



Consejo Económico y Social

Distr. general
5 de febrero de 1998
Español
Original: inglés

Comité de Fuentes de Energía Nuevas y Renovables y de Energía para el Desarrollo

Tercer período de sesiones

23 de marzo a 3 de abril de 1998

Tema 4 b) del programa provisional*

Energía y desarrollo sostenible

Fuentes renovables de energía, en especial la energía eólica

Informe del Secretario General**

Índice

	<i>Párrafos</i>	<i>Página</i>
I. Introducción	1	3
II. Potencial de recursos de energía eólica	2–9	3
III. Situación y tendencias en materia de tecnología	10–19	5
IV. Aspectos económicos de la energía eólica	20–32	6
V. Consideraciones de orden ambiental y social	33–37	10
VI. Incentivos para promover el aprovechamiento de la energía eólica	38–46	12
VII. Recomendaciones	47–55	13

Cuadros

1. Capacidad instalada mundial de energía eólica conectada a redes de distribución, en megavatios	3
2. Capacidad de energía eólica y electricidad eólica generada con arreglo a las hipótesis del Consejo Mundial de Energía	4
3. Valores de los efectos en el medio ambiente de la electricidad generada por energía eólica	11

* E/C.13/1998/1.

** En la División de Desarrollo Sostenible del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales se dispone de información más detallada.

Gráficos

I.	Gastos de inversión (precio de fábrica) y otros gastos de las turbinas eólicas	7
II.	Total de gastos de la turbina por unidad de electricidad producida, a una altura de 50 metros	8
III.	Comparación entre los costos evitables de la energía generada por fuentes tradicionales, excluido el crédito de capacidad, y los costos de producción de la electricidad generada por energía eólica	10
IV.	Variaciones totales estimadas de los efectos en el medio ambiente por tipo de fuente	12

I. Introducción

1. En el presente informe se resumen los progresos realizados hasta el presente en materia de energía eólica y se analizan las cuestiones relacionadas con los recursos y los aspectos tecnológicos, económicos, ambientales y sociológicos de la energía eólica en la actualidad. Además, se resumen las opciones de política de que se dispone para fomentar el aprovechamiento de la energía eólica. En una versión ampliada del informe se proporcionan también datos sobre breves estudios de casos realizados en cinco países que en 1996 tenían el 85% de la capacidad instalada mundial de energía eólica, así como recomendaciones respecto de ciertas opciones decisivas de política¹.

II. Potencial de recursos de energía eólica

2. *Potencial mundial:* El Organismo Internacional de Energía ha estimado que la demanda mundial de electricidad fue de 12.500 teravatios-hora (TWh) en 1993 y llegará a 20.907 TWh hacia el año 2010. Habida cuenta de esas cifras, cabe señalar que los recursos mundiales de energía eólica son abundantes. hasta el presente se han llevado a cabo sólo unos cuantos estudios exhaustivos del potencial mundial de energía eólica, pero en todos ellos se llegó a la conclusión de que los recursos generales en ese campo eran muy superiores al total de la demanda mundial de electricidad. Pero el potencial de energía eólica varía según la zona de que se trate y está distribuido de manera desigual desde el punto de vista geográfico. No obstante, los recursos disponibles a nivel mundial son enormes, si se tienen en cuenta las posibilidades que ofrecen las instalaciones ubicadas costa afuera, en zonas remotas y poco pobladas y en terrenos accidentados, así como la posibilidad de aprovechar el mismo terreno para diversos fines.

3. *Capacidad instalada mundial:* Desde 1980, en más de 50 países del mundo se han instalado turbinas eólicas modernas conectadas a redes. Como se indica en el cuadro 1, las primeras instalaciones se llevaron a cabo, sobre todo, en países industrializados. En años recientes, esas actividades también han aumentado considerablemente en ciertos países en desarrollo, en particular en la India y China. Egipto y Cabo Verde, que no figuran en el cuadro 1, también han logrado recientemente notables progresos en materia de energía eólica.

Cuadro 1
Capacidad instalada mundial de energía eólica conectada a redes de distribución, en megavatios (MW)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Europa						
Alemania	110	183	280	643	1 137	1 576
Dinamarca	418	470	490	540	630	785
España	15	45	58	72	126	216
Grecia	5	26	26	27	28	28
Italia	5	6	10	22	23	70
Países Bajos	82	105	132	153	255	305
Reino Unido	10	30	120	147	193	264
Suecia	8	12	24	40	67	105
Otros países de Europa	9	9	18	32	35	35
América del Norte						
Canadá	3	4	11	23	21	23
Estados Unidos	1 575	1 584	1 590	1 725	1 770	1 794
Otros países de América del Norte	–	–	–	2	12	22
Asia						
China	–	–	13	25	36	57
India	39	51	80	120	550	820
Japón	2	4	5	5	10	14
Otros países	6	10	19	18	26	62
Total a fines del año	2 287	2 539	2 876	3 594	4 905	6 172
Aumento anual	285	252	337	718	1 311	1 267

Fuente: "Review of progress in the implementation of wind energy by the member countries of the IEA" (París, Organismo Internacional de Energía/Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, julio de 1997).

Hipótesis sobre el aprovechamiento de la energía eólica

4. En la publicación *New renewable energy sources - a guide to the future* (1994); el Consejo Mundial de Energía formuló dos hipótesis sobre el desarrollo de la energía eólica a nivel mundial hasta el año 2020: i) la hipótesis basada en las políticas actuales, en que se supone que seguirán vigentes las tendencias tecnológicas y económicas generales actuales; y ii) la hipótesis orientada hacia la ecología, según la cual, a diferencia de la hipótesis basada en las políticas actuales, se supone que habrá un desarrollo más rápido de la eficiencia de las turbinas eólicas, se impondrá un impuesto sustancial a la energía generada por carbono y combustibles fósiles y el aprovechamiento de la energía eólica tropezará con obstáculos financieros menos graves. En el cuadro 2 se indican los resultados generales de ambas hipótesis.

Cuadro 2
Capacidad de energía eólica y electricidad eólica generada con arreglo a las hipótesis del Consejo Mundial de Energía

Hipótesis	Capacidad eólica mundial proyectada: año 2005	Capacidad y producción eólicas mundiales proyectadas: año 2020		Demanda mundial de kWh: año 2020
	(GW)	(GW)	(TWh)	(porcentaje)
Basada en las políticas actuales	62	180	376	1,5
Orientada hacia la ecología	83	474	967	4,8

Fuente: "New renewable energy resources - a guide to the future" (Londres, Consejo Mundial de Energía, 1994).

5. Los resultados de ambas hipótesis son considerablemente diferentes. En la hipótesis orientada hacia la ecología, el volumen de electricidad eólica en 2020 sería casi 2,5 veces mayor que el previsto en la hipótesis basada en las políticas actuales. El porcentaje relativamente mayor del total de la demanda mundial de kilovatios-hora (KWh) obtenido mediante la energía eólica en la hipótesis orientada hacia la ecología se debe, en parte, a que en esa hipótesis se proyecta una disminución del consumo de electricidad en general. Se supone que la energía eólica comenzará a penetrar en los mercados cuando los gastos marginales a largo plazo de la utilización de la energía generada por medios convencionales lleguen a ser más altos que los de la utilización de la energía eólica. A partir de entonces, se supone que la penetración de la energía eólica en los mercados dependerá, sobre todo, de las restricciones impuestas por los recursos financieros y del aumento futuro de la capacidad de fabricación de turbinas eólicas.

6. La institución BTM Consult evaluó recientemente el desarrollo a corto y mediano plazo de la capacidad mundial de energía eólica conectada a redes de distribución y estimó que la capacidad instalada mundial existente de 6,1 gigavatios (GW) (1996) aumentará a 17,5 GW hacia el año 2001 (una tasa de crecimiento anual de casi el 25%) y llegará a 33,5 GW en 2005, en consonancia con el pronóstico formulado por el Consejo Mundial de Energía para 2010 en la hipótesis basada en las políticas actuales. A corto plazo, no se prevé que la capacidad de la industria manufacturera vaya a disminuir; en realidad, se espera que haya una reñida competencia entre los fabricantes. Sobre la base de ese estudio, la capacidad acumulada mundial de electricidad generada por turbinas eólicas podría llegar a unos 375 GW en 2020, cifra intermedia entre las dos estimaciones formuladas por el Consejo

Mundial de Energía, con arreglo a la hipótesis basada en las políticas actuales y la hipótesis orientada hacia la ecología.

7. Los estudios mencionados concentran principalmente su atención en las turbinas ubicadas en tierra. Sin embargo, las instalaciones ubicadas costa afuera están aumentando; hay una en los Países Bajos y dos en Dinamarca. En *Energy 21*, el plan energético más reciente de Dinamarca, se prevé que con turbinas ubicadas costa afuera la capacidad instalada en Dinamarca generará más de 4.000 MW antes del año 2030.

8. Existen distintos mercados para los sistemas centralizados conectados en red y para los sistemas destinados a comunidades remotas que no están conectadas con ninguna red. Hasta el presente, el mercado más amplio ha sido el de las instalaciones convencionales conectadas a redes de distribución centralizadas. Los sistemas no centralizados que no están conectados a redes no han sido tan comunes, ya que las comunidades que utilizan sistemas de esa índole son de acceso más difícil y suelen ser pobres y estar ubicadas en países en desarrollo, debido a lo cual no constituyen mercados comercialmente atractivos. Los sistemas no centralizados pequeños que utilizan energía eólica podrían resultar más eficaces en función de los costos que las ampliaciones de la red de distribución centralizada.

Ubicación y evaluación de los recursos eólicos

9. La evaluación de los recursos eólicos suele realizarse calculando la velocidad media del viento en un lugar o zona determinados durante 10 a 20 años. La determinación exacta de la velocidad media del viento por día, por mes y por año tiene una importancia fundamental para determinar la ubicación de los proyectos de energía eólica. A manera de regla empírica, cabe afirmar que la producción de energía de las turbinas eólicas aumenta a razón de un tercio de la velocidad del viento y que, por lo tanto, el costo de la energía eólica disminuye notablemente cuando aumenta la velocidad del viento. En general, con los métodos existentes se pueden predecir los recursos eólicos con bastante exactitud, pero no ocurre así en todos los lugares. Por ese motivo, los usuarios deben saber cuál es el modo apropiado de utilizar los modelos y conocer las limitaciones reconocidas de éstos; además, en algunas zonas es preciso realizar más investigaciones. También para verificar los resultados de la utilización de los modelos es necesario llevar a cabo estudios específicos de cada ubicación.

III. Situación y tendencias en materia de tecnología

A. Tecnología de las turbinas eólicas modernas

10. La tecnología de las turbinas eólicas modernas puede clasificarse en tres categorías principales: turbinas grandes conectadas a redes, turbinas de tamaño mediano en sistemas híbridos y sistemas pequeños independientes. Las turbinas eólicas grandes conectadas a redes, cuya capacidad fluctúa entre 150 kilovatios (kW) y 2.000 kW, son las turbinas eólicas que más valor de mercado tienen, por amplio margen; la tecnología de esas máquinas está entrando en su etapa de madurez. La capacidad de las turbinas eólicas que se conectan a redes y se pueden adquirir comercialmente ascendía a 50 kW a principios del decenio de 1980; actualmente fluctúa entre 500 y 800 kW. La próxima generación de turbinas comerciales, con capacidades que fluctúan entre 1.000 y 1.500 kW, comenzaron a instalarse como prototipos en 1995 y se introdujeron comercialmente en el mercado en 1997. Las turbinas eólicas conectadas a redes suelen instalarse hoy en conjuntos de 10 a 100 MW que funcionan como una sola planta.

11. Las turbinas eólicas de tamaño mediano, cuya capacidad fluctúa entre 25 y 150 kW, pueden funcionar en sistemas energéticos híbridos, combinadas con otras fuentes de energía, tales como los sistemas fotoeléctricos, los de energía hidráulica, los motores diesel y/o los acumuladores. Esos sistemas resultan particularmente apropiados para pequeñas redes en lugares remotos, donde las posibilidades de utilizar combustible fósil se ven limitadas por el transporte, el medio ambiente, los costos u otros obstáculos, y para instalaciones con fines especiales como el bombeo y la desalación de agua o la recarga de baterías.

12. Las turbinas eólicas independientes de pequeño tamaño, cuya capacidad es inferior a los 25 kW, se utilizan para el bombeo de agua, la recarga de baterías y los sistemas de calefacción. Las turbinas eólicas pequeñas para la recarga de baterías, cuya capacidad fluctúa entre 25 y 150 vatios (es decir, rotores de 0,5 a 1,5 metros) son las que más éxito comercial han tenido hasta ahora. Es probable que en la actualidad haya unas 200.000 turbinas eólicas pequeñas para la recarga de baterías instaladas en estaciones de telecomunicaciones ubicadas en lugares remotos. Los principales productores de turbinas pequeñas para la recarga de baterías se encuentran en el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte (para los mercados relacionados con el mar y las

excursiones recreativas) y en China (para los ganaderos seminómadas de la región mongola).

13. Sin embargo, de las tecnologías de aprovechamiento de la energía eólica utilizada en la actualidad, la que más abunda sigue siendo el molino mecánico utilizado en explotaciones agrícolas. En el mundo se utilizan ordinariamente entre 1 y 2 millones de unidades de esa índole, y existen en esa esfera más de 50 fabricantes reconocidos. Los molinos mecánicos instalados en explotaciones agrícolas se utilizan primordialmente para el suministro de agua potable en zonas rurales. Se estima que actualmente se instalan entre 5.000 y 10.000 molinos por año.

B. Adelantos tecnológicos recientes

14. Existen dos tipos principales de turbinas eólicas, cuyo nombre alude a la dirección de su eje principal: las turbinas eólicas de eje horizontal y las turbinas eólicas de eje vertical. Las máquinas de eje vertical no han dado los resultados que de ellas se esperaban al principio, y sólo una porción muy pequeña de las turbinas eólicas que se utilizan hoy son de esa índole. Por consiguiente, el presente informe se ocupa únicamente de las turbinas eólicas de eje horizontal.

15. El tamaño medio de las turbinas ha aumentado notablemente en los últimos 15 años; para que ese tamaño siga aumentando existen sólo unos cuantos impedimentos técnicos, incluidos el transporte y la disponibilidad de grúas de gran tamaño cerca del emplazamiento. La eficiencia en la producción de electricidad también está aumentando rápidamente, debido a que se construyen torres más altas, existen rotores de mayores dimensiones y el rendimiento aerodinámico ha aumentado. Ese aumento de tamaño y de eficiencia es la causa directa del aumento de la producción anual de energía por metro cuadrado de terreno ocupado, lo cual es importante en regiones donde el espacio disponible es limitado.

16. La reducción de los gastos es el principal objetivo de las actividades de investigación y desarrollo en materia de tecnología de turbinas eólicas. Desde principios del decenio de 1980, los costos de las turbinas eólicas y, por consiguiente, los gastos de producción de energía, han disminuido a ritmo constante. El coeficiente de desarrollo de la tecnología de las turbinas eólicas (es decir, el porcentaje de disminución de los gastos cada vez que se duplica el volumen acumulado) ha sido del orden del 15%. Se prevé que esa tendencia se mantenga en el futuro, quizás a un ritmo ligeramente más lento. También se han reducido las emisiones acústicas de las turbinas eólicas, gracias a la utilización de aspas mejor

diseñadas, componentes mecánicos de más calidad y amortiguadores.

C. Efectos de las turbinas eólicas en la red de distribución de electricidad

17. *Crédito de capacidad:* El crédito de capacidad de energía eólica se puede determinar utilizando el método basado en las probabilidades de pérdida de carga (LOLP), un procedimiento para medir la disponibilidad de energía utilizado comúnmente por las empresas energéticas para prever la expansión de su capacidad de generación de energía. Utilizando el método LOLP, en niveles de baja penetración de la energía eólica en el mercado (hasta un 10% de la producción de kWh), el crédito de capacidad de un gran número de turbinas eólicas dispersas en una amplia zona y conectadas a una red grande de distribución es aproximadamente igual al factor de capacidad de las turbinas, el cual fluctúa habitualmente entre el 20% y el 40%. Incluso en niveles más altos de penetración de la energía eólica en el mercado, su crédito de capacidad puede ser considerable. Cabo Verde alcanzó un crédito de capacidad del 75% del factor de capacidad de las turbinas eólicas en un nivel de penetración que fluctuó entre el 25% y el 50%.

18. *Predicción a corto plazo:* Utilizando modelos de pronóstico meteorológico general y teniendo en cuenta la velocidad del viento en un lugar o región determinados, se puede predecir con gran exactitud la producción de energía generada por turbinas eólicas en la zona correspondiente a una determinada empresa energética. Sobre la base de esos modelos de pronóstico, el distribuidor de esa empresa energética puede obtener en la pantalla de su computadora una predicción de la producción de energía que será generada por turbinas eólicas durante las próximas 36 horas reduciendo así al mínimo las dificultades de distribución. Esos mecanismos de predicción pueden ser útiles también para determinar el potencial de gestión de la carga máxima en un sistema de redes de distribución, en términos de disponibilidad de energía eólica durante los períodos de carga máxima.

19. *Calidad de la energía:* Aunque se ha manifestado preocupación respecto de las repercusiones que el potencial de energía eólica pueda tener en la calidad de la energía (por ejemplo, la relación con la demanda de energía en tiempo real, el nivel del voltaje, las intermitencias de voltaje, la armonía, las variaciones de frecuencia), esos problemas se han resuelto eficazmente adoptando medidas técnicas, operacionales y de gestión.

IV. Aspectos económicos de la energía eólica

20. En esta sección se examinan únicamente los aspectos económicos de las turbinas eólicas conectadas a redes de distribución, ya que éstas constituyen el grueso de las turbinas instaladas con valor de mercado. Los principales parámetros que rigen la economía de las turbinas eólicas son: i) los gastos de inversión, incluidos los gastos adicionales de función, conexión con la red y otros gastos; ii) los gastos de funcionamiento y conservación; iii) la producción de electricidad y la velocidad media del viento; iv) el período de vida útil de la turbina; y v) la tasa de descuento. De esos parámetros, los más importantes son los gastos de inversión y la producción de electricidad de la turbina. Debido a que la producción de electricidad depende en alto grado de las condiciones del viento, la selección de un lugar apropiado donde ubicar la turbina es un factor decisivo para los resultados económicos.

A. Tendencias de los gastos de inversión y de la eficiencia

21. En general, dos tendencias han predominado en la evolución de las turbinas eólicas conectadas a redes: i) el tamaño medio de las turbinas que se venden en el mercado ha aumentado considerablemente; y ii) la eficiencia de esas turbinas en la producción de energía ha aumentado a ritmo constante. El tamaño medio de las turbinas que se venden en el mercado danés de exportaciones ha aumentado de unos 50 kW en 1985 a más de 500 kW en 1996. En la actualidad, la turbina que más se vende tiene una capacidad nominal de 600 kW, pero actualmente se venden turbinas con capacidades que ascienden a 1.500 kW. Además, la eficiencia en la producción de electricidad, medida sobre la base de la producción anual de energía por zona de barrido del rotor (kWh/m²) ha aumentado a razón de más del 5% anual en los últimos 15 años.

22. La mayor parte de los gastos de inversión de los proyectos de energía eólica tiene que ver con el costo de la propia turbina eólica (precio de fábrica). En el caso de una turbina ordinaria de 600 kW, el costo de la turbina absorbe en Dinamarca aproximadamente el 80% del total de gastos, mientras que aproximadamente el 9% de esos gastos corresponde a la conexión con la red y aproximadamente el 4% se utiliza en la instalación. Los demás gastos, como los relacionados con los sistemas de control y los terrenos, absorben sólo porciones menores del total de gastos.

23. Como se indica en el gráfico I, ha habido una disminución considerable de los costos por kW, los costos de la turbina (4% por año) y de los gastos adicionales. Por ejemplo, los gastos de inversión generales por kW disminuyeron en más del 5% por año entre 1989 y 1996. El aumento de la eficiencia, combinado con la disminución de los gastos de

inversión por unidad generadora, han dado lugar a que la relación entre la suma total invertida y la producción anual aumentara en más del 45% desde 1989, o más del 8% por año en términos reales, como se indica en el gráfico I (ordenada de la derecha).

Gráfico I

Gastos de inversión (precio de fábrica) y otros gastos de las turbinas eólicas

(En dólares EE.UU. por kW; valores constantes en dólares de 1996)

Fuente: Privatejede Vindmøllers Økonomi (Aspectos económicos de las turbinas eólicas de propiedad privada) (Organismo Danés de Energía, 1994) y P. Nielsen, Energy and Environmental Data, 1997.

24. Los gastos de inversión de los proyectos de energía eólica consignados en los informes del Organismo Internacional de Energía varían considerablemente entre un país y otro, debido a factores como la estructura del mercado, las características del lugar y las reglamentaciones de planificación: en los distintos países, los gastos de inversión de los proyectos de energía eólica fluctúan entre aproximadamente 900 dólares por kW y 1.600 dólares por kW.

B. Gastos de funcionamiento y conservación

25. Los gastos de funcionamiento y conservación constituyen una porción considerable del total de gastos anuales de las turbinas. Sólo un reducido número de turbinas han funcionado durante todo el período previsto de vida útil de 20 años. Por esa razón, las estimaciones de los gastos de funcionamiento y conservación han sido muy aproximadas, especialmente en los últimos años. Los gastos de funcionamiento y conservación se ven afectados principalmente por

la edad de la turbina; comienzan a niveles bajos y van aumentando con el tiempo. En el caso de una turbina de 150 kW de capacidad, se estima que los gastos anuales de funcionamiento y conservación ascienden aproximadamente al 1,2% por año de los gastos de inversión durante los dos primeros años de funcionamiento de la turbina y aumentan a 7% por año durante los años decimosexto a vigésimo. En el caso de una turbina de 600 kW de capacidad, los gastos de funcionamiento y conservación durante los dos primeros años ascienden aproximadamente al 1% por año y aumentan a 4,5% por año entre los años decimosexto y vigésimo.

C. Eficacia en función de los gastos globales

26. Los gastos totales por kWh producido (costo por unidad) se calculan dividiendo entre la producción anual de electricidad los gastos de inversión y los de funcionamiento y conservación. De ese modo, el costo por unidad generadora se calcula como un costo medio. En realidad, los gastos reales

serán inferiores a la cifra media calculada al comienzo del funcionamiento de la turbina (debido a que los gastos de funcionamiento y conservación son entonces menores) y aumentarán durante el período en que la turbina se utilice. En el gráfico II se indica el costo por unidad, teniendo en cuenta los distintos tamaños de turbinas, sobre la base de los gastos de inversión y los gastos de funcionamiento y conservación mencionados, con una vida útil de 20 años y una tasa de descuento del 5% por año (en términos reales). La producción de electricidad de las turbinas se calcula teniendo en cuenta dos clases de aspereza, correspondientes

a una velocidad media del viento de aproximadamente 6,9 metros por segundo y 6,3 metros por segundo, respectivamente, y a una altura de 50 metros por encima del terreno. En el gráfico II se observa la tendencia a fabricar turbinas de mayor tamaño y más eficaces en función de los costos. Por ejemplo, en un lugar con aspereza de la primera clase (6,9 metros por segundo), el costo medio en dólares de 1996 disminuyó de aproximadamente 8,8 centavos por kWh para una turbina de 95 kW a aproximadamente 5 centavos por kWh en una nueva turbina de 600 kW, lo cual equivale a un aumento de casi el 45% en un período de 9 a 10 años.

Gráfico II

Total de gastos de la turbina por unidad de electricidad producida, a una altura de 50 metros

(En centavos de dólar EE.UU. por kWh; valores constantes en dólares de 1996)

Fuente: R. Redlinger y otros, Laboratorio Nacional de Risø, Dinamarca.

27. La tasa de descuento tiene una influencia considerable en los gastos de producción y, por lo tanto, en la viabilidad financiera de los proyectos de energía eólica. En el caso de una turbina de 600 kW, si la tasa de descuento aumenta del 5% al 10% por año (en términos reales), los gastos de producción aumentan en poco más del 30%, de 5 centavos de dólar por kWh a 6,7 centavos de dólar por kWh. En los sistemas de energía eólica financiados por proyectos en los Estados Unidos de América, por ejemplo, las tasas de descuento nominales para sistemas financiados sobre la base de un 50% de deuda y un 50% de capital ha sido más del 12%

por año, lo cual ha dado lugar a que los costos del sistema aumentaran considerablemente.

D. Comparación con los costos de la energía generada por medios convencionales

28. El costo de la electricidad generada por medios convencionales se determina sobre la base de tres componentes: i) el costo del combustible, ii) los gastos de funcionamiento y conservación y iii) los gastos de inversión. Cuando la energía generada por medios convencionales es reemplazada por la electricidad eólica, la reducción de gastos depende del grado en que se tengan en cuenta esos tres componentes. En general se da por sentado que al utilizar la electricidad eólica se evitan los gastos por concepto de combustible fósil y una considerable porción de los gastos de funcionamiento y conservación de la planta convencional de energía que ha quedado desplazada. El nivel de reducción de gastos de inversión depende de la medida en que la capacidad de energía eólica haga innecesarias las inversiones en nuevas plantas convencionales de energía y, por ende, está directamente relacionado con el crédito de capacidad de las plantas de energía eólica. El crédito de capacidad depende de varios factores diferentes; entre ellos, el nivel en que la energía eólica haya penetrado en el mercado y el modo en que la capacidad eólica y se haya integrado en el sistema energético global. En general, en los niveles marginales de penetración de la energía eólica en el mercado, el crédito de capacidad de las turbinas eólicas es casi igual al factor de capacidad media anual. Es por ello que un crédito de capacidad de energía eólica del 25% se considera razonable cuando el volumen de electricidad eólica constituye menos del 10% del total de la producción de electricidad. Ese crédito de capacidad disminuye en la medida en que aumenta la proporción de utilización de energía eólica respecto de los sistemas convencionales; pero incluso en niveles altos de penetración en el mercado se alcanza un considerable crédito de capacidad, como se indica en la sección III.

29. En el gráfico III se indica la reducción de gastos que se puede lograr con la electricidad eólica, suponiendo que se eviten todos los gastos de combustible y de funcionamiento y conservación y que se asigne a la energía eólica un crédito de capacidad muy conservador del 0%. Por ejemplo, en Alemania, por cada kWh de electricidad generada mediante la energía eólica que desplace a un kWh de energía generada mediante el carbono se logran economizar aproximadamente 7 centavos de dólar por kWh, por concepto de combustible de carbono y gastos de funcionamiento y conservación, aunque la planta de energía eólica no reciba crédito alguno por desplazar gastos de inversión en plantas de carbono. Se indican, asimismo, los costos estimados de una turbina de 600 kW ubicada en emplazamientos terrestres comunes en Dinamarca y el Reino Unido (5 centavos de dólar y 4,5

centavos de dólar por kWh, respectivamente). Por consiguiente, si se puede instalar una turbina eólica en Alemania a un costo medio de 5 centavos de dólar por kWh y desplazar así a la electricidad generada por carbono, que cuesta 7 centavos de dólar por kWh se lograrían economías de 2 centavos de dólar por kWh en cifras netas por cada kWh de electricidad generada mediante la energía eólica.

30. Por lo tanto, la turbina de 600 kW es competitiva, o está a punto de serlo, en términos de gastos directos en muchos países, especialmente si se compara con las tecnologías basadas en el carbono o el gas. Esas cifras son conservadoras, ya que en esas comparaciones se supone que no hay crédito de capacidad para la energía eólica, debido a lo cual ésta tiene más dificultades para competir. Si se concede a la energía eólica un crédito de capacidad más realista, como del 25%, se reducirían aún más los gastos y aumentaría aún más la competitividad de la energía eólica, particularmente en comparación con la energía nuclear, cuyos costos están dominados por los gastos de inversión. Además, en el gráfico no se incluyen las ventajas ambientales de la energía eólica en lo que respecta a, por ejemplo, la acidificación y el calentamiento de la atmósfera.

31. El gráfico III cambiaría considerablemente si se asignara un crédito de capacidad más alto a la energía eólica. Por ejemplo, en el caso de los Estados Unidos de América, en el gráfico III se consignan reducciones de gastos de 2,41, 3,04 y 4,62 centavos de dólar por kWh respecto de la electricidad generada por energía nuclear, carbono y gas, respectivamente, suponiendo un crédito de capacidad eólica de cero. Si el crédito de capacidad eólica aumentara al 25%, la reducción de gastos sería de 3,00, 3,52 y 4,76 centavos de dólar por kWh. Con un crédito de capacidad del 50% se ahorrarían 3,59, 4,00 y 4,89 centavos de dólar por kWh. Ello pone de relieve la importancia de que la capacidad sea confiable y distribuible; pero esa importancia puede variar en el futuro, en la medida en que evolucionen los mercados de entrega inmediata y las opciones financieras respecto de sistemas competitivos de generación de electricidad, que tengan por objeto aprovechar mejor las diversas de fuentes de energía.

Gráfico III

Comparación entre los costos evitables de la energía generada por fuentes tradicionales, excluido el crédito de capacidad, y los costos de producción de la electricidad generada por energía eólica

(En centavos de dólar EE.UU. de 1996 por kWh)

Fuente: Basado en la información sobre costos extraída del documento “Projected costs of generating electricity” (Costos proyectados de la generación de electricidad (París, OCDE/OIEA, 1993).

E. Rentabilidad del bombeo para riego en pequeña escala

32. Los avances más notables de la energía eólica en los últimos años se han registrado en las aplicaciones eléctricas en gran escala y en ellas se centra el presente informe. No obstante, el tipo más corriente de aplicación de la energía eólica por el número de unidades instaladas sigue siendo la pequeña aerobomba mecánica empleada para el riego. Estas aerobombas se utilizan mucho tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados y pueden resultar un recurso particularmente atractivo cuando se carece de acceso a redes eléctricas. En un estudio en el que se comparan las aerobombas con grupos de bombas de queroseno, grupos de motobombas diésel, sistemas solares fotovoltaicos o sistemas solares de bombas ciclo Rankine se estableció que en varios países la relación costo-eficacia de las aerobombas era mucho mayor que la de los sistemas solares y, en la mayoría de los casos, las aerobombas eran más baratas que los grupos de bombas de queroseno y de motobombas diésel. Los subsidios que a menudo reciben el queroseno o el diésel influyen considerablemente en la relación costo-eficacia, y el alto costo de

inversión de los sistemas eólicos en comparación con los grupos de motobombas de queroseno y diésel también hace que las tasas de interés vigentes incidan en la rentabilidad de las aerobombas.

V. Consideraciones de orden ambiental y social

A. Repercusiones ambientales

33. El estudio ExternE, “Externalities of Energy” (“Efectos de la energía en el medio ambiente”), efectuado en 1995 por la Comisión Europea constituye uno de los mayores esfuerzos realizados para cuantificar los valores monetarios de los efectos en el medio ambiente de una gran variedad de ciclos de combustibles como el carbón, el petróleo y el gas, y del aprovechamiento de la energía nuclear, hidráulica y eólica.. En el estudio se dice que el ciclo de aprovechamiento de la energía eólica repercute en el medio ambiente produciendo ruido, efectos en el paisaje, el calentamiento de la Tierra, acidificación, accidentes en la vía pública, accidentes ocupacio-

nales, mortandad de aves e interferencias radiales y afectando el uso de la tierra. La construcción e instalación de turbinas eólicas implica el uso de energía que acarrea emisiones de aire, aunque ello depende de la índole de las fuentes de energía que intervengan en el momento de la construcción. En el cuadro 3 figuran los efectos de la energía eólica en el medio ambiente cuantificados en el estudio ExternE, para el que se tomaron los datos correspondientes a dos emplazamientos de baterías de aerogeneradores del Reino Unido.

Cuadro 3
Valores de los efectos en el medio ambiente de la electricidad generada por energía eólica

<i>Categoría</i>	<i>Costos externos (mECU por kWh)^a</i>
Ruido	0,07 – 1,1
Efectos en el paisaje	Sin cuantificar
Calentamiento de la Tierra	0,15
Acidificación	0,7
Accidentes en la vía pública	0,09
Accidentes ocupacionales	0,26

Fuente: ExternE, "Efectos de la energía en el medio ambiente", estudio (Comisión Europea, 1995).

^a Milésimas de unidad monetaria europea.

34. Los valores correspondientes al ruido variaron ampliamente de acuerdo con la densidad de la población situada en los alrededores del emplazamiento. Aunque en el estudio no se asignó un valor concreto al efecto en el paisaje, se calculó que éste era pequeño fuera de las zonas de belleza natural designadas que revisten importancia recreativa y que con toda probabilidad se situaba por debajo de 1,9 mECU por kWh. Si se supusiera un valor de ruido medio de 0,6 mECU por kWh y un valor de efecto en el paisaje de 1 mECU por kWh, la suma de los valores individualizados en el cuadro 3 arrojaría un valor total de efectos de la energía eólica en el medio ambiente de 3 mECU por kWh (0,0038 dólares EE.UU. por kWh). Se calculó que los efectos sobre la mortandad de aves eran insignificantes en el Reino Unido, aunque tal vez fueran mayores en otros lugares, entre ellos los Estados Unidos; también resultaron nimios los efectos sobre el uso de la tierra debido a la escasa superficie que requieren las turbinas y su compatibilidad con la agricultura y la fauna. Si bien el valor total de los efectos de la energía eólica en el medio ambiente no carecen de importancia, es considerablemente inferior a los costos de generación de electricidad, en particular porque el calentamiento de la Tierra y la acidificación son efectos secundarios que se originan en el supuesto de que se utilizará principalmente una fuente de energía de combustibles fósiles para la fabricación de turbinas. Si se excluyen esas emisiones secundarias (que

se omitieron en el estudio ExternE para todos los otros ciclos de combustible) el valor de los efectos de la energía eólica en el medio ambiente descendería a aproximadamente 2 mECU por kWh (0,0025 dólares EE.UU. por kWh).

35. Es difícil hacer comparaciones con otros combustibles porque se parte de distintos supuestos y metodologías. Sin embargo, tomando como base los estudios de los ciclos de combustible contenidos en el estudio ExternE, en el gráfico IV se calcula de forma altamente aproximativa en dólares de los EE.UU. el valor de los efectos en el medio ambiente de otros ciclos de combustible en comparación con el viento. Estos valores pueden oscilar considerablemente, y habría que manejar las cifras sólo con extrema cautela. Sin embargo, los efectos de la energía eólica en el medio ambiente parecieran no ser mayores que los de ningún otro tipo y considerablemente menores que los de los combustibles fósiles. Por lo demás, en el caso de la energía eólica esas repercusiones se circunscriben al ámbito local, son relativamente predecibles e inciden principalmente en la esfera estética.

B. Consideraciones de orden social

36. Según se explicó anteriormente, los efectos acústicos y visuales son las consecuencias negativas más importantes de la energía eólica. Dado que su repercusión es totalmente local, esos efectos pueden plantear problemas considerables cuando se realiza la planificación y se escoge el emplazamiento en el plano local. Cabe notar, sin embargo, que el ruido generado por baterías de aerogeneradores a una distancia de 350 metros es del orden de los 45 dB (aproximadamente el mismo ruido que produce un automóvil que se desplaza a 40 millas por hora a una distancia de 100 metros); en sí el ruido es menor que los niveles del ruido de fondo diurno en zonas rurales y es sólo ligeramente superior al de esos niveles durante la noche.

37. La creación de empleo es otra consideración de orden social que reviste gran interés. Se calcula que en todo el mundo la industria de la energía eólica sostiene en la actualidad aproximadamente de 30.000 a 35.000 puestos para suministrar 1.200 MW de nueva capacidad instalada por año. En los países en desarrollo se manifiestan con menor claridad las consecuencias de las modernas turbinas eólicas de alta tecnología para el empleo y la balanza de pagos, ya que subsistirá la dependencia de la importación de equipo, aunque no de combustible, y, tal vez, de mano de obra especializada.

Gráfico IV

Variaciones totales estimadas de los efectos en el medio ambiente por tipo de fuente

Fuente: ExternE, "Efectos de la energía en el medio ambiente", estudio (Comisión Europea, 1995).

VI. Incentivos para promover el aprovechamiento de la energía eólica

38. Se ha utilizado una variedad de mecanismos para promover proyectos de energía eólica, lo que ha permitido generar una considerable cantidad de energía eólica moderna en varios países de la OCDE y en algunos países en desarrollo. A continuación se describen varios de esos mecanismos.

39. *Acuerdos de adquisición de energía (AAE).* Tal vez el requisito único más importante de un buen proyecto de energía eólica es que exista un mercado que absorba la electricidad producida. En un sistema monopólico de servicios de energía verticalmente integrado, una empresa que escoja construir centrales eólicas dispondría de hecho de un mercado garantizado. No obstante, la mayor parte del aprovechamiento de la energía eólica se debe a productores independientes no vinculados con empresas de servicios. En este caso, hay que establecer un mecanismo que permita a quienes aprovechan la energía eólica vender la electricidad generada a la empresa de servicios. Es por eso que un objetivo fundamental de la concertación de acuerdos de adquisición de energía ha sido la creación de mercados estables.

40. *Subsidio a la producción.* Cuando la electricidad derivada del viento es más cara que la proveniente de fuentes

tradicionales, la energía eólica puede no resultar atractiva desde un punto de vista económico a las actuales tarifas eléctricas. En ese caso, un subsidio a la producción, pagado por kWh de electricidad generada, puede disminuir el costo de la energía eólica y hacer que los proyectos sean económicamente viables. El subsidio sería sufragado por el gobierno con cargo a la base tributaria general o por los usuarios del servicio mediante un recargo en sus cuentas de electricidad. Se supone que esos subsidios deben tener duración limitada y se suspenderán gradualmente, a medida que la energía eólica se haga más competitiva en el mercado como consecuencia de los avances tecnológicos.

41. *Créditos impositivos.* Se pueden conceder créditos impositivos sobre la base de los costos de inversión o de los kWh generados por el proyecto. Los inversionistas prefieren los créditos impositivos basados en los costos de inversión porque los pueden reclamar independientemente del rendimiento energético real del proyecto de generación de electricidad. Tratándose de proyectos que entrañan un alto riesgo, puede que los inversionistas sólo estén dispuestos a proporcionar financiación sólo si se les ofrecen condiciones generosas de ese tipo. Por otra parte, los créditos impositivos que se basan en los costos de inversión se prestan al abuso, porque los inversionistas a quienes sólo les interesa disponer de un refugio fiscal tienen escasos incentivos para garantizar que sus proyectos realmente produzcan electricidad. Los

créditos impositivos a la producción, pagados por kWh de electricidad generada, reducen la posibilidad de abuso al hacer que el pago dependa del rendimiento energético del proyecto, con lo que aumenta el riesgo de quienes invierten en él.

42. *Reserva de fuentes de energía renovables.* Una reserva de fuentes de energía renovables exige que un porcentaje del total de la electricidad generada provenga de fuentes renovables. En algunos casos, puede asignarse este porcentaje en forma separada a cada tecnología de aprovechamiento (del viento, el sol, la biomasa y otras semejantes). De este modo, una política de reserva permite crear un mercado garantizado para la electricidad generada mediante tecnologías de aprovechamiento de fuentes de energía renovables que en otras condiciones bien podrían ser incapaces de competir en el actual mercado de la generación de energía.

43. *Complementos por efectos en el medio ambiente.* Habida cuenta de que al planificar las fuentes de energía tradicionales no se ha prestado atención a los efectos en el medio ambiente de la producción de electricidad se ha tratado de solucionar ese problema mediante el incremento del costo hipotético de las centrales tradicionales; para ello se ha impuesto en la etapa de planificación un cargo o complemento en concepto de los efectos en el medio ambiente del funcionamiento de esas centrales. Al incrementar el costo aparente de las tecnologías de aprovechamiento tradicionales, esos complementos aumentan la posibilidad de que se construyan centrales eólicas. Los complementos por efectos en el medio ambiente se incluyen generalmente sólo en la etapa de planificación cuando se seleccionan los recursos, pero no se imputan a las operaciones, de modo que no afectan la puesta en marcha de las centrales tras la construcción de los proyectos.

44. *Impuesto sobre el carbono.* Al igual que el complemento por efectos en el medio ambiente, el impuesto sobre el carbono aumenta el costo de la energía derivada de los combustibles fósiles, ya que se cobra un gravamen por kilovatio hora, de acuerdo con el contenido de carbono de los combustibles y su probable incidencia en el cambio climático mundial. Este gravamen sobre los combustibles fósiles permite que las fuentes de energía exentas de carbono como la energía eólica sean mucho más competitivas. No obstante, a diferencia del complemento por efectos en el medio ambiente, el impuesto sobre el carbono entraña el pago real de dinero y no consiste simplemente en un cargo hipotético utilizado únicamente con fines de planificación.

45. *Financiación preferencial.* Comprende los préstamos concedidos en condiciones favorables a tasas de interés inferiores a las del mercado, la cofinanciación oficial para

atraer a los prestamistas comerciales, garantías de préstamos y otros mecanismos semejantes.

46. *Subvenciones a la investigación, el desarrollo y la demostración.* Varios gobiernos conceden o han concedido subvenciones para la investigación, el desarrollo y la demostración de tecnologías de fabricación de turbinas eólicas, así como para la evaluación de recursos, los aspectos ambientales y otras esferas conexas. Según el Organismo Internacional de Energía, los Estados Unidos tuvieron el programa más importante de investigación y desarrollo de energía eólica en 1996, seguidos de Japón, los Países Bajos, Dinamarca e Italia. En 1996, los fondos totales asignados por los gobiernos de los países de la OCDE a la investigación y el desarrollo de la energía eólica ascendieron a unos 70 millones de dólares de los EE.UU. Cabe proceder con cautela al hacer comparaciones entre los países ya que se utilizan distintos sistemas contables. Además, la asignación de fondos a la investigación el desarrollo y la demostración en sí misma no garantiza el éxito en materia de energía eólica. Entre 1973 y 1988, los Estados Unidos y Alemania gastaron aproximadamente 380 millones de dólares y 79 millones de dólares respectivamente en ese rubro, pero Dinamarca, que desembolsó en el mismo período sólo 15 millones de dólares con el mismo fin, llegó a dominar el mercado de fabricación de las turbinas eólicas. Para llevar a feliz término las inversiones en investigación, desarrollo y demostración, conviene complementarlas cuidadosamente con mercados seguros que absorban a largo plazo la electricidad generada por la energía eólica.

VII. Recomendaciones

47. Al formularse políticas adecuadas en los países en desarrollo, puede resultar beneficiosa la experiencia recogida en la creación de los incentivos mencionados en la sección - VI. No obstante, su implantación exigirá que se consolide la capacidad institucional de los órganos normativos y regulatorios. Ello reviste importancia particular para los países que comienzan la privatización de las empresas de servicios públicos. Una política encaminada a promover las fuentes de energía renovables podría comprender los elementos fundamentales que se describen a continuación.

48. *Fijación racional de tarifas y mecanismos de incentivos bien concebidos.* Puede que muchos países necesiten reformar las tarifas en el sector eléctrico tradicional. De otra manera, si el sector tradicional goza de subsidios excesivos trabaría sobremanera el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables. Además, los sistemas de incentivación basados en los mecanismos descritos anteriormente deberían

adaptarse a las circunstancias que caracterizan a los países en desarrollo.

49. *Creación de mercados estables para la electricidad generada por energía eólica.* La existencia de mercados seguros que absorban la electricidad generada por energía eólica es el factor decisivo para intensificar el aprovechamiento de esa energía. Los contratos estables de adquisición de energía han constituido un elemento fundamental de las políticas energéticas de todos los países que han obtenido buenos resultados con la energía eólica. Aún no se ha creado un entorno de plena y absoluta competitividad, por lo que este tipo de energía deberá seguir recibiendo algún tipo de apoyo adicional en los próximos años.

50. *Creación de mercados estables para las turbinas eólicas.* Los países también deberían promover la estabilidad de los mercados de nuevas turbinas eólicas para garantizar la viabilidad de la industria y fomentar el desarrollo tecnológico. No es necesario que los mercados sean grandes, ya que la estabilidad cuenta mucho más que el tamaño.

51. *Compatibilización del rendimiento financiero de los proyectos energéticos con las metas de la sociedad en materia de medio ambiente.* Habría que redoblar los esfuerzos para introducir mecanismos apropiados que permitan compatibilizar mejor el rendimiento financiero de los proyectos con las metas de la sociedad en materia de medio ambiente.

52. *Aumento de la participación de la comunidad en la planificación y en los beneficios de los proyectos.* Aunque escasos, los efectos acústicos y visuales de la energía eólica existen y deben encararse mediante un proceso de planificación abierto y directo. También disminuye considerablemente la oposición cuando los residentes locales están bien informados y los proyectos de energía eólica reportan beneficios financieros a sus comunidades.

53. *Fomento de los proyectos descentralizados en las comunidades distantes.* La energía eólica puede resultar muy eficaz en función de los costos en las comunidades distantes desprovistas de una red central de transmisión de electricidad. Sin embargo, como por lo general ese tipo de comunidades son pobres y se encuentran en los países en desarrollo, se han hecho menores esfuerzos para incentivar esos mercados; además, la mayor parte del aprovechamiento de la energía eólica se ha producido en el contexto de la generación centralizada de energía que utiliza redes. Deberían tomarse otras medidas para proporcionar financiamiento y estimular los proyectos de energía eólica en las comunidades distantes que no dependen de redes, en particular en el contexto de los programas de electrificación rural en los países en desarrollo.

54. *Eliminación de los obstáculos institucionales que afectan a la energía eólica.* Deben desarrollarse comunidades profesionales estables que comprendan las cuestiones vinculadas con la energía eólica y puedan facilitar el aprovechamiento a largo plazo de ese recurso. El fomento de la capacidad institucional también comprende la difusión de información, la formulación de procesos de planificación adecuados, mecanismos apropiados de certificación de turbinas y, tal vez, la instauración de programas de demostración de energía eólica en los casos en que todavía no existen proyectos.

55. *Estímulo de la investigación y el desarrollo, particularmente en materia de evaluación de los recursos eólicos.* El sector privado ya se ha hecho cargo con éxito del desarrollo tecnológico y quizás no se necesite un importante aporte de fondos públicos. No obstante, se requerirá asistencia pública para el trazado preciso de mapas eólicos destinados a determinar los emplazamientos adecuados para la generación de electricidad por la fuerza del viento. En los países en desarrollo, en particular en los países menos adelantados, la difusión de estas tecnologías exigirá, sin embargo, una intensa cooperación internacional.

Notas

¹ El presente informe fue redactado en nombre del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Secretaría de las Naciones Unidas por Robert Y. Redlinger del Centro Colaborador sobre Energía y Medio Ambiente del PNUMA, Per Dannemand Andersen del Departamento de Energía Eólica y Física Atmosférica, y Poul Erik Morthorst del Departamento de Análisis de Sistemas, dependencias situadas en el Laboratorio Nacional Risø de Dinamarca. Se basa en un amplio estudio de los mismos autores encargado por la secretaría. El estudio fue financiado por el Ministerio de Relaciones Exteriores de Dinamarca, a quien se agradece la asistencia prestada.