



ENRIQUECIMIENTO DEL URANIO:

# Oferta, demanda y costes

por J. Tom Roberts

La mayoría de los reactores de eficacia confirmada, que se prevé estarán en explotación industrial durante los dos próximos decenios, necesitan uranio enriquecido. Suponiendo incluso que aumente la proporción de reactores de agua pesada alimentados con uranio natural

y que los reactores reproductores entren pronto en servicio a escala industrial, lo probable es que las centrales alimentadas con uranio enriquecido representen una gran parte de la potencia nucleoelectrica que se instale de aquí a fines de siglo. Por tanto, el problema de garantizar una oferta suficiente de servicios de enriquecimiento al costo más bajo posible es tan importante como el de conseguir reservas seguras de minerales de uranio. La actual capacidad de enriquecimiento existente en el mundo occidental quedará probablemente saturada a comienzos de los años 80; la fecha exacta dependerá del ritmo de crecimiento de la potencia nucleoelectrica y de las variaciones que experimenten las proporciones entre los distintos tipos de reactores. Como el plazo que suele mediar entre el estudio de una planta de enriquecimiento y su puesta en servicio es de 8 a 10 años, y como la cuestión, debido a sus importantes repercusiones económicas y políticas en el plano nacional, regional e internacional, ha empezado a despertar gran interés, sería incompleto todo examen de las perspectivas de la electricidad nuclear que prescindiese de su consideración.

## DEMANDA Y OFERTA

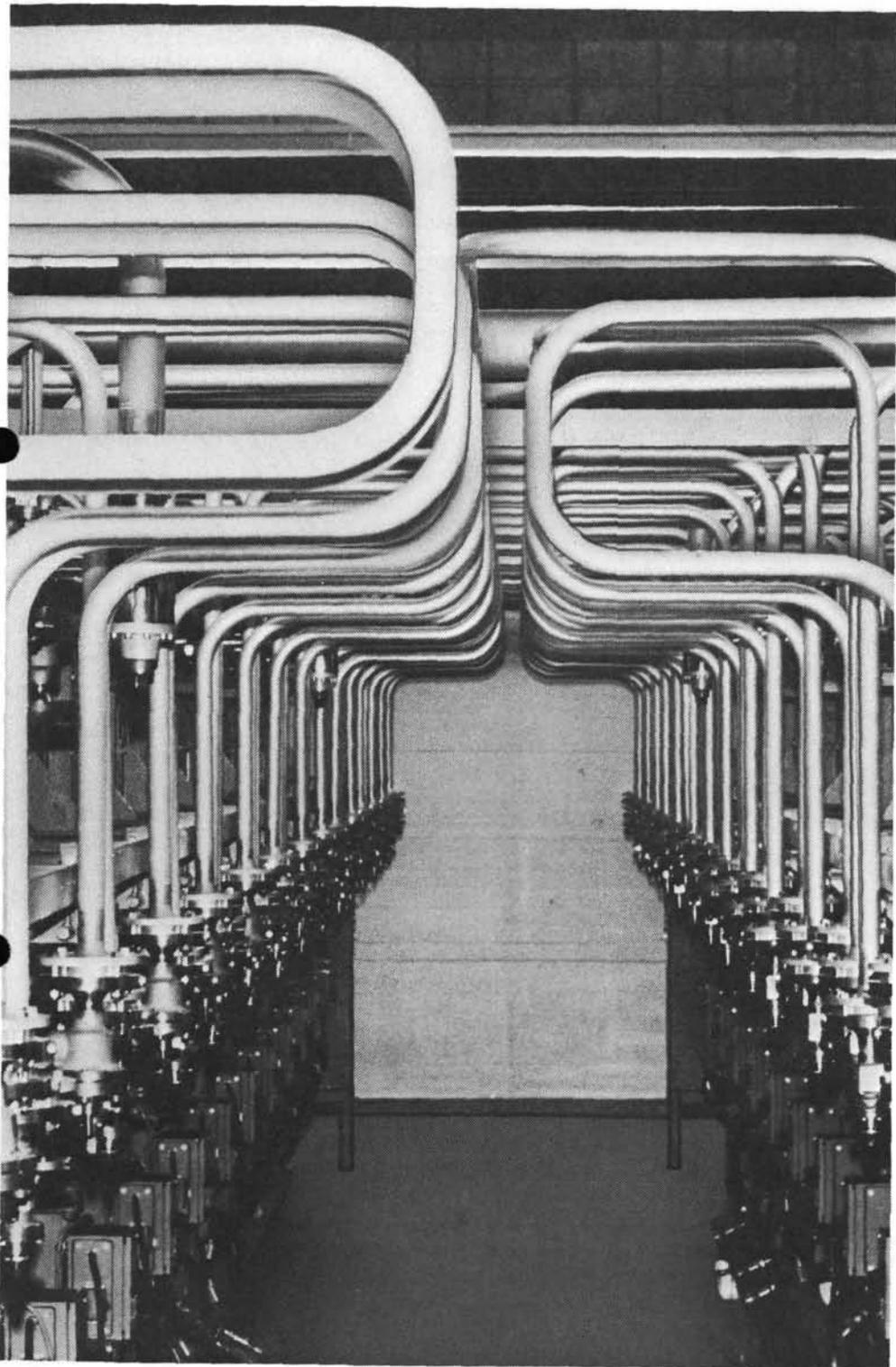
La demanda de servicios de separación depende de la demanda de uranio enriquecido, del grado de enriquecimiento del combustible y de la riqueza de los residuos del proceso. La demanda de uranio enriquecido viene a su vez determinada por la demanda de electricidad nuclear, la estrategia en materia de reactores, las características de los reactores, el factor de capacidad, los plazos necesarios y la política en cuanto al reciclado del plutonio.

### Influencia del ritmo de crecimiento de la electricidad nuclear y de la estrategia en materia de reactores\*

La **figura 1** muestra la magnitud de las necesidades anuales de trabajo de separación hasta 1990, calculadas en función de varias estrategias nucleares con diferentes combinaciones de reactores, suponiendo una riqueza residual en  $^{235}\text{U}$  del 0,25% y prescindiendo del reciclado del plutonio. Se ve que la demanda depende más del ritmo de crecimiento de la electricidad nuclear que de la estrategia adoptada en materia de reactores. Si se admiten

\* Gran parte de la presente información se basa en los resultados de un estudio conjunto sobre la oferta, producción y demanda de uranio realizado por la AEN (OCDE) y el OIEA, y que se publicará probablemente en agosto de 1973.

La planta piloto alemana de enriquecimiento UTA25, situada en Almelo (Países Bajos). La fotografía, tomada en enero de este año, muestra las tuberías de la cascada en la primera etapa de construcción. ►



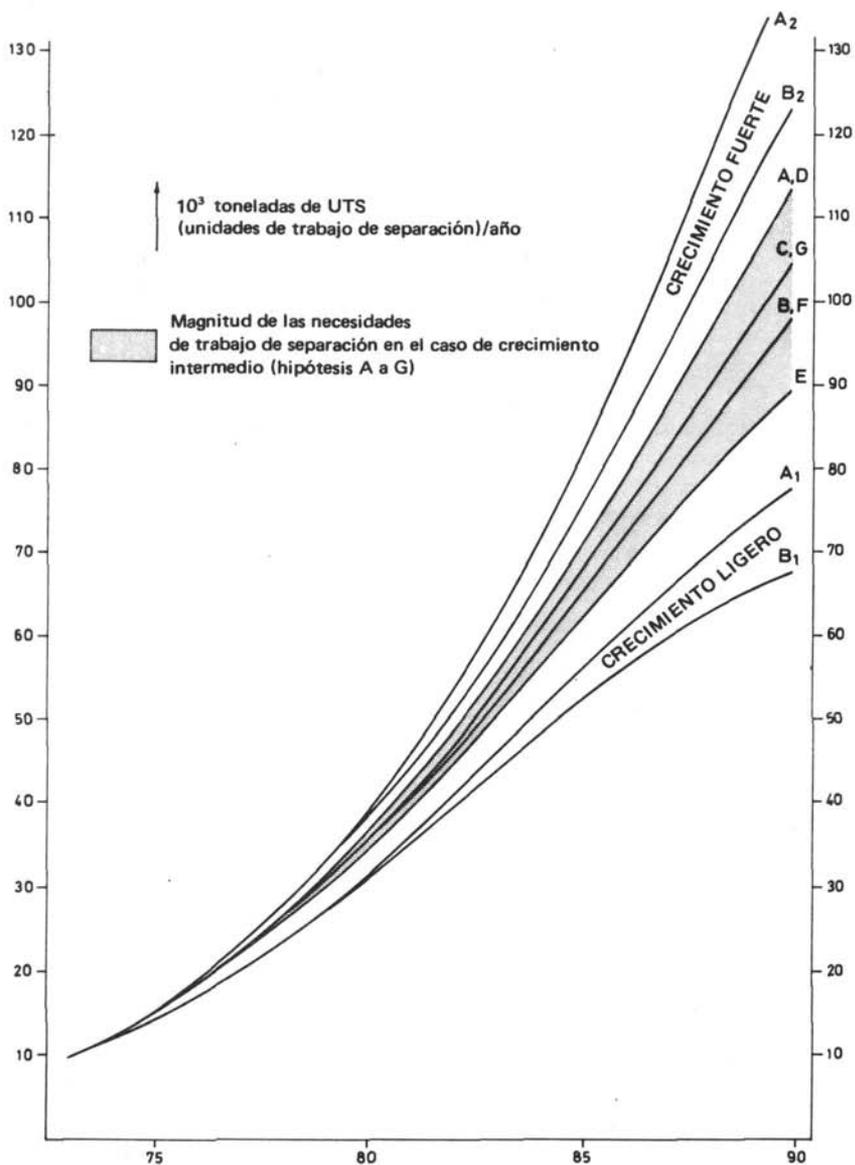


Figura 1: Necesidades anuales de trabajo de separación en función de distintas estrategias en materia de reactores y distintos ritmos de crecimiento de la electricidad nuclear (sin reciclado del Pu, riqueza residual de 0,25%).

las hipótesis de crecimiento intermedio de la electricidad nuclear, la demanda de servicios de separación aumenta de unas 10 000 toneladas de unidades/año, actualmente, a alrededor de 90 000 - 110 000 en 1990. En total, las previsiones sobre la demanda hasta 1990 oscilan respectivamente, según se admita la hipótesis de crecimiento ligero o la de crecimiento fuerte de la electricidad nuclear, entre 70 000 y 130 000 toneladas de unidades/año.

En el caso de crecimiento intermedio de la electricidad nuclear (hipótesis A a G), se ve que la demanda de trabajo de separación no depende significativamente de la estrategia en materia de HTR (reactores de alta temperatura) (por ejemplo, la hipótesis A postula un ligero crecimiento de los reactores de alta temperatura, y la hipótesis D difiere únicamente en que admite un fuerte crecimiento de los HTR; las necesidades de trabajo de separación son prácticamente las mismas en función de una y otra). En cambio, si se supone que los reactores reproductores rápidos crecerán mucho en lugar de hacerlo moderadamente (es decir, se acepta la hipótesis B en vez de la A), la demanda disminuye en 1990 en un 15% aproximadamente, mientras que admitiendo un crecimiento fuerte y no ligero de los HWR (reactores de agua pesada) (es decir, la hipótesis C en lugar de la A), se observa una reducción de alrededor del 8%. Después de 1990 los efectos de una estrategia de fuerte crecimiento serían cada vez más importantes.

El Cuadro 1 muestra las necesidades anuales de trabajo de separación y las necesidades acumuladas correspondientes a cada año, de 1973 a 1990, con arreglo a las hipótesis A (continuación de la tendencia actual), B (análoga a la hipótesis A, pero con un fuerte ritmo de implantación de los FBR (reactores reproductores rápidos)), A<sub>2</sub> (necesidades máximas de trabajo de separación, entre las 15 hipótesis consideradas) y B<sub>1</sub> (necesidades mínimas). En el Cuadro 1 se supone una riqueza residual de 0,275% y que el reciclado del plutonio comenzará en 1978, mientras que en la Figura 1 se supone una riqueza residual

CUADRO 1. NECESIDADES ANUALES MUNDIALES DE TRABAJO DE SEPARACION, EN 10<sup>3</sup> TONELADAS DE UTS/AÑO (Riqueza residual 0,275%, reciclado del Pu)

Año	Límite inferior		Intervalo de crecimiento intermedio				Límite superior	
	Hipótesis B <sub>1</sub> *		Hipótesis B*		Hipótesis A*		Hipótesis A <sub>2</sub> *	
	Anuales	Acumuladas	Anuales	Acumuladas	Anuales	Acumuladas	Anuales	Acumuladas
1973	9	9	9	9	9	9	9	9
1974	10	19	11	20	11	20	11	20
1975	13	32	14	34	14	34	14	34
1976	16	48	17	51	17	51	18	52
1977	18	66	20	71	20	71	22	74
1978	21	87	24	95	24	95	26	100
1979	23	110	26	121	26	121	29	129
1980	26	136	30	151	31	152	33	162
1981	30	166	35	186	35	187	39	201
1982	34	200	40	226	41	228	46	247
1983	37	237	45	271	46	274	52	299
1984	41	278	51	322	52	326	60	359
1985	45	323	57	379	58	384	68	427
1986	48	371	63	442	65	449	78	505
1987	51	422	70	512	73	522	88	593
1988	56	478	77	589	81	603	99	692
1989	59	537	85	674	89	692	111	803
1990	61	598	91	765	97	789	124	927

\* B Con una proporción elevada de reactores reproductores

\* A Con una proporción baja de reactores reproductores

CUADRO 2. PREVISIONES RELATIVAS AL REGIMEN DE POTENCIA DE LAS PLANTAS DE DIFUSION Y AL TRABAJO DE SEPARACION DISPONIBLE EN COMPARACION CON LAS NECESIDADES DEL MISMO, SUPONIENDO EL CRECIMIENTO "MAS PROBABLE" DE LA ELECTRICIDAD NUCLEAR (Trabajo de separación en millones de UTS)													
	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
	AÑO FISCAL												
EXPLOTACION DE PLANTAS DE DIFUSION													
Riqueza residual (% de <sup>235</sup> U)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,275	0,275	0,275	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Régimen medio de potencia de las tres plantas (megavatios)	4069	4558	5008	5567	5733	6199	6788	7110	7110	7178	7380	7380	7380
Producción anual de las plantas de separación	12,7	14,2	15,7	18,0	19,8	22,5	25,4	26,9	26,9	27,2	27,7	27,7	27,7
Inclusive el trabajo de separación:													
Resultante del CIP		0,6	1,9	3,4	4,4	4,4	5,4	5,7	5,7	5,7	5,8	5,8	5,8
Resultante del CUP			0,9	2,9	4,4	4,4	2,9	4,0	4,0	4,2	4,7	4,7	4,7
OFERTA Y DEMANDA DE TRABAJO DE SEPARACION (RIQUEZA RESIDUAL DE 0,30%)													
Incremento anual efectivo del trabajo de separación disponible debido al reciclado de los residuos, cuya riqueza se evalúa en 0,30 por ciento						(1,7)	(1,9)	(1,4)					
Trabajo acumulado de separación disponible, inclusive las existencias de 17,1 millares de unidades poseídas en 1 de julio de 1973	29,8	44,0	59,7	77,7	97,5	118,3	141,8	167,3	194,2	221,4	249,1	276,8	304,5
Trabajo anual de separación necesario <sup>1</sup>	12,7	8,3	12,2	15,5	15,1	21,3	26,4	30,4	34,9	45,9 <sup>2</sup>	42,8 <sup>2</sup>	46,6 <sup>2</sup>	53,2 <sup>2</sup>
Trabajo acumulado de separación necesario	12,7	21,0	33,2	48,7	63,8	85,1	111,5	141,9	176,8	222,7	266,5	312,1	365,3
Trabajo de separación en forma de existencias producidas con anticipación	17,1	23,0	26,5	29,0	33,7	33,2	30,3	25,4	17,4				
Trabajo de separación necesario de nuevas plantas:													
Anual										1,3	15,1	18,9	25,5
Acumulado										1,3	16,4	35,3	60,8

<sup>1</sup> Esta cifra abarca la producción necesaria para atender la demanda, nacional y extranjera, de electricidad, para las aplicaciones reservadas al Gobierno y para otras aplicaciones ajenas a la generación de electricidad. La cifra se ha ajustado para tener en cuenta la venta por adelantado de trabajo de separación al Japón.

<sup>2</sup> El trabajo de separación necesario incluye un fondo de rotación equivalente a 1/6 de las necesidades de cada año siguiente. El fondo de rotación necesario es de 7,1 en 1983, 0,5 en 1984, 1,1 en 1985 y 1,0 en 1986 (años fiscales).

de 0,25% y que no hay reciclado del plutonio. Estas modificaciones hacen disminuir la demanda en 1990 en 15%, aproximadamente, para la hipótesis A, pero sólo en 6%, aproximadamente, para la B, es decir, la demanda es menos sensible al crecimiento de los FBR.

### Comparación de la demanda y la oferta

El Cuadro 2 muestra las previsiones, formuladas por la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos (USAEC) en julio de 1973, relativas a la oferta de trabajo de separación de las tres plantas de difusión gaseosa de dicho país, que asciende a 27 700 toneladas de unidades, incluido el aumento de la capacidad resultante del programa de mejoramiento de la cascada (CIP) y del programa de aumento de potencia de la cascada (CUP). Dicho Cuadro indica el trabajo acumulado de separación disponible (inclusive las existencias poseídas a principios del año fiscal de 1973). Muestra igualmente las necesidades anuales y acumuladas de trabajo de separación estimadas hasta 1986; las estimaciones de la USAEC no son muy diferentes de las de la hipótesis B del Cuadro 1 (teniendo en cuenta que el Cuadro 1 está basado en el año corriente y el 2 en el año fiscal, que empieza seis meses antes que el primero). El Cuadro 2 muestra asimismo las existencias de trabajo de separación (en forma de uranio enriquecido producido con anticipación, es decir, antes de que se necesite realmente), que alcanzan un máximo en 1978 y decrecen hasta llegar a cero en el año fiscal de 1983; también indica la necesidad correspondiente de sucesivos aumentos de la capacidad en 1983-1986.

El Cuadro 3 muestra la capacidad actual y prevista de trabajo de separación en Europa Occidental, indicando para 1985 una capacidad anual de 10 000 toneladas de unidades. No se han incluido, debido a la escasez de datos exactos, otros planes para incrementar la capacidad de enriquecimiento en los Estados Unidos y en otros países, aunque las informaciones publicadas recientemente indican que la Unión Soviética dispone de una capacidad considerable. Igualmente, la sociedad Eurodif está estudiando la propuesta francesa de construir una gran planta de difusión gaseosa, que podría tener una capacidad inicial de 5 000 toneladas de unidades y alcanzar una producción de 9 000 toneladas a comienzos de los años ochenta. Sudáfrica ha anunciado su intención de construir una planta de enriquecimiento basada en un proceso de separación no revelado.

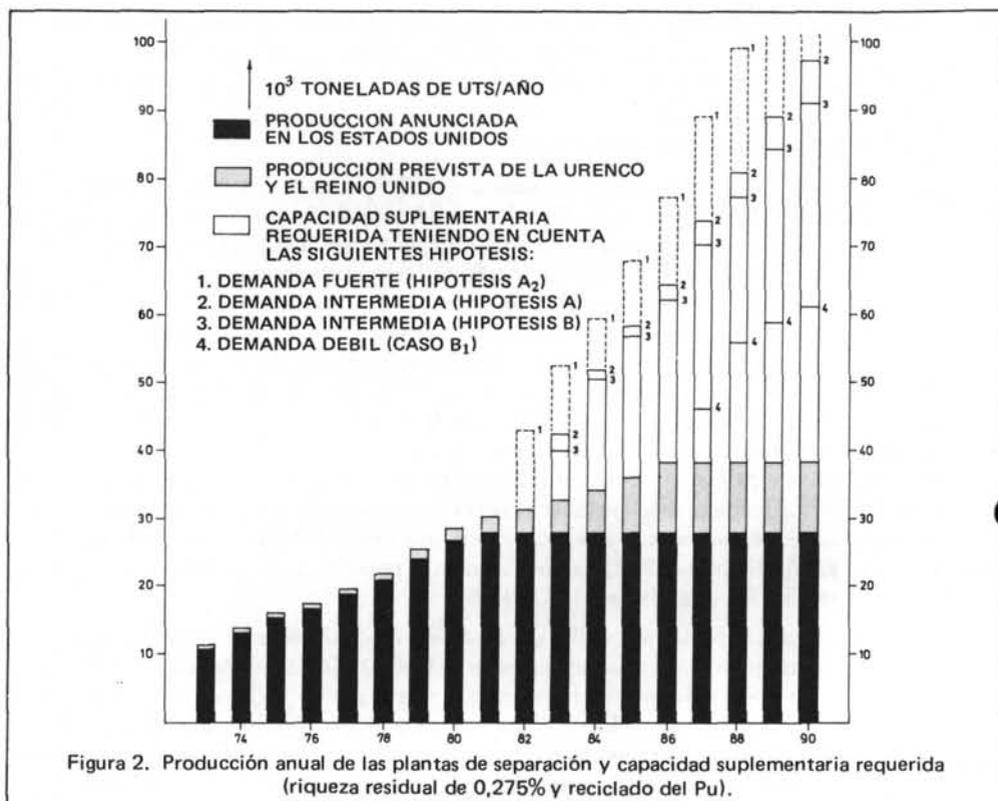
La Figura 2 muestra la producción anual de las plantas de separación de los Estados Unidos (según el Cuadro 2) y de Europa (según el Cuadro 3) y la capacidad suplementaria requerida cuenta habida de las necesidades resultantes de las cuatro hipótesis del Cuadro 1. Con arreglo a la hipótesis de demanda fuerte, se necesitará una capacidad suplementaria en 1982; con arreglo a la hipótesis de demanda intermedia, dicha capacidad se requerirá en 1983; con arreglo a la hipótesis de demanda débil, en 1987. La Figura 3 contiene la misma información, si bien expresada en existencias de trabajo de separación: las existencias alcanzan un máximo para bajar después a cero en 1981-1986, según la hipótesis que se admita sobre la demanda de electricidad nuclear.

CUADRO 3. CAPACIDAD ACTUAL Y PREVISTA\* DE TRABAJO DE SEPARACION EN EUROPA OCCIDENTAL (toneladas de UTS)

	1973	1975	1980	1985
Urenco**	50	400	2000/3000	10000
CEA, Francia, Pierrelatte	200			
AEA, Reino Unido, Capenhurst	400			

\* Información presentada en el Simposio sobre tecnología del enriquecimiento del uranio, organizado con motivo de la exposición Nuclex 72, Basilea.

\*\* Cifras ajustadas para tener en cuenta los anuncios recientes (véase N.W. de 22 de marzo de 1973).



La **Figura 4** muestra que las necesidades en los Estados Unidos superarán en 1985 la oferta prevista actualmente para dicho país según la hipótesis A, y a continuación, aumentarán hasta duplicarse casi en 1990. También muestra que la demanda prevista fuera de los Estados Unidos es prácticamente igual a la prevista en dicho país, mientras que la oferta europea prevista actualmente es mucho más baja que la de los Estados Unidos.

La **Figura 5** muestra cómo varía la demanda prevista de trabajo de separación según sea la riqueza residual admitida, cuando no hay reciclado del plutonio. Por comparación con la **Figura 1**, basada en una riqueza residual de 0,25%, se deduce que, al aumentar a 0,30% esta riqueza, la demanda en 1990 disminuiría en un 10% aproximadamente.

Entre los factores de indeterminación que afectan a la situación de la oferta, tal como se ha expuesto, cabe señalar el eventual exceso de la capacidad de enriquecimiento con respecto a las necesidades de los países no incluidos (Unión Soviética, Europa Oriental, China y Sudáfrica) y el posible empleo de reservas militares de uranio enriquecido y plutonio.

## COSTES

### Costes pasados y actuales

La USAEC, que ha sido hasta la fecha la principal proveedora de servicios de separación en escala industrial, aumentó sus precios por kilogramo unitario de 26,00 a 28,70 dólares en 1970, a 32,00 dólares en 1971 y a 36,00-38,00 dólares (según el tipo de contrato) en 1973. No se han publicado los precios de venta de otros proveedores (por ejemplo, la Unión Soviética y Francia).

Figura 3. Existencias de trabajo de separación resultantes de la producción de Ureco, del Reino Unido y de los Estados Unidos (riqueza residual de 0,275%, reciclado del Pu).

Figura 4. Trabajo de separación: necesidades y producción anuales (riqueza residual de 0,275%, reciclado del Pu).

Figura 5. Demanda anual suponiendo distintas riquezas residuales (sin reciclado del Pu).

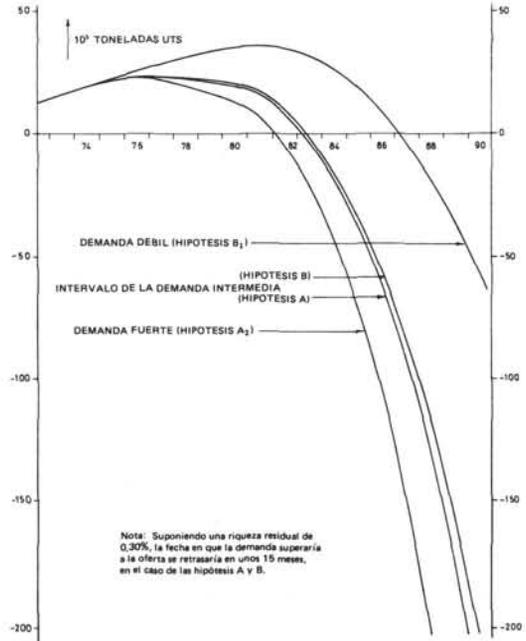
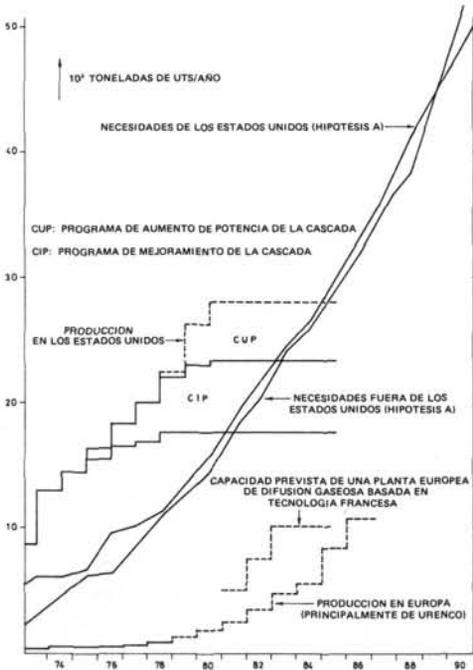


Figura 3 ►



▲ Figura 4

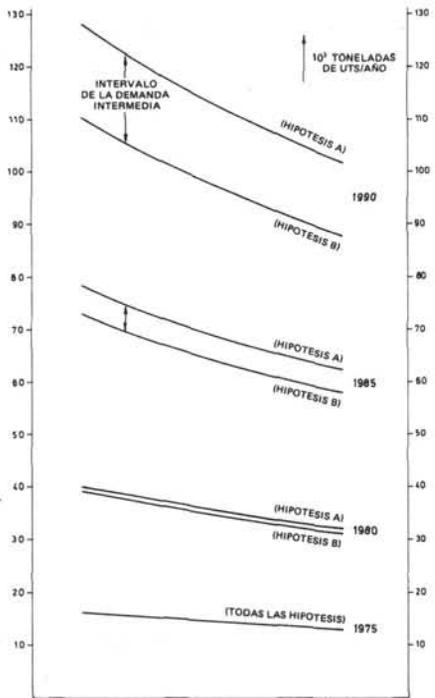


Figura 5 ►

Los actuales precios de la USAEC son algo menores que los costes reales, lo que se explica por el hecho de que los contratos han de concertarse con ocho años de antelación, con sanciones en caso de anulación, y de que el pago ha de hacerse en parte por adelantado. Además, el coste actual efectivo para los clientes resulta algo mayor, pues la USAEC sigue la norma de calcular las necesidades de uranio natural y las tarifas del trabajo de separación sobre la base de una riqueza residual de 0,20% en  $^{235}\text{U}$ , y no en función de la riqueza real de los residuos del proceso, que es del 0,30%, o de una riqueza residual fijada por el cliente. Cuando la cascada de enriquecimiento es "ideal", la relación entre el coste del producto enriquecido y su grado de enriquecimiento es tal que existe un valor "óptimo" de la riqueza residual, el cual aumenta al subir el coste del trabajo de separación y disminuye al subir el coste del hexafluoruro de uranio. Desde el punto de vista de los costes actuales por estos dos conceptos, la riqueza residual óptima oscila entre 0,25 y 0,30%. En el caso del uranio con un enriquecimiento en  $^{235}\text{U}$  comprendido entre 2,2 y 2,6%, la conducta de la USAEC se traduce en un coste global del uranio natural y del enriquecimiento superior en 3%, aproximadamente, al obtenido en condiciones óptimas.

### Costes futuros

Hasta ahora las predicciones del coste futuro de los servicios de separación han sido un tanto problemáticas, puesto que la USAEC ha subido sus precios en los últimos años a un ritmo bastante rápido y ha tenido relativamente poca competición. Sin embargo, muy recientemente la Urenco ha anunciado que estaba dispuesta a concertar contratos de enriquecimiento de uranio a 48,00 dólares por kilogramo unitario, con una antelación obligatoria de cuatro años. Este precio es más elevado que el aplicado actualmente por la USAEC, aunque no necesariamente mayor que el que pediría una nueva planta de propiedad privada en los Estados Unidos (como se indica seguidamente).

El coste del trabajo de separación por difusión gaseosa depende en particular de los gastos de establecimiento y de los gastos de explotación, siendo estos últimos función del coste de la electricidad principalmente. Se prevé que las plantas de centrifugación consumirán sólo alrededor del 10% de la electricidad que necesitan las plantas de difusión gaseosa de capacidad comparable, aunque los restantes gastos de explotación serán más elevados.

El Cuadro 4 indica las estimaciones más recientes de la USAEC acerca de los gastos de establecimiento y de explotación (excluido el coste de la electricidad) en el caso de plantas de difusión gaseosa y de centrifugación. Los gastos de establecimiento en uno y otro caso se consideran del mismo orden de magnitud, pero los de explotación, excepto el coste de la electricidad, se estiman mucho más elevados en una planta de centrifugación gaseosa.

CUADRO 4. ESTIMACIONES RESUMIDAS RELATIVAS A LAS PLANTAS DE ENRIQUECIMIENTO (Planta de 8,75 millones de UTS/año de nueva construcción, dólares del año fiscal de 1974)

	Planta de difusión gaseosa		Planta de centrifugación gaseosa
	Tecnología CIP	Tecnología avanzada	Intervalo de costes
Gastos de establecimiento, millones de \$	1 400	1 200	1 130-1 710
Inversión específica, \$/UTS	160	137	129- 195
Gastos de explotación (excluida la electricidad), millones de \$/año	16	16	70- 115

Una planta de difusión gaseosa con una capacidad de 8,75 millones de UTS necesita unos 2 400 megavatios de electricidad. Una planta de centrifugación gaseosa de la misma capacidad requiere mucho menos electricidad, alrededor del 10% de la cantidad mencionada.

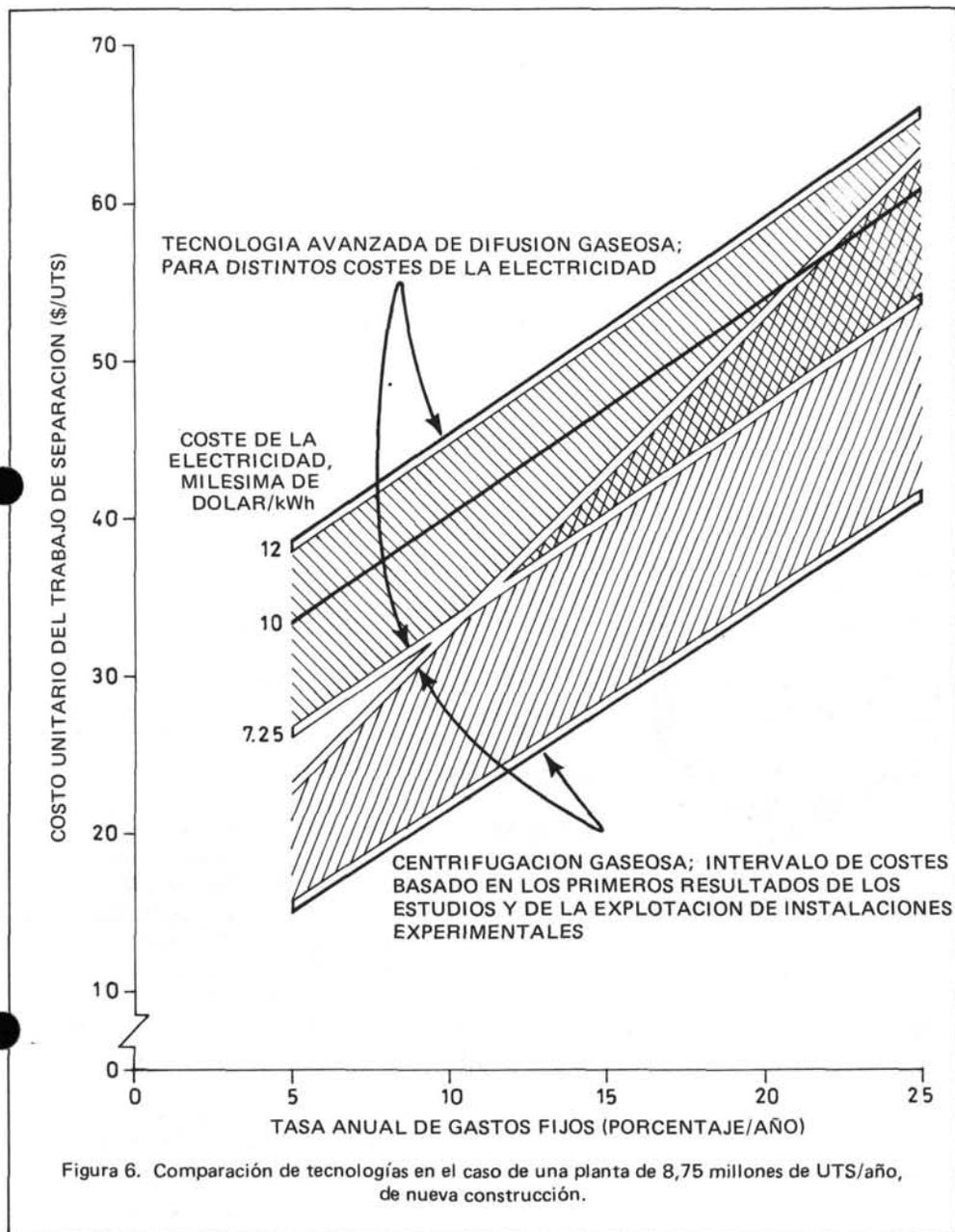


Figura 6. Comparación de tecnologías en el caso de una planta de 8,75 millones de UTS/año, de nueva construcción.

La Figura 6 muestra las estimaciones más recientes de la USAEC acerca del intervalo de costes de la unidad de trabajo de separación para plantas de difusión gaseosa y plantas de centrifugación gaseosa, en función del coste de la electricidad y de la tasa anual de gastos fijos. Para tasas bajas de gastos fijos (inferiores a 10%/año) las plantas de centrifugación son claramente ventajosas; sin embargo, para gastos fijos más elevados, típicos de las instalaciones de propiedad privada, la difusión gaseosa resulta competitiva y presenta menos riesgos ya que la tecnología se considera ya bien conocida.

## Ampliación de la capacidad: plazos necesarios

La USAEC ha calculado recientemente que entre el momento en que se decide construir una planta y la fecha en que la misma funciona a plena capacidad transcurren unos siete años, tanto para las plantas de difusión como para las de centrifugación, siendo en estas últimas el tiempo de construcción algo más corto pero el de puesta en servicio más largo. El hecho de que la Urenco sólo exija una antelación de cuatro años en los contratos de suministro indica que considera suficiente un plazo de sólo unos cuatro años para planificar la ampliación de la capacidad.

Como las plantas de difusión gaseosa consumen grandes cantidades de electricidad, el plazo necesario no puede ser inferior al requerido para construir las correspondientes centrales eléctricas. Las plantas de centrifugación, que necesitan mucha menos electricidad, no están sujetas a esta limitación.



## La necesidad de reactores reproductores rápidos

por R. Skjoeldebrand

Los artículos precedentes de este número muestran que, durante muchos decenios, el mundo tendrá que recurrir cada vez más a la energía nuclear para satisfacer la demanda de energía primaria. Pero para conseguir ese objetivo hay que contar con un tipo de reactor que precise menos uranio y servicios de enriquecimiento, pues de lo contrario estos factores podrían limitar la expansión de la energía nuclear. El reactor reproductor, por su capacidad de transformar el uranio-238 en plutonio fisionable, es una solución que verdaderamente brindaría una fuente prácticamente inagotable de energía nacida del uranio durante siglos. La razón básica es que el aprovechamiento mucho más racional del uranio en un reactor de esta naturaleza (más de 60 veces mayor que en un reactor de agua ligera) permite consumir uranio de un precio inicial mucho más alto, con la consiguiente multiplicación de las reservas disponibles.

Varios países han consagrado durante muchos años una parte considerable de sus programas de energía nuclear al desarrollo de los reactores reproductores y las seis primeras centrales de demostración, de dimensiones medias, están ya en las etapas iniciales de funcionamiento o en construcción. Todas ellas son del mismo tipo básico, es decir, están provistas de un reproductor rápido refrigerado por metal líquido, aunque otras soluciones, por ejemplo, los reactores refrigerados por gas, habrían sido posibles y brindado ciertas ventajas. Estos programas son extremadamente costosos y se ha estimado que la realización de un prototipo industrial exigirá en total un mínimo de 2 000—3 000 millones de dólares; para cada uno de esos programas trabajan millares de científicos en los laboratorios nacionales y en la industria.