

# MÉTODOS PARA CALCULAR EL COSTO DE LA ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA

Es evidente que la expansión en gran escala de la energía nucleoelectrónica dependerá de sus ventajas económicas, que a su vez estarán determinadas principalmente por el costo de la electricidad producida. El interés por obtener datos sobre el costo de las centrales nucleares de tipo conocido es general. Hace tiempo que el Organismo Internacional de Energía Atómica está acopiando información técnica y económica sobre los diferentes tipos de reactores generadores, información que comunica a sus Estados Miembros. El año pasado se presentó a la Conferencia General del Organismo un informe sobre los costos de producción de la energía nucleoelectrónica; este año se está preparando una revisión de dicho informe.

Algunos Estados Miembros del Organismo tropiezan con dificultades cuando tratan de adaptar a su propia situación los datos obtenidos por otros países. Aparte de que los factores que influyen en el costo suelen variar ampliamente de un país a otro, los métodos utilizados para calcularlo no son idénticos en todos los países. Por ello, el Organismo considera que una de sus tareas más importantes consiste en contribuir al establecimiento de bases sólidas para calcular el costo de la energía nucleoelectrónica de modo que permita evaluar y utilizar en circunstancias diferentes la información de que se disponga.

Un grupo internacional de expertos\* reunido por el Director General del Organismo ha redactado recientemente, después de un examen minucioso de los métodos de cálculo de costos, un informe titulado "Introducción a los métodos de cálculo del costo de producción de la energía nucleoelectrónica". El objeto del informe es ayudar a los Estados Miembros del Organismo, sobre todo a los menos adelantados en la tecnología nuclear, a efectuar un análisis económico preliminar a la construcción de una central nuclear. Contiene indicaciones sobre las diferentes partidas de gastos que deben preverse en un proyecto de energía nucleoelectrónica, sugerencias sobre el modo de adaptar los datos disponibles a cada caso y evaluaciones de los distintos métodos utilizados para calcular los elementos del costo unitario de la energía producida.

En el informe se señala que el cálculo del costo de producción de la electricidad en una central es sólo un primer paso en la evaluación de la rentabilidad de la energía nucleoelectrónica. Si la central nuclear forma parte de una red habrá que comparar dicho costo con el de la corriente producida por una central clásica conectada a la misma red. Asimismo,

si un país proyecta ejecutar un programa nacional de energía nucleoelectrónica, deberán tenerse en cuenta los gastos indirectos que ello supondrá para la economía de todo el país y compararlos con los que ocasionarían otras soluciones posibles. Pero estos análisis de alcance más vasto exigen estudios especiales; el objeto del informe es ayudar a los países que estudian la posibilidad de producir energía de origen nuclear a calcular el costo de dicha energía o del calor industrial producido por los reactores nucleares.

## Tres categorías de costos

En principio, parece que el precio de costo de la energía nucleoelectrónica debe calcularse como el de la electricidad clásica. En ambos casos se trata de determinar el precio de costo unitario habida cuenta de los gastos de inversión, de los gastos de combustible y de los gastos de explotación, conservación y otros. Pero dada la variedad de tipos de reactores, las características excepcionales del combustible nuclear y la escasa experiencia adquirida en la explotación de reactores generadores, es más complicado determinar el precio de costo de la energía de origen nuclear que el de la producida en centrales clásicas. En un capítulo de introducción se examinan brevemente algunas características especiales de las tres categorías de costos de la energía nucleoelectrónica antes mencionadas.

En toda comparación económica entre la energía de origen nuclear y la clásica lo que llama más la atención es la diferencia entre los gastos de inversión, sobre todo cuando se trata de centrales de poca potencia. Esta diferencia se debe en gran parte al elevado costo del reactor, del equipo complementario y de los dispositivos de seguridad.

En lo que respecta al combustible existe también una gran diferencia entre los gastos. En el caso de un reactor generador el valor total de las reservas de combustible (incluida la carga del reactor) puede ser diez veces mayor que el de las reservas necesarias para una central térmica alimentada con carbón. Además, el costo del combustible por unidad de energía producida es mucho más sensible a las variaciones de las dimensiones de la instalación para las centrales nucleares que para las centrales clásicas. Otra particularidad del combustible nuclear es que en la actualidad sólo puede obtenerse en unos pocos países, mientras que las fuentes de abastecimiento de combustibles clásicos son mucho más numerosas. Además, si se quiere aprovechar el combustible agotado de un reactor nuclear, su transporte y tratamiento supone gastos muy elevados.

\* El grupo estaba integrado por expertos del Canadá, Estados Unidos, Francia, Hungría, India, Italia, Japón, Reino Unido y Suecia.

En lo que concierne a la explotación y conservación, el informe señala que, debido a los peligros de irradiación, es preciso adoptar en las centrales nucleoelectricas precauciones especiales de seguridad y protección de la salud; por ello, los gastos de explotación y conservación de las centrales nucleares son actualmente más elevados que los de las centrales clásicas.

En los tres capítulos siguientes del informe se examinan detalladamente los factores comprendidos en cada una de las tres categorías de costos. El primero de estos capítulos trata del "costo de construcción de la central", o sea el gasto total de construcción de una central eléctrica (denominado también "gasto de inversión" o "costo de la central").

### **Costo de construcción de la central**

Para calcular el costo de la central es muy importante un desglose detallado de los gastos de construcción que permita identificarlos. Una relación completa de los gastos de construcción facilitaría la comparación entre diferentes centrales nucleares.

Si se exceptúan el reactor y el equipo complementario, los elementos del costo de una central nuclear son en muchos aspectos análogos a los de una central clásica. Los principales elementos del costo de una central nuclear, enunciados en un apéndice del informe, son: 1) terreno y derechos de propiedad, 2) preparación del terreno, obras y estructuras, 3) reactor y equipo auxiliar, 4) circuito primario, intercambiadores de calor y dispositivos auxiliares, 5) material de sobrecalentamiento, 6) circuito secundario y generador, 7) material diverso, 8) gastos conexos. Cada uno de esos elementos puede descomponerse a su vez según los siguientes conceptos: a) material y equipo, b) transporte, c) impuestos, d) gastos de mano de obra y montaje, e) costo del material instalado.

Los ocho elementos principales del costo de construcción de la central pueden subdividirse en componentes más específicos de modo que permita identificarlos y compararlos con precisión. Por ejemplo, en la clasificación contenida en el informe, el elemento "reactor y equipo auxiliar" comprende: a) el reactor propiamente dicho, b) circuitos de refrigeración y de calentamiento y dispositivos auxiliares, c) equipo para manipulación del combustible, d) instrumental del reactor y dispositivos auxiliares, e) moderador, f) reflector (si es distinto del moderador), g) circuito del moderador y partes constitutivas, h) artículos diversos (por ejemplo, instrumentos de laboratorio), i) piezas de recambio. El elemento "gastos conexos" comprende: a) gastos de estudio, proyecto e inspección (originados por las investigaciones preliminares, etc.), b) gastos indirectos (de administración general, etc.), c) gastos de puesta en servicio (por ejemplo, gastos de inspección y ensayos previos), d) honorarios diversos (por ejemplo, derechos legales), e) intereses durante la construcción, f) gastos imprevistos.

Los anteriores ejemplos ilustran la manera como deben descomponerse los costos para adaptar con éxito a un país los datos referentes a otro; cuanto más detallada sea la descomposición mayor será la utilidad de esos datos.

### **Costo del combustible**

En el informe se hace observar que, teniendo en cuenta los elevados gastos de inversión que exige la energía nucleoelectrica, la posibilidad de producir dicha energía en condiciones rentables depende sobre todo del aumento del rendimiento del combustible y de la reducción de su costo. Al describir los diferentes ciclos de combustible se señala que los reactores de uranio natural presentan considerable interés porque su combustible es más barato y se puede obtener más fácilmente. Se advierte, en cambio, que si bien el uranio enriquecido es más costoso, permite una selección más amplia de los materiales de revestimiento y de la composición del combustible, lo que puede dar por resultado un mejor rendimiento de éste y, por consiguiente, una reducción de los gastos totales de inversión por unidad producida. Un ciclo de combustible no debe, pues, estudiarse aisladamente sino teniendo en cuenta su efecto global sobre el costo de la energía.

El informe enumera los factores económicos y técnicos que determinan el costo del combustible. El primero es el costo del combustible elaborado en la forma en que se introduce en el reactor. El segundo es el valor del combustible agotado después de ser extraído del reactor, esto es, el valor de los materiales fisionables y fértiles de los elementos irradiados menos los gastos de transporte y seguro del combustible irradiado y los gastos de tratamiento. Un tercer factor es el rendimiento del combustible, es decir, la cantidad de calor generada por una cantidad determinada de combustible nuclear antes de ser extraída del reactor y regenerada. Otro factor es la administración del combustible (que incluye el método de obtención de éste, las reservas necesarias, la manipulación del combustible después de ser extraído del reactor, etc.). Como quinto factor cabe citar la potencia específica del reactor expresada en kilovatios de potencia térmica por kilogramo de combustible. Otro factor es el rendimiento térmico de la central, que determina el número de unidades de energía eléctrica producidas por una unidad de calor. También cabe citar como factores importantes el tipo de interés y el factor de utilización de la central en razón de las grandes cantidades de dinero inmovilizadas en el combustible nuclear. La vida de la central puede también influir en el cálculo del costo del combustible por unidad de energía producida.

### **Costos de explotación, conservación y otros**

El informe clasifica en la tercera categoría todos los gastos que no sean de inversión ni de combustible. Los costos corrientes de explotación de las centrales nucleares, como los de las centrales

clásicas, se descomponen con arreglo a los siguientes conceptos: mano de obra y dirección, suministros externos y materiales consumibles, conservación y gastos varios. En un apéndice al informe figura una clasificación de los costos de explotación y conservación.

Mientras no se adquiera más experiencia en lo que concierne a la explotación, es probable que haya que destinar a las centrales nucleares personal especializado, sobre todo en ingeniería nuclear y en servicios de seguridad y protección de la salud. Ello contribuirá a mantener los gastos de explotación a un nivel elevado. Es posible que los gastos de dirección sean también más elevados en una central nuclear que en una clásica.

Los gastos de conservación del equipo clásico utilizado en una central nuclear pueden calcularse fácilmente por comparación con los gastos de las centrales clásicas. Por lo que respecta a la parte nuclear de la central, los gastos tenderán a ser más elevados debido a los riesgos de irradiación inherentes; puede ser necesario, por ejemplo, ejecutar algunas de las operaciones de entretenimiento por mando a distancia.

En cuanto a los refrigerantes y moderadores especiales, tales como agua pesada o líquidos orgánicos, utilizados por algunos tipos de centrales nucleares, el costo de la carga inicial de dichos materiales se clasifica en el informe entre los gastos de inversión, pero el costo de las cargas complementarias se considera como gasto de explotación. También pueden ser necesarios para la explotación materiales especiales de otro tipo. Por lo que respecta a los gastos varios, un elemento importante son las primas del seguro de responsabilidad en caso de accidente nuclear. El informe señala que no hay ninguna regla rígida para clasificar los gastos de explotación entre las diferentes categorías establecidas. Lo que importa es velar por que no sea omitido ningún gasto que pueda influir en el resultado final.

### **Cálculo del costo de producción**

Después de haber identificado los costos de construcción, de combustible y de explotación y mantenimiento, y una vez efectuada su clasificación, procede determinar el costo unitario de la energía producida. Si se dispone de datos exactos sobre el costo de producción de la energía en una sola central se puede hacer una comparación económica de dos reactores cuyos costos de construcción, combustible y explotación y conservación tengan estructuras distintas, pero que estén destinados a prestar servicios análogos durante el mismo período de tiempo y dentro de una misma red.

De todos modos, en el informe se hace observar que dichos datos no deben utilizarse indistintamente para comparaciones entre centrales clásicas y nucleares. Estas últimas se introducirán por lo general en redes cuya explotación quedará completamente modificada; además, la determinación del costo real de explotación de una central nuclear exige un análisis económico de toda la red durante varios años.

Los métodos de cálculo del costo de producción de la energía nucleoelectrónica pueden clasificarse en dos categorías: los métodos del estado estacionario y el método del valor actual. Los métodos del estado estacionario difieren en algunos detalles de un país a otro, según sea el sistema de adquisición del combustible, pero tienen una característica fundamental común: se basan en la hipótesis de que se ha alcanzado un estado de equilibrio en el que se suponen constantes los principales parámetros determinantes del costo, tales como la irradiación media del combustible y el factor de carga de la central. Seguidamente se efectúan los ajustes necesarios para tener en cuenta las variaciones que pueden experimentar esos parámetros durante la vida del reactor. En cambio, el método del valor actual puede aplicarse sistemáticamente a cualquier tipo de reactor sea cual fuere el sistema de abastecimiento de combustible. Este método consiste en hacer una relación de todos los gastos previstos para el período de vida del reactor y en determinar su valor actual. Para obtener el costo de producción, dicho valor se divide por el valor actual de la energía que la central producirá según las previsiones.

En los métodos del estado estacionario, el costo de producción del kilovatio hora (la unidad de energía producida) se considera como la suma de los gastos de inversión, de combustible, así como de explotación, conservación y otros. Los gastos totales de inversión en el momento de puesta en marcha se determinan sumando todos los elementos comprendidos en ese concepto y añadiendo una cantidad para tener en cuenta los intereses durante la construcción. El gasto de inversión anual se obtiene calculando el interés anual de la inversión total, la amortización (que se calcula determinando las anualidades que, si se reservasen cada año, alcanzarían, cuando termine la vida de la central, un valor igual al del gasto total inicial de inversión), más los impuestos y las primas de seguro cuando proceda. El gasto de inversión anual unitario se obtiene dividiendo el gasto de inversión anual por el número de kilovatios hora producidos al año.

Por lo que respecta al elemento "costo del combustible", en el informe se describen los métodos aplicados en el Canadá, los Estados Unidos y el Reino Unido y se hace observar que la imputación de los gastos de combustible a los kilovatios hora producidos puede exigir el cálculo por separado de una serie de elementos de costo: arrendamiento del combustible, empobrecimiento del combustible, elaboración del combustible, tratamiento químico, transporte, transformación del uranio, transformación del plutonio y valor del plutonio.

Todos los gastos comprendidos en la categoría de "gastos de explotación y de conservación" pueden expresarse como gasto anual por kilovatio y capacidad instalada. El elemento correspondiente del costo de producción se obtiene, pues, sumando simplemente esos gastos y dividiendo el total por el número anual de kilovatios hora producidos por kilovatio de capacidad instalada.

Los métodos del estado estacionario tienen la ventaja de permitir un cálculo rápido y de dar resultados cuya exactitud es más que suficiente si se tiene en cuenta el carácter incierto de los valores actuales y futuros de los datos en que se fundan. Sin embargo, están sujetos a algunas limitaciones; por ejemplo, se obtendrán costos de producción diferentes para años distintos si los parámetros de explotación o económicos, tales como el factor de carga de la central o el costo del combustible, varían durante la vida del reactor.

Estas dificultades pueden resolverse recurriendo al denominado método del valor actual, utilizado por algunos países para las evaluaciones económicas generales. Como ya se ha indicado, este método con-

siste en establecer un calendario en el que se inscriben (por ejemplo, año por año) todos los gastos de inversión, combustible, explotación y otros, así como los créditos derivados de la explotación del reactor durante toda su vida, más las cantidades de energía que producirá. A continuación se determina el costo de producción del kilovatio hora; este costo ha de ser tal que el valor actual de la energía que producirá el reactor sea igual al valor actual de todos los gastos en el momento de puesta en servicio del reactor. El método del valor actual está particularmente indicado cuando los ciclos de combustible son complejos, cuando el período necesario para alcanzar el equilibrio es relativamente largo o cuando se pueden predecir exactamente las variaciones futuras de los parámetros pertinentes.

---

## APLICACIONES DEL TRITIO EN LAS CIENCIAS FÍSICAS Y BIOLÓGICAS

En el curso de los últimos años, el tritio (isótopo radiactivo del hidrógeno) se viene empleando cada vez más con fines de investigación en química, física, biología, meteorología e hidrología. En muchos estudios de procesos biológicos y metabólicos, puede utilizarse como indicador el tritio o algún compuesto tritiado. También es útil para estudiar los efectos de las radiaciones sobre las plantas y los animales o las características de los reguladores bioquímicos, tales como las vitaminas y las hormonas. En hidrología, una de las principales aplicaciones prácticas del tritio consiste en el estudio de las aguas subterráneas, que es esencial para la planificación de las operaciones de riego en las regiones áridas o semiáridas.

La variedad de estudios e investigaciones que pueden realizarse mediante el tritio o los compuestos tritiados crece continuamente y en muchos casos los resultados obtenidos han permitido comprender mejor numerosos procesos físicos y biológicos.

En un simposio internacional reunido en Viena entre el 3 y el 10 de mayo de 1961 se examinaron diversos aspectos de la detección y uso del tritio en las ciencias físicas y biológicas. Alrededor de 270 hombres de ciencia de 27 países y cinco organizaciones internacionales tomaron parte en este simposio, preparado por el Organismo Internacional de Energía Atómica conjuntamente con la Comisión Mixta de Ra-

diactividad Aplicada del Consejo Internacional de Uniones Científicas. Se presentaron y discutieron 65 memorias relativas a una serie de temas especializados, agrupados en las siguientes materias: distribución del tritio en la naturaleza; métodos de enriquecimiento y aplicaciones hidrológicas; el tritio en la química y en la física; detección y recuento del tritio; preparación de compuestos tritiados; y utilización del tritio y de los compuestos tritiados en los estudios biológicos.

Al inaugurar el simposio, el Sr. Sterling Cole, Director General del OIEA, señaló que el mismo constituía la primera reunión internacional dedicada al examen de los progresos realizados en el empleo del tritio en las ciencias físicas y biológicas. Manifestó que algunas de las memorias presentadas se referían a trabajos en cuya ejecución el Organismo participa activamente; mencionó en particular los estudios acerca de la distribución del tritio en la naturaleza y sus aplicaciones en hidrología. En colaboración con la Organización Meteorológica Mundial, el OIEA ha emprendido un estudio de alcance mundial con objeto de determinar la concentración de los isótopos del hidrógeno y del oxígeno en las aguas pluviales y de investigar el ciclo de las aguas en diferentes partes del mundo. Además, el Organismo utiliza actualmente el tritio para estudiar algunos problemas relacionados con las aguas subterráneas en Grecia.