

Nueva ojeada al costo de la energía nucleoelectrica

por Rurik Krymm*

A mediados de 1973, las previsiones relativas a la energía nucleoelectrica, basadas en las estimaciones de los costos y en los contratos ya concertados para la construcción de varias grandes centrales y su abastecimiento de combustible, indicaban que este tipo de energía conquistaría rápidamente una parte creciente del mercado energético, parte que posiblemente llegaría a fines de siglo a representar alrededor de un tercio de la producción total de energía en el mundo. Estas previsiones se fundaban generalmente en las comparaciones con los costos de las centrales de fuel oil en una época en que el crudo se vendía a dos o tres dólares por barril. Menos de un año más tarde, el precio del crudo en las principales zonas de exportación se había cuadruplicado, alcanzando de ocho a 12 dólares por barril, mientras que los productos del petróleo, así como el carbón y el gas, iniciaban en los diferentes países un alza vertiginosa que las medidas reguladoras nacionales solo conseguían frenar temporalmente. No se hubiera podido reprochar a ningún observador económico, ni a ningún dirigente, la con-

clusión de que una subida de 300% en el precio del principal combustible competitivo, subida que nada hacía prever pudiera revocarse, se traduciría en una brusca revisión en alza de los programas nucleoelectricos, limitada únicamente por los plazos necesarios para ampliar la capacidad de fabricación de equipo y la infraestructura del ciclo del combustible nuclear. Las consideraciones de índole política sobre la oportunidad de reducir la dependencia respecto de los combustibles de importación parecían justificar aún más la utilización de la energía nucleoelectrica. Los programas nucleares revisados se elaboraron en efecto sobre la base de esos argumentos por completo razonables. No obstante, salvo en algunos países, a fines de 1975 las previsiones nacionales sobre el crecimiento de la energía nucleoelectrica no solo habían bajado con respecto a las metas contempladas como primera reacción a la crisis petrolera, sino que incluso estaban por debajo de las cifras estimadas en una época en que se daba por descontado que el petróleo seguiría constando hasta fines de siglo una cuarta parte de su precio actual.

Las causas de este desenlace paradójico que ilustra el Cuadro 1, suelen dividirse, según su naturaleza, en económicas y no económicas. Tal división, aunque cómoda, no deja de ser artificial. Si se prescinde de la opinión extrema según la cual "la energía nucleoelectrica es peligrosa a cualquier precio", en último término es posible disipar, siempre que se acepten los correspondientes gastos suplementarios, una gran parte de las inquietudes expresadas tan vigorosamente, y a menudo con toda razón, ante los riesgos propios de las centrales nucleares y de su ciclo del combustible. La seguridad de explotación, la protección del medio ambiente, el control de las diversas etapas del ciclo del combustible

* Jefe de la Sección de Estudios Económicos, División de Energía Nucleoelectrica y Reactores.

La expansión nucleoelectrica requiere una mejor capacitación del personal operador. En las centrales nucleares de Pickering, Ontario (Canadá), se ha instalado un simulador de central nuclear. Este simulador es un duplicado exacto operacional de la sala de control de uno de los cuatro grupos generadores de Pickering. Los operadores se entrenarán en el simulador a fin de adquirir experiencia y poder responder a las situaciones normales, anormales y de emergencia que puedan surgir. Foto: CAE. ▶



nuclear y, en particular, de la etapa final se han mejorado o pueden mejorarse hasta un punto tal que las expectativas de riesgos nucleares alcancen valores sensiblemente inferiores a los aceptados como consecuencia inevitable de la vida cotidiana en nuestra sociedad industrial. Estas medidas han originado gastos suplementarios, que se reflejan directa e indirectamente en las recientes estimaciones económicas, debidos a la incorporación de dispositivos adicionales de seguridad, al costo creciente de los servicios del personal técnico, a los mayores plazos de construcción y a las reservas también mayores para imprevistos.

CUADRO 1: Evolución de las estimaciones¹ del crecimiento mundial de la energía nucleoelectrica²
(potencia instalada – a fin de cada año – en GW(e))

Fecha de la estimación Año	1969	1970	1973	1975	1976
1970	25,6	18	14	–	–
1975	101–125	118	94	71	–
1980	235–330	300	264	179–192	–
1985	–	610	567	475–525	440–450
1990	–	–	1070	875–1000	750–850
2000	–	–	–	2000–2500	1700–2000

¹ Estimaciones de la OCDE/AEN-OIEA basadas en las informaciones facilitadas por los Gobiernos de los Estados Miembros.

² Con exclusión de los países de economía centralmente planificada.

LOS GASTOS DE INVERSIÓN DE LAS CENTRALES NUCLEARES EN RETROSPECTIVA

Basta echar una ojeada a las estimaciones de los gastos de inversión correspondientes a los LWR, efectuadas en los últimos siete u ocho años, para ver que la dispersión de las cifras es tan pronunciada que quebranta seriamente la fiabilidad de las estimaciones futuras. En el Cuadro 2, basado en una serie de estudios detallados realizados por la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos (USAEC) al correr de los años, se resume esta situación algo desconcertante.

A primera vista, los gastos unitarios de inversión correspondientes a LWR, para potencias del mismo orden de magnitud, parecería que se han más que quintuplicado en siete años. De tenerse en cuenta las estimaciones hechas a finales de 1975, el factor de multiplicación llegaría casi a seis. Dado que ni el costo del equipo ni el volumen del trabajo requerido han experimentado aumentos de esta magnitud, la situación exige evidentemente un análisis más detallado, cuya primera etapa consiste en distinguir entre las alzas "aparentes", atribuibles a los efectos contables de la inflación, y los aumentos de costos "reales", resultantes de la aparición de nuevas necesidades inesperadas.

Aumentos contables

Las cifras indicadas en el Cuadro 2 comprenden subidas de precios de magnitud variable estimadas para períodos distintos de tiempo conforme a tasas diferentes, lo que dificulta considerablemente toda tentativa de determinar el aumento real del costo de las centrales nucleares en contraposición al aumento contable.

CUADRO 2: Panorámica de las estimaciones de los gastos de inversión correspondientes a las centrales provistas de reactor de agua ligera (LWR), del orden de 1000 MW(e)
(En dólares corrientes de los Estados Unidos, incluidas las subidas de precios)

Fecha de estimación	Mediados de 1967	Mediados de 1969	Mediados de 1972	Principios de 1973	Fines de 1974
Fecha de entrada en servicio	Mediados de 1971	Mediados de 1974	Fines de 1977	Fines de 1977	1983
Gasto de inversión unitario (dólares corrientes por kW(e))	134	200	350	440	720

Por importante y necesaria que sea una estimación correcta de las sucesivas subidas para el fabricante, la compañía eléctrica que adquiere la central, el banquero y el que fija las tarifas, sus repercusiones sobre los gastos de inversión totales deben corregirse plenamente para poder hacer comparaciones económicas entre diferentes años o centrales. Hay que percatarse de que incluir las subidas sucesivas de precios en la estimación de los gastos totales viene a ser lo mismo que medir una distancia entre dos puntos con una vara cuya longitud disminuyera, a menudo de modo irregular, al avanzar desde el punto de salida al de llegada. Así, el costo total de 720 dólares/kW(e) para una central en funcionamiento en 1983, cuya construcción requiera por ejemplo 7,5 años, se obtiene sumando un cierto número de dólares con poder adquisitivo de 1976, otro número de dólares con poder adquisitivo de 1977, etc., hasta 1983. Es evidente que no hay nada en común entre este total y el gasto estimado de inversión de una central de petróleo que vaya a entrar en servicio ese mismo año, pero cuya construcción no comience sino en 1978, o entre dicho total y el gasto de inversión real de una central nuclear puesta en servicio en fecha diferente, pues cada gasto total se expresaría como una suma de dólares de diferentes valores.

Otro elemento de confusión radica en la estimación del interés durante la construcción en períodos inflacionarios. El tipo de interés durante la construcción guarda desde luego relación con el ritmo de subida de precios supuesto, no solo porque los pagos progresivos que deben hacerse con intereses varían, sino además porque el propio tipo de interés depende del ritmo de subida de los precios. Está claro que no se obtendrán fondos en las mismas condiciones, ya sea de particulares o de organismos oficiales, si la tasa probable de inflación es, digamos, del 10% o si es 0. Lo mismo puede decirse, en líneas más generales, de la tasa de actualización de valores. Sin embargo, esto a menudo no se tiene en cuenta al estimar los costos.

La Figura 1, tomada del extenso estudio sobre el costo de la energía nucleoelectrónica contenido en el informe USAEC WASH-1345, permite apreciar la importancia de estas consideraciones. Para los LWR que se prevé entrarán en servicio en 1983, las subidas de precios suponen alrededor del 25% del total, mientras que solo representaban una parte insignificante en las estimaciones de 1967. Pero la Figura 1 no es totalmente explícita, porque incluso si se suprime la estimación de las subidas de precios en cada total, los resultados obtenidos siguen expresándose en unidades monetarias de los distintos poderes adquisitivos correspondientes a los años 1967-1974.

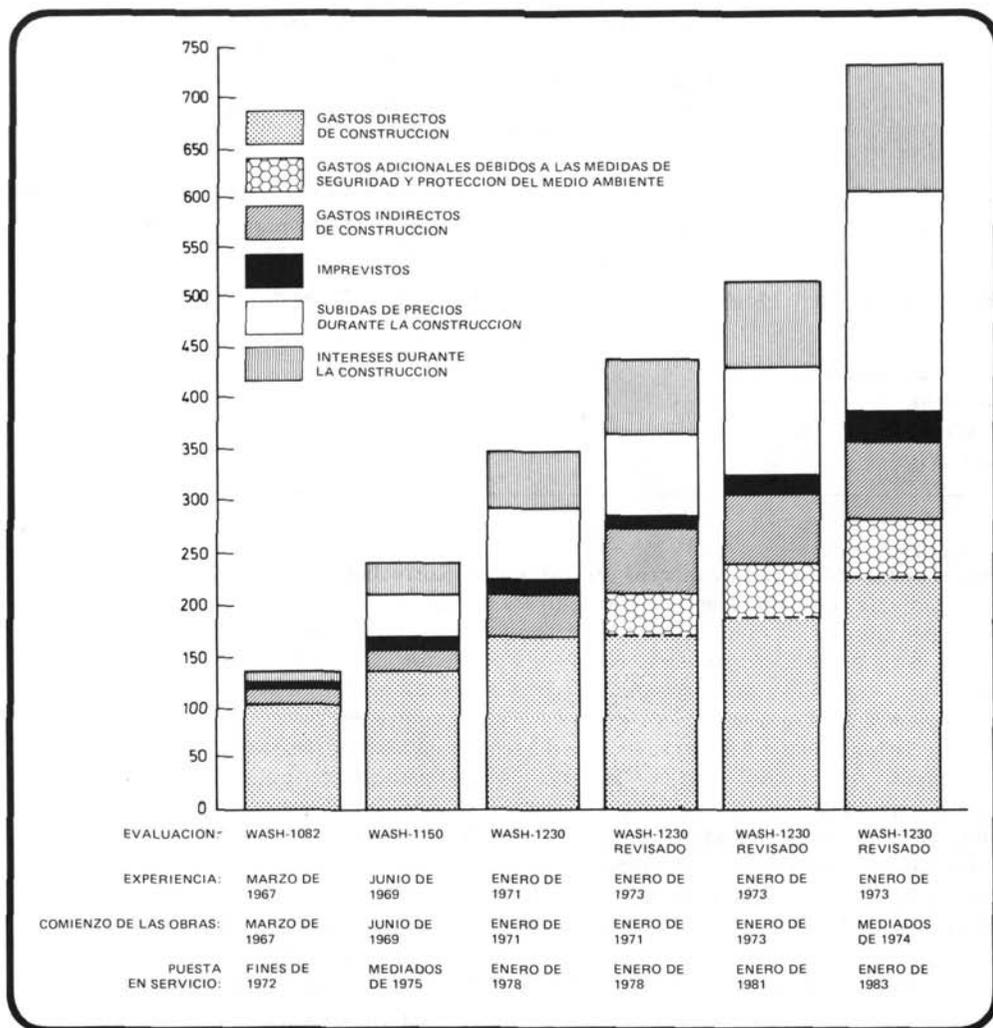


Fig.1. Comparación de las estimaciones del costo de las centrales nucleares [gasto total de inversión para unidades de 1000 MW(e)]

Aumentos "reales" de los costos

La etapa siguiente es reducir a un denominador común todas las estimaciones, expresando todos los costos en dólares de un año determinado. Un ejemplo particular de esta comparación económica "corregida" figura en el Cuadro 3, donde se han suprimido las subidas sucesivas de precios, se han ajustado los intereses durante la construcción y las estimaciones, realizadas en 1969 y 1974, de los gastos de inversión correspondientes a las centrales nucleares, de carbón y de petróleo, en el intervalo 1000-1100 MW(e), se han expresado todas en dólares constantes de poder adquisitivo de mediados de 1974. Aunque las cifras obtenidas constituyan inevitablemente valores medios abstractos sin ninguna relación con un caso determinado, esclarecen con luz reveladora lo realmente ocurrido en los últimos cinco años:

1. Los gastos estimados de inversión correspondientes a las centrales nucleares, expresados en dólares constantes, han subido en los últimos cinco años de un 60% a un 115%, y no un 200%, como la Figura 1 parece indicar.
2. Durante el mismo período, los gastos estimados de inversión correspondientes a las centrales de combustible fósil han aumentado igualmente en proporciones que, en promedio, solo son ligeramente menores que las registradas para las centrales nucleares.
3. Los márgenes de indeterminación de los costos son algo mayores en el caso de las centrales nucleares.

Las causas de estos aumentos son complejas y guardan relación entre sí. Prescindiendo de las estimaciones a la baja resultantes de las agresivas políticas de penetración del mercado que prevalecieron sobre todo entre 1966 y 1969, esas causas pueden atribuirse en general a las subidas por los siguientes conceptos: medio ambiente, seguridad, gastos indirectos y reservas para imprevistos, cuyo examen detallado se sale de los límites de este artículo. De todas formas, puede afirmarse decididamente que las consideraciones relativas al medio ambiente y a la seguridad son el origen de los principales aumentos, no solo por el equipo suplementario que implican, sino sobre todo por la enorme expansión de los servicios de construcción y de ingeniería, los mayores plazos de construcción y el considerable aumento de las reservas para imprevistos.

El Cuadro 4, que presenta en forma resumida las estimaciones, hechas en 1969 y 1974, acerca del personal de diferentes categorías necesario para los trabajos de ingeniería y construcción que requieren las centrales nucleares, muestra, con respecto al personal, razones de las estimaciones análogas a las contenidas en el Cuadro 3, y confirma hasta cierto punto la validez de las afirmaciones referentes a las causas principales del alza de los costos.

Diferencias entre los gastos de inversión correspondientes a las centrales LWR y a las otras centrales.

Los datos del Cuadro 3 pueden servir para obtener estimaciones aproximadas de la magnitud de las diferencias entre los gastos de inversión unitarios de los grandes reactores de agua ligera, en los países industrializados, y las centrales de combustible fósil. Por razones obvias

CUADRO 3: Valor promedio de las estimaciones de los gastos de inversión unitarios correspondientes a las centrales ¹ de LWR, de carbón y de petróleo, del orden de 1000 a 1100 MW(e)
(En dólares de los Estados Unidos, poder adquisitivo de mediados de 1974 (dólares de 1974 por kW(e)))

	LWR	Carbón	Petróleo
Estimaciones de 1969	267	235	200
Estimaciones de 1974	500±75	425±40 ²	350±25 ²
Intervalo de razones de las estimaciones de 1974 a las de 1969	1,59–2,15	1,64–2	1,63–1,88

¹ Grupos gemelos en emplazamientos de las mismas características generales, con refrigeración de paso simple.

² Con sistemas de extracción del SO₂.

CUADRO 4: Estimaciones promediadas pasadas y presentes del personal necesario para la construcción de una central nuclear de 1000 MW(e)
(millones de horas-hombre)

	Estimación promediada de 1969	Estimación promediada de 1974	Razón de las estimaciones
I. Personal de construcción:	6	11	1,83
II. Servicios profesionales:			
a) Arquitectura e ingeniería	0,7	1,2	1,71
b) Dirección de la construcción	0,7	1,3	1,86

CUADRO 5: Intervalo estimado de los costos de las etapas iniciales del ciclo del combustible en el caso de un LWR en equilibrio
(dólares de los Estados Unidos de mediados de 1974)¹

	\$/kg de combustible	Milésimas de dólar/kWh
Uranio y transformación	339-500	1,41-2,10
Enriquecimiento	296-440	1,23-1,83
Fabricación	120-150	0,5 -0,62
Costos directos totales	755-1090	3,14-4,55
Costos indirectos	-	1,23-1,80
Costos totales de las etapas iniciales	-	4,37-6,35

¹ Central de 1000 MW(e) — rendimiento térmico: 33%
enriquecimiento del combustible: 0,03
quemado de equilibrio: 30 000 MWd/t

CUADRO 6: Precios de paridad del carbón y del petróleo puestos en la central
(dólares de mediados de 1974 por millón de kilocalorías)

	Carbón	Petróleo
Caso más desfavorable para las centrales nucleares	3,76	4,56
Casos más favorables para las centrales nucleares	1,84	2,35

Nota: En estos cálculos se ha utilizado una tasa de actualización de 10% con precios constantes y un factor de carga del 70%.

deben compararse los valores superiores de las estimaciones relativas a las centrales nucleares con los valores análogos de las referentes a las centrales de combustible fósil, pues sería un tanto ilógico suponer que las consideraciones relativas al medio ambiente, que son una de las principales causas de posibles aumentos, tendrían gran peso cuando se tratase de una clase de centrales y ninguno en el caso de las otras. En estas condiciones, el intervalo aproximado de las diferencias entre los gastos unitarios de inversión de las centrales nucleares y los de las de carbón parece que va de 40 a 110 dólares por kW(e), y entre las nucleares y las de petróleo de 100 a 200 dólares, poder adquisitivo de mediados de 1974. Para que la estimación sea prudencial, cabe tomar como línea general de referencia las diferencias máximas de 110 dólares frente al carbón y de 200 dólares frente al petróleo.

Debe recalcar con toda insistencia que el precedente análisis se refiere solo a las grandes centrales de reactores de agua ligera en países industrializados con programas nucleares importantes. Toda tentativa de extrapolar estas cifras a fin de estimar los costos de una primera central nuclear en un país en desarrollo, por ejemplo por simple relación entre el costo unitario y la potencia, sería estéril y desorientadora. La variación de factores tan fundamentales como la infraestructura laboral e industrial, las características del emplazamiento, la magnitud del suministro, el tipo de contrato y las condiciones de financiamiento hacen que cada situación sea única y toda generalización imposible.

COSTOS DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

En los tres últimos años, las estimaciones del costo de algunas de las principales fases del ciclo del combustible nuclear han fluctuado todavía más que las del costo de inversión de las centrales nucleares. Los márgenes de indeterminación son particularmente amplios en las etapas finales del ciclo del combustible y, por tanto, parece razonable considerar los costos de las fases iniciales disociados de los de reelaboración y reciclado.

Costos de las fases iniciales

Uranio. En los tres años que median entre 1973 y 1976, el precio de la libra de U_3O_8 ha aumentado espectacularmente, dejando muy atrás la cota de seis a ocho dólares, usual a principio de los años setenta. Sin embargo, es imposible resumir en una sola cifra la magnitud de esta subida. No pueden considerarse indicadores fidedignos para el futuro ni los precios en plaza de cantidades modestas de uranio que se entregarán en 1976, que llegaron hasta 42 dólares por libra al final de 1975, ni los precios pagados por los suministros efectuados durante dicho año en virtud de contratos anteriores, cuyo valor es mucho más bajo, ni los aceptados en virtud de los nuevos contratos firmados durante un período de tensión acentuada.

A lo sumo puede decirse que pertenece al pasado la época del uranio barato, pero que la explosión de precios de 1974–1975 todavía no ha dejado sentir sus efectos en lo que respecta a nuevos descubrimientos y producciones en regiones propicias, en las que las prospecciones fueron escasas o nulas durante el largo período de abundancia. Parece razonable prever para el futuro un intervalo de precios de 20 a 30 dólares (poder adquisitivo de mediados de 1974) por libra de U_3O_8 , con subidas en proporción a la inflación general.

Enriquecimiento. Los actuales precios de los servicios de enriquecimiento prestados por las instalaciones construidas hace ya varios decenios no sirven tampoco como indicio de los precios futuros. El canon de 53 a 61 dólares por kilogramo de trabajo de separación que ahora se cobra en los Estados Unidos será probablemente rebasado con mucho por las nuevas instalaciones y parece razonable un intervalo de precios de 80 a 120 dólares de mediados de 1974, con los ajustes que requiera la inflación general.

Fabricación de combustible. Este componente del costo se viene destacando por su estabilidad y es probable que el intervalo de precios siga siendo de 120 a 150 dólares por kilogramo de combustible fabricado.

El Cuadro 5 presenta en forma resumida los resultados de estas estimaciones en el caso concreto de los componentes del costo del combustible (uranio enriquecido al 3%) y del componente "combustible" de los costos de generación de electricidad en una central LWR. Su intervalo de fluctuación es relativamente amplio, de 4,37 a 6,35 milésimas de dólar por kWh. Esta dispersión se acentúa todavía más si se tienen en cuenta las etapas finales del ciclo del combustible nuclear.

Costos de las etapas finales

Los principales componentes del costo de las fases finales del ciclo del combustible presentan márgenes tales de indeterminación que resulta un tanto prematuro proceder a un análisis económico de sus efectos. Si se tienen en cuenta solamente los principales componentes del costo pueden formularse las siguientes consideraciones generales:

Reelaboración. Dada la falta de experiencia industrial no es del todo sorprendente observar que las estimaciones de los costos de reelaboración varían entre 150 y 300 dólares por kilogramo de combustible, frente a 40 dólares por kilogramo estimados a principios de 1972, lo que incluso después de deducir la inflación representa un alza del triple al séxtuple.

Costo de fabricación de elementos combustibles mixtos Pu, U. Según las estimaciones, este costo estaría comprendido entre 250 y 350 dólares por kilogramo. En consecuencia, la diferencia con respecto a la fabricación de elementos de uranio socilaría entre 100 y 200 dólares por kilogramo.

El **valor del uranio recuperado** dependerá del costo supuesto para el uranio natural y para el trabajo de separación.

El **valor del plutonio fisionable** destinado a su reciclado en reactores de agua ligera dependerá también de los citados factores, pero además influirán en él las desventajosas condiciones económicas supuestas para la fabricación de combustibles de óxidos mixtos.

Así, pues, incluso una enumeración tan simplificada como ésta nos confronta con una serie de interrogantes que afectan a cuatro de los principales componentes que intervienen con efectos recíprocos: el uranio natural, el trabajo de separación, la reelaboración y las condiciones desventajosas de fabricación. Si solo se admitiesen dos valores extremos para cada uno de ellos, habría que examinar 16 casos posibles. Para los fines del presente artículo bastará indicar que, según apreciaciones muy aproximadas, la combinación más favorable se traduce en un beneficio de 150 dólares por kilogramo de metal pesado, es decir alrededor de 0,631 milésimas de dólar/kWh, y la situación más desfavorable arroja un déficit de más de 100 dólares por kilogramo o sea más de 0,42 milésimas de dólar/kWh.

Teniendo en cuenta las demás incógnitas relativas al costo de la evacuación definitiva de los desechos, parecería razonable, para los fines del presente estudio, suponer que la reelaboración cubrirá aproximadamente gastos y prescindir de ella en estas estimaciones de carácter muy sumario. Esto no supone en absoluto subestimar la importancia fundamental de la etapa final del ciclo del combustible nuclear para el logro de una industria nuclear desarrollada.

La última observación es tanto más pertinente cuanto que las estimaciones de los costos de las etapas iniciales no incluyen los gastos de ampliación de las instalaciones de almacenamiento del combustible en las centrales, que serán necesarios de no procederse a la reelaboración, ni la posibilidad de una reelaboración obligatoria incluso sin beneficios económicos. En un

y otro caso el límite superior del costo total del combustible se acercaría a la cota de 7 milésimas de dólar por kWh, mientras que el inferior podría bajar hasta 3,74 milésimas de dólar por kWh en las hipótesis más favorables.

CONCLUSIONES PROVISIONALES

A pesar de los elementos de indeterminación recalcados en los párrafos precedentes, las grandes centrales nucleares siguen ofreciendo un considerable incentivo económico en la mayoría de los casos. Esta conclusión se desprende claramente del Cuadro 6, que indica los precios de paridad del carbón y del petróleo (es decir, los límites por encima de los cuales las centrales nucleares empiezan a tener ventajas competitivas) en las hipótesis más favorables y más desfavorables consideradas en este estudio de los gastos de inversión y de combustible de las centrales nucleares.

Si consideramos primero el caso más desfavorable, los límites de 3,76 dólares por millón de kilocalorías, en el caso del carbón, y de 4,56 dólares por millón de kilocalorías, en el del petróleo (que corresponden aproximadamente a 26 y 46 dólares por tonelada), indicados en dicho cuadro, hoy día han sido ya ampliamente rebasados en muchos lugares y, a menos de una baja vertiginosa del precio del petróleo, que no parecen desear ni los productores ni los consumidores, es extremadamente poco probable que se descienda hacia ellos en un futuro previsible. En el caso más favorable, las ventajas económicas de las centrales nucleares son abrumadoras, aunque su valor exacto solo puede determinarse analizando las características concretas de cada caso particular.

En estas condiciones, la explicación de la paradoja que supone la contracción de los programas nucleares a pesar de las manifiestas ventajas desde el punto de vista del costo, debe buscarse sobre todo fuera del ámbito económico. Los aplazamientos y las anulaciones que han afectado a los encargos de centrales a corto plazo por parte de las compañías eléctricas de algunos de los principales países nucleares como los Estados Unidos, podrían explicarse como resultado de la recesión de 1974-1975 y por el estancamiento consiguiente del consumo de electricidad. El equipo encargado a finales de los años sesenta en base a una tasa supuesta de crecimiento de la demanda del 6 al 7% anual entró en servicio en 1974 y 1975 cuando la demanda estaba totalmente estancada. Por ello varias compañías eléctricas se encontraron con grandes márgenes de capacidad de reserva en un momento en que la escasez de capitales y el brusco encarecimiento de los combustibles fósiles dificultaban grandemente el financiamiento de las nuevas instalaciones.

Pero esto es solo una explicación parcial y la causa fundamental hay que buscarla sin duda en el efecto combinado de los puntos dudosos. Algunos de ellos pueden reducirse a términos cuantitativos aproximados, como se ha hecho en este breve análisis, pero los efectos psicológicos de su acumulación sobre los directores de las compañías eléctricas y los gobernantes de los países no pueden reducirse a simples cifras. Además, algunas de las incógnitas principales en cuanto al ciclo del combustible nuclear y a la aceptación por el público no pueden sencillamente reducirse a términos económicos. El futuro de la energía nucleoelectrónica depende de la aclaración de estos problemas y de su solución correcta, más que de la proliferación de las comparaciones económicas.