

# Representación con modelos matemáticos de Centros regionales para el ciclo del combustible nuclear

por Leonard L. Bennett\* y Larry D. Reynolds

El concepto de centros regionales para el ciclo del combustible nuclear ha despertado gran interés como un posible enfoque del problema que supone satisfacer las necesidades del ciclo del combustible nuclear de numerosos países. Como parte de su estudio de este concepto, el Organismo Internacional de Energía Atómica está desarrollando modelos matemáticos, junto con los códigos para computadora conexos, para analizar los aspectos económicos logísticos de las diversas estrategias de gestión del combustible nuclear agotado y de los materiales de desecho.

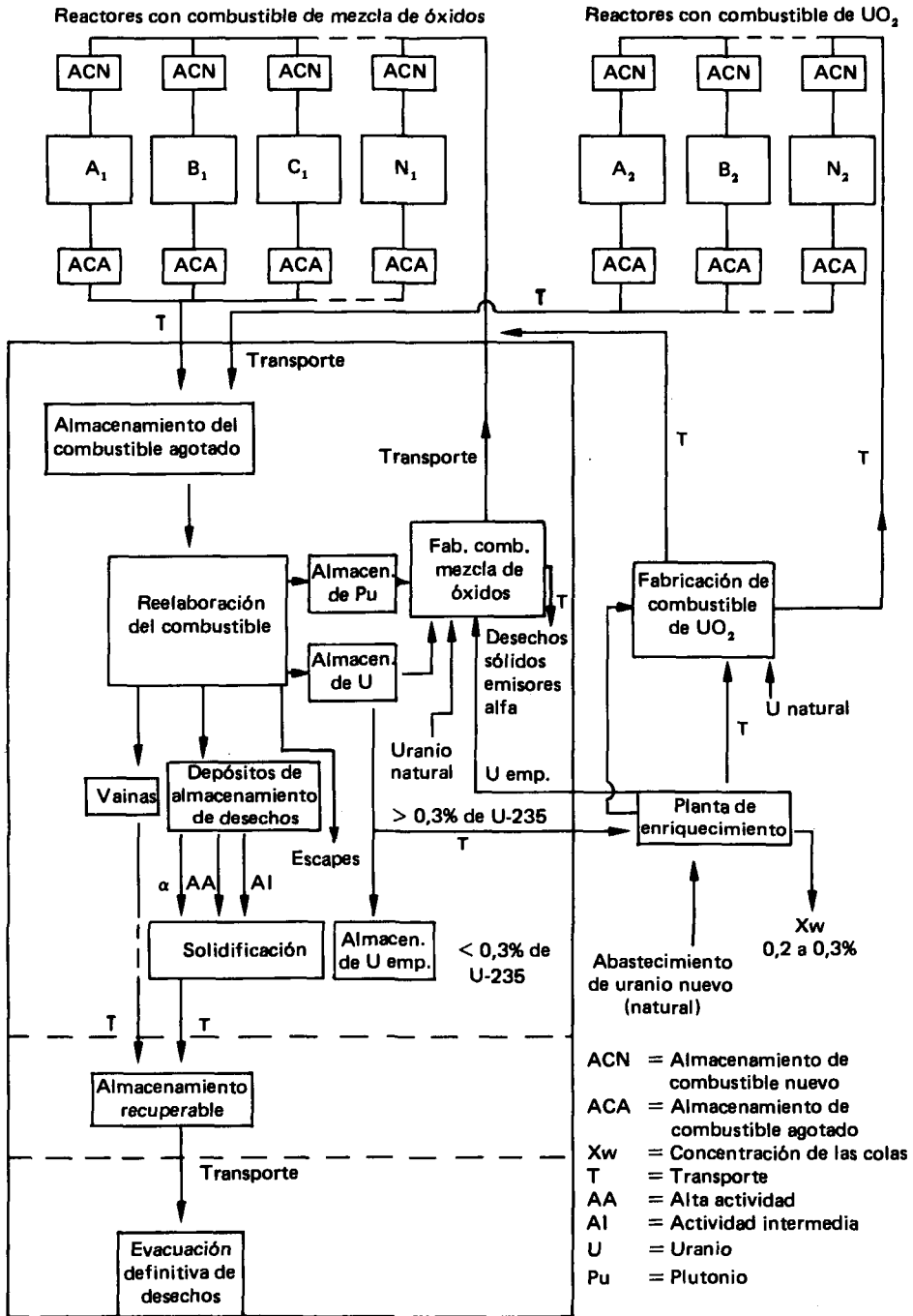
El Proyecto para el estudio de centros regionales para el ciclo del combustible nuclear abarca las operaciones de transporte, almacenamiento, tratamiento y reciclado desde el momento en que el combustible agotado se extrae de la piscina de almacenamiento en el emplazamiento del reactor hasta que el combustible reciclado se encuentra en forma de elementos combustibles terminados, en disposición de ser enviados a un reactor. En la Figura 1 se indican, dentro del amplio rectángulo grisáceo, todas aquellas actividades que se estima pueden corresponder a un centro regional para el ciclo del combustible nuclear. Como puede verse, no se incluyen la producción de uranio nuevo (natural), el enriquecimiento de reactores, uno de ellos empleando combustible nuevo de  $UO_2$  y el otro combustible a base de mezcla de óxidos (conteniendo o no algún combustible nuevo de  $UO_2$ ). Se parte del supuesto de que los reactores se encuentran instalados en diversos países designados con las letras A, B, ..., N. Después de extraído del reactor, el combustible agotado se deposita en unas piscinas de almacenamiento en el emplazamiento del propio reactor; estas piscinas se indican en la Figura con la abreviatura "ACA" (almacenamiento de combustible agotado).

Después de un período adecuado de "enfriamiento" inicial, el combustible agotado se transporta a una instalación colectiva de almacenamiento en el centro regional para el ciclo del combustible nuclear. Alcanzada esta etapa, corresponderá estudiar las ventajas económicas globales de un almacenamiento del combustible agotado por espacio de buen número de años comparándolas con las que ofrezcan una reelaboración y reciclado inmediatos.

La primera medida consiste en determinar si es necesario reelaborar el combustible agotado y en qué condiciones económicas (precio del uranio, costo del trabajo de separación y valor del plutonio) estará justificada tal reelaboración. Si la reelaboración del combustible agotado es viable desde el punto de vista económico, o si es esencial para poder conservar recursos de combustible, se necesita entonces determinar el momento apropiado en que debe disponerse de las oportunas instalaciones del ciclo del combustible, así como la capacidad óptima de rendimiento de las mismas.

El Sr. Bennett es Jefe del Grupo encargado de modelos matemáticos del Proyecto para el estudio de centros regionales para el ciclo del combustible nuclear, y el Sr. Reynolds es funcionario de la División de Información Científica y Técnica.

Fig. 1. Concepto de Centro regional para el ciclo del combustible



Inicialmente, un centro regional para el ciclo del combustible podría muy bien comprender únicamente las instalaciones requeridas para satisfacer las necesidades más inmediatas, por ejemplo las destinadas al almacenamiento del combustible agotado, y ser ampliado ulteriormente para abarcar otras operaciones, tales como las de reelaboración. El calendario óptimo de ampliación variaría según el tipo y la potencia de los reactores que se construyesen en los distintos países, dependiendo igualmente del valor económico del uranio y plutonio reutilizables. De todos modos, será preciso almacenar el combustible agotado hasta que las existencias acumuladas y el ritmo de descarga del combustible agotado resulten adecuados para el aprovechamiento económico de la capacidad de reelaboración una vez instalada.

Los materiales fisionables y los desechos radiactivos son las dos clases importantes de materiales resultantes del proceso de reelaboración. Los materiales fisionables recuperados, uranio y plutonio, pueden ser reincorporados al ciclo del combustible. El plutonio puede mezclarse con uranio recuperado, con uranio natural o con uranio empobrecido y utilizarse para fabricar elementos combustibles a base de mezcla de óxidos, que pueden enviarse posteriormente a reactores que empleen este tipo de combustible. El uranio recuperado puede muy bien destinarse a diversos usos. En efecto, hasta un 20% aproximadamente del uranio recuperado puede mezclarse con plutonio. El resto puede quedar almacenado o ser reintegrado al ciclo enviándolo a reactores de agua pesada o a plantas de enriquecimiento, según su grado de enriquecimiento y su contenido en uranio-236 y en otros isótopos no deseables. De todos modos, la reutilización del uranio recuperado reducirá las necesidades de uranio natural, con la consiguiente ventaja económica.

El sistema de manipulación de los desechos comprende las etapas de almacenamiento, tratamiento, transporte y evacuación. Según lo aconsejen las condiciones locales, las instalaciones de almacenamiento temporal y de evacuación definitiva de los desechos de alta actividad podrán o no quedar ubicadas en el emplazamiento del centro regional.

## OBJETIVOS DE LA REPRESENTACION CON MODELOS MATEMATICOS

Un importante criterio que ha de observarse al evaluar las ventajas de los centros regionales para el ciclo del combustible nuclear lo constituye el costo relativo de la gestión del combustible agotado utilizando instalaciones regionales integradas, comparado con el costo de utilizar instalaciones nacionales dispersas, teniendo debidamente en cuenta la posibilidad y el costo de un almacenamiento a largo plazo del combustible agotado, sin reelaborarlo. Para una evaluación global, es importante considerar el escalonamiento de las inversiones de capital y las necesidades logísticas de material de un centro regional para el ciclo del combustible.

La finalidad primordial del modelo matemático es proporcionar una metodología para el análisis de las diversas estrategias posibles de gestión del combustible agotado, haciendo hincapié en el análisis económico. Este objetivo se está alcanzando mediante el desarrollo de programas para computadora que describen los parámetros de la corriente de materiales, los calendarios de construcción de las instalaciones, los planes de inversión de capital y los gastos de explotación de las instalaciones utilizadas para tratar el combustible agotado. Estos programas para computadora se basan en las conclusiones de estudios técnicos que se están llevando a cabo y que proporcionan los datos de entrada operacionales y económicos necesarios.

## INDOLE DE LOS PROGRAMAS PARA COMPUTADORA

Para los análisis económicos, los programas para computadora emplean una combinación de procedimientos de simulación y de optimación. Muchas de las etapas del ciclo del combustible (tales como la descarga del combustible, su almacenamiento en emplazamiento

del reactor y su transporte al centro regional para el ciclo del combustible nuclear) se describen en términos físicos y económicos recurriendo a su representación mediante modelos de simulación, en tanto que otras (tales como la capacidad y los calendarios de construcción de las plantas de reelaboración, la asignación de cargas de reelaboración a las plantas disponibles y los calendarios de construcción de las instalaciones de almacenamiento) son objeto de procedimientos de optimización económica a fin de determinar, de entre las diversas opciones viables, cuáles son los planes de costo aproximadamente más bajo.

Existen diversas consideraciones de orden económico que pueden muy bien aconsejar como conveniente un aplazamiento de la reelaboración. Entre ellas figuran las siguientes:

1. Las economías de escala pueden muy bien proporcionar un incentivo para demorar la reelaboración, a fin de que una planta de capacidad mayor pueda contar con una suficiente reserva de combustible agotado almacenado.
2. El costo de la reelaboración y reciclado del uranio y del plutonio en reactores térmicos puede muy bien no quedar compensado por el valor del uranio y plutonio recuperados hasta que tenga lugar una subida del precio del uranio y de su enriquecimiento. Un factor complementario sería el valor asignado al plutonio que vaya a utilizarse como combustible en reactores reproductores rápidos.

Se tiene el propósito de que el modelo de centros regionales para el ciclo del combustible nuclear sea lo suficientemente detallado para que puedan explorarse los diversos elementos de compensación a fin de obtener una selección casi óptima de la capacidad de las plantas de reelaboración, las fechas de entrada en servicio y las corrientes de combustible.

Esto exige disponer de la necesaria flexibilidad para describir y tratar los costos de todas las opciones probables resultantes de comparar el almacenamiento con la reelaboración, la reelaboración diferida con la reelaboración inmediata, las instalaciones locales con las instalaciones regionales etc.

La Figura 2 muestra en forma esquemática las distintas partes del actual modelo del ciclo del combustible de un centro regional. Cada uno de los bloques representa un submodelo descriptivo de los procesos y costos específicos de la actividad de que se trata. Algunos de estos submodelos entrañan procedimientos de optimización.

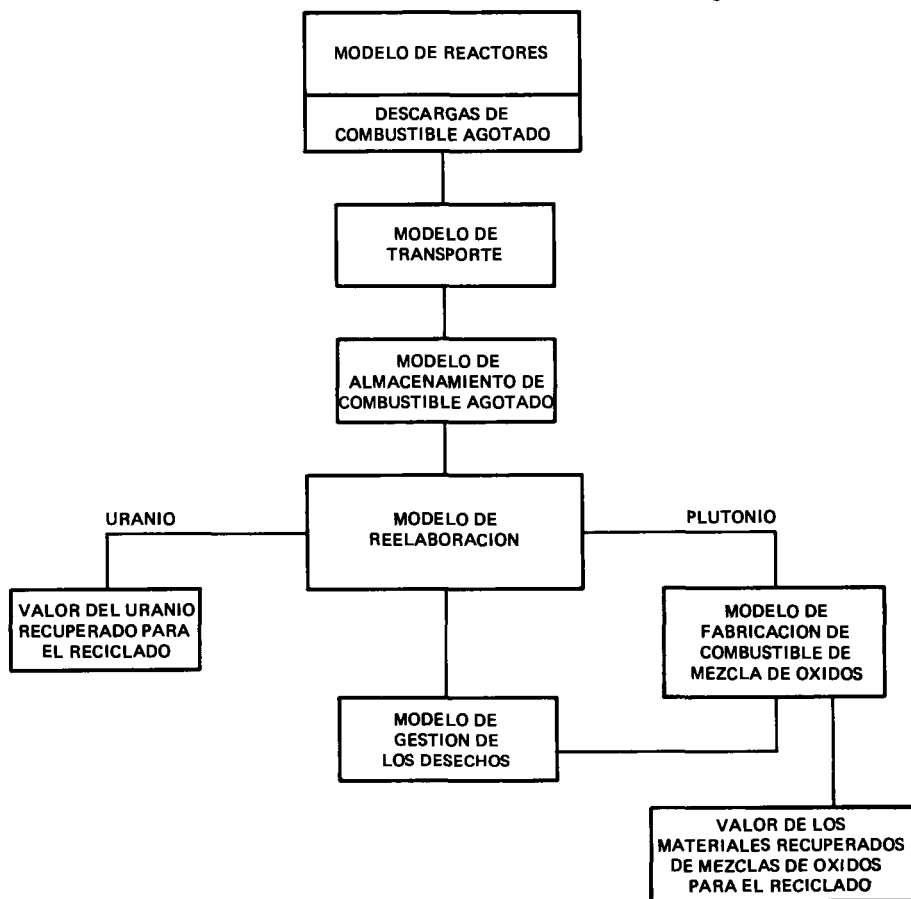
## DESCRIPCION DEL MODELO DE SIMULACION DE CENTROS REGIONALES

Este modelo simula la corriente del combustible y de los materiales de desecho a través de las distintas instalaciones en que tiene lugar su transporte, almacenamiento y tratamiento, y calcula también los costos de construcción y explotación de esas instalaciones.

La característica distintiva de este modelo es que carece de capacidad para optimizar o para llegar a decisiones. Es el analista quien debe especificar la fecha de entrada en servicio y la capacidad de rendimiento de cada una de las instalaciones principales, tales como plantas de reelaboración y de fabricación de combustible a base de mezcla de óxidos. Partiendo de los datos relativos a esos calendarios de construcción de las plantas, al régimen de descarga del combustible agotado y a los costos, el modelo de simulación llevará a cabo un análisis económico de la construcción y explotación de las instalaciones propuestas. Este cálculo de los costos incluye los gastos de transporte y almacenamiento del combustible agotado y los imputables a la gestión de los desechos, deduciendo de ellos el valor del uranio y del plutonio recuperados. Además, el programa para la computadora incluye la impresión de un informe detallado sobre las cantidades anuales de esos materiales correspondientes a cada una de las etapas del ciclo del combustible.

En las secciones del presente artículo que figuran a continuación se describen los principales elementos del modelo para computadora representado esquemáticamente, en la Figura 2.

**Fig. 2. Componentes principales del modelo de ciclo del combustible correspondiente al Proyecto para el estudio de centros regionales**



**Modelo de reactores.** Para calcular las cantidades anuales de combustible agotado que se descargan en los reactores de los diversos países se emplea el programa FURY. Los datos de entrada son los siguientes:

- 1) Proyecciones del crecimiento de la capacidad nucleoelectrica de cada país, por tipos de reactor (por ejemplo: reactores de agua a presión (PWR), de agua hirviendo (BWR), de agua pesada (HWR), etc.);
- 2) Factor de capacidad de la planta (valor medio);
- 3) Características del combustible agotado y cantidades por GW(e)-año de funcionamiento del reactor.

Las características del combustible agotado que han de tratarse en la computadora se eligieron de forma que sea posible una descripción adecuada del mismo en términos económicos.

Las características seleccionadas son las siguientes:

A. Contenido en uranio, en términos de:

- 1) Cantidad real de uranio;
- 2) Uranio natural equivalente economizado en la planta de enriquecimiento;
- 3) Trabajo de separación equivalente economizado en la planta de enriquecimiento;

B. Contenido en plutonio, en términos de:

- 1) Plutonio fisionable;
- 2) Plutonio total.

Estas características permiten calcular el valor económico pertinente del uranio y del plutonio recuperados, sin que sea necesario llevar cuenta del enriquecimiento de cada lote de combustible. Estas características pueden promediarse para cualquier número de lotes, en tanto que es erróneo hallar simplemente la media del enriquecimiento del uranio (por más que el error sea pequeño si los enriquecimientos no difieren considerablemente).

**Modelo de transporte de combustible agotado.** Este modelo simula el paso del combustible agotado a través de las diferentes operaciones de manipulación y transporte (después de haber pasado almacenado un período adecuado de "enfriamiento"), el cual termina con su llegada a la instalación de almacenamiento del centro regional. Esta simulación comprende el tratamiento de datos tales como los correspondientes a las inversiones de capital necesarias, a los costos de explotación y de expedición, y las demoras en las expediciones.

**Modelo de almacenamiento de combustible agotado.** A su llegada al centro regional, el combustible agotado es objeto de un almacenamiento intermedio, el cual sirve principalmente para acumular existencias que aseguren el funcionamiento ininterrumpido de la planta de reelaboración, y también para acopiar de manera eficaz el combustible agotado en una serie de "campañas" de reelaboración.

De recibirse el combustible agotado a un ritmo más rápido que aquel con que la planta pueda reelaborarlo, se precisará de una mayor capacidad de almacenamiento. En un caso así, es imposible mantener en almacenamiento intermedio, el exceso de combustible que se vaya acumulando, por lo que será necesario disponer de medios para su almacenamiento provisional. También es probable que se necesite este tipo de almacenamiento provisional mientras se construyan las plantas de reelaboración.

El modelo calcula la cantidad de combustible agotado recibida cada año, así como la cantidad que puede reelaborarse en el curso del año de que se trate. La diferencia entre estos dos valores es la cantidad que ha de mantenerse en almacenamiento provisional. Las necesidades acumulativas de capacidad de almacenamiento se calculan llevando cuenta de las entradas y salidas de los materiales. Siempre que la capacidad de almacenamiento necesaria excede de la capacidad disponible, se añaden en el cómputo nuevas instalaciones para ese fin.

**Modelo de planta de reelaboración.** El modelo actual de planta de reelaboración es sumamente sencillo. El analista puede incluir en el cómputo un plan de ampliación de la planta a cada una de, como máximo, tres capacidades distintas. No puede entrar en servicio más de una planta al año. Además, para cada una de las plantas, el analista especifica los gastos anuales de instalación, los gastos fijos anuales de explotación y los gastos anuales de explotación que varían en función de la producción.

En la reelaboración se da prioridad al combustible agotado acumulado en años anteriores en almacenamiento provisional. Es decir, que en la asignación de prioridades para la reelaboración se sigue el principio de tratar los lotes de combustibles por el mismo orden en que se hayan ido recibiendo.

8 Cuadro 1: Modelo para ajustar las corrientes de materiales para el reciclado del plutonio

CARACTERISTICAS: ESTADO DE EQUILIBRIO	CASO SIN RECICLADO (RECARGA UO <sub>2</sub> )	CASO DE RECICLADO		VARIACION NETA DEBIDA AL RECICALDO DEL Pu	VARIACION NETA POR Kg DE Pu FISIONABLE RECICLADO
		FRACCION DE UO <sub>2</sub>	FRACCION DE COMBUSTIBLE MEXCLA DE OXIDOS		
<b>CARGA:</b>					
URANIO TOTAL (Kg)	27 350	18 500	8 409	-441	-1,63
URANIO-235 (%)	3,200	3,200	0,711		
URANIO NATURAL EQUIV. (Kg)	192 980	130 535	8 409	-54 036	-199,91
TRABAJO DE SEPARACION EQUIV.	103 586	70 067	0,0	-33 519	-124,01
PLUTONIO TOTAL (Kg)	0,0	0,0	441,0	441,0	1,632
PLUTONIO FISIONABLE (Kg)	0,0	0,0	270,3	270,3	1,000
COMBUSTIBLE DE UO <sub>2</sub> FABRICADO	27 350	18 500	0,0	-8 850	-32,74
COMBUSTIBLE DE MEZCLA DE OXIDOS FABRICADO	0,0	0,0	8 850	8 850	32,74
<b>DESCARGA:</b>					
URANIO TOTAL (Kg)	26 167	17 679	8 190	-298	-1,10
URANIO-235 (%)	0,930	0,930	0,320		
URANIO NATURAL EQUIV. (Kg)	40 110	27 099	0,0	-13 011	-48,13
URANIO EMPOBRECIDO EQUIV. (Kg)	0,0	0,0	8 190	8 190	30,30
TRABAJO DE SEPARACION EQUIV.	5 064	3 421	0,0	-1 643	-6,08
PLUTONIO TOTAL (Kg)	254,9	172,4	273,1	190,6	0,705
PLUTONIO FISIONABLE (Kg)	180,1	121,8	151,2	92,9	0,344

**Modelo de fabricación de combustible de mezcla de óxidos.** Se están preparando los datos necesarios para obtener estimaciones de los gastos de instalación y de explotación correspondientes a cada subinstalación importante de una planta de fabricación de combustible de mezcla de óxidos. Esas estimaciones servirán de base para calcular los costos de fabricación del combustible de mezcla de óxidos en función de la capacidad y de la producción real de la planta de fabricación.

**Valor económico del uranio recuperado.** El uranio recuperado se "abona en cuenta" atendiendo a su valor como material de alimentación de plantas de enriquecimiento. Sirviéndose de las fórmulas usuales de enriquecimiento, el código calcula el "contenido" en uranio recuperado en términos de uranio natural equivalente y de trabajo de separación equivalente. Partiendo de tablas en las que figuran los datos de entrada correspondientes al uranio natural y al precio del trabajo de separación, se calcula el valor económico del uranio recuperado.

**Valor económico del plutonio recuperado.** Se parte del supuesto de que el plutonio será reciclado como combustible de mezcla de óxidos para reactores de agua ligera (LWR). Utilizando un flujo de materiales correspondientes al ciclo en equilibrio para un reactor LWR alimentado con combustible de  $UO_2$  y otro reactor del mismo tipo alimentado con combustible de mezcla de óxidos, el modelo calcula la variación neta de diversas características debida al reciclado del plutonio. Un ejemplo de este cálculo aparece en el Cuadro 1.

Los coeficientes calculados por este procedimiento se utilizan para asignar un valor económico al plutonio recuperado. Sirven igualmente para ajustar las características del combustible agotado descargado de un reactor, de manera que reflejen el hecho de que las características de las futuras descargas se varán modificadas por ese reciclado del plutonio.

**Modelo de gestión de desechos.** La capacidad y el índice de producción de las instalaciones de gestión de los desechos dependen principalmente de la capacidad y del índice de producción de las plantas de reelaboración. Los desechos de tratamiento y residuos de fabricación producidos en la fabricación de combustible de mezcla de óxidos influirán también en esa capacidad en índice de producción.

Para cada una de las operaciones principales de gestión y evacuación de desechos, se utilizarán los siguientes datos de entrada.

Para las instalaciones de almacenamiento, tratamiento y evacuación:

- a) Gastos de instalación;
- b) Plan de inversiones;
- c) Gastos fijos anuales de explotación;
- d) Gastos de explotación que varían en función de la producción de la planta.

Para las operaciones de transporte:

- a) Coste del transporte de los materiales de que se trate entre las instalaciones (en dólares por tonelada métrica de combustible agotado reelaborado).

## DESCRIPCION DEL MODELO DE OPTIMACION DE CENTROS REGIONALES

La finalidad de este modelo es determinar el calendario óptimo, desde el punto de vista económico, para ampliar la capacidad de reelaboración, teniendo en cuenta los índices de descarga de combustible agotado, las economías de escala resultantes de plantas de reelaboración de mayor capacidad, y el costo adicional de las instalaciones de almacenamiento provisional necesarias para acumular una reserva que asegure el funcionamiento ininterumpido de esas plantas de capacidad mayor. El planificador facilita los diversos datos relativos



a los gastos de instalación y de explotación correspondientes a las distintas capacidades posibles de las plantas de reelaboración, así como los correspondientes a los gastos de instalación y de explotación de las instalaciones de almacenamiento provisional. El modelo de optimización determina seguidamente la estrategia que entraña el costo más bajo para el almacenamiento y la reelaboración del combustible agotado, habida cuenta de la compensación que supone el valor del uranio y plutonio recuperados.

El método de optimización actualmente empleado es del tipo de "programación dinámica regresiva". Este método ofrece la posibilidad de seleccionar el calendario óptimo de ampliación de una planta de reelaboración a lo largo del período de tiempo proyectado, examinando un número finito de situaciones factibles, o "estados" que pueden plantearse en cada año del período considerado. Un "estado" del sistema se caracteriza por una capacidad discreta de reelaboración y por una cantidad discreta de combustible agotado almacenado como reserva. El método de programación dinámica determina aquel calendario de la capacidad de reelaboración y aquellos niveles de la reserva almacenada que conducen a los costos más bajos.

## CONCLUSIONES

Los modelos de optimización y de simulación pueden utilizarse ventajosamente en forma iterativa para efectuar un análisis detallado de las distintas estrategias en la gestión del combustible agotado. El modelo de programación dinámica permite determinar el calendario de reelaboración que ofrece el costo aproximadamente más bajo, si bien no proporciona detalles completos sobre todas las partidas de gastos o elementos del costo. El calendario así obtenido puede utilizarse como información de entrada para el modelo de simulación, el cual efectuará un análisis más detallado de las diferentes etapas de la gestión del combustible agotado. El modelo de simulación puede servir también para intentar una optimización mayor aún de los costos mediante el examen de cuestiones de detalle que no pueden incluirse en la programación dinámica. De esta forma, la combinación de las posibilidades que ofrecen ambos modelos deben poder permitir a un planificado del ciclo del combustible analizar una amplia gama de posibles estrategias en la gestión del combustible agotado.

# Códigos y guías de seguridad para su aplicación a centrales nucleares

por Enzo Iansiti\*

Los códigos prácticos y guías de seguridad que prepara para su publicación el Organismo Internacional de Energía Atómica versan sobre cinco temas principales: organizaciones nacionales, emplazamiento, diseño, explotación y garantía de calidad. En cada una de esas esferas, un secretario científico está encargado de la redacción inicial de los textos, que cinco Comités de Revisión Técnica, integrados por 10 o 12 expertos de distintos Estados Miembros, examinan en distintas etapas. Un Grupo Asesor Superior supervisa todo el programa y examina finalmente cada documento. La coordinación del programa con otras secciones del OIEA y con otras organizaciones internacionales corre a cargo de un funcionario científico.

El Sr. Iansiti es miembro de la Sección de Seguridad Nuclear, División de Seguridad Nuclear y Protección del Medio Ambiente.