

Los costos, desde el punto de vista sanitario y económico, de las diversas fuentes de energía

por L.D. Hamilton y A.S. Manne

Antes de que los Estados Unidos de América consigan establecer una política energética nacional coherente deberán resolverse varias controversias en curso sobre los riesgos ambientales, las repercusiones sanitarias y las consecuencias económicas directas de las posibles fuentes de energía futuras. Ninguna estrategia energética es indiscutiblemente acertada o exclusivamente justificada desde un punto de vista ético. Cada solución tiene sus inconvenientes; cualquiera puede tropezar con los obstáculos de las distintas coaliciones de grupos de intereses.

El público está mal informado por los medios de comunicación social. Un gran accidente recibe mucha más atención en una mina de carbón que una larga serie de accidentes aislados de trenes de carbón en un paso a nivel y, sin embargo, éstos causan muchos más fallecimientos año tras año. Análogamente la controversia pública sobre la energía nuclear se centra en sucesos de graves pero consecuencias, pero de mínima probabilidad. Parecería que la política energética del país estuviese concebida por un jugador cuyo lema fuese "lo que cuenta son las apuestas, no las probabilidades".

Aunque los autores de esta memoria proceden de disciplinas diferentes, ambos opinan que las probabilidades cuentan. Es esencial que el público esté bien informado sobre los riesgos para la salud y las consecuencias económicas que entrañaría el aplazamiento de la utilización con fines no militares de la energía nuclear en los Estados Unidos. Opinamos que dicho retardo influiría desfavorablemente sobre la salud y sobre la economía. Esas repercusiones, aunque pequeñas, por ejemplo, en relación con la mortalidad total o con el producto nacional bruto total, no lo son en sentido absoluto. Las consecuencias desfavorables de tal aplazamiento son mucho más ciertas y sin duda más graves que las repercusiones de cualquier accidente potencial resultante de la explotación de reactores de potencia.

En una esfera tan polémica y nueva como ésta no pretendemos que nuestras estimaciones tengan elevada precisión. Se han estudiado durante años los efectos sobre la salud de las centrales termoeléctricas a base de combustibles fósiles; no obstante, todavía hay personas que no reconocen la evidencia de los efectos nocivos para la salud de dichas centrales (Refs. [1-3]). La situación en este caso es similar al debate sobre los efectos perjudiciales de los cigarrillos. Aunque se ha comprobado, sin lugar a dudas, que el cigarrillo es causa de una elevada incidencia del cáncer y de enfermedades cardíacas, todavía no conocemos la naturaleza química definitiva de los carcinógenos activos o de los inductores de lesiones cardiovasculares. Análogamente, en el caso de las centrales termoeléctricas de combustibles fósiles debemos basarnos en razonamientos indirectos. Los modelos epidemiológicos, meteorológicos y de química atmosférica no son de ningún modo tan precisos como los

El Dr. Hamilton pertenece a la Biomedical and Environmental Assessment Division, National Center for Analysis of Energy Systems, Brookhaven National Laboratory; el Dr. Manne es miembro del Department of Operations Research, Stanford University, Estados Unidos de América.

experimentos de laboratorio; no obstante, estos modelos son los únicos medios disponibles hoy para estimar los riesgos relativos de las diversas fuentes de energía.

No entraremos en detalles sobre la energía eléctrica de origen solar o la obtenida por fusión termonuclear. Aquélla todavía no es competitiva económicamente y de ésta aún no se ha demostrado que sea técnicamente viable. Ni es probable que ninguna de estas fuentes adquiera importancia hasta el siglo XXI.

EL MODELO "BEAD" PARA LA EVALUACION DE LAS REPERCUSIONES SANITARIAS

La política energética nacional requiere un cálculo realista de *todos* los costos al evaluar las posibles fuentes de energía: costos desde el punto de vista humano y ambiental a largo y a corto plazo: costos, además, que sean fácilmente cuantificables desde el punto de vista económico. La Biomedical and Environmental Assessment Division (BEAD) de Brookhaven se ocupa de calcular dichos costos reales. Se están evaluando todas las formas de energía, incluso la producida mediante nuevas tecnologías. Comenzando con el establecimiento de una lista de todos los residuos (recursos consumidos y contaminantes) del sistema energético, se averiguan después las diversas vías de acceso al hombre y se estiman los efectos sobre la salud. El programa engloba informaciones procedentes de investigaciones sobre efluentes, tecnología de control, transporte de contaminantes, factores meteorológicos y ecológicos, así como de una serie de programas de laboratorio relacionados con problemas biológicos y médicos. (Esta evaluación, una vez integrada, se combina con una amplia gama de modelos energéticos y de análisis de políticas a escala nacional que, en la actualidad, realizan varios grupos del National Center for Analysis of Energy Systems de Brookhaven encargados del análisis económico y tecnológico de los problemas de la energía).

La BEAD ha elaborado métodos para analizar los efectos del sistema energético [4]. Cada fase del ciclo del combustible para la producción de energía eléctrica a partir de carbón, petróleo, gas natural o por medios hidroeléctricos o nucleares, se ha caracterizado mediante una serie de módulos de efectos (consecuencias) a cielo abierto. Así la extracción del carbón produce a) contaminantes sólidos en el aire y ruidos y b) ácidos, sólidos disueltos, etc. en las aguas. La conversión en energía del carbón en una central térmica descarga contaminantes sólidos, SO_2 , NO_2 -HC, etc. en el aire. Los módulos de efectos representan cómo una descarga o la utilización de un recurso afectan al agua, al aire, al terreno, a los materiales y a la biota. Los módulos pueden, por consiguiente, aplicarse a diferentes fases del mismo ciclo del combustible y también ser comunes a diferentes ciclos del combustible. Para el análisis, los módulos están formados por vectores que representan una serie de efectos resultantes de una descarga inicial o la utilización de un recurso. Cada módulo representa una agresión al ambiente impuesta por un componente de un ciclo del combustible o por otro módulo componente del ciclo del combustible. Teóricamente se cuantificará cada uno de los vectores individuales dentro de un módulo.

Mientras nos esforzamos en calcular los efectos sobre la salud, utilizando diferentes métodos y bases de datos convergentes, los encargados de tomar decisiones necesitan la evaluación *ahora*: una decisión diferida puede ser muy costosa, y en muchos casos esa decisión no puede retrasarse. Nuestro asesoramiento sobre los efectos que sobre la salud ejercen las tecnologías energéticas existentes y las propuestas debe ser rápido. Por ello hemos estimado mediante un procedimiento simplificado los efectos sobre la salud de las centrales. Hemos utilizado evaluaciones ya publicadas o de inmediata publicación procedentes de diferentes fuentes, así como una relación simplificada entre la contaminación atmosférica y los efectos sobre la salud.

Para calcular los efectos sobre la salud de la contaminación atmosférica debida a centrales térmicas de combustibles fósiles ha de especificarse qué contaminantes producen morbilidad

y mortalidad. Entre estos contaminantes se encuentran el SO_2 , el total de (contaminantes atmosféricos) sólidos en suspensión (TSS), hidrocarburos policíclicos y otras sustancias orgánicas, óxidos de nitrógeno y otros productos secundarios. Los conocimientos son insuficientes para relacionar cada uno de ellos independientemente con la salud. Los efectos de estos contaminantes se están cuantificando mediante estudios sobre animales, organismos y plantas; mediante estudios sobre seres humanos en poblaciones expuestas por razones profesionales a elevados niveles de mezclas de contaminantes, y mediante estudios epidemiológicos de poblaciones corrientes análogamente expuestas (aunque generalmente en menor grado). Para poder realizar estimaciones exactas de los riesgos queda por determinar con exactitud cómo se producen los daños. Mientras tanto, la cuantificación de los efectos sobre la salud debe basarse en estudios epidemiológicos existentes sobre poblaciones corrientes. En estos estudios epidemiológicos existentes se ha utilizado uno u otro de los contaminantes como índice de exposición a la contaminación atmosférica en general. Por lo tanto las evaluaciones basadas en esos estudios están sujetas inevitablemente a inexactitudes adicionales puesto que la mezcla de contaminantes varía de un lugar a otro, es decir, el empleo de un contaminante como índice del daño en un lugar puede no servir enteramente para otro lugar. Esto ocurre, en especial, cuando el propio índice es un contaminante, por ejemplo, el TSS, cuya composición puede variar.

La mayoría de los estudios epidemiológicos muestran una buena correlación entre el TSS y los efectos sobre la salud. La correlación entre el SO_2 y los efectos sobre la salud es menos clara, y ha sido difícil encontrar correlación entre los perjuicios a la salud y los óxidos y oxidantes del nitrógeno. No obstante, los óxidos y oxidantes del nitrógeno han producido daños biológicos mensurables en estudios de laboratorio [5].

Aunque los experimentos consistentes en exponer animales al SO_2 en fase gaseosa no han corroborado claramente los resultados epidemiológicos [6], se ha comprobado, mediante estudios sobre animales y epidemiológicos, que los sulfatos como contaminantes atmosféricos sólidos, derivados químicos del SO_2 , son una causa principal de enfermedades [7]. La contaminación atmosférica por contaminantes sólidos producida por las grandes centrales térmicas modernas de carbón y petróleo está compuesta principalmente por dichos derivados activos. Debido al uso generalizado de equipo de elevada eficacia para eliminar los contaminantes atmosféricos sólidos, la principal exposición de las poblaciones a los procedentes de centrales térmicas de combustibles fósiles se debe a la formación secundaria de contaminantes sólidos a base de sulfatos. La proporción de sulfatos en el TSS del penacho de una central térmica puede llegar al 98%, lo que nos ha hecho fijar la atención en el empleo del TSS y de los sulfatos como índices de contaminación atmosférica.

Si se calculan los efectos sobre la salud de la contaminación producida por una central eléctrica a partir de los datos sobre el TSS — habiendo recogido esos datos de poblaciones expuestas en zonas metropolitanas en las que los sulfatos constituyen solo un 15% aproximadamente del TSS — se subestiman en mucho los efectos sobre la salud. De hecho, suponiendo que los agentes patógenos en el TSS son los sulfatos, sería necesario utilizar un factor de corrección de los efectos dosis-respuesta del TSS calculado para zonas metropolitanas.

La central estándar de la BEAD de 1000 MW(e) está situada en una llanura, y las tasas de emisión de contaminación atmosférica se determinan a partir de hipótesis relativas a la central, las características del combustible y los dispositivos de control de las descargas. Los componentes de entrada del modelo de contaminación atmosférica se dan con detalle en otras referencias [8–10]. Se utiliza un modelo meteorológico de rosa de los vientos, combinado con un modelo de química atmosférica basado en una tasa de conversión lineal $\text{SO}_2\text{—SO}_4$, para determinar las exposiciones a nivel del terreno dentro de un radio de 80 km alrededor de la central térmica.

Cuadro 1. Mortalidad en exceso de la tasa normal en un radio de 80 km debida a la exposición a la contaminación causada por centrales térmicas de combustible fósil de 1000 MW(e)

(altura de chimenea 305 m; factor de capacidad 75%)

	Nº de fallecimientos anuales en exceso de la tasa normal				
	Inferior 10%	Lave ^a		Winkelstein ^a	
		Medio	Superior 10%	Lineal	No lineal
Carbón del Este de elevado contenido en azufre:					
(carbón de $2,9 \times 10^7$ J/kg, 3% de azufre) ($1,25 \times 10^4$ Btu/lb) ^b					
<i>Sin eliminación del azufre</i>					
3 × 10 ⁶ habitantes en un radio de 80 km	0	20	100	130	450
0,7 × 10 ⁶ habitantes en un radio de 80 km	0	4,6	23	31	105
<i>Eliminación del 90% del azufre</i>					
3 × 10 ⁶ habitantes	0	2	10	13	45
0,7 × 10 ⁶ habitantes	0	0,5	2,3	3,1	11
Carbón del Este de contenido bajo en carbono:					
(2,9 × 10 ⁷ J/kg, 0,4% de azufre) (1,2 × 10 ⁴ Btu/lb)					
<i>Sin eliminación del azufre</i>					
3 × 10 ⁶ habitantes	0	2,7	13	18	60
0,7 × 10 ⁶ habitantes	0	0,6	3,1	4,1	14
Carbón de Montana:					
(2,1 × 10 ⁷ J/kg, 0,8% de azufre) (8,6 × 10 ³ Btu/lb)					
<i>Sin eliminación del azufre</i>					
3 × 10 ⁶ habitantes	0	7,3	37	49	170
0,7 × 10 ⁶ habitantes	0	1,7	8,6	11	39
Petróleo de elevado contenido en azufre:					
(4,6 × 10 ⁷ J/kg, 2,5% de azufre) (2 × 10 ⁴ Btu/lb)					
<i>Sin eliminación del azufre</i>					
3 × 10 ⁶ habitantes	0	10,4	52	70	236
0,7 × 10 ⁷ habitantes	0	2,4	12,2	16	55
Petróleo de bajo contenido en azufre:					
(4,6 × 10 ⁷ J/kg, 0,2% de azufre) (2 × 10 ⁴ Btu/lb)					
<i>Sin eliminación del azufre</i>					
3 × 10 ⁶ habitantes	0	0,8	4,2	5,6	19
0,7 × 10 ⁷ habitantes	0	0,2	1,0	1,3	4,4

^a Datos modificados de los de Lave y Winkelstein. En la Ref. [9] figuran los detalles técnicos.

^b 1 Btu = 1,054 × 10³ J.

El único principio de química de la atmósfera incorporado actualmente en el análisis es el empleo de una tasa lineal de conversión $\text{SO}_2\text{—SO}_4$. La utilización de un solo índice de contaminación — los sulfatos — es sin duda un método muy simple para indicar el riesgo para la salud de la contaminación atmosférica. Finalmente debido a la falta de conocimientos sobre la curva exposición-respuesta, en especial para niveles bajos de contaminación atmosférica, hemos supuesto una relación lineal dosis-efecto, como es corriente para estimar los riesgos de irradiación.

Puesto que estamos estudiando los efectos de pequeños incrementos sobre los niveles básicos de contaminación atmosférica cercanos a las dosis clínicamente eficaces, el error de esta hipótesis es probable que sea inferior que el resultante de extrapolar dosis elevadas de irradiación a dosis bajas. Incluso si la curva exposición-respuesta no es lineal, es probable que los niveles que estamos considerando no se aparten mucho de la parte lineal de la curva.

En este estudio se utiliza el aumento de la tasa total de mortalidad como "repercusión sanitaria". Dos estudios realizados el uno sobre varias ciudades (Lave) y el otro sobre una ciudad (Winkelstein) evidencian con toda claridad la relación entre los niveles medios anuales de contaminación atmosférica y el aumento en las tasas de mortalidad [11, 12]. Otros estudios corroboran esta relación pero no son adecuados para deducir funciones cuantitativas dosis-respuesta [13, 14]. Por lo tanto dedujimos estas funciones dosis-respuesta de los datos de Lave y Winkelstein.

En el Cuadro 1 figura el aumento de mortalidad en un radio de 80 km previsto para diversas tecnologías y poblaciones y debido a la contaminación atmosférica producida por una central térmica de combustible fósil de 1000 MW(e).

Los datos del Cuadro 1 se combinaron con estimaciones de morbilidad y mortalidad producidas por los ciclos del combustible necesarios para alimentar una central térmica de 1000 MW(e) durante un año, con el fin de calcular los efectos sobre la salud resultantes de la producción de energía eléctrica en los Estados Unidos en 1975. Estos datos se resumen en el Cuadro 2. De este cuadro se deducen los efectos estimados sobre la salud en 1975 resultantes de un ciclo total del combustible normalizado que produzca 10^{10} kWh de energía eléctrica:

Debidos al carbón:	de 10 a 200 casos de fallecimiento, de 300 a 500 casos de invalidez;
Debidos al petróleo:	de 30 a 150 casos de fallecimiento, de 150 a 300 casos de invalidez;
Debidos al gas:	0,2 casos de fallecimiento, 20 casos de invalidez;
Debidos a la energía nuclear:	de 1 a 3 casos de fallecimiento, de 8 a 30 casos de invalidez.

Estadísticamente, los accidentes en reactores producen solamente 0,02 casos de fallecimiento por GW(e)-año. Estos son accidentes de consecuencias graves pero de baja probabilidad.

Como orientación, los fallecimientos totales al año en los Estados Unidos son 2×10^6 aproximadamente; el porcentaje debido a la producción de electricidad es del 0,1 al 1,0. Los fallecimientos en los Estados Unidos en las edades comprendidas entre 1 y 74 años son aproximadamente $1,1 \times 10^6$; el porcentaje debido a la producción de electricidad es de 0,2 a 1,9. La contaminación atmosférica producida por los combustibles fósiles es, con mucho, la que más contribuye a los fallecimientos. Esto puede compararse con otras causas conocidas de fallecimiento en los Estados Unidos: aproximadamente el 17% de fallecimientos debidos al uso de tabaco; aproximadamente el 5% debidos a accidentes de automóvil (la mitad de los cuales ocasionados por conductores embriagados), y aproximadamente el 5% debido a tratamiento y atrofélico letal.

Cuadro 2. Efectos estimados sobre la salud en 1975 resultantes de la producción de energía eléctrica

Combustible	1975 (kWh(e) × 10 ⁹) ^a	Nº equivalente de centrales de 1000 MW(e)	Fallecimientos estimados	Invalideces estimadas
Carbón	844	128	1900–15 000	25 000–39 000
Petróleo	292	44	88–4400	4000–7900
Gas	297	45	6	600
Nuclear	168	26	18–42	130–470
Totales	1601	243	2000–19 000	29 000–48 000

^a Estimados. Fuente Ref. [15].

EL MODELO ETA-MACRO PARA LA EVALUACION ECONOMICA Y TECNOLOGICA

Para conseguir una visión global los efectos sobre la salud deben combinarse con otros muchos factores. La próxima fase es tener en cuenta consideraciones económicas y tecnológicas. Con este fin ha resultado adecuado utilizar el modelo ETA-MACRO. Este modelo representa una combinación entre ETA (un análisis de procesos para la evaluación de las tecnologías de producción de energía) y un modelo de crecimiento macro-económico que permite la sustitución entre datos de entrada de capital, mano de obra y energía [16–17].

El modelo ETA-MACRO es un instrumento para combinar las proyecciones a largo plazo de la oferta y la demanda. Está concebido para comparar las posibilidades reales con que cuentan los Estados Unidos al irse liberando de la gran dependencia actual respecto de los recursos de gas y de petróleo, para conseguir una economía energética futura más diversificada.

Para tener en cuenta el posible agotamiento de los combustibles actuales, el modelo considera un tiempo horizonte excepcionalmente largo, hasta mediados del siglo XXI. Para evitar un exceso de detalles, se da más importancia a las tendencias a escala nacional que a las de regiones particulares. El estudio trata preferentemente del período de tiempo posterior a 1990, que es la época en que probablemente se inicie una transición importante hacia nuevas fuentes de suministro. Evidentemente, una perspectiva a largo plazo multiplica las incertidumbres y las conjeturas que intervienen en cualquier evaluación tecnológica. No obstante, parece esencial esta consideración a largo plazo para poder tomar hoy decisiones prudentes en relación con tecnologías que tardarán en utilizarse de 10 a 20 años y que es probable que tengan una vida útil de unos 30 años. ETA-MACRO tiene en cuenta explícitamente:

- a) Las interacciones energía-economía: la perspectiva de que los crecientes costos de la energía y la escasez de suministros evitarán que la economía alcance plena la tasa de crecimiento posible del producto nacional bruto, lo cual retrasará la futura acumulación de capital.
- b) Conservación motivada por los costos: los precios crecientes reducirán la demanda de energía que será inferior a las cantidades previstas deducidas a base de las tendencias de años anteriores.
- c) Sustitución de unos combustibles por otros: las condiciones cambiantes inducirán a los consumidores a reemplazar el petróleo y el gas por la electricidad, por ejemplo, bombas caloríficas en lugar de quemadores de combustible.

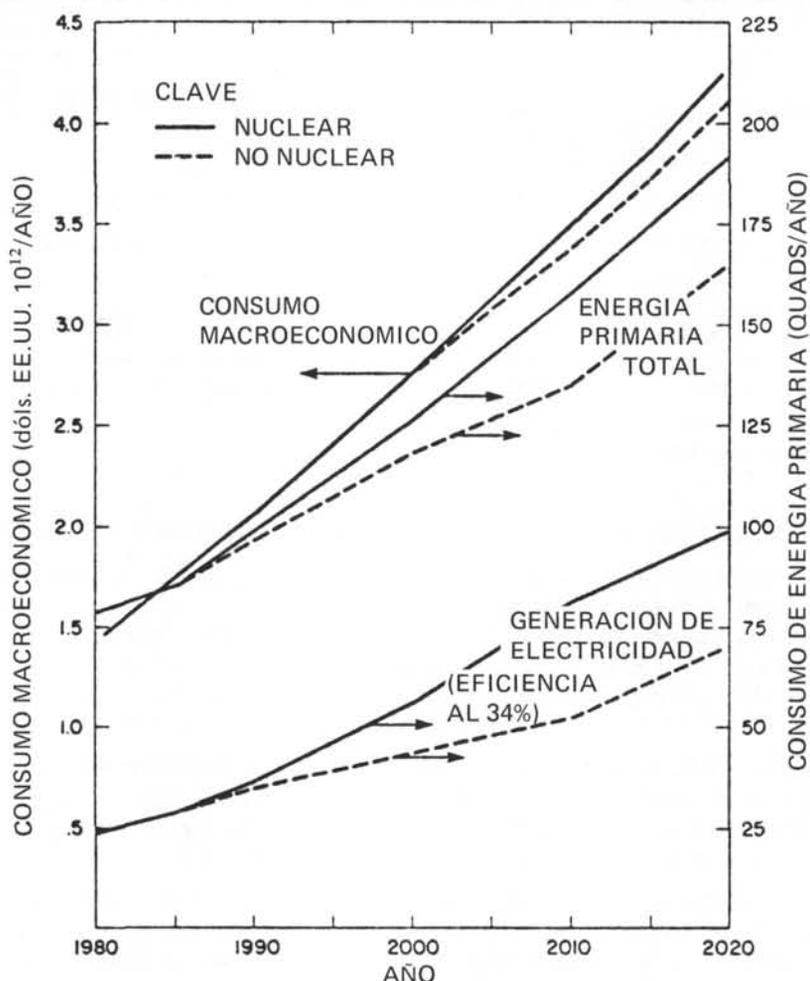


Figura 1: Resultados del caso básico.

d) Nuevas tecnologías de suministro: combustibles sintéticos, energía nuclear y solar; cada una presenta sus propias dificultades e incertidumbres respecto de las fechas y tasas de introducción.

El modelo simula una economía de mercado en el transcurso del tiempo, suponiendo que los productores y consumidores son suficientemente precavidos para prever futuras escaseces. La oferta, la demanda y los precios se relacionan mediante un modelo de programación dinámica, *no* lineal. Cuanto mayor sea el aumento de precio mayor será la oferta disponible en el futuro y mayores los incentivos para que los consumidores ahorren energía.

Todos los costos y beneficios se expresan en términos de poder adquisitivo "real" en dólares de los Estados Unidos de 1975. De este modo, cualquier elevación de precios debida a la inflación general no influye en el análisis. En su mayor parte las hipótesis numéricas son las adoptadas por el CONAES MRG (Modelling Resource Group, Committee on Nuclear and

Cuadro 3. Hipótesis de costos para la comparación económica entre centrales para la carga fundamental con un factor de capacidad del 65% (nivel general de precios de 1975)

Tipo de central eléctrica	De carbón	Reactor de agua ligera	Reactor reproductor rápido	De conversión de la energía solar en electricidad
Costos de instalación (dóls/kW)	520	650	810	1730
Costos unitarios (milésimas de dólar/kWh)				
Explotación y conservación	3,0	2,0	2,0	2,0
Costos del combustible	7,1	4,9	2,1	0
Costos de instalación nivelados ^a	12,2	15,2	19,0	40,5
Total	22,3	22,1	23,1	42,5

^a Factor de recuperación del capital basado en un tipo de descuento del 13%/a, factor de capacidad 65% y vida útil de 30 años. Por lo tanto $(0,1334/a) \{cap_i \div 0,65 (8,76 \cdot 10^3 \text{ h/a})\} = 0,0234 \text{ cap}_i$.

Alternative Energy Systems, National Academy of Sciences). Estas hipótesis básicas presuponen tasas claramente inferiores de crecimiento de la demanda de energía que las utilizadas en informes previos sobre el modelo ETA. Incluso con las hipótesis del CONAES MRG, los costos económicos, si los Estados Unidos adoptasen una política "no nuclear", serían notables.

Los costos de dicha política dependen en gran manera de las hipótesis que se adopten con respecto al carbón, pues el carbón representa la opción más inmediata después de la energía nuclear en los Estados Unidos. Para tener en cuenta las posibles consecuencias sanitarias, ambientales y climatológicas en general de un uso amplio del carbón, el MRG definió un límite superior para la tasa anual de consumo de este combustible para todos los fines en conjunto: electricidad producida mediante carbón, empleos directos y combustibles sintéticos. Se estableció que este límite superior vendría dado por una curva "logística" en forma de S definida por tres puntos: el valor real de 1970 es 13 quads; un aumento previsto a 40 quads para el año 2000, y una asíntota a largo plazo de 50 quads. Ciertamente es que ésta es una esfera en la que reina gran incertidumbre. Es, por otra parte, un tema que ofrece grandes posibilidades de colaboración entre ecólogos, especialistas en cuestiones de sanidad, analistas económicos e ingenieros. Esperamos que nuestros cálculos animarán a otros interesados a emprender nuevas investigaciones en esta esfera.

Según las hipótesis del caso básico resulta que el carbón *no* supondrá una fuerte limitación hasta después del año 2000 y que la economía no se verá afectada por lo tanto por una política "no nuclear" hasta dicha fecha (véase Fig. 1). Después del año 2000 las hipótesis básicas del MRG prevén que se dispondrá de la electricidad de origen solar como tecnología "de apoyo", pero con costes nivelados que son 20 milésimas de dólar/kWh superiores a los del carbón o nucleares (véanse los Cuadros, 3, 4 y 5). Considerando en conjunto las consecuencias directas e indirectas de la utilización de la energía de origen solar de elevado

Cuadro 4. Hipótesis de costos para la comparación económica de diversas fuentes de energía no eléctrica (nivel general de precios de 1975)

Costos unitarios del equivalente PETG ^a	PETG	Combustibles sintéticos obtenidos del carbón	OSE de energía no eléctrica ^c
Dóls millón de Btu ^b	2,0 (2720 quads de recursos incluidas las importaciones)	3,7	5,0

^a Petróleo y gas natural.

^b 1 Btu = $1,054 \times 10^3$ J.

^c OSE: Otros sistemas energéticos.

costo y de diversas fuentes de energía, resulta que las pérdidas totales en consumo total son de $109 \text{ dólares} \times 10^9$, 3,1% del consumo total en el año 2010 (véase la columna central del Cuadro 6). Sumando a lo largo de todos los años desde 1975 hasta el 2050, el valor actual de dichas pérdidas sería de 77×10^9 dólares o de 595×10^9 dólares según que el tipo de descuento postulado para este género de decisiones públicas sea del 10% o del 5%. Hay que señalar que las pérdidas macroeconómicas son bajas inicialmente y se elevan rápidamente después del año 2000. Por ello, un tipo de descuento del 5% implica que el valor actual de estas pérdidas sería muy superior al doble de las obtenidas con un tipo de descuento del 10%.

Los resultados anteriores se han basado en un 0,25 como nuestra estimación óptima de σ , la "elasticidad de sustitución". Este parámetro mide la facilidad o dificultad de sustituir otros datos económicos de entrada en lugar de la energía. Con $\sigma = 0,25$, se quiere decir que el 10% de incremento en el precio relativo de la energía producirá una disminución del 2,5% en el consumo óptimo de energía en relación con otros datos económicos de entrada tales como capital y mano de obra. Existe un amplio margen de incertidumbre en cualquier estimación econométrica de σ . Con una elasticidad de sustitución superior, las repercusiones macroeconómicas de una política "no nuclear" serían inferiores a las indicadas en el caso básico, si, por ejemplo, se supone $\sigma = 0,50$, la repercusión macroeconómica apenas es perceptible hasta el año 2000. En este caso, la demanda de energía crecería con mayor lentitud, los recursos de petróleo y de gas se agotarían con menor rapidez, y habría más tiempo para la transición a diversas fuentes futuras de energía de elevado costo. La conservación motivada por los precios resolvería nuestros problemas energéticos durante los próximos 50 años si resulta que $\sigma = 0,50$ o más.

No obstante, con una elasticidad de sustitución suficientemente baja, podría haber importantes repercusiones económicas por escasez de oferta de energía. Para aclarar esta posibilidad hemos calculado un conjunto de casos en los que $\sigma = 0,15$ (en vez del valor del caso básico de 0,25). Además se han realizado las siguientes reducciones en la oferta (o aumentos de costos) de energía no nuclear:

- El límite superior de consumo de carbón se reduce a 25 quads (en vez de 40) en el año 2000, y el valor asintótico a 40 quads (en vez de 50);
- No se explotan los recursos petrolíferos de pizarras por limitaciones impuestas por la necesidad de conservar la calidad de la atmósfera y del agua;
- Se retrasa la fecha de introducción de la electricidad obtenida directamente en gran escala a partir de la energía solar del año 2000 al 2020, y

Cuadro 5. Caso básico ETA-MACRO

	1985	1990	2000	2010	2020	2030
1. PRODUCCION NACIONAL DE ENERGIA, SEGUN LAS FUENTES. CANTIDAD NETA DE EXPORTACIONES (QUADS)	66,6	78,1	105,1	142,3	185,6	229,5
1.1 CARBON. TOTAL:	17,9	21,2	28,7	45,0	47,7	49,0
A. PARA PRODUCCION DE ELECTRICIDAD	12,4	15,1	21,3	24,5	18,5	9,4
B. PARA COMBUSTIBLES SINTETICOS	—	0,0	0,0	11,5	18,2	26,2
C. EMPLEOS DIRECTOS Y OTROS	5,5	6,1	7,4	9,0	11,0	13,4
1.2 GAS NATURAL, PETROLEO Y GAS NATURAL LIQUIDO	36,5	39,8	42,1	31,6	13,4	5,0
1.3 NUCLEAR, TOTAL:	8,3	12,7	27,1	48,1	70,1	95,3
REACTORES DE AGUA LIGERA	8,3	12,7	27,1	46,5	47,7	33,3
REACTORES REPRODUCTORES RAPIDOS	—	—	0,0	1,6	22,3	62,0
1.4 ENERGIA ELECTRICA DE ORIGEN SOLAR	—	—	0,0	0,0	0,0	0,0
1.5 PETROLEO DE PIZARRAS BITUMINOSAS	—	—	1,5	5,6	9,6	11,5
1.6 HIDROELECTRICA, GEOTERMICA, ETC.	3,9	4,4	5,7	7,2	9,3	11,9
1.7 OSE DE ENERGIA NO ELECTRICA	0,0	0,0	0,0	4,9	35,6	56,8
2. IMPORTACIONES DE PETROLEO Y DE GAS (QUADS)	18,2	19,9	21,1	15,8	6,7	2,5
3. CONSUMO TOTAL DE ENERGIA (QUADS)	84,9	98,0	126,2	158,1	192,3	232,0
4. PRODUCCION DEL ELECTRICIDAD (EN BILLONES DE kWh)	2,9	3,6	5,6	8,1	9,9	11,7
4.1 % DE PETROLEO Y GAS	14,7	9,0	1,9	0,0	0,0	0,0
4.2 % DE CARBON	43,6	43,5	39,7	31,8	19,7	8,4
4.3 % NUCLEAR	28,4	35,3	48,3	59,3	70,9	81,4
4.4 % OTROS	13,3	12,2	10,1	8,9	9,4	10,2
5. CONSUMO DE URANIO (MILLONES DE TONELADAS DE U ₃ O ₈ , ACUMULADAS DESDE 1975)	0,2	0,4	1,0	2,1	3,5	3,7
6. PRECIOS NACIONALES:						
6.1 CARBON (dóls./millón de BTU)	0,7	0,7	0,7	1,5	1,5	1,5
6.2 PETROLEOS GAS (dóls./millón de BTU)	2,2	2,4	3,3	5,0	5,0	5,0
6.3 ELECTRICIDAD (milésimas de dólar/kWh)	21,7	22,0	22,1	24,2	24,6	25,8
6.4 URANIO (dóls./LB. de U ₃ O ₈)	30,7	31,3	34,3	44,5	75,7	141,2

Cuadro 6. Resultados económicos del modelo MACRO – tres elasticidades posibles de sustitución

Elasticidad de sustitución		0,50	0,25	0,15
Limitaciones de suministro		(las mismas que en el caso básico)	(caso básico)	(con limitaciones de suministro adicionales)
Consumo total en 2010 (dóls. $\times 10^9$ al nivel de precios de 1975)	Con energía nuclear	3566	3496	3245
	No nuclear	3552	3387	2799
Reducción del consumo en 2010	(dóls. $\times 10^9$)	14	109	446
	(%)	0,4%	3,1%	13,7%
Tipo de descuento público:	Valor actual de la reducción en el consumo, 1975–2050 (dóls. $\times 10^9$)			
5%		293	595	3089
10%		36	77	456

d) Los costos de los OSE (otros sistemas energéticos) son equivalentes a los del petróleo y del gas a 8 dólares en vez de a 5 dólares por millón de Btu¹.

Incluso en estas circunstancias desfavorables, la actividad económica total se vería afectada solo ligeramente si se dispone de energía nucleoelectrica. En el año 2000, por ejemplo, no habrá prácticamente ninguna diferencia en consumo total. No obstante, con una política "no nuclear", las pérdidas económicas serían enormes. Ascenderían a 132×10^9 dólares en el año 2000 y aumentarían a 446×10^9 dólares en el 2010 (véase la última columna del Cuadro 6). Esto significaría una reducción del consumo del 13,7% en este año. Con un tipo de descuento del 5%, el valor actual de la reducción en el consumo sería de 3089×10^9 dólares en los años 1975 a 2050. Se requeriría una combinación poco probable de circunstancias para alcanzar esos resultados, pero tal combinación es bastante más probable que algunos de los desastres de baja probabilidad y graves consecuencias que se han mencionado en relación con la energía nuclear.

¹ Los OSE (otros sistemas energéticos) fueron considerados por el CONAES MRG como tecnologías de apoyo para producir energía limpia no eléctrica. Ejemplos de dichas tecnologías de apoyo son la calefacción y la refrigeración mediante energía solar. Otras posibilidades son la destilación in situ de pizarras bituminosas, la conversión biomásica, el hidrógeno generado con energía solar y el petróleo de fuentes no tradicionales. Según las hipótesis del caso básico, los OSE no llegarán a ser fuentes energéticas de importancia hasta el año 2010 más o menos (véase el Cuadro 5). Para el año 2010 y siguientes las tasas de introducción de los OSE parecen excesivas. Estas tasas son probablemente más optimistas que las adoptadas por el MRG para tecnologías mejor conocidas tales como las de combustibles sintéticos y del reactor reproductor.

CONSECUENCIAS DE UN RETRASO DE LA UTILIZACION DE LA ENERGIA NUCLEAR

En esta sección final indicaremos cómo pueden utilizarse los modelos BEAD y ETA-MACRO conjuntamente para analizar cuestiones tales como las consecuencias de un retraso nuclear. Cada modelo se compone de una manera diferente. El BEAD se descompone por regiones con el fin de estimar los efectos sobre la salud, mientras que el ETA-MACRO es de alcance nacional. Veremos que estos dos modelos se complementan entre sí. Cada uno mejora las estimaciones que proporcionan los resultados obtenidos con el otro.

Comencemos por resumir los resultados obtenidos con el modelo ETA-MACRO para un año determinado: el año 2000. En el Cuadro 7 se observa que hay una notable diferencia en el consumo total de carbón a partir de esta fecha: 28,7 quads si se dispone de energía nucleoelectrónica y 40,0 quads si no se instalan centrales nucleares después de 1975.

Entre las posibilidades de suministro y de conservación existentes el modelo ETA-MACRO selecciona automáticamente la combinación de costo inferior. Si se dispone de energía nucleoelectrónica lo mejor es utilizar los recursos petrolíferos y de gas a menor ritmo, aunque se consuma una mayor cantidad total de energía (126,2 quads en comparación con 118,0 quads) en el año 2000. Obsérvese que la producción de energía hidroeléctrica, geotérmica, o con petróleo procedente de pizarras bituminosas y con combustibles sintéticos obtenidos a partir del carbón no varía, y que las diferencias más importantes se dan en las otras fuentes de producción de electricidad. La reducción de 450 GW(e) en la electricidad de origen nuclear se compensa con solamente 200 GW(e) de centrales termoeléctricas alimentadas con carbón.

Utilicemos ahora el modelo BEAD para examinar las repercusiones sanitarias a escala regional de estos 200 GW(e) adicionales de potencia eléctrica obtenidos utilizando carbón. Para

Cuadro 7. Oferta y demanda de energía, año 2000

(Unidad: 10^{15} Btu de energía primaria^a — equivalente en combustible fósiles)

	Caso básico, con energía nuclear		Sin instalaciones nucleares después de 1975	
	Electricidad ^b	Energía no eléctrica	Electricidad ^b	Energía no eléctrica
Petróleo y gas natural		63,2		69,3
Petróleo extraído de pizarras		1,5		1,5
Energía hidro-eléctrica, geotérmica, eólica, obtenida de desperdicios, etc.	5,7		5,7	
Reactor de agua ligera	27,1 (=475 GW(e))		1,5 (=25 GW(e))	
Carbón	21,3 (=375 GW(e))	7,4	32,6 (=575 GW(e))	7,4
Totales	54,1	72,1	39,8	78,2

^a 1 Btu = $1,054 \times 10^3$ J.

^b Basada en un rendimiento térmico del 34% y en un factor de capacidad del 65%. Por lo tanto 10^{15} Btu/a = 17,6 GW(e).

85 Cuadro 8. Efectos de las centrales termoeléctricas de carbón por regiones — 1970
1000 MW(e), 0,5% de azufre, $2,9 \times 10^7$ J/kg (12 500 Btu/lb)

Región***	Población de 1970* x 10 ⁶	Mortalidad anual en exceso de la tasa normal debida a la contaminación atmosférica**					Fallecimientos en operaciones de minería	Fallecimientos en accidentes del transporte del carbón por ferrocarril	Mortalidad anual total en exceso de la tasa normal				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
NI	5,23	0	5,8	29	39	131	0,1	3,1	3,2	9	32	42	134
AM	7,07	0	7,8	39	52	177	0,1	2,6	2,7	11	42	55	180
NEC	2,88	0	3,2	16	21	72	0,1	2,0	2,1	5,3	18	23	74
NOC	0,08	0	0,09	0,4	0,6	2	0,1	0	0,1	0,2	0,5	0,7	2,1
AS	2,50	0	2,8	14	19	63	0,1	2,6	2,7	5,5	17	22	66
SEC	0,77	0	0,8	4,3	5,7	19	0,1	1,7	1,8	2,6	6,1	7,5	21
SOC	0,74	0	0,8	4,1	5,5	19	0,1	3,6	3,7	4,5	7,8	9,2	23
MT	0,14	0	0,2	0,8	1,0	3,5	0,1	0	0,1	0,3	0,9	1,1	3,6
PAC	0,50	0	0,6	2,8	3,7	13	0,1	4,0	4,1	4,7	6,9	7,8	17

* Las cifras representan la población en un radio de 80 km para los emplazamientos de las 100 centrales incluidas en la base de datos de Morgan/Morris, excepto en el caso del SOC y del PAC para los que no hay emplazamientos en dicha base de datos. Para las otras siete regiones se ha hallado una razón media de la población en un radio de 80 km desde el emplazamiento de la central media a la densidad media de población del censo de la región. La población en un radio de 80 km desde el emplazamiento en SOC y PAC se estimó aplicando esta razón a la densidad de población regional.

** Las estimaciones son

- 1) Estimación del 10º percentil según los datos de Lave.
- 2) Estimación de la mediana según los datos de Lave.
- 3) Estimación del 90º percentil según los datos de Lave.
- 4) Estimación lineal según los datos de Winkelstein.
- 5) Estimación no lineal "linealizada" según los datos de Winkelstein. Suponiendo: un valor de $78,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el de TSS, los sulfatos tres veces más eficaces que el TSS, y 6000 dólares de renta familiar anual.

*** Véase la explicación de las iniciales de las regiones en el Cuadro 9.

Cuadro 9. 200 Centrales distribuidas según el aumento relativo de población

Región	Aumento de la población en 1970—2000 10 ⁶	%	Número de centrales asignadas	Año 2000 (1)	Mortalidad anual total en exceso* (2)	(3)	(4)	(5)
Nueva Inglaterra	3,116	26	11,2	45	127	451	592	1889
Atlántico Medio	8,505	23	30,6	102	414	1582	2072	6781
Nordeste Centro	9,88	24	35,5	93	233	793	1013	3258
Noroeste Centro	2,169	13	7,8	0,9	1,8	4,4	6,3	18
Atlántico Sur	13,618	43	49,0	189	386	1191	1541	4624
Sudeste Centro	3,483	26	12,5	28	41	96	118	331
Suroeste Centro	4,197	21	15,1	68	83	143	168	421
Montaña	2,539	29	9,1	1,2	3,6	11	13	43
Pacífico	8,089	30	29,1	155	178	261	296	643
TOTAL	55,596		200	682	1467	4532	5819	18008

* Para la explicación de la base de cada estimación véase el Cuadro 8. Se supone que la población expuesta aumenta en proporción con el aumento del censo regional en conjunto.

aplicar este modelo a este problema comencemos con el Cuadro 9, estudiando los efectos específicos sobre la salud para la región de cada una de las 200 centrales termoeléctricas adicionales alimentadas con carbón que serían necesarias si se retrasa la producción de electricidad nuclear. Estas centrales se han asignado a cada una de 9 regiones geográficas en proporción al aumento de población que se espera entre el año 1970 y el año 2000 (proyecciones de la población residente de OBERS). Se ha supuesto que todo el carbón adicional procedería del Oeste, sería extraído a cielo abierto y tendría un bajo contenido de azufre, y que la combinación de un tratamiento de precombustión de tal carbón de bajo contenido en azufre con desulfurización de los gases de combustión daría como resultado descargas de azufre en la atmósfera equivalentes a la de un carbón con un contenido del 0,5% en azufre y un poder calorífico de 12 500 Btu/lb². Los fallecimientos en accidentes durante el transporte del carbón por ferrocarril (principalmente en pasos a nivel) indican los producidos por t/milla de distancia de cada región a los yacimientos carboníferos del Oeste.

Para la nación en conjunto, el modelo BEAD indica que estas 200 centrales causarían entre 1500 y 18 000 fallecimientos adicionales en el año 2000, principalmente la razón de la contaminación atmosférica (véase el Cuadro 8). Esto sería un fenómeno estadístico; ninguna de esas muertes tendría, individualmente, interés periodístico. En conjunto, esta repercusión es del mismo orden de magnitud que el estimado por Rasmussen para un accidente único en un reactor. La única diferencia consiste en la probabilidad. Los fallecimientos debidos a las 200 centrales termoeléctricas alimentadas con carbón ocurrirían año tras año. Los producidos en un improbable accidente de fusión del núcleo de una central atómica tendrían una probabilidad de una millonésima.

² 1 Btu = 1,054 × 10³J.

En el Cuadro 8 figuran las funciones dosis-respuesta deducidas de Lave y Winkelstein para una central en cada región.

El Cuadro 9 amplía los resultados a las 200 centrales necesarias para reemplazar la electricidad de origen nuclear. En las dos primeras columnas figuran los aumentos de población en cada región de 1970 al año 2000; la tercera columna de la distribución de las 200 centrales en proporción al crecimiento de la población en cada región, y las últimas cinco columnas dan la mortalidad anual total en exceso de la tasa normal, deducida de las cinco estimaciones del Cuadro 8 para estas centrales adicionales. Como ya se ha indicado la mortalidad total anual en exceso varía entre aproximadamente 700 (si se hace la hipótesis poco probable de que los efectos de la contaminación atmosférica son cero) y las cifras más probables de 1500 a 18 000. La población total de los Estados Unidos de América estimada para el año 2000 es de unos 263×10^6 , por lo que la mortalidad anual total sería de $2,6 \times 10^6$. El límite superior de la mortalidad anual en exceso correspondería entonces a un 1% aproximadamente de la tasa anual de mortalidad. Puesto que el modelo meteorológico utilizado en estas estimaciones se limita a un radio de 80 km alrededor de las centrales (naturalmente, en la realidad los sulfatos se desplazan a mayores distancias), la estimación de los fallecimientos debidos a la contaminación atmosférica que figuran en los Cuadros 8 y 9 es probablemente baja. El estudio de las repercusiones sanitarias del desplazamiento de los sulfatos a largas distancias en un factor de 3 a 10 [18, 19] podría aumentar esas cifras. Además, las cifras citadas se refieren solamente a la mortalidad y no a la morbilidad. La morbilidad producto de la contaminación atmosférica se estima que es aproximadamente cinco veces superior a la mortalidad.

Como ya se ha dicho, se ha prestado gran atención a los riesgos de baja probabilidad y graves consecuencias que supondrían las descargas radiactivas procedentes de un posible accidente en un reactor nuclear que produjese la fusión del núcleo. Pero cuando las grandes consecuencias se multiplican por valores de probabilidad muy bajos, el número previsto de muertes causadas por el posible accidente añadiría menos de un fallecimiento a las 76 a 190 muertes en exceso ocasionadas anualmente por las operaciones del ciclo total del combustible para mantener 450 centrales nucleares (año 2000). No hemos tenido en cuenta los riesgos de la desviación de materiales nucleares y del sabotaje de instalaciones, pero es difícil creer que dichos problemas resulten insolubles o que sobrepasen en importancia a las repercusiones sanitarias que suponen los 18 000 posibles fallecimientos adicionales cada año.

OBSERVACIONES

La falta de espacio no nos permite comentar detalladamente el informe Ford-Mitre (*Nuclear Power Issues and Choices*) que se publicó después de la preparación de nuestro manuscrito. Sobre las ventajas desde el punto de vista ambiental, sanitario y económico de los reactores de agua ligera, estamos de acuerdo con gran parte del citado informe. También coincidimos con sus conclusiones sobre las plantas de reelaboración del plutonio en poder de determinados países no poseedores de armas nucleares. Dichas plantas constituyen una "incomodidad atractiva" y contribuyen poco a detener la carrera de armamentos nucleares.

Con respecto al tema de la investigación y desarrollo relativos al reactor reproductor rápido creemos que el razonamiento de Ford-Mitre es erróneo. Sus argumentos se basan en un mundo en el que el carbón y el uranio son abundantes fuera de los Estados Unidos de América. Si en realidad esos recursos son limitados, el hecho de que no desarrollemos ese tipo de reproductor probablemente estimulará a otros a realizar aún mayores esfuerzos en su desarrollo. Los Estados Unidos no pueden participar eficazmente en programas internacionales de salvaguardia si renuncian completamente al reactor reproductor rápido. Desde un punto de vista realista debemos reconocer que los países que desean adquirir armas nucleares pueden hacerlo — a menor precio y más rápidamente — con medio que no son los programas de reactores con fines no militares.

Referencias

- [1] COMAR, C.L., SAGAN, L.A., Health effects of energy production and conversion, Annual Review of Energy 1 (1976) 581. Reviews Inc. (1976) 581.
- [2] SAGAN, L.A., Health costs associated with the mining, transport and combustion of coal in the steam electric industry, Nature 250 (1974) 107.
- [3] HAMILTON, L.D., MORRIS, S.C., "Health effects of fossil fuel power plants" (Proc. Symp. Population Exposures, Knoxville, 1974, CONF-741018 (1974) 317.
- [4] (HAMILTON, L.D., Ed.) "The health and environmental effects of electricity generation — a preliminary report", Biomedical and Environmental Assessment Group, Upton, New York, BEAG-HE/EE 12/74, BNL Rep. No. 20582 (1974).
- [5] COORDINATING COMMITTEE ON AIR QUALITY STUDIES, National Academy of Sciences and National Academy of Engineering, Air Quality and Automobile Emission Control, prepared for the US Senate Committee on Public Works, Washington, DC (1974).
- [6] ALAIRE, Y., et al., Long-term continuous exposures to sulfur dioxide in cynomolgus monkeys, Arch. Environ. Health 24 (1972) 115.
- [7] McJILTON, C., FRANK, R., CHARLSON, R., Role of relative humidity in the synergistic effect of a sulphur dioxide-aerosol mixture on the lung, Science 182 (1973) 503.
- [8] US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Monitoring and Air Quality Trends Report 1972, Research Triangle Park, Carolina, (1973).
- [9] HAMILTON, L.D., MORRIS, S.C., Health Costs of Substituting Coal-Electric as Alternative to Nuclear Power in a Nuclear Moratorium, Brookhaven Natl. Lab. Rep. BNL No. 22464 (Rev. 1977).
- [10] MORGAN, M.G., et al, A probabilistic methodology for estimating air pollution health effects for coal-fired steam electric plants, Energy Systems and Policy (en prensa).
- [11] WINKELSTEIN, W., et al., The relationship of air pollution and economic status to total mortality and selected respiratory systems mortality in man, Arch. Environ. Health 14 (1967) 162.
- [12] LAVE, L.B., SESKIN, E.P., An analysis of the association between US mortality and air pollution, J. Am. Stat. Assoc. 68 (1973) 284.
- [13] HEWITT, D., Mortality in the London borough, 1950—52, with special reference to respiratory disease, Br. J. Prev. Soc. Med. 10 (1956) 45.
- [14] PAŠIĆ, H., ČERKEZ, F., "The effect of air pollution on mortality in Sarajevo", Proc. Int. Conf. Sulleldorf, 1973.
- [15] Electrical World 185 (1976) 54.
- [16] MANNE, A.S., ETA: A model for energy technology assessment, Bell J. Econ. Manage, Sci. (Autumn 1976).
- [17] MANNE, A.S., ETA-MACRO: A Model of Energy-Economy Interactions, Dept of Operations Research, Stanford Univ. Rep. (Rev. 1977).
- [18] HAMILTON, L.D., et al., A Perspective on the Energy Future of the Northeast: Health and Environmental Impacts of Alternative Energy Futures for the Northeast, Brookhaven Natl. Lab. Summary, BNL Rep. No. 21611 and draft (1976).
- [19] HAMILTON, L.D., "US electricity through the year 2000: coal or nuclear? Alternative sources and health", in CRC Forum on Energy, Session II: US Electricity Through the Year 2000: Coal or Nuclear? (BUDNITZ, R.T., Ed.), CRC Press Inc., Cleveland (1977).

Esta memoria se presentó en la Conferencia internacional sobre la energía nucleoelectrica y su ciclo del combustible, que se celebró del 2 al 13 de mayo de 1977, en Salzburgo, Austria.