

LA ENERGÍA EÓLICA EN ESPAÑA

José María Fluxá Ceva.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Presidente del Consejo Social de la Universidad Autónoma de Madrid.

Enrique Gómez Landesa.

Dr. Licenciado en Ciencias Físicas.

Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL).

RESUMEN

En los últimos años, nuestro país ha incrementado de forma notable su capacidad de aprovechamiento eólico, con cerca de 500 aerogeneradores instalados a finales del año 1994, superando los 70 MW de potencia total disponible. La madurez alcanzada en este campo se refleja en la creciente tecnología propia y en el número cada vez mayor de empresas relacionadas con el sector. Dentro de nuestra geografía existen áreas como Tarifa, Canarias y la costa gallega con regímenes de viento privilegiados para la explotación eólica. Además de la continua puesta en marcha de nuevos proyectos, la energía eólica ocupa un lugar destacado en el Plan Energético Nacional (PEN), síntoma de la apuesta de España por las energías renovables como alternativa de futuro y el compromiso de conservar el medio ambiente.

ABSTRACT

Spain has considerably increased its use of wind power in recent years. At the end of 1994, nearly 500 turbines provided a capacity of over 70 MW. The good development of this sector is reflected in the growing local technology and the growing number of companies involved. Regions such as Tarifa, the Canary Islands and the coast of Galicia are particularly suited to the use of win power. New projects are under way, and wind power occupies an important place in the National Energy Plan, a sing of Spain's interest in renewable sources of energy as an alternative for the future and in protection of he environment.

1. SITUACIÓN ACTUAL

Las áreas de nuestro país con mayor potencial eólico y por tanto, con mayor concentración de aerogeneradores, están localizadas en la Islas Canarias, el estrecho de Gibraltar y Galicia. Otras regiones como Aragón, Cataluña y Navarra tienen ya un incipiente aprovechamiento de sus notables recursos de viento.

La producción de las principales áreas se distribuye de la manera siguiente:

REGIÓN	POTENCIA INSTALADA	N. AEROGENERADORES
Gibraltar	33.09 MW	266
Islas Canarias	24.48 MW	130
Galicia	4.86 MW	35

Se destacan otras regiones como Aragón con 3.85 MW de potencia instalada, 3 MW en Navarra y 0.59 en Cataluña. En la actualidad es Galicia la región con mayor crecimiento de su producción y con mayor número de proyectos en curso.

La tabla siguiente resume la distribución nacional en las seis principales áreas productoras, en porcentajes de potencia instalada y número de aerogeneradores de más de 90 kW de potencia nominal (datos de finales de 1994):

REGIÓN	% AEROGENERADORES	% POTENCIA
Gibraltar	56	46
Islas Canarias	28	34
Galicia	7	7
Aragón	6	8
Navarra	1	4
Cataluña	1	1

La potencia nominal de los parques eólicos españoles suele ser mayor de 1 MW y normalmente consta de aerogeneradores dentro del rango de 100 a 500 kW nominales.

Los regímenes de viento de una región constituyen el primer criterio para considerar el aprovechamiento eólico. Además existen otros factores como la proximidad de redes eléctricas o el tipo de terreno y el posible uso del mismo para otro tipo de explotación, o bien la exclusión de zonas protegidas.

El mayor potencial, medido en MW de potencia instalable, se estima en Galicia con 500-700

MW (datos estimados por IER-CIEMAT). En la actualidad existen 6 MW instalados y están proyectados más de 200 MW, haciendo de esta región la más prometedora y la más dinámica en cuanto a proyectos de explotación se refiere.

Para la región de Gibraltar-Tarifa se estima un potencial de 250-300 MW, y existen 31 MW instalados. Es la región con mayor aprovechamiento en la actualidad, seguida de la Islas Canarias con 25 MW instalados y un potencial de 150-250 MW instalables.

En la cuenca de Ebro se estiman entre 100 y 200 MW instalables, aunque esta zona presenta la ventaja de un terreno poco accidentado y una buena disponibilidad del mismo. Esto hace que haya en proyecto unos 100 MW a instalar, aunque solo existía 1 MW a finales de 1994. Finalmente, Cataluña presenta un potencial estimado en 20-50 MW, siendo la disponibilidad del terreno el mayor inconveniente en esta región.

2. MERCADO DE LOS AEROGENERADORES

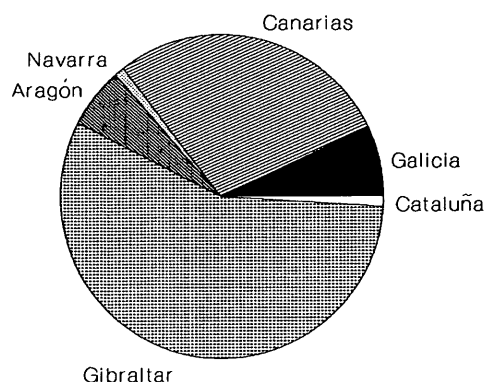
El mercado de la energía eólica en España está alcanzando un alto grado de actividad y madurez, como lo demuestra en número creciente de empresas y organismos relacionados con el aprovechamiento eólico.

Frente a las pequeñas instalaciones experimentales que caracterizaron los primeros pasos en nuestro país, en los últimos años se están explotando parques eólicos con fines comerciales (el precio medio del kWh al usuario durante 1994 fué de 10.47 pesetas).

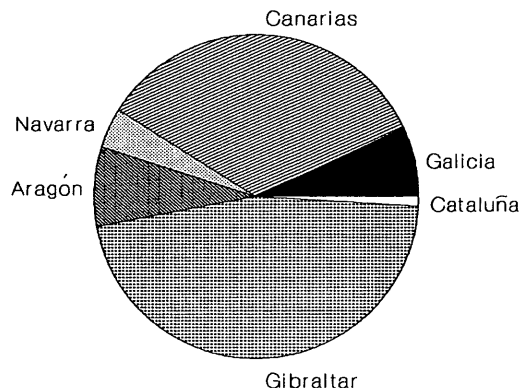
Entre los fabricantes e instaladores españoles de aerogeneradores destacan MADE Sistemas Eléctricos S.A., empresa subsidiaria de ENDESA y que ha desarrollado los modelos AE-20, AE-23 y AE-30, ECOTECNIA S.C.C.L., creadores de los modelos 20/150 y 24/200, Desarrollos Eólicos S.A. (DESA) creadores de los modelos DESA-300 y AWP-56, GAMESA EÓLICA, instaladores del modelo VESTAS V 39 y Aerogeneradores Canarios S.A., fabricantes e instaladores del modelo VESTAS V 27.

El perfil de los prototipos desarrollados en nuestro país es un aerogenerador de 3 palas, con un diámetro del rotor de 20 a 25 metros y con una potencia nominal entre 150 y 200 kW, aunque existen gran variedad en los modelos instalados, desde el AWP-56 de 100 kW nominales y 18 m. de diámetro, hasta el prototipo AWEC-60 de 1,2 MW

% de num. aerogeneradores.
(finales 1994)



% de potencia instalada.
(finales 1994)



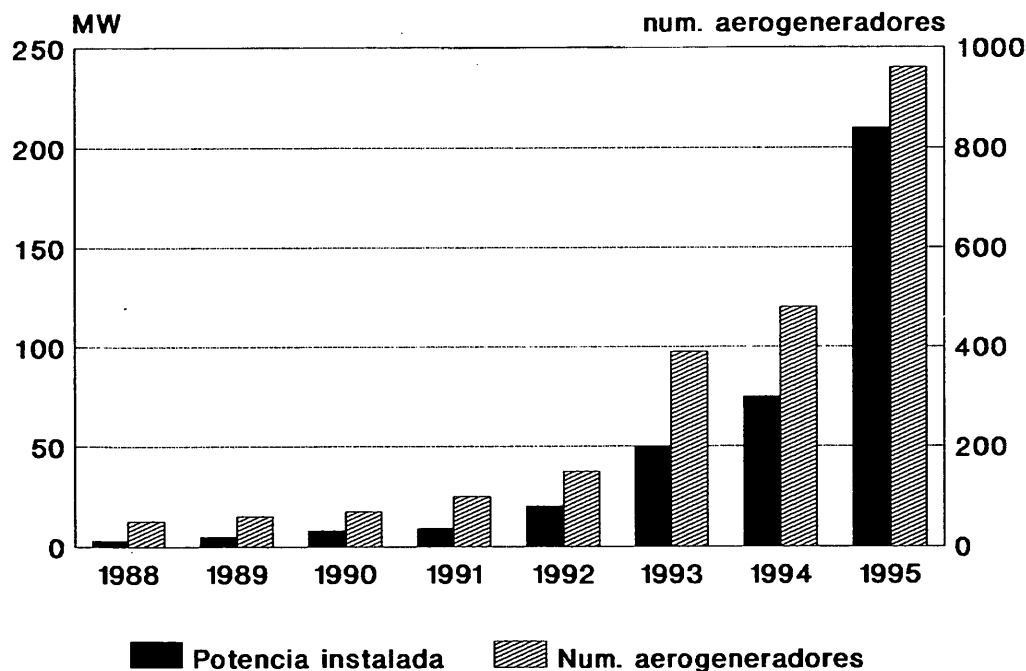
y 60 m. Los aerogeneradores típicos mencionados precisan de una velocidad de viento mínima de arranque (cut-in) de 4 a 5 m/s, siendo su velocidad nominal de funcionamiento de unos 12 a 15 m/s, hasta una velocidad máxima (cut-off) de 25 a 30 m/s, en que se activan los sistemas de alarma y se interrumpe su funcionamiento.

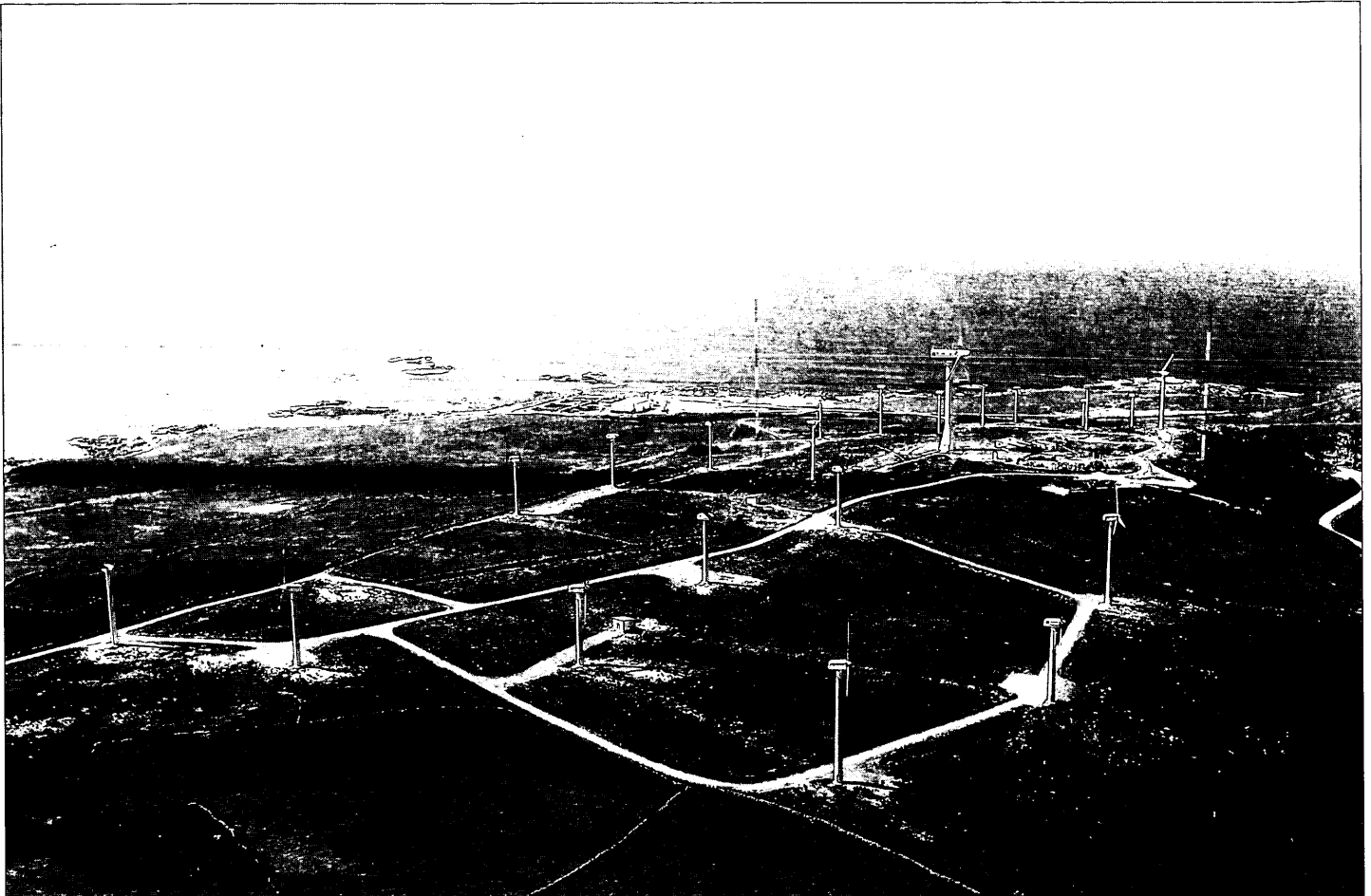
Existen, además, modelos de pequeños aerogeneradores, como los desarrollados por BORNAY, en el rango de 250 W a 2,5 kW, útiles para aplicaciones concretas (al margen de conexiones

a la red) como alimentar transmisores de radiotelecomunicaciones o simplemente abastecer pequeñas demandas domésticas en lugares en que resulte caro hacer llegar una línea de corriente.

3. TECNOLOGÍA EÓLICA

La mayoría de los aerogeneradores actuales son de eje horizontal, esto es, con su eje de rotación paralelo a la dirección del viento, frente a los





**Parque eólico de
cabo Villano (La
Coruña).**

de eje vertical (también llamados de tipo Darrieus) que no precisan de un sistema de orientación y presentan algunas ventajas estructurales, aunque se cuenta con menor experiencia en este tipo de diseños.

Existen dos tipos de diseño de aerogeneradores de eje horizontal: los que presentan la turbina frente a la dirección de incidencia del viento (tipo up-wind) y los que la presentan de espaldas al viento (down-wind). Los de tipo up-wind precisan de un sistema de orientación activo mientras que los de tipo down-wind pueden orientarse pasivamente, aunque este diseño presenta problemas debidos al efecto de "sombra" de la torre. En cada revolución las palas han de atravesar la región obstaculizada por la torre. Esto supone sufrir cambios bruscos en la velocidad del viento, que se traducen en un ruido adicional al suyo propio y en problemas de fatiga de materiales.

En una turbina eólica, la velocidad del rotor disminuye al aumentar el número de palas, mientras que aumenta el momento del par generado

por el viento. Se puede decir que un molino con un gran número de palas es adecuado para funcionar con velocidades de viento bajas, sin embargo no alcanzará grandes velocidades de giro.

Los diseños de aerogeneradores modernos se inclinan por tres palas, dada su estabilidad estructural y aerodinámica, así como por su menor emisión acústica. Existen, sin embargo, diseños con dos y hasta una sola pala.

El par generado en la rotación ha de transmitirse a un generador eléctrico. Si se aumenta el diámetro del rotor, la velocidad de giro del mismo disminuye, por lo que en grandes aerogeneradores es esencial una adecuada caja de cambios, similar a la de un automóvil, que transmita el momento angular del rotor al generador eléctrico con una velocidad de giro conveniente.

La energía que el aerogenerador recibe del viento es controlable mediante dispositivos de ángulo de paso variable, que modifican el ángulo de ataque de las palas frente al viento. Estos mecanismos permiten que un generador funcione a su

potencia nominal en diferentes regímenes de viento.

La conversión de energía mecánica en eléctrica se ha de realizar mediante un sistema capaz de absorber los picos de potencia resultantes de las oscilaciones del viento y amortiguar otras alteraciones dinámicas del aerogenerador, como resonancias estructurales y paradas bruscas por sobrecargas. Este efecto amortiguador es especialmente importante cuando existe conexión a la red y se trata por tanto de garantizar un suministro estable de potencia eléctrica.

Una solución mecánica consiste en introducir una pieza flexible de forma cilíndrica entre la caja de cambios y el generador eléctrico, capaz de absorber la potencia sobrante y las fluctuaciones de velocidad de giro del eje del rotor. Además, protege a la caja de cambios y al generador de sobrecargas. Esta suspensión elástica del bastidor de la caja de cambios puede reducir la aparición de torques transitorios indeseados.

Otra solución de tipo mecánico es hacer girar el estator de un generador de inducción por medio de un motor auxiliar, compensando así la diferen-

cia entre la velocidad nominal de giro y la velocidad real.

Existen también soluciones de tipo hidráulico, pero son más interesantes las soluciones de tipo eléctrico, ya que son las utilizadas generalmente en los aerogeneradores modernos.

Los generadores síncronos consisten básicamente en un rotor que induce potencia eléctrica a un estator fijo, siendo el rotor un electroimán excitado mediante un circuito auxiliar de corriente continua. Debido al giro del electroimán, su conexión a este circuito auxiliar consiste en una estructura de anillos deslizantes, que permiten la conexión eléctrica permanente a la vez que permiten el giro del rotor. La interacción entre la inercia de la estructura y las características dinámicas del generador, puede producir fenómenos de resonancia que se traducen en fatigas mecánicas adicionales. Hay formas de reducir las resonancias, como utilizar una bobina de amortiguamiento, pero siempre aparecerán fluctuaciones de potencia debidas a ráfagas de viento, que se transmitirán a la red.

El generador asíncrono es excitado normalmente extrayendo potencia reactiva de la red. El



*Parque eólico de
cabo Villano y
AWEC-60.*

devanado del estator está conectado a la red, mientras que el rotor no tiene terminal eléctrica y funciona en modo de cortocircuito. De este modo no existen anillos deslizantes y el generador es más robusto y da menos problemas de mantenimiento.

Otra solución es el generador asíncrono con cascada hipersíncrona. Consiste en un generador de inducción (asíncrono) en el cual se conecta el devanado del rotor, mediante anillos deslizantes, a un circuito inversor en cascada. Con ello, se pueden tolerar variaciones de velocidad del rotor por encima de la velocidad síncrona. La producción eléctrica del rotor puede ser rectificadora y ajustada a la red mediante un convertidor-inversor. A diferencia de los generadores anteriores, sólo una fracción de la potencia total ha de ser manipulada por este sistema de conversión, ya que la mayor parte de la potencia suministrada por el devanado del estator se transfiere directamente a la red. Esta es la solución adoptada por el aerogenerador AWEC-60 de 1.2 MW, proyecto en el que participaron ASINEL, IER-CIEMAT y U.E.FENOSA.

Existen otros posibles sistemas de conversión, como el generador de inducción realimentado

(double-fed), que puede funcionar por encima o por debajo de la velocidad síncrona, o como los sistemas de conversión de frecuencia.

Es importante para la caracterización de un aerogenerador, hallar su curva de potencia, que consiste en un gráfico de su producción eléctrica en función de la velocidad de viento a la altura del eje del rotor. Estos gráficos proporcionan información sobre la calidad aerodinámica del rotor y la calidad del sistema de control, especialmente sobre la regulación de potencia para velocidades de viento superiores a la nominal. Sobre la base de la curva de potencia se puede estimar la producción eléctrica anual conocido el régimen de viento local.

4. IMPACTO AMBIENTAL

Uno de los aspectos más interesantes de la explotación de la energía eólica es su carácter de energía renovable y no contaminante de su entorno. Sus efectos son muy localizados y siempre reversibles. Se puede estudiar el impacto ambiental de un aerogenerador en tres grupos bien diferen-



AWEC-60.

ciados; el impacto visual, la emisión acústica y la influencia en la fauna local autóctona (especialmente en las aves).

El aspecto ambiental más criticado por la opinión pública es el impacto visual. En este sentido cabe mencionar una encuesta realizada por CIE-MAT en la población de Camariñas (La Coruña), situada a 3 km del parque eólico de Cabo Villano que desmiente muchos de los prejuicios formulados en este sentido.

En cuanto a la emisión acústica, existen normativas internacionales que imponen niveles máximos de emisión acústica para aerogeneradores, de modo que se limita hasta un nivel totalmente inocuo y en absoluto molesto el ruido procedente de estas turbinas. La experiencia demuestra, además, que este ruido decrece muy rápidamente con la distancia a la turbina.

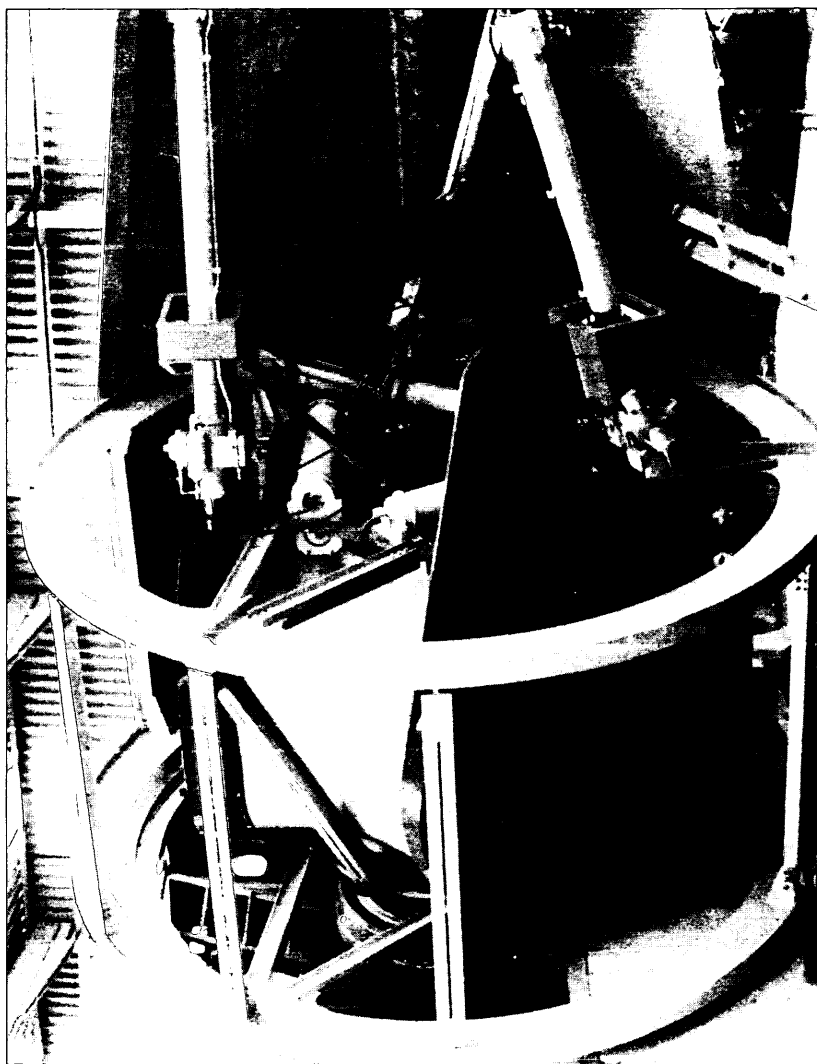
Quizá sea el impacto sobre las aves el aspecto más polémico de un parque eólico. La Agencia de Medio Ambiente de Andalucía realiza actualmente un estudio sobre este efecto, en especial, sobre colisiones de aves en vuelo con palas de aerogeneradores en la zona de Tarifa. La experiencia hasta la fecha recogida en parques de todo el territorio nacional, indica que este número de colisiones es poco significativo y, en todo caso, hay que cuidar la elección de la ubicación de los parques, evitando rutas de emigración de aves, reservas naturales, etc.

Finalmente, la ocupación del terreno de un parque eólico es mayor que en centrales térmicas o hidroeléctricas que tengan igual producción energética, sin embargo, una gran parte de los terrenos ocupados por aerogeneradores pueden ser utilizados simultáneamente para otras actividades, lo que no ocurre en otro tipo de centrales.

5. PROGRAMAS DE DESARROLLO

Los programas nacionales de desarrollo en relación con las energías renovables, hacen especial énfasis en la tecnología propia de fabricación y ensayo de aerogeneradores.

En el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética (PAEE) aprobado en 1994 e incluido en el Plan Energético Nacional (PEN), aprobado en 1991, se perfilan los objetivos en materia de energía desde el año 1991 hasta el 2000, estableciendo para la energía eólica, una producción eléctrica anual de 403 GWh y 168 MW de potencia instalada, con una inversión cercana a los 30.000 millones de pe-



Buje.

setas. Este objetivo de potencia instalada será ampliamente excedido, pues ya a finales de este año 1995 se superarán los 200 MW, según las previsiones de la administración.

La financiación contemplada por el gobierno español para proyectos relacionados con energía eólica varía según pertenezca a una de las tres categorías: proyecto comercial, con un máximo de un 26% del coste, proyecto de demostración, con un máximo del 35%, y proyecto de innovación, con un máximo del 49%.

Entre los trabajos a nivel nacional destacan:

▼ "Diseño y fabricación de palas para un aerogenerador de tamaño medio", en el que intervienen ENDESA, CIEMAT y OCIDE, para dotar de palas al prototipo AE-41 de 500 kW desarrollado por la empresa MADE, S.A.

- ▼ Proyecto SFAT dentro del programa europeo JOULE, de elaboración de recomendaciones y criterios para establecer procedimientos de ensayo de palas de aerogeneradores.
- ▼ "Ensayo estático de palas para aerogeneradores de 300 kW" en el que se somete a las palas a cargas crecientes hasta su ruptura.
- ▼ Proyecto AWEC-60 de construcción y explotación de un aerogenerador de 1,2 MW de potencia nominal, con la participación de ASINEL, CIEMAT, U.E.FENOSA, MAN Technology, OCIDE y la CEE.
- ▼ Verificación de la curva de potencia del aerogenerador MADE AE-20 de 150 kW, en el parque eólico de Cabo Villano (La Coruña).
- ▼ Medida de potencia, cargas, emisión acústica y calidad de energía eléctrica producida en el prototipo MADE AE-23 de 300 kW, instalado en Granadilla (Tenerife).
- ▼ Estudio de vibraciones en aerogeneradores con objeto de predecir averías.
- ▼ Proyecto MONTURB, dentro del programa europeo JOULE II, de ensayo de aerogeneradores en regiones montañosas.
- ▼ Proyecto REFSTRESS, dentro del programa JOULE, para obtener un modelo de fatiga para aerogeneradores.
- ▼ Estudio de cargas, verificación del diseño aerodinámico y de la variación del ángulo de paso del aerogenerador DESA-300.

- ▼ Modelización y estudio de la fatiga del aerogenerador MADE-300.
- ▼ Proyecto EWTS, dentro del programa europeo JOULE, para la revisión de la normativa y recomendaciones, con objeto de obtener una normativa común europea para aerogeneradores.
- ▼ Proyecto EUROWIN, de recolección de información en los parques eólicos españoles para la su integración en una base de datos europea.
- ▼ Otros proyectos de estudio de viabilidad de áreas para construcción de parques eólicos, elaboración de mapas de recursos eólicos, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- IEA Wind Energy Annual Report**, 1994. (NREL, Colorado, USA)
- La Energía Eólica en España**, E. Soria Lascorz, IER-CIEMAT. Revista Tecno Ambiente.
- 1993 Annual Report of Operational Wind Parks in Spain**, C. Lago, M. Esteban. IER-CIEMAT.
- Aprovechamiento Eólico en el Municipio de Calaf (Barcelona)**, L. Ferrero Andreu. Servicio de Medio Ambiente. Diputación de Barcelona.
- Presente y Futuro de la Energías Renovables**, F. Sánchez Sudón. Fronteras de la Ciencia y la Tecnología, nº 9, Julio-Septiembre 1995. ●