

La importancia de la energía nuclear en todo el mundo para la generación de electricidad aumenta continuamente ante las preocupaciones ambientales con respecto a la contaminación del aire y las emisiones de gases en relación con el aumento global de la temperatura. Arriba se muestra una parte de la central nuclear de Takahama, en el Japón, donde las centrales nucleares generan aproximadamente una cuarta parte del total de la electricidad. A la izquierda, un técnico inspecciona visualmente las soldaduras en las agujas de combustible del reactor reproductor rápido Superphénix, en Francia, donde la energía nuclear genera aproximadamente el 70% del total de electricidad. (Fotos: Yoshida para el OIEA; CEA, Francia).

# Etapa de transición de los sistemas energéticos conforme a las condiciones ambientales y del suministro

*El problema no radica en los recursos energéticos, sino en los productos de desechos energéticos*

por W. Häfele

El debate que se desarrolla actualmente sobre el futuro suministro energético se caracteriza por una considerable compartimentación y notables contradicciones. En este trabajo sólo nos referiremos someramente a las diversas posiciones conflictivas, los problemas y las afirmaciones mutuamente exclusivas, que reflejan básicamente la compleja naturaleza de los sistemas energéticos y sus múltiples interacciones, así como al hecho de que mientras que algunos observadores conceden importancia a determinados aspectos, descuidan otros que posiblemente merezcan igual atención. En todos los casos será preciso conocer la relación entre los diversos aspectos, especialmente en la esfera de la política energética.

### Argumentos y puntos de vista

Quizás resulte provechoso establecer una comparación entre las posiciones típicas y las controversias que tienen lugar en la actual escena energética. Por ejemplo, existe la demanda de un mayor uso del carbón, lo que es lógico para los países con yacimientos de carbón económicamente atractivos. Los Estados Unidos, la Unión Soviética y China tienen a su disposición enormes yacimientos de carbón. La Unión Soviética, por ejemplo, está desarrollando en la región siberiana de Kansk-Achinsk, en Krasnoyarsk, un gigantesco yacimiento de carbón con un contenido energético tan grande como las reservas de petróleo del Golfo Pérsico. Hoy se producen allí, 40 millones de toneladas anuales de carbón y se prevé aumentar la producción anual a 1000 millones de toneladas (10<sup>9</sup>). Tal nivel de producción afectará también la infraestructura asociada, incluida la construcción de grandes ciudades. De forma análoga pueden considerarse las posibilidades de suministro de China. Incluso en la República Federal de Alemania, se experimenta la necesidad del carbón, aunque las condiciones para incrementar su uso no son tan favorables como en otros países industrializados. Con todo, cualquier decisión que se tome respecto del carbón se verá drásticamente

afectada por el problema del dióxido de carbono. Me refiero a la amenaza de sobrecargar la atmósfera terrestre con dióxido de carbono, producto de la combustión del carbón. El problema del dióxido de carbono es la base de un argumento que aconseja la adopción de una estrategia contra el uso del carbón.

Otro grupo exige que se abandone de inmediato la energía nuclear. Al parecer, consideran que la energía nuclear no desempeña aún un papel económico importante, pero no hay indicios de cuál debería ser la alternativa. El argumento contrapuesto señala que, incluso hoy día, la energía nuclear constituye una parte considerable de la producción de electricidad y que no existe ningún sustituto a corto plazo.

Desde un tercer punto de vista, a veces se afirma con desenfado que la energía nuclear sólo es una solución de transición. De ser así, cabe preguntar cuál es el objetivo final de esa transición. Para dar una respuesta, hay que tener presente que en la práctica sólo hay tres fuentes energéticas inagotables libres de carbono, a saber, la energía nuclear basada en los reactores reproductores rápidos, el uso en gran escala de la energía solar, y la energía nuclear basada en la fusión. Esas son las principales posibilidades de cualquier estrategia a largo plazo. Hasta el momento, la única realidad técnica es el reactor reproductor. En el estado actual de la investigación para el desarrollo resulta imposible prever cuándo podrá hacerse realidad el uso comercialmente competitivo y en gran escala de la energía solar y la fusión.

La posición de un cuarto grupo parece ser especialmente extrema, ya que ve en la conservación la clave para la solución de todos los problemas energéticos y desea satisfacer las restantes necesidades energéticas sólo con las denominadas "fuentes sustitutivas de energía". Estas fuentes abarcan opciones tales como el uso local de energía solar y el uso de fuentes renovables de energía del medio natural, como el viento, el agua y la biomasa. Asimismo, se hace especial hincapié en la descentralización de las fuentes de suministro energético. Por supuesto, hay que comprender que la conservación siempre ha sido una ley económica y, por tanto, el objetivo principal de toda tecnología energética. Aunque en el mejor de los casos cabría esperar que la conservación puede facilitar la solución de los problemas energéticos, no es la solución ideal. Hay argumentos racionales que también se oponen a las expectativas exageradas en cuanto a las posibilidades de las fuentes renovables de energía.

---

El Prof. Häfele es Director de la Kernforschungsanlage (KFA) Jülich de la República Federal de Alemania. El presente artículo ha sido adaptado, con la debida autorización, de un trabajo que el autor presentó el 14 de septiembre de 1988, en la Conferencia de la VGB sobre Centrales Energéticas celebrada en Dortmund. El texto completo (en alemán) ha sido publicado en VGB Kraftwerkstechnik, Mitteilungen der VGB Technische Vereinigung der Grosskraftwerkbetreiber e. V., Jahrgang 68, Heft 11/88, S. 1098-1097.

En la práctica, estas fuentes son bastante limitadas, salvo por lo que respecta al uso en gran escala de la energía solar en zonas áridas.

### Consumo mundial de energía

En este panorama lleno de contradicciones, ¿cuáles son los aspectos fundamentales que hay que recordar al tratar de lograr una perspectiva para formular estrategias orientadas a objetivos? El análisis de los datos reales sobre el suministro energético y sus tendencias de desarrollo permite establecer algunos límites prácticos. En este contexto, resultará muy útil una unidad básica de energía, el teravatios-año (TWA). Un TWA (o  $10^9$  kilovatios años) equivale a 1000 millones de toneladas de carbón; la OPEP produjo y vendió aproximadamente 1 TWA de petróleo en 1987, y la mina de tajo abierto de lignito situada en Hambach, en las inmediaciones de Jülich, deberá producir alrededor de 1 TWA en los próximos 50 años.

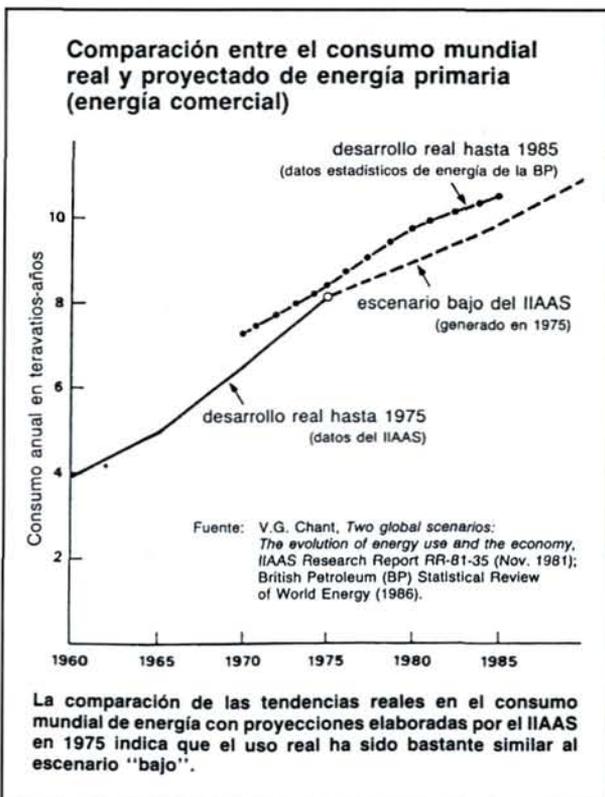
En 1985, el consumo mundial de energía primaria ascendió a unos 10 TWA, y en la República Federal de Alemania a 358 gigavatios-año. La cifra mundial aumentaría ligeramente con la contribución de la energía no comercial, fundamentalmente el uso de leña y desechos orgánicos para producir energía en las regiones pobres del planeta. El Comité de Conservación de la Conferencia Mundial de la Energía calcula que la contribución de la energía no comercial asciende a 1,1 TWA anual. Tomando como base una población mundial de 5000 millones de habitantes en 1985, el consumo medio anual de energía por persona sería de algo más de 2 kilovatios-año. No obstante, el consumo per cápita anual real está distribuido de manera bastante desigual

entre la población mundial. En la República Federal de Alemania asciende a 6 kilovatios-año; en América del Norte alcanza valores de aproximadamente 11 kilovatios-año. Sin embargo, más del 40% de la población mundial tiene que arreglárselas con 0,3 kilovatios-año anuales de energía comercial.

Un aspecto del problema del suministro energético es sin duda el constante crecimiento de la población mundial. Es posible pronosticar con bastante exactitud para un futuro previsible la distribución por edades y las tasas de natalidad y mortalidad de la población viva actualmente. En el año 2030 la población mundial será de unos 8000 millones de habitantes. Utilizando esta cifra y un consumo medio per cápita anual de 2 kilovatios-año, se puede calcular que para el año 2030 el uso anual de energía será de 16 TWA. Esta cifra debe considerarse el límite inferior. Si se suponen niveles de uso de energía que equiparen el nivel de vida de los países en desarrollo con el de Europa occidental, las variantes que se obtienen permiten delinear un intervalo de predicciones de una y media veces a cuatro veces el consumo de energía mundial actual, según las hipótesis que se formulan en relación con el uso per cápita.

### Escenarios relacionados con la energía

Esas predicciones se pueden mejorar considerando otras variables de consumo de energía, es decir, numerosos factores técnicos, económicos y sociales. Para ello habrá que incluir hipótesis adicionales, no aleatorias, pero de tal índole que los resultados sean compatibles con los diversos escenarios sociales y técnicos supuestos. Este proceso recibe la denominación técnica de "elaboración de escenarios". Los escenarios no son predicciones, sino diseños de futuros, orientaciones y perspectivas posibles desde el punto de vista actual sobre la base del mayor conocimiento y comprensión posibles y de una amplia perspectiva. La elaboración de un escenario energético algo ambicioso exige ingentes esfuerzos, ya que las interacciones entre los sistemas energéticos abarcan desde las circunstancias económicas de los diversos sectores hasta lo profundo de las características especiales de la estructura de la sociedad y sus normas de vida. Como parte de un extenso estudio en materia de energía realizado en el Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas (IIAAS) ubicado en Laxenburg, cerca de Viena, durante el decenio de 1970, se elaboraron dos escenarios mundiales de energía para el período 1975-2030, con una variante baja y una variante alta como continuación teórica del desarrollo real hasta el año 2030. Han transcurrido más de 10 años y se ha comprobado que el consumo de energía del escenario "bajo" del IIAAS representa al menos una aproximación inferior válida de los datos acumulados desde entonces. (Véase el gráfico adjunto.) También existen algunas proyecciones más recientes, entre ellas las del Instituto Mundial del Petróleo de Nueva York y la Conferencia Mundial de la Energía, que se aproximan bastante a las proyecciones del escenario "bajo" del IIAAS. Así pues, en este sentido el escenario "bajo" puede brindar una orientación bastante útil en cuanto a las perspectivas del suministro y la evacuación de desechos en el futuro.



**Suministro potencial de combustibles fósiles**

La cuestión del suministro potencial de combustibles fósiles, especialmente a largo plazo, debe examinarse de manera exhaustiva. No basta con meras listas de las reservas de energía descubiertas y estimadas para caracterizar la situación de los recursos, ya que las ocurrencias naturales varían en calidad. Por ejemplo, el tipo y concentración de materias primas, el rendimiento de un yacimiento y la infraestructura de su uso son factores que afectan el uso económico potencial de un recurso. Revisten interés inmediato para la economía energética los suministros que se pueden utilizar o producir conforme a los criterios técnicos y económicos vigentes. Estos suministros se denominan reservas si su existencia se ha confirmado con certeza o ya han sido explotados. Se pueden obtener reservas nuevas como resultado de nuevos descubrimientos, pero también mediante el redespigüe de recursos menos económicos. Pese a que por lo general en la esfera de los suministros energéticos el énfasis recae en las reservas actualmente disponibles, hoy por hoy éstas representan sólo un porcentaje muy pequeño de los suministros reales o estimados de energía fósil.

En el 12° Congreso Mundial del Petróleo, celebrado en abril de 1987 en Houston, Estados Unidos, C.D. Masters presentó una evaluación reciente de las reservas y los recursos de hidrocarburos líquidos y gaseosos. (Véase el cuadro adjunto.) En esta representación se establece una diferencia entre los recursos económicos y los que aún no lo son. El petróleo y el gas convencionales se muestran como reservas confirmadas y como reservas probables. Entre los recursos no convencionales se incluyen los aceites viscosos y el alquitrán, el betún natural y las arenas de alquitrán, así como la pizarra petrolífera. Se dan como ejemplos representativos la zona del Orinoco en Venezuela, las arenas de alquitrán de Athabasca en el Canadá y las pizarras petrolíferas de Colorado, en los Estados Unidos. Difieren de los recursos petrolíferos convencionales que son de calidad mucho más baja, contienen grandes cantidades de material de desecho y tóxico, y sólo se pueden utilizar directamente después de un costoso proceso técnico de elaboración. Sin dudas, habrá que vencer varias complicaciones técnicas, económicas y ecológicas para que los recursos energéticos que hoy se consideran de poco valor lleguen a utilizarse alguna vez en gran escala. No obstante, el análisis de las cantidades relativas pone de manifiesto que aun cuando se agoten las reservas actualmente disponibles, ello no significará en modo alguno que se dejen de utilizar los combustibles fósiles. Por el contrario, la práctica de la industria energética de crear nuevas reservas mejorando recursos desfavorables e invirtiendo nuevo capital, indica tendencias propicias para una transición gradual hacia el uso de recursos de energía fósil no convencional.

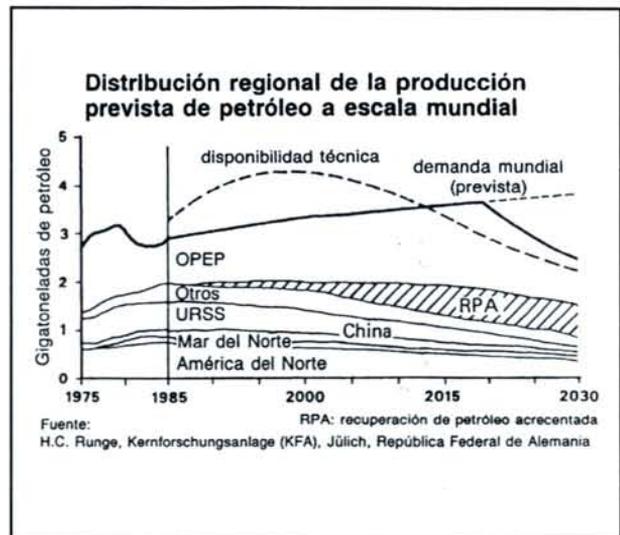
En la Kernforschungsanlage (KFA) Jülich, se han investigado en detalle las condiciones económicas y tecnológicas para tal transición, así como, en particular, la cuestión de cómo lograr esa transición con el tiempo. En general, cabe afirmar que la creciente demanda mundial de hidrocarburos líquidos se podría atender de manera muy satisfactoria hasta poco antes del año 2000 con petróleo producido convencionalmente. No obstante, en

**Reservas y recursos mundiales de petróleo/gas y energía no convencional**

	Convencional		No convencional	
	Petróleo (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	Gas (10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	Petróleo pesado, aceite de pizarra, betún natural (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	
Producción acumulativa	83,3	33,2	5,5	} económica
Reservas descubiertas	126,5	110,7	10,0	
Aún no descubiertas	86,1	119,0	—	
Recursos descubiertos	—	—	656,7	} aún no económica
Aún no descubiertos	—	—	1700,1	
<b>Total</b>	<b>296</b>	<b>263</b>	<b>2372</b>	
Todavía disponible	≈ 500 teravatios-años		≈ 3000 teravatios-años	

Fuente: C.D. Masters, 12° Congreso Mundial del Petróleo, Houston, Estados Unidos, 1987

ese proceso cabe esperar un cambio en la distribución regional de la producción mundial de petróleo, ya que la capacidad de producción limitada o las posibilidades de producción cada vez menores de algunas regiones deberán compensarse con creces elevando la producción en otras zonas. En este sentido, irá en aumento la importancia de los ricos yacimientos del Golfo Pérsico. Como es natural, este cambio entraña también deficiencias en lo que respecta a la seguridad del suministro, lo que a su vez exigirá que se tomen precauciones oportunas en cuanto al diseño de la estrategia y la tecnología energéticas. En el escenario básico de la KFA se incluye un mejoramiento continuo de la eficiencia de la producción que puede lograrse mediante adelantos tecnológicos; por ejemplo, la recuperación de petróleo acrecentada. Alrededor del 2010, no se podrá satisfacer la demanda mundial de hidrocarburos líquidos con petróleo convencional, de modo que en los años inmediatamente posteriores se tendrán que desarrollar cada



vez más las fuentes no convencionales. Considerando la situación de estrangulamiento que se avecina, después de aproximadamente el año 2000, es posible esperar medidas sustitutivas incluso más tempranas. (*Véase el gráfico adjunto.*) Estas fechas no deben considerarse definitivas, sino más bien una expresión cuantitativa de una situación cualitativa. La evolución descrita podría muy bien comenzar cinco años antes o después.

Una cuestión cualitativamente similar es el aumento con el tiempo de la demanda y la producción de gas convencional. El momento a partir del cual la producción no podrá satisfacer la creciente demanda, y mostrará una tendencia decreciente, deberá de producirse algo después que en el caso del petróleo, quizás alrededor del año 2020, debido a las particularidades del mercado del gas y a la situación de sus reservas. Por supuesto, las mismas advertencias hechas en el caso del petróleo se aplican a estas fechas.

### Transición a nuevas condiciones

Sobre la base de estas fechas, podemos llegar a la conclusión de que el actual período de uso intensivo de yacimientos de hidrocarburos naturales de alta calidad a bajos costos de desarrollo probablemente llegue a su fin en el período 2010-2030. También puede afirmarse con seguridad que la necesidad de hidrocarburos de alta calidad podrá satisfacerse mucho después de esta fecha recurriendo a numerosas fuentes disponibles que hoy se consideran de poco valor. El sistema energético está en una etapa de transición hacia nuevas condiciones.

Para responder a los nuevos criterios de utilización y evaluación de los recursos, deberán considerarse interacciones tecnológicas, económicas y geopolíticas muy diferentes, lo cual es evidente no sólo en el caso del suministro, sino también de la evacuación de desechos. Aunque todavía estamos acostumbrados a quemar combustibles relativamente limpios y de alta calidad, ya estamos empleando técnicas de control de emisiones, por ejemplo, durante la limpieza de gases de chimenea en las centrales energéticas, para mantener dentro de sus límites la contaminación ambiental. Con todo, la creciente demanda de energía y la transición hacia el uso de combustibles de calidad inferior entrañan un aumento cuantitativo de los desechos. Esto sucede en especial con la cantidad de dióxido de carbono que se libera durante el uso de los combustibles fósiles. Según el escenario "bajo" del IIAAS, hacia el año 2030 el consumo acumulativo de combustibles fósiles aumentará a 633 TWa. Parte de esta energía, unos 400 TWa, se deriva de la combustión del carbono aglutinado químicamente en el petróleo y el gas. La cantidad de dióxido de carbono resultante de este proceso es equiparable al contenido natural de dióxido de carbono en la atmósfera. Dicho de otro modo, el uso de 633 TWa de combustible fósil hace que casi se duplique el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera. Durante algún tiempo ha habido razones para esperar que tal duplicación produzca un aumento en la temperatura media de la Tierra de alrededor de 3 grados celsius, con una incertidumbre de más o menos 1,5 grados. En los polos, este aumento de temperatura sería considerablemente mayor, de modo que el derretimiento en gran escala del hielo continental en el Ártico y Groenlandia elevaría en

metros el nivel del mar. Pocas veces se menciona como un síntoma inicial el aumento marcado de la variabilidad climática. Sin embargo, en ocasiones han expresado algunos meteorólogos el parecer de que las anomalías climáticas registradas durante este decenio pueden interpretarse como las primeras señales de una sobrecarga crítica de la atmósfera.

### Niveles de dióxido de carbono

El efecto de "invernadero" del dióxido de carbono se debe físicamente a una mayor absorción atmosférica de la radiación infrarroja. El proceso geofísico abarca varios mecanismos de causa, efecto y retroacción que dificultan sobremedida el tratamiento exhaustivo de los fenómenos, en un sentido estrictamente científico. Por tanto, la duplicación del contenido atmosférico del dióxido de carbono se infirió de manera muy simplificada, a base de los valores de consumo acumulativos del escenario "bajo" del IIAAS. Una parte de la emisión antropogénica de dióxido de carbono presente en la atmósfera, aproximadamente la mitad, es absorbida con bastante rapidez por las capas superiores del océano, es decir, en un período de 10 a 20 años. Por otra parte, el efecto potencial de invernadero del dióxido de carbono restante aumenta considerablemente con los gases vestigiales (incluidos los fluorocarburos clorados, el metano y el gas hilarante).

El efecto de amortiguación de las capas superiores del océano se ve limitado por las constantes de tiempo de permanencia de los procesos de intercambio con el fondo marino. Así, el exceso de dióxido de carbono en la atmósfera sólo puede reducirse lentamente. Según los últimos estudios realizados, habrá que esperar un tiempo de transición de 600 a 900 años para que el dióxido de carbono se precipite en forma de carbonatos abisales, es decir, hacia su depósito final.\* El método actual de evacuación del dióxido de carbono, el principal producto derivado de la utilización del combustible fósil, trae aparejados marcos de tiempo con los que nos hemos familiarizado en la evacuación de desechos nucleares. El alcance de los problemas que se deberán solucionar es algo similar y probablemente no exista una solución ideal que nos libere de todos ellos.

### Conferencia de Toronto

En 1988, en el contexto de una importante conferencia celebrada en Toronto, que inauguró el Primer Ministro del Canadá, el problema del dióxido de carbono fue examinado en profundidad. Reconociendo plenamente la grave situación imperante, los delegados se trazaron varias metas audaces. Se supone que con medidas de obligatorio cumplimiento hacia el año 2005 se logren reducciones de las emisiones de dióxido de carbono, del 10% cada una, tanto por parte de los consumidores como de los productores. En la lista de medidas se incluyen, por supuesto, las mejoras de la eficiencia que durante largo tiempo han sido un problema para el desarrollo tecnológico y que ahora se están llevando a la práctica. También se insta a un mayor uso de gas y

\* Hipótesis: 2 a 3 constantes de tiempo de un intercambio exponencial.

petróleo en lugar de carbón, exhortación que apenas fue escuchada en los años setenta. Entre las medidas también se incluyen el requisito de un mayor uso de energía primaria no fósil, lo que exige un aumento de las llamadas fuentes sustitutivas de energía más apropiadas y un uso más intenso de ellas, así como el examen cauteloso de cualquier reevaluación que se haga sobre el uso de la energía nuclear.

No debemos sobrestimar ni subestimar estas metas. No hay que esforzarse mucho para demostrar que quizás sean inalcanzables. Hay que saber interpretar lo que ellas expresan: la conciencia de que el problema se acrecienta a medida que aumenta el conocimiento de los procesos geofísicos.

Por tanto, la cuestión esta clara. ¿Hasta qué punto las emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera se pueden considerar benignas a largo plazo; benignas en el sentido de que no se vea afectado el equilibrio dinámico de los procesos climáticos? Resulta difícil incluso plantear el problema con precisión. Por ejemplo, ¿qué criterios deben adoptarse para medir la sensibilidad? En el curso de la historia de nuestro planeta se han producido cambios climáticos considerables. Durante mucho tiempo la meteorología ha tratado de hallar una respuesta para este complejo especial de preguntas. Para hacer afirmaciones, que naturalmente tienen que ser condicionales y sólo pueden hacerse de manera aproximada y con reservas, es preciso emplear modelos acoplados de la atmósfera oceánica de gran tamaño y programas de computadora que sólo en fecha muy reciente han podido elaborarse y aplicarse gracias a la capacidad de las actuales supercomputadoras.

La primera respuesta al problema se da en un estudio publicado recientemente por Maier-Reimer y Hasselmann\*, en el que indican que una emisión de dióxido de carbono de un equivalente estequiométrico de 2,5 gigatoneladas de carbono anuales (es decir, 9,2 gigatoneladas de dióxido de carbono anuales durante los próximos 100 años) sólo producirá un ligero aumento en el contenido de dióxido de carbono de la atmósfera. Ahora bien, no se ha considerado el efecto de la biota oceánica. Esta es una aproximación preliminar; se expresa con reservas y debe tomarse con reservas, ya que ciertamente puede cambiar. De cualquier modo, las emisiones actuales duplican esta cantidad. El uso anual de energía comercial en el mundo en 1985, a saber, 10 TWh, produjo emisiones de dióxido de carbono correspondientes a 5,7 gigatoneladas de carbono. En el caso de una mezcla típica de combustible de 1985, se sobrepasarían los 2,5 gigatoneladas de carbono anuales con el uso de 4,3 TWh, o sea, el 43% del consumo real de energía de ese año. Tales límites tendrán que tomarse en cuenta en cualquier debate relativo a la expansión o limitación del uso de combustibles fósiles.

#### Contribución de la energía nuclear

Hablemos ahora de la energía nuclear, en estos momentos nuestra fuente más eficiente de energía no fósil. A principios de 1987 había 165 centrales nucleares

en servicio en países miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), con una capacidad aproximada de 222 gigavatios eléctricos.\* Un hecho significativo es la alta cuota de los Estados Unidos, lo cual también resulta sorprendente porque entre los alemanes se está difundiendo la opinión de que apenas existen centrales nucleares en los Estados Unidos. Los norteamericanos están poniendo en funcionamiento, una a una, centrales nucleares que hacía tiempo se habían planificado o estaban en construcción. Francia sigue también una política de expansión consecuente, y tiene en servicio al menos el 50% de la capacidad de los Estados Unidos. La energía nuclear es una realidad económica considerable incluso aquí, en la República Federal de Alemania, y en otros países. Esto se hace aún más evidente con las contribuciones que la energía nuclear hace a todo el suministro de electricidad, tanto en las principales naciones industriales como a nivel regional y mundial. (Véase el cuadro adjunto.) En 1986 las centrales nucleares aportaron 1515 teravatios-hora eléctricos, es decir, el 15,4%, a la producción global de electricidad de 9849 teravatios-hora eléctricos. A escala mundial, aunque también en comparación con América del Norte, la alta contribución de electricidad de Europa occidental es considerable (30%). Cuando, por cualesquiera razones, se escucha la exhortación a desistir de la energía nuclear, hay que formular una pregunta: ¿con qué sustituirla? Si esta pregunta no recibe respuesta, no es posible aceptar la exhortación.

\* Los países miembros de la OCDE son los siguientes: Alemania (República Federal de), Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, España, Estados Unidos de América, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Japón, Luxemburgo, Noruega, Nueva Zelandia, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza y Turquía, Condición especial: Yugoslavia.

#### Producción de electricidad de centrales nucleares, 1986

	Centrales nucleares (teravatios-horas eléctricos)	Producción total (teravatios-horas eléctricos)	Participación de la energía nuclear (porcentaje)
América del Norte	481	3076	15,6
Europa occidental	597	1967	30,3
Región del Pacífico	166	814	20,5
Europa oriental	198	2134	9,3
Asia	57	962	6,0
América Latina	5,5	509	1,1
África y Oriente Medio	8,8	386	2,3
Total mundial	~ 1515	9849	15,4
Participación de los países miembros de la OCDE en el total mundial	1244	5857	21,2

\* Transport and storage of carbon dioxide in the ocean — an inorganic ocean — circulation carbon cycle model", por E. Maier-Reimer y K. Hasselmann, *Climate Dynamics*, 2, 63-90 (1987).

### Reelaboración y suministro de combustible nuclear

El suministro de combustible nuclear no es un problema, en primer lugar porque hay abundante uranio, y en segundo lugar porque existe el reactor reproductor rápido. Con todo, se afrontan dificultades en la evacuación de desechos nucleares, en particular en la elaboración sistemática de elementos de combustible gastado. La comparación de la producción anual de combustible gastado y la capacidad de reelaboración disponible en el contexto de la OCDE lo demuestra con toda claridad. En 1986, en el ámbito de la OCDE se produjeron 5300 toneladas de combustible gastado, incluidas 35 toneladas de plutonio fisionable que tuvo que ser reciclado. Para el año 2000 cabe esperar una consiguiente producción anual de 8300 toneladas, o 54 toneladas, respectivamente. En 1987 la capacidad de elaboración en explotación en los países miembros de la OCDE fue de 1980 toneladas anuales, y aumentará en unas 2800 toneladas anuales adicionales a 4780 toneladas anuales si todas las unidades que se han planificado y las que están en construcción se ponen realmente en explotación. En el año 2000, en el mejor de los casos, permanecerán sin reelaborar 3520 toneladas de combustible gastado, y en el peor de los casos, 6320 toneladas, lo que equivale a 23 toneladas o 42 toneladas de plutonio, respectivamente. Si se extrapolan estas cifras al año 2030 se obtendrían como resultado varios miles de toneladas de plutonio. Esta cantidad no podría acumularse en forma de combustible gastado, sino que tendría que ser quemada en el reactor porque no podríamos, en modo alguno, dejar a las generaciones posteriores el problema de custodiar constantemente yacimientos de elementos de combustible gastado.

Como hemos visto, la evacuación de productos de la combustión de minerales fósiles también plantea dificultades, aunque de distinto tipo. Por supuesto que es difícil comparar cosas de diferente tipo. No obstante, tendremos que contraponer y sopesar las respectivas ventajas e inconvenientes de diversos aspectos si hemos de juzgar y adoptar decisiones basadas en criterios objetivos. A la luz de tal comparación, conviene analizar las cantidades de evacuación.

En relación con la producción anual de 10 TWh basada puramente en la energía nuclear, los desechos nucleares serían de 4680 toneladas anuales, cantidad razonable y técnicamente posible de evacuar. En comparación, en el caso del suministro de energía exclusivamente fósil, habría emisiones de dióxido de carbono de 21 000 millones ( $10^9$ ) de toneladas anuales, lo que equivaldría a una emisión de 5700 millones de toneladas anuales de carbono en la atmósfera. Por consiguiente, la proporción de corrientes de desechos, de fósiles a nucleares, es de un millón a uno. Es preciso prestar una atención especial a la orientación de las corrientes de desechos nucleares pero, como todos sabemos, esta atención también es pertinente respecto del problema del dióxido de carbono.

### Opciones energéticas

Como hemos visto, los hidrocarburos líquidos y gaseosos se podrían seguir utilizando a largo plazo, pero con limitaciones precisas, quizás hasta una contribución anual de 4 a 5 TWh. No tendremos que dejar de utilizarlos por completo.

Desde la óptica actual, hay tres —y sólo tres— opciones en cuanto al suministro de energía primaria libre de carbono en el orden de capacidades de 10 TWh anuales en adelante. Como se señaló al inicio, estas opciones están representadas por el reactor reproductor rápido, el uso a gran escala de la energía solar y la fusión.

Para una producción de energía primaria libre de carbono en el orden de 1 TWh anual, se pueden considerar fuentes de energía "sustitutiva" como el agua, el viento y la energía solar (de uso local). Su posibilidad de producción equivale al 10% de la energía que se utiliza actualmente en el mundo y, por lo tanto, no son realmente fuentes sustitutivas sino más bien fuentes complementarias de energía. Los cambios registrados en los últimos años en la evaluación de las fuentes renovables de energía han puesto en perspectiva su importancia económica real. La posibilidad de explotarlas en la República Federal de Alemania ha sido investigada en reiteradas ocasiones, y cada vez se ha calculado a un nivel inferior. No es casual que la conservación de la energía se haya planteado como un tema central en los escenarios más pertinentes que se han basado en la energía sustitutiva, no obstante, tiene que ser una característica específica de todo sistema de suministro que utilice fuentes sustitutivas de energía.

El tema de la conservación ha estado influido hasta cierto punto por la exigencia de objetivos de ahorro idealistas, por una parte, y por posibilidades de ahorro realísticamente viables, por la otra. Es obvio que hay que considerar la cuestión de qué constituye un consumo de energía necesario o sensato. Por supuesto, los valores de consumo per cápita anuales de la población mundial oscilan en una amplia escala: entre los 0,6 kilovatios-año en el caso de los más pobres, que tienen que conformarse con el mínimo para su supervivencia (0,3 kilovatios-año de energía comercial más 0,3 kilovatios-año de leña), y los 11 kilovatios-año de los norteamericanos existe un factor de 20.

En el contexto del consumo de energía es preciso reconocer que el efecto del uso de la energía (es decir, el servicio de energía) depende de varios factores de producción: la inversión de capital, la mano de obra, los conocimientos y las habilidades. Estos factores son parcialmente intercambiables; es decir, se puede lograr el mismo producto en formas muy diferentes mediante una combinación correcta de los factores respectivos. Se puede lograr el mismo servicio de energía con un insumo de energía considerablemente menor si la cantidad de capital, mano de obra y pericia tecnológica se aumenta en consecuencia. Este hecho no suele gozar de un reconocimiento general. Cuando hablamos hoy de una tecnología energética eficiente, o de las posibilidades de conservación, con frecuencia nos referimos a la sustitución de energía por capital. La necesidad de capital y la cuestión de aplicar un capital limitado en la forma más apropiada por lo general pierden importancia. Por tanto, las cifras sobre posibilidades de conservación de energía no son una cuestión meramente física y técnica, sino una cuestión de interacción entre tecnología, economía y sociedad. El tema tan debatido de las necesidades de energía debe entenderse en el mismo contexto.

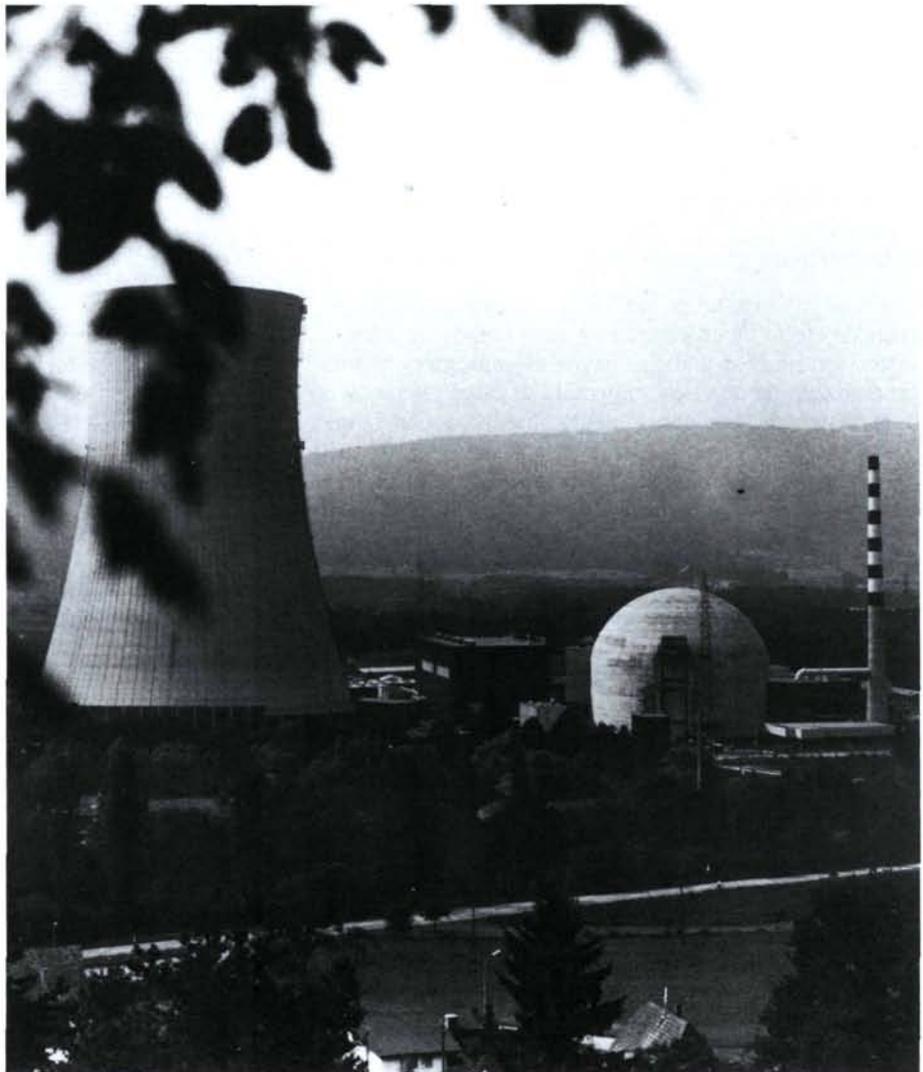
### Asignación de prioridades

¿Cuáles son las orientaciones y perspectivas correctas para vencer la compartimentación y las contradicciones? ¿Consisten en la suma de los diversos aspectos? Probablemente el conjunto sea mayor que la suma de las partes. Para ello es preciso asignar prioridades, lo cual viene dado en diversos horizontes de tiempo. La tecnología energética actual tiene como tarea más urgente la reducción de las emisiones que contaminan el ambiente, en particular mediante la reducción de la emisión de óxidos de nitrógeno y de dióxido de azufre. El surgimiento del dióxido de carbono aparece por debajo de un horizonte de tiempo de 50 años. La acumulación de concentraciones críticas de dióxido de carbono en la atmósfera coincide con el límite de tiempo del suministro de petróleo y gas convencionales. No hemos mencionado el desarrollo tecnológico de los sistemas de energía de bajo contenido de carbono y benignos desde el punto de vista ambiental que necesitarán de 100 a 140 años para desarrollarse y requerirán estrategias de transición orientadas a objetivos. Estas estrategias consisten básicamente en la introducción del hidrógeno como portador de energía secundaria, así como de electricidad, en tanto que la energía primaria que se suministre tendrá que ser principalmente exenta de

carbono. El suministro de combustibles fósiles no convencionales debe durar al menos 250 años.

La reducción de las emisiones de dióxido de carbono previstas tendrá lugar en un período de aproximadamente 50 años. La reducción del contenido de dióxido de carbono antropogénico, mediante el acoplamiento de las capas superiores del océano con los fondos marinos (el repositorio final del dióxido de carbono atmosférico) corresponde al horizonte de tiempo de 500 a 1000 años, plazo conocido en el caso de los tiempos de desintegración típicos de los desechos radiactivos. Los horizontes de tiempo para el suministro basado en los reactores reproductores o en la fusión deben ser de unos 15 000 años, y en el caso de la energía solar, de miles de millones de años. En estas condiciones, vemos que el problema principal no es el de los recursos, como pensábamos en el decenio de 1970, sino más bien el urgente problema de la evacuación de los productos de combustibles fósiles.

Considero que este panorama, aunque dramático, indica vías que permiten superar la compartimentación y las contradicciones. Debemos tener presentes estas vías si deseamos regresar a una evaluación sensata de las relaciones en la esfera de la energía que permita la adopción de medidas racionales y responsables.



Central nuclear de Gösgen, Suiza.  
(Foto: Siemens)