

RESUMEN DE LA TERCERA CONFERENCIA

El Dr. Glenn T. Seaborg, jefe de la delegación de los Estados Unidos en la tercera Conferencia de Ginebra, resumió en una disertación nocturna especial los resultados de dicha reunión, que había durado diez días y que, según dijo, nos había situado en las puertas mismas de la era de la energía de origen nuclear, pudiéndosele muy bien dar el nombre de "Conferencia de la Realización".

Tal vez la prueba más elocuente de los progresos realizados, añadió el conferenciante, se encuentre en el aumento de la potencia nuclear instalada en el mundo, la cual pasó de sólo 5 MW(e) en 1955 a 185 MW(e) en 1958. En la actualidad, esa potencia instalada se eleva casi a 5 000 MW(e). Cabe prever que, para 1970, la potencia nuclear total instalada en el mundo sea del orden de los 25 000 MW(e) y que, para 1980, esa cifra haya aumentado hasta 150 000 ó 200 000 MW(e).

A continuación figura una versión ligeramente resumida de su declaración sobre los progresos técnicos comunicados a la Conferencia.

"Muchos de los delegados presentes en esta Conferencia aprecian tres etapas en el desarrollo de la energía de origen nuclear. La primera etapa es la que se completó el pasado año, o aproximadamente por esa época, al alcanzar su mayoría de edad los tres tipos de reactores actualmente considerados como económicos: el reactor con moderador de grafito y refrigerado por gas, el reactor moderado y refrigerado por agua pesada, y el reactor moderado y refrigerado por agua ligera.

La segunda etapa está representada por los reactores convertidores perfeccionados o avanzados, incluidos los que podrían denominarse cuasirreproductores. Estos reactores corresponden a una amplia gama de tipos que abarca a reactores moderados por agua pesada, moderados por grafito, moderados por agua ligera e incluso tipos de reactores con sistema variable de moderación con agua pesada y ligera. Esta etapa del desarrollo de la energía nucleoelectrica promete una mayor utilización del combustible, una elaboración más rápida de los elementos destinados a los reactores reproductores y posiblemente una reducción del costo de la energía producida. Es preciso reconocer, sin embargo, que el continuo perfeccionamiento de los actuales tipos de reactores les permitirá continuar siendo rentables durante la mayor parte de esa etapa.

La tercera etapa del progreso en la esfera de la energía de origen nuclear, coincidente en parte con la segunda, la constituye el desarrollo de los reac-



Exposición en el Plainpalais de Ginebra. Estación meteorológica flotante que funciona con energía de origen nuclear, expuesta en la sección de los Estados Unidos y destinada a transmitir informes. Un generador nuclear SNAP-7 le proporciona la energía eléctrica necesaria (Foto USAEC)

tores reproductores. En la Conferencia que acaba de terminar se ha tratado con considerable detenimiento de los reactores reproductores rápidos que utilizan plutonio y uranio-238 en su ciclo de combustible. Por lo que respecta a los reactores reproductores térmicos que emplean torio y uranio-233 tal vez se les haya dedicado en los debates menos tiempo que el que merecen. En ambos casos, estos reactores reproductores son promesa de que la utilización como combustible de nuestros recursos de uranio y de torio se decuple o aumente más aún, ya que producirán mayor cantidad de sustancias fisionables que la que consumen. En el fondo, constituyen la llave que nos permitirá abrir la puerta a la energía almacenada en isótopos no fisionables pero en extremo abundantes, tales como el uranio-238 y el torio-232.

Múltiples caminos hacia una única meta

No todos los delegados están de acuerdo en que las tres etapas mencionadas pueden ordenarse formando una progresión que parte de los reactores actualmente considerados como económicos, pasa a los reactores convertidores perfeccionados, susceptibles de un empleo en condiciones económicas aún más favorables y llega a la ejecución, hasta cierto punto coincidente con la etapa anterior, de un programa a largo plazo relativo a los reactores reproductores.

En efecto, algunos delegados estiman que la etapa intermedia, representada por los reactores convertidores, resulta innecesaria, y que en los programas de desarrollo de la energía de origen nuclear de sus respectivos países debe pasarse directamente de la primera etapa a la de los reactores reproductores. No obstante, la incertidumbre que todavía acompaña a las perspectivas económicas a largo plazo que ofrecen los reactores reproductores parecen justificar, en teoría, el que muchos países se decidan por el desarrollo simultáneo y más inmediato de reactores convertidores perfeccionados. Del mismo modo, también hay delegados que, adoptando el criterio opuesto, estiman que por el momento no debe dedicarse al perfeccionamiento de los reactores reproductores ningún esfuerzo digno de tal nombre, ya que los actuales tipos de reactores y los reactores convertidores perfeccionados bastarán para proporcionar energía abundante por espacio de muchos decenios. Además, si como la delegación del Reino Unido ha manifestado en la Conferencia, será posible extraer uranio del agua de mar a un precio no superior a 20 dólares por libra de óxido de uranio, tal opinión se verá, sin duda, considerablemente robustecida.

La Conferencia ha puesto claramente de manifiesto que la meta perseguida por todas las naciones es conseguir energía nucleoelectrónica económica y abundante. Nos estamos acercando a esa meta por diversos caminos, y no deja de ofrecer sus ventajas el hecho de que se estén estudiando simultáneamente diversas soluciones. En efecto, es probable que por espacio de algún tiempo el desarrollo de la energía nucleoelectrónica se base en cierto número de tipos de reactores de características diversas cuyo perfeccionamiento y empleo tengan lugar paralelamente. No es probable que, en esa labor, nos encontremos bruscamente con que, en un determinado momento, uno de esos tipos de reactor haya dejado de tener utilidad. Es más, también es improbable que obtenga general aceptación determinado tipo avanzado de reactor -convertidor o reproductor- a menos que haya llegado a resultar rentable. Soy de la opinión de que, por ejemplo, nunca seremos testigos de una amplia utilización de los reactores reproductores si en su desarrollo tecnológico no se alcanza la etapa en que puedan competir en el terreno económico con otras fuentes de producción. En efecto, cabe imaginar circunstancias por las que los reactores reproductores sólo llegarán a ser rentables si el precio del combustible llega a ser lo suficientemente alto.

En las actas de la Conferencia puede apreciarse que, hoy en día, el interés por la producción económica de energía nucleoelectrónica se halla enfocado sobre grandes centrales de una potencia del orden de los 500 MW(e). Acaban de proponerse planes relativos a centrales aún mayores, de 1 000 MW(e). Cuando pensamos en los reactores destinados a desalinizar agua de mar, consideramos la posibilidad de

construir centrales de incluso 2 000 MW(e). Ahora bien, es preciso también prestar atención al extremo opuesto de esta escala de magnitudes. En efecto, no todos los países están en condiciones de utilizar la energía producida en esas grandes centrales. Afortunadamente, una de las consecuencias del desarrollo en gran escala de la energía nucleoelectrónica lo constituirá la aparición de reactores de potencia económica, más pequeños, y que se adapten mejor a las necesidades de los países en vías de desarrollo. En algunos de esos países están resultando ya rentables reactores nucleares de potencia inferior a 500 MW.



Una de las conferencias de prensa, que se celebraron al terminar cada sesión de la Conferencia
(Foto Naciones Unidas)

Aspectos económicos de la energía nucleoelectrónica

Permítaseme ahora pasar a cuestiones de detalle, comenzando por seguir el hilo central de mis observaciones de carácter general, es decir, por los aspectos económicos de la energía nucleoelectrónica. El costo de la energía producida por cualquier central, sea nuclear o de tipo clásico, lo determinan cuatro factores principales: los gastos de construcción, los gastos de explotación, el porcentaje de cargas fijas, y las características del reactor que determinan el factor de capacidad de la central. A excepción del porcentaje de cargas fijas, los demás elementos han sido ampliamente discutidos en diversas sesiones de la Conferencia. Tal vez sea de lamentar el hecho de que no se haya prestado mayor atención a ese porcentaje ya que, al parecer, gran parte de la polémica entablada en torno a las ventajas respectivas de los diversos tipos de reactores deriva de los diferentes valores asignados a ese porcentaje. En realidad, probablemente habrían obte-

nido excelente acogida cualquier esfuerzo tendiente a una normalización internacional de las bases del cálculo del rendimiento económico de los reactores.

El número de tipos de reactores que se encuentran lo suficientemente avanzados para poder aspirar actualmente a figurar en los programas inmediatos de producción en gran escala se ha visto restringido por factores de índole técnica y económica. Los gastos previstos de construcción que se han dado a conocer en relación con los tres tipos de reactores que hoy en día predominan en el mundo, ascienden sólo a la mitad aproximadamente de los gastos de construcción de los primeros reactores de gran potencia.

Los gastos de construcción oscilan entre 140 y 280 dólares/kW, y los de explotación entre 1,3 y 2,8 mills/kWh. No he intentado combinar los gastos de construcción y los de explotación para obtener los costos totales de producción de la energía a causa precisamente de las diferencias existentes entre los porcentajes de cargas fijas correspondientes a los diversos países. Lo importante es el hecho de que aquellos tipos de reactores que tienden a entrañar gastos de capital más elevados son también los que suelen caracterizarse por menores gastos de explotación. Aquellos países que han preferido concentrar sus esfuerzos en el desarrollo de esos reactores, con gastos de combustible bajos, se encuentran con un porcentaje de cargas fijas reducido que tiende a compensar sus mayores gastos de capital. En realidad, esas menores cargas fijas constituyeron el principal factor que estimuló el desarrollo de ese tipo de reactores. Habla en favor de la tecnología de estos reactores el hecho de que hayan podido llegar a

Exposición de Ginebra; vista parcial de la sección de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (Foto Naciones Unidas)



competir mejor frente al empleo de otros combustibles en sus propios países, pese al incremento de algunas de las partidas que integran las cargas fijas, tales como el aumento del tipo de interés señalado tanto por el Dr. Lewis como por Sir William Penney. Ese aumento ha sido muy gravoso en el caso del programa del Reino Unido, donde el porcentaje de beneficios utilizado para la evaluación económica de los costos de los reactores ha pasado del 4 por ciento en 1955 al 7 1/2 por ciento en la actualidad.

Todos estos tipos de reactores todavía encierran considerables posibilidades de un mayor rendimiento económico, que podrá lograrse mediante el empleo de reactores de mayores dimensiones, mediante centrales con más de un reactor, mediante la producción en gran escala lograda multiplicando las centrales de idéntico diseño, y mediante las constantes mejoras técnicas del tipo de las que ya han reducido considerablemente el costo de las centrales de tipo tradicional a lo largo de los años. Las mejoras que el Reino Unido ha podido introducir en su programa nacional de producción de energía basado en el empleo de reactores con elementos combustibles tipo magnox, y cuya meta inicial estaba fijada en 5 000 MW(e), son un ejemplo de esa evolución.

Posibilidades de mejora

La experiencia ha demostrado también que muchos reactores de potencia pueden funcionar sin riesgos a regímenes considerablemente superiores a la potencia nominal inicialmente prevista, con lo que se reducen en forma notable los costos unitarios. La potencia del reactor Yankee se hizo pasar de los 110 MW(e) iniciales a 175 MW(e). Los reactores que actualmente se encuentran en fase de diseño o de construcción siguen conservando esta "capacidad de mayor rendimiento". Por ejemplo, la central de Oyster Creek tiene una capacidad mínima de 515 MW(e), pero si se consigue en el cuerpo del reactor la potencia específica esperada, podrá alcanzar los 640 MW(e). La experiencia adquirida con el primer reactor de 210 MW de la central de Norovoronezh ha permitido aumentar la potencia del segundo reactor, que constituye una versión modernizada del primero, a 365 MW o incluso valores más elevados. A medida que se vaya acumulando experiencia, la potencia nominal de las nuevas centrales que se fije inicialmente se irá aproximando cada vez más a su potencia de régimen definitiva.

Las memorias presentadas han indicado además que subsiste la posibilidad de reducir considerablemente los costos de los ciclos de combustible. Es posible que las diferencias que se conseguirán entre los costos con los que se ha venido operando hasta ahora y los costos futuros lleguen a ser muy superiores al 50 por ciento, porcentaje en el que ya hemos reducido los gastos de capital, si bien la cuantía de la reducción variará según el tipo de reactor. Tam-

bién los gastos de elaboración del combustible disminuirán considerablemente a medida que se ideen técnicas más perfeccionadas y que aumente la importancia de la industria correspondiente. Un ejemplo de cuanto decimos lo constituye la elaboración por el Reino Unido de casi dos millones de elementos combustibles tipo magnox. También son dignas de mención las informaciones francesas relativas a la ampliación de sus actividades de producción. Igualmente se ofrece a todos los tipos de combustibles para reactores la perspectiva de niveles de irradiación más elevados, elevación que contribuye a reducir los costos del ciclo de combustible. Del mismo modo, el reciente aumento del nivel garantizado de irradiación del combustible magnox de los 3 000 a los 4 000 MWd/t constituye una clara prueba de estos progresos. También encierran posibilidades de contribuir a una disminución de los costos otros elementos que intervienen en los gastos de explotación, de conservación y del ciclo de combustible, como por ejemplo, la regeneración de los elementos combustibles.

Por lo que se refiere al combustible propiamente dicho, también se han dado a conocer diversas posibilidades de incrementar las economías. En la actualidad, los precios del uranio natural son bastante inferiores al costo del uranio empleado en los primeros núcleos de los reactores en servicio. Probablemente, el precio tantas veces citado de 6 dólares por libra es, hoy en día, un mero límite superior. Con el correr del tiempo, este factor redundará tanto en ventaja de los reactores alimentados con uranio natural como de los alimentados con uranio enriquecido. El empleo, a medida que aumenten las razones de conversión, de crecientes porcentajes de minerales uraníferos extraídos de las minas, tenderá también a reducir los costos. No obstante, algunas de estas posibles disminuciones de los costos del ciclo de combustible pueden exigir un cierto aumento simultáneo de los gastos de capital, de la misma manera que la elección de reactores alimentados con uranio natural obliga en un principio a contar con costos de capital más elevados.

Cambio de impresiones en un pasillo del Palais des Nations: el Sr. M. S. Halter, el Sr. J. Goens y el Sr. J. Bouquiaux, de Bélgica (Foto Naciones Unidas)



Tal vez la prueba más alentadora de todo esto, en el plano económico, la constituyan los ejemplos del aumento de la producción de energía nucleoelectrica que se han expuesto en esta Conferencia. Parece indiscutible que esa energía contribuirá en medida creciente a satisfacer las necesidades de energía eléctrica de muchos países. Esa contribución variará de un país a otro según la magnitud de sus recursos energéticos tradicionales y los gastos que entrañe la explotación de los mismos. A este respecto, las características económicas relativas de la energía nucleoelectrica serán de extrema importancia. En efecto, y como es perfectamente natural, los directores de las empresas de distribución de electricidad de todos los países parecen insistir en ciertas garantías de rentabilidad antes de embarcarse en programas de producción en gran escala de energía nucleoelectrica.

Futuro del desarrollo de la energía nucleoelectrica

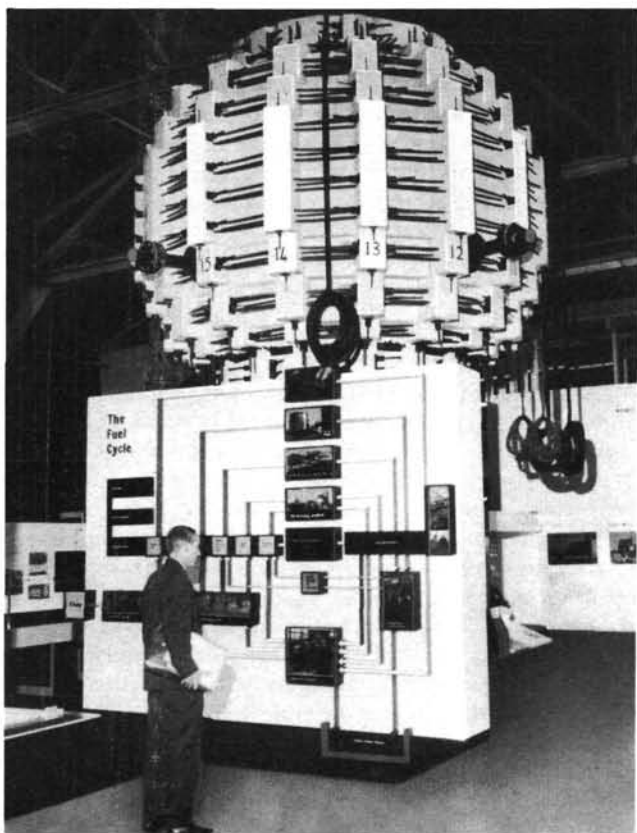
Los actuales tipos económicos de reactores de potencia, tal y como se han ido perfeccionando hasta la fecha, representan solamente un primer paso. Muchas de las memorias presentadas sobre los futuros reactores convertidores encierran importantes promesas por lo que respecta a la economía de su empleo y a la utilización del combustible. Aunque las opiniones sostenidas acerca del camino que debe seguirse sean divergentes, existe general acuerdo en que, para obtener esos mayores rendimientos, es preciso desarrollar reactores convertidores más perfeccionados. Previendo lo que en definitiva serán las futuras necesidades, el acuerdo es casi unánime en cuanto a la necesidad de perfeccionar reactores reproductores, si bien algunos países, como por ejemplo el Canadá, estiman que tal vez esos reactores no sean necesarios en el transcurso de muchos años, si es que alguna vez llegan a serlo. No obstante, la opinión general es la que se refleja en los planes que el Reino Unido, la Unión Soviética, Francia, Alemania y los Estados Unidos han dado a conocer en relación con sus respectivos programas.

Actualmente se está estudiando y desarrollando en muchos países toda una serie de esos reactores convertidores. Entre las ventajas que estos pueden ofrecer, figuran propiedades tales como las siguientes: altas razones de conversión, elevada potencia específica con la consiguiente reducción de las existencias de combustible necesarias, altas temperaturas de trabajo y elevado rendimiento térmico, mayor potencia de cada reactor de la central, empleo más eficaz del uranio natural, del torio y del plutonio, así como la posibilidad de contribuir a la consecución de los tipos definitivos de reactores reproductores. En algunos casos, los conceptos de estos reactores convertidores se basan en variantes del diseño y en ampliaciones y combinaciones de las características tecnológicas de los tipos de reactor que ya han dado

resultado en la práctica. En otros casos constituyen verdaderas innovaciones tecnológicas.

Pongamos un ejemplo: como es sabido, los reactores moderados por agua pesada representan una clase de reactores que ofrecen buenas posibilidades tanto a largo como a corto plazo. Se han comunicado a la Conferencia diversas ampliaciones de la tecnología de estos reactores de agua pesada a diseños que se están estudiando y desarrollando actualmente y en los que intervienen refrigerantes tales como gases, compuestos orgánicos, agua y vapor. El concepto de reactor moderado por agua pesada y con refrigerante orgánico que se está desarrollando con la ejecución del proyecto ORGEL (del EURATOM), del proyecto OCDRE en el Canadá, del proyecto DON en España, y del programa recientemente elaborado en los Estados Unidos en relación con la desalinización del agua, parecen encerrar importantes posibilidades, lo mismo que los programas de Francia y de Checoslovaquia en los que se prevé el empleo de gas como refrigerante y agua pesada como moderador, y que los trabajos que se realizan en el Reino Unido relativos a la refrigeración por vapor. Del alcance de los trabajos planeados en torno a la utilización de refrigerantes orgánicos se desprende sin lugar a dudas

Exposición de Ginebra: panel descriptivo del ciclo de combustible, expuesto por el Reino Unido, y encima, una maqueta del recipiente de presión de hormigón pretensado destinado a la central nuclear de Wylfa (Foto Naciones Unidas)



que muchos países han llegado ya a dominar la técnica del empleo de sustancias orgánicas como refrigerantes en reactores, mediante el establecimiento y el mantenimiento de normas satisfactorias de pureza para los correspondientes circuitos de refrigeración.

Otros ejemplos de la evolución de los reactores convertidores avanzados a partir de los tipos actuales de reactores de gran potencia los tenemos en los reactores de desplazamiento espectral (que emplean una mezcla de agua pesada y ligera en proporciones variables), en los diseños suecos de reactores de agua pesada tanto a presión como hirviendo, en el concepto de reactor de agua a presión del tipo de germen y envoltura fértil, y en el sobrecalentamiento nuclear. El hecho de que en Suecia se haya logrado un coeficiente de escape de agua pesada muy bajo es sumamente alentador. En cuanto a los trabajos relativos al sobrecalentamiento, parecen hallarse particularmente adelantados en la Unión Soviética, gracias en buena parte a la experiencia adquirida con el funcionamiento de la central de Bielyarsk.

Reactores rápidos

También se están desarrollando versiones avanzadas de reactores refrigerados por gas y con moderador de grafito, que conducen a un funcionamiento a temperaturas más altas, con ciclos de combustible mejorados y razones de conversión más elevadas. Los proyectos AGR y DRAGON cuya ejecución tiene lugar en el Reino Unido (el segundo de los cuales representa un amplio esfuerzo multinacional) y el proyecto HTGR de los Estados Unidos, constituyen los principales ejemplos de la labor que se realiza en tal dirección.

En el plano de la labor de desarrollo, nos encontramos también con que una parte considerable de los esfuerzos desplegados se orienta hacia los reactores refrigerados por sodio. La labor de perfeccionamiento del reactor con moderador de grafito y refrigerante de sodio que se realiza en los Estados Unidos tiene como principal objetivo conseguir un tipo de reactor de gran potencia que trabaje a altas temperaturas en condiciones económicas; además, esa labor representa una importante aportación a la tecnología del sodio, que es aplicable a los reactores rápidos refrigerados por sodio. Es digno de mención el que la Hallam Nuclear Power Facility de los Estados Unidos, que representa precisamente un reactor de este tipo, sea el reactor más potente refrigerado por sodio actualmente en servicio. Como parte de su programa conjunto de reactores, Alemania está ejecutando el proyecto del reactor KNK, que utilizará sodio como refrigerante e hidruro de circonio como moderador. El programa de la Unión Soviética revela también que se procede allí a una considerable labor de desarrollo en torno al empleo del sodio como refrigerante nuclear.

Las memorias presentadas ponen de manifiesto que, en los últimos años, la atención prestada en muchos países a los reactores rápidos ha aumentado de una manera realmente notable. Tanto Alemania como el Reino Unido, los Estados Unidos y la Unión Soviética han anunciado o reafirmado su intención de trabajar en prototipos de reactores de potencia relativamente elevada, del orden de varios centenares de megavatios eléctricos. Hemos podido escuchar la lectura de comunicaciones de la Unión Soviética y del Reino Unido relativas a la experiencia práctica que dichos países han adquirido con la explotación de reactores rápidos en las centrales BR-5 y de Dounreay, respectivamente. La potencia integrada de la central de Dounreay ha alcanzado un total de 9 080 MWd, y su producción total de electricidad es superior a 36 GWh. La central de Dounreay ha funcionado satisfactoriamente a plena capacidad, y su utilización continua como instalación de ensayo de combustibles contribuirá considerablemente a facilitar la ejecución del programa de reactores rápidos del Reino Unido.

Hemos sido informados de que el EBR II de la National Reactor Testing Station de los Estados Unidos está produciendo ya electricidad, y se prevé que este reactor, así como la central "Enrico Fermi", aportarán valiosa información sobre combustibles, comportamiento de elementos componentes y seguridad de funcionamiento de los sistemas. En Francia se está construyendo el reactor rápido Rapsodie que proporcionará igualmente importantes datos sobre física de los reactores, incluida la cinética de los núcleos de los reactores rápidos. En cuanto a Alemania, su programa se está desarrollando rápidamente, procediéndose a una evaluación detenida de los diversos refrigerantes y sistemas que pueden tener aplicación en la tecnología de los reactores rápidos.

Se ha prestado gran atención al posible empleo, en lo futuro, del ciclo de plutonio y uranio-238, a fin de utilizar eficazmente estas sustancias aprovechando la ventaja de las altas razones de reproducción que parece posible conseguir con ese tipo de ciclo. Se están estudiando diversos combustibles, tanto metálicos como cerámicos, a fin de averiguar las posibilidades que ofrecen de proporcionar un elevado rendimiento con un bajo costo. Ello ha conducido a la preparación de interesantes programas encaminados a evaluar el comportamiento neutrónico y la seguridad inherente de tales sistemas de combustible para reactores rápidos.

Altos niveles de seguridad

En lo que respecta a la evaluación de los combustibles, en el reactor de Dounreay, del Reino Unido, se está irradiando una serie de conjuntos experimentales de combustible. También se están irradiando materiales combustibles hasta un grado de combustión del 6 por ciento en el BR-5 de la Unión Soviética. Ya se han elaborado en firme planes para irradiar en un futuro muy próximo muestras y subconjuntos de

combustible en los reactores Rapsodie, Fermi y EBR II, así como en el circuito de flujo rápido del BR-5 de Bélgica. Además, los Estados Unidos están construyendo un reactor rápido para ensayos, el FARET, en el que se efectuarán valiosas mediciones físicas y en el que podrán ensayarse pequeños núcleos de reactor con elevadas potencias específicas y altos grados de combustión. La Unión Soviética también ha dado a conocer sus planes en relación con su reactor BR-60, de 60 MW(e), en el que se espera alcanzar con fines de demostración grados de combustión superiores al 10 por ciento.

Por lo que respecta a los estudios sobre seguridad, son varios los países en los que se llevan a cabo investigaciones de carácter teórico y experimental sobre las mediciones del coeficiente Doppler y del coeficiente de vacío correspondiente al sodio. Las memorias presentadas en las sesiones respectivas y los debates celebrados indican que existe general acuerdo acerca de la contribución del coeficiente Doppler a la cinética y seguridad de los reactores; ese coeficiente resultará negativo y amplio. En las instalaciones críticas ZEBRA, VERA y QUAGGA del Reino Unido, ZPR-III y ZPR-IV de los Estados Unidos, BFS de la Unión Soviética y FR-0 de Suecia se están realizando ya trabajos de experimentación. En el plazo de cinco años, habrán entrado en servicio otras varias instalaciones como son las de los proyectos MASURKA en Francia, SNEAK en Alemania y ZPPR en los Estados Unidos. Otro proyecto de reactor rápido en perspectiva es el SEFOR (Southwest Experimental Fast Oxide Reactor) que el EURATOM, la República Federal de Alemania, la Southwest Atomic Energy Associates (grupo de empresas americanas de servicios públicos), la General Electric Company y la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos han iniciado en un plano de asociación internacional. El SEFOR será empleado para medir el coeficiente Doppler y el coeficiente de temperatura del sodio en núcleos de reactor mixtos de plutonio y óxido de uranio, en régimen transitorio.

Aunque las actividades de desarrollo de reactores reproductores se encuentran principalmente enfocadas hacia los reactores rápidos refrigerados por sodio, las memorias presentadas en esta Conferencia ponen de manifiesto que también se están estudiando otros tipos de reactor que utilizarían otros refrigerantes tales como gas y vapor. En efecto, la delegación de Suiza presentó una memoria en la que se describe un tipo de reactor rápido refrigerado por gas, y también se presentó otra memoria sobre la evaluación de distintos sistemas de refrigeración en Alemania.

También se dio a conocer la labor que se realiza en diversos países y que puede conducir a la consecución de reactores reproductores térmicos, en los que se utilice un ciclo de combustible basado en el empleo de torio y uranio-233. Tres de los conceptos de reactor descritos que ofrecen la posibilidad de uti-

lizar las importantes reservas energéticas actualmente encerradas en el torio, así como con el tiempo, la posibilidad de un proceso de reproducción, son el del reactor de grafito y gas para funcionar a altas temperaturas, el del reactor de agua pesada y el del reactor de agua ligera a presión del tipo de germen y envoltura fértil. También deben observarse las posibles ventajas de los reactores de combustible fluido, tales como los del tipo de óxidos en suspensión o de sal fundida.

Ciclo del combustible

Pasemos ahora a tratar del combustible nuclear, cuya tecnología es una de las más importantes entre las relativas a la energía nucleoelectrónica, y en cuyo campo nos encontramos con que se han logrado firmes mejoras siguiendo diversos caminos. Estas mejoras se manifiestan por un lento pero constante aumento del rendimiento del combustible en el transcurso de los años, por temperaturas de trabajo cada vez más altas y por un mayor rendimiento térmico global de los conjuntos de combustible.

Aunque el número de conceptos distintos de reactores en estudio se ha reducido un tanto en los últimos años, todavía subsisten múltiples posibilidades de elección por lo que respecta al ciclo de combustible. En los reactores que emplean uranio natural sometido a bajas exposiciones se utilizan sistemas de uranio metálico. Para los reactores refrigerados por agua, el material combustible que actualmente goza de mayor aceptación y cuyo comportamiento ha sido comprobado más a fondo es el óxido de uranio. Los resultados dados a conocer en esta Conferencia, indican que este combustible seguirá siendo el preferido para tales tipos de reactores debido a que puede soportar elevados grados de irradiación. En diversas memorias se señalan las posibles ventajas que

Los telemanipuladores instalados en la sección de la República Federal de Alemania despiertan interés entre los visitantes de la Exposición (Foto Naciones Unidas)



encierra el empleo de combustibles a base de carburos en reactores que no utilicen agua. También se han presentado comunicaciones relativas a otros compuestos tales como nitruros, sulfuros, siliciuros, etc.

Las aleaciones de acero inoxidable y circonio continúan figurando entre los principales materiales de revestimiento, si bien los encargados de diseñar los elementos combustibles siguen preocupados por la fragilidad que adquieren esas aleaciones al ser sometidas a altas temperaturas durante la irradiación. Las aleaciones de magnesio han dado buenos resultados en los tipos de reactores refrigerados por gas que trabajan a bajas temperaturas. En cuanto a los reactores refrigerados por gas pero que funcionan a altas temperaturas, se prevé que en lo futuro dispondrán de un excelente combustible en el constituido por partículas de combustibles cerámicos revestidas de carbono.

En el Canadá, los combustibles más usuales son el óxido de uranio natural revestido de circonio, que permite llegar a grados de combustión calculados en 10 MWd/kgU. En Francia, el combustible empleado consiste en uranio metálico natural con revestimiento de aleación de magnesio, que permite alcanzar exposiciones de unos 3,5 MWd/kgU. En la Unión Soviética, los reactores de agua ligera emplean óxido de uranio enriquecido, con revestimiento de aleaciones de acero inoxidable, y llegan a grados de combustión superiores a 20 MWd/kgU. En el Reino Unido se emplea actualmente uranio natural metálico "ajustado", con revestimiento de aleación de magnesio, que permite alcanzar grados de combustión de 4 a 5 MWd/kgU. En los Estados Unidos se emplea principalmente como combustible óxido de uranio con revestimiento de acero inoxidable o de zircaloy, con posibles grados de combustión comprendidos entre 16 y 25 MWd/kgU.

También se están estudiando y perfeccionando diversos tipos de combustibles fluidos tales como sales fundidas, plutonio fundido y suspensiones acuosas. El empleo de estos nuevos materiales se traducirá sin duda en importantes economías respecto del ciclo de combustible, pero plantea enormes problemas todavía pendientes de resolución.

Dados los excelentes progresos conseguidos en la labor de desarrollar combustibles de larga duración y de reducir los costos de las distintas operaciones unitarias que intervienen en el mantenimiento del ciclo de combustible, parece ya posible afirmar que la exposición óptima rentable del combustible destinado a los reactores convertidores se aproximará mucho a la vida útil sin pérdida de integridad que cabe esperar razonablemente.

Se han recibido diversas memorias relativas a la fase final del ciclo de combustible, es decir, la regeneración del combustible ya utilizado, para la cual

existen diversos procedimientos cada uno de los cuales presenta ventajas e inconvenientes. En la actualidad, el procedimiento generalmente empleado para la recuperación de combustibles nucleares es el de extracción mediante solventes acuosos. No obstante, otros procedimientos tales como los de regeneración pirometalúrgica y piroquímica están ganando terreno rápidamente. A fin de cuentas, serán los tipos de combustible que necesiten de esa regeneración los que determinen en gran parte cuál es el procedimiento más económico para recuperar el combustible.

Conforme se ha dado a conocer en la Conferencia, puede preverse ya con claridad el reciclado en condiciones económicas de los combustibles -plutonio y uranio-233- de los reactores reproductores. Dentro de pocos años se llevará a la práctica el reciclado del plutonio en grandes reactores de potencia de tipo comercial, lo que representará un importante paso para afianzar la economía del ciclo completo de combustible. Del mismo modo, unos años más adelante le tocará el turno al reciclado del uranio-233.

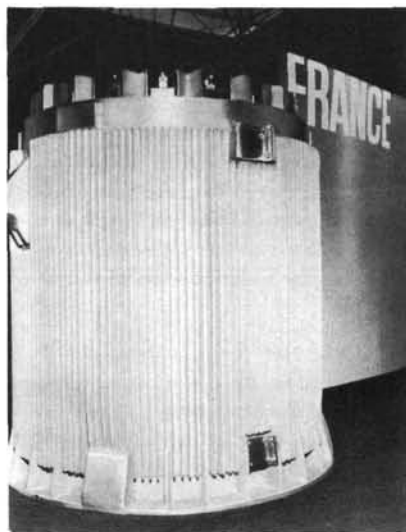
Seguridad nuclear y tratamiento y evacuación de desechos

De las memorias enviadas a esta Conferencia se desprende que en el mundo entero se está estableciendo un conjunto de principios generales de seguridad aplicables a esos tipos de reactores. La forma de abordar el problema parece basarse en dos criterios distintos pero interrelacionados, en los que destaca la prudencia. En primer lugar, y para evitar accidentes, al diseñar los reactores se suelen aplicar elevados coeficientes de seguridad, teniendo en cuenta el comportamiento cinético o neutrónico del tipo de reactor de que se trate, las características de los materiales empleados en su construcción y la multiplicación de los instrumentos y sistemas de control en número superior al estrictamente necesario y contruidos, en la medida de lo posible, a prueba de fallas. Además, se capacita cuidadosamente a los encargados de la explotación del reactor y se observan estrictamente las normas establecidas para el funcionamiento de la central. En segundo lugar, la mayoría de los reactores de potencia están provistos de toda una serie de dispositivos de seguridad y de sistemas para casos de urgencia a fin de reducir al mínimo las consecuencias de un accidente. Por ejemplo, en algunos países es práctica corriente encerrar la totalidad del reactor y de sus instalaciones en una estructura de confinamiento estanca capaz de resistir una presión considerable.

En apoyo de esta tendencia, en casi todos los países que cuentan con planes de construcción de reactores se ejecutan amplios programas de ensayos y de desarrollo de la investigación en materia de seguridad nuclear. Creo que podemos confiar perfectamente en que esta labor de investigación que abarca toda una amplia gama de cuestiones, desde las relativas

a la cinética de los reactores hasta las investigaciones sobre el comportamiento de los productos de fisión y sobre los materiales, y en la que intervienen una gran diversidad de disciplinas científicas y técnicas, continuará contribuyendo al excelente historial que corresponde a la energía de origen nuclear en lo que a seguridad respecta, así como en que el ritmo de sus progresos se ajustará al de las necesidades que experimente la industria a medida que se desarrolle.

La preocupación por la seguridad nuclear no cesa con el funcionamiento continuo y sin riesgos de los reactores nucleares. También es preciso proceder a la evacuación de los desechos radiactivos procedentes de esos reactores sin peligro para la seguridad. En los últimos años, Checoslovaquia, Francia, la India y los Estados Unidos han realizado importantes progresos, que han comunicado a esta Conferencia, respecto de la manipulación de desechos radiactivos derivados de las operaciones de producción de energía nucleoelectrónica. En el mundo entero se ha dado enérgico impulso a la ejecución de ambiciosos programas de investigación y desarrollo sobre tratamiento y evacuación de desechos, orientados a disminuir aún más las cantidades de materiales radiactivos que se evacúan en el medio ambiente.



Recipiente para el transporte de elementos combustibles destinados al reactor "Pégase", exhibido en la sección de Francia (Foto Naciones Unidas)

Conforme han indicado Francia y los Estados Unidos en sus respectivas comunicaciones, el tratamiento y evacuación de desechos radiactivos con sujeción a normas estrictas en las centrales nucleoelectrificadas no está limitando en absoluto el desarrollo de la producción generalizada y en gran escala de energía nucleoelectrificada, pudiendo observarse también que, en el transcurso de los últimos años, estas operaciones de manipulación de desechos no se han traducido en

liberación anormal alguna de radiactividad en el medio ambiente. En efecto, las concentraciones de radiactividad en los efluentes de las centrales equipadas con reactores de potencia se han mantenido, sin ninguna dilución ambiental, dentro del reducido margen del 1 al 3 por ciento que fijan las normas de protección radiológica aceptadas en el plano internacional.

En muchos países, entre ellos el Canadá, los Estados Unidos y la Unión Soviética, la evacuación en el subsuelo de determinados tipos de efluentes sólidos y líquidos de baja actividad ha resultado un procedimiento aceptable y que no entraña riesgos. Muchos países que disponen de extensiones de terreno suficientes han optado por el enterramiento o por el almacenamiento subterráneo de los desechos, con las consiguientes ventajas económicas, quedando prácticamente eliminada la evacuación de los desechos en el océano como operación importante dentro de esta esfera.

La experiencia adquirida a lo largo de más de 15 años tanto en el Reino Unido como en los Estados Unidos y en la Unión Soviética, en el perfeccionamiento de los procedimientos de manipulación de desechos radiactivos líquidos de elevada actividad procedentes de las operaciones de regeneración del combustible, almacenándolos en tanques subterráneos especiales, ha puesto de manifiesto que tal almacenamiento constituye una medida segura y práctica de carácter provisional. Su utilidad a largo plazo es, sin embargo, limitada, debido al largo período durante el cual los desechos conservan su actividad (varios centenares de años) y a la vida útil relativamente corta de los tanques (calculada en algunos decenios). Por esta razón, varios países están perfeccionando los procedimientos necesarios para transformar los desechos líquidos de elevada actividad en sólidos estables.

Ahora bien, después de transformados en sólidos los desechos líquidos de elevada actividad, subsiste la necesidad de almacenarlos con carácter permanente. Lo más probable es que los depósitos que pueda construir la mano del hombre no resistan el paso de los varios centenares de años que han de transcurrir hasta que los desechos puedan considerarse como relativamente inocuos; por el contrario, los yacimientos subterráneos de sal parecen ofrecer una interesante solución para el almacenamiento de desechos radiactivos, tanto sólidos como líquidos en forma concentrada, dadas sus características geológicas peculiares. En efecto, los yacimientos de sal son secos, impermeables, ofrecen una buena resistencia estructural y una buena conductividad térmica, están aislados de los recursos hidráulicos aprovechables del subsuelo, y se encuentran en múltiples regiones del mundo. Se seguirá con gran interés la labor de desarrollo que se lleve a cabo en lo futuro en diversos países con miras al aprovechamiento de los yacimientos con este fin.

Creo firmemente que, si se continúa prestando la debida atención a esta esfera de la seguridad nuclear y al tratamiento y evacuación de desechos, nos será posible aprovechar las ventajas inherentes a la producción de energía nucleoelectrica y, al mismo tiempo, mantener -e incluso mejorar- los niveles de seguridad y de protección de la salud de la población en general. En efecto, la utilización, cada vez en mayor escala, de la energía nucleoelectrica puede en definitiva contribuir a que disminuya la contaminación de la atmósfera, debida en gran parte al empleo tan extendido de los combustibles fósiles.

Progresos efectuados en la conversión de energía

Los progresos que en esta Conferencia se han dado a conocer en materia de técnicas de conversión de la energía, a saber, de la conversión termoelectrica y termoiónica de la energía nuclear y de las técnicas magnetohidrodinámicas, están abriendo nuevos horizontes a la producción de energía.

En el breve período transcurrido desde la última Conferencia, ha quedado demostrado que la conversión directa en electricidad del calor producido en la desintegración nuclear, mediante la emisión termoiónica de electrones, es un concepto que puede llevarse a la práctica. Tal vez lo que mejor refleja las posibilidades que encierra este concepto sea la magnitud de los esfuerzos que, conforme se ha comunicado a la Conferencia, se están desplegando en el Reino Unido, la Unión Soviética, Francia y los Estados Unidos con miras a llevarlo a la práctica. El ensayo de convertidores, realizado fuera del reactor, con emisores de carburo de uranio y de metal refractario ha revelado períodos de vida útil del orden de millares de horas. En los ensayos realizados en reactores, los convertidores alimentados con carburo de uranio y de óxido de uranio han funcionado por espacio de varios centenares de horas. Como es natural, las posibilidades que ofrecen estos convertidores han estimulado el desarrollo de nuevos materiales. A medida que progresa la tecnología de los metales refractarios, que permiten alcanzar temperaturas crecientes en los reactores, aumenta la eficacia del procedimiento de la conversión termoiónica hasta el punto en que cada vez es mayor el incentivo para superar los múltiples problemas pendientes de resolución.

Son varios los laboratorios en los que se procura generar energía eléctrica recurriendo a las técnicas magnetohidrodinámicas. También en este caso, las elevadas temperaturas de plasma que se precisan plantean arduos problemas relativos a los materiales, si bien el empleo de un fluido de trabajo inerte reduciría la importancia de estos problemas. El convertidor de ciclo cerrado utilizado en combinación con un reactor nuclear refrigerado por gas que trabaje a altas temperaturas ofrece interesantes posibilidades. A este respecto, se han dado a conocer



Indumentaria protectora presentada en la sección de Suecia de la Exposición (Foto Naciones Unidas)

proyectos relativos a reactores que funcionen a temperaturas del orden de $1\,800 - 2\,200^{\circ}\text{C}$.

La técnica de la generación de energía eléctrica mediante la conversión termoeléctrica directa del calor producido por la desintegración de los radioisótopos se ha establecido firmemente en el período transcurrido desde la última Conferencia. Los resultados de esta tecnología se reflejan no sólo en sus aplicaciones espaciales, sino también en diversas aplicaciones terrestres tales como las estaciones meteorológicas, boyas de ayuda a la navegación y faros. En el Golfo de México presta servicio una estación meteorológica de los Estados Unidos instalada en una gabarra y alimentada por un generador de 60 W que utiliza estroncio-90. La Unión Soviética ha informado asimismo sobre el funcionamiento satisfactorio de una estación meteorológica automática situada en la región central del país, que dispone de un generador de 5 W alimentado por cerio-144.

La posibilidad de lograr la conversión termoeléctrica directa del calor producido a raíz de la desintegración en un reactor nuclear ha quedado plenamente demostrada. Ofrecen considerable interés los esfuerzos realizados en la Unión Soviética, que han culminado en la construcción del reactor "Romashka". Este reactor rápido alimentado por dicarburo de uranio (UC₂) y acoplado a pares termoeléctricos de si-

licio y germanio, ha venido funcionando desde mediados de agosto de 1964 a una temperatura de $1\,800^{\circ}\text{C}$, generando electricidad a un nivel de potencia del orden de varios centenares de vatios.

Los Estados Unidos proyectan ensayar en la primavera de 1965, con el vuelo orbital del SNAP 10A, un reactor de 500 W que emplea también la técnica de la conversión termoeléctrica directa. Este reactor alimentado por uranio-235, moderado por hidruro de circonio y refrigerado por un metal líquido, pesará algo más de 400 kg, incluido el blindaje de su carga útil. Los reactores de esta clase contruidos en mayor tamaño, permitirán a los futuros satélites de comunicación transmitir en forma directa a los diversos hogares programas de televisión en diferentes canales simultáneamente.

Es evidente que los reactores de la índole del SNAP y "Romashka", si bien son resultado de la apremiante necesidad de disponer de energía en el espacio ultraterrestre, terminarán igualmente por hallar importantes cometidos que desempeñar como fuentes de energía terrestres de poco volumen y de funcionamiento seguro.

Aplicaciones especiales

En el curso de la Conferencia se nos ha informado sobre los estudios realizados en los Estados Unidos con miras a combinar la producción de energía para la producción de electricidad y para la desalinización del agua, así como sobre los estudios análogos llevados a cabo en Israel y en Túnez. La Unión Soviética y Francia han aportado interesantes datos sobre reactores destinados a ser aplicados a procesos de desalinización o de tipo análogo. Nos sentimos estimulados por estas informaciones y esperamos que en un futuro próximo, digamos dentro de 4 a 8 años, se construyan y entren en servicio una o varias instalaciones de doble finalidad para producción de energía nucleoelectrica y desalinización, capaces de suministrar diariamente varios millones de litros de agua dulce.

Los estudios realizados hasta la fecha indican que, en el plazo de unos pocos decenios, estas instalaciones nucleares de doble finalidad podrán producir agua dulce y energía eléctrica a un precio asequible para satisfacer múltiples necesidades municipales e industriales en el mundo entero. En ciertos casos concretos, incluso es posible que el agua producida por esas plantas de doble finalidad pueda emplearse en la agricultura con ventaja económica frente a la obtenida de otras fuentes de suministro.

Otra aplicación inmediata de los reactores nucleares es el suministro de energía eléctrica y calor en lugares remoto. La Unión Soviética presentó una memoria sobre su central portátil ARBUS, de 750 kW(e), cuyo reactor emplea refrigerante y moderador orgánicos. Esta planta, que comenzó a prestar servicio en 1963, utiliza un circuito primario de ace-

ro al carbono, así como bombas y elementos auxiliares de bajo costo del tipo empleado en la industria petrolífera; está constituida por 19 unidades, cada una de las cuales no pesa más de 20 t. Los científicos soviéticos han descrito también la central TES-3 de 1 500 kW(e), con reactor de agua a presión, distribuida sobre cuatro grandes vehículos de orugas. Los científicos americanos han descrito sus reactores portátiles de agua a presión, que emplean cuerpos compactos de cermet de óxido de uranio y acero inoxidable, y han facilitado detalles sobre la experiencia práctica adquirida en diversos emplazamientos tanto en los Estados Unidos como en el Ártico y en la Antártida. El éxito de estas centrales, que producen hasta 2 000 kW(e) además de una considerable cantidad de calor destinado a la calefacción, representa una tecnología aplicable a cualquier central nuclear pequeña destinada a prestar servicio en lugares apartados para satisfacer la demanda de una explotación minera de una misión científica, u otras necesidades.

Las previsiones optimistas expresadas durante la Conferencia de 1958 respecto de las aplicaciones marítimas de la energía de origen nuclear pueden considerarse ya ratificadas por la experiencia adquirida con el funcionamiento satisfactorio de dos buques de propulsión nuclear. Durante casi cinco años de servicios, el rompehielos "Lenin" ha puesto de manifiesto las ventajas que representa la energía de origen nuclear aplicada al desempeño de su importante cometido. En cuanto al N.S. "Savannah", está próximo a terminar su segundo viaje a Europa y se está mostrando también a la altura de las esperanzas en él cifradas.

Dos países, la Alemania occidental y el Japón, cuentan ya con proyectos en firme para la construcción de sus primeros buques de propulsión nuclear. Otros varios realizan trabajos de desarrollo en preparación de futuros proyectos, y la Unión Soviética ha anunciado durante la Conferencia que proyecta construir dos nuevos rompehielos de propulsión nuclear, previéndose que el primero de ellos entre en servicio en 1971.

El programa "Plowshare" de los Estados Unidos, relativo a la utilización de los explosivos nucleares con fines pacíficos, ha despertado considerable interés. Pese al hecho de que dicho programa se encuentra todavía en una temprana etapa de su desarrollo, y de que es necesario acopiar gran cantidad de datos antes de poder emprender proyectos de utilidad, las posibilidades de emplear los explosivos nucleares en trabajos de excavación, en el laboreo de minas y en la explotación de yacimientos de gas y de petróleo, así como su empleo como instrumento de investigación, parecen ser prometedoras. Los delegados de varias naciones han formulado importantes propuestas relativas a procedimientos de colaboración y de participación a este respecto en el plano internacional. Es de suponer que gracias a ese apoyo y a esa colaboración internacionales, la tecnología de las ar-

mas atómicas pueda convertirse en útil instrumento técnico y de investigación en beneficio de toda la humanidad.

Reactores de investigación y de flujo intenso

Las memorias presentadas a la Conferencia indican que la utilización de los reactores de investigación más modernos puede clasificarse en tres grupos principales de actividades: en primer lugar, tenemos el estudio continuo de los efectos ejercidos por las radiaciones sobre los materiales destinados a la construcción de reactores o a ser utilizados en ellos como moderadores o como combustibles. En segundo lugar, nos encontramos con el tipo más fundamental y mejor controlado de investigaciones físicas que es posible llevar a cabo gracias al empleo de reactores diseñados para satisfacer necesidades más específicas de la investigación. Un buen ejemplo de ello lo constituyen los trabajos que se han dado a conocer sobre los reactores pulsados. El tercer campo de actividad es el de la producción de radioisótopos destinados a fines de terapéutica médica, a su empleo como indicadores y, en la actualidad, para la producción de cantidades relativamente grandes de elementos transplutónicos tanto en los Estados Unidos como en la Unión Soviética.

Mis inclinaciones personales quedarán de manifiesto si se me permite afirmar que las perspectivas que ofrece la realización de investigaciones básicas y de carácter exploratorio sobre las cantidades de isótopos del californio del orden del gramo, los cientos de miligramos de berkelio, los miligramos de einsteinio y hasta un miligramo de fermio producidos en esos reactores, figuran entre las más interesantes de cuantas se nos han presentado en varios decenios.

Como más fácil resulta apreciar la transición de los reactores de investigación para múltiples fines a los reactores de investigación especializados es atendiendo a la construcción de reactores de flujo intenso destinados al ensayo de materiales o a la producción de radioisótopos. Ya están en servicio, o lo estarán en breve, los reactores HFIR, HFBR y ATR en los Estados Unidos, el Mp, MPR y SM-2 en la Unión Soviética, y el PEGASE en Francia.

Este deseo de obtener flujos neutrónicos más intensos se ha traducido en progresos tecnológicos que rebasan en un orden de magnitud, por lo menos, las condiciones que se ofrecen en los actuales reactores de potencia, con lo que queda despejado el camino para introducir nuevas mejoras en estos últimos reactores. Entre esos importantes progresos figura el desarrollo de elementos combustibles y de cuerpos de reactor destinados a trabajar a potencias específicas y flujos térmicos muy elevados.

Hemos aprendido también a adaptar especialmente las características del flujo en los diversos sectores

de la experimentación, y los conocimientos adquiridos nos han hecho apreciar la necesidad de coordinar cuidadosamente el diseño y la construcción del reactor con las exigencias de la labor de investigación. La experiencia adquirida se ha traducido en la construcción de instalaciones experimentales tan notables como los circuitos de ensayo de elementos combustibles de que disponen el reactor soviético MR y el reactor francés PEGASE, el circuito para altas temperaturas refrigerado por gas del reactor Pluto del Reino Unido, la trampa fría de hidrógeno líquido del reactor francés con haz de flujo intenso, y la cámara del moderador de hidrógeno líquido del reactor británico "DIDO".

Radioisótopos

Es evidente que la tecnología relativa al empleo de los isótopos se ha extendido ya a todos los sectores científicos y técnicos. Constituye realmente un producto de la era atómica que puede ser utilizado por todos los países, cualquiera que sea su extensión o su grado de adelanto tecnológico.

A mi juicio, uno de los logros técnicos más notables de los últimos años -conforme se refleja en las memorias aquí presentadas- ha consistido en el esfuerzo realizado con objeto de producir, separar y purificar los radioisótopos en cantidades suficientes para poder estudiar su empleo como fuentes de radiaciones y de energía térmica. Varios países han informado sobre importantes adelantos conseguidos en esta esfera. Otro sector -al que podríamos dar el nombre de "El Atomo Humanitario"- en el que se han logrado destacados progresos ha sido el de las aplicaciones de los radioisótopos en medicina para aliviar los sufrimientos del hombre.

Desde el punto de vista científico, el hecho de que se haya generalizado el empleo del análisis por activación neutrónica como técnica para la medición de vestigios de casi todos los elementos de la tabla periódica, representa una contribución de incalculable valor para la medicina, la agricultura y las ciencias físicas. En realidad, su aplicación se ha extendido incluso al terreno de los encargados de velar por el cumplimiento de la ley.

Las radiaciones ionizantes -tanto si proceden de radioisótopos como de aparatos o de reactores- están encontrando ya aplicaciones en la elaboración de productos químicos orgánicos, de materiales plásticos y de otras sustancias, así como en la esterilización de suministros médicos y en la conservación de productos alimenticios.

Reacciones termonucleares controladas

Una de las principales novedades que proporcionó la Conferencia de 1958 fue la publicación de informaciones que hasta entonces habían tenido carácter reservado o secreto, relativas a investigaciones realizadas sobre las reacciones termonucleares contro-

ladas. Dicho año y los que inmediatamente le siguieron constituyeron una época nebulosa en esta esfera de la investigación, esfera que podría conducir a la extracción de cantidades inagotables de energía de los océanos. Las memorias presentadas en esta Conferencia demuestran que hemos aprendido mucho en los años transcurridos desde entonces. Los especialistas en física del plasma conocen ya perfectamente las enormes dificultades científicas y técnicas que entraña la suspensión, la constricción y el mantenimiento en el espacio de gases con temperaturas comparables a las que reinan en las estrellas. Se han percatado de que las perspectivas de poder encontrar un fácil atajo en la tecnología conducente a la fusión controlada no son muy brillantes. Por último, han demostrado, a plena satisfacción propia y de la comunidad nuclear, que la fusión controlada constituye uno de los problemas científicos y técnicos más difíciles con los que se ha tropezado nunca.

No obstante, el hecho de que al optimismo inicial haya seguido la experiencia moderadora de los últimos seis años, no debe impedirnos ver los progresos realmente importantes que se han conseguido. En la física del plasma ha nacido una nueva, importante e interesante esfera de las ciencias fundamentales. Me limitaré a citar tres ejemplos de la madurez alcanzada por la física del plasma. Uno de ellos es la creciente complejidad de esta esfera, reflejada en parte por el desarrollo de una nueva terminología que, utilizada por los especialistas, está escapando a la comprensión del resto de quienes trabajamos en la esfera nuclear. El segundo ejemplo se tiene en el brusco aumento de la importancia adquirida por este nuevo campo de actividad, que se refleja en el aumento general del número de científicos que se dedican a investigaciones sobre la fusión controlada, en las sumas cada vez mayores invertidas en instalaciones científicas por los Gobiernos, y en el aumento del número de publicaciones que tratan de estos problemas. El número de memorias científicas publicadas anualmente sobre física del plasma ha aumentado en un 45 por ciento aproximadamente desde 1959, habiendo aumentado en la misma proporción el número de investigadores en esta esfera. Un recuento aproximado indica que en la actualidad se está trabajando con 10 importantes dispositivos experimentales en la Unión Soviética, 14 en el Reino Unido y la Europa occidental, 4 en el Japón y Australia y 10 en los Estados Unidos.

La prueba más importante de este desarrollo se encuentra, sin embargo, en los resultados de la labor científica de estos últimos años, que figuran en las memorias presentadas en esta Conferencia. Mientras que en 1958 los especialistas en física del plasma se encontraban sólo a punto de provocar reacciones de fusión con liberación de neutrones térmicos verdaderamente atribuibles a la reacción, hoy en día son varios los laboratorios que producen regularmen-

te plasma con energías iónicas que exceden de la llamada temperatura mínima de ignición.

Para que una reacción de fusión controlada resulte aprovechable, se precisan reacciones nucleares de una duración, temperatura y densidad del plasma adecuadas. Hoy en día puede existir una máquina con la que pueda alcanzarse la temperatura necesaria, otra en la que las reacciones nucleares tengan la duración apropiada y una tercera en la que se consiga un plasma de la densidad requerida, pero no existe ninguna que pueda satisfacer las tres necesidades a la vez. La meta actualmente perseguida -una meta a largo plazo- es obtener en una sola máquina reacciones en las que se combinen satisfactoriamente todos estos factores.

Ya se han sentado las bases del conocimiento de uno de los problemas más importantes que plantea la fusión controlada: el de la estabilidad del plasma. Es digna de admiración la labor sin precedentes realizada por Ioffe en la Unión Soviética sobre el confinamiento de plasmas en una región en la que la presión del campo magnético pasa por mínimo, es decir, el llamado confinamiento mínimo-B. También es alentador tener noticia de los múltiples experimentos nuevos que se están llevando a cabo para medir los límites de la estabilidad del plasma en condiciones

variables, tales como el experimento NTSE en el Reino Unido, el DECA en Francia y el DC-2 en los Estados Unidos.

Cada vez se dispone de medios más eficaces para predecir el comportamiento de los plasmas. Ya se han realizado numerosas comparaciones satisfactorias entre los resultados experimentales y los teóricos, como por ejemplo, en los experimentos Phoenix del Reino Unido y en los experimentos del Levitrón y el ALICE de los Estados Unidos. En 1958 no se daba tal concordancia entre los resultados obtenidos por distintos laboratorios y la ahora alcanzada es seguro indicio de la madurez que va alcanzando la ciencia del plasma.

No podemos abrigar la absoluta seguridad de que llegue a obtenerse energía de la fusión termonuclear controlada, si bien la opinión general en la Conferencia es que sí se logrará algún día, incluso tal vez antes de que termine el siglo.

Indudablemente, los beneficios que tal conquista proporcionaría -en esencia, poder disponer de cantidades inagotables de energía para la población de la Tierra- son de tal importancia que no pueden pasarse por alto."