

# LA ENERGÍA EÓLICA\*

## Parte 2 (Conclusión)

### 3.2.6 Potencia eólica instalada en España

En la Tabla 3 se representa la potencia eólica instalada en los últimos años en cada Comunidad Autónoma, así como el número de Parques. Galicia, Castilla-La Mancha y Castilla-León son las Comunidades con mayor potencia instalada, suponiendo en 2004 casi un 61% del total. La cuarta posición es para Aragón (1.163 MW), seguida por Navarra (849 MW, ahora un 10% del total), que hasta 2002 tenía la tercera posición, pero, debido a la espectacular subida de potencia instalada en Castilla-La Mancha, Castilla-León y Aragón, ha intercambiado los puestos. Un comentario merece la Comunidad autónoma de Andalucía, que, si bien hasta 2001 prácticamente mantenía la potencia, en los últimos tres años la ha duplicado, al igual que Murcia.

Las tasas de crecimiento de las distintas Comunidades Autónomas son muy dispares, siendo significativos los aumentos en País Vasco, La Rioja y la Comunidad Valenciana.

### LA INDUSTRIA EÓLICA EN ESPAÑA

La energía eólica es favorable desde el punto de vista medioambiental, pero, desde el punto de vista de seguridad de suministro, como el resto de las energías renovables, tiene inconvenientes ya que depende de la Naturaleza. Pero gracias a ello se ha promovido la creación de nuevas empresas, la generación de empleo, la formación de nuevos profesionales y, en definitiva, la mejora de la competitividad industrial del país.

#### Fabricantes

La tecnología eólica en España está muy desarrollada y existen varios fabricantes que disponen de tecnología propia, compitiendo en la actualidad

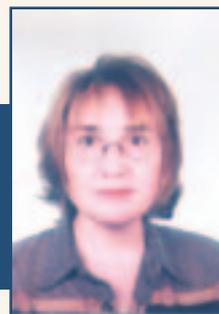
**Beatriz Yolanda Moratilla Soria**

Dr. Ingeniero Industrial

Dep. de Ingeniería Mecánica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Universidad Pontificia Comillas de Madrid



Comunidad		1998	2000	2001	Variación (%) 2001/2000	2004
Andalucía	Potencia (MW)	127	150	158	5,3	346
	Número de parques	14	15	16	6,7	
Aragón	Potencia (MW)	209	230	404	75,7	1.163
	Número de parques	10	21	30	42,9	
Asturias	Potencia (MW)	-	-	24	-	144
	Número de parques	-	-	1	-	
Balears	Potencia (MW)	0,2	0,2	0,2	-	3,66
	Número de parques	-	-	-	-	
Canarias	Potencia (MW)	82	115	120	4,3	135
	Número de parques	22	29	31	6,9	
Cantabria	Potencia (MW)	-	-	-	-	-
	Número de parques	-	-	-	-	-
Castilla-La Mancha	Potencia (MW)	112	348	493	41,7	1.567
	Número de parques	5	11	15	35,4	
Castilla-León	Potencia (MW)	122	228	357	56,6	1.535
	Número de parques	8	16	27	59,3	
Cataluña	Potencia (MW)	59	71	83	16,0	94
	Número de parques	6	7	8	14,3	
Comunidad Valenciana	Potencia (MW)	3	7	3	0	20
	Número de parques	1	1	1	0	
Extremadura	Potencia (MW)	-	-	-	-	-
	Número de parques	-	-	-	-	-
Galicia	Potencia (MW)	438	601	938	56,1	1.914
	Número de parques	25	34	47	38,2	
La Rioja	Potencia (MW)	-	24	74	208,3	348
	Número de parques	-	1	2	100	
Madrid	Potencia (MW)	-	-	-	-	-
	Número de parques	-	-	-	-	-
Murcia	Potencia (MW)	6	11	11	0	54
	Número de parques	1	2	2	0	
Navarra	Potencia (MW)	318	468	553	18,1	849
	Número de parques	17	23	27	17,4	
País Vasco	Potencia (MW)	-	24	27	12,5	85
	Número de parques	0	1	2	100	
Total nacional	Potencia (MW)	1.476	2.274	3.242	42,6	8.263
	Número de parques	117	161	209	29,8	

Tabla 3. Número de parques y potencia (MW) instalada por CCAA

en el mercado mundial y dedicando grandes recursos a la Investigación.

Los aerogeneradores fabricados permiten garantizar una disponibilidad

\*La parte I de este artículo se publicó en el número 9 de diciembre de 2005 (págs. 53-59)

superior al 95% y cumplen la curva de potencia declarada en el  $\pm 5\%$ .

#### Promotores de Parques eólicos

La promoción de Parques eólicos en España ha crecido a finales de los 90 con tasas del 100%. Las máquinas han pasado de los 100-300 kW en los 90, con costes específicos de 120 €/kW instalado, a los 750-1.200 kW con costes específicos del orden de los 900 €/kW instalado y con tasas de crecimiento de este tipo de energía muy elevados en los años actuales (Fig. 9).

En España hay del orden de 400 empresas que trabajan en este sector, de las que casi el 80% son pequeñas y medianas. A igual potencia instalada, con esta tecnología se cre-

está produciendo por algunos agentes sociales debido al incesante incremento de aerogeneradores. Las zonas apropiadas para instalar los Parques son en muchos casos de gran valor paisajístico, lo que acentúa más este problema de no fácil solución.

- Finalmente, hay que resaltar (igual que ocurre con el resto de las instalaciones eléctricas) el inconveniente de la falta de agilidad en la obtención de permisos y autorizaciones. Los arduos y dilatados trámites ante las diferentes administraciones (nacionales, autonómicas y municipales) encarecen innecesariamente la construcción e incluso a veces hacen que los empresarios abandonen los proyectos.



Fig. 9. Evolución del coste por kW eólico instalado

an hasta cinco veces más puestos de trabajo que con las tecnologías energéticas tradicionales, lo cual hace que cuente con apoyos gubernamentales que no dejan falsear el mercado energético.

#### 4.3 Barreras

Las barreras históricas existentes para la entrada de la energía eólica son las siguientes:

- La falta de redes de transporte adecuadamente dimensionadas, y cercanas a los emplazamientos de los Parques eólicos, que sean capaces de admitir la energía producida. El carácter fluctuante de este tipo de energía, junto con el hecho de que estas instalaciones suelen estar conectadas a redes de distribución propias de zonas rurales, dificulta la operación y gestión de las redes y plantea un problema grave de calidad de la energía circulada por las redes.

- Es importante el rechazo que se

#### 4.4 Apoyo a la energía

La promoción de la energía eólica en España se realiza mediante el marco legislativo que incentiva económicamente la instalación de Parques eólicos conectados al sistema eléctrico.

La energía eólica está considerada dentro del *Régimen Especial de Generación*. La Ley 54/1997 del Sector Eléctrico supuso un apoyo importante, en el caso de que el Parque tenga una potencia inferior a 50 MW para el desarrollo de la industria eólica, puesto que éstos no ofertan su energía al *pool* y reciben un precio regulado superior al precio de mercado en competencia.

El Real Decreto 2818/1998, de 23 de septiembre, sobre producción de energía eléctrica mediante instalaciones que emplean para la generación de energía renovable, residuos y cogeneración, desarrolló los requisitos y procedimientos para acogerse al

llamado *Régimen Especial de Generación* así como el régimen económico para los productores de electricidad acogidos a este régimen. Este sistema de primas o incentivos económicos ha sido el principal responsable de que se haya desarrollado la energía eólica de forma significativa y se considera imprescindible si se requieren conseguir los objetivos definidos en el *Plan de Fomento de las Energías Renovables*.

En diciembre de 1999, el Gobierno aprobaba el *Plan de Fomento de las Energías Renovables* en el que se establecían las medidas necesarias para alcanzar el objetivo de que el 12% de la energía primaria consumida en España procediera de fuentes de energía renovables en 2010.

En Europa, por otro lado, el *Libro Verde "Hacia una estrategia europea de seguridad de abastecimiento energético"*, publicado por la **Comisión Europea** en noviembre de 2000, propone que se fomente el uso de las energías renovables y la cogeneración para lograr el objetivo de reducir la dependencia energética y limitar la emisión de gases de efecto invernadero.

Esto se concretó en la Directiva 2001/77/CE, de 27 de diciembre de 2001, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovable, en la que se definen las líneas básicas regulatorias que determinarán la expansión de la energía eólica.

El Real Decreto 436/2004 (nuevo desarrollo de la Ley 54/1997) objetiva el cálculo de la prima, da un precio fijo para toda la vida del Parque, incentiva las mejoras técnicas en cuanto a una mayor integración en la red (huecos de tensión), obliga a predecir la producción y esto hace que esa oferta directa al mercado mejore la retribución económica (especialmente para las grandes empresas).

En España hay ayudas públicas para el desarrollo de proyectos de I+D+i así como para la instalación de Parques eólicos. El **Ministerio de Ciencia y Tecnología**, a través del **IDAE** y las CC.AA, convoca programas de ayuda a este tipo de energía. En Europa se incluyen en las distintas

convocatorias del Programa Marco y se emplean los *Fondos Europeos para el Desarrollo Regional* (FEDER) para cofinanciar los planes de desarrollo de la red de forma que permita la integración fiable y segura en los sistemas eléctricos de los Parques eólicos.

## ENERGÍA EÓLICA e I+D

### 5.1. Introducción

La energía eólica se ha desarrollado de forma significativa en los últimos 15 años ya que se trata de una tecnología multidisciplinar, receptiva a todo tipo de avance técnico y en la que se pueden aplicar casi de inmediato y con gran agilidad los resultados de la investigación en los más variados campos. Eso hace que sea difícil separar lo que es propiamente investigación y desarrollo tecnológico de lo que es la descripción del estado actual de la tecnología descrita anteriormente.

### 5.2 Modelos para la predicción del viento

La importancia que ha tomado la generación de energía eléctrica de origen eólico ha planteado problemas en su integración en el Sistema eléctrico español que hay que resolver. Se necesita conocer las características del viento con cierta anticipación para predecir la producción eléctrica de cada Parque eólico y, de esta manera, integrarla en la cobertura de la demanda eléctrica. Esto se hace mediante métodos estadísticos basados en correlacionar el viento que hay un cierto instante con el que ha habido en una serie de instantes anteriores. Se utilizan para ello una serie de coeficientes que se van actualizando con el tiempo de manera que se minimicen los errores. También se utilizan métodos basados en redes neuronales y Lógica difusa. El procedimiento más atractivo y fiable consiste en utilizar las predicciones meteorológicas, combinadas con modelos de cálculo que estiman el efecto local del terreno.

Cuando se quieren instalar una máquina eólica o Parque eólico se busca que la producción sea máxima. Asimismo, se busca que las cargas turbulentas que deben soportar las máquinas sean tan reducidas como

sea posible, por lo que es necesario estimar debidamente las características del viento en ese emplazamiento. Se parte de los datos de viento en el lugar donde se han hecho medidas y, mediante la estimación del viento geostrofico, se obtiene los datos del viento en otros lugares próximos. Sin embargo, la orografía tiene en muchos casos efectos importantes sobre los vientos locales. En la actualidad existen modelos de meso-escala como el desarrollado por la **Universidad de Karlsruhe**, denominado *KAMM*, que se está tratando de combinar con otros locales como el *UASP* desarrollado en el **Riso** (Dinamarca). Pero este tipo de modelos no pueden predecir el comportamiento del viento cuando la orografía es abrupta, por lo que se producen desprendimientos de la corriente y recirculaciones, en ese caso hay que recurrir a modelos que resuelven las ecuaciones de la Mecánica de fluidos, con métodos apropiados de cierre de la turbulencia, tales como los presentados por **Kim, Crespo, Toomer** y otros. La aplicación de estos métodos es, desde el punto de vista informático, bastante costosa.

Otros aspectos a considerar son las características turbulentas del flujo y su influencia en el comportamiento del aerogenerador ya que producen cargas por fatiga que deben resolver los sistemas de control y que empeoran la calidad de la energía producida.

También hay proyectos de I+D para desarrollar modelos numéricos complejos para estudiar tanto las estelas aisladas como las estelas superpuestas que se producen en los Parques eólicos. Tal es el caso del *UPM-WAKE*, desarrollado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la **E.T.S.I. Industriales de la UPM**, que considera que la aeroturbina está inmersa en una corriente básica no-uniforme correspondiente a la capa superficial de la capa límite terrestre. El *UPM-WAKE* tiene la posibilidad de reproducir la cortadura del viento incidente sobre la aeroturbina, por lo que se ha utilizado en combinación con otros programas de modelización para estimar las cargas que se producen sobre los

aerogeneradores situados en la estela de otros.

La mejora de estos códigos es objeto de continuos trabajos de I+D, cuyos resultados permiten mejorar el comportamiento de los generadores.

### 5.2.1 Investigación sobre Parques eólicos marinos

En la actualidad se está investigando la construcción de Parques eólicos en el mar por la mayor velocidad media del viento, las menores turbulencias atmosféricas y porque el avance de la tecnología hace que se puedan resolver otros aspectos negativos como la problemática de las cimentaciones, del montaje de los aerogeneradores, de los accesos, del mantenimiento y de la evacuación de la energía eléctrica a la red.

Dinamarca es el país más avanzado en la instalación en el mar de Parques eólicos. En 1991, construyeron el Parque de Vindeby, con 11 turbinas de 450 kW cada una. Este Parque se construyó con fondos del *IV Programa Marco* de la **Unión Europea**, liderado por el laboratorio danés **RISO**. En 2001 se instaló el Parque de Middlegrunden, cerca de la costa de Copenhague, que consta de 20 aeroturbinas de 2 MW, y se pretende construir otros cinco campos eólicos en el mar de 160 MW cada uno. Cada uno de estos Parques ocupará 20 km<sup>2</sup> y tendrá 80 aeroturbinas de 70 m de altura, con tres palas de 40 m de longitud. De hecho, se piensa que en Dinamarca el 21% de toda la energía suministrada en 2010 será de origen eólico.

Los temas de Investigación e Innovación más relevantes son:

- Cálculo de la cimentación y estructura soporte.
- Desarrollo de nuevos diseños de aeroturbinas más robustas, de fácil mantenimiento, mayor disponibilidad, etc.
- Desarrollo de aerogeneradores con mayor velocidad de giro o velocidad de giro variable.
- Desarrollo de transformadores más pequeños que permitan instalarlos en la góndola.
- Estudio de la corrosión de los diferentes componentes.

- Estudio del efecto combinado de las olas y el viento sobre la torre que permitan el diseño de torres más ligeras con menor peso y coste.

- Estudios sobre accesibilidad para reparar y mantener el parque en condiciones meteorológicas adversas. Análisis de la estrategia óptima de mantenimiento.

- Efectos de la estela, más acusados en el mar por la menor difusión de las mismas debido a que en el mar la turbulencia es menor.

### 5.3 Aerodinámica de los aerogeneradores

Se está investigando principalmente sobre:

- La degradación de la pala por su ensuciamiento y el estudio de diversos materiales para los álabes.

- El funcionamiento por entrada en pérdida para controlar la potencia.

- El efecto de la rotación en el coeficiente de sustentación y resistencia de los perfiles.

- El efecto de la turbulencia sobre los aerogeneradores.

- Las condiciones de entrada en pérdida con turbulencia con la consiguiente histéresis, o sea, la entrada en pérdida dinámica.

- Nuevos diseños de palas, en los que se estudian perfiles más avanzados, nuevos materiales y los métodos de fabricación para conseguir palas más baratas, resistentes y con mejores prestaciones.

- El desarrollo de los aerogeneradores futuros con potencias de 5 MW y palas de 60 m.

### 5.4 Materiales

Desde el punto de vista de los materiales, se investiga sobre:

- Nuevos materiales compuestos para el buje.

- Nuevos materiales compuestos para mejorar la estabilidad aero-elástica y el comportamiento ante la fatiga. Optimización aerodinámica empleando materiales más ligeros y que mejoren el efecto de auto-amortiguamiento.

### 5.5 Calidad de la energía

La calidad de la energía eólica, cuando se vierte a la red eléctrica, puede hacer que no cumpla con los estándares establecidos, de forma que los equipos eléctricos alimentados por la

red se vean afectados negativamente. Un fenómeno muy conocido que tiene la energía eólica es el *flicker*, que produce oscilaciones del voltaje que provocan un cambio apreciable del brillo de la luz. Se está elaborando la normativa Internacional que debe cumplir la generación con aerogeneradores para su alimentación a los sistemas eléctricos.

### 5.6 Códigos y normas

Hay abundante normativa en desarrollo que cubre aspectos como integración de los sistemas eólicos en la red, medida de la calidad de la energía eléctrica, instalación de Parques eólicos en el mar, generadores eléctricos eólicos, medidas de la potencia de los aerogeneradores, medida del ruido, seguridad de los aerogeneradores de gran tamaño, estándares para el control remoto, normas para ensayos estructurales con máquinas a escala natural, etc.

### 5.7 Ruido aerodinámico

Los aerogeneradores producen ruido por dos motivos: el aerodinámico, debido al paso del aire sobre las palas y el mecánico debido al generador eléctrico y las reductoras. A lo largo de los años, el ruido ha disminuido de forma considerable en el segundo caso, fundamentalmente mejorando su diseño. Actualmente se estudia la forma de reducir este ruido.

### 5.8 Otros temas

Otros temas de investigación son los siguientes:

- Interferencia del movimiento de las palas en las ondas electromagnéticas de radio y TV.

- Impacto sobre las actividades agrícolas y ganaderas.

- Efectos de una rotura de las palas o de la torre.

- Impacto en la flora y fauna.

- Impacto visual.

## 6. LA PROMOCIÓN EN EUROPA DE LA ENERGÍA EÓLICA

El apoyo a las energías renovables constituye uno de los principales objetivos de Europa por lo que los incentivos económicos a la generación eólica en nuestro país se derivan de ello.

La Directiva 96/92/CE sobre el mercado interior de la electricidad ya

establecía como objetivo la garantía de suministro respetando el medioambiente. En noviembre de 1997, la **Comisión Europea** publicaba el *Libro Blanco "Energía para el futuro: fuentes de energía renovable"*, en el que se establece como objetivo doblar la cuota de participación de las fuentes de energía renovables en el consumo interior bruto de energía de la UE, marcando como objetivo que éstas permitan cubrir el 12% del consumo de energía primaria en 2010. Este compromiso se transpuso a la legislación española en la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico.

Además, la **Comisión Europea**, a través de su *Libro Verde "Hacia una estrategia europea de seguridad de abastecimiento energético"*, vuelve a resaltar el importante papel que las energías renovables están llamadas a jugar en el futuro respecto a la seguridad de suministro y la mejora del medioambiente.

Esto se concreta en la Directiva 2001/77/CE, de 27 de diciembre de 2001, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad y establece que los Estados miembros deberían prever mecanismos para garantizar que la electricidad generada a partir de dichas fuentes y en cuota antes del 27 de octubre de 2003.

La certificación de la energía como *energía verde* y los mercados de dichos certificados constituyen otra opción planteada por la Directiva 2001/77/CE para el fomento de las energías renovables.

Dado el marco regulatorio, se concluye que la energía eólica seguirá disponiendo en los próximos años de un marco regulatorio favorable y seguirá ganando peso en el Sistema eléctrico español.

### 6.1 Promoción de la energía eólica en España

El sistema retributivo de la generación eólica está regulado por el Real Decreto 2818/1998, de 23 de diciembre, sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración.

Dicho Real Decreto establece los requisitos de su régimen así como el sistema económico para retribuirlos.

El Decreto 2818/1998 establece las primas para cada tecnología, que son actualizadas de forma anual y cuya estructura es revisada cada cuatro años. Concretamente, en 2003 correspondía aplicar la primera revisión en función de los precios de mercado, de la participación de estas instalaciones en la cobertura de la demanda y de su incidencia sobre la gestión técnica del sistema. La prima a la producción de energía eólica y, en general, las destinadas al régimen especial, son consideradas como un sobrecoste del sistema eléctrico español incluido en el cálculo de la tarifa eléctrica.

A finales de cada año se publican las primas al régimen especial en el Real Decreto de Tarifas. Para 2002, estas primas fueron publicadas por el RD 1483/2001, de 27 de diciembre, sobre la tarifa eléctrica.

El Real Decreto-Ley 6/2000, de 23 de junio, de medidas urgentes de intensificación de la competencia en los mercados de bienes y servicios, introdujo incentivos con el fin de facilitar la progresiva incorporación de las energías renovables, y muy especialmente la energía eólica, a un escenario de libre mercado. En este sentido, se estableció la obligación para las instalaciones renovables acogidas a la legislación anterior (RD 2366/1994) con una potencia superior a 50 MW a participar en el mercado de generación. Además, se estableció la posibilidad de que las instalaciones adscritas al régimen especial pudieran acudir al mercado mayorista de electricidad, recibiendo una prima adicional sobre el precio horario del mercado, así como un complemento por garantía de potencia mayor que el correspondiente a las energías convencionales.

También se abre la posibilidad de que los Parques eólicos puedan establecer contratos bilaterales de venta de energía con comercializadores.

El Decreto 841/2002, de 2 de agosto, por el que se regula, para las instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial, su

CCAA	Potencia instalada (MW)			
	2002	2004	2007	2010
Andalucía	200	650	1.600	1.825
Aragón	853	1.253	1.653	1.928
Asturias	75	150	350	450
Cantabria	0	25	50	50
Castilla-León	488	950	1.400	1.725
Castilla-La Mancha	825	1.200	1.600	1.825
Cataluña	184	400	700	827
Galicia	1.062	1.450	1.700	1.825
La Rioja	321	371	395	395
Murcia	0	50	225	263
Navarra	543	629	755	840
País Vasco	25	50	75	100
Valencia	47	325	500	950
Total	4.623	7.503	11.003	13.003

Tabla 4. Evolución de la potencia eólica hasta 2010 por CCAA (Fuente CNE)

incentivación en la participación en el mercado de producción, determinadas obligaciones de información sobre sus previsiones de producción y la adquisición por los comercializadores de su energía eléctrica producida, con lo que se desarrolla y completa el RD-Ley 6/2000 anterior.

La prima a la eólica para 2003 se establecía en el Real Decreto de tarifas RD 841/2002, por el que se reducía ligeramente.

#### 6.2 Previsión de la potencia eólica a instalar hasta 2010

La Disposición Transitoria Decimosexta de la Ley 54/1997, del Sector Eléctrico, establecía el objetivo de cubrir el 12% de la demanda de energía primaria en 2010 mediante fuentes renovables, es decir, el 29,4% de la electricidad consumida en 2010 se generará de esta forma, lo que supone una producción del orden de los 260 TWh.

La energía eólica es, junto a la biomasa, la energía renovable con mayores expectativas de crecimiento en los próximos años.

A más largo plazo, el borrador del documento de *Planificación y Desarrollo de las Redes de Transporte Eléctrico y Gasista 2001-2011*, aprobado por el Gobierno, revela existencia de cierta incertidumbre, tanto en la potencia de la generación eólica prevista para este periodo de tiempo como para su segregación en cada

una de las zonas previsible. La Tabla 4 presenta la potencia eólica que por Comunidad Autónoma prevé el citado documento, donde ya podemos apreciar que se están superando ampliamente dichas previsiones.

## 7. CONCLUSIONES

La energía eólica es la renovable que más se ha desarrollado en Europa y en España siendo su potencial de crecimiento en el futuro muy elevado debido a su desarrollo tecnológico, consecuencia de las subvenciones y a la política establecida a la generación con estas energías.

Tiene sus retos:

- Internalizar los costes externos.
- Evitar las distorsiones del mercado.
- Facilitar la tramitación administrativa y de acceso a la red.
- Solucionar los problemas medioambientales que produce. Entre los más importantes podemos destacar el visual-paisajístico, los ruidos y el impacto sobre la flora y la fauna.

Esta energía es imprescindible para cumplir con los compromisos adquiridos en el *Protocolo de Kioto*. Es una tecnología actualmente muy desarrollada, madura, que cuenta a escala nacional con fabricantes que compiten a escala mundial y con el apoyo gubernamental para seguir apostando por esta fuente energética. ■