

DESARROLLO DE LA PRODUCCION DE ENERGIA NUCLEOELECTRICA

El debate sobre el desarrollo de la producción de energía nucleoelectrica se celebró también en la Festsaal de la Neue Hofburg de Viena, el 28 de septiembre de 1960. Los hombres de ciencia que participaron en el debate fueron el Dr. H.G. de Carvalho (Brasil), Consultor de la Comisión de Energía Atómica de su país y en la actualidad profesor visitante en el Instituto Nazionale dei Fisichi Nucleari de Nápoles, el Dr. J.V. Dunworth (Reino Unido), Director Adjunto del Centro de Energía Atómica de Winfrith, el Dr. J. Horowitz (Francia), Jefe del Departamento de Estudios sobre Reactores del Centro de Investigaciones Nucleares de Saclay y el Dr. W. H. Zinn (Estados Unidos), Vicepresidente encargado de las actividades nucleares de la Combustion Engineering, Inc., y ex Director del Laboratorio Nacional de Argonne.

En su discurso de apertura del debate, el Sr. Cole, Director General del Organismo, se refirió a la opinión tan extendida de que "de todas las posibilidades de utilización de la energía atómica, la que ofrece perspectivas más interesantes para el mejoramiento de la suerte de la humanidad es la de obtener energía eléctrica barata". A continuación, el Sr. Cole presentó a los cuatro oradores y al Sr. H. de Laboulaye, Director General Adjunto de Actividades Técnicas del OIEA, que había de actuar de árbitro.

En la primera parte del debate, los expertos hablaron de los cuatro temas propuestos por el árbitro. Estos temas fueron: situación técnica actual en materia de energía nucleoelectrica, costo actual de la energía nucleoelectrica, posibilidad de reducir el costo de dicha energía y aplicaciones de la energía nucleoelectrica en las regiones menos adelantadas.

El debate se desarrolló de la siguiente forma:

SITUACION TECNICA ACTUAL

Dr. Dunworth:

En el proceso de desarrollo de todo equipo industrial es posible distinguir tres etapas.

La primera se alcanza cuando se comprueba que dicho equipo puede conseguir su finalidad meramente técnica, es decir, cuando se tiene la certeza de que funcionará. A la segunda etapa se llega cuando re-

sulta posible que el equipo funcione de una manera segura y eficaz y que su costo de construcción y utilización resulte aceptable desde el punto de vista económico. La tercera etapa se alcanza cuando el equipo puede competir en el terreno económico y se dispone de uno o dos años de experiencia práctica respecto del producto final.

Por lo que se refiere a la energía atómica, se ha venido estudiando, desde 1946, un gran número de sistemas de reactores en trabajos teóricos, programas de investigación y desarrollo y, en algunos casos, mediante la construcción de modestos sistemas de reactores experimentales e incluso de prototipos. Gran parte de la información sobre estas actividades se dio a conocer en la primera y segunda conferencias de Ginebra, que tuvieron lugar en 1955 y 1958 respectivamente. Desearía subrayar que, como resultado de todos estos esfuerzos, ya va siendo raro que surjan tipos realmente nuevos de reactores. En realidad, no puedo recordar que desde la última Conferencia de Ginebra se haya ideado ningún tipo totalmente nuevo.

Esos estudios preliminares han dado lugar, en el curso de los últimos años, a un proceso de eliminación bastante rápido, gracias al cual vemos destacar un número relativamente reducido de sistemas de reactores que satisfacen el segundo de los criterios que expuse. Ese criterio, como recordarán ustedes, es que el equipo ha de poder ser aceptado desde el punto de vista económico y ofrecer la seguridad de un funcionamiento adecuado. Los sistemas de reactores que satisfacen ese criterio derivan de dos amplios conceptos. Se trata de los sistemas de reactores refrigerados por gas y con moderador de grafito que se están desarrollando en el Reino Unido y en Francia, y de los sistemas de agua hirviendo y de agua a presión utilizados en los Estados Unidos, la Unión Soviética, el Canadá y, en menor escala, en Escandinavia. Tal vez debiera añadir ahora que los Estados Unidos están iniciando también el desarrollo de reactores refrigerados por gas.

Ningún reactor generador ha llegado aún a la tercera etapa a que me he referido y que, como ustedes recordarán, sólo se alcanza cuando se dispone de una experiencia práctica que demuestre que el nuevo equipo puede competir en el terreno económico.

No obstante, en el Reino Unido y en Francia las autoridades competentes han dispuesto ya la construcción de los primeros sistemas de reactores comerciales refrigerados por gas, y en el primero de esos países la construcción de los instalados en Berkeley y Bradwell está acercándose a su fin. En los Estados Unidos se está también terminando la construcción de los primeros reactores comerciales de agua a presión, uno en Rowe (Massachusetts) y el otro en Indian Point (Nueva York). Además, cerca de Chicago ha entrado en servicio un reactor-prototipo de agua hirviente, el reactor de Dresden. En la Unión Soviética, se está construyendo una central nucleoelectrica en Voronezh que utiliza agua a presión y otra en Bielyarsk que utilizará un reactor de agua hirviente con moderador de grafito. Tanto en la Unión Soviética como en Francia y en el Reino Unido se está adquiriendo experiencia con las instalaciones montadas para la producción simultánea de plutonio y de energía nucleoelectrica, mientras que, en los Estados Unidos, los diversos programas militares para cuyo desarrollo se utilizan reactores de agua a presión y agua hirviente han demostrado de una manera muy completa que tales sistemas ofrecen excelentes garantías de funcionamiento adecuado. En ningún otro país existen centrales nucleoelectricas importantes cuya construcción esté próxima a terminar, si bien pronto comenzará a funcionar en el Canadá un pequeño reactor de agua pesada a presión.

En la Conferencia que se celebró recientemente en Viena*, pudieron oír ustedes muchas cosas sobre los reactores de pequeña potencia; me he abstenido de enumerar los diversos progresos realizados en este terreno, pero la tecnología de los reactores grandes y pequeños será en gran parte idéntica y mis observaciones, quizá orientadas principalmente hacia los primeros, son igualmente aplicables a los reactores pequeños.

La situación técnica actual en materia de energía nucleoelectrica puede resumirse de la siguiente manera:

En 1955, cuando se celebró la primera Conferencia de Ginebra, se estaba llegando al final de la primera etapa, que consiste en estudiar todas las soluciones técnicas posibles.

En los cinco últimos años se ha reducido considerablemente el campo de estas investigaciones, y ello ha conducido a seleccionar un número reducido de sistemas que son objeto de detenido estudio.

Tanto en el Reino Unido como en los Estados Unidos se está acercando el momento en que se dispondrá de experiencia práctica acerca de la producción de energía nucleoelectrica. Francia sigue de cerca a estos países.

En el Canadá entrará pronto en funcionamiento una pequeña central nucleoelectrica; recientemente se ha decidido construir una grande.

Ya han oído ustedes lo que el Dr. Bhabha, Presidente de la Comisión de Energía Atómica de la India, ha dicho acerca del programa de producción de energía nucleoelectrica de su país en el discurso alentador que ha pronunciado en la presente Conferencia General.

En lo que respecta a la adquisición de experiencia en materia de funcionamiento y de construcción, formularé las siguientes observaciones:

Los Estados Unidos han demostrado la posibilidad de utilizar reactores de agua hirviente y a presión con fines militares. Esos reactores tienen también aplicación en la esfera civil; creo que en la conferencia recientemente celebrada en Viena se presentaron varios trabajos sobre este tipo de reactores.

La Unión Soviética, Francia y, en particular, el Reino Unido han adquirido ya experiencia sobre el funcionamiento de plantas productoras tanto de plutonio como de energía nucleoelectrica.

La experiencia práctica adquirida por el Reino Unido con el funcionamiento de los reactores de Calder Hall y Chappel Cross ha sido excelente. Para los detalles, remito a ustedes al trabajo presentado en Viena hace dos semanas. Durante los cuatro últimos años, es decir, desde que el reactor de Calder Hall comenzó a producir electricidad, no se ha registrado ninguna interrupción involuntaria de su funcionamiento debida al equipo nuclear. Las únicas dificultades con que hemos tropezado han sido debidas al equipo corriente entoda central eléctrica. Hemos conseguido que la central funcionase durante un 90 por ciento del tiempo previsto. Este porcentaje es realmente muy elevado, casi tan alto como el correspondiente a las centrales eléctricas tradicionales. Además, la experiencia que hemos adquirido en lo que respecta a los elementos combustibles ha sido en extremo alentadora.

Se me ha invitado a que dijese unas palabras sobre la construcción de centrales nucleoelectricas. A mi juicio, la construcción de dichas centrales es bastante simple, salvo en lo que se refiere a la técnica relativa a los tanques y a los circuitos de presión, que debe ajustarse a requisitos un tanto especiales. En cuanto al factor tiempo, me limitaré a hacer constar que, en el Reino Unido, Christopher Hinton diseñó y construyó el primer reactor de Calder Hall en dos años y nueve meses, período de tiempo increíblemente corto y, en mi opinión, considerablemente inferior al que normalmente es necesario para diseñar y construir una central eléctrica de tipo tradicional.

Dr. Zinn:

En primer lugar deseo manifestar que estoy de acuerdo con el resumen hecho por el Dr. Dunworth.

La aplicación de la energía nuclear a la producción de electricidad en escala comercial está entrando en una fase de auténtica prueba.

En los Estados Unidos, hace algunos meses que la primera central nucleoelectrica, propiedad de una

* El orador se refiere a la Conferencia sobre reactores de pequeña y mediana potencia organizada en Viena por el OIEA del 5 al 9 de septiembre de 1960.

empresa de servicios públicos, con una capacidad de 180 000 kWe, viene sirviendo electricidad a la red de distribución; según tenemos entendido, otras se encuentran en la etapa final de su construcción. Se trata de reactores de agua hirviendo y a presión. Todos celebramos que estas centrales se hayan construido dentro de los plazos previstos y que, en los cuatro años que ha durado su construcción, los experimentos realizados en los laboratorios hayan aportado nuevas pruebas, corroborando las previsiones primitivas, o sea que su rendimiento será igual o mayor que el calculado, y que serán fáciles de manejar y totalmente seguras.

Ahora bien, esperamos de ellas más todavía. Tendrá una importancia capital el comportamiento del combustible durante el período de dos a cuatro años en que permanecerá en el reactor produciendo el calor necesario para obtener vapor. Los experimentos realizados en reactores de ensayo demuestran que podemos confiar en que los elementos combustibles tendrán una larga vida ya que de lo contrario no se hubiera aprobado su especial diseño. Pero un reactor de grandes dimensiones contiene, aproximadamente, 40 millas de elementos combustibles tubulares. ¿Cuál será el coeficiente de deterioración de dichos elementos? ¿En qué medida se interrumpirá la producción como consecuencia de ese deterioro? ¿Será posible, como esperamos, seguir explotando la central, pese al deterioro de parte de los elementos combustibles, hasta la próxima interrupción prevista en su funcionamiento? Las pruebas realizadas con combustible no irradiado demuestran, desde luego, que es fácil manipular o retirar el combustible. ¿Ocurrirá lo mismo con el combustible intensamente irradiado? He aquí algunas de las preguntas que no pueden recibir respuesta sin haber adquirido una experiencia previa en la explotación.

La experiencia que proporciona la explotación en gran escala tiene especial importancia cuando se trata del aspecto económico de la producción de energía nucleoelectrica. La energía total obtenida con una carga de combustible fabricado y el período de tiempo durante el que podrá funcionar la planta son dos factores que influyen de un modo importante en el costo de la energía, y sólo pueden determinarse de manera definitiva mediante la experiencia. Deseo hacer hincapié una vez más en esta cuestión. Sabemos que los gastos de capital en las centrales ya construidas son más elevados que los de las centrales térmicas equivalentes, y tal vez seguirán siéndolo siempre. Sólo la experiencia práctica puede indicarnos el verdadero costo del combustible y permitirnos con ello confirmar nuestras esperanzas de que será inferior al de las centrales térmicas en medida suficiente para justificar los gastos de capital más elevados en las centrales nucleoelectricas. Creo que a este respecto la situación en el Reino Unido y Francia es análoga a la de los Estados Unidos. Los dos o tres años próximos darán una respuesta en todos esos países a la importante pregunta que he formulado. Sólo entonces dispondremos de los elementos de juicio necesarios para evaluar las

perspectivas económicas de la energía nucleoelectrica.

Otra cuestión que suscita interés y preocupación es la seguridad de las centrales nucleoelectricas. Por fortuna, hay en funcionamiento centrales experimentales de los principales tipos y continuamente recibimos datos a este respecto. Hasta ahora las informaciones no son desalentadoras. A mi juicio, esto no significa que debamos permitir el relajamiento de las normas estrictas que hemos establecido para el diseño, la explotación y el emplazamiento de las centrales nucleoelectricas. Para reactores de diferentes tipos y dimensiones deben aplicarse distintos criterios tanto en lo que respecta al diseño como al emplazamiento, y cada caso debe ser estudiado por personas especialmente competentes y experimentadas. No es probable que se puedan establecer criterios fácilmente aplicables a todos los reactores y a todos los emplazamientos. Creo, no obstante, que podrán establecerse criterios aceptables para todos los tipos de reactores cuya utilización para la producción de energía nucleoelectrica se está estudiando, y que las centrales nucleares dotadas de reactores de esos tipos no presentarán ningún riesgo para el medio ambiente, tanto en su funcionamiento normal como en caso de accidente.

A mi juicio, para garantizar la seguridad es esencial que el diseño, el funcionamiento y el emplazamiento de las centrales estén sometidos a la inspección de un funcionario o de un organismo que no represente ni al proveedor ni al usuario. El funcionario o el organismo encargados de la inspección deberán poseer verdadera competencia técnica o contar con el concurso de un personal que la posea. En los Estados Unidos desempeñan esta función la Comisión de Energía Atómica y su Comité Consultivo sobre Salvaguardias de Reactores, que disponen de personal especializado. Antes de conceder un permiso de explotación de una central nucleoelectrica estos órganos proceden a una inspección completa. Durante la explotación se siguen practicando inspecciones. Considero que esas inspecciones efectuadas por personas libres de las diversas presiones que se ejercen sobre el proyectista o el explotador, constituyen para la población una garantía de que sus intereses están debidamente protegidos.

COSTO ACTUAL

Sr. Horowitz:

Limitaré mis observaciones a las centrales nucleoelectricas de grafito, las cuales, tanto en Francia como en el Reino Unido, constituyen la base de los programas a corto plazo.

Pese a la experiencia adquirida con los reactores de doble finalidad instalados en Marcoule -reactores que producen tanto plutonio como electricidad- seguimos careciendo de muchos elementos de juicio, ya que no se ha terminado aún ninguna de las centrales nucleoelectricas de la Electricité de France; incluso la tercera central nucleoelectrica -EDF. 3-, cuya construcción se iniciará en breve en Chinon y

cuyo rendimiento eléctrico neto oscilará entre 300 y 400 MW, seguirá teniendo, en cierto modo, un carácter experimental.

Sin embargo, esperamos que a partir de ahora se produzca una reducción considerable de las inversiones, gracias al aumento de la potencia específica y de la capacidad de producción de cada central. En cuanto a las centrales que se construirán de aquí a tres o cuatro años con una capacidad de producción de 500 MW eléctricos (con un solo reactor, por lo menos en Francia), los gastos de inversión, incluida la primera carga de uranio, serán ciertamente inferiores a 300 dólares por kilovatio instalado. Si la irradiación (uno de los principales factores que se desconocen) alcanza, como se espera, una cifra del orden de 3 000 a 3 500 MW/día por tonelada, dichas centrales nucleoelectricas serán sin duda alguna rentables.

Dr. Dunworth:

Se calcula que dentro de unos cinco años las nuevas centrales nucleoelectricas que las autoridades competentes del Reino Unido han encargado producirán electricidad a un costo superior, en un 10 por ciento como máximo, al correspondiente a las nuevas centrales eléctricas tradicionales que utilizan carbón y petróleo como combustible. Bastará con que aumenten en un 15 por ciento los precios reales del petróleo o del carbón para que esa diferencia quede compensada. Este aumento podría muy bien producirse durante el período de construcción de las centrales nucleoelectricas. Pero suponiendo que esto no ocurra, es oportuno recordar que en una colectividad normal el costo de producción de electricidad en las grandes centrales suele ser inferior a la mitad del precio de venta y que un aumento de un 10 por ciento en el costo de la electricidad producida no presenta una gran importancia económica, especialmente si se tiene en cuenta que el costo de la electricidad no es un factor principal en los gastos de las plantas industriales, ni siquiera en las casas particulares. La experiencia que adquiriremos con nuestras centrales nucleoelectricas producirá grandes beneficios y, en la práctica, las centrales que se van a construir en el Reino Unido serán totalmente rentables desde un comienzo. Me refiero a las que quedarán terminadas dentro de un plazo de cuatro o cinco años.

Las centrales eléctricas más pequeñas dan un rendimiento bien probado, y en ellas la generación de electricidad mediante combustibles tradicionales es sencilla. Además, los combustibles tradicionales, tales como el carbón y el petróleo, son abundantes, y probablemente seguirán siéndolo durante algún tiempo. Aun en las regiones remotas existen comunicaciones por carretera que permiten el transporte del combustible, ya que dichos medios de comunicación suelen utilizarse para acarrear muchos otros artículos en ambos sentidos. La producción de energía nucleoelectrica mediante pequeños reactores requiere gastos de inversión elevados que no podrán reducirse fácilmente. No deseo presentar esta cuestión con colores pesimistas, pero creo que

debemos procurar no exagerar las ventajas de la instalación de pequeños reactores, a no ser que se trate de lugares muy remotos.

Los considerables esfuerzos que hoy se realizan para fomentar la producción de energía nucleoelectrica se justifican sin duda por el hecho de que, al aumentar la demanda de combustibles tradicionales, con el aumento consiguiente de sus precios reales, se podrá disponer fácilmente de otro tipo rentable de combustible -o sea el combustible nuclear- y habrán de construirse reactores para utilizarlo.

Dr. Zinn:

No tengo ninguna razón para discrepar de la exposición que acaba de hacerse sobre las buenas perspectivas que ofrecen las centrales nucleares cuya construcción se va a iniciar en el Reino Unido. Es más, creo que la situación es muy similar en nuestro país.

El costo actual de la energía nucleoelectrica y el plazo en que ésta llegará a ser rentable son cuestiones que suscitan interés en todas partes, pero especialmente en aquellos países en que el Estado destina grandes sumas de dinero al desarrollo de la energía nuclear. Dado que la situación con respecto al costo y a las disponibilidades de combustibles fósiles varía mucho en los diferentes países, también habrá grandes diferencias en cuanto a los períodos que hayan de transcurrir antes de que la producción de energía nucleoelectrica llegue a ser rentable.

En los Estados Unidos, los combustibles fósiles son abundantes y baratos y las centrales térmicas tienen una gran capacidad de producción. Por estas razones, las probabilidades de que la energía nucleoelectrica llegue a ser rentable son, a mi juicio, más escasas que en parte alguna, salvo, tal vez, en la Unión Soviética.

En los Estados Unidos se están construyendo centrales eléctricas tradicionales con calderas y turbinas, dotadas de una capacidad que oscila entre 500 y 600 MW, e incluso se tienen en proyecto algunas mayores. Por consiguiente, sólo puede esperarse que sean rentables las grandes centrales nucleoelectricas. También es evidente que estas centrales tienen que utilizar reactores de elevada potencia. Si se encargasen ahora centrales nucleares de 300 MW eléctricos, costarían seguramente entre 200 y 230 dólares por kilovatio instalado, o sea un 25 o un 30 por ciento más que una central comparable que utilizara carbón como combustible. Se trata de reactores moderados y refrigerados con agua ligera, del tipo de agua hirviente o a presión. El costo del combustible necesario para estos reactores se calcula en 2,3 milésimas de dólar por kilovatio hora para una carga de equilibrio en las condiciones en que actualmente puede ser suministrada. En esta cifra se incluye un crédito de 12 dólares por gramo de plutonio producido, y se supone que el uranio enriquecido se arrendará a un cuatro por ciento anual de su valor. Se prevé un consumo máximo de 40 000 MW/día por tonelada de uranio y un consumo medio de 15 000 MW/

día por tonelada de uranio. El costo comercial del combustible es aproximadamente 1,0 milésimas de dólar por kilovatio hora, inferior al costo del combustible de una central térmica media en los Estados Unidos. Suponiendo que los intereses acumulados del capital invertido se eleven a un 14 por ciento, esta economía de 1,0 milésimas de dólar por kilovatio hora en el combustible representará 50 dólares por kilovatio instalado de aumento del capital disponible para ser invertido en la central nucleoelectrica y, por tanto, equilibrará aproximadamente la desventaja de la central nucleoelectrica por lo que respecta a los gastos de inversión. Cabe esperar, por consiguiente, que resulten rentables las grandes centrales nucleoelectricas que posiblemente se construirán en los Estados Unidos. Así ocurrirá especialmente si se consideran los costos en relación con la duración de la central, ya que en un período de 20 años se pueden prever nuevas reducciones en el costo del combustible nuclear. Suponiendo que se inviertan dos años en planificar una central de esa índole y cuatro años en construirla, podemos calcular que en 1967 tendremos tal vez nuestra primera central rentable en una región del país en que el costo del combustible sea elevado.

Por lo que se refiere a las centrales nucleoelectricas de pequeña y mediana potencia, las perspectivas no son tan lisonjeras. Estimamos que, en la actualidad, el costo de una central de 50 MW eléctricos se eleva a unos 370 dólares por kilovatio instalado. Se calcula que el costo del combustible asciende a 3,2 milésimas de dólar por kilovatio hora. Otros gastos de explotación, que en el ejemplo de la central de gran potencia se suponían iguales para las centrales que utilizan carbón como combustible y las centrales nucleares, ascienden en la central de pequeña potencia a 3,0 milésimas de dólar por kilovatio hora, mientras que una central tradicional comparable tiene sólo un gasto de 1,0 milésimas de dólar por kilovatio hora. Por consiguiente, la energía producida por la central nucleoelectrica más pequeña es un 20 por ciento más cara de lo que debiera ser para resultar rentable. Considero que, dado el actual estado de desarrollo de la energía nucleoelectrica, este resultado no es despreciable. Deseo insistir en que las cifras citadas son las que corresponden a la construcción de una central en los Estados Unidos en las actuales circunstancias.

REDUCCION DE LOS COSTOS

Sr. Horowitz:

No obstante la selección efectuada, aún es posible tomar en consideración una gran variedad de reactores para los programas a medio y largo plazo. Uno de los principales problemas es evidentemente la reducción de las inversiones, pero, a mi juicio, debe resaltarse la importancia del ciclo del combustible, cuya baratura ha de ser la principal ventaja de la energía atómica. A este respecto cabe distinguir, en líneas generales, entre ciclos simples y ciclos complejos del combustible. Los primeros consisten en lograr un precio razonable sin necesidad de cos-

tosas regeneraciones del combustible ni de asignar al plutonio producido un precio desproporcionado en relación con sus actuales posibilidades de utilización práctica.

Un ciclo simple no excluye necesariamente la posibilidad de enriquecer el combustible, siempre que el enriquecimiento sea moderado y el grado de combustión muy elevado, siendo muy indicado para el uranio natural. Por lo que respecta a los reactores de combustible metálico moderados con grafito, hay que lograr que el costo del ciclo del combustible sea inferior a dos milésimas de dólar por kWh. En los reactores de agua pesada la reactividad permite utilizar óxido de uranio y obtener un grado de combustión muy elevado con uranio natural. A pesar de que en este caso los gastos de elaboración son más elevados que para el uranio metálico, podría llegar a obtenerse un costo de 1,5 e incluso de 1 milésima de dólar por kWh para el ciclo del combustible; en ello estriba una de las principales ventajas de los reactores de agua pesada.

Para ser rentables, los ciclos complejos exigen además de uranio enriquecido barato, enormes instalaciones de regeneración tales como las que se acaban de citar, sobre todo si no se quiere imponer un precio artificial al plutonio producido.

Por último, quisiera referirme brevemente a las posibilidades que ofrece la reproducción, que muchos estiman muy interesantes porque a largo plazo pueden resolver definitivamente el problema del abastecimiento de combustible. Pero debe puntualizarse que ese método no tiene viabilidad económica a no ser que se consigan combustibles de gran duración y se descubran métodos poco costosos de regeneración y de elaboración. Se trata de una labor muy difícil, más difícil aún que perfeccionar la técnica de reacción en cadena. Por lo que yo sé, aún no se vislumbra ninguna solución.

Por el momento el mejor método de reproducción consiste en reducir al máximo posible el contenido de uranio-235 del combustible; el uranio natural es el combustible más económico para lograr la combustión más completa in situ del plutonio formado con un buen factor de conversión.

Dr. Zinn:

Puede afirmarse categóricamente que la eficacia de un reactor depende del perfeccionamiento de sus elementos combustibles y de su ciclo de combustible. Para los reactores de uranio enriquecido es de capital importancia lograr un elemento combustible de muy larga vida. Es casi asombroso pensar que el dióxido de uranio posee esta propiedad. Según creo, el grado máximo de combustión de esta sustancia es, aproximadamente, de 40 a 50 000 MW/día por tonelada. Por tanto, el problema técnico que en realidad se plantea es determinar qué proporción de este grado máximo se puede obtener por término medio. Esta proporción variará según los tipos de reactor. Por ejemplo, en nuestro país se investigan con interés los reactores de elevada temperatura. El dióxido

de uranio es apropiado para estos reactores, sobre todo cuando se utiliza un gas como refrigerante, pero aún no sabemos en qué medida es posible aumentar el grado medio de combustión, pues la vida del combustible depende de la temperatura y en los reactores de temperatura elevada ésta es superior a la de los reactores de dióxido de uranio construidos hasta ahora, en los que se utiliza agua como moderador.

A mi juicio, el objetivo inmediato es producir energía nucleoelectrónica rentable; una vez logrado esto podremos dedicarnos a los problemas que plantea la conservación de los recursos de uranio y torio. Para este fin precisamos reactores que conserven mejor los neutrones, tal vez, en último término, reactores reproductores. Podría describir muy detalladamente las investigaciones que se realizan en numerosos centros para construir reactores de elevada razón de conversión o que utilicen combustible poco enriquecido y sean, por lo tanto, más apropiados para la conservación del uranio y para la regeneración del plutonio, elemento importante para utilizar el uranio al máximo. Estos reactores son, a nuestro juicio, más difíciles de construir y de explotar satisfactoriamente, pero creemos que el esfuerzo merece la pena.

Dr. Dunworth:

Quiero hacer resaltar lo que los dos oradores precedentes han dicho sobre la importancia del combustible. Creo que nos encontramos ante un largo período de laboriosas y detenidas investigaciones para perfeccionar los tipos de reactor a que me referí anteriormente, aunque sin abandonar por completo la investigación general y el estudio de nuevas técnicas.

Opino que se debe aprovechar al máximo el confinamiento para facilitar la solución de los problemas que plantea el emplazamiento de centrales nucleoelectrificadas, sobre todo en los países densamente poblados. Sin embargo, en los países de territorio muy extenso y de poca densidad de población, ha de procurarse no encarecer demasiado el reactor adoptando medidas complicadas de seguridad, si el reactor se instala en una región muy poco poblada.

Por lo que respecta a los reactores refrigerados por gas es posible observar su evolución en el mundo entero. Tenemos primero los reactores Magnox de Gran Bretaña. Se desea después obtener temperaturas más elevadas y, en consecuencia, se cambia gradualmente el combustible, sustituyendo el uranio metálico por el óxido de uranio; asimismo el material de revestimiento (Magnox) se sustituye por el acero, que resiste mayores temperaturas, después por el berilio, y finalmente por los materiales cerámicos, con lo que se pasa de los reactores Magnox al reactor refrigerado por gas de tipo avanzado (Reino Unido), al reactor experimental refrigerado por gas de Oak Ridge (Estados Unidos), y, por último, a los reactores de elevada temperatura refrigerados por gas, uno de los cuales se está construyendo bajo los auspicios de la OEEC en Winfrith

Heath (Reino Unido), mientras en otros países se están efectuando trabajos análogos.

En el caso de los reactores con moderador de agua, el diseño ofrece una serie de posibilidades que nos hacen vacilar. ¿Es preferible utilizar una cámara de presión o un tubo de presión? ¿Es más indicada el agua ligera o el agua pesada como moderador? ¿Conviene utilizar agua ligera o agua pesada como refrigerante? ¿Debe evitarse la ebullición? ¿Debe permitirse en cierto grado? ¿Conviene hacerla más intensa? ¿Es preferible una refrigeración parcial por vapor y un cierto grado de sobrecalentamiento? Hay, además, otras dos variantes: la posibilidad de utilizar un líquido orgánico en lugar de agua para limitar la presión y obtener quizá temperaturas ligeramente superiores, y el procedimiento aplicado especialmente en la Unión Soviética de utilizar grafito como moderador y agua como refrigerante. El funcionamiento de los prototipos construidos en los Estados Unidos, Francia y la Unión Soviética y el programa de reactores de agua pesada del Canadá permitirán sin duda decidir cuál de estas posibilidades es la más indicada, pero, como el Dr. Zinn ha indicado, transcurrirán muchos años antes de que se resuelvan estas cuestiones. En el Reino Unido se investiga con interés un reactor moderado con agua pesada, provisto de tubos de presión alrededor del combustible en los que hierve agua ligera, pero no creo que se vaya a emprender su construcción en un futuro próximo.

Por lo que respecta a los demás tipos de reactores, transcurrirán dos o tres años antes de que pueda llegarse a alguna nueva conclusión sobre los reactores de neutrones rápidos, para lo que habrá que esperar los resultados del funcionamiento de los reactores EBR II y Enrico Fermi (Estados Unidos), del reactor de Dounreay (Reino Unido) y de las nuevas investigaciones emprendidas en estos dos países. Como carezco de información sobre las actividades que se desarrollan en la Unión Soviética en este aspecto, debo excusarme por no mencionar las investigaciones sobre reactores de neutrones rápidos realizadas en ese país.

Un punto que puede suscitar algunas discrepancias, ya tratado por otros oradores que en líneas generales están, al parecer, de acuerdo conmigo, es que no hay necesidad urgente de poner en servicio reactores de factor de reproducción positivo. Temo, en efecto, que hayamos dificultado el perfeccionamiento de los reactores de neutrones rápidos y de los reactores homogéneos atribuyendo demasiada importancia a la necesidad de obtener un factor positivo de reproducción. Estoy convencido de que los reactores que conservan sin alteraciones notables su contenido de material fisionable nos servirán aún durante mucho tiempo.

Todos los reactores en los que la conservación del material fisionable es un objetivo importante son forzosamente de grandes dimensiones y no es probable, por lo tanto, que presenten interés inmediato para los países insuficientemente desarrollados.

Dr. Zinn:

Quisiera formular algunas observaciones más precisas y señalar tres procedimientos que podrían permitir reducir el costo de los reactores de agua hirviente, por ejemplo. Cuando se comenzaron a proyectar los reactores de este tipo se consideraba satisfactoria una densidad de potencia en el cuerpo del reactor de 20 kW por litro. Ello condiciona naturalmente las dimensiones de la cámara de presión y, en realidad, de toda la central. Pronto pasamos de los 20 kW a los 30 kW por litro. Ahora los reactores se proyectan para una densidad del orden de 40 a 50 kW por litro y hay quienes piensan obtener densidades aún superiores. Este solo hecho hará que los costos de la central varíen. En segundo lugar, hemos estudiado atentamente la cantidad de material complementario -tuberías, válvulas, bombas- que es preciso instalar en los grandes reactores de agua hirviente. Hemos observado que nos ha sido posible reducir la cantidad de ese material a bastante menos de la mitad y obtener, incluso, un mejor rendimiento. En tercer lugar está la cuestión de los sistemas de control. No creo que puedan hacerse menos complejos. En realidad, opino que serán más delicados y tal vez más complejos. La razón de ello es que esta mayor complejidad permite obtener un mejor rendimiento del cuerpo del reactor y el mayor gasto que supone el equipo perfeccionado de control queda varias veces compensado por este aumento de rendimiento.

Se trata pues, como ya se ha dicho, de una labor continua y aunque esta labor será difícil y tal vez no muy apasionante, creo que nos permitirá reducir progresivamente el costo de la energía nucleoelectrica.

APLICACIONES EN LAS REGIONES MENOS ADELANTADAS

Dr. de Carvalho:

Las regiones llamadas insuficientemente desarrolladas difieren entre sí en muchos aspectos, tales como la disponibilidad de recursos energéticos, densidad de población, grado de desarrollo técnico y de industrialización, medios de transporte, demanda de energía, y política económica.

Desde el punto de vista de las actuales fuentes de energía, cabe distinguir las siguientes regiones: en primer lugar, un enclave industrial -una zona que posee cierto número de centrales clásicas interconectadas; esta zona suele hallarse en una etapa de rápida industrialización, con producción local de aparatos electrodomésticos, de manera que la demanda debida a la industria local y al consumo doméstico de electricidad, combinada con un aprovechamiento racional de las centrales interconectadas permite obtener un factor de carga global de hasta el 60 por ciento y explotar determinadas centrales básicas con factores de carga de hasta el 90 por ciento. En general, el índice de aumento de la demanda en dichas zonas es aproximadamente del 14 por ciento anual. Esta situación se da en las regiones de Río

de Janeiro y Sao Paulo, Bombay, Buenos Aires, Ciudad de México, Montevideo y Manila.

Hay otro tipo de regiones que suelen poseer unas cuantas centrales dispersas en un territorio muy extenso y que carecen de red de interconexión. Debido a ello y a otras causas, el factor de carga es sólo del 30 al 40 por ciento y en la mayoría de los casos el aumento de la demanda es superior al 14 por ciento anual.

Por último, hay otras regiones que carecen de centrales eléctricas y de sistema de distribución.

Si pensamos que para que la energía nucleoelectrica sea rentable es menester que las centrales funcionen con un factor de carga elevado (aproximadamente el 80 por ciento), la consecuencia inmediata es que los enclaves industriales son las zonas más indicadas para instalar centrales nucleares en los países insuficientemente desarrollados. Pero antes de llegar a una conclusión definitiva a propósito de un país determinado hay que estudiar minuciosamente sus recursos hidroeléctricos y de combustibles fósiles, la capacidad de la industria local para contribuir a la construcción de una central eléctrica y las condiciones económicas de la región, tales como costo de los terrenos, del financiamiento, de los materiales y de la mano de obra. Para destacar los efectos debidos a la diferencia de costos locales, puede citarse un ejemplo tomado de la literatura publicada sobre el particular: la energía producida por un reactor de uranio natural moderado con agua pesada, de 200 MW, costará 11,3 milésimas de dólar por kWh en los Estados Unidos, 6 en Canadá y alrededor de 10 en Suecia.

Para producir energía nucleoelectrica es preciso preparar un programa a largo plazo y conocer de antemano la demanda de electricidad, ya que los emplazamientos de las centrales deben seleccionarse con seis o siete años de anticipación y las licitaciones han de anunciarse cinco años antes de que la central comience a funcionar.

La Comisión Brasileña de Energía Nuclear ha iniciado un programa a largo plazo de energía nucleoelectrica. La región de Río de Janeiro-Sao Paulo ofrece condiciones muy favorables para instalar centrales nucleares; como el Sr. Octacilio Cunha, jefe de la delegación brasileña, ha anunciado en la Conferencia General, la primera central atómica del Brasil se construirá en Nambucaba, localidad de esa región. Tendrá una capacidad de 200 MW eléctricos.

La Comisión Brasileña de Energía Nuclear también proyecta instalar una pequeña central atómica en la nueva capital, Brasilia, donde el costo de la energía eléctrica es actualmente muy elevado.

El Profesor Bhabha ha anunciado que la India ha emprendido también un programa de energía nucleoelectrica de vasto alcance y que instalará en Tarapur, en el enclave industrial de Bombay, una central atómica de dos reactores, con una capacidad total de 300 MW. En la región de Delhi se instalará otra

central de 150 MW. El programa de energía nucleoelectrónica de la India es, pues, muy ambicioso.

Cabe prever que la región de Manila, donde el precio de los combustibles fósiles es elevado, será el próximo lugar donde convenga instalar una central nuclear.

La participación de la industria local de un país insuficientemente desarrollado en la instalación de una central atómica es muy importante, habida cuenta de las economías de divisas extranjeras que permite y de la experiencia industrial que con ella se obtiene. No obstante, la importancia de esta participación depende en gran medida de la capacidad y de los conocimientos industriales del país. Para los países que carezcan de esta capacidad la única participación posible consistirá en los trabajos de ingeniería civil y en la construcción de los elementos clásicos de la central.

Los elevados gastos de inversión obligan a explotar las centrales atómicas a un régimen de carga muy elevado durante toda la vida de la central; esto pone de manifiesto la necesidad de acumular la energía para absorber la mayor producción posible fuera de las horas de punta. En la región de Sao Paulo se sigue la práctica de acumular el agua, para lo que la topografía es particularmente indicada.

Pensando en un futuro lejano, no hay que olvidar que algunos de los países insuficientemente desarrollados y densamente poblados carecen de recursos energéticos; para industrializar esos países y para elevar su nivel de vida es necesario disponer de una nueva fuente de energía. Esta puede ser la energía nuclear.

Por último, quiero señalar que no es verdad que las regiones insuficientemente desarrolladas no puedan beneficiarse de la energía nucleoelectrónica. Además, creo que el principal objetivo del Organismo es ayudar en la medida de lo posible a esos países a obtener tal beneficio.

Dr. Zinn:

Estoy de acuerdo con el Dr. Carvalho en que no es necesario que los países insuficientemente desarrollados esperen para emprender sus programas de energía nucleoelectrónica. También creo que no es preciso ni acertado que esos países se dediquen a perfeccionar un determinado tipo de reactor. Es bien sabido que el perfeccionamiento de un tipo de reactor hasta que resulte realmente útil, es muy costoso; fácilmente se invierten en él muchos millones de dólares. Análogamente, no creo que sea preciso esperar hasta que las centrales nucleares sean totalmente rentables en los Estados Unidos donde, como dije anteriormente, la competencia es extraordinariamente dura.

A mi juicio, si un país insuficientemente desarrollado cree disponer de personal técnico suficiente personal quizá no especializado en la tecnología nuclear, pero versado en la ciencia y en la ingeniería ese país tiene la posibilidad de emprender un programa de energía nucleoelectrónica. Es evidente que un país puede explotar un servicio de aviones a

propulsión de manera totalmente satisfactoria sin fabricar o producir dichos aviones. Como primer paso, sería útil para un país insuficientemente desarrollado comprar una central nuclear a otro país, aunque fuese algo anticuada, y adquirir experiencia con ella. Por las cifras relativas a las pequeñas centrales nucleares que he citado anteriormente, cabe pensar que en algunas regiones insuficientemente desarrolladas los inconvenientes económicos de dichas centrales quizás no fuesen muy grandes. El aumento de los gastos podría muy bien ser aceptable desde el punto de vista del desarrollo de la economía y de la industrialización del país a largo plazo.

RUEGOS Y PREGUNTAS

Pregunta:

El precio del uranio metálico ha venido bajando considerablemente. ¿Cómo repercutirá esta baja en el costo de la energía obtenida de reactores nucleares?

Sr. Horowitz:

Una baja en los precios del uranio del orden de 6 a 8 dólares por kilogramo repercutiría sobre todo en los reactores de combustible metálico y grafito: la reducción del precio del kWh sería de un 4 a un 5 por ciento. Para los reactores de óxido de uranio natural y agua pesada, con costos de fabricación más elevados y un consumo de combustible también mayor, la repercusión sería menos considerable. Los efectos de esa baja de precio sobre los reactores de uranio enriquecido serían también muy ligeros. Por todas estas razones, no debe exagerarse la repercusión que pueda tener sobre el precio del kWh una baja en los precios del uranio natural empleado como material básico.

Pregunta:

En el debate sobre evacuación de desechos radiactivos, el Dr. Silverman, de los Estados Unidos, nos ha dicho que los gastos de evacuación de esos desechos aumentarían el costo de la producción de electricidad en 1 milésima de dólar por kWh. ¿Están ustedes conformes con esta cifra?

Dr. Zinn

Me parece demasiado elevada, pero habría de hacer algunos cálculos y consultar la documentación publicada sobre lo que se prevé que correspondería a las plantas de tratamiento químico proyectadas para el futuro.

Sr. Horowitz:

En el caso de los reactores de uranio natural, o bien resulta rentable volver a tratar el uranio a fin de extraer el plutonio, en cuyo caso el costo de la evacuación de los desechos queda incluido en la suma cuyo pago se prevé para obtener el plutonio, o bien se procede simplemente a almacenar el uranio irradiado. En este último caso, el costo del almacenamiento es decididamente inferior al precio mencionado.

Pregunta:

Supongamos que un país cuente con vastos yacimientos de minerales de uranio. ¿Hasta qué punto puede esta circunstancia facilitar al país la producción de energía nucleoelectrónica?

Dr. de Carvalho:

Creo que he contestado a esta pregunta en mi intervención anterior, ya que afirmé que para que un país pueda aprovechar sus recursos naturales es preciso que disponga de cierta capacidad industrial. Creo que lo primero que deben hacer los países que tienen el propósito de emprender un programa a largo plazo de producción de energía nucleoelectrónica es procurarse una fuente permanente de suministro de uranio. Esta es la cuestión fundamental cuando se inicia un programa de esa índole. La India ha conseguido resolver muy bien el problema. El Dr. Bhabha nos ha dicho que la India se encuentra ya en condiciones de autoabastecerse de uranio. El Brasil está tratando de hacer lo mismo, y creo que también lo hacen los demás países que piensan organizar un programa a largo plazo.

Pregunta:

En algunos de los países más adelantados se dispone de grandes cantidades de plutonio. ¿Cuáles son las perspectivas de utilizar plutonio como combustible en un reactor generador?

Sr. Horowitz:

De aquí a unos pocos años se producirán en los reactores generadores cantidades muy elevadas de plutonio. No sólo se trata, por lo tanto, del plutonio de que ya se dispone, sino del que más adelante se irá produciendo.

Desde el punto de vista de la física de los neutrones, es decir, de las propiedades físicas, el plutonio puede ser utilizado de manera en extremo ventajosa en los reactores de neutrones rápidos. Para los reactores de neutrones térmicos el valor del plutonio es inferior al del uranio-235 en razón de sus propiedades físicas y a causa también del mayor costo de la elaboración del combustible. Por este motivo me parece que el empleo de plutonio en reactores de neutrones térmicos sólo es posible cuando no existe competencia por parte de los reactores de neutrones rápidos.

De todos modos, para poder emprender un programa de reactores experimentales de neutrones rápidos se necesitan varios centenares de kilogramos de plutonio. Además la utilización del plutonio dependerá de la medida en que se construyan reactores de neutrones rápidos en escala industrial. Si esto no ocurre hasta un futuro muy lejano, los países que disponen de grandes centrales nucleares con reactores de uranio natural y pueden producir grandes cantidades de plutonio habrán de escoger entre almacenar el combustible irradiado o perfeccionar la técnica de utilización del plutonio en reactores de neutrones térmicos. En este último caso, y si no existe competencia por parte de reactores de neutrones rápidos, el precio del combustible del que se obtenga el plu-

tonio habrá de ser, y podrá serlo, muy bajo e incluso nulo.

Pregunta:

¿Cuáles son las necesidades de personal de una central nucleoelectrónica? ¿Son mayores que las de una central de tipo tradicional?

Dr. Dunworth:

Hemos llegado a la conclusión de que la explotación y conservación de una central nucleoelectrónica es perfectamente simple, sin complicaciones, y no requiere un personal muy especializado. Creo, en realidad, que para la buena explotación y conservación de una central es muy importante que no haya quien se dedique a introducir modificaciones en el reactor o en las instalaciones auxiliares. Lo que conviene es disponer de una persona capaz de atenerse a las instrucciones que se le den. En el Reino Unido hemos recurrido a personas equiparables a un sargento de los servicios técnicos del ejército, es decir, a personas disciplinadas y capaces de controlar bien a sus hombres. Para vigilar la marcha de una central nuclear basta, pues, con una persona que reúna esas cualidades y cierto número de ayudantes con una formación técnica general. Para mantenerla en funcionamiento 24 horas diarias durante los siete días de la semana es necesario organizar cinco o seis turnos. Esto es posible con un centenar de personas. Pueden surgir, claro está, situaciones especiales debidas a accidentes de poca importancia y pueden plantearse algunos problemas especiales de conservación. En estos casos será necesaria la intervención de personal sumamente especializado; en países como los Estados Unidos o el Reino Unido este personal puede obtenerse recurriendo a los centros de investigación o a otros órganos competentes. Si un país sólo dispusiera de una central nucleoelectrónica y tuviera que proceder a una operación de carácter especial, tal vez debería solicitar ayuda fuera de sus fronteras; podría recurrir, por ejemplo, al Organismo Internacional de Energía Atómica.

Pregunta:

¿Existe algún riesgo de que una central nuclear instalada en un país insuficientemente desarrollado pueda tener que dejar de funcionar por falta de una infraestructura industrial?

Dr. Dunworth:

Si se produjera una pequeña avería en algún aparato de tipo corriente, por ejemplo, en el equipo electrónico de control, no resultaría difícil actualmente, en la mayoría de los países, proceder a su reparación. Ahora bien, si se tratase de equipo sumamente especial, tal vez fuera necesario pedir ayuda al extranjero. Teniendo esto en cuenta, convendría organizar una especie de cuerpo volante de especialistas que, en caso de necesidad, pudiesen acudir a los países que contasen con una sola central nucleoelectrónica y atender rápidamente a las anomalías registradas. Con los aviones modernos esto puede hacerse fácilmente, ya que la mayoría de las piezas y elementos de un reactor pueden ser transportados por vía aérea. El problema sería más difícil de resolver si se tratase de una avería realmente

importante; en ese caso es probable que se tardase bastante en subsanarla.

Pregunta:

En México, un reactor de 300 MW eléctricos tendrá que competir con costos de producción del orden de 4 a 6 milésimas de dólar por kWh, mientras que en ciertas regiones del país un reactor de 50 MW eléctricos sólo tendría que competir con costos del orden de 15 a 20 milésimas de dólar por kWh. ¿Qué potencia de reactor es la que, en opinión de ustedes, tiene mayores probabilidades de ser la primera en dar resultados satisfactorios?

Dr. Zinn:

Yo preferiría tener que competir con costos de 15 a 20 milésimas de dólar por kWh. La razón es que para competir con costos de 6 milésimas de dólar tendríamos que rebajar en 1,5 milésimas el mejor costo calculado para la producción de una central de gran potencia. Obtener esta rebaja plantea un problema realmente difícil de diseño y técnica. En cambio, unos costos de 15 a 20 milésimas de dólar casi permiten la competencia y resultaría más fácil reducirlos. Tal vez se haya conseguido ya. Por esta razón creo que cuanto menos potente sea la central más fácil le será poder competir.

Pregunta:

¿Qué medidas aconsejarían ustedes a un país que deseara iniciar la producción de energía nucleoelectrónica? ¿Es conveniente instalar cuanto antes una central nuclear de pequeña o mediana potencia para ir adquiriendo experiencia, aun cuando esa central no resulte estrictamente rentable?

Dr. de Carvalho:

Eso depende esencialmente de la situación en que se encuentre el país. Quiero ilustrar esto con un ejemplo. Italia ha establecido un programa en extremo interesante de producción de energía nucleoelectrónica con un reactor de uranio natural del tipo más moderno, refrigerado por gas y con moderador de grafito; este reactor de 200 MW está instalado en Latina. Se está construyendo otro de agua hirviendo a orillas del río Garellano. Ahora bien, Italia es un país de capacidad industrial considerable que dispone de un elevado número de físicos y técnicos. En cambio, en un país menos desarrollado que Italia la situación sería totalmente distinta; a mi juicio, habría que empezar organizando la formación profesional de personal. La primera etapa tendría que consistir en la formación teórica. Luego, se podría iniciar una modesta labor de investigación. Poco a poco el país se encontraría en una situación análoga a la de la India o del Brasil, países que tienen ya el empuje suficiente para poder emprender un programa mucho más ambicioso.

Dr. Dunworth:

Creo que esto debe hacerse en varias etapas. En mi opinión, lo primero que hace falta, y creo que es lo que han hecho ya muchos países, es reunir a un

reducido número de personas sumamente capacitadas y familiarizarlas con los problemas de que se trata enviándolas al extranjero para que estudien la producción de energía nucleoelectrónica e incluso para que trabajen durante una o dos semanas con un reactor que se encuentre en funcionamiento. Importa mucho que el número de esas personas no sea demasiado elevado, ya que de otro modo sería muy difícil ponerse de acuerdo sobre lo que yo considero que debe constituir la segunda etapa.

A continuación, habría que decidir lo que debe hacerse y, hasta cierto punto, creo que para ello habría que consultar con instituciones como el Organismo Internacional de Energía Atómica, y quizá también con representantes de las comisiones de energía atómica de diversos países y con algunas firmas industriales. Como ha indicado ya el Dr. Zinn, estimo que, al principio, no debería procederse al diseño de un reactor propio; habría que basarse, en gran parte por lo menos, en un diseño ya existente, y por ello pienso que los técnicos podrían consultar con firmas especializadas a fin de familiarizarse con los detalles de los posibles diseños y poder llegar eventualmente a la decisión de construir un reactor a su debido tiempo. Transcurridos unos pocos años, quedaría todavía por hacer en cualquier país una buena cantidad de trabajo para mejorar el diseño, especialmente a medida que sus firmas industriales comenzasen a familiarizarse con diversos aspectos de los reactores, tales como el sistema de control y una parte del conjunto de sus piezas metálicas.

Pregunta:

¿Sería conveniente utilizar reactores generadores experimentales para acelerar la introducción de la energía nucleoelectrónica en diversos países insuficientemente desarrollados?

Sr. de Laboulaye (árbitro):

Que yo sepa, existen dos procedimientos para adquirir experiencia en cuanto a la explotación de un reactor. El primero consiste en enviar becarios a países más adelantados; el segundo, en construir lo que aquí llamamos un reactor generador experimental. Por lo que respecta al segundo procedimiento, les haré observar que en Europa occidental se han establecido algunas empresas comunes. Se ha tropezado con dos dificultades, a saber: quién pagará el reactor y dónde habrá que instalarlo. En los casos que he citado, ha sido posible resolverlas.

Pregunta:

¿Podría influir de modo importante en el costo de la energía una reducción de un 30 o un 40 por ciento en el costo del agua pesada?

Sr. Horowitz:

En los Estados Unidos el precio actual del agua pesada es de 28 dólares por libra, o sea, casi 62 dólares por kilogramo.

La persona que ha formulado esta pregunta cree posible que se logre una reducción de un 30 o un 40

por ciento. Si aceptamos como supuesto la cifra máxima de un 40 por ciento, la reducción sería de 25 dólares por kilogramo. En un reactor generador, el máximo de agua pesada oscila entre 0,8 y 1 kilogramo por kilovatio instalado. Por tanto, la máxima economía oscilaría, aproximadamente, entre 20 y 25 dólares por kilovatio instalado, siendo de unos 300 dólares la inversión total de capital. Esto representaría una economía de un 5 o un 8 por ciento, lo que no es desdeñable y podría conducir a diseñar un reactor algo diferente, en el que, al buscarse las condiciones óptimas, se tendría en cuenta la economía efectuada en la producción de agua pesada.

Pregunta:

¿Es posible convertir directamente la energía nuclear en energía eléctrica sin una turbina de vapor? ¿Se están realizando investigaciones en gran escala en este sentido? ¿Cuáles son las perspectivas de esa transformación en escala comercial y en un futuro próximo?

Dr. Zinn:

A la primera pregunta hay que responder que sí, puesto que esa transformación se está realizando ya con carácter experimental. Se estudian tres procedimientos, ninguno en una escala realmente importante: el primero consiste en utilizar un convertidor termoiónico, en el que los iones son impulsados hacia un electrodo colector desde un elemento combustible de uranio calentado. Los iones son de cesio gaseoso. Este dispositivo ha sido instalado en un reactor de nuestro laboratorio de Los Alamos, y con él se acciona un pequeño motor. Se están realizando investigaciones para perfeccionar los dispositivos termoelectrónicos y se han logrado algunos progresos en la tarea de conseguir que la eficacia se aproxime a un 10 por ciento. Creo que los convertidores termoelectrónicos no tienen aplicación comercial para la producción de energía en gran escala; en cambio, es muy posible que la tengan para usos secundarios, remotos e inesperados, tal vez en el espacio extraterrestre. Además, existe un tercer procedimiento que sólo sería razonable si se aplicara en gran escala; se trata del método magnetohidrodinámico, que exige una fuente calorífica que no ha de ser necesariamente un reactor, pero que se suele concebir como un reactor y que engendra un gas a temperaturas muy elevadas, superiores a los 3000°F. Este gas debe poseer también propiedades conductoras, que se obtienen añadiéndole sales de potasio. A continuación, este gas excitado fluye, o es aspirado entre los electrodos y genera un voltaje en forma enteramente análoga a la de un generador eléctrico de metal líquido, o sea en forma inversa a la de la bomba electromagnética. Este dispositivo puede tener una eficacia térmica bastante elevada, que puede elevarse, según cálculos, a un 50 por ciento, siempre que una vez que se haya reducido la temperatura del gas hasta unos 2000°F, el calor restante sea eliminado mediante un ciclo de vapor, por lo que no se puede prescindir por completo de la turbina.

Considero muy interesante ese procedimiento, o sea, el de la conversión magnetohidrodinámica. Se están realizando investigaciones en una escala bastante amplia. Creo que se está construyendo un convertidor de 10 kW. Costará largo tiempo, desde luego, obtener materiales que puedan utilizarse en un reactor o en el sistema de electrodos a una temperatura tan elevada.

Pregunta:

¿Cuál es la situación con respecto a los reactores de fusión? ¿Estiman los expertos que los reactores de este tipo pueden adquirir importancia en el futuro?

Dr. Zinn:

La adquirirán, desde luego, si se realizan los descubrimientos fundamentales necesarios.

Pregunta:

¿Cuáles son las posibles aplicaciones de la energía atómica en relación con la exploración del espacio extraterrestre?

Dr. Zinn:

Estimo que si tenemos el propósito de enviar hombres al espacio extraterrestre no podemos negarles luz, calor, energía y posibilidades de desplazamiento. Si esos hombres han de llegar hasta los planetas próximos, es casi seguro que para su propulsión necesitarán una fuente de energía distinta de los combustibles químicos de que disponemos; es probable que un reactor pueda resolver el problema.

No se trata, claro está, de una tarea fácil. Idear un reactor que pueda ser trasladado al espacio extraterrestre y funcionar en él, es, por el contrario, una tarea muy difícil. No obstante, tal vez mucho antes de que el hombre llegue a ese espacio será posible enviar instrumentos. Existen ya dispositivos nucleares construidos con ese objeto. Así, por ejemplo, se utiliza material radiactivo en grandes cantidades para calentar una masa pequeña hasta una temperatura razonable, y luego se emplean dispositivos termoelectrónicos para transformar el calor en electricidad y condensarla en un acumulador. Creo que este procedimiento es ya aplicable y no hay duda de que se utilizará.

Se habían formulado algunas otras preguntas; no obstante, dado lo avanzado de la hora, el Sr. de Laboulaye, al llegar a este punto, hubo de interrumpir el debate. Después de dar las gracias a los oradores que habían intervenido, dijo que la discusión había demostrado claramente las inmensas posibilidades de la energía nuclear.