hasta el momento, una norma que clasifique de forma precisa los sistemas de generación eléctrica que utilizan energía eólica en función de la penetración de ésta última, por tanto, para tener una guía, se utiliza la clasificación realizada por el laboratorio de Energía Renovables de los Estados Unidos (NREL, National Renewable Energy Laboratory) para los sistemas híbridos diesel eólicos [5].

| TABLA 1 | | |
|---|-----------|----------|
| NIVELES DE PENETRACIÓN EÓLICA SEGÚN [5] | | |
| NIVEL DE PENETRACIÓN | PP máximo | PE |
| Bajo | <50 % | <20 % |
| Medio | 50-100 % | 20-50 % |
| Alto | 100-400 % | 50-150 % |

La existencia de una penetración mayor de un 100 % está dada por la posibilidad de enviar energía eléctrica a otro sistema interconectado, a un sistema almacenador de energía (por ejemplo, baterías, volante de inercia) o a un consumidor que puede recibirla de forma aleatoria (calefacción eléctrica).

Horizontes de tiempo en los estudios de penetración eólica

Los problemas que trae la penetración eólica dependen de los denominados *Horizontes de Tiempo* que se analicen [6]. Existen cuatro horizontes de tiempo diferentes que dan lugar a problemas diferentes relacionados con la penetración eólica. estos son:

1. *Del orden de los ciclos:* En este caso ocurren los problemas de cortocircuito, estabilidad transitoria, valles de tensión, etc.; tienen que ver con cualquier nivel de penetración. El desarrollo de aerogeneradores que utilizan convertidores estáticos de tensión y frecuencia y modernos métodos de control ha dado lugar a que, hoy en día, la presencia de aerogeneradores en un sistema eléctrico contribuya a mejorar tanto la estabilidad como la respuesta a perturbaciones súbitas [7-11]. En cuanto a los valles de tensión, en la actualidad en todos los países europeos existen normas que exigen que el aerogenerador permanezca conectado a la red ante esta perturbación y que aporte tanto energía activa como reactiva para ayudar a la recuperación de la tensión. Esto lo consiguen, por ejemplo, los aerogeneradores de la firma española Gamesa con el denominado Crowbar Activo [12].
2. *De segundos a minutos.* Para este tiempo son importantes los análisis relacionados con la regulación de la tensión y la frecuencia del sistema; tienen que ver con cualquier nivel de penetración. Puede decirse lo mismo que en el punto anterior pues, en diferentes países desarrollados se han desarrollado métodos de regulación y control tanto de la tensión como de la frecuencia, que superan el comportamiento de los generadores convencionales [13-18].
3. *De minutos a horas.* En esta circunstancia lo más importante es como acoplar la variabilidad del viento con la variabilidad de la demanda. Se hacen más críticos al aumentar e nivel de penetración. Para esto debe hacerse, por una parte, que estén disponibles unidades generadoras que sean capaces de aumentar o disminuir tanto la potencia activa como reactiva de forma relativamente rápida [4] y, por otra utilizar aerogeneradores con sistemas de control capaces de amortiguar las variaciones de la potencia suministrada por el viento [17].
4. *Del orden de los días.* Los problemas aquí surgen de la necesidad de arrancar y poner en operación unidades de plantas térmicas cuya puesta en marcha

suele llevar unas cuantas horas. Este aspecto está muy relacionado con la correcta predicción del viento en el orden de los días ya que implica una adecuada planificación de la reserva rodante y de la entrada de unidades térmicas. Los problemas en este horizonte de tiempo se hacen más críticos al aumentar el nivel de penetración [6].

EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL PROBLEMA EN LA ISLA DE LA JUVENTUD

En la figura 2 puede observarse un esquema de las características de distribución y consumo del SE que se está analizando. El SH de la Isla de la Juventud está conformado actualmente por 10 GE con una capacidad instalada de 32176 kW y un parque eólico de 1,65 MW de potencia nominal, conformado por 6 aerogeneradores Vergnet de 275 kW, a velocidad nominal de 14 m/s cada uno. Las características de los grupos electrógenos que se encuentran conformando la red eléctrica en cuestión se presentan en la tabla 2.

Desde febrero del año 2007 está en funcionamiento en el territorio un Parque Eólico con aerogeneradores del tipo abatible Vergnet (ver figura 3); este tipo de tecnología está diseñada de forma que el aerogenerador puede ser abatido (bajar la góndola y las aspas) en presencia de fenómenos como los huracanes y evitar la destrucción del mismo.

Los niveles de generación eléctrica se han mantenido estables durante los últimos 5 años, con un ligero incremento en los meses de julio a noviembre a partir del año 2003 en casi todos los años con un incremento puntual de la demanda, atípico, en el mes de agosto de 2005, como puede verse en la figura 4.

Este estudio se considera preliminar pues sólo se ha trabajado con los datos correspondientes a los dos primeros meses de funcionamiento del Parque Eólico, pero se evidencia ya en esos dos meses algunas características, en el comportamiento del sistema en condiciones estables, que permiten analizar el concepto de penetración cólica, desde varias ópticas y

demostrar que realmente es un parámetro con el cual se debe tener cuidado a la hora de valorarlo.

En la figura 5 se presenta como se comporta, día a día, para una semana típica del mes de Marzo, la generación del parque eólico con relación a la demanda del sistema eléctrico. En la figura anteriormente mencionada pueden observarse dos aspectos coincidentes:

1. Las curvas de demanda para cada día presentan ligeras variaciones en algunos puntos, pero en general, poseen la misma tendencia en cuanto a valores picos y valles, en horario, y puede decirse que son similares.
2. La curva de generación del parque eólico demuestra la variabilidad del viento día a día, no teniendo un patrón típico, lo que permite intuir que existen diferencias significativas entre las medias mensuales de este parámetro, y por tanto, no hay un patrón típico anual de energía asociada al mismo en el lugar donde se ubica el parque eólico.

Por otro lado, la figura 6 muestra el comportamiento en el mismo período anterior, pero ya visto en forma continua, lo que ayuda a observar aún más la respuesta del parque eólico a las necesidades de la demanda del sistema

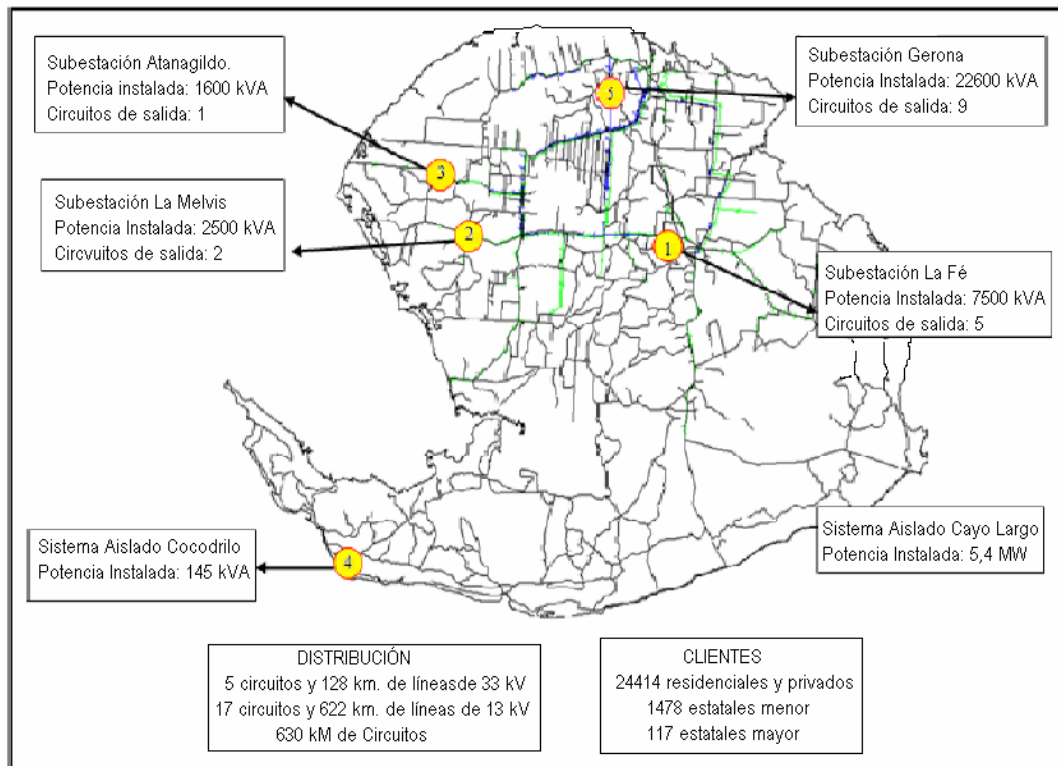


Fig. 2. Características de la red eléctrica de la Isla de la Juventud.

| TABLA 2. Características de los GE que conforman la red | | | |
|--|------------|--------------|------------|
| Tipo | MAN | RUSKY | MTU |
| Fabricante | Alemania | Rusia | Alemania |
| Conformación | Batería | Batería | Aislada |
| Tipo de combustible | fuel oil | Diesel | Diesel |
| Potencia unitaria (kW) | 3600 | 3500 | 1888 |
| Cantidad | 4 | 4 | 2 |
| Tensión de salida (kV) | 6 | 6,6 | 0,48 |



VERGNET

| | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Constructor • Tipo y potencia nominal • Eje del rotor • Orientación del rotor | <p>VERGNET S.A. GEV MP - 275 kW Horizontal Corona de orientación – orientación natural por la hélice abajo con corrección del motor hidráulico si necesario.</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Altura del buje • Diámetro del rotor • Velocidad de rotación del rotor • Velocidad de viento nominal • Velocidad de viento para arranque • Velocidad de viento máxima en funcionamiento (producción) • Velocidad de viento máxima (torre arriba) • Velocidad de supervivencia (torre abatida) • Sistema de control de potencia | <p>55 m 30 m - 32m 31 o 46 rpm 13 m/s 4 m/s 20 m/s (29 m/s instantáneos) 42,5 m/s 85 m/s regulación a paso variable con variación del ángulo (pitch). Control activo con sistema hidráulico</p> |

| GEV MP 32-275 L | | |
|------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Diameter = | 32 | meters |
| Density = | 1.225 | kg/m ³ |
| Wind Speed (m/s) | P(kW) at 1.225 kg/m ³ | Cp at 1.225 kg/m ³ |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0.00 |
| 2 | 0 | 0.00 |
| 3 | 0.0 | 0.00 |
| 4 | 4.2 | 0.13 |
| 5 | 19.6 | 0.32 |
| 6 | 38.4 | 0.36 |
| 7 | 63.6 | 0.38 |
| 8 | 101.4 | 0.40 |
| 9 | 145.4 | 0.40 |
| 10 | 194.0 | 0.39 |
| 11 | 233.9 | 0.36 |
| 12 | 256.8 | 0.30 |
| 13 | 270.1 | 0.25 |
| 14 | 273.5 | 0.20 |
| 15 | 275.0 | 0.17 |
| 16 | 275.0 | 0.14 |
| 17 | 275.0 | 0.11 |
| 18 | 275.0 | 0.10 |
| 19 | 275.0 | 0.08 |
| 20 | 275.0 | 0.07 |

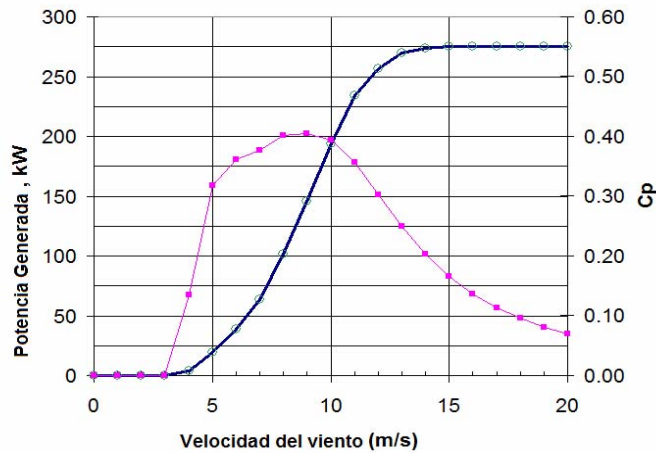


Fig. 3. Tecnología Vergnet.

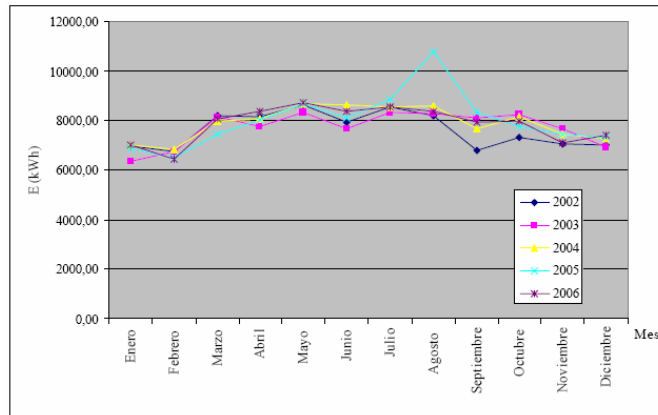


Fig.4. Comportamiento de la demanda por mes, en el período 2002 – 2005.

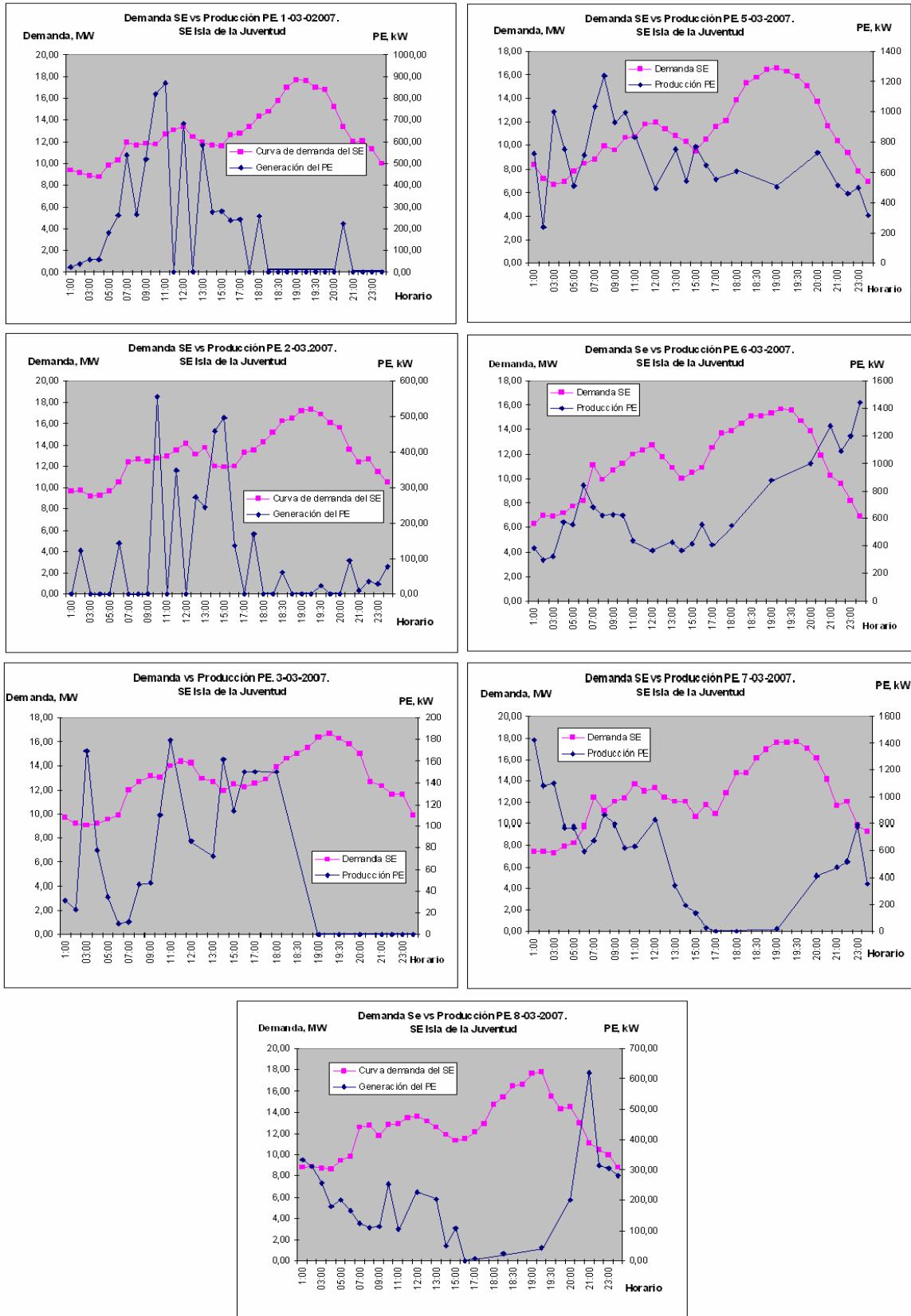


Fig. 5. Comportamiento día a día del parque eólico y la demanda en el sistema eléctrico de la Isla de la Juventud.

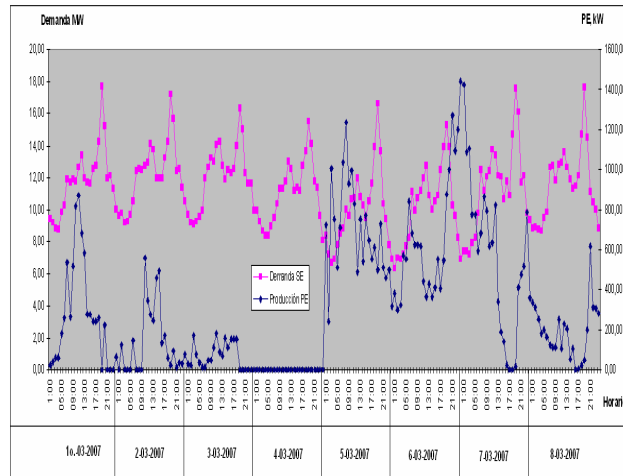


Fig. 6. Comportamiento del Parque Eólico vs Demanda del sistema eléctrico. Período del 1º al 8 de marzo de 2007.

Se observa que en los horarios del pico de demanda en el sistema, el parque eólico disminuye, y en ocasiones es nula, su generación, por lo que puede decirse que el parque no es capaz de seguir la demanda del sistema, y por tanto, su objetivo fundamental está en los ahorros de combustible fósil que pueda aportar con su funcionamiento. Pero también se observa, que en los períodos en que menor es la demanda, coincide por regla general, con los momentos de mayor generación, y es aquí donde el concepto de penetración eólica comienza a ser interesante su análisis.

Desde las 21:00 horas del día 6 de marzo a las 03:00 horas del día 7 de marzo el parque eólico aportó entre el 11% y el 21% de la potencia demandada por el sistema, lo que indica el nivel de penetración eólica de potencia (PP).

Sin embargo, el máximo valor de penetración eólica por energía producida (PE), para un período de 24 horas, fue de 6,85%; por otro lado, en el período de máxima generación del parque eólico, las 7 horas entre los días 6 y 7 de Marzo alcanzó el valor de 15,12%, lo que indica que el problema de los límites de la penetración eólica pueden cambiar según la hora y el momento en el cual se analice. Así mismo puede verse que en el momento de la máxima producción del parque eólico (1443,72 MW), la demanda del sistema fue de 6,9 MW (tercer

mínimo en la semana analizada), por lo que penetración eólica de potencia (PP) fue del orden del 21%, la máxima lograda en el período analizado, mientras que el día y hora de la demanda mínima, la PP no pasó del 6% ya que la producción del parque fue mucho menor.

Si se analiza el caso del mes de abril, se observa un comportamiento similar, lo cual se muestra en las figuras 7 y 8. Como puede verse, en abril hay un comportamiento muy similar al visto en marzo: en los períodos de máxima demanda, entre las 17:00 y 22:00 horas, la generación del parque eólico es mínima o nula, mientras que se observa una máxima generación del parque eólico en horario en que la demanda cae, lo que hay que tener en consideración, como se dijo anteriormente, en la aplicación del concepto de máxima penetración eólica permisible.

La máxima penetración eólica de potencia obtenida en este período fue del 14,79% el día 22 de abril (no coincide con la máxima producción del parque eólico), mientras que la máxima penetración eólica, desde el punto de vista de la energía, fue del 4,44% el día 24 de abril.

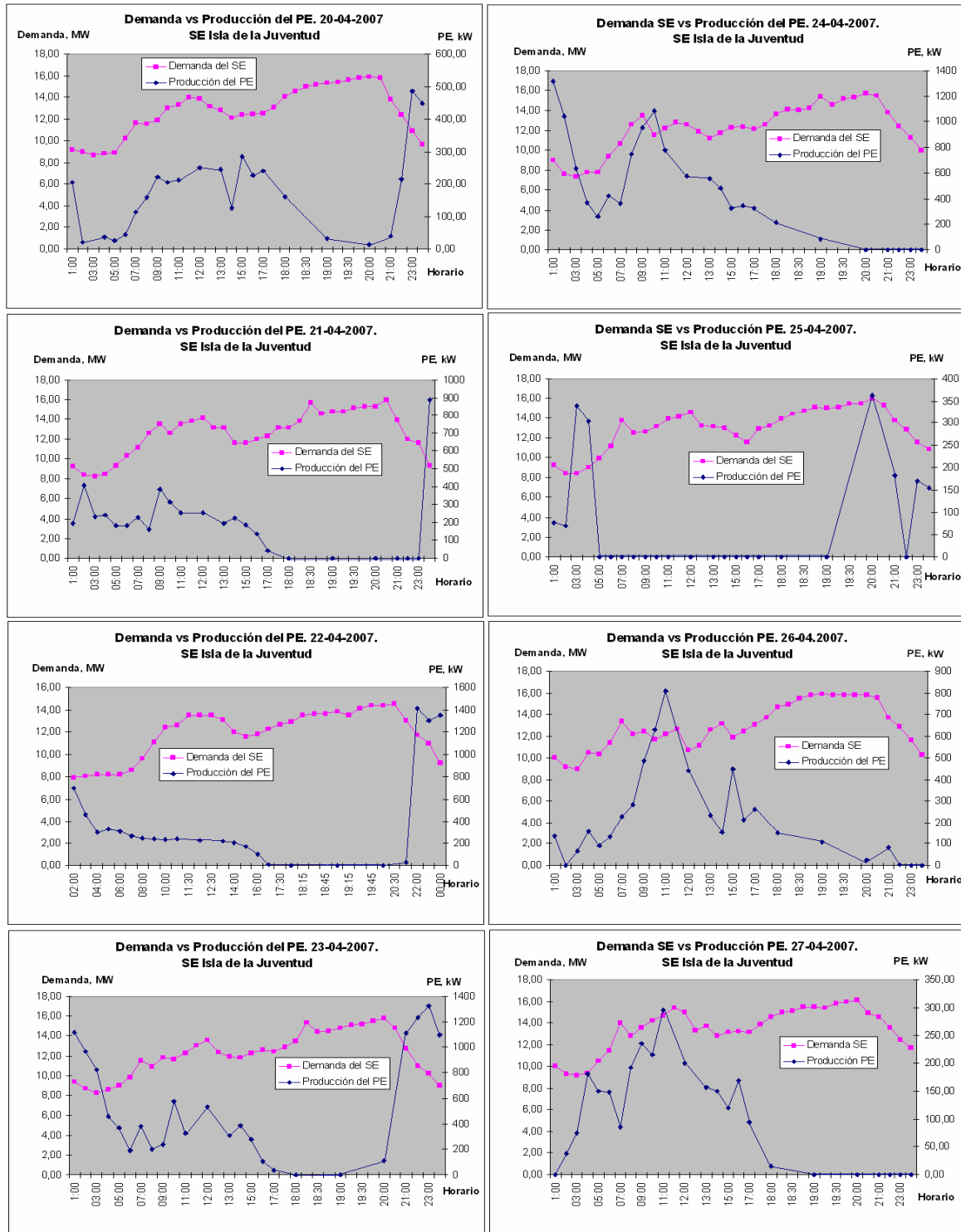


Fig. 7. Comportamiento, día a día, del parque eólico y la demanda en el sistema eléctrico de la Isla de la Juventud en el mes de abril.

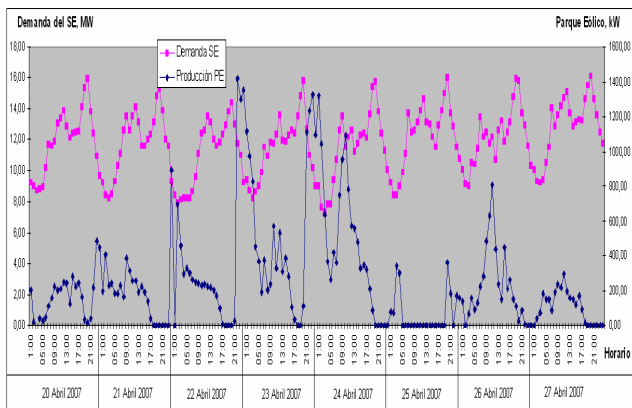


Fig. 8. Comportamiento del Parque Eólico vs Demanda del sistema eléctrico. Período del 20 al 27 de abril de 2007.

REFERENCIAS

- [1] SANTOS FUENTEFRÍA, A. Y. MACHEL Z. L. *Estudio preliminar del sistema híbrido (SH) diesel – eólico de la Isla de la Juventud*. Trabajo de Diploma CIPEL. Ciudad de La Habana, Junio del 2007
- [2] GARDNER, P. E. A. The impacts of increased level of wind penetration on the electricity system of the Republic of Ireland and Northern Ireland. February 11, 2003
- [3] COSTA MONTIEL, A. *Notas sobre penetración eólica*,. Octubre 2007.
- [4] SODER, L. AND HOFFMAN, LUTZ "Orths, Antje; Holtinnen, Hanele; Yih Wei Huan; Touhy, Adian Experience from Wind Integration in some high penetration areas,". *IEEE Transactions on Energy Conversion*,. March 2007, Vol 22, No. 1.
- [5] MC GOWAN, J. G. et al. Wind Power at Guantanamo Bay, A Hybrid Wind Diesel System for the US Navy at Guantanamo Naval Base using an energy savings performance contract. En: American Wind Energy Association's Global Wind Power. March 30, 2004.
- [6] "Integrated Wind into the Power System. Special Issue. Power and Energy Magazine", Nov./Dec. 2005. Vol 3, No. 6,
- [7] MIROSLAV CHOMAT, et al. Effect of Variable Wind Speed on Wind Turbines with Induction and Doubly Fed Machines. En: *International Conference on Electrical Machines*. Krakow, Poland. 2004.
- [8] JUNJI TAMURA, et al. Transient Stability Simulation of Wind Generator Expressed by Multi-Mass Shaft Model. En: *International Conference on Electrical Machines*. Krakow, Poland. 2004.
- [9] L. WU, E. A. Wind Generator Stabilization with Doubly Fed Synchronous Machines,. En: *International Conference on Electrical Machines*,. Krakow, Poland, . 2004.

[10] HUGHES F. M. et al. "Control of DFIG Based Wind Generation for Power Network Support". *IEEE Transactions on Power Systems*. November 2005, vol 20, no 4

[11] MULJADI, E. et al. "Effect of Variable Speed Wind Turbine Generator on Stability of a Weak Grid". *IEEE Transactions on Energy Conversion*,. March 2007, Vol 22, No. 1,.

[12] AUSÍN, J. C., Y FRANCISCO JIMÉNEZ: . *Descripción técnica y funcionamiento del kit crowbar activo*. 2005

[13] GILIAN LALOR, et al. "Frequency Control and Wind Turbine Technologies". *IEEE Transactions on Power Systems*,. November 2005, vol 20, no 4,.

[14] MULLANE, A. Y. O. M., MARK :. "The Inertial Response of Induction Machine Based Wind Turbines". *IEEE Transactions on Power Systems*,. August 2005, Vol 20, No. 3.

[15] PETERSSON, A., ET ALL: . " Experimental Verification of Grid Interaction of a DFIG Wind Turbine". *IEEE Transactions on Energy Conversion*,. December 2005, vol 20, no 4.

[16] MORREN, J., ET AL.:. "Wind Turbines Emulating Inertia and Supporting Primary Frequency Control,". *IEEE Transactions on Power Systems*,. February 2006, vol 21, no 1.

[17] CHANGLING LUO et al. "Strategies to Smooth Wind Power Fluctuations of Wind Turbine Generators". *IEEE Transactions on Energy Conversion*,. June 2007, vol 20, no 2,.

[18] NREL *Wind Energy Fact Sheet, Comparative Cost of Wind and Another Energy Source*

[Consultado el: <http://www.nrel.gov/wind>

[19] *US Department of Energy-Energy Efficiency and Renewable Energy. Low Wind Speed Technology. Wind and Hydropower Technologies Program*. [Consultado el:

http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/printable_version/wind_low_speed.html

AUTOR

Miguel Castro Fernández.

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas. Investigador Auxiliar del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica del ISPJAE. La Habana, Cuba.

e-mail: mcastro@electrica.cujae.edu.cu