

DE LA MADERA Y EL SOL AL ÁTOMO: ¿UN VIAJE DE IDA Y VUELTA?

LUIS GUTIÉRREZ JODRA
Real Academia de Ciencias

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el hombre ha utilizado la energía en todas sus actividades. Comenzó empleando su propia energía muscular para preservar el fuego en su primitivo hábitat, cultivar la tierra y construir sus primeras herramientas. Utilizó la energía del Sol para conservar alimentos y fabricar el primer material de construcción artificial: el adobe. Multiplicó la energía a su disposición mediante la esclavitud y la doma de animales, y con estos medios se comenzó a emplear el primer combustible no natural: el carbón vegetal. Con él se inició la obtención de materiales de construcción en horno: el vidrio y los materiales metálicos artificiales en unión de los metales nativos. Por otra parte, en Europa se construyen los molinos de agua fluyente y en el Oriente próximo se desarrollan los molinos de viento, adquiriendo ambos un rápido incremento.

Con estas energías se llega a la revolución industrial en que el carbón mineral, por una parte, y la máquina de vapor, por otra, transforman el artesano en la fábrica, cambian totalmente los medios de transporte, hacen que el acero sustituya a la madera para todo tipo de maquinaria e inician el camino de la innovación y los inventos, que conduce en el siglo pasado al empleo del petróleo y del gas y a la electricidad. Éstos, a su vez, constituyen la base, ya en el siglo XX, de la industria en su más amplio sentido y del reconocimiento de la investigación como medio más adecuado del aumento de conocimientos y de sus aplicaciones prácticas.

El descubrimiento de la radiactividad conduce a una forma nueva de energía primaria, la energía nuclear, cuyo rápido desarrollo para generar electricidad coincide con una gran expansión industrial y un aumento del grado de bienestar de las naciones industrializadas.

La preocupación por el agotamiento de los recursos y, sobre todo, los problemas de contaminación planteados por el uso masivo de los combustibles fósiles, con el riesgo de un posible cambio climático, dan lugar al empleo creciente de las energías renovables para sustituirlos, y surgen entonces las cuestiones del grado de eficacia que podrán

aportar sin riesgo y si serán capaces de hacer frente a las necesidades de la sociedad actual y futura.

De ahí el título de la conferencia. En lo que sigue se expondrá la situación actual y previsible para que se pueda adoptar una posición objetiva sobre este problema.

SITUACIÓN ACTUAL DE LA PRODUCCIÓN Y DEMANDA DE ENERGÍA. RECURSOS, HECHOS Y TENDENCIAS MÁS IMPORTANTES

En el camino del desarrollo de la Humanidad, el hombre pudo complementar los 60-100 Watos de su potencia muscular con el descubrimiento del fuego y de la energía del Sol, que duplican dicha cantidad, con lo que en términos de la unidad macroscópica de toneladas equivalentes de petróleo, el hombre primitivo disponía de 0,2 a 0,3 tep anuales.

Las sucesivas etapas de conversión del hombre primitivo en cazador y en explotador agrícola elevaron su capacidad hasta aproximadamente 1 tep al comienzo de la Edad Moderna, cantidad que se duplicó durante la revolución industrial y pasó a ser de casi 8 tep en los países industrializados al final del siglo XX, como se indica en la figura 1, que trata de señalar la íntima relación entre la historia de la civilización y la historia de la energía, tal como se ha indicado en la introducción.

En la actualidad, el consumo energético del mundo crece de forma global. Sin embargo, hay una gran diferencia según las zonas del mundo. El crecimiento es nulo en los países industrializados y es notable en los países en desarrollo. En estos últimos hay una doble influencia, ya que coincide el incremento de energía con el aumento de población.

Hay, no obstante, una característica común a todos los países: el rápido crecimiento del consumo de electricidad, que se convirtió en la segunda mitad del siglo XX en el vector energético de las más importantes innovaciones tecnológicas –radio, televisión, ordenadores, sistema telefónico global, etc.– (figuras 2 y 3).

Consumo de energía y desarrollo del hombre. El desarrollo del hombre a lo largo de los siglos ha sido posible gracias al aumento de la cantidad de la energía disponible: de las 0,3 toneladas equivalentes de petróleo (TEP) por habitante y año de hace 100.000 años a 8 para el actual habitante de los países industrializados.

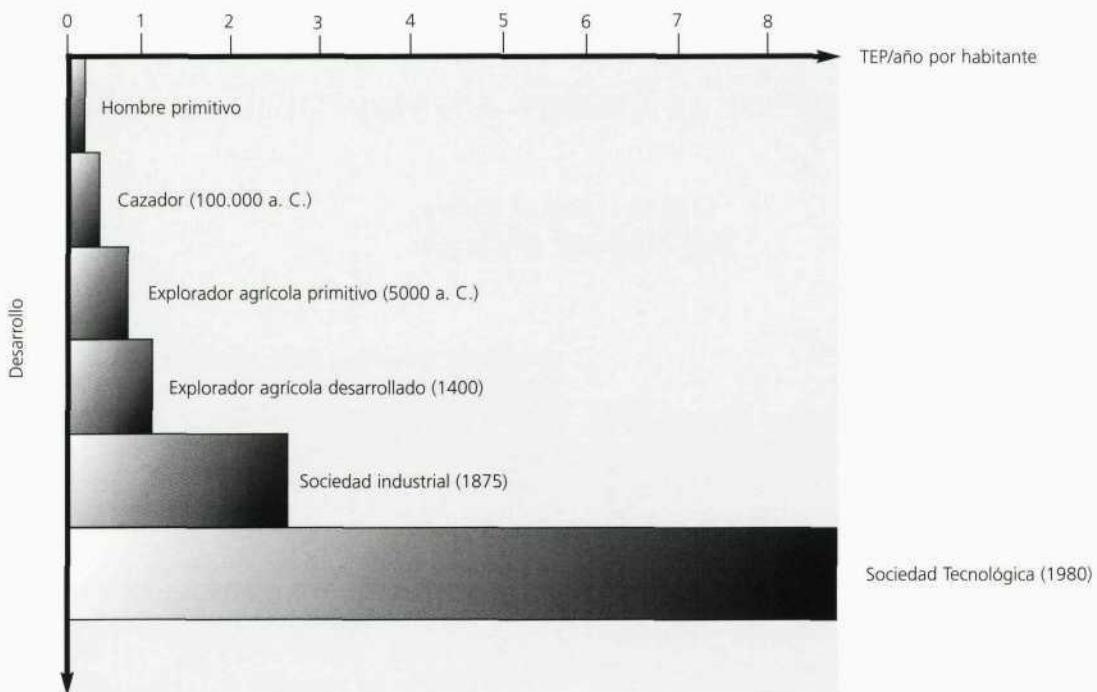


Fig. 1

Los suministros energéticos actuales se basan en los combustibles fósiles, y de ellos el petróleo constituye la fuente más importante de producción de energía para el transporte, de forma casi única, y de la industria química de base, además de complementar con el carbón y las energías nuclear e hidráulica la producción de electricidad. Del precio del petróleo depende el precio del resto de los combustibles, incluido el gas natural, que en los últimos años ha experimentado un espectacular aumento de sus redes de distribución.

A comienzos de los años setenta, a la vista del consumo de recursos naturales, que en lo que iba de siglo habían sido empleados en cantidad comparable a toda la consumida anteriormente, comenzó la preocupación en muchos ámbitos sobre el mantenimiento de ese ritmo. Una de las primeras indicaciones vino, en 1972, del Club de Roma que, demasiado prudentemente, propuso un crecimiento cero, que era evidentemente incompatible con el crecimiento demográfico.

La primera cuestión a aclarar es la de los recursos. ¿Existen suficientes teniendo en cuenta el ritmo actual de consumo? Las reservas comerciales comprobadas de combustibles fósiles a finales de 1996 se exponen en la tabla I, en la que asimismo aparecen las producciones respectivas de combustibles sólidos, petróleo y gas natural. El con-

sumo y las reservas mayores corresponden a la gama de combustibles sólidos. El petróleo y el gas natural tienen reservas comparables.

Tabla I. Reservas mundiales de energías fósiles

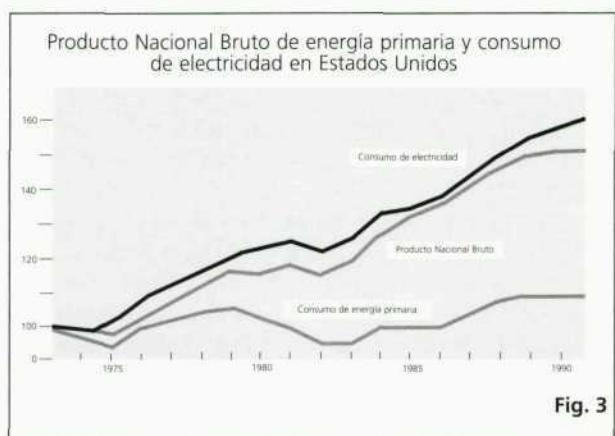
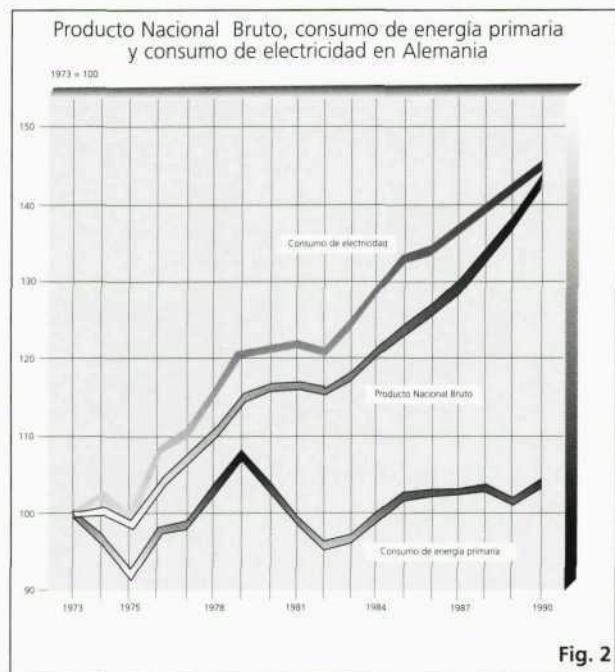
	Reservas probadas	Producción	Años de vida *
Combustibles fósiles	1.032 G ton	4.607 M ton	224
Petróleo	141 Gtep	3.362 Mtep	42
Gas	141 T m³	2.231 G m³	62

T: Tera (10^{12}); G: Giga (10^9); M: Mega (10^6).
Tep ton. Equiv. Petróleo.

* Ratio Reservas/Producción.

(Fuente: B. P. Statistical Review).

Es evidente que en todos los casos hay reservas no comerciales hoy, explotables a costes superiores o con tecnologías mejoradas, que permiten afirmar que las duraciones de las reservas dadas en la tabla I son muy conservadoras y que las cifras reales pueden bien ser muy superiores. En todo caso, puede decirse que, salvo hallazgos de grandes nuevos yacimientos de petróleo y gas natural o de tecnologías de explotación muy superiores a las actuales, los problemas de suministro podrían aparecer en el siglo XXII, mientras que las reservas de carbón y otros combustibles sólidos pueden durar probablemente más de cinco siglos.



Panorama semejante ofrecen los combustibles nucleares, como puede comprobarse en las tablas II y III, que muestran las reservas de uranio y torio, respectivamente, con la salvedad en el caso del torio de no incluir ni la antigua Unión Soviética, ni los países de su órbita en el este de Europa. Si se tiene en cuenta además que la presencia de torio en la litosfera es del orden de 3 o 4 veces la de uranio, parece razonable suponer que las reservas de torio han de ser superiores a las de uranio. Es de destacar también la gran diferencia –un factor de 50– entre el empleo de uranio en reactores térmicos de agua y su utilización en reactores reproductores.

Tabla II. Reservas mundiales de uranio (1997)		
Recursos razonablemente seguros (<130 \$/kgU)	2,34 M ton	
Recursos conocidos (<130 \$/kgU)	3,419 M ton	
En reactores de agua ligera actuales: 1 ton U = 10.000 tep: 57,59 G tep		
En reactores reproductores: 1 ton U = 500.000 tep: 2.870 G tep		

Tabla III. Reservas mundiales de torio (excepto Unión Soviética, China y Europa oriental)			
	Recursos razonablemente seguros*	Recursos conocidos*	Total
Europa			
Finlandia		60	60
Groenlandia	54	32	86
Noruega	132	132	264
Turquía	380	500	880
Total:	566	724	1.290
América			
Argentina	1		1
Brasil	606	700	1.306
Canadá	45	128	173
EE. UU.	137	295	432
Uruguay	1	2	3
Total:	790	1.125	1.915
África			
Rep. de Sudáfrica	18		115
Egipto	15	280	295
Kenia			.8
Liberia	1		1
Madagascar	2	20	22
Malawi		9	9
Nigeria			29
Total	36	309	479
Asia			
Corea	6		22
India	319		319
Irán		30	30
Malasia	18		18
Sri Lanka			4
Tailandia			10
Total:	343	30	403
Australia	19		19
TOTAL:	1.754	2.188	4.106

* Datos en miles de toneladas.

Quedan finalmente las fuentes energéticas más utilizadas desde la más remota antigüedad: las energías renovables. Es preciso distinguir, no obstante, entre la potencia teóricamente utilizable en todas y cada una y la fracción utilizable con las tecnologías actuales, tal como se indica en la tabla IV.

Tabla IV. Energías renovables		
	Potencia, TW*	Útil
Solar	112.000	25
Ciclo hidrológico	39.000	3
Eólica	2.500 (?)	3
Mareas	1	0,01
Olas	30-50 kw/m	—
Térmica (océanos)	10	—
Térmica (Tierra)	1	—
Biomasa	1,5	0,65

*1 TW año = 2 Gtep

Para una mejor interpretación de las tablas precedentes, conviene indicar que el consumo anual global de todas las fuentes energéticas es del orden de 10 Gtep; o su equivalente, 5 TW/año.

CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE FUENTES DE ENERGÍA

Las fuentes de energía tienen directa o indirectamente un origen nuclear. Los combustibles nucleares se produjeron al formarse la Tierra como residuos, según parece, de la formación del Sistema Solar. Los combustibles fósiles son el resultado de la conversión de la materia orgánica creada a expensas de la energía recibida del Sol. La energía geotérmica se produce a partir del calor de desintegración radiactiva de los combustibles nucleares presentes en la litosfera. El resto de las energías proceden del Sol. Los movimientos de la atmósfera, el ciclo del agua, la biomasa, las mareas y la energía de las olas generan las llamadas energías renovables. Y el Sol es un gigantesco reactor de fusión nuclear.

La característica cuantitativa más importante en cuanto a su utilización es la concentración específica de cada tipo. Las energías renovables son diluidas. Las energías basadas en la combustión son ya bastante concentradas y, con una gran diferencia, de varios órdenes de magnitud, la de mayor concentración es la nuclear.

Estas diferencias se traducen en el consumo de combustible para una producción dada de energía. Así, la tabla V indica la energía necesaria para disponer de una potencia de 1.000 MW, según las distintas fuentes de abastecimiento:

Tabla V. Comparación en consumo o necesidades de diversas fuentes energéticas

Central de 1.000 MW		
*Solar fotovoltaica	40 km ²	
*Eólica	200 unidades de 500 kW	
Carbón	5 millones de toneladas/año	
Lignito	8 "	
Fuel oil	2,5 "	
Nuclear	35 toneladas uranio enriquecido	

* Se supone un funcionamiento continuo.

También relacionada con la concentración de cada fuente está la superficie específica necesaria, representada con sus márgenes de variación en la figura 4. Evidentemente, a la hora de establecer comparaciones también es preciso tener en cuenta las horas de funcionamiento útiles y la vida de la instalaciones, aspectos según los cuales la mayor parte de las energías renovables tienen una clara desventaja respecto a los combustibles fósiles y nucleares. Así, las instalaciones eólicas raramente sobrepasan los 2.500 horas anuales de utilización y las solares no suelen llegar a las 3.500. Y, en cuanto a la vida útil, las centrales térmicas y nucleares exceden los 40 años de funcionamiento, mientras que no se espera que las centrales eólicas y solares pasen de los 20 o 25 años, si bien estas cifras deben considerarse con un cierto grado de incertidumbre en todos los casos.

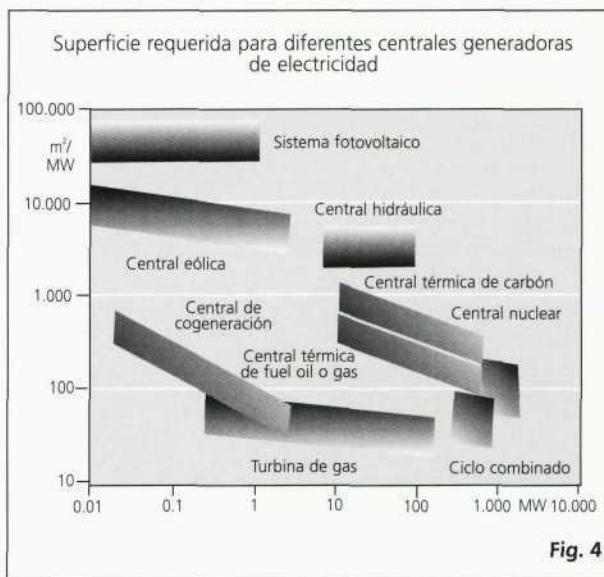


Fig. 4

IMPACTO AMBIENTAL. EMISIONES, VERTIDOS Y RESIDUOS

La preocupación por el ambiente se hizo patente en el ámbito internacional en la Conferencia de Ottawa en 1987, donde se adoptó la primera decisión internacional de prohibición de compuestos enviados a la atmósfera —los clorofluocarburos— ante sus efectos previsibles sobre la capa de ozono.

La otra gran preocupación ambiental —el efecto invernadero y el posible cambio climático— ha conducido también a otro acuerdo internacional en la Conferencia de Kioto de 1997, cuyas decisiones, aún no concluidas de manera definitiva en la de Buenos Aires (1998), limitan las emisiones de dióxido de carbono, si bien la no inclusión de los países en desarrollo y algunos otros defectos están retrasando la aplicación efectiva de los acuerdos.

Las emisiones de dióxido de carbono se producen en la combustión de todos los carburantes que contienen este elemento. Así ocurre de manera directa con los combustibles sólidos (carbones, lignitos y biomasa), petróleo y sus derivados, y gas natural. Indirectamente, el resto de las fuentes energéticas emiten CO₂ en la fabricación de los componentes de los sistemas e instalaciones de generación, y en la producción y transformación de otros combustibles, como los nucleares, en el caso de que la energía para la fabricación o producción hubiera sido generada a partir de combustibles que lo emiten.

La tabla VI pormenoriza los efectos ambientales de todas las fuentes energéticas incluyendo los del ciclo del combustible correspondiente. Comprende los combustibles fósiles, los nucleares, las energías renovables y un apartado especial para la producción de electricidad. Puede observarse que todas las fuentes de energía tienen un cierto efecto sobre el ambiente, en mayor o menor grado dependiendo de su energía específica y de las emisiones, vertidos y residuos que originan.

TABLA VI. Principales efectos ambientales de las fuentes de energía

Fuente	Aire	Aguas	Tierra y suelos	Naturaleza	Riesgos	Otros residuos (salud, ruido, impactos visuales, etc.)
Carbón	CO ₂ , SO ₂	Aguas de drenaje de minas. Aguas de lavado y tratamiento.	Cambio de uso, sumersión del suelo, alteración del terreno.	Alteración del ecosistema, diques de estériles.	Laborales	Ruidos, emisión de polvos, impacto visual de pilas y escorias.
Petróleo	H ₂ S, SO ₂ , CO ₂ , NH ₃ , CH ₄ . Partículas, trazas de metales	Escapes y vertidos	Oleoductos	Escapes y vertidos. Alteración por oleoductos.	Escapes, explosiones e incendios.	Olores, escapes, impacto visual de depósitos y oleoductos.
Gas	CH ₄ e hidrocarburos	Líquidos residuales	Gasoductos	Escapes, alteración por oleoductos.	Escapes, explosiones e incendios.	Olores, escapes, impacto visual de depósitos y oleoductos.
Uranio	Polvo radiactivo Rádon. Radisótopos en concentraciones bajas. Calor residual	Radisótopos en concentraciones bajas. Calor residual	Residuos radiactivos		Accidentes con dispersión de radiactividad	Combustible gastado
Combustibles fósiles	Efecto invernadero	Calor residual	Residuos de combustión	Microclima	Accidentes	Efectos visuales de torres de refrigeración y líneas de transporte
Hidráulica	Microclima	Cambio de fluvial a lacustre. Impide migración de peces	Inundación irreversible	Alteración de ecosistemas. Microclima	Ruptura de presa	Impacto visual, usos lúdicos y agrícolas
Varias: biomasa, eólica, solar, etc.	Combustión de biomasa. Contaminación en geotermia	Contaminación en geotermia	Uso del suelo en solar, eólica y biomasa	Cambios en ecosistemas	Laborales	Ruido y aves en eólica. Impacto visual en eólica y solar. Residuos en clausura de fotovoltaica

Por lo que concierne a las emisiones gaseosas, la de CO₂ es particularmente importante. En la figura 5 se presentan los valores mínimo y máximo de las emisiones de la cadena completa de diversas fuentes energéticas. Puede comprobarse la gran diferencia entre los combustibles y las energías renovables y nuclear que no emiten directamente CO₂. En los combustibles, su valor depende de la relación intrínseca de carbono a hidrógeno, que es mayor para el carbón y mínima para el gas.

Las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno tienen orígenes diversos, pero en todos los casos las cantidades mayores emitidas por unidad de energía corresponden al carbón. Es de destacar que el gas natural y la madera no emiten óxidos de azufre y que las centrales nucleares no emiten prácticamente ninguno de estos gases, según se indica en la figura 6.

Los vertidos líquidos, salvo en accidentes, tienen un menor impacto que las emisiones a la atmósfera o crean menores problemas que los residuos sólidos. El petróleo y sus derivados, la geotermia y las centrales nucleares pueden presentar alguna contaminación apreciable en dichos casos.

Los residuos sólidos son importantes en el caso de los combustibles sólidos y especialmente en el caso de los nu-

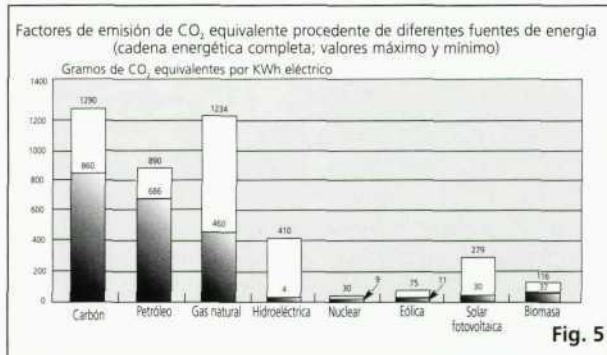
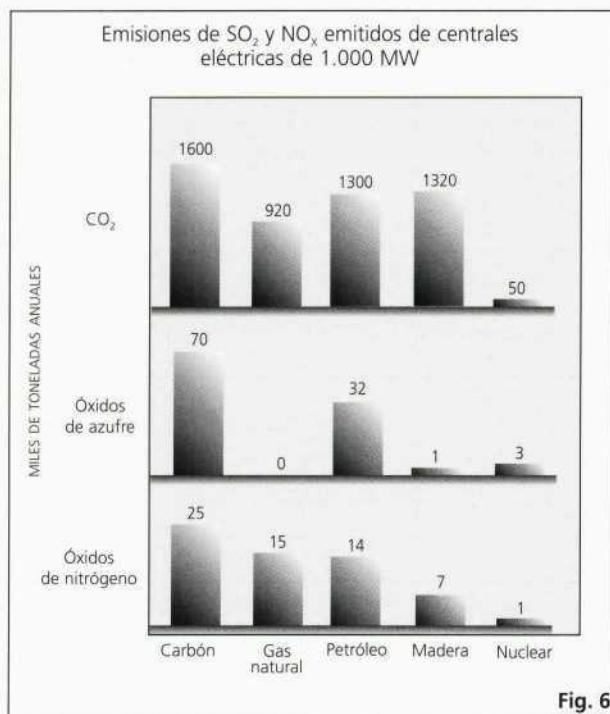


Fig. 5

cleares. El alto contenido en cenizas de los carbones de baja calidad se traduce en una elevada formación de escorias y cenizas volantes en las centrales térmicas. Como productos naturales, los residuos de los combustibles sólidos contienen una gran variedad de elementos, algunos de los cuales son radiactivos.

Por su interés actual se dedicará a los residuos radiactivos una mayor atención. Conviene recordar que los residuos de bajo nivel no plantean problemas muy diferentes a los de otros residuos tóxicos. Incluso desde el punto de vista del tiempo de almacenamiento, han de ser mantenidos



fuera del contacto con la biosfera un tiempo menor –250 años–, en vez de para siempre, y en todo caso sin adoptar precauciones excepcionales.

Otro aspecto bastante diferente presentan los residuos de alta radiactividad. Su origen son los elementos combustibles después de ser irradiados en el reactor, bien como tales, bien después del reproceso, mediante el cual se separan uranio y plutonio de los productos de fisión, que constituyen más del 99 % de la radiactividad total. El gran número de radisótropos formados y la larga vida de algunos de ellos obliga a mantenerlos separados de la biosfera durante un tiempo que puede alcanzar los 100.000 años.

Al principio del desarrollo de la energía nuclear no se constató la importancia de estos residuos. Más tarde se propusieron diversas soluciones, resumidas en la tabla VII, de las cuales las más próxima a su realización práctica es el almacenamiento en formaciones geológicas profundas, tal como se indica en la figura 7, donde se esquematizan las soluciones suecas a los almacenamientos de residuos de bajo nivel y temporal del combustible gastado en las centrales nucleares del país, así como del futuro almacenamiento definitivo del combustible gastado.

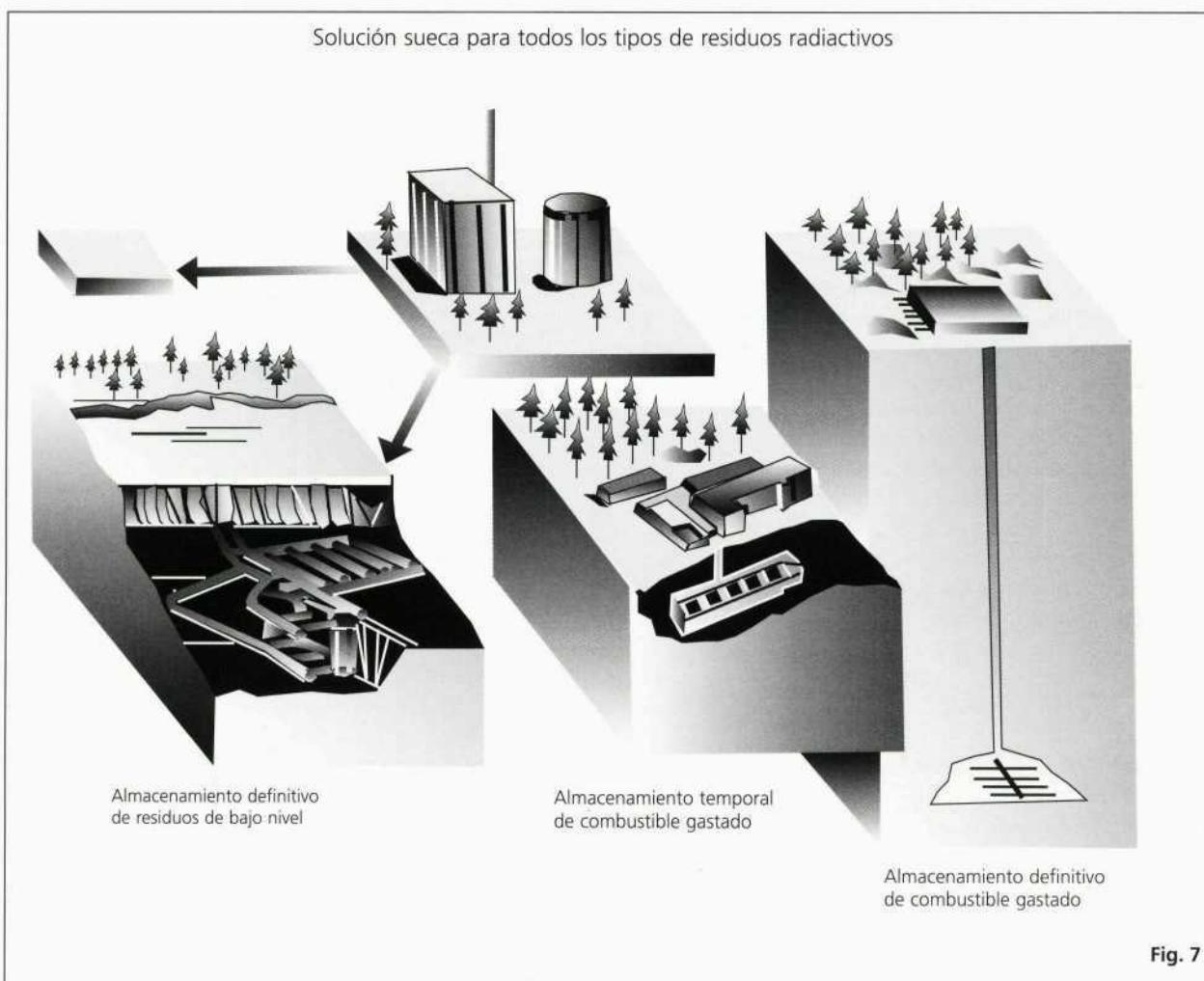


Tabla VII. Almacenamiento o evacuación de residuos radiactivos

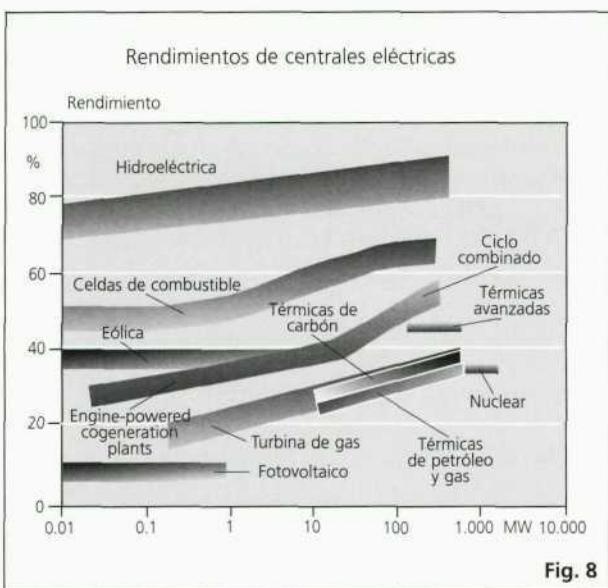
1. TRANSMUTACIÓN.
2. ENVÍO AL ESPACIO EXTERIOR.
3. INTRODUCCIÓN EN EL HIELO DE LA ANTÁRTIDA.
4. COLOCACIÓN SOBRE FONDOS MARINOS.
5. INTRODUCCIÓN EN EL SUBSUELO MARINO.
6. ALMACENAMIENTO E INSTALACIONES DE SUPERFICIE.
7. ALMACENAMIENTO EN FORMACIONES GEOLÓGICAS PROFUNDAS.

LA SOCIEDAD Y SUS PREOCUPACIONES.**OPINIÓN PÚBLICA. DEMOGRAFÍA.****PAÍSES DESARROLLADOS Y EN DESARROLLO**

La energía no figura entre las preocupaciones más destacadas de la sociedad actual, una vez pasados los efectos de la crisis producida por la drástica subida del precio del crudo en 1973.

Los problemas sociales y del ambiente y sus repercusiones sobre los usos de la energía son, por el contrario, temas importantes para la opinión pública. Las mejoras de la eficiencia energética, en otras palabras, el ahorro desde el punto de vista de la conservación de recursos, el impacto ambiental, los riesgos, la contaminación, los residuos y, evidentemente, los costes son objeto de una mayor atención.

La tendencia a evitar el despilfarro energético debe ser un esfuerzo continuado, sobre todo en la industria, en el transporte y en la producción de electricidad, que constituyen los mayores consumidores. Especialmente en las dos últimas facetas hay un gran margen de posibilidades, ya que todos los sistemas que pasan por la etapa de calor –combustibles fósiles, centrales nucleares, biomasa, motores de combustión, turbinas de gas– y algunos de energías renovables tienen hoy por hoy rendimientos bajos, aparte de las limitaciones termodinámicas que conllevan los primeros. En la figura 8 se ponen de manifiesto estas características.



En cuanto al impacto sobre el ambiente conviene destacar los dos aspectos diferentes del funcionamiento de las instalaciones energéticas. Se han visto anteriormente los impactos ambientales derivados del funcionamiento normal de las diversas fuentes energéticas. Sin embargo, en muchos casos un accidente de una fuente impresiona a la opinión pública más que las consecuencias a largo plazo del funcionamiento de otra. Esto está relacionado con mecanismos psicológicos que en nada se corresponden con los riesgos reales de los diversos tipos de instalaciones.

El concepto de riesgo como resultado del producto de la probabilidad del accidente por las consecuencias de éste no suele coincidir con el manejado por el público, que concede mucha más importancia a las posibles consecuencias que a la probabilidad.

Así se constata en la figura 9 en que se relaciona la producción eléctrica, tomando como referencia el gigawatio-año, con el número de muertes por accidente.

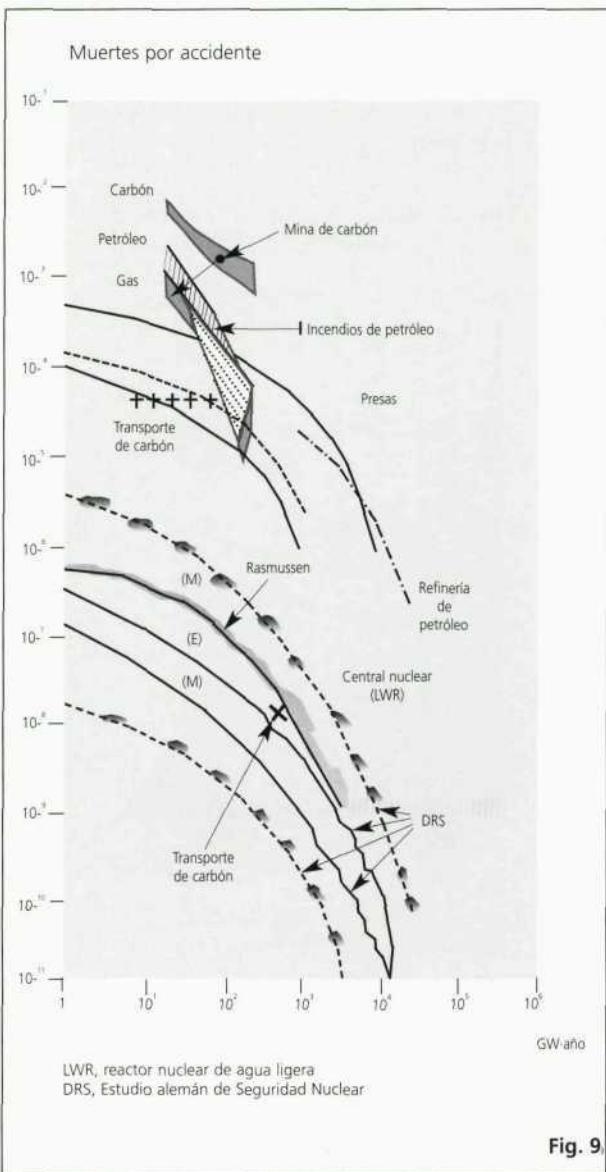


Fig. 9

Excepto por la rotura de presas, las energías renovables ofrecen menos riesgos que los combustibles fósiles; asimismo cabe señalar la baja probabilidad de accidentes de las centrales nucleares, bastante inferior a la de las centrales térmicas teniendo en cuenta el ciclo entero del combustible.

En cuanto a costes, las energías renovables aún no pueden competir con las energías fósiles o nucleares, no sólo en España, sino también en el resto de la Unión Europea y en muchos otros países. No obstante, todos los países impulsan su desarrollo para propiciar una disminución de costes y aumentar su participación en el balance energético. Así, en España, además de las subvenciones para su instalación, las empresas eléctricas tienen obligación de adquirir la electricidad que se produzca con ellas y además con primas que se suman por kWh. Estas primas van desde 60 pesetas por kWh, en el caso de las instalaciones fotovoltaicas pequeñas, hasta las de 3,70 pesetas por kWh y valores intermedios de 5,26 para la eólica, 5,45 para la minihidráulica y 5,07 para la biomasa en el de las incineradoras de residuos urbanos.

El progreso en la reducción de costes de las energías renovables ha sido grande en los últimos años, como se demuestra en la figura 10.

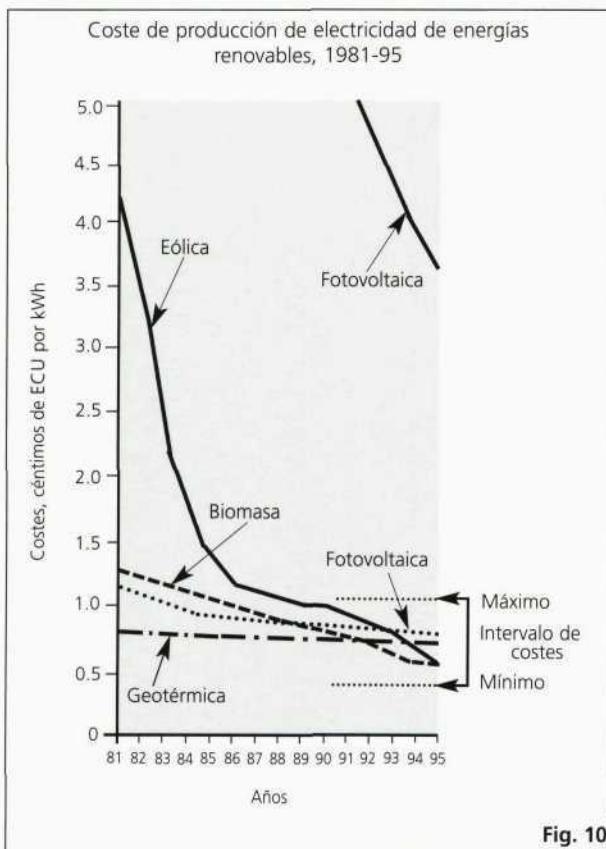


Fig. 10

Aunque la energía nuclear es considerada por muchos benigna en cuanto a su impacto ambiental y la mejor solución a gran escala para reducir el efecto invernadero y, en conse-

cuencia, la posibilidad del cambio climático, la opinión pública se inquieta por el problema de los residuos radiactivos, por la responsabilidad hacia las generaciones futuras y por las dificultades para garantizar la seguridad física y para evitar con garantía su escape o difusión hasta la biosfera.

Los expertos partidarios del almacenamiento a profundidad suficiente en una formación geológica estable y de propiedades mineralógicas que actúen de barrera para los radioisótopos involucrados opinan que hay suficientes argumentos para justificar que estas cuestiones han sido resueltas por la Naturaleza en forma de análogos naturales y que, de forma parcial, existen precedentes, en cuanto a la duración del almacenamiento, del comportamiento de los materiales, de las estructuras y de las instituciones, como se indica en la tabla VIII.

Tabla VIII. Algunos hechos históricos

Fenómenos naturales		
Oklo, Gabón	Reactor nuclear natural	2.000 millones de años
Gigar Lake, Canadá	Yacimiento de uranio	5.500 millones de años
Siberia	Mamuts en glaciares	Varios millones de años
Varios	Ámbar (resina fósil)	Id.
Materiales		
Vidrios	Oriente medio y Egipto	4.000-4.500 millones de años
Cerámica	Varios países	≥ 2.000 años
Bronce	Mar, Tierra	500-1.000 años
Estructuras		
Pirámides	Egipto, Mesoamérica y México	≥ 3.000 años 700-1.500 años
Edificios	Italia, Francia, España (Coliseo, foros, acueductos, etc.)	1.500-2.000 años
Caminos	Calzadas romanas	Id.
Iglesias y catedrales		600-800 años
Instituciones		
Universidades		700 años
Estados		500 años
Holanda	Diques	siglos

Es de destacar el hecho de que varios reactores nucleares funcionaron durante casi medio millón de años hace dos millones de años en África (Gabón) y dejaron sus residuos radiactivos en las inmediaciones del yacimiento de uranio que actuó de base para los reactores. Evidentemente, no quedan actualmente los productos de fisión formados, pero sí se han identificado sus descendientes a escasa distancia del uranio empobrecido en uranio-235 remanente en las zonas del yacimiento.

No obstante estas certezas, las investigaciones se dirigen hacia métodos para reducir el tiempo y la toxicidad de los residuos radiactivos mediante transmutación o fisión de los radioisótopos de período más largo o de mayor radiotoxicidad, lo que se aplica a ciertos productos de fisión y a los transuránicos formados.

Esto sólo puede lograrse con flujos elevados de neutrones, lo que no puede conseguirse satisfactoriamente con los reactores actuales. Solamente los reactores rápidos ofrecen alguna posibilidad. La combinación de acelerador y reactor subcrítico puede teóricamente dar lugar a un flujo suficiente para fisionar los transuránidos y transmutar los productos de fisión.

Desgraciadamente, cualquiera de estos métodos requiere el reprocesso de los combustibles gastados, lo que plantea nuevamente el problema de la proliferación nuclear, resuelto por el Tratado de No Proliferación, firmado por la mayor parte de los países del mundo.

Las ideas actuales se basan en que los radisótopos responsables del elevado período de almacenamiento y de la radiotoxicidad de los residuos radiactivos de alto nivel son sólo una fracción muy baja del total. El esquema más simplificado sería, inicialmente, la separación de productos de fisión, uranio y transuránicos.

En los productos de fisión, una vez recuperados cesio-137 y estroncio-90, se procedería a la transmutación

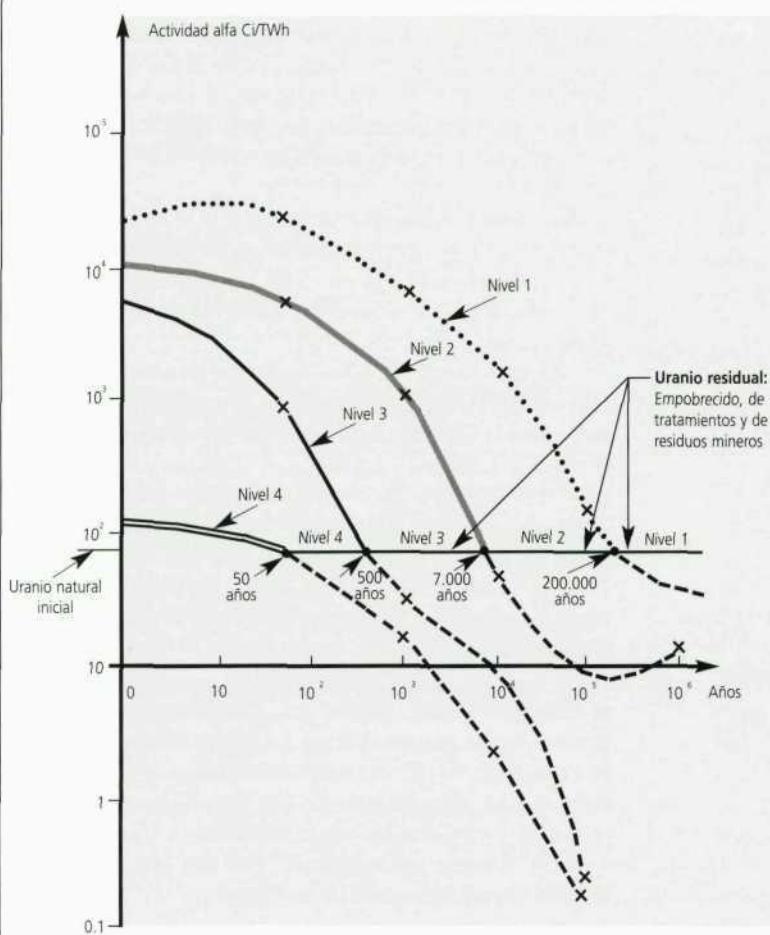
de los radisótopos de vida más larga: entre otros tecnecio-99 (período $2,1 \times 10^5$ años), en rutenio-100 (estable), y yodo-129 ($1,6 \times 10^7$ años), en xenón-130 (estable).

En los transuránicos, eminentemente emisores alfa, sería necesario separar plutonio, americio y curio e incinerarlos en reactores especiales.

Con ello se reduciría el período de almacenamiento a un tiempo comparable al de los residuos de bajo nivel, es decir, unos 250 años, como se indica en la figura 11. No obstante, sería necesario su almacenamiento en mejores condiciones y con requerimientos mayores, por su mayor toxicidad y por su mayor emisión de calor.

A pesar de todas estas ideas sobre la energía, no hay preocupación por el abastecimiento energético. Hay todo tipo de soluciones para ello. Unas más realistas que otras. Unos confían en el mercado, otros en las aportaciones de la ciencia y la tecnología, otros en remedios casi irreales. Pero entre ellas raramente aparece la consideración del fu-

Evolución de la actividad alfa de los residuos de alta radiactividad tras la separación de plutonio, americio y curio



Nivel 1: Almacenamiento directo.
 Nivel 2: Reproceso y reciclado de plutonio.
 Nivel 3: Separación e incineración de americio.
 Nivel 4: Separación e incineración de curio.

Fig. 11

turo, ni se tiene en cuenta las grandes diferencias entre los países industrializados y los países en desarrollo.

La primera consideración que hay que valorar es el aumento de la población mundial, que ha pasado de los 900 millones en el año 1800 a los 1.600 en 1900 y a unos 5.800 en 2000, lo que significa que el consumo de energía debe aumentar para que los que se incorporan a la sociedad tengan el mismo nivel de vida que los que ahora la formamos.

Aspecto tan importante como el aumento demográfico es su distribución, ya que tal crecimiento se produce con mayor intensidad en los países en desarrollo. A este factor hay que agregar el desigual consumo de energía entre los países en desarrollo y los países industriales. La suma de ambos efectos en los países del Tercer Mundo crea un problema de difícil remedio que solamente podrá ser resuelto si los países desarrollados abordan con generosidad y comprensión la ayuda necesaria.

La cuestión planteada se entiende mejor si consideramos la distribución por zonas geográficas de la población mundial y los consumos energéticos, en toneladas equivalentes de petróleo por habitante, de dichas zonas en el año 1990. Conviene tener en cuenta dos cuestiones: por un lado, la gran diferencia de consumos entre Europa, Japón y América del Norte y el resto del mundo; por otro, que el consumo del resto del mundo, especialmente de África, presenta un valor semejante al de la Humanidad primitiva o, en todo caso, que los 3/5 de la población mundial está en niveles de consumo energético semejantes a los de la Edad Media. O dicho de otra forma, que 1/3 de la Humanidad consume los 2/3 de la energía, mientras que el resto no tiene acceso a las fuentes comerciales, por lo que continúan viviendo con el mismo estilo de vida que sus remotos antepasados, aunque conozcan que en otras partes del mundo se dispone de un nivel de bienestar para ellos inalcanzable.

No es difícil prever los posibles efectos de esta situación, que por ahora sólo se manifiesta en un aumento de la emigración hacia los países desarrollados.

EL FUTURO PREVISIBLE

En la actualidad, la forma de hacer frente a la demanda de energía es muy diversa, ya que depende de un sinúmero de variables, algunas de ellas cuantificables, otras varían según la situación y el estado de la opinión pública, el nivel de vida, los recursos propios y muchas otras.

En muchos países, la disponibilidad depende de la situación económica y del nivel de precios de los combustibles en el mercado mundial. En países pobres en recursos energéticos, como España, que han de importar prácticamente la totalidad del petróleo y del gas natural y parte del carbón, el nivel de la balanza energética depende del precio de los crudos de petróleo. En muchos de estos países, la producción de electricidad por vía nuclear ha reducido el impacto de las variaciones del precio, y

aunque ahora no sea el caso ha dado cierta independencia y seguridad a este sistema energético.

Lo mismo ha ocurrido con las interconexiones de las líneas eléctricas de alta tensión y con la construcción de oleoductos y gasoductos.

No obstante, la situación general es que continúa la dependencia de los combustibles fósiles en todo el mundo y de éstos más la energía nuclear en la mayoría de los países industrializados y en algunos países en desarrollo.

Además, la tendencia global es hacia el aumento del consumo energético, tanto por el aumento de población como por el incremento del grado de bienestar y sobre todo por la necesidad de reducir las diferencias entre los países ricos y pobres.

Es evidente que se atenuaría el problema disminuyendo el consumo, bien por ahorro, bien por un cambio radical en las formas actuales de vida. Ambas soluciones son más ideales que prácticas. El ahorro tiene un límite. El cambio de forma de vida conlleva modificaciones de comportamiento difíciles o imposibles de obtener en una sociedad democrática.

Por otra parte, la preocupación por el ambiente y los recursos tiende a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, de los cuales las generaciones de este siglo han hecho un uso masivo, que si bien ha contribuido grandemente al bienestar actual, también ha hecho que en un muy breve tiempo de la historia desaparezcan riquezas que la Naturaleza tardó millones de años en crear.

El reciente acuerdo de Kioto sobre la reducción de emisiones de CO₂ por parte de los países industrializados complica aún más las soluciones posibles porque la sustitución del carbón por el gas natural sólo resuelve parcialmente el problema.

Tampoco lo hace la pretensión de que sean las energías renovables las que sustituyan a los combustibles fósiles, sobre todo si, al mismo tiempo, se dice que la energía nuclear debe dejarse de utilizar, como ocurre ahora en Suecia y en Alemania. Por el momento y dadas las tendencias de crecimiento de las grandes ciudades, más incluso en los países en desarrollo que en los desarrollados, y las grandes concentraciones industriales, es difícil pensar que las energías eólica o solar puedan responder a sus grandes demandas energéticas.

No cabe duda de que las energías renovables cumplen la gran función de aportar una energía limpia y no contaminante, pero, por ahora, su participación en satisfacer la demanda es relativamente escasa a pesar de todos los esfuerzos de investigación y desarrollo, y de las subvenciones y primas con que se favorece su difusión y utilización. En España con una aportación del 6% se toma como objetivo duplicarla en la próxima década.

Con un esfuerzo continuado de todo tipo, la conservación de los recursos fósiles que aún quedan sería todavía posible si la sustitución por las energías renovables y nuclear permitiera combatir el efecto invernadero hasta que

se pudieran utilizar como fuentes quasi-inagotables la energía solar y la energía nuclear de fusión, ambas, por diferentes motivos, aún no comerciales.

La energía solar podría asimismo resolver las necesidades de combustible para transporte a través de la producción de alcoholes, hidrógeno, hidrocarburos o ésteres de ácidos grasos, y la energía nuclear de fusión, inicialmente con deuterio y tritio, pero después con otros combustibles de segunda o tercera generación que no generarían residuos radiactivos, daría a la Humanidad la electricidad necesaria para sus futuros desarrollos.

Evidentemente, todo ello requiere confianza en que la ciencia y la tecnología sigan aportando soluciones a los problemas que siempre han aparecido a lo largo de la historia. Algunas, como la superconductividad o la fusión están aún en los albores de la utilización práctica, lo mismo que ocurre con la energía fotovoltaica en cuanto a rendimiento y coste, pero, excepto en casos contados, el proceso de la investigación es lento. Otras, como el almacenamiento de la energía, requerirán mucho más tiempo.

La solución a la pregunta formulada en el título de la conferencia «De la madera y el Sol al átomo: ¿un viaje de ida y vuelta?», ha quedado de manifiesto a lo largo de la presentación. La flecha del tiempo es irreversible. Los recursos existen y son suficientes. Su utilización dependerá de la sabiduría y los conocimientos de los hombres.

BIBLIOGRAFÍA

- *Annual Review Energy Environment* (1993, 1994, 1995, 1996).
- *Le Développement Durable*, Stratégies de l'OCDE pour le XXI^e siècle, OCDE, París, 1997.
- *Energía'98*, Foro Nuclear, Madrid, 1998.
- GUTIÉRREZ JODRA, L., *La ciencia ante el siglo XXI*, Fundación Areces, Madrid, 1995.
- GUTIÉRREZ JODRA, L., *En torno a la energía*, Real Academia de Ciencias, Madrid, 1997.
- *Industrial Ecology And Global Change*, Cambridge University Press, 1994.
- *The Link between Energy and Human Activity*, International Energy Agency, París, 1997.