

# Expansión de la energía nucleoelectrica y necesidades de combustible entre los años 1975 y 2000

por E. Goodmann y R. Krymm\*

En el presente artículo se examinan las previsiones recientemente formuladas de la potencia nuclear instalada que cabe suponer que vaya entrando en servicio a lo largo de los próximos 25 años.

El análisis de los márgenes de incertidumbre que influyen en las previsiones de la energía nucleoelectrica conduce a seleccionar una estimación probable y otra del caso de máximo crecimiento, sobre cuya base se calculan las necesidades de uranio y de trabajo de enriquecimiento, necesidades que se comparan con las fuentes de suministro actuales y potenciales

Independientemente de sus efectos económicos a corto y a largo plazo, la reciente crisis energética, durante la que se cuadruplicó el precio de los crudos en las principales regiones exportadoras y se produjo un alza de los precios de otros combustibles clásicos, ha venido a poner en primer plano, con toda claridad, el carácter finito de las fuentes energéticas, concepto que, aunque proclamado a menudo en el pasado, se había descuidado un tanto en la euforia del rápido crecimiento del consumo de energía durante los dos últimos decenios.

Si bien las estimaciones de los recursos de combustibles fósiles varían muy ampliamente, estos quedan comprendidos por lo general en el intervalo de  $1,5 \times 10^{12}$  a  $15 \times 10^{13}$  toneladas equivalentes de carbón, o para expresarlo empleando una unidad más adecuada, entre 40 y 400 Q ( $Q = 10^8$  Btu =  $250 \times 10^{15}$  kcal), en cuyo total el carbón representa, con gran diferencia, la proporción más grande. El actual consumo mundial es del orden de 0,28 Q al año, por lo que a primera vista el problema del agotamiento de los recursos no parece revestir una urgencia inmediata. Ahora bien, incluso si la tasa de crecimiento del consumo de energía, que ha sido de un 5% durante los dos últimos decenios, se redujera a un 4%, estas reservas quedarían agotadas en un plazo de 50 años, si se acepta la estimación más baja, es decir 40 Q, y dentro de un centenar de años si resultase cierta la cifra superior de 400 Q. Por consiguiente, es indispensable explotar nuevas fuentes de energía distintas de los combustibles fósiles. Entre estas, la energía nucleoelectrica basada en la fisión es con gran diferencia, la competidora más destacada.

\* Este estudio proyectivo se preparó para el Simposio organizado por la Comisión Económica para Europa sobre "El papel de la energía nucleoelectrica para satisfacer la futura demanda de energía y cooperación internacional en esta esfera", celebrado en Grecia del 19 al 23 de mayo.

Conduciría a una apreciación equivocada de la situación el comparar estas cifras con las cantidades de energía que podrían producirse con reactores de potencia de los tipos hoy en día en servicio, empleando los recursos actualmente comprobados de uranio de bajo costo, los cuales son del orden de 1 a 3 Q únicamente. En efecto, la geología del uranio es una ciencia relativamente nueva y la labor de prospección se ha concentrado en formaciones particularmente favorables situadas en un corto número de países. Por espacio de casi dos decenios la búsqueda de nuevos criaderos estuvo prácticamente paralizada como consecuencia de la debilidad de la demanda. No parece que quepa duda alguna de que la actual reanudación de la labor de prospección y su ampliación a regiones del mundo a las que en el pasado no se había prestado la debida atención incrementará de modo sustancial las reservas conocidas. Tal vez más importante aún sea la posibilidad de utilizar minerales de ley más baja de cuya existencia se había venido haciendo prácticamente caso omiso en el pasado. Además, el porcentaje relativamente bajo que el costo del uranio representa en la generación nuclear de electricidad permite considerar la posibilidad de utilizar materias primas a un precio cinco veces superior al de las actuales sin que por ello aumente el costo de producción de la energía eléctrica en más de 50%. Por último, el desarrollo satisfactorio de reactores avanzados es posible que permita obtener con misma cantidad de uranio de 10 a 60 veces más energía que con los actuales reactores de probada eficacia. Cuando se tienen en cuenta todos estos factores, parece que los recursos de combustible nuclear son del mismo orden de magnitud que los de combustibles fósiles, de utilizarse en los reactores actuales, y de uno a dos órdenes de magnitud superiores si se empleasen en reactores reproductores. Las dificultades y limitaciones en esta coyuntura estriban, en efecto, no en los recursos de combustible sino en problemas de tecnología e ingeniería que en los últimos 20 años se ha demostrado que pueden resolverse.

Durante los 20 años transcurridos desde la Conferencia de Ginebra de 1955, se ha llevado a cabo una enorme labor de desarrollo en la esfera de la energía nucleoelectrica. En términos generales, cabe afirmar que en el primer decenio (de 1955 a 1965) destacó la aparición de varios sistemas prometedores de instalaciones generadoras de energía nucleoelectrica que salvaron la laguna entre los reactores prototipo y las centrales industriales. El segundo periodo (de 1965 a 1975) fue testigo de la rápida incorporación de centrales nucleares de gran potencia a las redes eléctricas de diversos países industriales y la entrada en servicio de un corto número de centrales nucleares en varios países en desarrollo.

Algunas cifras de las que figuran en el **Cuadro 1** servirán para ilustrar la rapidez de este proceso. En 1955 había en el mundo, en dos países, dos reactores de potencia con una capacidad total de 7,4 MW(e). En 1965, el número de reactores en servicio era ya de 66, en 9 países, con una potencia total de 7 000 MW(e). Antes de que finalice el año 1975 cabe confiar en que se encontrarán en servicio, en 19 países, más de 200 centrales con una potencia total de cerca de 92 000 MW(e), y para 1980 es de esperar que se llegue a 400 centrales, con casi 250 000 MW(e), en 26 Estados.

**CUADRO 1: Crecimiento en el pasado de la potencia nuclear instalada**

	1955	1960	1965	1970	1975
Potencia nuclear (1000 MW(e))	0,007	0,13	7,1	20	92
Número de reactores de potencia	2	24	66	98	200
Número de países en que se hallan en servicio	2	5	9	14	19



Aspecto del reactor de agua pesada generador de vapor de Winfrith, en Inglaterra: verificación del diámetro de los distintos tubos de presión durante una parada del reactor para proceder a la recarga de combustible. Foto: UKAEA.

## PREVISIONES RELATIVAS A LA ENERGIA NUCLEOELECTRICA Y SUS LIMITACIONES

### ANTES DE LA CRISIS ENERGETICA DE 1973-1974.

En el período 1945-1970 quedaron un tanto relegadas al olvido lo mismo la amenaza de agotamiento de las fuentes de combustibles fósiles que las incertidumbres inherentes a las previsiones relativas a energía primaria y a la energía eléctrica. La extrapolación de las tendencias de crecimiento registradas en años anteriores, completada en ocasiones con análisis correlacionados del incremento del PNB previsto y con estudios sectoriales de la demanda, había conducido a un firme convencimiento de que la tasa de crecimiento de la demanda de energía primaria, estimada entre un 4 y un 5% anual, así como la de aumento del consumo de electricidad, cifrada entre un 7 y un 8%, se mantendrían constantes por lo menos durante el resto del siglo en el caso de los países industriales avanzados, mientras que en ciertos Estados en rápido desarrollo se registrarían tasas sensiblemente más elevadas.

Esta composición de lugar se basaba en el tranquilizador supuesto de unos precios estables de la energía que evolucionarían todo lo más a la par que el índice de inflación general, cuando no fueran quedándose realmente a la zaga de éste como había ocurrido entre 1950 y 1970.

En medio de esta satisfactoria concordancia entre las previsiones y la experiencia real, la energía nuclear destacaba como una excepción inquietante. Todas las dificultades con que tropieza una importante industria nueva: transición desde la etapa de los prototipos a la de los modelos industriales, mejoramiento constante de los diseños, problemas de construcción, embotellamientos en el suministro de materiales y componentes de crítica importancia, necesidades financieras, problemas de reglamentación, y dificultades de aceptación por parte de los órganos jurídicos y de la opinión pública, se tradujeron en retrasos y en variaciones de las estimaciones de los costos, con lo que las perspectivas imaginadas de la introducción económica de la energía nucleoelectrónica pasaron a ser función del optimismo del autor de las previsiones y de la fecha en que éstas se hacían. El mejor ejemplo de esta variabilidad lo constituye tal vez un resumen de las previsiones hechas durante los últimos 12 años con respecto a la potencia nuclear total instalada que se encontrará en servicio en 1980 en un país de los que marchan a la cabeza del mundo en la esfera de la energía nucleoelectrónica: los Estados Unidos. Conforme puede verse en el **Cuadro 2**, no sólo, en efecto, las previsiones relativas a la potencia instalada en 1980 casi se cuadruplicaron entre 1962 y 1970, lo que tal vez es explicable cuenta habida de los perfeccionamientos constantes de los planos y el funcionamiento satisfactorio de una serie de centrales, sino que también se redujeron en un 30% entre 1970 y 1974 a pesar de la rápida subida del precio de los combustibles fósiles.

**CUADRO 2: Variabilidad de las previsiones de la potencia nuclear instalada en los Estados Unidos en 1980**

	1962	1964	1966	1967	1970	1971	1972	1974	1975
Potencia instalada prevista para 1980 [1000 MW(e)]	40	75	95	145	150	151	132	102	[a]

[a] Previsión no ultimada aún.

### REPERCUSIONES DE LA CRISIS ENERGETICA

El hecho de que el precio del que había pasado a ser el principal combustible del mundo, el petróleo bruto, se cuadruplicase en menos de los tres meses transcurridos de diciembre de 1973 a febrero de 1974, constituyó un acontecimiento sin precedentes en la historia

posbélica de la energía. Aparte de los trastornos económicos y financieros a corto plazo a que puede dar lugar, sus efectos a plazo más largo sobre la demanda de energía primaria y de energía eléctrica han hecho que resulte considerablemente más arriesgado que en el pasado formular previsiones en esta esfera. Los riesgos nacen principalmente de la dificultad de encontrar contestación a las dos preguntas siguientes: ¿qué grado de estabilidad llegará a alcanzar el actual nivel de precios? y además ¿cuál será su influencia sobre la demanda.

La primera pregunta entraña la necesidad de evaluar la solidez del consorcio de la OPEP, y sólo puede recibir respuestas hipotéticas, siendo la más probable que el actual precio de más de 10 dólares de los Estados Unidos por barril de crudo ligero arábigo sea algo erosionado por la inflación sí bien no mucho. Los previsionistas suponen ahora que la cifra más baja que sería posible o incluso deseable alcanzar estaría comprendida entre 6 y 9 dólares (para precios constantes de 1973). En otras palabras, se ha reconocido universalmente que los tiempos de la energía barata han pasado ya para siempre.

Ahora bien, independientemente de que el precio del petróleo se mantenga estable o baje ligeramente, la pregunta de cuál será su repercusión sobre la demanda de distintas formas de energía sigue siendo sumamente difícil de contestar. Los coeficientes de elasticidad de las funciones que intervienen en la demanda de los diferentes combustibles sólo han sido evaluadas para fluctuaciones de precio relativamente pequeñas y apenas pueden ser utilizados como guía para evaluar los efectos de la actual situación anómala.

Como es natural, en el caso de la demanda de energía eléctrica se plantea también la misma cuestión de estimar su sensibilidad ante las variaciones de los precios. Además, a ese problema se suma el de evaluar un posible efecto compensador que puede derivar del hecho de que ciertos usuarios de energía primaria sustituyan el petróleo por la energía eléctrica, así como de posibles modificaciones en la forma de la curva de la demanda de esta última.

Podía haber parecido lógico que simultáneamente al hecho de que las previsiones relativas a las fuentes energéticas clásicas adquiriesen bruscamente un carácter de gran incertidumbre, se hubiera reafirmado, por el contrario, la fiabilidad de las relativas a la energía nucleoelectrica. En efecto, desde un punto de vista estrictamente económico, la situación compleja y variable que imperaba en los últimos años 60 y primeros años 70 se había aclarado súbitamente. Incluso en el peor de los casos, es decir, suponiendo que se triplicase el precio del mineral de uranio y que se duplicase el costo del enriquecimiento, el costo del ciclo de combustible nuclear expresado en dólares constantes de 1974 no era de suponer que excediese de 4 milésimas de dólar/kWh frente a 16 milésimas de dólar/kWh para el petróleo, lo que representa una economía anual de 70 dólares/kWh para un factor de carga de un 65%. Al cabo de tres o cuatro años, tal economía en el costo del combustible debía compensar la máxima diferencia posible que cabe esperar que subsista entre los gastos de inversión de las centrales nucleares y de las alimentadas con aceite pesado con una potencia del orden de los 1000 MW.

Habría resultado, por tanto, que salvo en los casos relativos a aquellos países que tienen sin explotar aún importantes recursos hidráulicos y de carbón, toda previsión de la energía nucleoelectrica hubiera podido basarse muy bien en el supuesto de que, a partir de 1980, todas las nuevas centrales que se construyeran para asegurar la carga de base en las grandes redes de distribución debían ser centrales nucleares, complementadas únicamente con un corto número de centrales hidroeléctricas y de turbinas de gas, hasta llegar a representar dichas centrales nucleares el 60% aproximadamente de la potencia total instalada y ascendiendo la energía producida por ellas a más del 80% de la energía total.

No obstante, pronto se comprobó que las previsiones teóricas basadas en comparaciones efectuadas en el plano meramente económico tropezaban con una serie de limitaciones, las cuales podían clasificarse en las dos categorías principales siguientes:

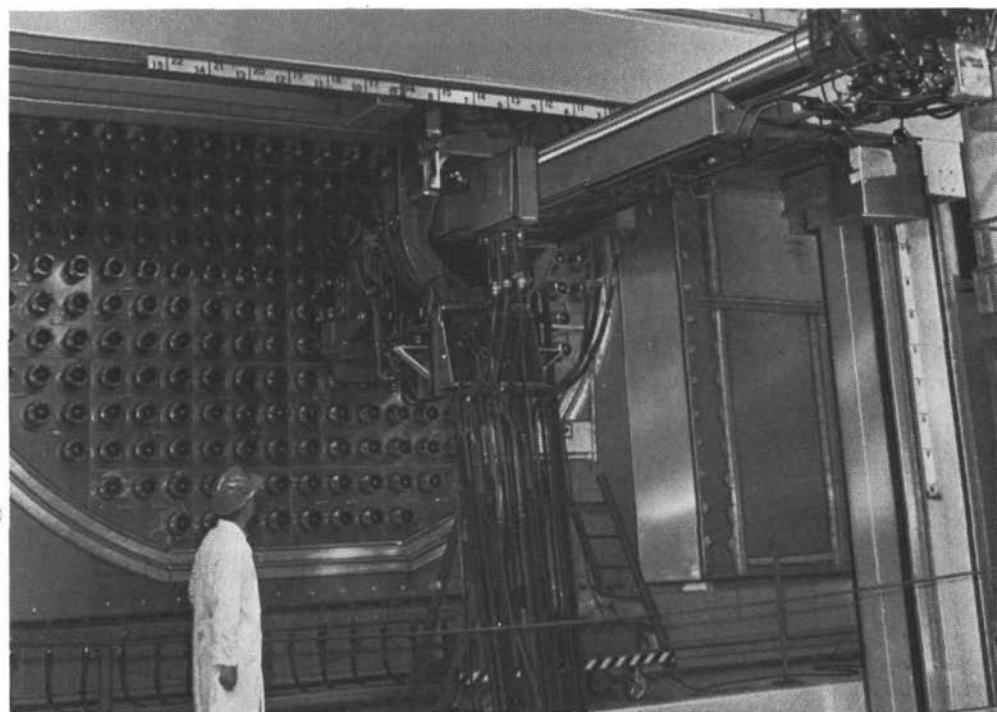
- a) En primer lugar, las limitaciones resultantes de la introducción masiva de una nueva tecnología que exigía una gran inversión de capital y entrañaba una técnica muy avanzada, conforme ya se ha indicado, limitaciones éstas que llegaron a ponerse más de manifiesto aún al tener en cuenta la aceleración de programas ya radicales de por sí. Esta realidad se dejaba sentir muy particularmente en el plano del financiamiento, en el que se necesitaban grandes inversiones de capital precisamente en el momento mismo en que el ritmo de la inflación y el tipo de interés habían alcanzado sendos máximos. En efecto, los programas de energía nucleoelectrica exigen aumentos muy fuertes de los gastos durante el período que precede a una situación de equilibrio. En cierto modo, esto no solo se aplica a la demanda de capital sino también a la demanda de energía, toda vez que las inversiones para la producción de la energía propiamente dicha y para la infraestructura auxiliar correspondiente a los combustibles son inicialmente más cuantiosas en el caso de las centrales nucleares que cuando se ejecutan programas basados en centrales clásicas.
- b) En segundo lugar, las limitaciones impuestas por los riesgos particulares inherentes a la explotación de las centrales nucleares y al control de su ciclo de combustible. A diferencia de las limitaciones incluidas en la primera categoría, estas son específicas de un programa nuclear y no tienen paralelo en otras tecnologías, por lo que es preciso encontrar nuevas fórmulas para superarlas. Los riesgos de accidente poco importantes son mayores en las centrales alimentadas con combustible fósil, si bien el ciclo del combustible nuclear incluye etapas potencialmente más peligrosas. Ahora bien, los problemas de seguridad en la construcción y explotación de las centrales nucleares y de un control riguroso de todas las complejas etapas del ciclo del combustible nuclear se habían puesto ya de manifiesto para la mayoría de los observadores antes de producirse la crisis energética. Estos problemas cobraron mayor importancia a medida que fueron hallándose económicamente justificados programas nucleoelectricos mucho más vastos, lo que condujo a renovados y más amplios esfuerzos cuyos resultados, en cuanto se refiere a la aceptación de los programas nucleoelectricos por la opinión pública y a posibles retrasos, siguen aún pendientes de determinar.

En estas condiciones no cabe sorprenderse, por lo tanto, de que las previsiones relativas a la energía nucleoelectrica durante los próximos 25 años continúen abarcando una gama bastante amplia de objetivos posibles, según puede verse en los Cuadros 3 y 4.

**CUADRO 3: Previsiones máximas y mínimas de la potencia nuclear instalada (1000 MW(e))**

(USAEC, diciembre de 1974 [1])

	1980		1985		1990		2000	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Estados Unidos	85	112	231	275	410	575	850	1400
Resto del mundo	113	157	290	420	640	900	1600	2550
<b>TOTAL MUNDIAL</b>	<b>198</b>	<b>269</b>	<b>521</b>	<b>695</b>	<b>1050</b>	<b>1475</b>	<b>2450</b>	<b>3950</b>



Sistema de carga del combustible de la central nuclear de Pickering, próxima a Toronto. Foto: AECL.

**CUADRO 4: Estimaciones más probable y máxima de la potencia nuclear instalada (1000 MW(e))**

(OIEA, septiembre de 1974 [2], datos revisados)

	1980		1985		1990		2000	
	Más probable	Máx.	Más probable	Máx.	Más probable	Máx.	Más probable	Máx.
Total mundial	255	287	663	850	1350	1850	3600	5300

**ESTIMACIONES BASICA Y MAXIMA DEL CRECIMIENTO DE LA POTENCIA NUCLEAR INSTALADA**

De las consideraciones generales expuestas en las secciones anteriores se desprende claramente que para evaluar con objetividad el papel futuro de la energía nucleoelectrica en una red dada de producción de electricidad no basta con determinar la proporción óptima desde el punto de vista económico en que han de figurar las centrales nucleares y no nucleares. En efecto, tal evaluación exige, una optimización teniendo en cuenta toda una serie de limitaciones, algunas de las cuales actualmente resulta imposible cuantificar. Entre éstas figuran los factores relacionados con la concesión de permisos de explotación y con las cuestiones de reglamentación, la actitud del público y la medida en que los gobiernos nacionales se comprometen a ejecutar programas de energía nucleoelectrica. Para muchos países en vías de desarrollo, los problemas que supone tener que financiar con divisas gastos extraordinarios son tan agudos que se ven obligados a aplazar el lanzarse a empresas por lo

demás muy rentables. En el caso de países con importantes recursos de combustibles fósiles e hidráulicos de bajo precio, como por ejemplo, la unión Soviética, se ha logrado, y es probable que se siga manteniendo, un amplio margen de flexibilidad en lo que se refiere a la fijación de los objetivos a medio y a largo plazo de los programas nucleoelectricos.

Las enormes incertidumbres inherentes a las previsiones nacionales se intensifican y multiplican cuando se intenta sumar todas ellas para obtener previsiones a escala mundial. No solamente los datos recibidos de los diversos países difieren en cuanto a su verdadero significado y a su fiabilidad, lo que hace que el procedimiento de sumarlos sea un tanto discutible, sino que, además, en ese simple procedimiento de suma casi siempre se hace caso omiso de la posible interacción de los distintos planes nacionales. Por tanto, la prudencia exige que todas las estimaciones de la futura expansión de la energía nucleoelectrica se presenten en forma de valores mínimos y máximos probables; a este criterio se ajustan los Cuadros 5 y 6 que muestran un caso básico y un caso hipotético de aceleración máxima.

#### CASO BASICO (CUADRO 5)

Debido a diferencias en la metodología empleada y en la disponibilidad de datos, los países del mundo se han agrupado en tres categorías:

- a) Los países de la OCDE, para los que las estimaciones se basan en una serie de análisis efectuados por grupos de expertos nacionales que se han revisado en fecha tan reciente como noviembre de 1974 [3,4].
- b) Los países en desarrollo que no son miembros de la OCDE y que no pertenecen al grupo de Estados de economía centralmente planificada, para los que las estimaciones se basan en un amplio estudio del mercado efectuado por el OIEA mediante misiones enviadas a 11 de estos países haciendo extensiva a otros países la misma metodología utilizada [5,6].
- c) Países de economía centralmente planificada, para los que siempre que ha sido posible se han utilizadó los objetivos del correspondiente plan nacional, complementándolos, en

#### CUADRO 5: Crecimiento estimado de la potencia nuclear instalada (Caso básico)\*

	Potencia nuclear instalada (en 1000 MW(e)), al final de cada año				
	1975	1980	1985	1990	2000
Países de la CEE	20,6	51,7	129	264	
Países europeos de la OCDE (comprendidos los de la CEE)	25,8	75,7	175	345	
América del Norte	49,8	108,6	275	531	
Japón y otros países	4,6	22	62	107	
Total correspondiente a la OCDE	80,2	206,3	512	983	2600
Países en desarrollo	2,0	10,5	47	126	360
Total parcial	82,2	216,8	559	1109	2960
Países de economía centralmente planificada	9,5	38,4	104	246	640
<b>TOTAL</b>	<b>91,7</b>	<b>255,2</b>	<b>663</b>	<b>1355</b>	<b>3600</b>

\* Con exclusión de la China continental por no disponerse de datos.



el caso de la Unión Soviética con una extrapolación de la relación registrada en el pasado entre su programa de energía nucleoelectrica y el de los Estados Unidos.

Las estimaciones que figuran en el siguiente cuadro indican que la energía nucleoelectrica se expandirá hasta una potencia instalada total de unos 3 600 000 MW(e) al final de este siglo, en cuyo momento representará el 40% aproximadamente de la potencia eléctrica total del mundo. Estas estimaciones no parece que sean muy sensibles a una disminución moderada del precio de los combustibles fósiles, actualmente elevado, y deberían permanecer prácticamente constantes aun cuando esos precios disminuyesen en un tercio.

#### CASO HIPOTETICO DE CRECIMIENTO MAXIMO ACELERADO (CUADRO 6)

Conviene subrayar con toda claridad, desde un principio, que los supuestos en que se basa este caso tienen por objeto fijar un máximo a fin de poder estimar la presión a que podrían verse sometidos los servicios relativos al ciclo del combustible en el caso de que se acelerase bruscamente la ejecución de los programas básicos anteriormente examinados. Se supone que la actual relación entre los costos del ciclo de combustible nuclear y el precio de los combustibles fósiles seguirá siendo del orden de 1/5 durante todo este período, y que para todos los grandes sistemas la optimización de los costos será el único criterio aplicable, habiendo quedado superadas en el transcurso del próximo decenio cuantas limitaciones afectan hoy genuinamente a la energía nucleoelectrica. En tales circunstancias, para el año 2000 la potencia nuclear instalada podría muy bien llegar a representar el 60% de la total, en tanto que habría que ajustar las cifras intermedias para asegurar una transición suave.

Aunque reconocidas como hipotéticas, las condiciones en las que se basa este ejemplo es probable que fueran satisfechas por diversos países, entre ellos Francia y el Japón; además, dicho ejemplo proporciona un valor máximo útil como término de comparación para evaluar las necesidades de mineral de uranio y de trabajo de separación.

**CUADRO 6: Crecimiento estimado de la potencia nuclear instalada (Caso hipotético de crecimiento acelerado)\***

	Potencia nuclear instalada (en 1000 MW(e)) al final de cada año			
	1980	1985	1990	2000
Países de la CEE	58	167	367	
Países europeos de la OCDE (comprendidos los de la CEE)	83	227	480	
América del Norte	119	358	743	
Japón y otros países	35	82	146	
Total correspondiente a la OCDE	237	667	1369	3800
Países en desarrollo	12	66	185	500
Total parcial	249	733	1554	4300
Países de economía centralmente planificada	38	117	290	1000
<b>TOTAL</b>	<b>287</b>	<b>850</b>	<b>1844</b>	<b>5300</b>

\* Con exclusión de la China continental por no disponerse de datos.

## PREVISIONES DE LA OFERTA Y DEMANDA DE URANIO Y DE TRABAJO DE SEPARACION

### DEMANDA

Para calcular la demanda de uranio natural y de trabajo de separación correspondiente a las previsiones de la potencia nuclear instalada que figuran en el **Cuadro 5** se necesita precisar los tipos de reactor, los factores de carga y la cronología de la ejecución de los planes. El **Cuadro 7** indica la combinación de tipos de reactor supuesta para los dos casos considerados. Para el "caso básico" se ha partido de las previsiones revisadas que figuran en el **Cuadro 5** y que inicialmente se formularon en 1973, y para el "caso acelerado" se ha tomado como base el **Cuadro 6**. En ambos casos se ha excluído a los países de economía centralmente planificada ya que el objeto de proceder a esta extrapolación de la demanda es compararla con la oferta, y es muy escasa la información de que se dispone sobre los recursos de uranio y la capacidad de trabajo de separación de dichos países.

La distribución de los tipos de reactor indicada en el **Cuadro 7** para el caso básico es muy parecida, en lo que se refiere a los datos hasta 1990 inclusive, al caso más probable estudiado

**CUADRO 7: Composición de la potencia nuclear instalada supuesta para estimar las futuras necesidades de uranio y de trabajo de separación <sup>a)</sup>**

	Potencia instalada (GW(e))						
	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
<b>I. Caso básico <sup>b)</sup></b>							
Reactores Magnox	5	7	7	7	7	7	7
Reactores avanzados refrigerados con gas	—	4,3	6	6	6	6	6
Reactores de agua pesada	1	4	11	23	46	73	101
Reactores de alta temperatura	—	—	2	10	43	116	206
Reactores reproductores rápidos	—	—	1	5	43	247	856
Reactores de agua ligera	8	66,9	190	508	964	1421	1734
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>82,2</b>	<b>217</b>	<b>559</b>	<b>1109</b>	<b>1920</b>	<b>2910</b>
<b>II. Caso de crecimiento acelerado <sup>c)</sup></b>							
Reactores Magnox	5	7	7	7	7	7	7
Reactores avanzados refrigerados con gas	—	4,3	6	6	6	6	6
Reactores de agua pesada	1	4	11	29	62	104	147
Reactores de alta temperatura	—	—	2	12	57	163	302
Reactores reproductores rápidos	—	—	1	6	57	348	1228
Reactores de agua ligera	8	66,9	222	673	1365	2177	2710
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>82,2</b>	<b>249</b>	<b>733</b>	<b>1554</b>	<b>2805</b>	<b>4400</b>

**Notas:**

- La potencia instalada sumada por los reactores de agua ligera se supone distribuida de la siguiente forma: 60% correspondiente a reactores de agua a presión y 40% a los de agua hirviendo.
- Tomando como base las estimaciones que se indican en el Cuadro 5, con exclusión de los países de economía centralmente planificada.
- Tomando como base las previsiones que se indican en el Cuadro 6, exclusión de los países de economía centralmente planificada.

en el informe AEN (OCDE)/OIEA [3] de agosto de 1973, edición revisada [4], con fuerte preponderancia de los reactores de agua ligera. Se han utilizado plazos análogos para las diversas etapas del ciclo de combustible y se ha supuesto un factor de carga del 70% para todo el período considerado. Es posible que para el caso de crecimiento acelerado pudiera resultar más apropiado utilizar en las previsiones correspondientes a los años 90 un factor de carga algo más bajo y que fuera disminuyendo gradualmente, a medida que la potencia nuclear instalada vaya representando una parte proporcional mayor de la total. No obstante, frente a esta posibilidad ha de tenerse presente la probable demanda creciente de calor industrial de origen nuclear que cabe esperar que se produzca durante el decenio 1990–2000, demanda que compensaría el efecto de dicha disminución del factor de carga. Las características de los reactores empleadas en estas previsiones son las mismas que se utilizaron en el informe conjunto AEN(OCDE)/OIEA anteriormente mencionado [3].

Las necesidades de uranio y de trabajo de separación antes mencionadas se indican en los Cuadros 8 y 9, respectivamente. En las estimaciones que incluyen el reciclado del plutonio se supone que, una vez descontado el margen necesario para cubrir las necesidades de los reactores reproductores rápidos, todo el plutonio que exceda de una reserva mínima almacenada de 50 toneladas se recicla en reactores de agua ligera. Como podrá observarse, el reciclado del plutonio modifica solamente en muy pequeña medida las cantidades correspondientes a las necesidades acumuladas de uranio natural y de trabajo de separación que entrañan los dos tipos de programas de construcción de centrales nucleares, fenómeno que puede imputarse a los considerables plazos (anticipaciones y demoras) que intervienen

**CUADRO 8: Proyección de las necesidades de uranio <sup>a)</sup> (10<sup>3</sup> toneladas de U)**

	Sin reciclado del Pu		Con reciclado del Pu	
	Anuales	Acumuladas	Anuales	Acumuladas
<b>I. Caso básico <sup>b)</sup></b>				
1973	<b>19</b>	19	19	19
1975	<b>19</b>	52	19	52
1980	<b>56</b>	253	52	243
1985	114	696	104	651
1990	180	1463	166	1358
1995	235	2560	225	2380
2000	258	3830	258	3650
<b>II. Caso de crecimiento acelerado <sup>c)</sup></b>				
1973	<b>19</b>	19	19	19
1975	<b>24</b>	57	24	57
1980	<b>73</b>	303	69	292
1985	160	917	149	866
1990	263	2028	244	1896
1995	353	3660	339	3430
2000	377	5550	377	5300

Notas:

- a) Tomando como base un enriquecimiento de las colas del 0,275%.  
b) Tomando como base el Cuadro 5, con exclusión de los países de economía centralmente planificada.  
c) Tomando como base el Cuadro 6, con exclusión de los países de economía centralmente planificada.

en el ciclo del combustible. Además, gran parte de la demanda a lo largo de esos períodos corresponde a las cargas iniciales del núcleo del reactor, y estos núcleos iniciales no se benefician del reciclado del plutonio.

**CUADRO 9: Previsiones de las necesidades de trabajo de separación <sup>a)</sup> (10<sup>3</sup> toneladas de U)**

	Sin reciclado del Pu		Con reciclado del Pu	
	Anuales	Acumuladas	Anuales	Acumuladas
<b>I. Caso básico <sup>b)</sup></b>				
1973	10	10	10	10
1975	12	29	12	29
1980	30	132	27	124
1985	67	388	59	349
1990	116	868	103	774
1995	168	1610	159	1450
2000	184	2500	184	2340
<b>II. Caso de crecimiento acelerado <sup>c)</sup></b>				
1973	10	10	10	10
1975	13	30	13	30
1980	38	153	34	142
1985	94	499	83	452
1990	168	1186	151	1069
1995	241	2270	228	2070
2000	276	3620	276	3400

Notas:

- a) Tomando como base un enriquecimiento de las colas del 0,275%.
- b) Tomando como base el Cuadro 5, con exclusión de los países de economía centralmente planificada.
- c) Tomando como base el Cuadro 6, con exclusión de los países de economía centralmente planificada.

## OFERTA

El Cuadro 10 indica, en forma resumida, los recursos razonablemente seguros (reservas en el sentido minero) y los recursos adicionales estimados con costos de explotación inferiores a 15 dólares/libra de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. Estos últimos se definen como el conjunto del uranio que se supone existe en prolongaciones no exploradas de yacimientos conocidos o en criaderos todavía sin descubrir en distritos uraníferos conocidos. Se ha fijado en 15 dólares/libra de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> el límite superior del costo de explotación ya, que hasta la fecha, en las regiones en que se prevén costos más altos del mineral la labor de prospección realizada ha sido relativamente modesta:

Comparando los datos del Cuadro 10 con las cifras indicadas para la demanda en la sección anterior, se pone de manifiesto que los recursos razonablemente seguros (reservas) quedarían prácticamente agotados de aquí a 1990 en el caso de crecimiento normal o caso básico, y de aquí a 1988 en el caso de crecimiento acelerado, y que el reciclado del plutonio apenas retrasaría más de un año ese agotamiento.

Debe tenerse presente, sin embargo, que la industria de extracción del uranio debe contar en todo momento, por término medio, como reservas demostradas suficientes para cubrir las futuras necesidades de consumo durante un período de ocho años. Por consiguiente, habría que hallar reservas suplementarias del orden de 2 000 000 de toneladas antes de 1990 en el caso básico, y de 2 500 000 toneladas de reservas antes de 1988 en el caso de crecimiento

**CUADRO 10: Recursos estimados de uranio con un costo de explotación de 15 dólares/libra de  $U_3O_8$  <sup>a)</sup>, en enero de 1973 ( 1000 toneladas)**

	Recursos razonablemente seguros	Recursos adicionales estimados <sup>b)</sup>
Estados Unidos	400	679
Canadá	307	526
Sudáfrica	264	34
Australia	100	107
Resto del mundo (excluidos los países de economía centralmente planificada)	475	202
<b>TOTAL</b>	<b>1546</b>	<b>1548</b>

Notas:

- a) Valor del dólar en marzo de 1973 = 0,829 D.E.G. (Special Drawing Rights: Derechos especiales de giro).
- b) Conforme se definen en la página 12 de la referencia [3].

acelerado. Además, no deberá aceptarse ninguna discontinuidad ni altibajo brusco en las actividades de prospección, considerándose como sumamente deseable que el ritmo medio de descubrimiento de nuevas reservas aumentase de manera gradual desde las 65 000 toneladas anuales en que se ha venido cifrando a lo largo de los ocho últimos años, hasta llegar en 1990 a las 230 000 toneladas anuales.

En lo que respecta al trabajo de separación no se pretende en el presente artículo tratar de la cronología exacta de las necesidades de nuevas plantas además de las ya anunciadas y cuya capacidad se indica en el **Cuadro 11**. Como podrá observarse, para las hipótesis adoptadas y prescindiendo de las reservas almacenadas disponibles, al principio de los años 80 se necesitarán instalaciones suplementarias de trabajo de separación en los dos casos supuestos. El reciclado del plutonio puede retrasar esta fecha probable en unos dos años. Aumentando el enriquecimiento de las colas podría obtenerse un resultado análogo, pero para ello se requeriría un suministro adicional de uranio.

La falta de información ha impedido evaluar la situación con respecto a la oferta y la demanda de uranio y al trabajo de separación de los países de economía centralmente planificada. Es posible que estos países dispongan de una considerable capacidad de servicios de enriquecimiento y que tal vez cuenten con importantes recursos de uranio. Esto podría retrasar sensiblemente la fecha en la que se precisará aumentar en gran medida la capacidad de enriquecimiento para satisfacer la demanda mundial. Los acuerdos concertados recientemente entre usuarios de uranio enriquecido y la Unión Soviética han tenido ya repercusiones sobre esa capacidad de enriquecimiento.

Debe subrayarse que ni la falta de recursos de uranio natural ni de instalaciones de separación provocarán embotellamientos en la ejecución de los planes de expansión de la energía nucleoelectrica, siempre y cuando toda planificación adecuada vaya seguida de la adopción de medidas eficaces destinadas a evitar que se produzcan perturbaciones a corto plazo. En lo que atañe al uranio, los recursos adicionales indicados en el **Cuadro 10**, que permitirían satisfacer la demanda hasta 1995, incluso en el caso de un programa acelerado, representan una estimación prudencial. Más importancia tiene, sin embargo, la posible existencia de considerables reservas con costos de explotación superiores a 15 dólares/libra de  $U_3O_8$ , costo límite tomado como base en el presente análisis.

**CUADRO 11: Capacidad estimada de trabajo de separación (excluida la Unión Soviética) (1975–1985)**

	Toneladas de unidades de trabajo de separación		
	1975	1980	1985
Estados Unidos	17 000	27 000	27 000
Urenco	250	2 000	10 000
Eurodif	200	5 000	9 000
AEA, Reino Unido	400	400	400
<b>TOTAL</b>	<b>17 850</b>	<b>34 400</b>	<b>48 400</b>

Incluso si el alza alcanzase los 30 dólares/libra de  $U_3O_8$ , el costo anual de la electricidad obtenida de reactores de agua ligera no aumentaría más que en 1,3 milésimas de dólar/kWh aproximadamente, lo que apenas modificaría la posición competitiva de la energía nucleoelectrónica. No se ha iniciado todavía la evaluación sistemática de los recursos correspondientes al intervalo de costos comprendido entre los 15 y los 30 dólares/libra de  $U_3O_8$ , y es de esperar que una labor de prospección ininterrumpida y cada vez en mayor escala de las regiones más prometedoras, tanto de los países industriales como de los países en desarrollo conduzca a encontrar reservas por lo menos tan importantes como las situadas en el intervalo de costos de hasta 15 dólares/libra de  $U_3O_8$ .

Por lo que respecta al trabajo de separación, el esfuerzo requerido, por muy considerable que sea en valor absoluto, debe enfocarse en la debida perspectiva teniendo en cuenta las necesidades de capital de los programas de construcción de centrales nucleares. La inversión de capital exigida por las plantas de enriquecimiento por difusión gaseosa (comprendidas las centrales necesarias) es inferior al 7% del capital requerido por la potencia nuclear instalada para la que trabajan esas plantas, y las inversiones en plantas de separación por centrifugación son inferiores al 5% de dicho total. En esta esfera, como en el de la prospección de uranio, el principal problema estriba más en una cronología óptima de los planes de construcción de las plantas que en la lucha contra penurias insuperables.

Por desgracia, será preciso adoptar en un futuro próximo muchas decisiones relativas a la planificación de la capacidad de enriquecimiento del uranio que exigirán el conocimiento de la potencia nuclear instalada al comienzo de los años 80. Sería preciso planificar nuevas plantas de enriquecimiento y que estas se encontrasen en construcción de manera que pudiesen satisfacer en el momento oportuno las exigencias de la futura expansión de la energía nucleoelectrónica. Otra complicación deriva de la extrema sensibilidad del momento en que se necesite la planta de enriquecimiento considerada tal necesidad en función del reciclado del plutonio y de, posiblemente, fuentes adicionales de uranio enriquecido. La planificación de los recursos de  $U_3O_8$ , su transformación, fabricación y reelaboración dependen también, como es natural, del nivel que alcance la potencia nuclear instalada.

A principio de los años 80 este nivel será de la máxima importancia para la industria del ciclo de combustible, la cual ha venido padeciendo principalmente las consecuencias de un exceso de capacidad. Parece ya haber indicaciones de que un mercado favorable al vendedor, y una situación de escasez podrán plantear problemas en los años 80. La aparición de un mercado dominado por el vendedor en el sector del suministro de mineral y la insuficiencia de la capacidad de reelaboración de los Estados Unidos son signos precursores de dicha posibilidad. El riesgo de una insuficiente capacidad de enriquecimiento es tan importante para la economía nuclear básica, y los plazos previos para la construcción de nuevas

instalaciones son tan largas, que tal vez convendría establecer alguna modalidad de cooperación a nivel internacional o regional para paliar este problema. En el extremo opuesto de la cadena, es decir, las actividades de reelaboración, un retraso de uno o dos años en la disponibilidad de capacidad suficiente no es tan crítico. En efecto, durante este período, el combustible irradiado puede almacenarse, de preferencia en el emplazamiento del reactor, sin que esto origine desventajas económicas graves si tal operación se ha planificado con la debida antelación. De hecho, retardando la entrada en servicio de nuevas plantas de reelaboración se las podría construir de mayor capacidad y obtener se así economías de escala. Esta posible ventaja debe compararse con la pérdida del valor actualizado del plutonio y del uranio contenidos en el combustible almacenado.

El razonamiento precedente no es totalmente compatible con la implantación de una economía basada en los reactores reproductores. Las ventajas económicas de un sistema de reactores de este tipo está centrada en la producción, la recuperación y la reutilización de material fértil. De hecho, el tratamiento del combustible con períodos breves de enfriamiento parece redundar en ventaja de la economía general. Por tanto, parece llegado el momento de iniciar un programa de investigación y desarrollo relativo a la reelaboración del combustible agotado de reactores reproductores. La escasa capacidad actual de reelaboración de combustible agotado de los reactores de agua ligera sería intolerable en el caso de explotarse reactores reproductores. El OIEA está estudiando ya la cooperación a escala regional en materia de reelaboración, y espera continuar promoviendo la colaboración y la planificación en el plano internacional acerca de otros aspectos del ciclo del combustible.

## CONCLUSIONES

En el presente artículo se han examinado con cierto detenimiento incertidumbres con que se tropieza al querer determinar con cierta exactitud cuál será la potencia nuclear instalada en un futuro momento dado. Ahora bien, estas incertidumbres deben contrastarse con la certeza de que la energía nucleoelectrónica desempeñará un papel decisivo en la satisfacción de las necesidades energéticas de la humanidad. El rendimiento satisfactorio de diversos tipos de probada eficacia de centrales nucleares, combinado con los prometedores progresos conseguidos en el desarrollo de varios sistemas avanzados, constituyen una amplia garantía frente a toda dificultad imprevista que pueda plantearse en los reactores de un tipo dado. Además, el suministro de combustible nuclear depende de una materia prima que existe en el corteza terrestre en cantidades mucho más abundantes que los recursos estimados como seguros. Las reservas seguras están limitadas a criaderos de minerales de gran riqueza situados en determinados países, lo cual hace que se tienda a subestimar los recursos totales disponibles. La complejidad del ciclo del combustible nuclear está compensada por una flexibilidad genuina que permite reajustes entre sus diferentes etapas, por ejemplo, entre suministro de uranio natural y el trabajo de separación, o entre el almacenamiento y el reciclado del plutonio. Si bien esta flexibilidad no elimina la necesidad de una planificación previa ni la de adoptar medidas previas indispensables para cada etapa del ciclo del combustible, sí ofrece por el contrario un cierto grado de protección frente a los trastornos bruscos y las fuertes fluctuaciones de los precios.

Por lo tanto, pese a que puedan registrarse retrasos y contratiempos, hay motivo fundado para suponer que hacia el final de este siglo las centrales nucleares suministrarán más de la mitad de la electricidad que se produzca para entonces en el mundo entero.

## REFERENCIAS

- [1] "Nuclear Power Growth 1974—2000", USAEC, WASH-1139(74), febrero de 1974.
- [2] J.A. Lane y col.: "The Role of Nuclear Power in the Future Energy Supply of the World", Conferencia Mundial de la Energía, memoria N° 4, págs. 1—22, Detroit (1974).

- [3] "Uranium-Resources, Production and Demand", informe conjunto AEN(OCDE)/OIEA, agosto de 1973.
  - [4] "Energy Prospects to 1985", Informe de la OCDE, noviembre de 1974.
  - [5] "Market Survey for Nuclear Power in Developing Countries – General Report", OIEA, septiembre de 1973.
  - [6] "Market Survey for Nuclear Power in Developing Countries – 1974 Edition", publicación STI/PUB/395 del OIEA.
- 



## CURSO DE CAPACITACION EN ITALIA

Estos fueron los participantes en el primer Curso interregional de capacitación en fitotecnia para aumentar la resistencia a las enfermedades, incluido el empleo de las mutaciones inducidas, que se celebró a fines del pasado año en Casaccia, Italia. Asistieron 15 candidatos de otros tantos países.

El curso fue organizado conjuntamente por el OIEA y la FAO; fue patrocinado por el Organismo Sueco de Desarrollo Internacional (SIDA) y el Gobierno italiano. Se celebró en los locales del Laboratorio de Aplicaciones Agrícolas del Centro de Energía Nuclear, y el Profesor A. Bozzini, Director del Instituto, actuó como director del curso. El Ing. E.A. Favret, de Castelar (Argentina) fue el asesor científico y codirector.

El programa del curso comprendió clases teóricas, seminarios, coloquios y prácticas de laboratorio. Abarcó los siguientes elementos: cuestiones generales de fitotecnia y fitoprotección, una serie de cultivos y de agentes patógenos concretos, una introducción a la inducción de mutaciones, técnicas para la selección de los tipos apetecidos, a partir de poblaciones genéticamente diversas, aprovechamiento racional de variedades resistentes y algunos temas conexos.