Tendencias de la demanda, oferta y costo del ciclo del combustible

Por R.B. Fitts y H. Fujii*

Del 11 al 14 de noviembre de 1975 se celebró en Viena la reunión de un Grupo asesor del OIEA sobre las tendencias de la demanda, oferta y costo del ciclo del combustible, con la finalidad de hacer un examen global del ciclo del combustible nuclear. Las deliberaciones abarcaron el ciclo completo del combustible nuclear, empezando por las previsiones acerca de la potencia nucleoelectrica mundial¹ hasta el año 2000 y la consiguiente demanda de servicios del ciclo del combustible, y terminando por un estudio detallado sobre las fases de dicho ciclo.

Se comprobó que los problemas más urgentes, en lo que respecta al ciclo del combustible nuclear, eran el de cubrir las necesidades de uranio, que van aumentando considerablemente, el de hacer frente a las onerosas consecuencias financieras que tiene la implantación de servicios del ciclo del combustible, y el de superar la falta de instalaciones adecuadas para la reelaboración y reciclado del combustible.

PREVISIONES SOBRE LA EXPANSION NUCLEOELECTRICA

Se previó que la potencia nucleoelectrica instalada en todo el mundo, que en 1975 se elevaba aproximadamente a 70 GW(e), aumentaría hasta unos 500 GW(e) en 1985 y sobrepasaría los 2000 GW(e) en el año 2000.

En cuanto a la distribución por tipos de los reactores en que se basará la expansión nucleoelectrica hasta el año 2000, cuestión de interés para los cálculos relativos al ciclo del combustible, se llegó a las siguientes conclusiones generales:

- 1) Se supone que, de la totalidad de los reactores de agua ligera (LWR), una tercera parte estará constituida por reactores de agua en ebullición (BWR), y dos terceras partes, por reactores de agua a presión (PWR);
- 2) El empleo de reactores reproductores rápidos (FRB) de uso industrial adquirirá considerable importancia a mediados de la década de los 90;
- 3) Decrece el ritmo de introducción de los reactores de alta temperatura (HTR) en comparación con las previsiones anteriores, al tiempo que aumenta el ritmo de introducción de los reactores de agua pesada (HWR).

En el Cuadro I se expone con cierto detalle la distribución por tipos de los reactores prevista para los países de la OCDE (más del 90% de la producción nucleoelectrica mundial hasta el año 2000).

CICLO DEL COMBUSTIBLE: NECESIDADES, OFERTA Y COSTOS

Basándose en las previsiones sobre la expansión nucleoelectrica y sobre las características de los reactores, varios participantes calcularon y presentaron a debate las necesidades en cuanto a servicios del ciclo del combustible. Estas previsiones de la demanda se resumen

* Funcionarios de la Sección de Materiales Nucleares y Ciclo del Combustible, División de Energía Nucleoelectrica y Reactores.

¹ Con exclusión, en todos los casos, de los países de planificación económica centralizada.

Cuadro I. Distribución de los reactores por tipos (GW(e))
OCDE (estimación alta)

Año	LWR ¹	PTR ²	AGR ³	HWR	HTR	GCR ⁴	FBR	Total
1975	60,1	—	1,0	2,5	0,3	5,8	0,5	70
1980	162	—	5,8	7,2	0,6	5,8	1,4	183
1985	434	5,3	6,0	18,4	8,3	4,2	4,0	481
1990	775	22	6,0	41	29	1,1	15	889
2000	1584	79	4,5	115	126	—	200	2089

¹ Relación PWR:BWR = 2 : 1

² Reactor de agua pesada con tubos de presión

³ Reactor de tipo avanzado moderado por grafito y refrigerado por gas

⁴ Reactor moderado por grafito y refrigerado por gas

Cuadro II. Ejemplo de previsión de la demanda mundial de servicios del ciclo del combustible nuclear

Servicio	Año					
	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Producción de uranio, miles de toneladas/año	21	50	100	160	240	300
Producción de uranio, acumulada desde 1975, miles de toneladas de U	21	200	600	1300	2300	3700
Enriquecimiento, miles de toneladas de UTS/año	11	35	70	110	180	240
Fabricación de combustible, miles de toneladas de metal pesado/año (sólo LWR)	2,5	7	15	25	40	55
Reelaboración, miles de toneladas de U/año (sólo LWR)	0,5	3,5	10	18	30	45

brevemente en el **Cuadro II**, que permite apreciar las magnitudes y los ritmos de expansión.

A fin de calcular la demanda típica, se supuso un factor global de carga del 70% para todos los tipos de reactores nucleares, y un factor de concentración de colas del 0,25%. Se tomó en consideración la producción de plutonio y su reciclado parcial en reactores térmicos, así como el empleo de plutonio en reactores rápidos. Se supuso que el reciclado del plutonio comenzaría hacia 1981, teniendo en cuenta los posibles retrasos en los programas de construcción de plantas de reelaboración y la situación poco clara en lo que respecta a los procedimientos para la concesión de las correspondientes licencias.

Al examinar las cantidades que se calcula serán necesarias, se pasó revista a las diferentes fases del ciclo del combustible, con los resultados siguientes:

Uranio

En el **Cuadro III** figura una estimación actual de los recursos mundiales de uranio². La comparación de estas cifras con la demanda acumulada de uranio prevista (**Cuadro II**) pone de relieve un problema que podría ser grave. Las reservas razonablemente seguras clasificadas en la categoría de bajo precio, que son las que normalmente se utilizan, no alcanzan sino para satisfacer la demanda hasta fines de la década de los 80. Otro punto quizás de la misma importancia: los recursos totales de uranio actualmente conocidos y estimados, clasificados en la categoría < 30\$/lb de U_3O_8 , se agotarán hacia el año 2000. Por lo tanto, se consideran muy importantes los esfuerzos cada vez mayores que se realizan para localizar y evaluar más reservas de uranio.

Cuadro III. Recursos mundiales de uranio
(miles de toneladas de U)

Recursos razonablemente seguros		Recursos adicionales estimados	
< 15\$/lb de U_3O_8	15–30\$/lb de U_3O_8	< 15\$/lb de U_3O_8	15–30\$/lb de U_3O_8
1080	730	1000	680

La comparación entre las capacidades de producción previstas y las necesidades anuales de uranio muestra que, por lo menos hasta 1983, la capacidad potencial de extracción y tratamiento de mineral es suficiente. Sin embargo, el mercado del uranio es sin duda una realidad nada simple, y se admitió que actualmente y a corto plazo hay algunas dificultades para la producción de uranio en cantidades suficientes.

El costo del uranio en forma de torta amarilla (U_3O_8) se mantuvo muy estable hasta 1973, entre 7 y 8\$/lb de U_3O_8 . Desde entonces, ha ido en rápido aumento. En 1974, los precios de las entregas concertadas para mediados de 1975 eran, aproximadamente, de 15\$/lb de U_3O_8 , aumentando a razón de 1,30 a 1,50 dólares por libra y año sucesivo de entrega. Actualmente, los precios se acercan a 30\$/lb de U_3O_8 , aumentando en 2\$ por libra y año sucesivo de entrega.

El componente del precio del uranio que es el costo de conversión (de U_3O_8 en UF_6), se mantiene estable desde 1965. El costo de este servicio para las entregas correspondientes a 1975 era de unos 3,50 a 4\$/kg de uranio, y ha subido en estos últimos cinco años con gran estabilidad en la proporción de 0,14 dólares por kg y año.

Enriquecimiento

Las necesidades anuales y acumulativas de trabajo de separación para responder al incremento previsto de la electricidad nuclear muestran, como era de esperar, que la demanda aumenta con la potencia nucleoelectrónica instalada hasta que el empleo del plutonio comienza a reducir ligeramente la tasa de crecimiento, a finales de la década de los 80. La capacidad de producción de uranio actual y proyectada en firme supera a la demanda prevista hasta aproximadamente el año 1980. Después de este año, dados los largos plazos de construcción requeridos, y en vista de que será necesaria una expansión acelerada al ritmo de 6000 a 9000 t UTS/año entre 1985 y 1990, habrá que prestar gran atención a las fechas de incorporación de nuevas plantas y deberán tomarse oportunamente las decisiones necesarias.

En 1967, el costo de la unidad de trabajo de separación, en los Estados Unidos, era de 26 dólares. A partir de 1971, este costo ha ido aumentando gradualmente hasta llegar a la cifra actual de 60,95\$/kg UTS para contratos referentes a pedidos ocasionales, y

² Para más detalles sobre los recursos uraníferos, véase en este mismo número el artículo: "Recursos y oferta de uranio".

de 53,25\$/kg UTS para contratos referentes a pedidos fijos a largo plazo. Las previsiones del costo para 1985 oscilan entre 85 y 160\$/kg de UTS. Sin embargo, el costo del enriquecimiento es muy sensible al costo de la energía eléctrica y al costo de construcción de la respectiva planta, por lo que resulta muy difícil hacer una previsión fidedigna de esos costos futuros.

Fabricación de combustible

Se previó que, hasta el año 1990, aproximadamente, más del 90% de la demanda de fabricación de combustible se referiría al combustible para los reactores tipo LWR, y hoy en día hay suficiente capacidad para satisfacer esta demanda (véase el **Cuadro II**) por lo menos hasta fines de 1985. Actualmente es reducida la capacidad de fabricación de combustibles para reactores de los tipos FBR y HTR, como también lo es la demanda. No se previeron problemas tecnológicos resultantes de la ampliación de tales capacidades, si dicha ampliación fuera necesaria en el futuro.

Los costos de fabricación de combustibles para reactores tipo LWR han permanecido prácticamente estables en los últimos años, oscilando en general entre 120 y 170\$/kg de U para los encargos normales. Se prevé que han de disminuir o estabilizarse en los próximos años. El costo de tratamiento del combustible de óxidos mixtos es mucho más elevado que el del tratamiento de combustible de bióxido de uranio. El costo de fabricación del combustible de óxidos mixtos para los reactores tipo LWR se estima en unos 300\$/kg de U + Pu, valor de 1975 y el de los combustibles para reactores tipo LMFBR se calcula que oscilará entre 800 y 1000\$/kg de U + Pu.

Reelaboración

El **Cuadro II** muestra la expansión de la capacidad de reelaboración que se prevé será necesaria. Se examinaron las capacidades proyectadas y previstas y se comprobó que las necesidades pronosticadas en la actualidad no podrán ser cubiertas por la capacidad existente. La capacidad de reelaboración actualmente prevista para combustibles con destino a reactores tipo LWR en los años 1975, 1980 y 1985 es, respectivamente, de 0,1 3,4 y 6,8 miles de toneladas anuales de uranio. Por tanto, se prevé que en 1985 se habrán acumulado 21 000 toneladas de combustible pendientes de reelaboración.

Teniendo en cuenta los largos plazos necesarios para el proyecto y la construcción de las plantas en cuestión (de unos 5 a 7 años), así como la escasez de la experiencia necesaria, es probable que, a principios de la década de los 80, sea crónica la insuficiencia de la capacidad de reelaboración. Por consiguiente, según las previsiones actuales, se necesitarán probablemente grandes instalaciones para almacenar el combustible agotado hasta que aumente la capacidad de reelaboración.

Con respecto a los costos de reelaboración y a sus tendencias, hay que hacer notar que la tecnología de estas plantas se halla en fase de activa mutación y se carece de datos fidedignos sobre los costos de reelaboración. Dichas plantas requerirán gastos de inversión bastante elevados. Los costos de reelaboración se estima que oscilarán generalmente entre 150 y 200\$/kg de U, valor de 1975.

Almacenamiento del combustible agotado

Esta fase del ciclo del combustible se consideró de especial importancia, porque las necesidades aumentan debido al retraso en el crecimiento de la capacidad de reelaboración. De todas formas, se estimó que ya se poseía o se estaba creando la tecnología necesaria para producir la adecuada capacidad de almacenamiento.

El costo de almacenamiento del combustible agotado, en el caso de los reactores tipo LWR, se estimó en unos 10\$/kg de U/año. El costo anual de almacenamiento del combustible agotado, en el caso de los reactores CANDU, es actualmente de 3 a 5\$/kg de U.

Transporte del combustible agotado

Se consideró que estaba desarrollándose de manera satisfactoria la tecnología del transporte del combustible. Los gastos correspondientes, en Europa, con modernos cofres y modalidades de transporte, serán aproximadamente de 20 a 35\$/kg de U, valor de 1975. En estos gastos influyen sin duda la distancia y la forma de transporte, así como la evolución de las normas de salud, seguridad y salvaguardias aplicables en esta esfera.

Evacuación de desechos

Se estudió en forma general este último aspecto del ciclo del combustible nuclear. Se estimó que la cuestión, aunque de gran interés e importancia, era tan amplia y se hallaba en un estado tal de fluctuación que no convenía de momento que el grupo la estudiase detenidamente. No obstante, el consenso general del Grupo asesor fue que se disponía ya de una tecnología aceptable, aunque no óptima, para la evacuación de desechos.

EJEMPLOS DE COSTOS DE CONSTRUCCION DE PLANTAS DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

Los costos unitarios de cada fase del ciclo del combustible nuclear (\$/kg de U) se componen de los gastos de inversión y de los gastos de explotación, siendo los gastos de inversión uno de los parámetros más importantes. Los gastos de inversión de cada fase del ciclo del combustible nuclear están aumentando rápidamente en estos últimos años, debido a la fuerte subida de los materiales y la mano de obra, y a la carga que también supone la protección del medio ambiente. Son escasos los datos sobre el costo de construcción de las plantas correspondientes a cada fase del ciclo del combustible, por lo que las estimaciones de dicho costo pecan de poco exactas. Por eso, se acordó que esas estimaciones sólo podían servir para indicar el orden de magnitud de los costos, en los estudios económicos sobre el ciclo del combustible nuclear. Admitidas estas restricciones al valor absoluto de tal información, se incluye el Cuadro IV como ilustración de la magnitud de los costos. Se indica también la potencia nucleoelectrónica que cada instalación podría atender, para poner de relieve que, por razones de tamaño económicamente óptimo, estas instalaciones deberán trabajar para sistemas eléctricos y demandas de electricidad relativamente grandes.

Cuadro IV. Costos indicativos de construcción de las instalaciones del ciclo del combustible (dólares de 1975)

Tipo de planta	Capacidad	Costos de construcción (millones de dólares)	Potencia eléctrica atendida (MW(e))
Conversión	5000 t de U/año ¹	50	6 000–7 000
Enriquecimiento	3000 t de UTS/año ²	1 000	40 000
Fabricación de combustible UO ₂	1500 t de U/año	100	50 000
(U, Pu)O ₂	1500 t de U/año	200	50 000
Reelaboración	1500 t de U/año	1 000	50 000
Instalación de almacenamiento del combustible agotado	1500 t de U/año	20	~ 9 veces la carga de combustible de un reactor LWR de 1000 MW(e)

¹ Toneladas métricas de uranio

² Toneladas métricas de unidades de trabajo de separación.

RECOMENDACIONES

Basándose en su examen de la situación actual de las diversas fases del ciclo del combustible nuclear, y de la capacidad de cada una de esas fases para satisfacer la demanda de energía nucleoelectrónica, los miembros del Grupo asesor recomendaron que se adoptaran ciertas medidas.

- La realización del ciclo completo del combustible nuclear plantea problemas, especialmente en los países pequeños, pues se necesitan plantas de gran capacidad y, en consecuencia, son muy elevadas las inversiones que requieren algunas fases del ciclo del combustible, como las de enriquecimiento y reelaboración. Por tanto, el Grupo asesor recomendó que se doblasen los esfuerzos para hallar la forma técnica y organizativa de resolver estos problemas, inclusive, sólo como un aspecto particular, un estudio práctico de la idea de los centros regionales del ciclo del combustible.
- Un problema de especial importancia en los trabajos de desarrollo, exploración y construcción que requiere el ciclo del combustible nuclear es la de financiar esas actividades y conseguir un seguro que cubra sus riesgos. La dificultad de este problema se agrava a menudo por el carácter internacional de la participación y la responsabilidad civil en tales actividades. Por tanto, el Grupo asesor recomendó que en un futuro próximo se estudiase a fondo la financiación y el aseguramiento de las actividades en gran escala relacionadas con el ciclo del combustible nuclear.
- El Grupo asesor, reconociendo la labor del Organismo Internacional de Energía Atómica encaminado a preparar guías con el fin de uniformizar las normas sobre concesión de licencias y actividades de explotación de centrales nucleares y transporte y evacuación de desechos, recomendó que se ampliasen tales trabajos de forma que abarquen todas las fases del ciclo del combustible nuclear.

Consideró que era de particular importancia:

- La elaboración de guías para la selección de emplazamientos de diferentes instalaciones del ciclo del combustible nuclear;
 - La creación de normas internacionales modelo de seguridad para cada fase del ciclo, que especifiquen en particular el grado de seguridad que debe lograrse, los criterios para determinar la suficiencia de las medidas de seguridad, y el análisis de tales medidas desde el punto de vista de los costos y beneficios.
- Una condición indispensable para el desarrollo de la energía nucleoelectrónica es el suministro adecuado de uranio natural. Por tanto, el Grupo recomendó que se acelerase aún más la exploración de uranio en todo el mundo.
 - Cuando las plantas de reelaboración comiencen a recuperar el uranio y el plutonio del combustible agotado en cantidades importantes, satisfarán una proporción apreciable de la demanda mundial de materiales fisionables. El plutonio recuperado es valioso para su empleo en el ciclo del combustible de los reactores tipo LWR, pero es indispensable para el de los reactores reproductores. Por estas razones se estimó que debía prestarse más apoyo a las actividades relacionadas con las fases de reelaboración y fabricación de combustible reciclado (por ejemplo, mediante actividades cooperativas en centros regionales del ciclo del combustible).
 - Deben publicarse con regularidad previsiones sobre las necesidades de servicios del ciclo del combustible, desde la demanda de uranio hasta la evacuación de desechos, previsiones que han de basarse en los pronósticos actuales sobre el desarrollo de la energía nucleoelectrónica.
 - Dada la existencia de campañas concertadas para disuadir del empleo de la energía nuclear para la producción de electricidad, y la presentación de información a veces tendenciosa sobre la seguridad y fiabilidad de las centrales nucleares y del ciclo del combustible nuclear, se recomendó que, en beneficio del público en general, se publicara sobre esta cuestión más información básica. Tales publicaciones deben exponer con exactitud los riesgos de la energía nucleoelectrónica y analizar la fiabilidad de las soluciones que actualmente se dan a tales problemas.