

Los sistemas energéticos

por el Prof. Wolf Häfele

1. INTRODUCCION

Hasta hoy, la producción, el transporte y la distribución de la energía se han venido considerando en general como problemas separados; lo más que se ha hecho es estudiarlos a nivel de subsistemas o sistemas de segundo orden. En la actualidad, la escala de utilización de la energía está aumentando con gran rapidez, con la consecuencia de que la sociedad depende cada vez más de la energía. Este fuerte aumento cuantitativo surte su influjo sobre casi todos los aspectos de naturaleza cualitativa de la utilización de la energía. Recursos,

El Profesor Häfele es Director del Institut für Angewandte Systemtechnik und Reaktorphysik del Kernforschungszentrum Karlsruhe (Rep. Fed. de Alemania). Dirige también el Proyecto de Sistemas Energéticos en el Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas (IIAAS) de Laxenburg (Austria) y es miembro del Comité Consultivo Científico del Organismo. El artículo del Prof. Häfele se ha seleccionado para publicarlo en el Boletín, porque se trata de un estudio singularmente completo del problema de la energía desde el punto de vista del análisis de sistemas. El OIEA colabora con el grupo del Prof. Häfele en el IIAAS en el estudio de los sistemas energéticos.*

* Instituto de Análisis Aplicado de Sistemas y Física de Reactores del Centro de Investigaciones Nucleares de Karlsruhe.

reservas, fiabilidad y medio ambiente son algunos de los términos clave que podrían caracterizar el cambio que se está operando en la naturaleza del problema de la utilización de la energía. La energía no puede considerarse ya como problema técnico y económico aislado, sino que se ha enraizado en la ecosfera y en el complejo sociedad-tecnología. Hay que dedicar a las limitaciones y restricciones correspondientes la misma atención que a los problemas técnicos tradicionales, pongamos por caso una turbina de vapor, de donde resulta un alto grado de interconexión. Además, resulta tanto más patente la finalidad de surtir energía, a saber, hacer posible la supervivencia de un mundo civilizado y densamente poblado en un planeta de dimensiones finitas. Como consecuencia del citado grado de interconexión y de finitud, se cree que la energía debe considerarse como un sistema y, por este motivo, se emplea la expresión "sistemas energéticos". La producción de la energía no es más que uno de los componentes de este sistema; tienen importancia análoga la forma de operar con la energía y la integración de ésta en el complejo físico y social del mundo por lo que se refiere a la ecología, la economía, los riesgos y los recursos.

El abordamiento del problema energético como "sistema" requiere una explicación más profunda. Con el presente trabajo se pretende esbozar los problemas fundamentales, y se confía en que con ello, se pueda interpretar mejor el nutrido coro de voces, contradictorias algunas, que se alzan sobre el tema de la energía. La confusión empieza ya con la expresión "crisis energética". ¿Existe o no una crisis energética? Será preciso laborar aún mucho en el futuro para atacar los problemas que plantean los sistemas energéticos. El presente trabajo sólo puede contribuir accesoriamente al fin perseguido, pero se espera que ayude a comprender el alcance del problema.

2. LAS FASES DEL PROBLEMA ENERGETICO

Es muy importante percatarse de que el problema energético parece presentarse en fases cronológicas, en cada una de las cuales sus características de detalle serán muy distintas e incluso de carácter opuesto.

Conviene distinguir las tres fases siguientes:

- primera fase a corto plazo, 1970 - 1985
- segunda fase a plazo medio, 1980 - 1995
- tercera fase a largo plazo, 1990 - 2050 (?)

Las fechas que se indican son solamente aproximadas; las fases coinciden parcialmente en el tiempo y no están definidas con tal precisión. A continuación se dan algunas explicaciones que pueden caracterizar estas tres fases y justificar quizá su elección (véase la Fig.1).

Fig.1 Las fases del problema energético

A corto plazo 1970-1985	A plazo medio 1980-1995	A largo plazo 1990-2050 (?)	Posteriormente
Precios de la energía	Nuevas tecnologías para la utilización del carbón	Reactores reproductores rápidos	Además
Importación de petróleo	Reactores de agua ligere en gran escala	Hidrógeno	?Utilización en gran escala de la energía solar?
Garantía de suministro	Reactores de alta temperatura refrigerados con gas	Transporte de energía en gran escala	
Ahorro de energía	Oleoductos	Reactores de alta temperatura refrigerados con gas	
Inversión de capital	Plataformas flotantes	Compleos nucleares	
Elección de emplazamientos	Calefacción de locales mediante, la energía solar	Optimación de la integración de energía	
	Prospección	Sistemas de vigilancia a escala mundial	
	Control en gran escala de la contaminación		

2.a) Primera fase (1970 - 1985)

En la primera fase del problema energético se producirán determinadas situaciones de escasez y cambios en el mercado de los combustibles, sobre todo en el del petróleo y el gas natural. Si bien las innovaciones tecnológicas podrán servir de ayuda para adaptarse a esta situación, ello requerirá cierto tiempo, probablemente de diez a quince años. Y es

precisamente este intervalo de tiempo el que determina la duración de la primera fase del problema energético, ya que durante la misma sólo podremos servirnos de los elementos tecnológicos y económicos que hoy existen.

El problema más evidente de esta primera fase reside en el **suministro de petróleo y gas natural**, sobre todo en los Estados Unidos. Piénsese, por ejemplo, en el problema de la prospección del petróleo. Según M.K. Hubbert [1], la cantidad de petróleo descubierta por pie de perforación en los Estados Unidos ha disminuido fuertemente desde 1938 y en la actualidad es tan sólo de 35 barriles/pie. Hubbert supone además que los descubrimientos efectuados hasta 1965 representan aproximadamente el 82% del total definitivo que puede esperarse. Por lo que respecta al gas natural, la situación es cualitativamente semejante, pero el caso del carbón es distinto, porque son otros los factores que impiden su fácil empleo [2]. No existen grandes esperanzas de poder descubrir con facilidad nuevos recursos de petróleo o de gas, y tal descubrimiento supondría inversiones de capital inusitadamente elevadas.

Por tanto, **economizar energía** será el tema que prevalecerá en los próximos años. Se prestará incesante atención a la elevación de los rendimientos en la conversión de energía, a la reducción del despilfarro, a un aislamiento térmico más eficiente en oficinas y viviendas, y a otras medidas. Será preciso reconsiderar entonces las previsiones actuales de la demanda de energía a la luz de las nuevas economías. Tal será el caso de los Estados Unidos particularmente [3], donde se pasará de una situación de plétora a la necesidad de ahorrar energía. El cambio será *menos drástico en otros países, pero no dejará de producirse.*

El ahorro puede sólo mitigar, pero no resolver, el problema de la escasez de petróleo y de gas. Durante la fase a corto plazo del problema energético, a los Estados Unidos no les queda otra opción sino **importar** las cantidades necesarias de petróleo del Oriente Medio, donde se encuentra aproximadamente el 50% de todos los recursos petroleros, sin contar la Unión Soviética y China. Ahora bien, no hay que olvidar que el Japón y Europa occidental importan del Oriente Medio alrededor del 80% y el 60%, respectivamente, del petróleo que consumen. Walter Levy [4, 5], por ejemplo, trata en detalle las implicaciones de estos hechos.

Aumentará la fracción que corresponde a la **energía nuclear** en la producción de energía eléctrica, pero este aumento tendrá un límite, porque el tiempo necesario para la construcción de una central nucleoelectrica, es cada vez más largo. En Estados Unidos es frecuente un plazo de ocho a nueve años. Además, hay que tener presente que la energía eléctrica supone solamente el 25% de la demanda de energía primaria y sólo el 10% de la demanda de energía secundaria. Es decir que, en esta primera fase, la energía de origen nuclear tendrá una influencia menor que lo anteriormente previsto — aunque importante — sobre el problema energético global.

Existe una copiosa **reglamentación** relativa a la utilización de la energía: importaciones, impuestos, tipos, etc. En gran parte se ha llegado a ella partiendo de un punto de vista fragmentario. Se han efectuado optimaciones parciales cuando el problema de la energía no constituía todavía un problema global. Ejemplo de ello son las cuotas de importación de petróleo en los Estados Unidos. En la República Federal de Alemania, por ejemplo, no se ha comenzado hasta ahora a elaborar un plan general para ocuparse de la energía en conjunto. Además, se van añadiendo a ritmo creciente normas reglamentarias encaminadas a la protección del medio ambiente. Hasta cierto punto, ha sido la energía nucleoelectrica la que ha despertado la conciencia de los problemas ambientales.

Por supuesto se entiende que la energía nucleoelectrica no ha representado en este sentido *más que una función piloto, ya que los problemas del medio son de carácter mucho más general.* Sin embargo, las complicaciones con que se tropieza en la concesión de autoriza-

ciones para las centrales nucleares, debido a la intervención de los grupos interesados por el medio ambiente, agravan el problema de un suministro suficiente de energía eléctrica. De modo parecido, las reglamentaciones rigurosas aplicables a la emisión de contaminantes por los motores de combustión tienden a hacer aumentar el consumo de gasolina. Por lo tanto, es probable que haya que reconsiderar las reglamentaciones partiendo de un punto de vista más amplio como es el de los sistemas.

Algunos observadores son del sentir de que en el momento actual se ha producido una reacción exagerada ante los problemas ambientales. Un punto particularmente delicado es el emplazamiento de las grandes instalaciones industriales como centrales eléctricas, terminales petroleras en alta mar, refinerías y líneas de transporte de alta tensión. Se espera que en los próximos diez años se llegue a un cierto **equilibrio entre las exigencias de la protección del medio ambiente y las de la economía**. La consecución de un equilibrio razonable en este sentido probablemente sea una nota característica de la fase a corto plazo del problema energético.

Los **precios de la energía** llegarán asimismo en el próximo decenio a un equilibrio con la economía general. La instalación de nuevas plantas, refinerías, por ejemplo la prospección intensificada de combustibles fósiles que permitan satisfacer las normas de protección del medio, la investigación y el desarrollo de tecnologías energéticas, y otras actividades necesarias tenderán todas al aumento de los precios de la energía. Queda por ver en qué punto se alcanzará el mencionado equilibrio.

En los últimos tiempos se ha publicado mucho en torno a estas cuestiones. Concretamente, en un artículo de S.D. Bechtel [6] se establecen las necesarias distinciones, a las que se alude más adelante.

2.b) Segunda fase (1980 - 1995)

Como ya se ha mencionado, la tecnología puede ayudar a la sociedad a adaptarse a la nueva situación y a las restricciones en materia de energía. El intervalo de tiempo necesario para poner en ejecución las medidas oportunas determina el comienzo de la fase a plazo medio del problema energético, fase en la que se harán sentir las consecuencias de los reajustes tecnológicos. Para tener una idea aproximada de en qué puntos son necesarios estos reajustes, es importante tener presente que el consumo de energía se divide grosso modo en cuatro partes iguales, a saber, un 25% de la energía primaria se consume en hogares y edificios comerciales, un 25% se destina a la industria, un 25% al transporte y el 25% restante a la generación de electricidad. Debido a que los rendimientos de conversión son bajos, este último 25% supone tan sólo el 10% de la demanda global de energía secundaria. La energía nuclear se ha desarrollado casi exclusivamente con vistas a la producción de electricidad. Incluso si las centrales nucleares llegan a constituir la mayoría de las centrales eléctricas (como probablemente sucederá), el problema de disponer de energía suficiente seguirá en pie durante este período, porque no es muy verosímil la viabilidad de una economía basada totalmente en la electricidad. Por ejemplo, parece claro que los aviones no podrán nunca volar por medio de la electricidad. Los combustibles fósiles seguirán desempeñando un papel importante y, por fortuna, existen en gran cantidad en forma de carbón. En el pasado, la extracción de carbón ha permanecido estacionaria o incluso ha disminuido. Ello se debe en gran parte a los actuales métodos de explotación minera, pero también el mayor rigor de las normas y de los reglamentos de seguridad y la ausencia de actividades de investigación y desarrollo han contribuido a las dificultades con que se ha enfrentado la industria del carbón en el último decenio [2]. Por lo tanto, la tecnología a que se ha aludido atacará con toda probabilidad el problema de la utilización del carbón por medios distintos de la minería clásica; los proyectos más obvios son la licuefacción y gasificación del carbón y el transporte del combustible obtenido por

oleoductos [7]. Este procedimiento permite una transición fácil del empleo de gas natural al de un producto sucedáneo del mismo. La gasificación del carbón requiere calor, por lo que interesa evaluar si la energía nucleoelectrónica puede suministrar dicho calor. Esta idea podría activar el desarrollo de los reactores de alta temperatura refrigerados con gas.

También el problema del emplazamiento podría ser objeto de importantes adelantos tecnológicos. Conviene mencionar aquí la idea de fabricar en serie centrales nucleares, montadas sobre plataformas flotantes. La fabricación resultaría más económica y en condiciones rigurosas de control de la calidad, y se aliviarían las dificultades cada vez mayores que plantea la elección de emplazamiento para las centrales nucleares y otras instalaciones técnicas en zonas superpobladas. Sin embargo, hay que prever también otras innovaciones que afectarían al problema general del emplazamiento.

Otra meta de la investigación y el desarrollo tecnológicos podrían ser medidas para hacer disminuir el empleo de los combustibles fósiles. También han de mencionarse las aplicaciones especiales de la energía solar, por ejemplo, para la calefacción de locales en climas templados, como ya se hace en la actualidad.

Pero más trascendental ha de ser el reajuste a fondo de la economía y de las infraestructuras de la sociedad moderna para adaptarlas a la tercera fase, la fase a largo plazo del problema energético. Como los recursos de combustibles fósiles son limitados, a la larga habrá que estar preparados para explotar una o dos de las escasas soluciones que hoy día se ofrecen para el suministro prácticamente infinito de energía, lo cual probablemente requerirá reajustes. Por ejemplo, quizás sea necesario alterar los límites entre la utilización de la energía en forma eléctrica y en forma no eléctrica, o estudiar más explícitamente las relaciones entre la disponibilidad de energía y la disponibilidad de agua. Los reajustes de este orden acarrearán consecuencias de gran trascendencia.

2.c) Tercera fase (1990 - 2050 (?))

Las características principales de la tercera fase (a largo plazo) del problema energético podrían ser las siguientes:

- Se habrán elegido y estudiado a fondo para llegar a su puesta en práctica en gran escala una o dos de las posibles soluciones hoy día existentes para disponer de un suministro prácticamente infinito de energía.
- La demanda mundial de energía habrá aumentado como mínimo por un factor de diez. Los países en desarrollo serán los que registrarán los aumentos más altos en el consumo de energía.
- Se habrán determinado las limitaciones y restricciones que afectan a la utilización de la energía a escala mundial y se habrán desarrollado modalidades para la producción y utilización de la energía compatibles con dichas limitaciones y restricciones.
- La segunda fase del problema energético habrá servido para pasar sin dificultades a esta tercera fase.

Es de notar que las características citadas son más seguras que la fecha concreta de 1995. La predicción de fechas es más susceptible de error que la de las características propiamente dichas.

Más adelante nos extendemos sobre las citadas soluciones para conseguir un suministro prácticamente infinito de energía, así como sobre las limitaciones y restricciones a que estará sujeta la utilización a escala mundial de estas cantidades de energía. Es importante analizar en detalle la fase a largo plazo, porque se espera que la fase a plazo medio constituya una suave transición de la fase a corto plazo a la fase a largo plazo. A este

efecto, se tratarán ahora en mayor detalle aspectos más específicos de los sistemas energéticos, las soluciones energéticas posibles en la actualidad y las limitaciones y restricciones que afectan a la utilización de la energía en gran escala, para volver después al estudio de la fase a largo plazo.

3. MODELOS MATEMATICOS DE LA OFERTA Y LA DEMANDA EN RELACION CON LOS SISTEMAS ENERGETICOS

En el pasado, la fuerza propulsora del desarrollo de la tecnología energética y de la evolución de una economía energética ha sido, principalmente, la demanda de energía. Las demás consideraciones han sido de orden secundario, por lo que, en la esfera de la energía, se ha podido operar con conjuntos de parámetros de un alto grado de agregación, como es el crecimiento de la demanda de energía eléctrica. La observación mejor conocida quizá sea la de que esta demanda se duplicaba cada diez años. Este tipo de consideraciones han sido también de gran utilidad, porque este alto grado de agregación ha conducido a resultados bastante exactos. Las fluctuaciones en los componentes del conjunto parecían compensarse mutuamente.

Nos encontramos ahora ante una situación que cambia. Ya no es tan fácil, en esta primera fase del problema energético, que la oferta de determinadas clases de combustibles pueda satisfacer a la demanda. Aparecen también en escena restricciones de carácter ecológico y de otra índole, como se ha señalado anteriormente, que no pueden considerarse ya de importancia secundaria. Es forzoso, pues, evaluar en mayor detalle grupos menos complejos de parámetros, lo que conduce a la formulación de modelos matemáticos para la oferta y la demanda de energía.

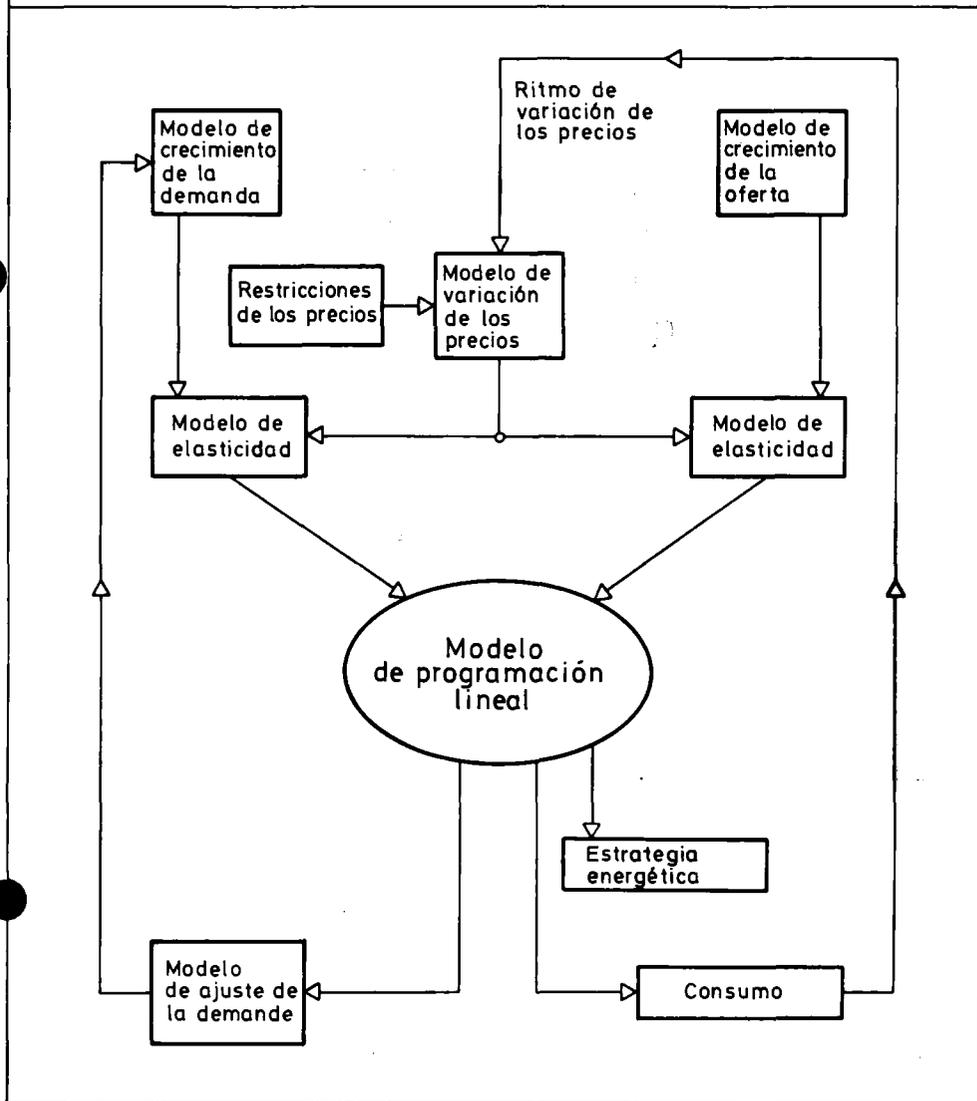
Cabe observar tres aspectos en la elaboración de estos modelos: tanteo, optimización y predicción.

Hay diversos aspectos que tienen que tantearse mediante los modelos. Ya se ha mencionado anteriormente que las reglamentaciones en la esfera de la energía se han establecido a veces partiendo de un punto de vista fragmentario; sólo se han tomado en consideración subsistemas o sistemas de segundo orden. La construcción de modelos debe conducir a un punto de vista más amplio: ¿qué sucede si ...? Estos procedimientos deberían hacer posible la evaluación de determinadas políticas y normas. Tal puede ser concretamente el caso cuando se trate de sentar criterios de orden ambiental o económico, como se ha señalado ya. Pero probablemente también pueda plantearse así el complejo problema de la evaluación de la tecnología, y quizá de este modo sea posible establecer prioridades para las actividades de investigación y desarrollo. Indudablemente, en la comunidad científica y tecnológica existe preocupación por la producción de energía, pero, con toda probabilidad, la forma de actuar con la energía y la integración de ésta constituirán a la larga un problema más acuciente. La situación sería más fácil de enjuiciar utilizando modelos. Además, se podrían evaluar mejor los efectos del ahorro de energía en relación con el problema de un crecimiento económico limitado o nulo.

Evidentemente, la optimización ha de ser uno de los objetivos de los modelos matemáticos. Entran en escena la distribución más conveniente y oportuna de la oferta de combustible, la sustitución óptima de unos combustibles por otros y la aportación óptima de capital. Hasta ahora se llegaba a la función objetivo simplemente por consideraciones de orden económico de precios y costos. Importa ahora incorporar objetivos múltiples en la función objetivo, que reflejen tanto valores económicos como valores ambientales y sociales. Ello conduce al problema mucho más general de comparar tales valores. A veces se dice que este problema es como "comparar peras con manzanas". Indudablemente, se precisa más trabajo metodológico en este sentido.

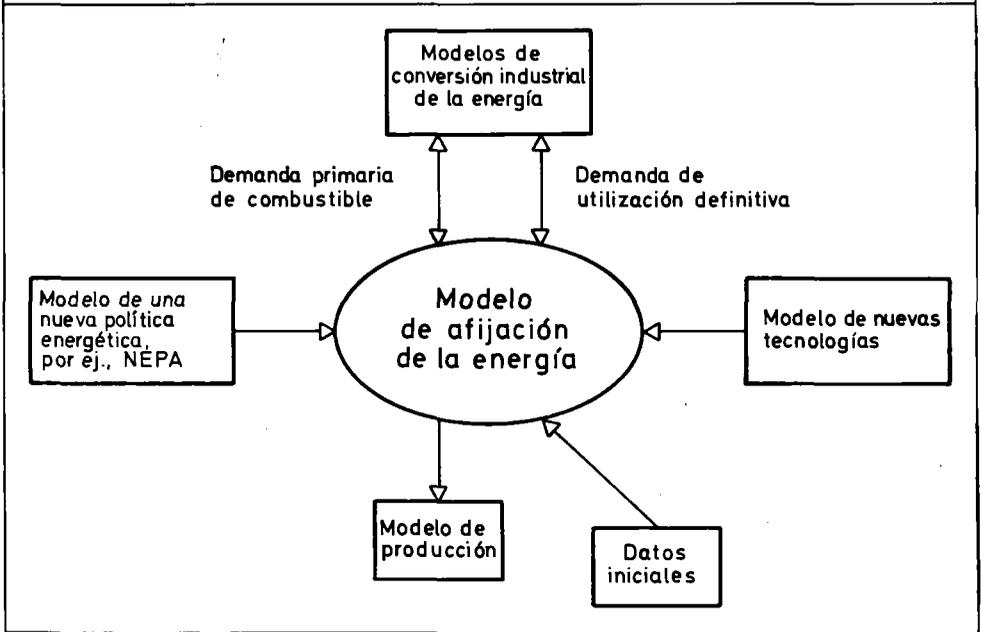
Fig. 2 Modelo de afijación de la energía

(según Schweizer, Lovey Chiles, Westinghouse Electric Corporation)



El tercer aspecto de la construcción de modelos es la predicción, cuestión que no se explicará en gran detalle, ya que todo el mundo tiene conciencia de ella. Más adelante se trata de los "problemas de sistemas"; debe señalarse que la predicción de problemas de sistemas de esta clase es de especial interés para comprender los sistemas energéticos. Recientemente, en una Conferencia sobre modelos energéticos celebrada en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, Schweizer, Love y Chiles [8] presentaron un ejemplo típico de construcción de un modelo para la oferta y la demanda de energía. Estos autores consideran el modelo de afijación del combustible que se describe en la Fig.2. Se utiliza

Fig. 3 Modelo energético computerizado
(según Schweizer, Lovey Chiles, Westinghouse Electric Corporation)



Cuadro 1 Modelo dinámico de afijación de la energía

$$\delta P = \sum_{ik} \delta P_{ik}$$

$\delta P_{ik} \equiv$ Aumento de los precios que la industria I-ésimo tendrá que pagar por el combustible K-ésimo

$$\delta D_i \equiv \sum_k d_{ik} \cdot \delta P_{ik} = \sum_k \beta_{ik} \cdot \frac{D_{ik}}{P_{ik}} \cdot \delta P_{ik}$$

$\delta D_i \equiv$ Aumento del mínimo del consumo de la industria I-ésima

$\beta_{ik} = \frac{\delta D_{ik}}{D_{ik}} / \frac{\delta P_{ik}}{P_{ik}} \equiv$ Elasticidad parcial (conocida a partir de los modelos de elasticidad)

$$\delta S_k \equiv \sum_i s_{ik} \cdot \delta P'_{ik} = \sum_i \gamma_{ik} \cdot \frac{S_{ik}}{P'_{ik}} \cdot \delta P_{ik}$$

$\delta S_k \equiv$ Aumento del máximo de la oferta total del combustible K-ésimo disponible

$\gamma_{ik} = \frac{\delta S_{ik}}{S_{ik}} / \frac{\delta P'_{ik}}{P'_{ik}} \equiv$ Elasticidad parcial (conocida a partir de los modelos de elasticidad)

$P'_{ik} = P_{ik} - q_{ik} \cdot P_{ik} \equiv$ Costos de suministro del combustible K-ésimo o la industria I-ésima

Problema de programación lineal: Minimizar el aumento total de los precios δP respecto de las variables δP_{ik} y de las restricciones D_i y S_k

Nota: El criterio de optimación podría ser diferente (por ej., aumento de la contaminación) Podrían considerarse, además, otras restricciones (por ej. recursos)

un modelo para la demanda de energía y su crecimiento para diversos tipos de combustibles y para diversas regiones y diversos sectores del mercado. El modelo de la demanda de energía se combina con un modelo de las diversas elasticidades parciales, para que sirva como entrada de un algoritmo de afijación de programación lineal. Se procede de igual modo con un modelo de la oferta, de su crecimiento y de las elasticidades correspondientes. El algoritmo de programación lineal afija entonces los crecimientos de la demanda a los crecimientos de la oferta para una función objetivo dada. El resultado es una estrategia energética para satisfacer el crecimiento de la demanda con las variaciones de precios correspondientes. Este enfoque del problema supone una cierta posibilidad de intercambiar los combustibles, lo que conduce al terreno de la conversión de la energía y a los correspondientes modelos relativos a la misma y, de ahí, a considerar nuevas tecnologías, así como modelos para las políticas energéticas en estudio. El modelo global que se presenta en la Fig.3 puede servir de ayuda para determinar prioridades en la labor de investigación y desarrollo tecnológicos, para evaluar las consecuencias que se derivan de considerar no sólo el precio mínimo sino también otras funciones objetivo, y para prejulgar los resultados que se seguirían de ciertas políticas.

En el Cuadro 1 se expone brevemente el fundamento matemático de este modelo.

El proceso de elaboración del modelo y la asignación al mismo de diversos valores numéricos pueden ayudar a comprender mejor las características intrínsecas de la realidad a la que se aplica el modelo. Puede ser de especial importancia la identificación de los distintos niveles que pueden existir en el sistema en estudio y del grado de acoplamiento entre dichos niveles. Por ejemplo, la construcción de una nueva central eléctrica constituye parte del sistema de abastecimiento de una región. A su vez, este sistema de abastecimiento eléctrico forma parte del sistema general de suministro de energía, en todas sus formas etc. En este momento, puede ser interesante considerar, por ejemplo, el problema de si una alteración en los límites del sistema en cuestión influye sobre las diversas conclusiones a que se puede llegar, o dicho de otro modo: en qué grado el sistema en estudio está acoplado a sistemas de nivel superior [9].

Es precisa una observación sobre la entrada de datos. Los modelos matemáticos sólo tienen valor cuando se dispone de los datos de entrada necesarios. Las evaluaciones encaminadas a la solución asintótica del problema de la energía exigen consideraciones de orden global. Hay que averiguar el tipo de datos que se requieren a este fin. El problema consiste entonces en hacer compatible el grado de agregación de los datos originales. Además, quizás se disponga de los necesarios datos económicos, pero de igual importancia con los datos sobre contaminación, sobre pérdidas caloríficas, los datos de índole sociológica o, en otras palabras, unos datos que permitan tener en cuenta las funciones objetivo de orden más general anteriormente mencionadas.

4. DEMANDA DE ENERGIA A LARGO PLAZO

A continuación se van a tratar de cantidades muy grandes de energía. Por ello, es conveniente introducir la unidad $Q = 10^{18}$ Btu. En el Cuadro 2 se indican los equivalentes de Q en diversas unidades.

En el Cuadro 3 se dan algunas cifras que caracterizan el consumo de energía. Puede observarse que el consumo mundial de energía en 1970 es aproximadamente $1/4 Q$ /año, mientras que el consumo de energía en el año 2050 podría alcanzar la cifra de $6 Q$ /año, es decir, 25 veces más que en 1970. La cifra de 10^{10} habitantes para la población es una simple conjetura que parece lógica, pero que podría ser muy discutible. Obsérvese, no obstante, que esta cifra no implica un aumento exponencial. Por otra parte, el valor de 20 kW per cápita es una cifra clave introducida por Weinberg y Hammond [10] tras

Cuadro 2 Equivalencia entre unidades d'energía

1 Q \approx 10^{18} BTU = $2,52 \times 10^{17}$ kcal
= $1,05 \times 10^{21}$ julios
= $2,93 \times 10^{14}$ kWh (t)
= $1,22 \times 10^{10}$ MWd (t)
= $3,35 \times 10^7$ MWa(t)

Cuadro 3 Consumo de energía

Estados Unidos	1970	0,07Q/a
Estados Unidos	2000	0,16Q/a
Mundial	1970	0,24 Q/a (4×10^9 habitantes, 2 kW(t)/cápita)
Mundial	2000	2,1 Q/a (7×10^9 habitantes, 10 kW(t)/cápita)
Mundial	2050	6 Q/a (10×10^9 habitantes, 20 kW(t)/cápita)

Cuadro 4 Presupuesto energético correspondiente a una civilización en estado estacionario*

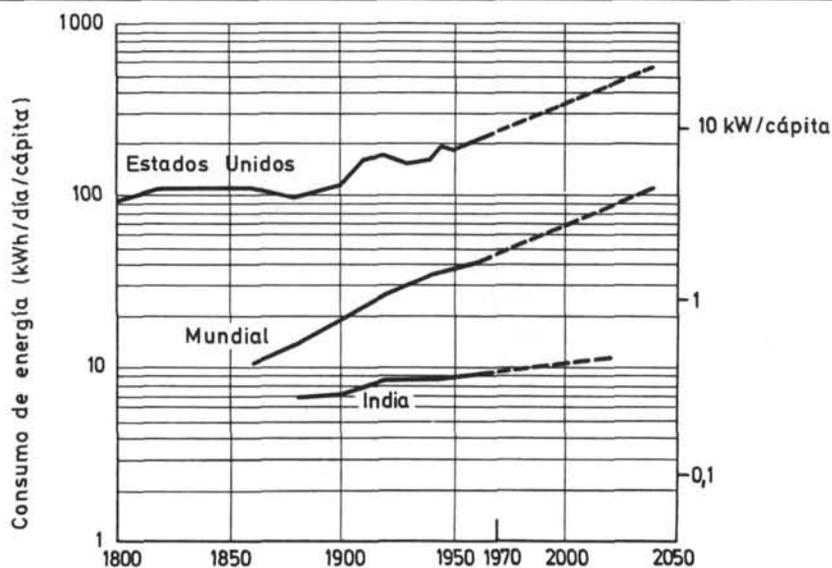
	kW (t) / cápita
Nivel actual en los Estados Unidos	10,0
Reajustes para el futuro	
Producción de acero, aluminio y magnesio	0,1
Recuperación y reciclado de elementos que escaseen	2,0
Hidrógeno electrolítico	2,5
Agua de desalación (100 galones/día)	0,3
Transporte de agua a las ciudades	0,1
Acondicionamiento del aire en las ciudades	0,3
Producción intensiva de alimentos	0,2
Tratamiento de aguas negras y desechos	0,5
Total reajustes	6,0
Imprevistos	4,0
	<hr style="width: 50%; margin-left: auto; margin-right: 0;"/> 20,0

* (Weinberg y Hammond, Global effects of increased use of energy, Ginebra, septiembre de 1971)

haber estudiado con cierto detalle las futuras condiciones de una sociedad civilizada. En el Cuadro 4 se indica la descomposición de esa cifra. También aquí debe observarse que no se ha supuesto ningún aumento exponencial en el número de kW per cápita. Lo que hay que dejar bien sentado en este punto es que tenemos que tomar en consideración las condiciones de vida en futuros decenios, en que la población será muy elevada, y que probablemente será necesario reciclar algunos recursos, en particular el agua. Para comprender mejor estas condiciones futuras de vida se necesitan a modo de "guiones" y descripciones del estilo de vida muy detallados. Pero sigamos adelante: la Fig.4 [11] demuestra que en la actualidad el consumo de energía está distribuido de un modo muy desigual sobre la tierra. Por el contrario, todo estudio de soluciones asintóticas del problema energético tiene que partir de la hipótesis de que el suministro de energía per cápita será el mismo para toda la población del mundo y, además, de que el valor efectivo de tal cifra corresponderá a la cifra más alta en cuestión, por ejemplo, la correspondiente a los Estados Unidos. Es imposible que no llegue el momento en que se haga realidad la proliferación de una elevada potencia instalada per cápita. Con el tiempo, tiene que ser posible que toda la población del mundo pueda vivir en las mismas condiciones de confort, por lo menos en teoría, lo que significa que toda solución asintótica del problema energético tiene que basarse en el supuesto de la igualdad. Partiendo tan sólo de la base de estas consideraciones de orden conceptual, puede verse que la demanda de energía será como mínimo diez veces superior a la demanda actual, aunque probablemente más.

Anteriormente se ha indicado una escala de tiempo para las tres fases del problema energético. La tercera, la fase a largo plazo, se ha caracterizado por el hecho de que se habrán elegido para ponerlas en práctica una o dos de las pocas soluciones posibles para contar con un suministro prácticamente ilimitado de combustible; los combustibles fósiles ya no podrán emplearse en gran escala. Como veremos más adelante, esto sucede cuando el consumo de energía alcanza un valor de unos pocos Q/año. Este hecho, a su vez,

Fig. 4 Crecimiento de la demanda de energía
Según C. Starr (11)



dependerá en gran parte de la magnitud de la población mundial y del ritmo a que se eleve el nivel de vida en los países en desarrollo. Esta situación puede darse antes o después de 1995 y, en consecuencia, la fase a largo plazo del problema energético se iniciará también antes o después de tal fecha, que, como ya se ha dicho, tiene solamente un valor indicativo.

Puede apreciarse la pertinencia de estas consideraciones si se estudia la Fig. 5, que demuestra la existencia de una correlación lineal entre el consumo de energía per cápita y el producto nacional bruto per cápita y que esta correlación subsiste si se introducen los incrementos que se han registrado recientemente en las cifras correspondientes. Hoy día se discute en qué medida es de carácter necesario esta correlación lineal, lo que, a su vez, conduce de nuevo a los modelos matemáticos. Resta todavía una gran tarea por realizar en este sentido.

Fig. 5 Utilización comercial de la energía y producto nacional bruto

- 1968 según Stat. Yearbook of UN (Anuario estadístico de las NU) (1970)
- (1961 / 1962) según C. Starr
- Energy and Power, 1971 S.4

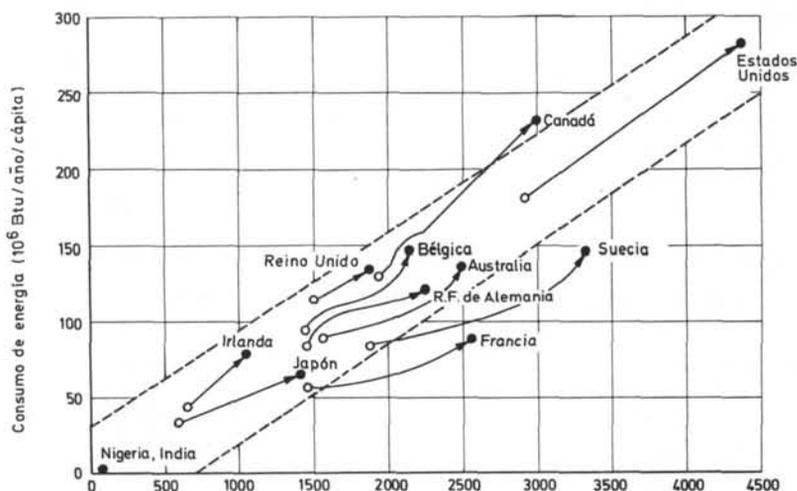
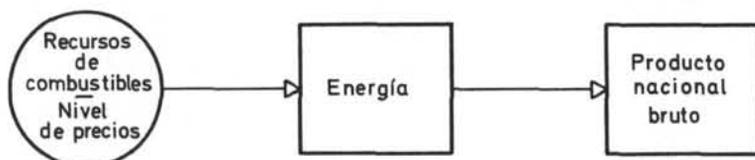


Fig. 6 Relación entre el combustible, la energía y el producto nacional bruto



Procede hacer una observación más. La correlación lineal de la Fig. 5 parece confirmar el esquema simple que se representa en la Fig. 6. El círculo de la oferta de combustibles y de su nivel de precios indica una restricción pero, por lo demás, sólo aparecen la energía y el producto nacional bruto. Este esquema resultaba razonable en tanto eran de importancia secundaria las restricciones y condiciones límites anteriormente mencionadas, pero el panorama cambia ahora.

5. RECURSOS ENERGETICOS

Hasta el momento actual se han venido empleando exclusivamente combustibles fósiles, pero, a la vista de las futuras fases de la evolución energética, procede comparar los recursos de estos combustibles con los de otras fuentes.

5.a) Combustibles fósiles

Las cifras que se publican y se discuten en la actualidad en relación con los recursos de combustibles fósiles discrepan mucho entre sí. La razón estriba sencillamente en que es difícil definir con claridad qué debe considerarse como límite superior evidente para clasificar los yacimientos como recursos. Earl Cook [12] hace observar que hay tres métodos para predecir la disponibilidad de recursos. Uno es el método económico, que se limita simplemente a extrapolar las tendencias históricas y la elasticidad de la demanda junto con las tendencias tecnológicas y llega a la sencilla conclusión de que, si se busca combustible en esas condiciones, se encontrará. Quizá esta manera de enfocar el problema fuera razonable en el pasado, cuando la producción de energía resultaba modesta a escala mundial. Ahora nos encontramos ante un orden diferente de magnitud en el problema de la energía. El segundo método es el de las analogías geológicas, que se orienta hacia el suministro y no hacia la demanda como el método económico; en el que se tienen en extrapolaciones sobre la base de consideraciones de índole geológica. El tercer método es el de la historia de la explotación de M.K. Hubbert [13], en el se tienen en cuenta la historia de la curva de producción, la curva de las reservas comprobadas y la curva del combustible descubierto por unidad de longitud perforada en la exploración. Estos dos últimos métodos parecen ser aplicables a las consideraciones que aquí se hacen.

En el Cuadro 5 se presenta la información facilitada por V.E. McKelvey y D.C. Duncan [14], y por M.K. Hubbert [13]. La gran diferencia entre los límites inferiores y superiores indicados por McKelvey y Duncan, y los datos de M.K. Hubbert, que se encuentran entre medias, ilustra las observaciones que acaban de hacerse. Una vez más habría que señalar que los valores superiores no significan un límite en el sentido físico. Por ejemplo, en el caso del carbón, la cifra se refiere exclusivamente a los recursos que se encuentran a una profundidad no superior a 1800 m.

Los recursos de petróleo ocupan un punto situado entre 2 Q y 20 Q. Se ha indicado antes que, para un futuro no muy distante, hay que prever ritmos de consumo de varios Q por año. Por lo tanto, se desprende de las cifras del Cuadro 5 que un consumo semejante no puede basarse en el petróleo: hay que introducir en su lugar el carbón. En el caso de éste, los recursos son aproximadamente diez veces mayores. Por consiguiente, es muy razonable hacer del carbón una posible piedra angular para la fase a plazo medio del problema energético. Se deduce de un razonamiento matemático sencillo que esta materia prima podría durar algunos decenios. Ahora bien, hay que tener en cuenta las condiciones que caracterizarían la explotación del carbón en gran escala, que requeriría operaciones de gran envergadura a escala mundial. Como se verá más adelante, esta circunstancia da lugar a problemas de sistemas, es decir, que determinados efectos colaterales que resultaban de importancia secundaria cuando la explotación de los recursos

Cuadro 5 Contenido energético de los recursos mundiales de combustibles fósiles en unidades $Q \approx 10^{18}$ BTU

	Según V.E. McKelvey y D.C. Duncan (12)		Según M.K. Hubbert (13)	
	Conocidamente recuperable	Por descubrir y marginal	recuperable en algún momento	%
Carbón	17,3	320	192	88,8
Petróleo crudo	1,73	23	11,1	5,2
Gas natural	1,95	20	10,1	4,7
Líquidos del gas natural	0,21	3,2		
Petróleo de arenas bituminosas	0,23	6,3	1,7	0,8
Petróleo de esquistos	0,87	77	1,1	0,5
Total	22,5 Q	450 Q	216 Q	

se efectuaba a escala modesta, pasarán a ser efectos de primer orden. A modo de ilustración, pueden mencionarse los problemas que plantea la minería a cielo abierto. Observaciones parecidas pueden hacerse en el caso de los esquistos bituminosos.

La identificación de estos problemas de sistemas exige un gran esfuerzo. No basta con señalar una simple cifra de recursos, y no muy elevada. Es decir, que podría ser mucho más limitado el período de tiempo en que se podrá confiar en el carbón. Ello viene a confirmar la idea ya apuntada de que la fase a plazo medio debería ser primordialmente una fase de suave transición una fase de suave transición.

5.b) Recursos de uranio y de torio

Las observaciones relativas a la dificultad de efectuar estimaciones válidas de los recursos de combustibles fósiles son igualmente aplicables a los recursos de que se nutren los reactores nucleares de fisión, es decir, el uranio y el torio. Mucho se ha publicado sobre este tema y la cuestión de las reservas de uranio se debatió intensamente mediados los años sesenta [16]. Ahora bien, debe tenerse presente que todas las cifras manejadas en aquella época se referían a yacimientos ya conocidos o a yacimientos que podrían descubrirse con un alto grado de certidumbre. Además, sólo se tomaban en consideración para el uranio precios de hasta 30 dólares por libra de U_3O_8 . Para poder apreciar la cuestión hay que conocer las relaciones entre los costos del mineral por kWh y los costos a la salida de la central, para los distintos tipos de centrales eléctricas, relaciones que se indican en el Cuadro 6. Un aumento del precio del mineral de 10 dólares por libra a 30 dólares por libra incrementaría en unos 0,001 dólares/kWh el costo a la salida de la central en el caso de un reactor de agua ligera. Consideraciones de esta clase son las que marcaban los límites de las polémicas en los años sesenta. Pero en aquella época,

Cuadro 6 Sensibilidad del costo a la salida de la central frente a los costos de mineral/combustible

Combustible fósil	0,5	} (a $\approx \frac{50 \text{ centavos}}{\text{millión de BTU}}$)
Reactor de agua ligera	0,1	
Reactor reproductor	0,001	

Cuadro 7 Recursos de uranio

en unidades Q $\approx 10^{18}$ BTU

(De no indicarse lo contrario, las cifras están tomadas o concuerdan con las de V.E. Mc Kelvey y D.C. Duncan (12))

	Yacimientos conocidas		Yacimientos no evaluados a por descubrir		a) Valores en dólares de los Estados Unidos a finales del decenio 1960-1969 b) Suponiendo un factor de conversión de 1 tonelada corta de $U_3O_8 = 7 \times 10^{13}$ BTU (1 tonelada corta = 907 kg) c) Suponiendo un factor / de conversión de 1 tonelada corta de $U_3O_8 = 7 \times 10^{13}$ BTU d) Según la nota d) del cuadro 4 en (14) e) No concuerda necesariamente con (14) f) Suponiendo un factor técnico de extracción de 3×10^{-2} g) Se ha calculado que se podría extraer uranio del mar al precio de 25 \$ / libra de U_3O_8 (15)
	Reactor de agua ligera b)	Reactor reproductor c)	Reactor de agua ligera b)	Reactor reproductor c)	
hasta 10 \$ / libra de U_3O_8 a)	07	70	≈ 30 d)	≈ 3000 d)	
hasta 100 \$ / libra de U_3O_8 a)	—	—	$(2-10) \times 10^2$ e)	$(2-10) \times 10^4$ e)	
hasta 500 \$ / libra de U_3O_8 a)	—	—	5×10^4 d)	5×10^6 d)	
Océanos g)	1×10^2 f)	1×10^4 f)	3×10^3	3×10^5	

consideración primordial era la competencia comercial entre la energía de origen nuclear y la producida con combustibles fósiles. Dentro del marco general en que hoy día se considera la energía y, concretamente, en el contexto del presente artículo, ya no es éste el único punto de vista válido. Por ello, en el Cuadro 7 se incluyen también estimaciones basadas en precios superiores para el uranio. A un precio de 100 dólares por libra, el aumento del costo de la energía eléctrica producida con reactores de agua ligera sería de aproximadamente de 0,005 dólares/kWh, pero los recursos seguirían siendo solamente de unos pocos centenares de Q. Se trata de cantidades comparables a las de los combustibles fósiles. La energía nucleoelectrónica, si se parte de la base de las centrales nucleares actuales, no difiere de las centrales que queman combustible fósil en lo que se refiere a los recursos de combustible. La situación es cualitativamente diferente en el caso de los reactores reproductores. Su importancia a corto plazo estriba en el hecho de que los aumentos de precios de los minerales de uranio no se reflejan prácticamente en los costos a la salida de la central cuando se trata de reactores reproductores. Pueden admitirse precios de más de 500 dólares por libra de U_3O_8 , con lo que resultan accesibles grandes cantidades de recursos que, además, se convierten mejor en energía por un factor de 100. Del Cuadro 7 se desprende que los recursos energéticos accesibles gracias a los

reactores nucleares reproductores son prácticamente ilimitados, lo que determina la importancia a largo plazo de este tipo de reactores. M.K. Hubbert [13] cita el ejemplo de yacimientos de uranio que cobran valor gracias a la tecnología de los reactores reproductores. En los Estados Unidos, los esquistos de Chattanooga se extienden a lo largo de la vertiente occidental de los Montes Apalaches. Un estrato de estos esquistos, de 5 m de potencia, contiene uranio en una proporción de 60 g por tonelada, valor muy inferior a lo que se considera interesante en las actuales circunstancias. El contenido energético de este esquisto por metro cuadrado sería equivalente al de 2 000 toneladas métricas de carbón, y el de una superficie de 13 kilómetros cuadrados equivaldría al de los recursos mundiales de petróleo bruto (2×10^{12} barriles).

La distribución del torio en las distintas partes del mundo es diferente de la del uranio, hecho que tendrá consecuencias a escala regional. Por ejemplo, la India no posee mucho uranio, pero sí grandes cantidades de torio, por cuyo motivo tendrá que buscar medios y caminos especiales para aprovechar estos recursos. Ahora bien, en conjunto, el equivalente energético de los recursos de torio es sólo ligeramente superior al de los recursos de uranio. Por lo tanto, fundamentalmente es correcto suponer que son iguales. Para más detalles, véase McKelvey y Duncan [14]. Así, pues, la energía obtenida por fisión del uranio y del torio en reactores reproductores constituye una primera solución para contar con un suministro prácticamente ilimitado de energía.

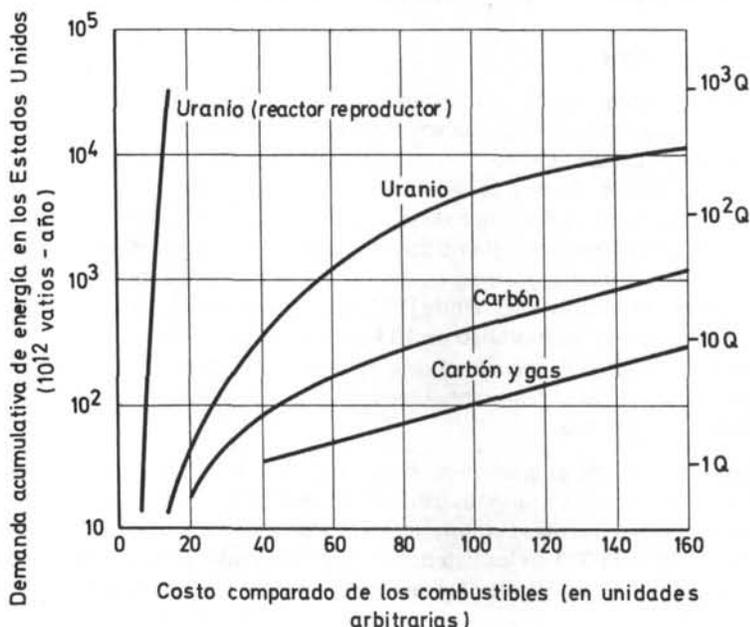
Hay que tener presente que el desarrollo de los reactores reproductores está ya muy adelantado. Su versión más avanzada es el reactor reproductor rápido de metal líquido, que ha sido desarrollado por la Unión Soviética, Francia, el Reino Unido y Alemania en cooperación con Bélgica y los Países Bajos, los Estados Unidos y el Japón. Los trabajos importantes de desarrollo como los correspondientes al reactor reproductor rápido han de atravesar tres umbrales:

- el umbral de la viabilidad científica,
- el umbral de la viabilidad industrial y
- el umbral de la viabilidad comercial.

En la actualidad se están construyendo o poniendo en marcha grandes prototipos de reactores industriales del orden de los 300 MW(e) por la Unión Soviética, Francia, y el Reino Unido y Alemania en colaboración con Bélgica y los Países Bajos. Se espera que esta construcción comience muy pronto en los Estados Unidos y en el Japón. Esto significa que estamos atravesando el segundo umbral, el de la viabilidad industrial. Se espera alcanzar la viabilidad comercial a mediados de los años ochenta [17]. Además, el reactor reproductor rápido refrigerado con metal líquido cuenta con otras soluciones en que apoyarse. Así, por ejemplo, el reactor reproductor rápido refrigerado con helio constituye una de estas soluciones. Se están investigando ciertos problemas clave para este tipo de reactor. Pero también los reactores reproductores térmicos [18] y, especialmente, el reactor reproductor de sales fundidas que se está estudiando en los Estados Unidos, en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, sirven de punto de apoyo para el desarrollo de los reactores reproductores rápidos de metal líquido. Lo que conviene destacar aquí es: ya con la tecnología de los años setenta y ochenta tendremos en el reactor reproductor rápido una solución industrialmente viable para conseguir un suministro prácticamente ilimitado de energía, incluso si en un futuro no muy distante hay que enfrentarse con un consumo de energía de varios Q/año. La Fig.7 resume la situación correspondiente a los combustibles fósiles y los reactores nucleares de fisión [11] e ilustra el hecho de que no puede darse una cifra única para los recursos energéticos.

Fig. 7 Costo comparado de los combustibles

Según C. Starr (11)



5.c) Recursos de litio y deuterio

Además de la fisión, también la fusión es una fuente de energía nucleoelectrica. Es sabido que los reactores de fusión no han atravesado todavía el umbral de la viabilidad científica, pero este hecho podría producirse en los próximos diez a quince años. Cualquiera que sea la respuesta que se reciba a la viabilidad científica y a las viabilidades de otros genes, merece la pena examinar brevemente los recursos de combustible. Lo más probable con mucho es que la fusión se base en la reacción D-T, que precisa litio como combustible además del deuterio. Resulta así que el litio es el factor limitante del suministro de combustible. De hecho, un reactor de esta clase es en realidad un reactor reproductor de fusión [19], porque con el litio se produce tritio de forma análoga a como se genera plutonio-239 a partir del uranio-238. Con un reactor técnico de fusión puede producirse 1 MWd/g de Li natural (7,4% de litio-6 y 92,6% de litio-7) [20]. Se trata de una cifra del mismo orden que la correspondiente al uranio o al torio en los reactores de fisión.

También en este caso se han dado a conocer cifras bajas para el litio [14]. Esto se debe, evidentemente, a que hasta ahora no había ningún aliciente para efectuar una prospección adecuada. Pero la cantidad de litio en los océanos solamente es indicativa: $2,7 \times 10^{11}$ toneladas métricas, lo que corresponde a $2,2 \times 10^7$ Q, si fuera posible extraer todo el litio. Si de nuevo suponemos un factor de $\sim 3 \times 10^{-2}$ para la extracción, tenemos $\sim 7 \times 10^5$ Q.

Un reactor de fusión basado en la reacción D-D constituiría un caso muy distinto, ya que no se necesita litio. Sin embargo, hay que tener presente que un reactor de este tipo

es notablemente más difícil que un reactor de fusión D-T y, como se ha indicado antes, su misura viabilidad está todavía por demostrar. Como quiera que sea, el contenido en deuterio de los océanos equivale a $\sim 10^{10}$ Q o, si se aplica de nuevo un factor de 3×10^{-2} para la extracción, se llega al equivalente de 3×10^8 Q.

Es evidente que la fusión constituiría una segunda solución para disponer de un suministro prácticamente ilimitado de energía, si es que llega alguna vez a ser técnicamente viable.

5.d) Fuentes geotérmicas

El aprovechamiento de las fuentes geotérmicas para el suministro de energía en gran escala constituye un aspecto relativamente nuevo. Hasta ahora, solamente en Italia, Nueva Zelandia y los Estados Unidos han funcionado centrales eléctricas geotérmicas. La escala ha sido modesta, de escasos centenares de MW como máximo. La vida útil prevista para esta clase de centrales es del orden de escasos decenios [13]. Tales han sido los motivos de que esta fuente de energía no atrajera gran atención cuando se discutió el problema de las fuentes de energía en gran escala. Pero esta posibilidad se ha vuelto a examinar recientemente. Donald E. White [21] ha calculado que la capacidad geotérmica total del mundo hasta una profundidad de 10 km es aproximadamente 4×10^{20} Ws. Sin contar ningún factor de conversión o de otra clase, esta cifra equivale a 0,4 Q, lo que evidentemente representa una cantidad despreciable de energía en el contexto de que aquí se trata.

Ahora bien, hay también otras opiniones. Recientemente, R.W. Dose [22] ha declarado que utilizando más a fondo los recursos geotérmicos que existen en los Estados Unidos podrían quizá explorarse fuentes con una vida superior a los 1000 años y una potencia de 10^5 MW. Esto supondría 3 Q en los Estados Unidos, cifra más o menos del mismo orden que los recursos de petróleo del país. No se han facilitado detalles respecto de estos cálculos.

Aparece en escena un orden distinto de magnitud si se considera el contenido calorífico de la corteza terrestre. El gradiente de temperatura es del orden de unas cuantas decenas de grados centígrados por kilómetro de profundidad. Si se considera la corteza terrestre por debajo de los continentes hasta una profundidad de 10 km, el contenido calorífico resultante es del orden de 5×10^5 Q. Hay que tener en cuenta las pérdidas por conversión, y que porbablemente sólo pueda explotarse una fracción de la corteza terrestre continental. En principio, se dispondría así de varios millares de Q. Pero tan sólo se trata de un cálculo rápido y simplificado.

Ahora bien, el tema de la energía geotérmica tiene aún otros aspectos. Además de los continentes existen los océanos. Los 200 m superiores del océano tienen unos diez grados centígrados más de temperatura. Considerando análogamente la superficie total de los océanos, se llega a la cifra de unos 3000 Q. En este caso, las pérdidas por conversión serían considerables debido a que la diferencia de temperaturas es sólo de 10°C y únicamente sería posible explotar una fracción de los océanos. En principio, por este método se dispondría de algunas docenas de Q.

La cuestión de si puede explotarse en gran escala la energía geotérmica es muy discutible. De momento, no es posible llegar a ninguna conclusión concreta. Incluso se ignora si la energía geotérmica puede considerarse como una posible solución para el suministro de energía en gran escala.

5.e) Energía de las aguas y las mareas

Los recursos de energía que suponen las aguas y las mareas en todo el mundo son del orden de algunas décimas de Q [13]. Estas fuentes de energía pueden ser de interés regional,

pero, decididamente, no constituyen una solución para el suministro de energía en gran escala.

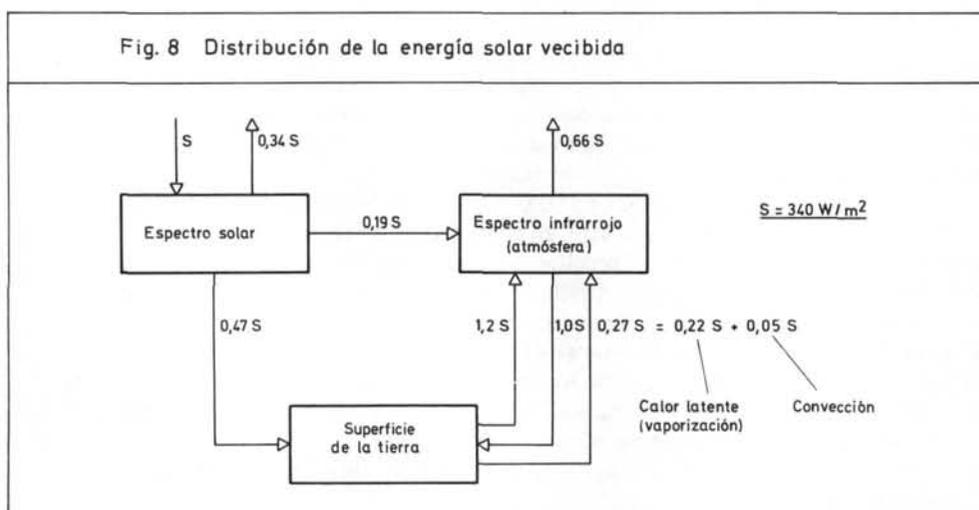
5.f) Energía solar

El suministro de energía solar es en sí infinito. Se trata aquí más bien de un problema de densidad de energía. La energía solar que llega a la parte superior de la atmósfera, promediada a lo largo del día y de la noche y respecto de todas las zonas de la tierra, es de 340 W/m^2 . Aproximadamente el 47% alcanza la superficie terrestre, lo que significa 160 W/m^2 . El valor neto de la energía infrarroja que escapa es $\sim 70 \text{ W/m}^2$. Por lo tanto, tenemos

$$160 \text{ W/m}^2 = 70 \text{ W/m}^2 + 90 \text{ W/m}^2$$

luz visible = radiación infrarroja + balance térmico.

En la Fig.8 se detalla algo más el balance energético. El balance térmico sirve, a su vez, para mantener el ciclo del agua en la atmósfera por evaporación del agua de lluvia, para calentar la tierra y la parte inferior de la atmósfera y para aportar energía a los procesos biológicos.



Por lo tanto, la consideración decisiva respecto de la recolección de energía solar en la superficie de la tierra estriba evidentemente en hasta qué punto es lícito perturbar este equilibrio energético. Se trata ciertamente de un problema de sistemas sumamente complejo, sobre el que se volverá más adelante. Una estimación simplista del valor medio mundial para la energía solar que se puede recolectar daría 20 W/m^2 . Ahora bien, es de tener en cuenta que este valor puede ser considerablemente superior según las regiones, lo que, por consiguiente, es importante a esta escala regional. Pero lo que nos interesa en el presente contexto es la cuestión del suministro de energía en gran escala sobre toda la tierra. Como se verá más adelante, de este valor de 20 W/m^2 se desprende claramente que el factor determinante para la recolección de energía solar sobre la tierra no es el suministro de energía, sino la superficie de terreno que habría que destinarle.

Ahora bien, como se detalla en una propuesta recientemente formulada por P.E. Glaser [23, 24], no es absolutamente necesario que la energía solar sea recogida en la superficie de la tierra, sino que podría hacerse en el espacio ultraterrestre.

Claramente, la energía solar puede constituir, en principio, una solución para el suministro de energía en gran escala.

Se pueden resumir los razonamientos que anteceden con la conclusión de que, al menos en principio, se ofrecen tres (cuatro) posibles soluciones para el suministro de energía en gran escala. Por "gran escala" se entiende algunos Q/año durante mil años o mucho más. Estas soluciones son las siguientes:

- 1) La energía generada en la fisión nuclear
- 2) La energía generada en la fusión nuclear
- 3) La energía solar
- 4) La energía de origen geotérmico (?)

Debe hacerse constar con claridad que la única solución que es viable con certeza es la energía de fisión. Otras fuentes de energía, como los combustibles fósiles, las aguas, las mareas, etc., no encuadran en esta categoría. No obstante, pueden alcanzar una importancia local considerable.

6. PROBLEMAS DE SISTEMAS

Si existe más de una solución para llegar a disponer de un suministro de energía en gran escala, ¿cuál es el problema? Según la Fig. 6 no debería haber ninguno.

La energía de fisión es la solución que ya es viable hoy día. Es más, se está implantando a un ritmo tal que sus efectos comienzan a hacerse sentir en el panorama general de la energía. Hacia finales del presente decenio, varios países esperan que la energía nuclear produzca aproximadamente el 30% de toda su electricidad. En los Estados Unidos están actualmente en funcionamiento, en construcción o pedidas en firme centrales nucleares que suponen una potencia total superior a 150 GW(e). En la República Federal de Alemania la cifra correspondiente es de 13 GW(e), en el Japón de 15 GW(e) y la del mundo entero 254 GW(e). Aun así, no es precisamente un placer ser hoy día promotor de la energía nucleoelectrica. Se oponen muchas objeciones a esta modalidad de energía; he aquí los argumentos que se esgrimen en contra:

- a) La explotación de las centrales nucleares acarrea consigo una cierta carga radiactiva;
- b) Las centrales nucleares podrían dar lugar a cargas radiactivas importantes en caso de accidentes graves. Se atribuye especial importancia al problema de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo de los reactores;
- c) La explotación de las centrales nucleares hace necesaria la evacuación de desechos radiactivos a largo plazo;
- d) Al operar en gran escala con plutonio en el ciclo del combustible, pasará inevitablemente este elemento a la biosfera;
- e) Los materiales fisionables son peligrosos en potencia, ya que pueden utilizarse para fines militares, y es preciso tener en cuenta la posible distracción ilícita de estos materiales por robo o por parte de determinados grupos;
- f) Las grandes centrales nucleares liberan elevadas cantidades de calor residual, que dan lugar a perturbaciones de la biosfera al elevar la temperatura de ríos y lagos;
- g) Las centrales nucleares requieren grandes extensiones de terreno;
- h) No se necesita realmente la energía de las centrales nucleares.

Hace pocos años, las objeciones se centraban en torno a las centrales nucleares aisladamente consideradas. La tendencia actual se dirige más bien hacia la instalación y explotación de un gran ciclo de combustible nuclear. ¿Cuántos transportes de elementos combustibles irradiados se necesitan? ¿Qué sucederá si coinciden varios desprendimientos? ¿Y qué sucederá, en principio, con el plutonio?

Hasta cierto punto, las objeciones que anteceden son legítimas. Surgieron y recibieron respuesta cuando la energía nucleoelectrica se encontraba en su infancia y, ahora que llega a la madurez, las cuestiones se replantean en demanda de nuevo examen. Pero esto

no quiere decir que se consideren legítimas todas las objeciones que se oyen en contra de la energía nucleoelectrica [25].

Consideremos ahora a modo de ejemplo la cuestión de la carga radiactiva debida a la explotación de las centrales nucleares. La polémica Gofman-Tamplin que se desarrolló en los Estados Unidos está íntimamente relacionada con este problema. Junto con otras circunstancias, dio lugar a que se adoptara como normal para la carga radiactiva admisible un límite de tan sólo 5 mrems/año (reactor de agua ligera).

La cuestión central que ahora se plantea es la siguiente: ¿Qué alternativas se ofrecen? En una reciente publicación de los centros de investigaciones nucleares de Karlsruhe y de Jülich de la República Federal de Alemania se trata de efectuar una comparación entre las distintas soluciones alternativas [26]. En esta publicación se supone que toda la energía eléctrica de la República Federal se produciría alternativamente con antracita, lignito, gas natural, reactores de agua a presión o reactores de agua hirviente. Por supuesto, constituye un problema comparar una carga debida al SO₂ con una carga debida a la radiactividad. A este fin, se adoptaron los valores tipo existentes para cada uno de los contaminantes correspondientes y los valores de las intensidades de dosis ambientales (obtenidas con un modelo meteorológico que se reconoce que es poco exacto) se normalizaron de acuerdo con esos valores tipo, y a continuación se sumaron a éstos los valores normalizados obtenidos (véase el Cuadro 8).

Los problemas metodológicos que entraña una comparación de esta clase son obvios. Por ejemplo, no se tienen en cuenta los efectos sinérgicos ni se sabe si los distintos valores tipo se han obtenido por procedimientos análogamente rigurosos. Anteriormente hemos aludido al problema de comparar "peras con manzanas"; constituye éste uno de los problemas clave del análisis de sistemas.

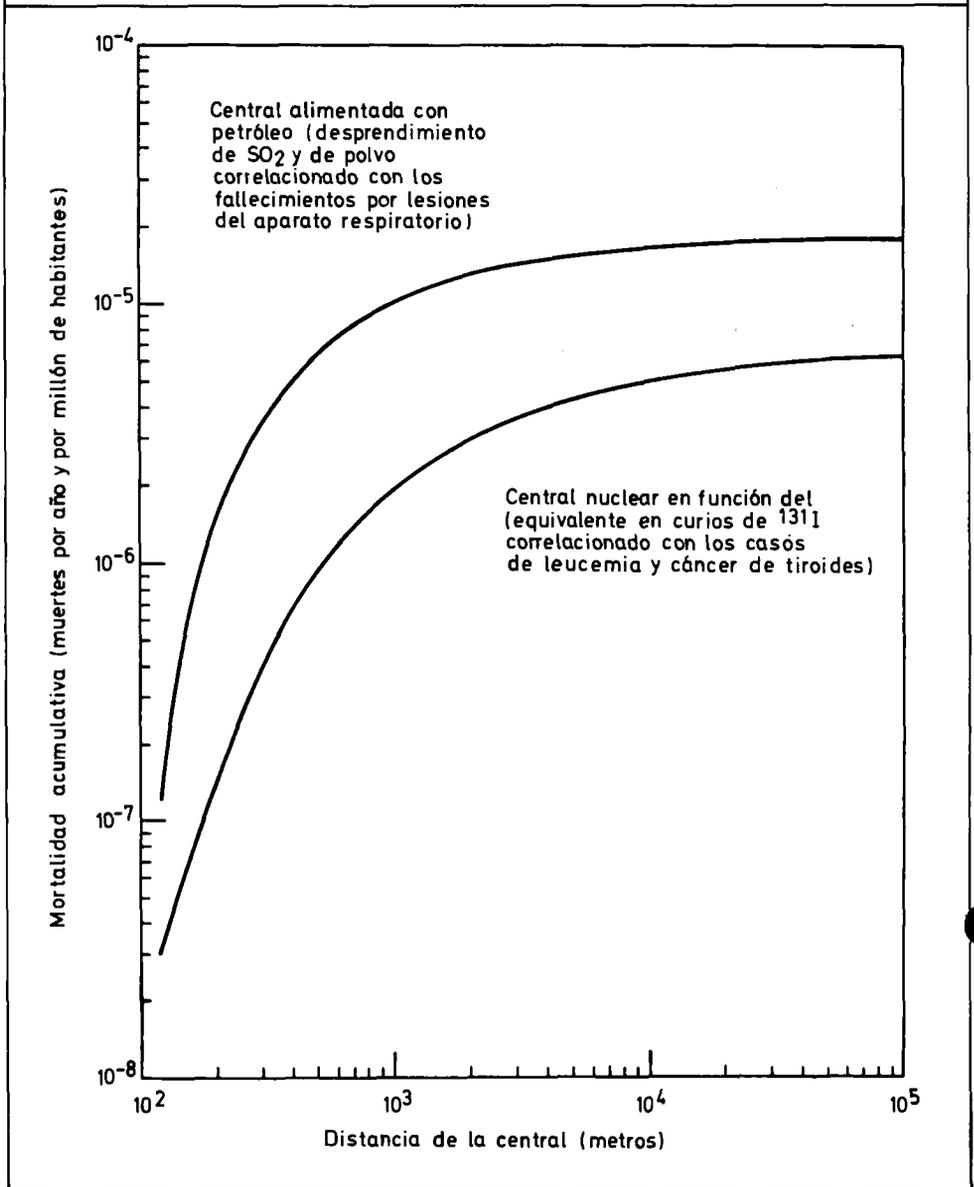
Aun teniendo presentes estas reservas, parece bastante claro que todas las alternativas consideradas suponen una carga de contaminación más alta que la energía nucleoelectrica. Es decir, que el problema de la contaminación es mucho más general. No es un problema

Cuadro 8 Contaminaciones relativas en el caso de la Republica Federal de Alemania, cuando se emplean diferentes fuentes de energía eléctrica (1970) (según la referencia [26])

	SO ₂	Polvo	NO _x	Flúor	Xe	Kr	Total*
Antracita	0,94	0,45	0,17	0,75	—	—	2,31
Lignito	1,20	0,86	0,28	1,65	—	—	3,99
Petróleo	1,16	0,22	0,20	0,06	—	—	1,64
Gas natural	3,1 x 10 ⁻⁴	—	0,16	—	—	—	0,16
Reactores de agua a presión	—	—	—	—	1 x 10 ⁻³	1 x 10 ⁻³	2 x 10 ⁻³
Reactores de agua hirviente	—	—	—	—	3 x 10 ⁻⁴	1,4 x 10 ⁻³	1,7 x 10 ⁻³

* Se entiende que sólo queda incluida la contaminación provocada por la producción de energía eléctrica

Fig. 9 Comparación de una central nuclear con una central alimentada con petróleo (según C. Starr y col.)



nuclear específico, pero se puso de manifiesto y llegó a conocimiento del público con el advenimiento de la energía nucleoelectrónica. El problema real estriba en la magnitud de la producción de energía. Se trata de una novísima fuente de experiencia y, a la vez, de preocupación.

Pasemos a un segundo ejemplo. El riesgo de que se produzcan accidentes nucleares es sumamente pequeño, pero existe. En el pasado, no se tenían explícitamente en cuenta

Cuadro 9

Energía fósil



$1g \text{ de C} \rightarrow 3,4 \times 10^4 \text{ Ws}$

Energía nuclear



$1g \text{ de U} \rightarrow 1MW = 8,6 \times 10^{10} \text{ Ws}$

$(1g \text{ de Li} \rightarrow 1 \text{ MW d})$

$\frac{1g \text{ de U (Li)}}{1g \text{ de C}}$	\rightarrow	$\frac{8,6 \times 10^{10} \text{ Wsegundo}}{3,4 \times 10^4 \text{ Wsegundo}} = 2,5 \times 10^6$
--	---------------	--

Fósil:

$0,24 \text{ Q/a} \rightarrow 2,5 \times 10^{20} \text{ Ws/a}$

$\Rightarrow 5 \text{ ppm CO}_2/\text{a, en peso}$
(no reciclado)

Nuclear:

$0,24 \text{ Q/a} \rightarrow 8 \times 10^6 \text{ MW}$

$\Rightarrow 8 \times 10^6 \cdot f \text{ Curios/a}$

	10^8 s	10^{10} s	10^{11} s
$f =$	10^4	10	1

estos riesgos tan remotos, pero, una vez adquirida experiencia con la energía nucleoelectrónica, se están evaluando también otros riesgos. Recientemente, C. Starr, M.A. Greenfield y D.F. Hausknecht han procedido a comparar los riesgos de una central nuclear con los de una central alimentada con petróleo [27]. La Fig. 9 presenta uno de los resultados de dicha comparación. Una vez más se plantean cuestiones de orden metodológico, porque se están comparando cosas cualitativamente diferentes. Los que interesa aquí no son tanto los detalles de la comparación, que pueden variar en un sentido u otro según se vaya profundizando en la misma, como el hecho de que una comparación de esta clase resulta ahora procedente. Tampoco la cuestión del riesgo es privativa de la energía nucleoelectrónica, sino que se trata de un problema general, que pasa ahora a primera línea debido al orden de magnitud de la producción de energía.

Otro ejemplo es el de los desechos que se producen al generar energía. En los datos indicados en el Cuadro 9 se refleja este aspecto. En el caso de los combustibles fósiles no se considerará la contaminación ordinaria. Teóricamente, este problema se podrá haber resuelto mediante medidas especiales de supresión o reducción, pero la producción de CO₂

es una característica intrínseca de este tipo de fuentes de energía, y las cantidades de CO_2 son tan grandes que no hay más solución que descargarlas en la atmósfera. Al ritmo actual de la producción mundial de energía, esto da lugar a un aumento de 5 ppm en peso por año. Una producción de energía 25 veces mayor originaría valores proporcionalmente más altos. La observación de "no reciclado" que figura en el Cuadro 9 se refiere al hecho de que el CO_2 atmosférico se encuentra en equilibrio dinámico con el CO_2 contenido en los océanos y en la biosfera, de forma que los valores reales son aproximadamente la mitad. Los valores para el aumento del contenido de CO_2 tienen que compararse con el contenido natural de CO_2 de la atmósfera. En 1950, este valor era de 450 ppm en peso. Preocupa bastante el hecho de que la radiación infrarroja que la tierra emite hacia el espacio ultraterrestre disminuya al aumentar el contenido en CO_2 debido al llamado "efecto de invernadero" [28]. En la actualidad, este efecto es notoriamente pequeño, pero no se sabe bien todavía qué aumento podría tolerarse en el CO_2 atmosférico. El problema requiere ser estudiado con mucho más detenimiento.

Pero también la energía nucleoelectrónica da lugar a desechos. Como consecuencia del famoso factor de $2,5 \times 10^6$ (energía producida por gramo de combustible nuclear en comparación con la producida por gramo de combustible fósil), estos desechos son de pequeño volumen y, contrariamente a lo que sucede con el CO_2 , pueden ser confinados. Esto plantea naturalmente la necesidad de conseguir este confinamiento o contención con todas las garantías y por períodos muy largos, lo que constituye un difícil problema. Pero lo que hemos de preguntarnos no es si deseamos enfrentarnos con este problema o no, sino más bien, qué es más tolerable, que se produzcan alteraciones del clima (cuestión que no se conoce bien todavía) o tener que resolver un problema a largo plazo planteado por pequeños volúmenes de desechos. También en este caso hay que comparar categorías completamente distintas, problema típico de sistemas, en el que se pretenden comprender interconexiones.

En el caso de la evacuación del calor residual quedó de manifiesto, incluso en las polémicas públicas, que se trata de un problema general de la producción de energía. Presenta éste dos aspectos: en la conversión de energía se producen a veces pérdidas muy grandes y, además, toda la energía útil termina finalmente en forma de calor de desecho (exceptuada la minúscula fracción que se transforma en energías de enlace). Dedicaremos a este problema una sección completa, en la que se verá que este problema era secundario pero que, debido a la magnitud de la producción de energía, ha pasado a ser de primer orden, y que incluso probablemente constituirá el factor limitante. Una vez que se ha obtenido energía a partir de las energías de enlace, tal energía subsiste y no desaparece (exceptuada la pequeñísima fracción que retorna a dichas energías de enlace). La corriente de energía acaba por desaparecer en el espacio ultraterrestre por radiación infrarroja, por lo que esta corriente tiene que ser integrada o canalizada de manera tal que el deterioro de las condiciones naturales sobre la tierra no exceda de unos límites admisibles. Es obvio que el estudio del problema de la "admisibilidad" constituye parte integrante de los problemas de sistemas.

No se tiene el propósito de tratar aquí la totalidad de los problemas de sistemas que plantean todas las formas de producción de la energía, ni se pretende tampoco afirmar que únicamente la fisión presenta problemas de sistemas. También los presenta, por ejemplo, la fusión [19]. Lo mismo cabe esperar de la energía solar y de la energía de fuentes geotérmicas. Estas, por ejemplo, pueden exigir que se tenga en cuenta la posibilidad de que se produzcan terremotos. El estudio de los problemas de sistemas representa una labor inmensa que requerirá muchos años, y mucho queda por hacer en los próximos. Lo que se trata de señalar aquí es más bien lo siguiente: cada vez se tiene una conciencia más clara de que la energía nucleoelectrónica ha ejercido una función piloto respecto de todas

las modalidades de producción de energía al poner de manifiesto el hecho de que existen problemas de sistemas en cuanto se hace grande la escala de producción de la energía. Están todavía por perfeccionar los patrones de medida que han de utilizarse para evaluar esa escala, pero es evidente que la misma naturaleza y las condiciones de un planeta finito aportan implícitamente tales patrones. Los patrones que hay que establecer explícitamente se refieren más bien a la forma de operar con la energía, a la integración de ésta y al problema de la admisibilidad, que al problema de la producción de energía en sí, contrariamente a lo que sucedía en el pasado.

7. FUNCION DEL ANALISIS DE SISTEMAS EN EL CASO DE LOS SISTEMAS ENERGETICOS

Resulta ahora más fácil especificar la función del análisis de sistemas en el caso de los sistemas energéticos. Probablemente, mediante una generalización adecuada se podría llegar a comprender la naturaleza de los problemas de sistemas trascendiendo de los sistemas energéticos. La citada función se subdivide en las siguientes funciones de segundo orden:

- a) Es necesario identificar y comprender todos los problemas de sistemas inherentes a las diversas soluciones posibles que se ofrecen para el suministro de energía en gran escala. Será ésta una labor permanente y a la que es probable que nunca se dé fin, al irse expandiendo más y más los sistemas energéticos. No se trata de una cuestión algorítmica, sino más bien de médula tecnológica y sociológica. Probablemente, para realizar esta labor se utilizarán a modo de "guiones" y descripciones del estilo de vida. Será de particular interés identificar las diversas interconexiones que adquieren importancia al aumentar el orden de magnitud de la producción de energía. Ello requiere en cierto grado un trabajo orientado hacia diversas disciplinas concretas, pero sólo en la medida en que sea necesario para identificar aquellas cuestiones encanzadas hacia una disciplina determinada. A partir de ese momento, corresponderá a las distintas ramas de la ciencia seguir estudiando las cuestiones así identificadas en relación con el análisis de sistemas.
- b) En el caso de los sistemas energéticos, el problema de sistemas principal parece ser el de la integración de la energía, no el de su producción. Esta integración se hace necesaria en consideración del conjunto de funciones de la tierra. Hay que integrar la energía en:
 - la atmósfera
 - la hidrosfera
 - la ecosfera
 - la socioesfera.
- c) A continuación habrá que identificar y evaluar soluciones alternativas para supuesta en práctica en gran escala. Parecen existir las siguientes soluciones para el suministro de energía en gran escala:
 - la energía de la fisión nuclear
 - la energía de la fusión nuclear
 - la energía solar
 - la energía de las fuentes geotérmicas.

Si bien se han identificado ya en cierta medida los problemas de sistemas que plantea la energía obtenida por fisión nucleare, habrá que hacer lo mismo para las demás soluciones posibles. Para comparar éstas entre sí, será necesario aplicar no sólo métodos de costo/beneficio, sino también de costo/beneficio/riesgo, tanto en sentido especial como general.

d) Finalmente, será necesario minimizar los problemas de sistemas, lo que entraña serios problemas metodológicos. Ya se ha aludido repetidas veces a la comparación de peras con manzanas. Expresado más científicamente quiere decirse que se llega a un problema de metodología de objetivos múltiples y de adopción de decisiones en condiciones de incertidumbre.

Esta labor de análisis de sistemas tiene que acompañar inseparablemente a la evolución tecnológica y sociológica de los sistemas energéticos.

8. INTEGRACION DE LA ENERGIA EN LA ATMOSFERA

Ya se subrayado repetidamente la importancia de lo que podría llamarse la "integración" (embedding) de la energía. Por lo tanto, parece necesario profundizar en este concepto. Como primer paso, consideremos la integración de la corriente de energía en la atmósfera, para lo que será de utilidad considerar la distribución de la energía aportada por el sol, según se indica en la Fig. 8.

La energía que aporta el sol supone 340 vatios por metro cuadrado de la superficie superior esférica de la atmósfera, tomando el valor medio a lo largo del día y de la noche sobre todas las zonas de la tierra. Aproximadamente el 34% de ese valor es reflejado inmediatamente, el 19% es absorbido y transformado en calor ya en la atmósfera, y el 47%, es decir, 160 W/m^2 , alcanza la superficie terrestre. De esta cantidad, el 20% de 340 W/m^2 supone la diferencia entre la radiación infrarroja que escapa y la radiación infrarroja retrodispersada desde la atmósfera a la superficie de la tierra. Otro 22% se invierte en la evaporación de agua para mantener el ciclo de las precipitaciones. Esta evaporación hace que el agua ascienda hasta las capas medias de la atmósfera, donde se condensa y el calor de condensación se disipa en el espacio ultraterrestre. El 5% se invierte en calentar las capas inferiores de la atmósfera. Todo el calor que se transmite a la atmósfera acaba por ser irradiado al espacio ultraterrestre y, por lo tanto, se mantiene un equilibrio entre la aportación de energía solar y el escape de energía térmica. Las temperaturas de la tierra y de la atmósfera son tales que hacen posible precisamente este equilibrio. Tenemos, pues, un patrón de referencia para las densidades de energía de la superficie de la tierra. En el Cuadro 10 se indican convenientemente dispuestas algunas de estas densidades naturales de energía. Debe observarse que la cifra de 55 W/m^2 no es el valor medio mundial sino que se refiere a las zonas más húmedas de los continentes.

Hay que formular algunas observaciones:

- El equilibrio energético es un equilibrio delicado, resultante de una diferencia entre magnitudes muy grandes (en el espectro visible y en el espectro infrarrojo). Por consiguiente, hay que evaluar cuidadosamente los diversos factores que puedan influir sobre los mecanismos de intercambio energético, por ejemplo, el efecto de un aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera o de alteraciones en los distintos albedos que intervienen;
- el ciclo del agua a través de los mecanismos de evaporación y condensación está íntimamente ligado al equilibrio energético;
- el patrón de medida de estos mecanismos naturales viene dado en función de la densidad de energía.

A fines de comparación, se considerarán ahora las densidades de energía creadas por el hombre. En el Cuadro 11 se dan cifras orientativas. Hoy en día, el valor medio mundial de la densidad de energía obra del hombre es sin duda demasiado pequeño para crear ningún problema, pero la cifra anteriormente considerada de 20 kW per cápita para una población de 10^{10} habitantes, cambia el panorama por completo. Un valor de $1,35 \text{ W/m}^2$ en los continentes ya es del orden del valor medio mundial de la densidad de energía correspondiente al viento, las olas, la convección y las corrientes.

Cuadro 10 Densidades naturales de energía

Balance térmico en la superficie de la tierra (valor)	100 W/m ²
Densidad de calor latente de las lluvias sobre los continentes	55 W/m ²
Densidad de calor sensible por °C en el agua de lluvia sobre los continentes	0,1 W/m ²
Vientos, olas, convecciones y corrientes (toda la tierra)	0,7 W/m ²
Fotosíntesis	0,075 W/m ²

Cuadro 11 Densidades de energía creadas por el hombre

	<u>Consumo</u>	
	Actual	Futuro
Valor medio mundial	$\frac{1,5 \text{ KW/cáp} \cdot 3,3 \times 10^9 \text{ hab.}}{1,48 \times 10^{14} \text{ m}^2} = 0,033 \text{ W/m}^2$	$\frac{20 \text{ KW/cáp} \cdot 10^{10} \text{ hab.}}{1,48 \times 10^{14} \text{ m}^2} = 1,35 \text{ W/m}^2$
Rep.Fed.de Alemania	$\frac{4 \text{ KW/cáp} \cdot 6 \times 10^7 \text{ hab.}}{2,5 \times 10^{11} \text{ m}^2} = 1 \text{ W/m}^2$	$\frac{20 \text{ KW/cáp} \cdot 6 \times 10^7 \text{ hab.}}{2,5 \times 10^{11} \text{ m}^2} = 5 \text{ W/m}^2$
Zona industrial (Zona del Ruhr)	$\frac{18 \text{ KW/cáp} \cdot 6 \times 10^6 \text{ hab.}}{6,5 \times 10^9 \text{ m}^2} = 17 \text{ W/m}^2$	$\frac{100 \text{ KW/cáp} \cdot 10^8 \text{ hab.}}{10^{10} \text{ m}^2} = 1000 \text{ W/m}^2$
<u>Producción</u>		
Grandes parques de energía nucleoelectrica 30 000 MW(e) → 100 000 MW(t)		
$\frac{7 \times 10^{10} \text{ W(t) (desecho)}}{3,5 \times 10^6 \text{ m}^2} = 20 000 \text{ W/m}^2$		

Ahora bien, no basta ciertamente con limitarse a considerar los valores medios mundiales. La actividad del hombre no se distribuye por igual en toda la tierra. Ya hoy, en el caso concreto de la República Federal de Alemania, se tiene aproximadamente 1 W/m². Más adelante habrá que contar con regiones altamente industrializadas con valores comprendidos entre 17 W/m² y varios centenares de W/m². En esencia, la cuestión

de si estos valores dan lugar a efectos perjudiciales sobre la atmósfera y el clima está hoy por hoy sin resolver. Es evidente que hay que atacar el problema gradualmente.

El primer nivel a que se harían sentir estas densidades de energía creadas por el hombre podría ser la configuración del ciclo del agua. En la actualidad, ya hay indicios de que se ha alterado el número de lluvias copiosas sobre las zonas industrializadas. Pero estas zonas no producen solamente calor de desecho, sino también dispersiones de sólidos y contaminantes, y hay que tener en cuenta su efecto global. El problema es complejo. Si las zonas industriales crecen, las alteraciones del ciclo del agua podrían adquirir una importancia que trascendiese del ámbito local.

Un segundo nivel al que repercutirían las densidades artificiales de energía sería sobre el clima de grandes zonas al *variar sólo ligeramente los valores medios de ciertos factores climáticos*. Ha de tenerse presente que se pueden producir inestabilidades en el equilibrio atmosférico. Se plantea, pues, la cuestión de si existen zonas de la tierra sensibles (o insensibles) a la producción de calor de desecho.

Un nivel todavía más grave de influjo de las densidades artificiales de energía sería sobre el clima mundial en conjunto. Ello daría lugar también a un aumento de la temperatura media. Ha de tenerse presente que un cambio climático de temperatura de tan sólo 1 a 2 °C es de gran trascendencia.

Se trata de cuestiones sumamente difíciles, que conducen a la necesidad de construir modelos metodológicos y climatológicos que requieren instalaciones de cómputo electrónico muy grandes. Igual importancia tienen los datos de entrada. Queda, sin embargo, mucho por hacer hasta llegar a comprender bien la física de la atmósfera, en la que intervienen ecuaciones no lineales de grado muy alto. En los últimos años, estos problemas han ido atrayendo cada vez más atención [28]. Nombres como Budyko, Smagorinski, Manabe, Washington, Lamb, Fortak, Bryson, Kellogg y otros caracterizan este campo de actividades. La Organización Meteorológica Mundial y el Consejo Internacional de Uniones Científicas proyectan para 1977 el primer experimento mundial GARP (Global Atmosphere Research Programme) (Programa mundial de investigaciones atmosféricas) [29]. Pero tendrán también que participar y fomentarse las ramas de observación de las ciencias climatológicas. En este sector, el programa CLIMAP se encarga de confeccionar mapas del clima de épocas pasadas y proporciona a la vez la oportunidad de poner a prueba las posibilidades de programas climatológicos computerizados de gran envergadura.

Se ha aludido anteriormente a los posibles problemas de sistemas que se plantearían si se aprovechara en gran escala la energía solar. Se desprende de los Cuadros 10 y 11 que las densidades de energía requeridas para los fines de la civilización en ciertas zonas industriales serán del mismo orden o incluso mayores que las densidades naturales de energía. El aprovechamiento de la energía solar en escala industrial importante afectaría a grandes superficies de la tierra, de manera que las alteraciones del albedo y la redistribución de la energía desembocarían en las mismas cuestiones ya mencionadas anteriormente en relación con el calor residual.

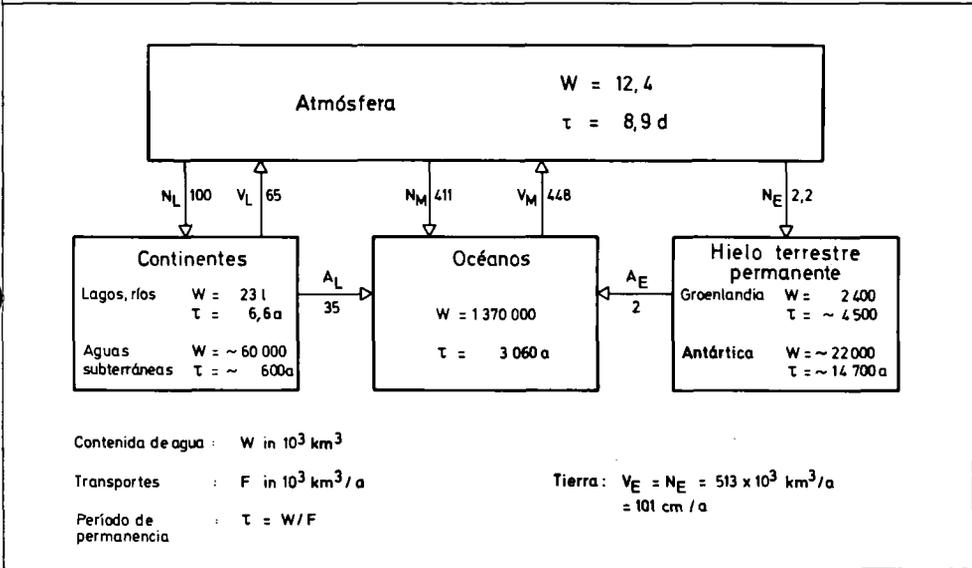
Hay que preguntarse si no será necesario acompasar las correspondientes actividades de investigación y desarrollo en las ciencias meteorológicas y en la esfera de la energía.

9. INTEGRACION DE LA ENERGIA EN LA HIDROSFERA

La Fig. 10 aporta suficientes datos de partida para tratar este tema. La cantidad media de lluvia sobre la tierra es de 101 cm/año, lo que da un total de $513 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{año}$, y la misma cantidad tiene necesariamente que evaporarse. Pero la razón entre la evaporación y la cantidad de lluvia no es la misma en el caso de los océanos que en el de los continentes.

Fig.10 Ciclo del agua en la tierra

(según Lvovich 1970)



El agua de lluvia es transportada de los océanos a los continentes para alimentar las escorrentías, es decir, los ríos y los arroyos; la escorrentía total es de $35 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{año}$. El Cuadro 12 representa el consumo de agua. Contrariamente a una creencia muy generalizada, el riego supone actualmente la mayor parte del consumo de agua, pero se cree que la situación cambiará para el año 2000. Lvovich [30] ha calculado que el consumo en el año 2000 será aproximadamente de $13\,000 \text{ km}^3/\text{año}$ o, lo que es lo mismo, $1/3$ de la escorrentía total. Obsérvese, no obstante, que los valores medios mundiales no reflejan casi nunca adecuadamente la realidad y que el panorama regional puede diferir radicalmente. En la zona del Ruhr se pierden ya anualmente por evaporación $0,63 \text{ km}^3$ del agua empleada en la industria, lo que equivale a 14 cm/año o, aproximadamente, a $1/3$ la escorrentía local. Estas consideraciones no se refieren todavía a la energía, pero constituyen un punto de referencia para evaluar las relaciones que hacen al caso.

En primer lugar, está la desalación. Se ha calculado que podrían cultivarse $32 \times 10^6 \text{ km}^2$ de tierras (la superficie total de los continentes es de $148 \times 10^6 \text{ km}^2$). Aproximadamente $20 \times 10^6 \text{ km}^2$ son terrenos áridos y es preciso suministrarles la cantidad suficiente de agua. En el Cuadro 13 se indica que se precisaría la cantidad de agua equivalente a 200 cm/año de lluvia, ya que esta cifra supone la diferencia entre las zonas áridas y las tierras cultivadas en zonas que eran originariamente áridas. La cifra de 200 cm/año multiplicada por $20 \times 10^6 \text{ km}^2$, da $40\,000 \text{ km}^3/\text{año}$. De la Fig. 10 se desprende evidentemente que sólo la desalación puede proporcionar cantidades tales de agua. En la actualidad, el proceso de desalación requiere aproximadamente 50 kWh/m^3 , lo que supone 7 Q/año y hace casi duplicarse la cifra del consumo de energía anteriormente considerada de 20 kW per cápita para una población de 10^{10} , con lo que se llega a un total de $7 + 6 = 13 \text{ Q/año}$. Por supuesto, en las consideraciones que anteceden sólo se trata de órdenes de magnitud.

Desde luego, el aprovechamiento del terreno mediante el cultivo de zonas áridas, la utilización del agua y la utilización de la energía son aspectos que van unidos.

Cuadro 12 Consumo de agua (según Lvovich, 1969) y recursos de agua

Consumo de agua	1965			2000		
	Consumo	Desechos	Evaporación	Consumo	Desechos	Evaporación
Abastecimiento urbano	98	56	42 km ³ /a	950	760	190 km ³ /a
Riego	2 300	600	1700 "	4 250	400	3 850 "
Industria	200	160	40 "	3 000	2 400	600 "
Centrales eléctricas	250	235	15 "	4 500	4 230	230 "
Totales	2848	1051	1797 "	12 700	7 790	4 910 "

Cuadro 13 Valores representativos del balance térmico en Egipto (según Flohn, 1971)

	Terrenos áridos	Terrenos cultivados
Irradiación total	280 W/m ²	280 W/m ²
Albedo	25 %	10 %
Radiación del cuerpo, valor neto	32,5 W/m ²	38 W/m ²
Balance neto Q	170 W/m ²	205 W/m ²
a) Evaporación	2 cm /a	220 cm /a
b) Calor de vaporización	1,7 W/m ² \approx 1% de Q	176 W/m ² \approx 86% de Q
c) Calor sensible + resto	99% de Q	14 % de Q
Razón de Bowen: $\frac{\text{Calor sensible}}{\text{Calor latente}}$	104	0,16

Existen otras relaciones mutuas entre la energía y el agua, pero, de hecho, la densidad de las lluvias limita la producción de electricidad. La diferencia entre las precipitaciones y la evaporación, 40 cm/año por término medio, alimenta la escorrentía que, por lo tanto, es proporcional a las precipitaciones si se consideran valores medios correspondientes a superficies suficientemente grandes de la tierra. Se puede considerar ahora la cantidad de calor de desecho que es capaz de evacuar la totalidad de las escorrentías, bien por refrigeración en corriente continua, bien en torres de enfriamiento. En el Cuadro 14 se

Cuadro 14 Límites impuestos a la producción de electricidad por la evacuación de calor de desecho

Escorrentía total $\text{---} \circ \text{---}$ 40 cm / a

A) Aumento de la temperatura de la escorrentía total de ΔT :

$$\frac{N_{th}}{F} = 0,054 \cdot \Delta T \text{ W/m}^2$$

(por ejemplo, $\Delta T = 2^\circ\text{C} \longrightarrow \frac{N_{th}}{F} = 0,1 \text{ W/m}^2$)

B) Escorrentía total evaporada (torres de enfriamiento)

$$\frac{N_{th}}{F} = 40 \text{ W/m}^2$$

resumen los datos correspondientes. Debido a la relación existente entre precipitaciones y escorrentías, los límites se expresan también aquí en forma de densidad de energía, lo que está intrínsecamente relacionado con el aprovechamiento de las tierras. Si se calienta en 5°C el volumen total de la escorrentía, sólo podrán evacuarse $0,25 \text{ W/m}^2$ y esta consideración, aunque indudablemente muy simplista, conduce a veces a resultados sorprendentemente exactos. Por ejemplo, en la República Federal de Alemania aproximadamente 30 GW de la producción eléctrica se basan en la refrigeración en corriente continua. El calor de desecho es de 60 GW más o menos, o sea, $0,24 \text{ W/m}^2$, lo que plantea realmente una situación en la que el calentamiento de ríos y lagos constituye motivo de legítima preocupación.

Las torres de enfriamiento sirven de ayuda durante algún tiempo, pero hay que tener en cuenta que en estas torres sólo puede consumirse una fracción de las escorrentías. Si se comparan las densidades de energía citadas con las que el hombre generará el día de mañana, se ve una vez más que ha de plantearse un problema, como sucede efectivamente.

En estudios más detallados llevados a cabo en la República Federal de Alemania se llega a la conclusión de que las torres de enfriamiento probablemente sólo servirán de ayuda durante los próximos quince años [31].

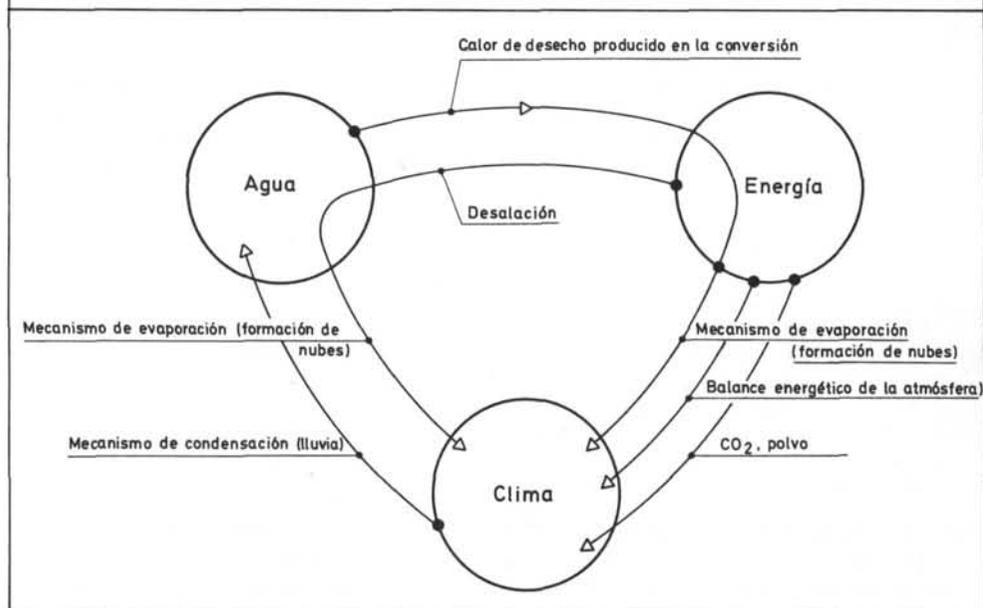
Anteriormente se ha mencionado una tercera relación entre el agua y la energía: el efecto de realimentación del calor de desecho en el ciclo del agua y en el volumen de precipitaciones.

En la Fig. 11 se intenta aclarar mejor las interconexiones que existen entre el agua, la energía y el clima. Se trata de una especie de resumen de la presente sección y de la anterior.

La mayor parte de lo dicho hasta ahora se refiere al agua de los continentes, pero los océanos constituyen también un gran depósito de agua. La evacuación de calor en éstos es viable desde el punto de vista de la capacidad calorífica, pero se plantean problemas ecológicos y de dinámica de las corrientes marinas. Sería preciso encontrar en los océanos zonas estables e insensibles a la descarga de grandes cantidades de calor de desecho.

Esto supondría desligar las fuertes interconexiones que existen entre el agua, la energía y el clima, como se indica en la Fig. 11. Si se instalan parques de generación (nuclear) de energía en las orillas de los océanos o en los océanos mismos, se tropieza con el problema de transportar la energía a mayores distancias. Para apreciar este problema en su justo

Fig. 11 Interconexiones entre agua, clima y energía



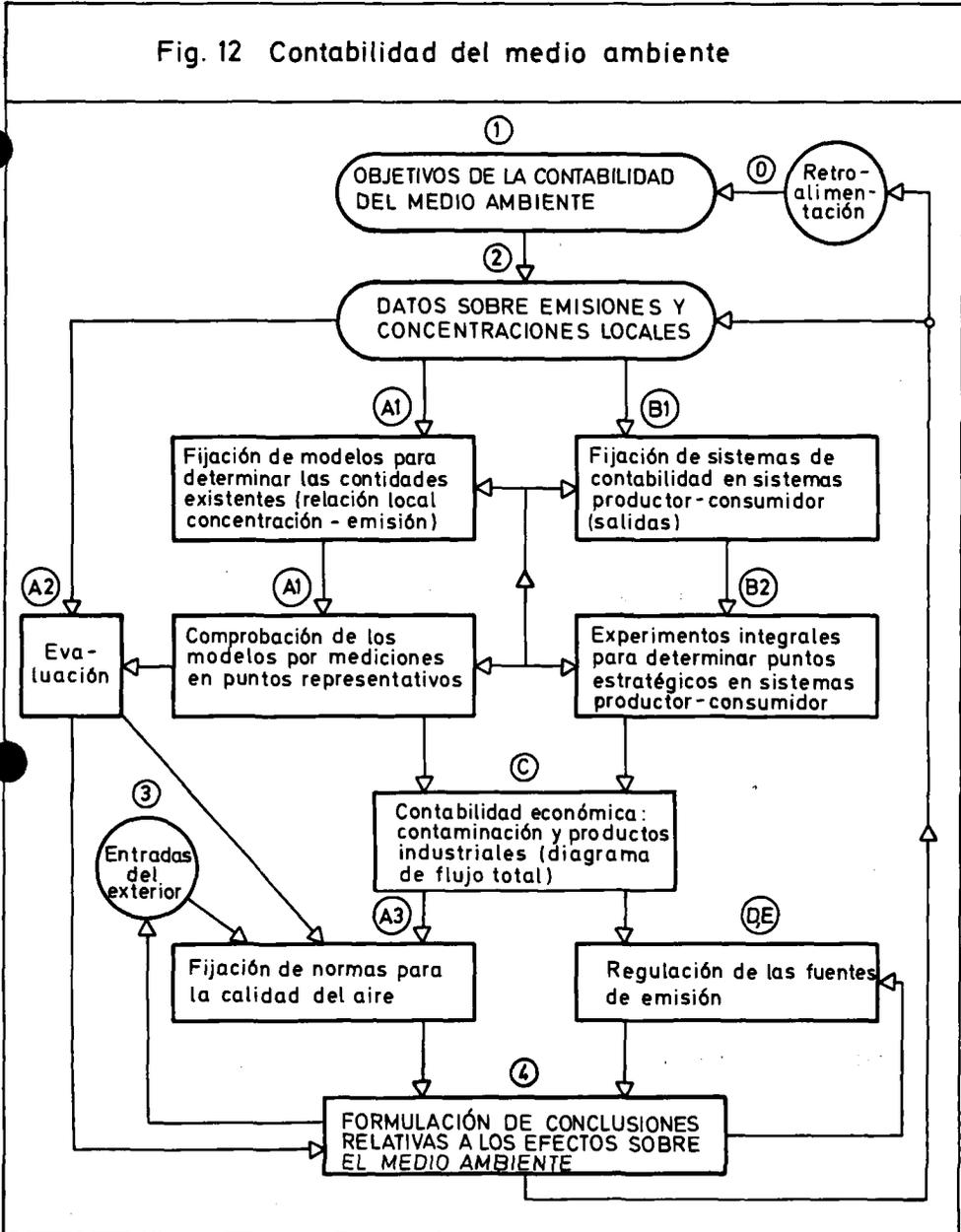
valor hay que tener presente que hoy en día no se transporta energía eléctrica a distancias verdaderamente grandes. En el caso de la República Federal de Alemania, sólo se transportan grandes cantidades de electricidad a distancias no superiores a unos 150 km por término medio. La mayor parte de las líneas de transporte de alta tensión sólo sirven para estabilizar la distribución de energía eléctrica en las distintas zonas. Existen varias posibilidades para el transporte de energía en gran escala: líneas de ultraalta tensión, cables superconductores, gaseoductos de hidrógeno, etc. Hasta el momento, la mayor parte de los trabajos de investigación y desarrollo tecnológicos en gran escala se ha venido dedicando al problema de la producción de energía, por ejemplo, al desarrollo de la energía nucleoelectrica. Sin embargo, si se considera la utilización de la energía, de las tierras y del agua como un solo problema complejo, resulta que el problema tecnológico del transporte de la energía puede tener mayor importancia que el desarrollo de nuevas fuentes de energía.

10. INTEGRACION DE LA ENERGIA EN LA ECOSFERA

La integración del empleo de la energía en la ecosfera conduce, entre otros, a determinados problemas de índole ambiental, aunque, por descontado, no todos los problemas de este género surgen en escena por este camino. Probablemente, lo razonable sería estudiar en primer lugar sistemas de contabilidad. Las centrales eléctricas, las zonas urbanas y los vehículos constituyen emisores de contaminantes, y estas emisiones se concentran en el medio ambiente. Mediante modelos meteorológicos e hidrológicos sencillos o complicados se podría determinar qué nexos existen entre las citadas emisiones y las concentraciones ambientales. Posiblemente, la organización de sistemas de vigilancia pudiera contribuir a sentar la base experimental de estas relaciones y permitiera comprobar la validez de los modelos. Análogamente, quizá fuera posible establecer ciertas conexiones entre la producción de bienes industriales y determinadas emisiones, con lo que se llegaría a la

relación: productos – emisiones – concentración de contaminantes. De este manera, llegará el momento en que sea posible establecer un sistema global de contabilidad para el flujo de contaminantes, lo que entrañará la posibilidad de controlar la contaminación. Para apreciar bien esta cuestión conviene reparar en que el establecimiento del sistema mundial de contabilidad de materiales nucleares que actualmente está poniendo en práctica el Organismo Internacional de Energía Atómica [32] está resultando ser la clave para operar sin riesgos con dichos materiales. La universalidad de este enfoque plantea también ciertos problemas de gestión, y el autor propone que se estudie este

Fig. 12 Contabilidad del medio ambiente



aspecto de la universalidad. Al hacerlo, habría que reconocer que el análisis de sistemas desempeñó un papel importante en la creación del actual sistema de salvaguardias del OIEA [33].

Para poder llegar a determinadas conclusiones a partir de los resultados obtenidos con los sistemas contables se precisan normas. El establecimiento de estas normas permitiría, por ejemplo, fijar determinados niveles de actuación. Entran aquí en escena el conocimiento incompleto de la toxicología, las decisiones a adoptar en condiciones de incertidumbre, la aceptación pública, el proceso legislativo y otros aspectos. Quizá ilustre la situación la polémica sostenida en años recientes en los Estados Unidos y en otros países acerca de las normas adecuadas para las intensidades de dosis radiotóxicas. Se debería comprender mejor desde este punto de vista el fenómeno del asunto Gofman-Tampling, el proceso de reglamentación para llegar a las intensidades de dosis "más bajas posibles", la función de los debates públicos en el proceso de adopción de decisiones y otros sucesos de los últimos años. La Fig. 12 ilustra sumariamente el problema de la contabilidad del medio ambiente que se acaba de examinar.

11. INTEGRACION DE LA ENERGIA EN LA SOCIOESFERA – RIESGO Y FIABILIDAD

Una reflexión detenida sobre el problema de la contaminación conduce también a la esfera del control de la fiabilidad y de la evaluación de riesgos. Una vez más será de utilidad estudiar el Cuadro 9. Además de integrar la energía en la atmósfera, se plantea el problema del riesgo.

El riesgo tiene dos componentes: una, debida a la falta de conocimientos que, en principio, pueden adquirirse; y otra que es indeterminable incluso en principio [34]. Esta segunda componente se debe al hecho de que la aplicación estricta de modelos científicos deterministas requiere un conocimiento completo de las condiciones iniciales y en los límites, incluso si se conocen perfectamente las leyes de la naturaleza. En muchos casos es imposible adquirir este conocimiento absoluto si no se dispone de un "demonio de Laplace". Entonces surge un riesgo de la segunda clase.

La liberación de CO_2 en la atmósfera, junto con otros contaminantes, constituye un riesgo de la primera clase. En principio, debería ser posible comprender si un aumento del contenido en CO_2 afectará o no al clima, pero en el momento actual no lo es.

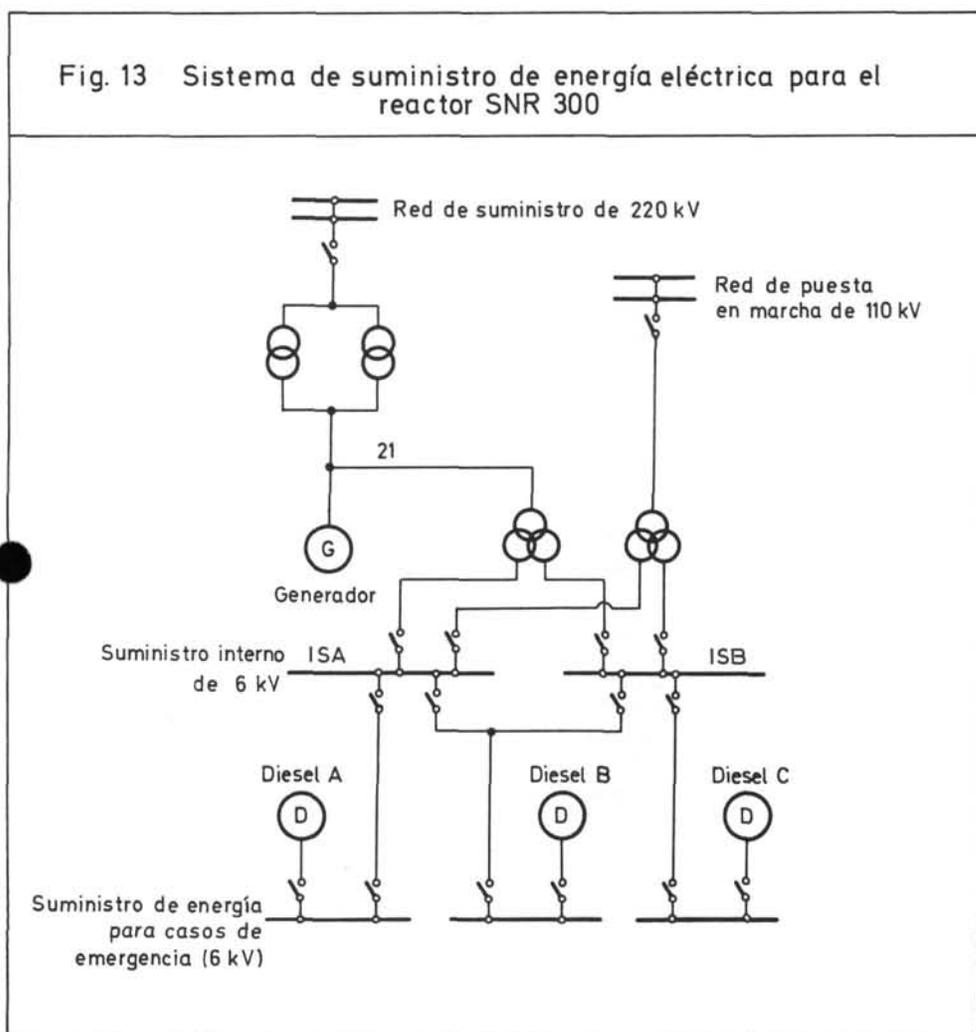
La energía nucleoelectrónica entraña un riesgo de la segunda clase: es posible producir energía sin afectar en absoluto al medio ambiente, al menos en principio. Sin embargo, las reacciones en el dominio del núcleo atómico dan lugar a la producción de elementos radiactivos (esto también es cierto respecto de la energía obtenida en reactores técnicos de fusión en los que se emplea el proceso D-T [19]). Debido al factor de $2,5 \times 10^6$ que existe entre la energía nuclear y la energía fósil, los elementos radiactivos producidos son tan reducidos en volumen y en peso que pueden ser confinados, contrariamente al problema que supone la liberación en el medio ambiente de los productos de combustión de los combustibles fósiles, como se ha señalado anteriormente. El confinamiento es, pues, un ejemplo de una medida tecnológica, pero todas las medidas tecnológicas pueden fallar y aquí radica el riesgo.

Mientras que los riesgos de la primera clase pueden eliminarse en principio, los riesgos de la segunda clase, en principio, subsisten. Ahora bien, el riesgo que encierra una medida tecnológica puede hacerse menor que cualquier cifra pequeña dada, el límite del riesgo residual. Se llega así al dominio del control de la fiabilidad. Las investigaciones espaciales, la electrónica y más recientemente la energía nuclear, han sido las ramas en que se han desarrollado y aplicado los métodos de control de la fiabilidad. El instrumento principal del control de la fiabilidad es establecer un esquema de fallos. La

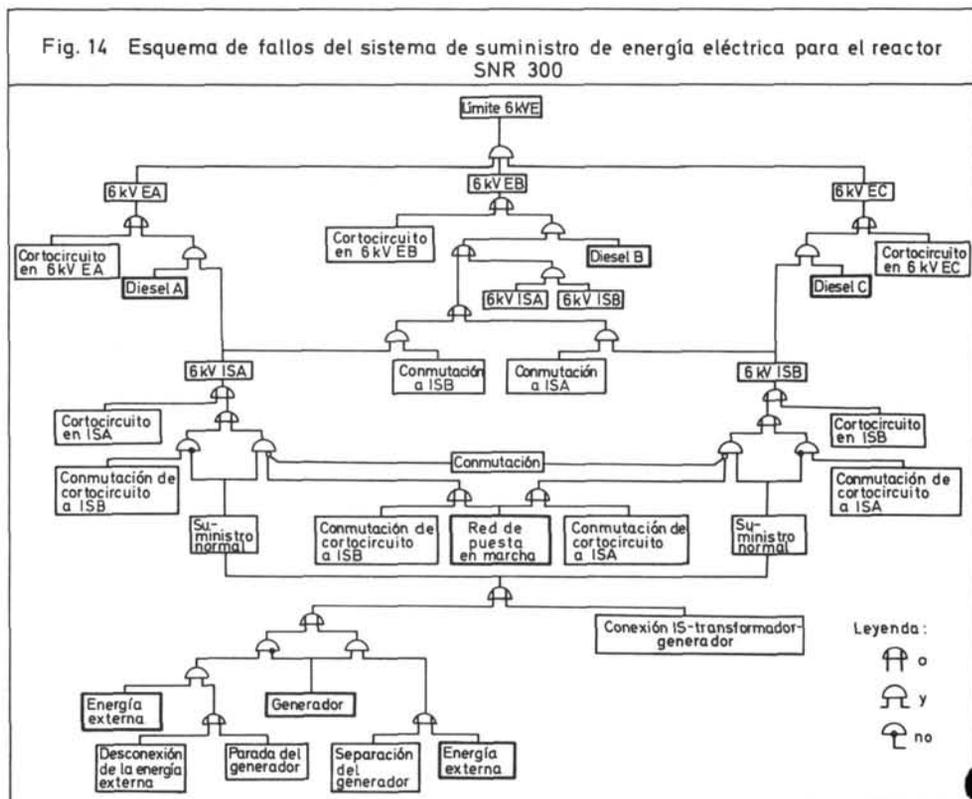
cima de este esquema representa un suceso accidental no deseado. El empleo de símbolos lógicos ayuda a representar la estructura lógica de la fiabilidad de un dispositivo tecnológico dado. La Fig.13 representa un sistema para el suministro de emergencia de energía al reactor reproductor rápido germano-belga-holandés SNR 300 y la Fig. 14 el esquema de fallos que se utilizó para evaluar la fiabilidad del sistema de suministro. Una vez establecido el esquema en cuestión es posible evaluar el ritmo de incidencia de fallos en el sistema tecnológico a base de una simulación efectuada con computadoras, en la que se utilizan, entre otras, técnicas del tipo Monte Carlo.

Quedan en pie, sin embargo, varios problemas de índole metodológica: en la mayoría de los casos faltan datos de entrada (la frecuencia de fallos de los distintos componentes de los sistemas tecnológicos), es difícil asegurar que el esquema de fallos considerado basta para los fines en cuestión, han de evaluarse límites de confianza, etc. Por otra parte, será necesario disponer de procedimientos de control de la fiabilidad en la mayoría de los proyectos tecnológicos que se emprendan en el futuro, porque la sociedad tiene que apoyarse cada vez más en la tecnología.

Fig. 13 Sistema de suministro de energía eléctrica para el reactor SNR 300



Aun cuando se dominen plenamente los métodos de control de la fiabilidad, no se podrá conseguir que la fiabilidad de un dispositivo tecnológico dado sea exactamente la unidad. El límite del riesgo residual será siempre distinto de cero, aunque sea muy pequeño. Así, pues, será menester fijar límites para estos riesgos residuales, de la misma manera que fue necesario establecer normas para evaluar los sistemas de contabilidad de los contaminantes. La fijación de los límites de diseño sólo puede hacerse a partir de la evaluación de los riesgos existentes. La evaluación de riesgos como disciplina científica se



encuentra sólo en sus comienzos y es particularmente obra de C. Starr y Erdmann, de la Universidad de California, Los Angeles, y de H. Otway (Laboratorio Científico de Los Alamos, Universidad de California, y OIEA), a quienes debe mencionarse aquí expresamente. En el Cuadro 15 se presenta un espectro de los riesgos existentes. Starr [35] ha logrado evaluar una serie de cuasileyes. Por ejemplo, parece existir una diferencia entre los riesgos voluntarios y los riesgos involuntarios, que difieren en un factor de 10^3 . Además, también parece que en el caso de los riesgos voluntarios existe una relación entre el riesgo y el beneficio esperado, hecho que ilustra la Fig. 15. La Fig. 16 representa un enfoque para responder racionalmente a la cuestión: ¿qué grado de seguridad es "suficientemente seguro"? Ciertamente, el problema general del análisis de sistemas, el de la cuantificación, se presenta especialmente arduo en el caso de la evaluación de riesgos. Sin duda, es preciso profundizar en esta esfera, con lo que se podría llegar a procedimientos para la evaluación de riesgos asentados sobre una base más firme.

Cuadro 15 Accidentes mortales, Estados Unidos, 1967

Tipo de accidente	Total de muertes	Probabilidad de muerte por persona y año
Vehículos de motor (VM)	52 924	$2,7 \times 10^{-4}$
Caídas	20 120	$1,0 \times 10^{-4}$
Incendios y explosiones	7 423	$3,7 \times 10^{-5}$
Armas de fuego	2 896	$1,5 \times 10^{-5}$
Aviación	1 799	$9,0 \times 10^{-6}$
Ferrocarriles (excepto VM)	997	$5,0 \times 10^{-6}$
Corriente eléctrica	376	$1,9 \times 10^{-6}$
Rayos	88	$4,4 \times 10^{-7}$
Explosión de recipientes a presión	42	$2,1 \times 10^{-7}$
Tranvías (excepto VM y colisiones con trenes)	5	$2,5 \times 10^{-8}$

(National Safety Council , Chicago 1970)

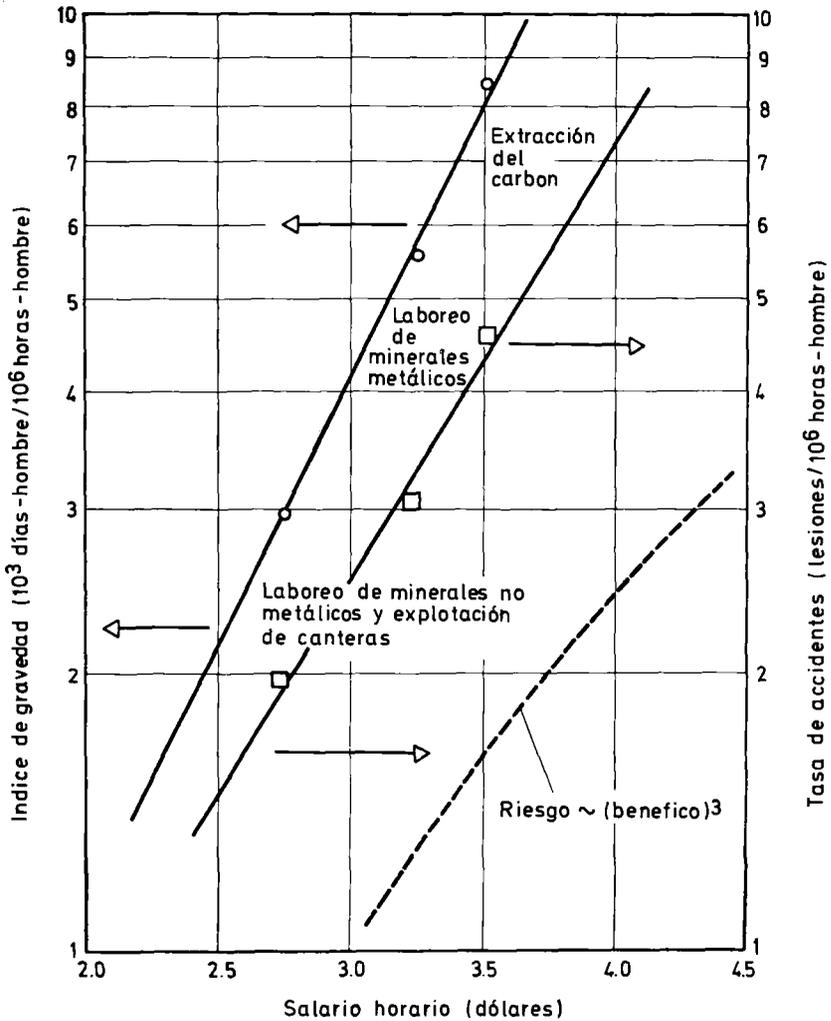
12. SISTEMAS ENERGETICOS

Ahora debería ser posible aboradar en primera aproximación el significado de la expresión "sistemas energéticos".

Ya hemos dejado sentado sin lugar a dudas que la sencilla relación expresada en la Fig. 6 no es suficiente. Como se ha visto, la producción de grandes cantidades de energía a un cierto plazo no constituirá una restricción: se dispondrá de suficiente energía. Pero, probablemente, se plantearán otras graves restricciones. Una de ellas es la cantidad de agua de refrigeración, si las centrales se construyen en los continentes. Como ha podido apreciarse, lo que tiene límites es la densidad de energía. La carga térmica que puede transmitirse a la atmósfera constituye también un límite que viene dado en función de una densidad. Lo mismo sucederá durante mucho tiempo por lo que se refiere a la carga de contaminación, aunque es posible que en algún momento se haga patente la existencia de límites absolutos. Como ejemplo podríamos quizá citar el CO_2 . Una vez centrada la atención sobre el término densidad, puede apreciarse que los límites de riesgo pueden

Fig. 15 Tasa de accidentes en minería en función del incentivo

(C. Starr, Benefit-Cost Studies in Socio-Technical Systems, abril de 1971)

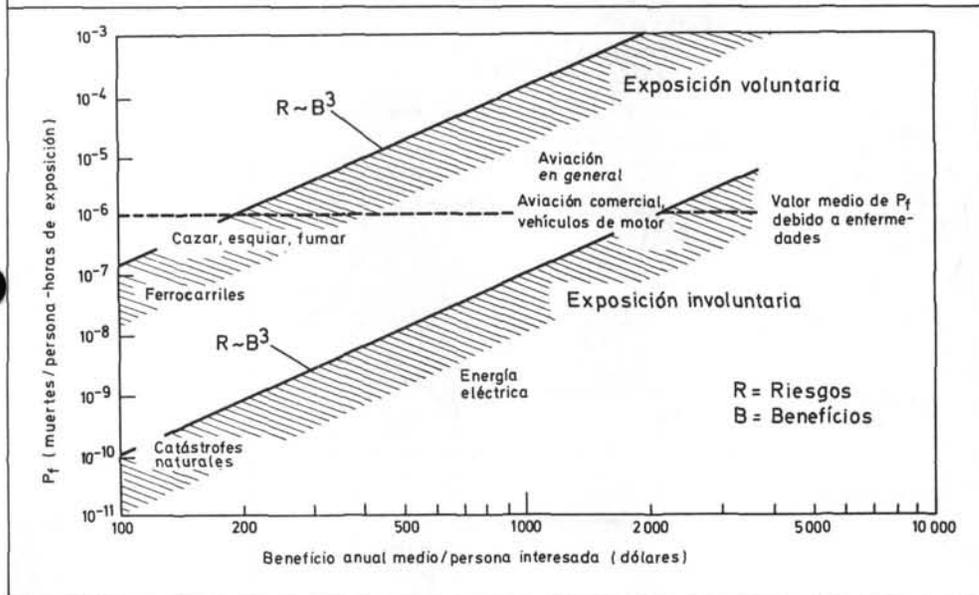


expresarse también como una densidad. Las polémicas en torno al emplazamiento de los reactores señalan en esta dirección. Pro ejemplo, un aeropuerto, una fábrica química y dos centrales nucleares, ubicados todos en un mismo lugar, podrían considerarse como una acumulación excesiva de riesgos. Es decir, que procedería diluir, distribuir estos riesgos.

En la Fig. 17 se trata de ilustrar lo que podría significar la expresión sistemas energéticos. Las líneas de trazos representan la interpretación tradicional de la Fig. 6, y los círculos denotan restricciones. Cada restricción se refiere también a la admisibilidad y, por tanto, al

Fig. 16 El riesgo en función del beneficio -
Exposición voluntaria e involuntaria

(C.Starr, Benefit-Cost Studies in Socio-Technical Systems, abril de 1971)

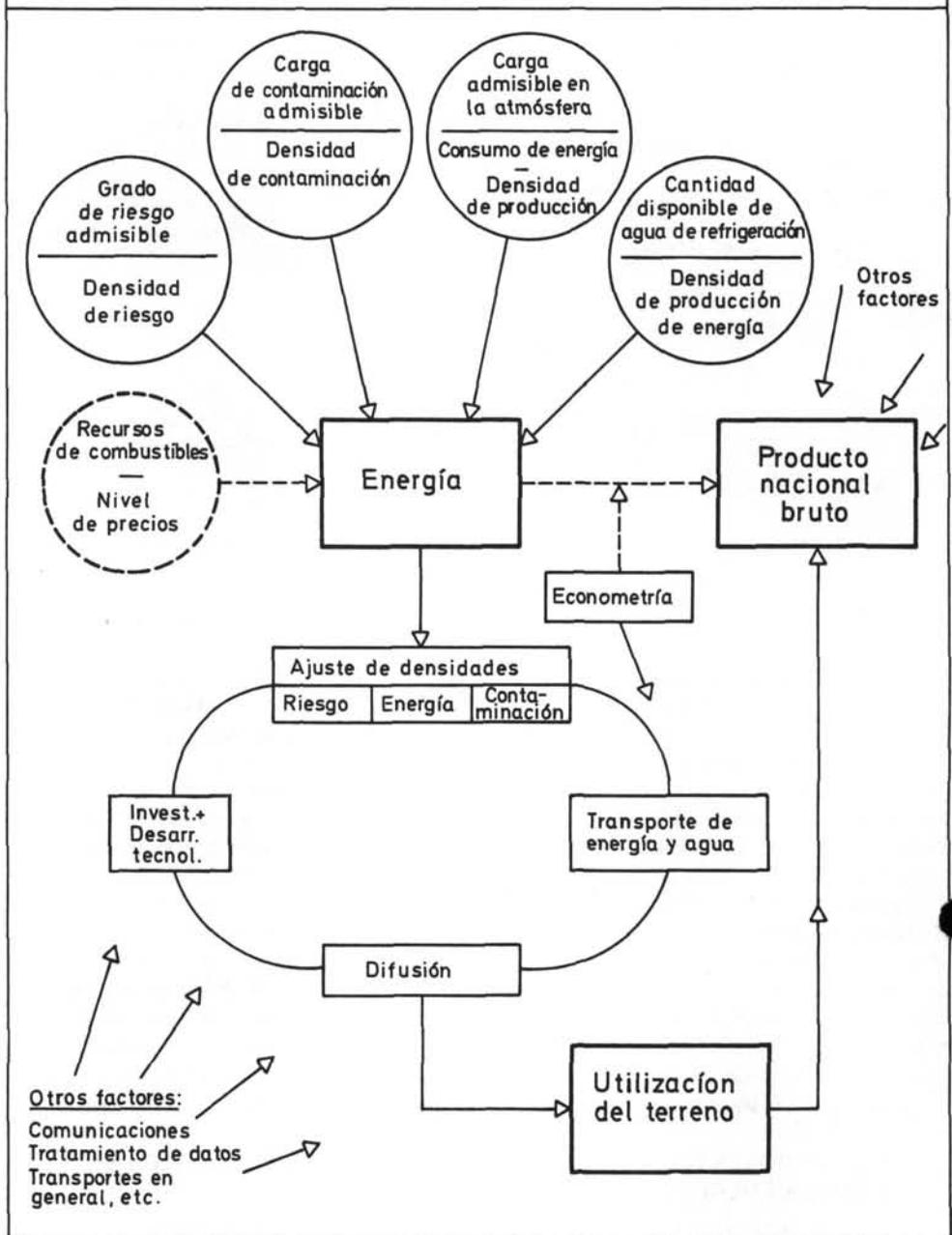


aspecto sociológico de las restricciones. Dentro del marco de estas restricciones puede producirse energía. Un proceso de optimación debería conducir ahora a un ajuste de las densidades de riesgo, de energía y de contaminación. Los medios que harán esto posible son el desarrollo tecnológico, la distribución de todas las instalaciones de que se trata y el transporte de la energía y del agua a mayores distancias. En esta optimación se utilizaría una función objetivo generalizada, como se ha visto en la sección 3. Con ello, la econometría pasa a ser una disciplina más general que antes. Cuando se trate de un enfoque de política a largo plazo, es evidente que hay que tener en cuenta otros factores. Por ejemplo, aparecen también en escena las comunicaciones, el tratamiento de datos, las necesidades generales de transporte y otros elementos. Pero el panorama es ya lo suficientemente amplio para describir el impacto de la energía y para poder integrar adecuadamente los sistemas energéticos en un suprasistema. El resultado de semejante optimación es un plan de utilización del terreno. Solamente a través de esta utilización del terreno puede la energía generar un producto nacional bruto. Es decir, que la utilización que se haga del terreno constituye una de las principales interconexiones entre los sistemas energéticos y otros sistemas importantes de la infraestructura de la civilización moderna.

13. OBSERVACIONES ADICIONALES SOBRE LA FASE A LARGO PLAZO DEL PROBLEMA ENERGETICO

Se ha señalado anteriormente que debería conseguirse llegar a la fase a largo plazo del problema energético mediante una suave transición a través de la fase a plazo medio. Para ello es necesario comprender los fundamentos teóricos de las soluciones asintóticas del problema de la energía. Después de las observaciones que se han hecho acerca de la integración de la energía, resulta ahora más fácil extenderse un poco más sobre un ejemplo de solución asintótica del problema energético.

Fig. 17 Energía - Utilización del terreno - Producto nacional bruto



Hemos visto que la idea de crear grandes parques de generación de energía nucleoelectrica podría producir un cierto desacoplamiento en la interconexión entre agua, energía y clima. Por ello, quizá sea necesario encontrar en los océanos zonas que sean especialmente insensibles, tanto desde el punto de vista meteorológico como ecológico, a la liberación

de grandes cantidades de calor de desecho. A este fin, se precisarán probablemente grandes modelos meteorológicos y ecológicos. Los mencionados parques nucleares deberían ser lo bastante grandes para comprender la totalidad del ciclo del combustible nuclear. Esto quiere decir que se precisaría una magnitud mínima del orden de 30 GW(t).

La concentración del ciclo del combustible nuclear eliminaría una serie de preocupaciones en torno a la energía nuclear. Por ejemplo, con la concentración de las instalaciones, todo el plutonio permanecería en un solo lugar y los operadores serían personas altamente capacitadas y eficientes. El límite superior de magnitud de estos parques nucleares viene determinado probablemente por consideraciones relativas a la seguridad en el suministro de energía. Como se ha visto anteriormente, la producción de electricidad no constituye más que un aspecto de la cuestión. No es necesariamente cierto que una economía basada exclusivamente en la electricidad constituya una solución óptima. Por ello, pensamos también en la producción de hidrógeno en reactores de alta temperatura. Cabría esperar rendimientos de conversión del 75%. En una economía futura más o menos estable, la ganancia de reproducción en los reactores reproductores rápidos de gran tamaño no tiene por qué obtenerse forzosamente en forma de plutonio. También podría obtenerse uranio-233 que serviría para alimentar reactores de alta temperatura refrigerados con gas. El transporte de la electricidad y el del hidrógeno no deberían constituir problemas demasiado difíciles. Anteriormente se han mencionado nuevos aspectos tecnológicos de esta cuestión. El hidrógeno se podría bombear a través de las redes de conducciones utilizadas en la fase a plazo medio de la evolución energética, en la que el combustible secundario consiste en hidrocarburos gaseosos. Sería así posible la transición suave a que se ha aludido.

Tanto la electricidad como el hidrógeno son combustibles secundarios muy limpios, y el hidrógeno es además susceptible de toda forma de transporte y empleo industrial. Sólo son de esperar efectos de contaminación de muy reducida importancia.

Se precisa una gran labor para estudiar en detalle todos los aspectos de un plan para la solución asintótica del problema energético y, en particular, los problemas de sistemas que plantea. Las observaciones aquí hechas no constituyen más que un ejemplo de lo que podría ser semejante solución. Han de estudiarse también otras posibles soluciones. Por ejemplo, debería llevarse adelante el proyecto de Peter Glaser para recolectar la energía solar en el espacio ultraterrestre [23] y profundizarse en los problemas de sistemas que suscita.

El presente trabajo no pretende representar una parte completa de esa labor. Su exclusiva finalidad es ayudar a comprender el alcance del problema de los sistemas energéticos.

REFERENCIAS

- [1] M.K. Hubbert: The energy resources on the earth, Scientific American, septiembre de 1971.
- [2] Véase por ejemplo, Herbert S. Rickey: "Coal: Prospects and Problems", Actas, National Energy Forum, sept. 23-24, 1971, Patrocinado por: The National Division of the US National Committee de la Conferencia Mundial de la Energía.
- [3] Véase, por ejemplo: "Quandary", R-1084-NSF/CSRA, R-1115-RF/CSA, R-1116-NSF/CSA, Sept. de 1972, RAND, Santa Monica, Calif.
- [4] Walter J. Levy: Oil Power, Foreign Affairs, Julio de 1971, Vol.49, No.4.
- [5] Walter J. Levy: An Atlantic-Japanese Energy Policy, Europe - America Conference, Amsterdam (Países Bajos) 27 de marzo de 1973.
- [6] Stephen D. Bechtel Jr.: "Energy for the Future: New Directions and Challenges", Reunión anual de la American Gas Association, Cincinnati, Ohio, 16 de octubre de 1972. Véase también: Nuclear News, publicación de la American Nuclear Society, julio de 1973, Vol.16, No.9.

- [7] H.C. Hottel y J.B. Howard: *New energy technology, some facts and assessments*, Capítulo 3, MIT Press, Cambridge, Mass., y Londres (Inglaterra) 1971.
- [8] P.F. Schweizer, C.G. Love y J. Hunter Chiles III: *A regional energy model for examining new policy and technology changes*, comunicación oral en la conf. del MIT sobre: *Energy, Demand, Conservation and Institutional Problems*, febr. de 1973, Massachusetts Inst. of Techn., Cambridge, Mass., Estados Unidos.
- [9] Alan S. Manne: *On linking energetics to dynamics*, Parte 3 del estudio: *Multi Level Planning, Case Studies in Mexico*, Universidad de Stanford.
- [10] A.M. Weinberg y P. Hammond: *Actas de la cuarta Conf. Int. sobre la Utilización de la Energía Atómica con Fines Pacíficos*, Ginebra, sept. 1971.
- [11] C. Starr: *Energy and power*, *Scientific American*, Vol. 225, No. 3, sept. de 1971, p. 37.
- [12] Earl Cook: *Comunicación privada, Memoria para el Congressional Research Service, Library of Congress of the United States*. En prensa.
- [13] M.K. Hubbert: *Actas del Simposio del OIEA sobre las centrales nucleares y el medio ambiente*, Nueva York, agosto 1970, IAEA-SM-146/1.
- [14] V.E. McKelvey y D.C. Duncan: *United States and World Resources of Energy, Mineral Resource Development Ser.*, No 26, II (1969) 9.
- [15] R.V. Davies y col.: *Extraction of uranium from sea water*, *Nature* 203, 1110 (1964).
- [16] Véase, por ejemplo: *Ergänzendes Material zum Bericht: "Kernbrennstoffbedarf und Kosten verschiedener Reaktortypen in Deutschland"*, KFK 466, Septiembre de 1966, Gesellschaft für Kernforschung, Kernforschungszentrum Karlsruhe (R.F. de Alemania)
- [17] La última conferencia internacional sobre reactores reproductores rápidos tuvo lugar en Karlsruhe (R.F. de Alemania) del 9 al 13 de octubre de 1972. Las actas dan clara idea del desarrollo de los reactores rápidos: *Ingeniería de reactores rápidos para su funcionamiento seguro y fiable*. Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung.
- [18] A.M. Perry y A.M. Weinberg: *Thermal breeder reactors*, *Annual Review of Nuclear Science*, Vol. 22, 1972.
- [19] W. Häfele y C. Starr: *A Perspective on the Fusion and the Fission Breeders*, Kernforschungszentrum Karlsruhe y University of California, Los Angeles, 1973, en prensa.
- [20] J.D. Lee: *Tritium breeding and energy generation in liquid lithium blankets*, *Actas de la BNES Conf. on Nuclear Fusion Reactors*, Culham, Sep. de 1969, BNES 1970.
- [21] D.E. White: *U.S. Geolog. Surv. Circ. 519*, Wash. (1965).
- [22] R.W. Rex: *Geothermal energy, the neglected energy option*, *Science and Public Affairs, Bulletin of the Atomic Scientists*, Octubre de 1971, Vol. XXVII, No. 8.
- [23] P.E. Glaser: *Power from the Sun: its Future Science*, Vol. 162, 1968.
- [24] P.E. Glaser: *Power without pollution*, *Journal of Microwave Power*, Vol. 5, No.4, Dic. de 1970.
- [25] W. Häfele: Véase por ejemplo: *150 Jahrfeier*, Munich, 1972.
- [26] H. Bükler, P. Jansen, W. Sassin y W. Schikarski: *Kernenergie und Umwelt*, Tabla 21, página 47, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK-1366, Kernforschungsanlage Jülich, Jül-929-HT-WT, Marzo de 1973.
- [27] C. Starr, M.A. Greenfield y D.F. Hausknecht: *A comparison of public health risks: nuclear versus oil-fired power plants*, *Nuclear News*, publicación de la American Nuclear Society, octubre de 1972, Vol. 15, No. 10.
- [28] Véase, por ejemplo, William H. Matthews, William W. Kellogg y G.D. Robinson: *Man's Impact on the Climate*, the MIT Press, Cambridge, Massachusetts y Londres (Reino Unido) 1971.
- [29] *The first GARP global experiment, objectives and plans*, GARP, No. 11, marzo de 1973, Organización Meteorológica Mundial y Consejo Internacional de Uniones Científicas.
- [30] M.I. Lvovitch: *World Water Balance (General report)*, Publicaciones de la Asociación Internacional de Hidrología Científica 93 (1969)
- [31] Véase [26], página 15 y siguientes.
- [32] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Estructura y contenido de los acuerdos entre Estados y el Organismo requeridos en relación con el Tratado sobre la no proliferación de las armas nucleares*, OIEA, Viena, INFCIRC/153, 1971.
- [33] W. Häfele: *Systems Analysis in Safeguards of Nuclear Material*, *Actas de la cuarta Conf. Int. sobre la Utilización de la Energía Atómica con Fines Pacíficos*, Ginebra, sept. de 1971, Naciones Unidas, Nueva York, OIEA, Viena.
- [34] W. Häfele: *Ergebnis und Sinn des SEFOR Experimentes in: Einheit und Vielheit*, *Festschrift für Carl Friedrich von Weizsäcker zum 60. Geburtstag*, Vandenhoeck and Ruprecht, Göttingen-Zurich, 1973.
- [35] C. Starr: *Benefit-Cost Studies in Socio-Technical Systems, Colloquium on Benefit-Risk Relationships for Decision Making*, Washington D.C., 26 de abril de 1971.