

# La energía eólica

Félix  
Avia  
(CENER)

Energía y medio  
ambiente

24



## Guías técnicas de energía y medio ambiente

---

### 24. La energía eólica

#### Coordinador

---

Félix Avia Aranda

#### Con la colaboración de:

- **Ignacio Martí Pérez**, Director Técnico Adjunto. Coordinador de I+D del Cener.
- **Yolanda Loureiro Rodríguez**, Área “Evaluación y Predicción del Recurso Eólico” del Cener.
- **Elena Cantero Nouqueret**, Área “Evaluación y Predicción del Recurso Eólico” del Cener.
- **Raquel Garde Aranguren**, Área de Integración en Red de Energías Renovables del Cener.
  
- **Vicente Mena Gutiérrez**, Director de la unidad de Promoción Eólica de Gas Natural Fenosa Renovables.
- **Consolación Alonso Alonso**, Responsable de la Unidad de Renovables de Gas Natural Fenosa Engineering.
- **Francisco Javier Alonso Martínez**, Subdirector de Innovación y Soporte Tecnológico de Gas Natural Fenosa.
- **Carlos Gutiérrez Sánchez del Río**, Técnico del Área de Análisis de Recurso y Gestión Técnica de Proyectos, Departamento Operaciones de Gas Natural Fenosa Renovables.
- **Segundo Alfonso Fernández**, Responsable del Área de Análisis de Recurso y Gestión Técnica de Proyectos, Departamento de Operaciones de Gas Natural Fenosa Renovables.
- **Javier de Los Rios Martín de Argenta**, Responsable de Explotación Eólica y Minihidráulica de Gas Natural Fenosa Renovables.

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización por escrito de la Fundación Gas Natural Fenosa.

#### Edita

---

### Fundación Gas Natural Fenosa

Plaça del Gas, 8

08201 Sabadell (Barcelona)

Teléfono: 93 402 59 00 Fax: 93 745 03 20

[www.fundaciongasnaturalfenosa.org](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org)

1ª. edición, 2012

ISBN:978-84-615-7876-4

Impreso en España

# Índice

<b>Prólogo</b> de Pedro-A. Fábregas.....	7
<b>Introducción</b> .....	11
<b>1. La historia</b> .....	15
1.1. Historia de la energía eólica.....	16
1.1.1. Las primeras máquinas eólicas.....	16
1.1.2. Los molinos europeos.....	18
1.1.3. Los aeromotores de la Revolución Industrial.....	20
1.1.4. Tecnologías del siglo XX.....	21
1.2. Nueva generación de sistemas de conversión de energía eólica.....	26
1.3. Orígenes del desarrollo de la energía eólica en España.....	27
1.4. La I+D en España como base del desarrollo de la energía eólica.....	32
1.5. Estímulo del mercado.....	35
Referencias.....	37
<b>2. El sector</b> .....	39
2.1. Situación mundial de la energía eólica.....	42
2.2. Estado de desarrollo en España.....	52
2.2.1. Fabricantes españoles presentes en el mercado.....	61
2.3. Eólica marina.....	69
2.3.1. La energía eólica marina en España.....	74
Referencias.....	79
<b>3. El viento</b> .....	81
3.1. Generalidades.....	81
3.1.1. Circulación general de la atmósfera.....	82
3.1.2. Efectos locales.....	83
3.1.3. Estabilidad de la atmósfera.....	85
3.1.4. Orografía del terreno.....	87
3.2. Energía contenida en el viento. El límite de Betz.....	89
3.3. Evaluación del recurso eólico.....	91
3.3.1. Medida del viento.....	100
3.3.2. Modelos de evaluación del potencial eólico.....	104
3.3.3. Predicción eólica.....	109

3.4. Estudio de sensibilidad de la producción energética de un aerogenerador .....	112
3.4.1. Velocidad media del emplazamiento .....	113
3.4.2. Presión atmosférica.....	115
3.4.3. Temperatura atmosférica.....	116
3.4.4. Rugosidad del terreno.....	117
Referencias.....	119
<b>4. La tecnología.....</b>	<b>121</b>
4.1. Introducción.....	121
4.2. Tipos de aeroturbinas.....	123
4.2.1. Aeroturbinas de eje horizontal.....	123
4.2.2. Aeroturbinas de eje vertical.....	127
4.3. Partes de una aeroturbina: componentes.....	130
4.3.1. Sistema de captación.....	131
4.3.2. Sistema de transmisión mecánica.....	133
4.3.3. Sistema eléctrico.....	134
4.3.4. Sistema de regulación y control.....	137
4.4. Situación actual del mercado tecnológico. Tecnologías disponibles.....	138
4.5. Situación de desarrollo tecnológico de la eólica marina.....	149
4.5.1. Estructuras de soporte.....	149
4.5.2. Aerogeneradores marinos.....	161
4.6. Tecnología de pequeños aerogeneradores para sistemas aislados de la red.....	165
Referencias.....	174
<b>5. La red y el almacenamiento.....</b>	<b>175</b>
5.1. La conexión de los parques eólicos a la red eléctrica.....	176
5.1.1. Estructuras para la conexión de un parque eólico a la red.....	176
5.1.2. Requerimientos técnicos de conexión.....	180
5.2. Impacto de una alta penetración de energía eólica en la red eléctrica.....	184
5.2.1. Balance de energía.....	186
5.2.2. Adecuación de la potencia.....	187
5.2.3. La red.....	187
5.2.4. La contribución de las centrales de gas de ciclo combinado.....	189
5.3. Beneficios de los sistemas de almacenamiento de electricidad.....	192
5.3.1. Bombeo hidráulico.....	194
5.3.2. Almacenamiento de energía con aire comprimido (CAE).....	195
5.3.3. Volantes de inercia.....	196
5.3.4. Supercondensadores.....	196

5.3.5. Superconductores magnéticos SME.....	197
5.3.6. Almacenamiento de energía en baterías.....	197
5.3.7. Hidrógeno.....	199
5.4. Aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía.....	204
5.5. Gestión de la demanda.....	206
Referencias.....	208
<b>6. La economía.....</b>	<b>211</b>
6.1. Introducción.....	211
6.2. Impacto económico del sector eólico en España.....	213
6.3. Contribución a la generación de empleo.....	217
6.4. Mecanismos de incentivo.....	218
6.4.1. <i>Feed-in tariff</i> .....	218
6.4.2. Cuota obligatoria.....	219
6.4.3. Subastas.....	220
6.4.4. Incentivos fiscales.....	221
6.5. Análisis de inversión para un proyecto eólico.....	221
6.5.1. Criterios para la valoración.....	221
6.5.2. Parámetros de entrada.....	223
6.5.3. Resultados del modelo. Comparando rentabilidad de los proyectos.....	226
6.5.4. Gestión de la incertidumbre: análisis de sensibilidad y comparación de escenarios.....	228
6.6. Financiación de proyectos.....	230
Referencias.....	231
<b>7. El medio ambiente.....</b>	<b>233</b>
7.1. El impacto visual.....	236
7.2. El ruido.....	236
7.3. La fauna silvestre y las aves.....	238
7.4. Fauna silvestre y murciélagos.....	242
7.5. Parques eólicos marinos.....	243
Referencias.....	245
<b>8. El futuro.....</b>	<b>247</b>
8.1. Tecnología y desarrollo industrial.....	249
8.2. Preocupaciones ambientales.....	250
8.3. Seguridad de abastecimiento.....	250
8.4. Empleo y desarrollo local.....	251

8.5. Escenarios de evolución de la energía eólica en el mundo.....	252
8.6. Escenarios de evolución de la energía eólica en España en el horizonte de 2030.....	257
8.7. Claves de la evolución previsible en España: costes, retribución, adecuación a la red, tecnologías de almacenamiento y eólica off-shore.....	263
8.8. Eólica marina.....	264
Referencias.....	268
<b>Anexo 1</b> .....	269
Glosario de términos.....	269
1. Máquinas y componentes.....	269
2. Meteorología.....	271
3. Actuaciones, parámetros de diseño y seguridad.....	272
<b>Enlaces de interés</b> .....	277

## Prólogo

A Eolo lo hace aparecer Homero en la Odisea, no como dios del viento, sino como administrador de la isla Eolia, pero habiendo recibido de Zeus el poder de administrar los vientos, es decir, que los podía aplacar o excitar de acuerdo con su libre albedrío.

Tan antiguo o más es el conocimiento de la fuerza de los vientos, en las épocas más primitivas se conocía que el viento podía producir energía mecánica, sea para mover un barco empujado por la fuerza del viento en sus velas, sea para moler grano o subir agua de un pozo o de un río, utilizando los molinos de viento tradicionales en tantas partes, sustituyendo la energía humana por energía de los vientos.

Sin embargo, en las épocas más modernas, el aprovechamiento de la energía del viento viene más por las posibilidades de su transformación en energía eléctrica, después mucho más fácilmente utilizable in situ o a largas distancias. La energía del viento se aplica sobre grandes palas metálicas que aprovechan de una forma extraordinariamente eficiente la energía del viento y la transforman en electricidad. Antes, sin embargo, debe estudiarse dónde se colocan los modernos molinos para que el recurso, el viento, sea claramente aprovechable, por su magnitud y su continuidad, dando lugar a aprovechamientos rentables y eficientes del recurso primario.

El viento es un recurso, en principio, inagotable, renovable y sin coste de adquisición, sin embargo, también presenta algunos problemas. La continuidad del recurso es limitada, no siempre sopla el viento, y a veces su intensidad no es la adecuada, por lo que no podemos construir un sistema energético basado solo en la fuerza del viento, y debemos tener una capacidad de generación alternativa en reserva para cuando el recurso no está presente. En definitiva, debemos tener duplicada la potencia instalada, en energía eólica para cuando hay viento, y en otra línea de actuación, normalmente ciclos combinados a gas natural para cuando no lo hay. Esta duplicidad es una externalidad económica del sistema relevante a tener en cuenta.

Evidentemente, la problemática es debida a las dificultades de almacenamiento de la energía eléctrica que, como es conocido, no es una energía sino un vector energético, es decir, no existe en la naturaleza sino que debe producirse. La extremada complejidad de su almacenamiento, es claramente un problema no resuelto, y solo enunciado con las centrales de bombeo o la conversión de eólica en hidrógeno, por ejemplo.

Por otra parte, los emplazamientos de alto valor del recurso son limitados, y en los esquemas actuales son los primeros que se han aprovechado, siendo por tanto poco susceptibles de aprovechamientos masivos en el futuro.

Una de las ventajas de la energía eólica, la dispersión sobre el territorio, es a la vez uno de sus inconvenientes, si se produce la energía eólica donde hay viento y debe transportarse como electricidad a los puntos de consumo es preciso la realización de infraestructuras de recolección y transporte sobre el territorio con dificultades adicionales y evidentes de coste económico de ocupación de espacios naturales.

Finalmente, y hasta los momentos actuales, la energía eólica ha requerido una aportación económica, una prima, que a pesar de ser de las más pequeñas de las denominadas energías renovables, ha contribuido al incremento del problema conocido del déficit de tarifa del sector eléctrico en los últimos años, problema de una gran importancia económica y de difícil planteamiento y solución y que grava los próximos años del sector energético español.

Sin embargo, es evidente que la energía eólica ha ido mejorando claramente sus estándares en los últimos años, el progresivo aumento del tamaño de los molinos, la eficiencia de rotores y de los cálculos de previsión del viento, han ido construyendo un sector muy próximo a las posibilidades de funcionamiento sin ayudas, ni primas, ni subvenciones, sobre todo en las zonas donde el recurso es de elevada calidad. La energía eólica es sin duda, de las energías renovables, la más próxima en costes a las energías convencionales.

El coste/rendimiento de los parques eólicos ha pasado de un coste de generación de 40 céntimos de euro por kilovatio hora en el año 1979 a un coste de 4/7 céntimos el kWh en el año 2006, con un impresionante avance de eficacia. Por otra parte, las

posibilidades de la eólica marina y de la microeólica abren nuevas perspectivas de actividad, desarrollo y eficiencia.

Una parte del desarrollo de la tecnología ha sido posible por la importante difusión de la energía eólica en los últimos años que ha facilitado el desarrollo de nuevos conceptos, nuevos diseños y nuevos desarrollos. La potencia instalada en el mundo en 1995 era de 4.776 MW mientras que en 2010 era ya de 199.520 MW, es decir, en solo 15 años la potencia instalada se había multiplicado más de 40 veces. El empleo del sector es asimismo de una gran importancia, en el año 2010 ya superaba los 180.000 empleos.

En el caso de España, el crecimiento y la difusión del sector eólico han sido igualmente importantes siendo uno de los líderes europeos en este sector, dado que el 24% de la potencia instalada en Europa en eólica estaba ubicada en España con 20.676 MW (2010), cifras solo superadas por Alemania. Por otra parte, en el contexto de la cobertura de la demanda eléctrica española de 2010 la aportación de la energía eólica ya alcanzó el 16,4% de la demanda, cifras realmente espectaculares de crecimiento.

Este libro aporta la breve pero intensa historia de la energía eólica, pero también el análisis del recurso, el viento, la evolución de la tecnología, las necesidades de redes y los problemas de almacenamiento, así como la evaluación de esta tecnología desde una perspectiva energética, económica y ambiental, penetrando también en los elementos de la gestión operativa.

Por otra parte, también se plantean las posibilidades y alternativas de la posible evolución futura, del recorrido de los costes y de la tecnología, así como de las posibilidades de eólica marina.

Para el desarrollo de este trabajo hemos tenido la suerte de disponer de un reconocido experto en la materia, Félix Avia Aranda, del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), que ha desarrollado su actividad en el sector desde 1980, habiendo sido vicepresidente de la Agencia Internacional de la Energía en Investigación y Desarrollo de la Energía Eólica y presidente de la Academia Europea de Energía Eólica. Realmente ha sido un placer el trabajo desarrollado con Félix, tanto por sus evidentes conocimientos científicos como por sus indudables calidades humanas, consiguiendo un resultado de

un gran nivel, y una evolución del trabajo de investigación claramente estructurado de acuerdo con los programas establecidos.

Esperamos que la publicación de este libro estimule el conocimiento y la observación de qué es y qué puede aportar la energía eólica, se han intentado plantear sus ventajas así como sus inconvenientes para permitir una evaluación seria, profesional y de nivel de las posibilidades y limitaciones de la energía eólica en el complejo futuro energético de la humanidad.

Pedro-A. Fábregas  
Director General  
Fundación Gas Natural Fenosa