

La energía eólica: Significación, perspectivas y aspectos técnicos de la principal fuente renovable de generación eléctrica

Wind Energy: Significance, perspectives and technical aspects
of the main source of renewable electric generation

Francisco Galán Soralupe. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Colaborador de Acciona Energía. GALANSORA@telefonica.net

Resumen: En el año 2005 la generación eólica del sistema eléctrico peninsular español fue de 20.377 GWh, superior a los 19.170 GWh de la gran hidráulica del mismo periodo. Esta situación, que hubiese sido impensable hace pocos años, pone de manifiesto la importancia del sector eólico dentro del sistema eléctrico.

El año 2005 fue un mal año hidráulico, pero el estancamiento de la potencia hidroeléctrica instalada y el aumento continuado de la potencia eólica van a provocar que la generación anual eólica supere de modo permanente a la aportada al sistema por la gran hidráulica. Todo ello en un contexto en el que la comunidad internacional busca alternativas eficientes a los combustibles fósiles debido al alza continuada de los precios del petróleo y el gas, a la inseguridad que se deriva de la concentración de sus reservas en países políticamente inestables y a su contribución al cambio climático.

Este hecho, indudablemente importante, nos ha motivado a redactar este artículo en el que tratamos de exponer la situación actual del sector.

Palabras Clave: Energía eólica, Generación térmica, Futuro energético

Abstract: Wind powered generation for the Spanish mainland electricity network reached 20,377 GWh over 2005, this being somewhat higher than the 19,170 GWh of hydropower generated over the same period. This situation, which would have been unthinkable just a few years ago, demonstrates the importance of the wind sector within the electricity system.

2005 was a bad rainfall year, but the stagnation of installed hydroelectric power and the ongoing increase in wind power will eventually lead to an annual wind power generation permanently over and above that of hydropower. This should be seen within the context of the search by the international community for efficient alternatives to fossil fuels on account of continuously rising prices of petrol and gas, the insecurity implied by the concentration of reserves in politically unstable countries and the contribution of these fuels to climate change.

Keywords: Wind energy, Electric generation, Energy future

Evolución de la energía eólica en España

En el cuadro 1 resumimos los datos de la evolución de la producción eólica del sistema eléctrico peninsular de los últimos años.

Hemos indicado en el cuadro los datos de potencia y generación del sistema eléctrico peninsular para

Development of wind energy in Spain

The table 1 shows the development of wind energy production for the mainland electricity system over recent years.

The table indicates details of total power and generation for the mainland electricity system

Cuadro 1/Table 1

Año Year	Sistema eléctrico/ <i>Electric system</i>		Sector eólico/ <i>Wind sector</i>				
	Potencia/ <i>Power</i>	Energía/ <i>Energy</i>	Potencia/ <i>Power</i>		Energía/ <i>Energy</i>		
	MW	GWh	MW	%	GWh	%	
2001	55.152	205.643	3.442	6,24	6.600	3,21	
2002	59.820	211.516	4.950	8,27	9.257	4,38	
2003	62.223	225.850	6.220	10,00	11.720	5,19	
2004	68.719	235.999	8.442	12,28	15.753	6,68	
2005	73.970	246.187	9.800	13,25	20.377	8,28	

Fuente : El Sistema Eléctrico Español 2005 – Red Eléctrica de España/Source: The Spanish Electricity System 2005 – Electricity Network in Spain.

que pueda apreciarse lo que suponen, en %, los datos eólicos.

Puede verse el rapidísimo crecimiento de la potencia eólica, que se ha triplicado en 4 años. En 1995 era de sólo 115 MW y prácticamente inexistente en 1991.

Como dato puntual destacado, cabe señalar que el 12 de agosto de 2005 la energía eólica aportó, en el momento de mayor producción, 6.160 MW que supusieron el 22,9 % del total de la energía generada y un 70 % de la potencia eólica instalada.

Los datos de 2005, por Comunidades Autónomas son los reflejados en el cuadro 2.

and the percentage contribution of the wind sector.

A very rapid growth may be observed in wind power, this having tripled in just four years. This may also be seen in comparison to figures for 1995 when power production was just 115 MW and the fact that this source was practically non-existent in 1991.

As a point of particular interest it may be indicated that on 12 August 2005 and at the time of highest production, wind energy provided 6,160 Mw, this making up 22.9% of the total energy generated and 70% of the installed wind capacity.

Cuadro 2/Table 2

Comunidad/Region	Potencia/Power		Energía/Energy		Horas/Hours equivalentes equivalent	Consumo/Consumption	
	MW	%	GWh	%		GWh	%
Andalucía	467	4,77	907	4,45	1.942	37.643	2,41
Aragón	1.409	14,38	3.215	15,78	2.282	10.530	30,53
Asturias	162	1,65	356	1,75	2.198	10.934	3,26
Cantabria	0	0,00	0	0,00	0	4.706	0,00
Castilla-La Mancha	1.820	18,58	3.163	15,52	1.738	11.004	28,74
Castilla y León	1.762	17,98	3.156	15,49	1.791	13.098	24,10
Cataluña	147	1,50	240	1,18	1.633	45.139	0,53
Extremadura	0	0,00	0	0,00	0	4.325	0,00
Galicia	2.401	24,51	5.582	27,39	2.325	18.622	29,98
La Rioja	420	4,29	983	4,82	2.340	1.721	57,12
Madrid	0	0,00	0	0,00	0	29.672	0,00
Murcia	59	0,60	74	0,36	1.254	7.917	0,93
Navarra	986	10,06	2.447	12,01	2.482	5.199	47,07
País Vasco	145	1,48	241	1,18	1.662	20.120	1,20
Valencia	20	0,20	12	0,06	600	25.557	0,05
Total	9.798		20.376		2.080	246.187	8,28

Fuente : El Sistema Eléctrico Español 2005- Red Eléctrica de España/Source: The Spanish Electricity System 2005 – Electricity Network in Spain



Las horas equivalentes son el cociente entre la producción anual y la potencia instalada y dan idea de la rentabilidad de las instalaciones, aunque, al referirse la potencia al 31/12/05 y la producción a todo el año 2005, pueden estar afectadas por los meses en que hayan entrado en servicio algunos parques eólicos.

Los datos del cuadro ponen de manifiesto:

- La gran diferencia de potencia instalada de unas a otras Comunidades que refleja, en parte, la desigual agilidad administrativa para iniciar y promover esta actividad energética y económica.
- El alto porcentaje del total que está instalado en Galicia
- El también alto porcentaje, en relación con su superficie, de Navarra.
- El elevado número de horas equivalentes de Navarra.
- La gran variación del porcentaje que supone la energía eólica con respecto al consumo energético de cada Comunidad. Destacan los altos porcentajes de La Rioja y Navarra.

A fin de situar el sector eólico español en el contexto mundial, en el cuadro 3 se resumen los datos de los países con mayor potencia instalada a fines de 2005.

Parque de Guerinda con 199 aerogeneradores, en el momento de su construcción en 1997 era el mayor de España/
Guerinda park with 199 wind generators. At the time of its construction in 1997 this was the largest park in Spain.

The 2005 figures for each Region were as follows in Table 2.

The equivalent hours are the quotient between annual production and installed capacity and give an idea of the yield of the installations, though, on referring to the power at 31.12.05 and the production for the whole of 2005, this may be affected by months in which several wind parks came into service.

The figures from the table show:

- *The large difference in installed capacity between one region and another partially reflects the varying degrees of administrative capacity to promote and develop this energy and economic activity.*
- *The high percentage of the total installed capacity in Galicia.*
- *The similarly high percentage in relation to surface area in Navarra*
- *The high quantity of equivalent hours in Navarra.*
- *The large percentage variations between wind energy and energy consumption in each region and the particularly high percentages in La Rioja and Navarra.*

In order to place the Spanish wind energy sector within an international context, the table 3 provides

Cuadro 3/Table 3

País/Country	Potencia Power MW	Producción Production GWh	Horas/Hours equivalentes Equivalent
Alemania/Germany	18.445	33.090	1.794
España/Spain	10.027	21.060	2.100
Estados Unidos/United States	9.181	21.120	2.300
India/India	4.253	7.660	1.801
Dinamarca/Denmark	3.087	6.950	2.251
Resto del mundo/Rest of the world	14.271	30.590	2.144
Total	59.264	120.470	2.033

Fuente: International Wind Energy Development/ Source: International Wind Energy Development

Los datos de España difieren algo de los anteriores por estar incluidos los sistemas eléctricos insulares.

Los datos de este cuadro ponen de manifiesto que entre sólo 3 países se concentra el 63,5 % del total. Destaca la importancia de España en este campo, –segundo país del mundo por potencia instalada, por delante de los EEUU, con mucho menor territorio– así como la relativa alta rentabilidad de sus instalaciones, sobre todo frente a las de Alemania.

Es indudable que la potencia eólica instalada en cada país es función de la política energética adoptada. En Alemania, por ejemplo, se ha optado por propiciar que los parques eólicos estén distribuidos por todo el país, con precios de la energía generada más altos en las áreas de menos viento, lo que ha motivado su gran desarrollo, aunque las horas equivalentes, y por tanto la rentabilidad energética, sea baja.

Los datos expuestos ponen de manifiesto que el futuro de la energía eólica depende de las políticas energéticas que se adopten en los diferentes países. Parece claro que se debe estimular el desarrollo de energías renovables como solución segura y estable a largo plazo y hay que tener en cuenta que, al menos de momento, la eólica es la única realidad cuantitativamente importante de este sector. En este sentido parece más adecuado, en nuestra opinión, situar los parques en lugares de vientos que los hagan rentables que mantener políticas permanentes de precios primados.

Previsiones de desarrollo eólico en España

En el cuadro 4 se recogen, por Comunidades, los datos de potencias previstas en el Plan de Energías

detalles de those countries with the highest installed capacity at the end of 2005.

The figures for Spain differ somewhat from previous figures as this also includes the Canary Islands and Balearic electricity systems.

The table shows that 63.5% of all wind energy is concentrated in just three countries. Spain stands out in this regard, being the second country in the world in terms of installed capacity, ahead of the United States though with far less territory. Spanish installations may be seen to have a relatively high yield, particularly with regards to Germany.

The installed wind capacity of each country is undoubtedly the result of adopted energy policies. In Germany, by way of example, this policy has ensured the equal distribution of wind parks throughout the country, with higher prices for generated energy in areas of less wind. This has undoubtedly led to the large development of this source, in spite of lower equivalent hours and ensuing energy yield.

The results show that the future of wind energy depends on the energy policies adopted in each country. It would seem evident that renewable energy should be developed as a safe and stable long-term solution and here it should be borne in mind that, to date, wind energy is the only realistic and quantitatively important source of alternative energy. As such the authors feels that it would be more adequate to place the wind parks in areas which offer higher returns, rather than maintaining permanent policies of premium pricing.

Forecasted wind development in Spain

The table 4 shows the regional power production forecasted in the Spanish Renewable Energy Plan (REP) 2005-2010 and the prospective energy plans for each region.

The table only includes regions within the mainland electric system and if the Balearics and Canary Islands were included the total Renewable Energy Plan would amount to 20,155 MW.

The total considered in the Renewable Energy Plan is high and presumes a doubling of the installed capacity as at 2005. However, this is far lower than the total sum established by the regions in their respective energy plans.

This total exceeds the maximum power of the mainland electricity system over several months and,



Parque de Leizta-Berute en Navarra, ejemplo de integración en el entorno/
 Leizta-Berute wind park in Navarra, example of integration within the surroundings.

Renovables en España 2005-2010 y las previsiones de los planes energéticos de cada Comunidad.

En el cuadro 4 figuran únicamente las Comunidades del sistema eléctrico peninsular, añadiendo Baleares y Canarias el total del PER asciende a 20.155 MW.

Puede verse que el total del Plan de Renovables es elevado, supone duplicar la potencia instalada en 2005 y, sin embargo, es muy inferior a la suma total prevista por las Comunidades en sus planes energéticos propios.

Este total supera la potencia máxima del sistema eléctrico peninsular de algunos meses y, por supuesto la correspondiente a las horas valle de todo el año, como detallamos más adelante.

También se han recogido en el cuadro las solicitudes de conexiones eléctricas recibidas por Red Eléctrica en 2005.

Lo elevado de las cifras indicadas, las diferencias entre los objetivos autonómicos y las limitaciones de la red, que más adelante comentamos, hacen ver la necesidad de una planificación energética adecuada.

Cuadro 4/Table 4

Comunidad Region	Previsión REP 2010 PER en 2010 Forecast MW	Objetivo de Regional Comunidad Objective MW	Solicitudes Petitions for a REE connections MW
Andalucía	2.200	4.000	8.145
Aragón	2.400	4.000	3.566
Asturias	450	900	605
Cantabria	300	300	174
Castilla-La Mancha	2.600	4.450	3.874
Castilla y León	2.700	6.700	8.415
Cataluña	1.000	3.000	2.198
Extremadura	225	225	0
Galicia	3.400	6.300	2.925
La Rioja	500	660	587
Madrid	50	50	232
Murcia	400	850	637
Navarra	1.400	1.530	551
País Vasco	250	624	310
Valencia	1.600	2.359	2.218
Total	19.475	35.948	34.437

Fuente: Plan de Energías Renovables y previsiones eléctricas/Source: Renewable energy Plan and electricity forecasts

Se comprende que cada Comunidad busque el mayor desarrollo eólico posible, ya que irá unido a un desarrollo industrial y a una creación de riqueza, pero es evidente que acabará habiendo limitaciones técnicas a la implantación, por lo que cuanto antes se establezcan mejor y se eviten planteamientos de tipo nacionalista que traten de pasar por encima de las realidades técnicas de un sistema eléctrico unificado que da garantía de suministro a todo el país y que debe prevalecer a los intereses localistas. España no debe dejar de ser un sistema eléctrico unificado.

También es evidente que un desarrollo repartido dentro la geografía española permitirá una mayor potencia total, porque nunca hay viento en todos los sitios, con lo que la potencia máxima instalada no será una situación alcanzable y se conseguirá un mejor aprovechamiento de la energía del viento.

La energía eólica Off Shore

La generación eólica con aerogeneradores situados en el mar, parques off shore, constituye un tipo singular, de incipiente desarrollo y enorme proyección de futuro. En 2005 la potencia total instalada en el mundo fue de 679 MW, con unas previsiones de 8.338 MW para 2010.

Los parques eólicos off shore tienen varias ventajas:

- El viento en el mar suele ser de mayor intensidad, más uniforme y sin turbulencias
- Se pueden colocar máquinas de gran tamaño (en este momento son de 3,6 MW)
- Se pueden instalar potencias muy importantes (hay proyectos de parques de 1.000 MW)
- Su afección es más reducida que la de los parques de tierra.

Frente a estas ventajas, cuentan con los inconvenientes de los mayores costos de las cimentaciones, del montaje y de las conexiones eléctricas, la agresividad del mar a las instalaciones, las dificultades de acceso etc.

Existen algunos programas comunitarios para el desarrollo técnico de esta parcela del sector que pueden dar lugar a importantes actuaciones en toda la costa europea.

obviously, that corresponding to off-peak hours throughout the year, as detailed further on.

The table also refers to petitions for electrical connection received by the electric Grid in 2005.

The high figures indicated above, the differences between regional objectives and network restrictions, as referred to below, all demand suitable energy planning.

It may be taken that each region wishes to obtain the maximum possible development in wind power as this is interrelated with industrial development and the creation of wealth. However, it is also evident that there will eventually be technical restrictions on their introduction and it is, therefore, preferable to establish these as soon as possible in order to prevent future procedure of a nationalistic or regionalistic nature which attempts to pass over the technical realities of a unified electricity system which guarantees supply to the entire country and which should prevail over local interests. Spain should not stop having a unified electricity system.

It is also evident that equal development throughout Spanish territory would provide greater total power as wind is never present everywhere. This would then mean that while maximum installed capacity might not be achieved, there would be a greater harnessing of wind energy.

Offshore wind energy

Wind energy obtained by offshore wind turbines is one of new development and enormous potential. In 2005 the total installed capacity in the world was 679 MW and the forecasts for 2010 take this figure up to 8,338 MW.

Offshore wind farms have several advantages:

- *Sea wind is usually more intense, more uniform and without turbulence*
- *Large scale generators may be installed (at present these are of 3.6 MW)*
- *Very large generating powers may be installed (there are plans for 1,000 MW parks)*
- *Offshore wind farms have a lower affect than those on land*

In contrast to these advantages, offshore farms have a number of inconveniences in terms of the



Ventajas e inconvenientes de la energía eólica

La energía eólica ofrece unas ventajas incuestionables:

- Es actualmente la única fuente capaz de generar cantidades significativas de energía renovable en prácticamente todos los países del mundo. Esta ventaja, puesta de manifiesto en España en 2005, es la que realmente propicia su desarrollo, a pesar de los inconvenientes que se comentan más adelante.
- Su instalación puede ajustarse a las necesidades y las obras se pueden realizar de manera modular con rapidez y facilidad.
- Pueden instalarse parques eólicos de potencias importantes prácticamente en cualquier lugar, lo

Parque de El Perdón, el primero construido en Navarra, en 1994/1995, con 3.439 horas equivalentes de producción/El Perdón park, the first wind park constructed in Navarra over 1994/1995, with 3,439 hours equivalent production.

increased cost of foundations, assembly and electric connections, the affect of the sea on installations, difficulty of access, etc.

Certain Community programmes are underway for the technical development of this particular sector with the intention of installing offshore wind farms throughout the European coastline.

Advantages and disadvantages of wind energy

Wind energy offers undoubtable advantages:

- It is currently the only source capable of generating significant quantities of renewable energy in practically every country in the world. This advantage, as demonstrated by Spain in 2005, is what really makes its development viable in spite of the inconveniences described below.
- Installation may be adjusted to suit needs and works may be carried out in a modular form with speed and ease.
- Wind parks of considerable power may be installed practically anywhere and this allows distributed generation.
- Wind energy does not generate any type of greenhouse emission and helps comply with Kyoto commitments, though in this latter regard Spain is one of the signing countries most furthest removed from its obligations.
- Current wind forecasting systems allow reasonably accurate predictions of the amount of energy that may be incorporated in the system within the following twenty-four hours.
- Wind energy allows development in rural areas, leads to important industrial activity and reduces dependence on oil producing companies.
- The selection of location should be made in accordance with the environmental characteristics of the area in addition to wind potential. In the Navarra study, 72 locations were considered, of which 43 were rejected on account of vegetation, passage of birds, the natural situation of the area, potential effects of the works and problems concerning electric connections. This is spite of the fact that some of the rejected locations had the best wind potential in the region.
- When taking the selected areas to be environmentally acceptable, it is important that the

que permite una localización repartida de la generación.

- No genera ningún tipo de emisiones de efecto invernadero, colaborando en el cumplimiento de los compromisos de Kioto, de los que, por cierto, España es el país firmante más alejado.
- Los sistemas actuales de predicción de viento permiten adelantar, con razonable fiabilidad, la energía que podrá incorporarse al sistema en las 24 horas siguientes.
- La energía eólica genera un desarrollo de zonas rurales, crea una actividad industrial importante y reduce la dependencia energética de los países productores de petróleo.
- La elección de los emplazamientos, además de hacerse con base en las previsiones de viento, se debe realizar en función de las características ambientales de las zonas. En el estudio del plan de Navarra se analizaron 72 emplazamientos de los que 43 fueron rechazados por razones de vegetación, pasos de aves, situación natural de la zona, afecciones que pudieran producirse por la ejecución de las obras, problemas de las líneas eléctricas de evacuación etc. Algunos de los rechazados eran los de mayor potencial de viento de la Comunidad.
- Suponiendo que los lugares elegidos sean admisibles ambientalmente, es importante que las obras se ejecuten reduciendo al mínimo su impacto, revegetando zonas alteradas etc.
- Las afecciones ambientales principales de los parques en funcionamiento son el impacto visual y las colisiones de aves. Eligiendo adecuadamente los emplazamientos, pueden reducirse a los niveles que se consideren aceptables por la sociedad. En la puesta en marcha del programa eólico de Navarra se planteó instalar la potencia necesaria para conseguir que todo el consumo eléctrico anual de la Comunidad se generase en la misma y con energías renovables. Este criterio, que suponía asumir el impacto de la energía consumida, fue muy bien aceptado por la población y facilitó el rápido desarrollo eólico de Navarra.
- El principal inconveniente de la energía eléctrica de origen eólico es que se trata de una energía eventual, sin garantía de potencia, por lo que su instalación no evita la necesidad de disponer de plantas de otras fuentes que aseguren el suministro

works be carried out with minimum impact and that all altered areas be replanted and restored.

- *The main environmental effects of operating wind parks are their visual impact and the collision of birds. If locations are suitably selected, this may reduce these impacts to levels accepted by the public. When introducing the Navarra wind programme, consideration was given to installing sufficient capacity to allow all the annual electricity consumption of the region to be generated within the same by renewable energies. This criteria, which required taking responsibility for the impact of consumed energy, was very well accepted by the population and allowed the rapid development of wind energy in Navarra.*
- *The main disadvantage of wind generated electric energy is that it is a provisional source without guaranteed power and, therefore, its installation does not eliminate the need for other sources of energy to guarantee supply over those days and hours when there is no wind. Further emphasis is made on this point later on.*
- *The lack of guaranteed power together with the large installed capacity being accumulated in Spain, will eventually affect the technical and economical conditions concerning the integration of wind energy to the electricity grid. We shall also deal with this subject in further depth later on.*
- *The current cost of installation is around 1,200 €/MW, which may be considered reasonable when compared to other power installations. These costs have increased over recent years on account of the rising prices of steel, copper and equipment to support voltage dips, etc.*
- *The generating costs depend on the real costs of the works, wind conditions, the characteristics and availability of equipment, depreciation and amortization criteria etc. The National Renewable Energy Plan considers costs of between 0.051 and 0.07 €/kWh. It is necessary to consider the probability that new parks will have a lower number of wind hours than those already built, with an ensuing drop in yield, but that this will also lead to a fall in cost due to the application of scale economies in a sector which has the capacity for increased production and significant technological improvements.*

los días y horas en que no haya viento. Más adelante insistimos en este punto.

- La falta de garantía de potencia, unida a la importante potencia instalada que se está alcanzando en España, acabará incidiendo en las condiciones técnicas y económicas de acceso de la energía eólica a la red eléctrica. También profundizamos en este tema más adelante.
- Los costos actuales de instalación son del orden de 1.200 €/MW, que pueden considerarse reducidos respecto a otras instalaciones energéticas. En los últimos años se han incrementado debido a los aumentos de los precios del acero, cobre, equipos para soportar huecos de tensión etc.
- Los costos de generación dependen de los costos reales de las obras, condiciones de viento, características y disponibilidad de los equipos, criterios de amortización etc. En el Plan Nacional de Energías Renovables se consideran costos entre 0,051 y 0,07 €/kWh. Hay que tener en cuenta que es probable que los nuevos parques que se hagan tengan menor número de horas de viento que los ya construidos, por lo que la rentabilidad irá descendiendo, si bien también opera a favor del descenso del coste la aplicación de economías de escala en un sector con recorrido para superiores producciones y mejoras tecnológicas significativas.
- La situación legal actual de España ha permitido el rápido crecimiento indicado. Las modificaciones que se introduzcan en el mismo deben asegurar la continuidad del crecimiento del sector, dentro de lo que permita la garantía del funcionamiento del sistema eléctrico peninsular.



Torre de hormigón de 80 m con aerogenerador de 1500 kW construida en 2005 en el parque de Albar, en Navarra/80 m high concrete tower with 1500 kW wind generator built in 2005 at the Albar wind park in Navarra.

- *Spanish legislation has enabled this rapid growth and any changes to the same must ensure the continued growth of the sector to guarantee the operation of the mainland electric system.*

Technical problems of wind energy

Wind energy has considerably developed over recent years but there are still technical problems requiring attention.

In order to focus these problems, we shall first indicate some of the basic concepts of wind generation.

The power produced by a wind generator is:

$$P = \frac{1}{2} C_p S \rho V^3$$

Where:

P is power

C_p the coefficient of power with the value indicated in the figure below

ρ is the density of air

S is the section of the area swept by the blades

V is the wind speed

The equation demonstrates:

Problemas técnicos de la energía eólica

La energía eólica se ha desarrollado considerablemente en los últimos años, pero sigue habiendo problemas técnicos pendientes de solucionar. A continuación relacionamos algunos de ellos.

Para centrar mejor el tema vamos a exponer previamente los conceptos básicos de la generación eólica.

La potencia generada por un aerogenerador es:

$$P = \frac{1}{2} C_p S \rho V^3$$

En la que:

P es la potencia

C_p un coeficiente cuyo valor se indica en la figura adjunta

S es la sección del área barrida por las palas

ρ es la densidad del aire

V es la velocidad del viento

La ecuación pone de manifiesto:

- La importancia de tener altas velocidades de viento, al ser la potencia función del cubo de la velocidad (pasar de 5 m/s a 8 m/s de velocidad supone multiplicar por 4,1 la potencia generada).
- La influencia de la densidad del aire, ya que la energía se obtiene de la masa de aire en movimiento. Se genera más energía en el nivel del mar que en cotas altas en que la densidad es menor. Como dato informativo podemos señalar que la densidad del aire en el nivel del mar a 15 ° y 1013 milibares es de 1,228 kg/m³ y que la equivalente a 1.000 metros es de 1,112 kg/m³. etc.
- La ecuación también pone de manifiesto que para potencias mayores, con el mismo viento, se deben hacer máquinas que tengan mayor sección, es decir con mayor longitud de pala.
- La importancia de operar con un buen valor de C_p , que es la parte del viento que se aprovecha y que, como puede verse en la figura, tiene valores muy variables, en función de λ , con una zona de máximos muy limitada. Como es sabido el máximo teórico de C_p es 0,59 (límite de Betz).

En la figura 1 se ha dibujado únicamente la curva de C_p correspondiente a una máquina de 3 palas, que son las normalmente utilizadas, porque, a las velocidades de funcionamiento de los aerogeneradores actuales, el aumento de producción que supondría un número mayor de palas no justifica el aumento del costo y las mayores complejidades correspondientes. En cambio con velocidades bajas en la punta de las palas y con vientos reducidos, el número de palas es muy importante, por eso los molinos de viento multi-palas para bombear agua, que salen en todas las películas del Oeste, tienen un gran número de palas.

El coeficiente λ es la relación entre la velocidad en la punta de la pala y la del viento. Puede verse la importante variación de C_p para diferentes valores de λ .

• The importance of high wind speeds as power is a function of velocity cubed (an increase in speed from 5 m/s to 8 m/s would imply a multiplication of generated power of 4.1).

• The influence of air density as the energy is obtained from the air mass in movement. More energy is generated at sea level than at higher elevations on account of lower density. By way of reference we may indicate that air density at sea level at 15° and 1013 millibars is 1,228 kg/m³ and that at 1,000 metres is 1,112 kg/m³.

• The equation also shows that at higher powers, with the same wind, it is necessary to provide machines with greater section or blade length.

• The importance of operating with a good value of C_p , this being the proportion of the wind harnesses and which, as seen from the figure, has very variable values, in terms of λ , with an very limited maximum area. As widely known, the theoretical maximum of C_p is 0.59 (the Betz limit).

The figure 1 only shows the curve of C_p corresponding to the more widely employed 3 blade machine, as at the operating speeds of modern wind turbines, the increased production provided by a greater number of blades does not justify the increased cost and the greater corresponding complexities entailed. However, when there are low speeds at the tips of the blades and reduced winds, the number of blades is very important and this explains the large number of blades seen on the water pump windmills appearing in all the Westerns.

The coefficient λ is the ratio between the speed at the tip of the blade and the wind speed. Sizeable variations in C_p may be seen for different λ values.

We have plotted the power curve of a 1,500 kw wind turbine in terms of wind speed and have superimposed the frequency of each wind speed at one site. In order to calculate total production it is necessary to integrate that of each speed, calculated according to the corresponding C_p coefficient. From the two curves one may readily comprehend the importance of the correct selection of a suitable coefficient for the more frequent wind ranges, From the case indicated below it may be seen that there is considerable production at low wind speeds.

Hemos dibujado la curva de potencia de un aerogenerador tipo de 1.500 kW (Fig. 2), en función de la velocidad de viento y hemos superpuesto la frecuencia de cada velocidad de viento de un emplazamiento. Para calcular la producción total se debe integrar la de cada velocidad, calculada en base al coeficiente C_p correspondiente. A la vista de las dos curvas se comprende la importancia de acertar en la elección de un coeficiente adecuado para la franja de vientos más frecuentes. Puede verse que, en el caso indicado en la figura, la producción con velocidades de viento reducidas es muy importante.

- Por razones de turbulencia la velocidad de la punta de las palas se suele limitar a 200 km/h, lo que implica que en máquinas mayores la velocidad de giro sea más reducida y por tanto mayor la relación del multiplicador (para tener 1.500 vueltas en el generador) o mayor número de polos en caso de ser de acoplamiento directo.
- El aumento del tamaño de las palas y la reducción de la velocidad de giro da lugar a mayores esfuerzos y por tanto a la necesidad de que las máquinas deban ser más robustas.
- También las palas deben serlo, por lo que ya se ha empezado su construcción con fibras de carbono, en vez de vidrio, que, aunque de mayor costo, tienen mejores condiciones estructurales. Hay que tener en cuenta que las palas de un aerogenerador son las estructuras con más duras condiciones de trabajo, son ménsulas de gran longitud sometidas a las fuerzas aerodinámicas, que producen su giro, al peso que les afecta de forma variable según su posición, al efecto de sombra de la torre cuando pasan delante de ella y todo ello 30 ciclos por minuto.
- Deben desarrollarse sistemas eléctricos y electrónicos para adecuarse a los problemas de seguridad y estabilidad de la red de modo que, en casos de huecos de tensión, se evite la desconexión de grandes potencias para las que el sistema eléctrico tendría dificultades de disponer de alternativas que garantizaran el suministro y pudieran producirse apagones generalizados.
- Cada vez las torres son más altas, para captar mayores velocidades de viento y los aerogeneradores de mayor potencia, para aprovechar mejor los emplazamientos. Como consecuencia de ambos factores aumentan los esfuerzos en las torres y por tanto estas deben ser más resistentes. Actualmente,

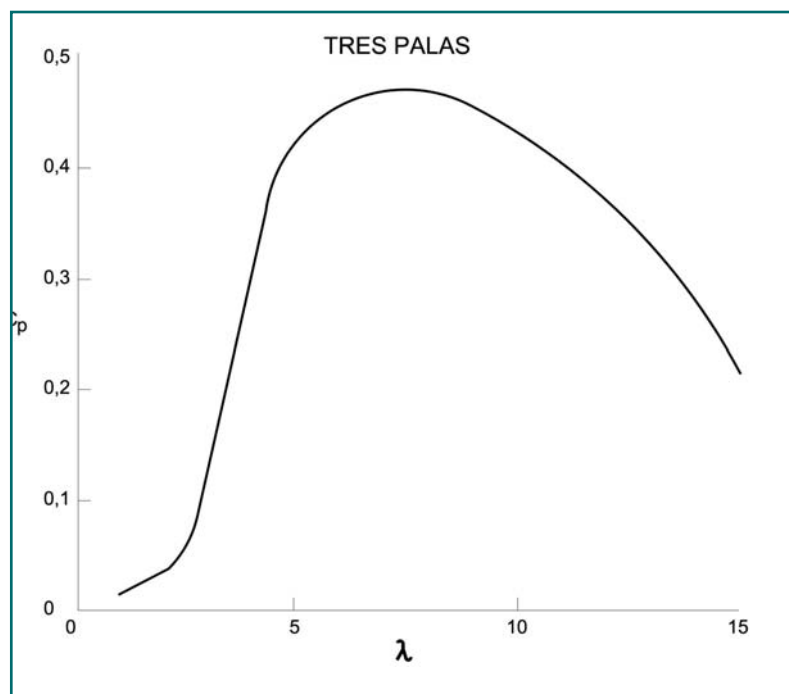
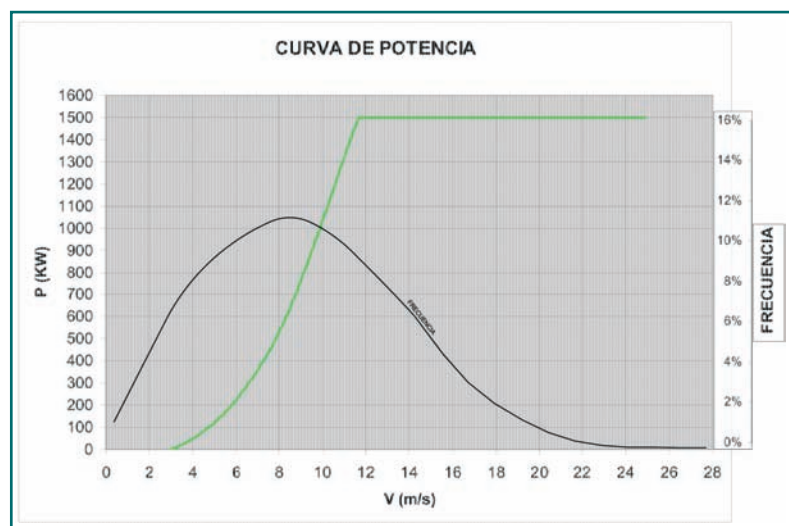


Fig. 1.

- As a result of turbulence, the speed at the tip of the blades is normally restricted to 200 kph which, in larger turbines, implies a lower rotating speed and, subsequently, a greater multiplying ratio (in order to gain 1,500 rotations in the generator) or a greater number of poles in the case of direct coupling.
- An increase in the size of the blades and a reduction in the rotating speed gives rise to greater stress and the need for more robust turbines.

Fig. 2.



con máquinas de 1.500 kW y torres de 80 m de altura se ha llegado a diámetros en la base de las torres de 4,50 m, que no puede aumentarse porque es el galibo de los puentes de carreteras. Ello obliga a que, para mayores esfuerzos, el aumento de la resistencia se consiga únicamente a base de mayores espesores de chapa, lo que crea problemas de costo, de curvado de chapas, de soldaduras etc. Como solución alternativa se plantean torres de hormigón prefabricadas en piezas de dimensiones que las hagan transportables y que se monten en obra. En la foto puede verse una torre de hormigón de 80 metros de altura para un generador de 1500 kW instalada en el parque de Aibar (Navarra) y que es el primer ejemplo de solución prefabricada de España. Ha habido algunos prototipos de torres de hormigón in situ, tanto en España como en Alemania, para aerogeneradores de gran potencia (hasta 5 MW), pero no parece que vayan a ser soluciones en serie para parques de gran número de equipos. Las torres de hormigón construidas con elementos prefabricados se pueden proyectar del diámetro que los esfuerzos requieran y resultan mucho más proporcionadas que las de acero, como puede verse en el montaje en que la torre de acero parece anoréxica. El desarrollo de torres de hormigón es uno de los retos actuales del sector.

Sistemas de garantía de la energía eólica

Ya hemos comentado que la energía eólica es una energía eventual que carece de garantía, lo que es compatible con el hecho de que, del mismo modo que se sabe si en los próximos días va a llover, también se sepa, más o menos, que viento va a haber en cada sitio y por tanto la energía de origen eólico que se va a generar. Es decir que la eventualidad es compatible con la programación, lo que facilita el trabajo del operador del sistema eléctrico.

Si embargo está claro que hay días sin viento, y en algunos casos no lo hay en casi ningún sitio de la península. A, por ejemplo, el 17 de julio de 2006 se alcanzó la mayor punta de demanda eléctrica histórica de verano (40.730 MW). Climatológicamente fue debida a un anticiclón situado sobre la península, sin apenas viento y con muy altas temperaturas, en la que la energía eólica sólo aportó 611 MW (el 1,5 % del total).

• *Blades are now beginning to be constructed in carbon fibre instead of glass fibre and while these are more expensive they have better structural conditions. It is necessary to bear in mind that the blades of a wind turbine are the structures with the most severe working conditions and these very long attachments are subject to aerodynamic forces, produced by turning, the variable weight imposed on the same according to position and the shadow effect of the tower when they pass in front of the same, and all this at 30 cycles per minute.*

• *Electric and electronic systems should be developed to overcome problems concerning the safety and stability of the network and to prevent large power disconnection, in the case of voltage dips, and potential problems of obtaining alternative power to guarantee supply and which could potentially lead to widespread blackouts.*

• *Towers are becoming increasingly taller to capture greater wind speeds and wind generators are becoming more powerful to take better advantage of their locations. Both these factors increase the stress on the towers and these have to be more resistant. At present, turbines of 1,500 kW and 80 m high towers have base diameters of up to 4.50 m, and this diameter cannot be increased as it is the maximum clearance of road bridges. This means that under greater stress, increased strength can only be achieved by greater plate thicknesses with all the ensuing problems of cost, curving of plate, welding, etc. As an alternative solution, concrete towers have been employed using prefabricated components which may be transported and erected on site. The photograph shows a 80 m high tower for a 1500 kW generator installed in the Aibar park (Navarra), this being the first example of a prefabricated solution in Spain. There have been some prototypes of in-situ concrete towers both in Spain and Germany for large power wind generators (up to 5 MW), but these do not appear to be a widespread solution for parks with large numbers of towers. Prefabricated concrete towers may be designed in diameters to suit the stresses and are far more proportioned than the steel towers, as may be seen in the assembly in which the steel tower appears almost anorexic in*

Ese día el sistema tuvo que utilizar otras fuentes para garantizar el suministro.

Es decir, la energía eólica puede ser muy importante en la cuenta anual de kWh generados, pero tenemos que disponer casi de la misma potencia instalada para los días en que no hay viento en tanto no se disponga de sistemas que den garantía de suministro a la energía eólica. Para esto hay, en este momento, dos posibles soluciones, al margen de recurrir a otras fuentes renovables no intermitentes, como la biomasa:

- Centrales reversibles que bombeen en horas de viento y generen cuando no lo haya.
- Fabricar hidrógeno para producir electricidad u otros usos energéticos.

La primera solución fue implantada en España cuando se puso en marcha en programa de centrales nucleares a fin de buscar consumos a la gran potencia nocturna sin demanda. De noche se bombeaba y de día se generaba, ajustándose de este modo la curva de producción neta a la demanda real. Ello supuso la gran inversión de las centrales reversibles, (algunas de ellas magníficas) que actualmente sirven para asegurar la potencia del sistema eléctrico.

Algo así cabe plantearse con la energía eólica: habrá que construir nuevas centrales reversibles, pagar su coste y asumir la pérdida de rendimiento que el bombeo y la generación suponen y que reducen la energía neta del conjunto al 60 %. Es decir, que se precisa hacer nuevas inversiones y reducir la energía generada al menos al 60 %. La realidad de esta solución estará condicionada a la forma en que se distribuyan los vientos, se comprende que en caso de que sean muy estacionales, con épocas sin viento, se podrá corregir la variación diaria pero no se podrá asegurar la potencia en todo momento.

La alternativa es fabricar hidrógeno cuando haya viento y acumularlo para su uso cuando se precise. Esta solución ofrece la ventaja de no tener problemas de estacionalidad de vientos; además el hidrógeno se puede producir en parques situados en lugares de mucho viento, aunque no haya red eléctrica, y transportarlo a los lugares de consumo. Tiene el inconveniente de que las pilas de combustible, para vehículos no están todavía muy desarrolladas, son caras, de bajo rendimiento etc. El rendimiento de fabricar hidrógeno y producir electricidad es, actualmente, del orden de 0,35, inferior por tanto al de las centrales re-

comparison. The development of concrete towers is currently one of the challenges of the sector.

Guaranteed systems of wind energy

As we have already indicated, wind energy is a provisional source that lacks guarantee. However, this is compatible with the fact, that in the same way that one may forecast rain over following days, it is also possible to know, within a reasonable degree of accuracy, the prevailing wind in each area and, therefore, the wind energy that can be generated. This means that this provision is compatible with scheduling and aids the work of the electricity system operator.

However, it is similarly clear that there will be days without wind and in some cases that there will be no wind anywhere on the mainland. By way of example, the highest ever summer electricity demand (40,730 MW) was recorded on 17 July 2006. In weather terms this was provoked by a anticyclone over the peninsular with very high temperatures and hardly any wind, and where wind energy could only provide 611 MW or 1.5% of the total. On this day the system had to employ other sources to guarantee supply.

This means to say that while wind energy may be very important for the annual account of generated kWh, it is necessary to dispose of almost the same installed capacity for those days with no wind until such time as guaranteed supply systems of wind energy are in place. At present there are two possible solutions beside resorting to other non-intermittent renewable sources such as biomass:

- *Reversible plants which pump during wind hours and which generate when there is no wind.*
- *The manufacture of hydrogen for electricity production and other energy uses.*

The first solution was introduced in Spain on the establishment of the nuclear plant programme in order to gain large power nocturnal supplies without demand. Pumping was carried out at night and generation during the day and this allowed the net production curve to be set in accordance with real demand. This implied large scale investment in

versibles, aunque al tratarse de un sistema en desarrollo se prevé que pueda llegar a 0,55. La solución del hidrógeno irá seguramente ligada al desarrollo de vehículos que usen esa fuente de energía. Su generalización mejoraría el medio ambiente urbano, ya que el tráfico ni haría ruido ni produciría humos.

La garantía de suministro supone un encarecimiento de la energía eólica, pero para valorarla adecuadamente habría que considerar todos los costos de las soluciones alternativas, como las emisiones de CO₂, la moratoria nuclear, el desmantelamiento de las centrales nucleares (no incluido en los precios del pool), las subvenciones estatales al carbón nacional (en 2005 fueron de 481,3 millones de euros), la contaminación por lluvias ácidas del carbón, etc.

Caben otras soluciones para casos concretos, como bombeos de acuíferos profundos a balsas de regulación de riego, pero, aunque en ciertos supuestos puedan ser muy interesantes, nunca serán la solución al problema de fondo del sistema eléctrico peninsular.

Un caso de especial utilización de la energía eólica puede ser Canarias. Esta Comunidad tiene una casi total dependencia energética del petróleo que, además de para la generación eléctrica, se usa para la desalación del agua del mar. Sin embargo los fuertes vientos de la isla, unidos a los grandes desniveles existentes pueden propiciar la construcción de aprovechamientos eólicos unidos a centrales reversibles y a plantas desaladoras que constituyan una alternativa parcial al uso del petróleo.

Limitaciones a la generación en horas valle

También es un hecho que cuando haya una gran potencia eólica instalada habrá momentos, en las horas valle, en que habrá exceso de oferta y el operador del sistema deberá seleccionar la energía que admita. Ya en el año 2005 hubo momentos de limitación de entrada en la red de energía de parques eólicos.

En el año 2005 la mínima potencia demandada en las horas valle estuvo comprendida casi todos los meses entre 17.000 y 18.000 MW; únicamente en febrero y diciembre superó los 20.000 MW.

Las diferentes fuentes de generación que, por unas u otras razones, pueden tener prioridad para entrar en la red son, con datos de 2005 de REE:

reversible plants (some of which being excellent examples) and currently serve to guarantee the power of the electricity system.

Something along the same lines may be considered for wind energy. It would be necessary to construct new reversible plants, pay their cost and take on board the loss in performance implied by pumping and generation which would reduce the net energy of the whole by 60%. This would then make it necessary to make new investment and reduce generated energy by at least 60%. The reality of this solution is subject to the manner in which the winds are distributed and when these are taken to be very seasonal, with periods without wind, the daily variation could be corrected but it would not be possible to assure the power at all times.

The alternative is to produce hydrogen when there is wind and to store this for use as necessary. This solution has the advantage that it is not affected by the seasonability of winds and, furthermore, the hydrogen may be produced at wind parks where there are prevalent winds, even without electricity networks, and to transport this to areas of consumption. There is the disadvantage that fuel cells for vehicles are still at an early stage of development and are currently expensive and offer low performance. The efficiency of manufacturing hydrogen and producing electricity is currently around 0.35, this being subsequently lower than that of the reversible centres, though as this is a system still under development it is expected that this might reach up to 0.55. The hydrogen solution would undoubtedly be associated with the development of vehicles using this source of energy. The generalized use of hydrogen would improve the urban environment as there would be no traffic noise or fumes.

Guaranteed supply implies the increased cost of wind energy, but in order to consider this in a suitable light it is necessary to consider all the costs of alternative solutions, such as CO₂ emission, the nuclear moratorium, the dismantlement of nuclear power plants (not included in pool prices), state coal subventions (in 2005 these were 481.2 million Euros), pollution from acid rain, etc.

There are other solutions for specific cases, such as pumping from deep water bearing stratum to irrigation regulation reservoirs and while these may



Nuclear	7.876 MW
Hidráulica del régimen especial	1.758 MW
Otras renovables del régimen especial (residuos, solar etc)	939 MW
Régimen especial no renovable (cogeneración etc)	6.646 MW
Total	17.218 MW

Montaje de torre de hormigón y torre de acero de la misma altura en el que se aprecia el mejor dimensionado de aquella/Erection of concrete tower and steel tower of the same height and in which one may appreciate the improved proportions of the former.

Si a esta potencia sumamos los 20.000 MW eólicos que se alcanzarán próximamente, que con el coeficiente de utilización máxima del 70 % de agosto de 2005, suponen una generación de 14.000 MW, tenemos un total muy superior a la demanda en bastantes ocasiones. Este tema debe estudiarse a fin de saber las previsiones del sistema y poder adoptar las medidas oportunas. De no hacerlo empezará a haber horas sin generar que coincidirán, con las de mayor potencial y que, desde el punto de vista de la rentabilidad, obligarán a adoptar soluciones de acumulación.

Para dar una idea de la evolución de la potencia eléctrica demandada por el sistema peninsular a lo largo del día, incluimos la curva del suministro eléctrico del 17 de julio de 2006 en que, como ya hemos indicado, se produjo la punta histórica de consumo de verano con 40.730 MW. La potencia mínima de ese día fue de 22.920 MW, bastante superior al valor más bajo mensual, que fue inferior a 18.000 MW.

be interesting in certain instances, they will never be a solution to the basic problem of the mainland electricity system.

A case for the special use of wind energy may well be that of the Canary islands. This region almost entirely depends on oil for both electricity generation and for the desalination of sea water. However, the strong winds on the island together with the rocky terrain would make it ideal for wind harnessing together with reversible power plants and desalination plants as a partial alternative to oil.

Limitation of trough hour generation

It is also the case that when there is a large installed capacity of wind energy there will be times during off peak hours when there will be excess supply and when the system operator will have to select the energy to be incorporated. In 2005 there were restrictions on the incorporation of energy from wind parks on certain occasions.

In 2005 the minimum power demanded over off-peak hours was set between 17,000 and 18,000 MW for almost the entire year and this only exceeded 20,000 MW in February and December.

On the basis of electricity network connection data for 2005, the different sources of generation which, for one reason or another, have priority access to the grid are:

Nuclear	7,876 MW
Hydropower (Special regime)	1,758 MW
Other renewable sources under the special regime (waste ,solar, etc.)	939 MW
Non-renewable sources (cogeneration, etc.) under Special Regime	6,646 MW
Total	17.218 MW

If we then add the 20,000 MW of wind energy which will soon be reached, and when taking that at the 70% maximum demand factor recorded in August 2005, this would imply a generation of 14,000 MW, we would then have a total well over demand on many occasions. This matter should be studied in order to establish system forecasts and introduce relevant measures. If this is not carried out there will soon be hours without generation which will coincide with those of greater potential and which

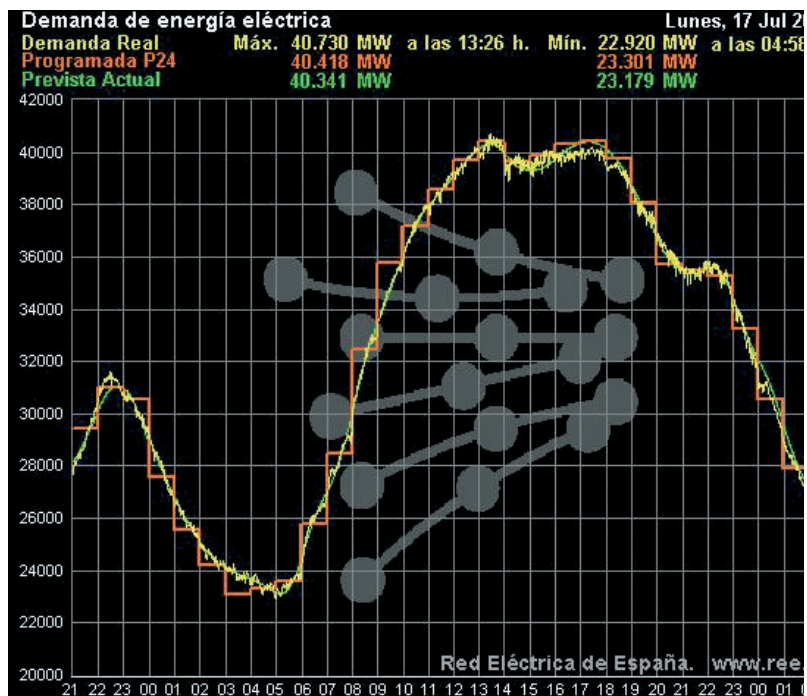


Fig. 3.

Conclusiones

De lo expuesto se desprende que:

- La energía eólica es la única fuente renovable capaz de producir actualmente cantidades significativas de energía eléctrica, por lo que parece obligado potenciarla, estableciendo los marcos legales y económicos que la hagan posible.
- No puede hablarse de mayores costos, frente a otras alternativas de generación, sin hacer un estudio detallado de todos los gastos que supone cada solución.
- No hay graves problemas técnicos derivados del mayor tamaño de los aerogeneradores aunque, como es natural, se deben ir adaptando a los cambios cualitativos que suponen sus mayores dimensiones.
- En el futuro puede haber limitaciones de entrada en la red de la energía eólica en horas valle y convendrá tener estudiadas las soluciones oportunas para almacenar la energía de modo que pueda incorporarse a la red en horas de mayor demanda.
- Esa acumulación permitirá el aprovechamiento completo del potencial y dará garantía a los kilowatts eólicos y, por tanto, mayor valor energético y económico. ♦

demand accumulation solutions for the sake of efficiency.

In order to give an idea of the development of electric power demand on the mainland system throughout the day, we include the curve for the electricity supply on 17 July 2006 on which a maximum historic peak for summer consumption of 40,730 MW was recorded. The minimum power demand on this day was 22,920 MW which is well over the lowest monthly figure which was below 18,000 MW.

Conclusions

From that indicated in this article it may be taken that:

- Wind energy is the only renewable source currently capable of producing significant quantities of electrical energy and it would subsequently appear essential to promote the same and establish the legal and economic framework to make this viable.
- Reference cannot be made to increased costs over other alternative sources without making a detailed study of all the costs implied by each solution.
- There are no serious technical problems resulting from the increased size of wind generators though, as is logical, adaptation should be made to the qualitative changes implied by these increased dimensions.
- In the future there may be network restrictions on the incorporation of wind energy over off-peak hours and it is necessary to study solutions for the storage of energy so that this may be incorporated on the grid over hours of greater demand.
- This accumulation would allow the complete harnessing of wind potential and would guarantee wind kilowatts and, subsequently, greater energy and economic value. ♦

Referencias:

- Estudio de determinación de Infraestructuras de producción de energía eólica en Navarra (1995) - Acciona Energía (entonces Energía Hidroeléctrica de Navarra).
- Plan de Energías renovables en España 2005-2010 - IDAE.
- El sistema eléctrico español 2005 - Red Eléctrica de España.
- International Wind Energy Development - World Market Update 2005.
- Archivo fotográfico de Acciona Energía.