

# Reactores nucleares <sup>(\*)</sup>

POR EL

DR. JUAN BTA. VIDAL-ABARCA DIEZ DE REVENGA

*Profesor Adjunto de la Facultad de Ciencias*

No es exagerado decir que hoy día todo lo referente a las cuestiones atómicas —o por mejor decir, a las cuestiones nucleares—, despierta el interés y la atracción de las gentes.

No son ya únicamente los especialistas quienes están atentos a la rápida evolución de esta nueva y sugestiva rama de la Ciencia, sino que todos nosotros nos sentimos ganados por la curiosidad, por la ansiedad, y hasta por el temor, al conocer una nueva noticia, un nuevo detalle, o algún nuevo perfeccionamiento relacionado con los temas atómicos o nucleares.

Ansiedad y temor perfectamente justificados porque la irrupción de esta nueva fuente de energía en la vida del hombre ha sido tremendamente trágica; y es indudable que habrá de pasar un buen número de años y tendrá que producirse una fundamental rectificación en la conducta de los pueblos para que la energía nuclear deje de asociarse con el recuerdo de los centenares de miles de víctimas que acompañaron a su nacimiento.

Sin embargo, la energía nuclear tiene otra cara más risueña y más amistosa: la energía nuclear es potencialmente la mayor reserva de progreso y bienestar con que cuenta la Humanidad, aunque para que ello llegue a ser una realidad, las cosas del espíritu han de estar siempre por encima de los avances materiales por muy espectaculares y prometedores que parezcan.

\* \* \*

---

(\*) Conferencia pronunciada en la Academia General del Aire (San Javier, Murcia), en mayo de 1962.



Dentro del ciclo que se viene celebrando en este lugar sobre estos temas del día, hablaremos de **REACTORES NUCLEARES**.

Aunque la ciencia nuclear es muy nueva —no olvidemos que hace tan sólo 17 años que se lanzaron sobre el Japón las dos primeras bombas atómicas—, ha adquirido un desarrollo tan sorprendente que incluso a la mente más dotada y mejor organizada le es imposible estar al día.

Creo que unos datos les pueden dar una buena idea.

La Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos edita una publicación dedicada exclusivamente a transcribir breves resúmenes de los trabajos que, sobre aspectos relacionados con los temas nucleares, se publican en el mundo, —mejor dicho, y debe entenderse así—, lo que los gobiernos permiten a sus científicos que publiquen. Pues bien, en el año 1948, primero de dicha publicación, el número de tales resúmenes fue de 2.190, mientras que en el pasado año de 1961, los trabajos recogidos ascendieron a 33.064.

Y este hecho que demuestra, por una parte la extraordinaria vitalidad de la ciencia nuclear, tiene su cara opuesta en cuanto representa una gran dificultad para sintetizar, resumir y presentar en forma asequible tal cantidad de información.

Pero, entremos ya en el tema que hemos de desarrollar.

¿Qué es un reactor nuclear?

Hace unos quince años, se habría dicho:

¿Qué es una pila atómica? ¿Qué es un horno para quemar uranio?

Sabemos que existen unas partículas sin carga eléctrica, llamadas neutrones, que pueden penetrar en el núcleo de los átomos venciendo la barrera de potencial eléctrico que existe alrededor de dichos núcleos.

Dichas partículas son capaces, en determinados casos, de romper, de dividir, el núcleo atómico con que chocan, en dos partes más o menos iguales, y que dicho proceso de ruptura, que en términos nucleares se denomina **FISIÓN** o **ESCISIÓN**, va acompañado de un gran desprendimiento de energía.

También se sabe que junto con esos fragmentos nucleares se liberan simultáneamente varios neutrones nuevos. Estos neutrones, que se mueven con diversas energías cinéticas, —porque poseen distinta velocidad— si, a su vez, chocan con otro núcleo capaz de romperse, repiten el proceso dando lugar a nuevos fragmentos nucleares y nuevos neutrones, todo ello acompañado de nuevas cantidades de energía.

Este conjunto de choques y de rupturas sucesivas, y cada vez en número creciente, se conoce como una **REACCIÓN DE ESCISIÓN EN CADENA**.

Así pues, nosotros vamos a definir un reactor nuclear como el artefacto mediante el cual es posible mantener bajo control una reacción en

cadena y que nos permite utilizar los cuatro productos que aparecen en ella: energía, neutrones, radiaciones y nuevos elementos radiactivos.

Como quiera que la base de todo reactor nuclear es una reacción en cadena, es conveniente que nos detengamos brevemente en considerar algunas particularidades de la misma.

Para que una reacción en cadena tenga aplicación en un reactor nuclear ha de ser capaz de mantenerse a sí misma y no debe cesar al cabo de un cierto número de etapas. Esto no es posible más que en el caso de que en cada escisión se produzcan dos neutrones como mínimo.

Según se ha indicado antes, los neutrones que proceden de un fenómeno de escisión tienen diversa energía cinética como consecuencia de la distinta velocidad con que salen proyectados del núcleo roto. Estas energías, que se miden en electrón-voltios, presentan un amplio espectro de valores.

Por otro lado, para que un determinado núcleo sufra escisión ha de ser golpeado por un neutrón cuya energía se encuentre entre ciertos límites. Se desprende, por tanto, que no todos los neutrones son capaces de mantener la reacción en cadena.

También puede ocurrir que los neutrones procedentes de la escisión tomen parte en la etapa siguiente, en una reacción que ya no es de escisión. Esto hace que se pierdan para la continuidad de la cadena.

Incluso en el material escindible puro, no todos los neutrones absorbidos provocan escisión, como es teóricamente posible.

Finalmente y a causa del tamaño finito que naturalmente ha de tener el sistema en cuyo seno se desarrolla una reacción en cadena, es inevitable que una cierta proporción de neutrones salga al exterior y se pierda.

Entonces, el que sea posible una reacción en cadena dependerá de la magnitud con que se verifique cada uno de estos sucesos:

- 1) Pérdida o fuga de neutrones del sistema.
- 2) Captura de neutrones por el núcleo escindible, pero sin ocasionar ruptura. Se denomina CAPTURA DE RESONANCIA, porque los neutrones así absorbidos poseen energías análogas a las que tienen las partículas que integran los núcleos atómicos.
- 3) Captura de neutrones por los diversos componentes del sistema (estructura del reactor, hormigón, madera, etc.) y que naturalmente no producen escisión.
- 4) Captura de neutrones por el material escindible, dando lugar a fenómenos de escisión y a la aparición de otros nuevos neutrones.

En cada uno de estos procesos se produce una pérdida de neutrones,

pero únicamente en el cuarto, simultáneamente a dicha pérdida, hay nueva aportación de los mismos.

Si el número de neutrones producidos en el último proceso resulta igual, o excede, a los perdidos o absorbidos en los tres primeros, la reacción en cadena es capaz de mantenerse a sí misma.

Las anteriores consideraciones sobre lo que se llama la ECONOMÍA DE NEUTRONES de una reacción en cadena, pueden quedar representadas por una magnitud que recibe el nombre de FACTOR DE MULTIPLICACIÓN EFECTIVO.

Dicha magnitud es «la relación que existe entre el promedio de neutrones liberados en cada etapa de una cadena de escisión y el número total de neutrones perdidos por absorción y por fuga».

Si el expresado factor es igual a la unidad, esto es, si el número de neutrones puestos en libertad es igual al de los perdidos por absorción o fuga, la cadena es estacionaria y se mantiene indefinidamente; se dice entonces que el sistema se encuentra en estado CRÍTICO.

Si el factor de multiplicación efectivo toma un valor inferior a la unidad, la cadena de reacción es convergente, y no es capaz de mantenerse a sí misma; este estado del sistema se denomina SUBCRÍTICO.

Por último, si el factor de multiplicación aparece con un valor superior a la unidad, la cadena es divergente y el sistema se dice SUPERCRÍTICO.

En estrecha relación con los valores de esta constante se encuentra el tamaño del sistema.

Entre todos los posibles existe uno para el cual se verifica que la liberación de neutrones por escisión está exactamente equilibrada por las pérdidas debidas a absorción y a fuga fuera del sistema.

Si se recuerda lo ya dicho, se comprenderá que son aquellas condiciones para las que hemos supuesto que el factor de multiplicación efectivo toma el valor unidad. Dicho tamaño recibe el nombre de CRÍTICO.

Pero no es únicamente el factor de multiplicación efectivo, o REACTIVIDAD, —como también suele llamarse en ocasiones— quien gobierna el tamaño del sistema. Hay otros, y uno de ellos es la forma.

En efecto; como quiera que los neutrones se liberan en toda la masa del sistema, mientras que la pérdida o fuga de los mismos tan sólo tiene lugar a través de la superficie exterior, la probabilidad de que un neutrón no se escape del sistema aumentará cuando lo haga la relación entre el volumen del mismo y su área correspondiente.

Ahora bien, el cuerpo sólido que tiene la mínima superficie para un valor dado del volumen es la esfera, y ésta es la razón por la cual los primeros ensayos sobre sistemas capaces de desarrollar una reacción en cadena se hicieran con conjuntos de forma esférica.

Otro hecho relacionado con la economía de los neutrones de una cadena de escisiones es la posibilidad de disminuir el tamaño crítico del sistema si se le rodea por un material que obligue a los neutrones. (que pretender escapar) a reintegrarse al sistema. Este material se denomina REFLECTOR, y su importancia es grande, no sólo desde el punto de vista ya expuesto, sino también en consideración al coste del sistema, pues reduce considerablemente la cantidad de materia escindible que hay que acumular para que se desarrolle la reacción en cadena.

Hemos indicado que los neutrones puestos en libertad, en el proceso de escisión, tienen diversos valores de energía. Según estos valores se clasifican en TÉRMICOS o lentos, RÁPIDOS e INTERMEDIOS.

Cada uno de estos tipos de neutrones sólo puede inducir la escisión en una sustancia concreta. Por ello, cuando dicha sustancia sólo es escindible por los neutrones lentos, debe existir en el sistema un agente que sea capaz de FRENAR los neutrones de los otros dos tipos, que tienen energías más altas, y los ponga en condiciones adecuadas para tomar parte en las reacciones de escisión.

Dicho agente se llama MODERADOR y será tanto más eficaz cuanto menor sea el número de choques que tenga que soportar un neutrón al atravesarlo hasta que su velocidad quede igualada con la de los neutrones térmicos.

Para desempeñar el papel de moderadores se emplean el agua ordinaria, el agua pesada, el berilio y su óxido, y sobre todo el grafito.

En la definición que hemos dado de reactor nuclear hemos establecido que la reacción de escisión ha de ser controlada. Por lo tanto, es importante disponer de algún medio para conseguir que la reactividad del sistema se mantenga con valores próximos a la unidad, condición necesaria para que las reacciones de escisión se puedan prolongar.

Con esta finalidad se emplean cuerpos que tienen la propiedad de absorber neutrones fácilmente y que, por consiguiente, mantienen el número de neutrones liberados en un reactor dentro de los límites convenientes. Más adelante insistiremos sobre este punto.

Así pues, de todo lo expuesto se deduce que un reactor nuclear ha de estar integrado, en principio, por las siguientes partes:

- Un material escindible,
- Un material moderador,
- Un material reflector y
- Un procedimiento de control.

Además de estos constituyentes esenciales, y en el caso de que se desee aprovechar la energía desprendida en las reacciones de escisión, que

es lo más frecuente, el sistema ha de incluir un REFRIGERANTE que elimine el calor producido en el lugar de las escisiones.

Creemos de interés exponer detalles complementarios sobre cada uno de los componentes de un reactor nuclear que acabamos de citar.

### Material escindible

Tres son los productos desintegrables susceptibles de ser empleados como combustibles nucleares:

Uranio-235

Plutonio-239

Uranio-233

De ellos, solamente el Uranio-235 se encuentra en la naturaleza, aunque mezclado con el Uranio-238, en la proporción de una parte del primero por 140 partes del segundo. Los otros dos son isótopos artificiales que se obtienen en el bombardeo con neutrones del uranio-238 y del torio-233.

Tanto el plutonio-239 como el uranio-233 son combustibles nucleares difíciles de obtener, hasta tal punto de que muchas naciones que cuentan con grandes recursos en uranio, sólo disponen de unos pocos miligramos de plutonio.

El uranio es el más asequible de los combustibles nucleares y se utiliza bien en forma de uranio natural, o como uranio enriquecido. Los combustibles enriquecidos se obtienen separando del uranio natural parte del uranio-238. Una de las principales finalidades perseguidas con el empleo de un combustible enriquecido es disminuir el tamaño crítico de un reactor.

En las primeras pilas atómicas, en las que aun era prematuro pensar en obtener energía útil a partir de la reacción en cadena, el uranio formaba pequeños bloques o dados que se introducían en el moderador.

En etapas posteriores el material escindible adoptó la forma de barras cilíndricas o prismas que en algunos casos eran agujereados para permitir el paso del fluido refrigerante.

Los elementos combustibles se protegen con envolturas de aluminio, zirconio, berilio o aleaciones especiales que presentan una absorción mínima a los neutrones. La finalidad de estas vainas metálicas es doble: por una parte, evitar fenómenos de corrosión debidos al contacto del combustible con el medio refrigerante, y por otra, impedir la dispersión de los residuos de la escisión, que por su alta radiactividad son peligrosos.

Al igual que todos los elementos fundamentales que intervienen en un reactor nuclear, el combustible ha de utilizarse en el estado de mayor pureza posible. Los primeros intentos que se hicieron para mantener una reacción en cadena no tuvieron éxito debido, principalmente, a las impurezas que acompañaban al uranio.

Para dar una idea de las extraordinarias precauciones y el exquisito cuidado que se pone durante el proceso de fabricación del uranio, referiremos lo siguiente:

Hace dos años tuvimos ocasión de asistir en París a una reunión de profesores universitarios dedicada al estudio y consideración de los temas nucleares. Entre las visitas que efectuamos a diversas instalaciones atómicas francesas, estuvimos en la planta de obtención de uranio de Le Buechet, situada en los alrededores de la capital francesa. Al iniciar la visita y pasar por el puesto de control de entrada, se nos rogó que depositásemos cualquier clase de tabaco que pudiésemos llevar.

En realidad, una fábrica para la obtención de uranio no presenta más peligro de incendio que cualquier otra. La razón por la que se nos privaba del tabaco se debía a que las pequeñísimas cantidades de boro, que generalmente lleva el humo de los cigarrillos, bastan para contaminar el uranio y hacerlo inútil como combustible nuclear.

### **Moderador**

Cuando el combustible de un reactor nuclear es uranio natural, solamente los neutrones térmicos son capaces de mantener la reacción en cadena en el uranio-235 que, como se recordará, es el elemento escindible. Por consiguiente, interesa disponer del mayor número de neutrones lentos. Esto se consigue utilizando sustancias de bajo peso atómico, mínimo poder absorbente para los neutrones y fáciles de obtener en estado de gran pureza. El papel de estas sustancias que, según dijimos reciben el nombre de MODERADORES, es actuar de agente pasivo en las colisiones con neutrones haciendo que éstos disipen su energía como consecuencia de una disminución de su velocidad.

El primer moderador utilizado en las experiencias realizadas por investigadores alemanes, allá por el año 1940, fue la parafina, que es una sustancia de tipo orgánico, compuesta solamente por átomos de carbono y de hidrógeno, y que tiene la cualidad de ser inerte a los fenómenos de corrosión y a la acción de los agentes químicos.

Sin embargo, la parafina fue pronto sustituida por el agua pesada.

Esta última sustancia no es más que agua ordinaria en donde los átomos de hidrógeno están sustituidos por átomos de deuterio, que es un isótopo del hidrógeno de masa 2.

El agua pesada es un compuesto muy costoso de obtener y antes de que se pensara en su utilidad como moderador de las reacciones en cadena, únicamente tenía aplicación en trabajos de investigación. Por ello, al comenzar la segunda guerra mundial casi no existían las plantas industriales dedicadas a su obtención. Concretamente en Europa solamente Noruega producía agua pesada, y ello, porque era un subproducto de otras fabricaciones. Este hecho se ha presentado como una de las razones de que los alemanes invadiesen aquella nación nórdica, con el fin de asegurarse el suministro del compuesto vital para sus trabajos sobre aplicaciones bélicas de la energía nuclear. Pero los ingleses que conocían el gran interés de los alemanes por el agua pesada y que estaban más o menos al tanto de lo que pretendían con ella, mediante una acción de comandos, destruyeron la fábrica noruega, obstaculizando de esta forma los trabajos germanos, hasta el punto de que cuando se produjo la rendición de Alemania, sólo encontraron un conjunto subcrítico que no podía mantener la reacción en cadena por falta de más cantidad de moderador.

Otro excelente agente moderador de neutrones es el grafito, que es una de las formas cristalinas del carbono.

Este moderador es mucho más abundante que el agua pesada, aunque su principal inconveniente reside en obtenerlo en un extremado grado de pureza, en el estado que se llama «nuclearmente puro». Los americanos han sido quienes han desarrollado la tecnología del grafito, ya que es éste el moderador que desde un principio utilizaron en sus experiencias sobre las reacciones en cadena.

También se han utilizado como moderadores el berilio y su óxido, aunque su aplicación es mucho menos frecuente debido a su gran toxicidad.

## Control

Aunque la condición suficiente para que un reactor opere de forma continua es que el factor de multiplicación efectivo sea la unidad, cuando se trata de aprovechar la energía desprendida en las reacciones de escisión, se ha de conseguir que dicho factor alcance valores superiores.

Esto sólo es posible desarrollando una reacción en cadena divergente.

Con el fin de que dicha reacción no degenera en una liberación violenta de energía, o sea, en una explosión nuclear, se ha de disponer de

algún medio para modificar a voluntad la reactividad del proceso y mantenerlo dentro de los necesarios límites de seguridad y utilidad.

Hay cuatro métodos generales que permiten variar el factor de multiplicación efectivo de una reacción de escisión, los cuales son la base de diversos procedimientos de control.

Dichos métodos implican la adición o eliminación de:

- combustible
- moderador
- reflector
- absorbente de neutrones.

Por lo general, los reactores de los últimos tipos construídos, o los que hay en proyecto, van dotados de una combinación de estos métodos con el fin de elevar el coeficiente de seguridad del reactor.

El procedimiento de control que se ha utilizado con más frecuencia dado su sencillez, es la inserción o extracción en la masa del reactor, de sustancias como el boro o el cadmio, que presentan gran avidez por captar neutrones. Los reactores que emplean neutrones térmicos o lentos utilizan métodos de control basados en aquel procedimiento.

En ocasiones, en vez de utilizar un absorbente que consuma neutrones, sin ningún beneficio o aprovechamiento posterior de los mismos, se usan barras de control fabricadas con sustancias que al ser bombardeadas por los neutrones del reactor se transforman en isótopos para múltiples fines.

Si el reactor ha de trabajar con neutrones rápidos, no es factible controlar la reacción mediante una sustancia que absorba neutrones dada la pequeña posibilidad de captación que dicho absorbente presenta a los neutrones de altas energías, como son los rápidos. En este caso, la reactividad se puede modificar a voluntad adicionando o retirando material combustible del corazón del reactor y alterando la posición relativa de la capa reflectora respecto al material combustible.

### **Refrigerante y transportador de calor**

Nos hemos referido en diversas ocasiones a la energía que se desprende en una reacción en cadena.

Esa energía —la energía nuclear—, que se desarrolla en el corazón del reactor se traduce en la aparición de una gran cantidad de calor, que es preciso eliminar para evitar que dañe peligrosamente la estructura del sistema.

Por otra parte, el aprovechamiento práctico y útil de una reacción en cadena se basa en transformar dicha energía calorífica en energía mecánica o en energía eléctrica.

Se precisa, por tanto, un vehículo que pueda eliminar dicha energía calorífica y la intercambie con el exterior en forma aprovechable.

Para estos fines se ha empleado con mucha frecuencia el agua ordinaria y el agua pesada. Estos líquidos tienen la doble ventaja de poseer una elevada capacidad calorífica, con lo que la velocidad de eliminación del calor es muy grande, y de ser líquidos a temperatura ambiente, aunque tienen el inconveniente de ser corrosivos para muchos metales, sobre todo a temperatura elevada.

Por otra parte, estos líquidos ofrecen la posibilidad de actuar simultáneamente como refrigerante y como moderador, reduciendo así el costo de las instalaciones del reactor.

El sodio, el potasio, el bismuto y las mezclas de estos metales en estado fundido, también constituyen buenos agentes enfriadores:

### **Tipos de reactores**

Una vez expuestas muy brevemente, algunas particularidades sobre los elementos de un reactor nuclear, vamos a considerar ahora los principales **Tipos de los mismos**.

Los reactores nucleares se pueden clasificar según la forma que el combustible está repartido en el sistema, y según el estado de los neutrones que propagan la reacción.

Si el combustible nuclear se encuentra situado en el volumen activo del reactor en unidades determinadas y concretas, independiente del moderador y de los restantes elementos, se denomina **HETEROGÉNEO**; si el combustible está distribuido de una manera uniforme, como en el caso de una disolución o de una suspensión, el reactor se llama **HOMOGÉNEO**.

Otro criterio de clasificación de reactores lo suministra el valor de la energía de los neutrones responsables de la reacción de escisión

Si los neutrones han de atravesar un moderador para adquirir los valores de la energía térmica, se trata de un reactor **TÉRMICO** o con **MODERADOR**.

Si los neutrones entran en colisión con un núcleo escindible sin ser frenados, el reactor se denomina **RÁPIDO**, o sin **MODERADOR**.

En los momentos actuales nadie puede precisar cuál de estas cuatro clases fundamentales constituirá la base de las aplicaciones prácticas más

importantes, ya que es posible construir reactores combinando las características de varios de ellos con el fin de adaptarlos mejor a un objetivo determinado.

En principio, un reactor térmico es fácil de controlar, mientras que uno rápido presenta más dificultades.

Por el contrario, un reactor rápido utiliza mejor los neutrones y el combustible disponibles y no presenta ciertos efectos de envenenamiento que dificultan el que un reactor se pueda poner en marcha después de haber sido detenido.

El reactor homogéneo parece a primera vista, bastante tentador: basta preparar una disolución o una suspensión de uranio y hacerla circular a través del recinto de reacción y un intercambiador de calor exterior. Pero este sencillo principio adolece de numerosos y graves problemas tecnológicos.

Sin embargo, aunque el reactor homogéneo está aún en estado de investigación, hay en funcionamiento actualmente una docena de ellos que son utilizados con fines experimentales.

\* \* \*

Los reactores que pertenecen a las cuatro clases indicadas dan lugar a una gran variedad de tipos.

En primer lugar, tenemos los **REACTORES CON MODERADOR DE GRAFITO**.

Pertenecen a la clase de los reactores heterogéneos. En ellos, el combustible nuclear se encuentra repartido según una forma relativamente sencilla dentro del volumen del grafito, que actúa de moderador.

La primera reacción en cadena fue conseguida por Enrico Fermi en 1942, en un sistema de este tipo.

Los reactores con moderador de grafito se caracterizan por ser de gran tamaño, ya que necesitan «apilar» grandes cantidades de uranio natural para alcanzar el estado crítico. De ahí el primitivo nombre de «pila atómica».

El reactor de este tipo que funciona en el laboratorio americano de Argonne (Chicago) pesa 1.400 toneladas.

En la actualidad hay en el mundo unos veinte reactores de estas características en funcionamiento.

La refrigeración por aire o por gas es la más conveniente para ellos.

Se emplean en investigaciones nucleares de carácter general, para la fabricación de plutonio y para la producción de energía.

En segundo lugar, están los reactores heterogéneos con **MODERADOR DE AGUA**.

El moderador de este tipo de reactores puede ser el agua ligera o el agua pesada.

El reactor con agua pesada es anterior al moderador con agua ligera, porque alcanza el estado crítico con uranio natural como combustible mientras que el reactor con agua ligera no puede llegar a ser crítico más que con un combustible enriquecido, que es más caro y más difícil de conseguir por las naciones que no poseen plantas especiales de separación de isótopos.

Hay aproximadamente unos veinte reactores en servicio y unos cuantos más en construcción. Este tipo quizás es el que más conviene en las instalaciones de investigación y en las pequeñas centrales nucleares.

El reactor moderado con agua pesada es económico desde el punto de vista de la utilización de los neutrones, pero exige una importante inversión económica en forma de agua pesada.

Para instalaciones de gran potencia, el reactor moderado con agua ligera parece convenir adecuadamente.

Los reactores con moderador de agua pueden funcionar bajo presión para evitar la ebullición del líquido. Esto permite que el agua circule a elevada temperatura y genere vapor en un circuito secundario. Igualmente se puede dejar hervir el moderador a alta temperatura y tomar el vapor para alimentar directamente una turbina.

Existe una tipo especial de reactor moderado con agua ligera. Es el REACTOR PISCINA, llamado así porque el corazón de combustible enriquecido está suspendido por un punto y sumergido en un gran baño de agua contenido en una cuba de hormigón. La columna de agua sirve de moderador y como escudo contra las radiaciones. Este es un reactor típico para realizar investigaciones fundamentales. Existen unos 25 de estos reactores distribuidos por numerosos países y se prevee la instalación de otros muchos.

Los REACTORES HOMOGÉNEOS no han pasado aún de la etapa experimental. El combustible puede estar en disolución o encontrarse en forma de muy pequeñas partículas suspendida en un lodo soporte.

Un último tipo de reactores está constituido por los llamados RÁPIDOS o INCUBADORES RÁPIDOS.

Estos reactores suponen el empleo de un combustible nuclear fuertemente enriquecido, o puro, y funcionan sin ningún agente moderador, es decir, como una bomba atómica que se quemara lentamente.

Como en ellos no puede intervenir ninguna sustancia que produzca un efecto de frenado y moderación sobre los neutrones, es imposible refrigerarlos con agua; es preciso emplear metales líquidos, u otros medios de refrigeración, que no moderen los neutrones.

El uranio-235 es el combustible primario que se utiliza en todos los reactores. El plutonio es un combustible secundario obtenido en aquellos reactores que se cargan con uranio que no sea uranio-235 puro. El plutonio se puede extraer y quemar en otros reactores, pero una pequeña cantidad siempre es quemada en el curso mismo de la producción.

El torio se puede convertir en combustible nuclear por captura de neutrones. El torio-232 se transforma así en uranio-233, que es escindible y se puede utilizar en los reactores.

Entonces, tanto el uranio-235 como el torio-232, al ser quemados en un reactor nuclear, dan origen a nuevo y distinto material escindible. De ahí el nombre de INCUBADOR con el que se designan estos reactores.

También existen reactores de TIPO COMBINADO en los que entran en juego a la vez los neutrones rápidos y los neutrones moderados. Parece ser que en estos reactores los problemas de transporte de calor y de control son más fáciles de resolver.

\* \* \*

El uso que se hace de un reactor nuclear también puede ser un criterio para su clasificación, ya que un tipo puede convenir mejor que otro a una aplicación determinada.

Vamos a pasar revista brevemente a las siguientes clases:

Reactores de investigación,

Reactores de potencia,

Reactores de propulsión,

Reactores destinados a la producción de sustancias y otros usos.

### **Reactores de investigación**

Los temas de investigación en los cuales intervienen los reactores nucleares son dos:

1) Estudiar la física de los reactores con el fin de comprender mejor su funcionamiento y perfeccionar su construcción.

2) Realizar estudios fundamentales en el campo de la Física nuclear, o investigar sobre la estructura de los materiales y los efectos que las radiaciones ejercen sobre ellos. En este caso el reactor sólo sirve como fuente de neutrones y de radiaciones.

Los reactores destinados a estos fines son conjuntos subcríticos o críticos pero funcionando a un nivel cero de potencia. Estas instalaciones exigen pocas condiciones de seguridad y basta con un equipo reducido para realizar un trabajo eficaz.

Para estos fines de investigación ha adquirido un gran desarrollo en los últimos tiempos los reactores tipo «piscina», ya que dentro de lo costosas que son estas instalaciones, resultan de los más económicos.

La Junta de Energía Nuclear dispone en el Centro «Juan Vigón» de la Moncloa, en Madrid, de un reactor de estas características.

### **Reactores de potencia**

Un reactor concebido para producir energía juega el mismo papel que una caldera de vapor de una central térmica clásica para producir electricidad.

En una central nuclear el papel del reactor es producir energía térmica destinada a ser transformada en energía mecánica o eléctrica en un turbo-generador.

Como quiera que para obtener un rendimiento apreciable es necesario que el reactor funcione a temperatura elevada, existen limitaciones en cuanto a los materiales del reactor, pues los fenómenos de corrosión son intensos y complejos los problemas de transporte de calor.

En el transporte del calor desde el corazón del reactor hasta los intercambiadores de calor que lo aprovechan se emplean agua ordinaria y su vapor, aire, dióxido de carbono y otros gases, y hasta metales fundidos.

Si en la refrigeración se emplea el agua, ésta ha de mantenerse bajo presión para evitar su ebullición.

### **Reactores de propulsión**

Los ensayos efectuados en los Estados Unidos han demostrado que los reactores nucleares pueden servir perfectamente para alimentar una máquina de propulsión.

Los submarinos atómicos, tipo «Nautilus», capaces de navegar 50.000 millas sin repostar combustible, son un exponente de lo que promete la energía nuclear en el campo de la navegación.

En la actualidad, se realizan numerosos estudios conducentes a la construcción de reactores nucleares para la propulsión naval. El problema es bastante complicado porque no basta elegir un reactor terrestre conveniente y situarlo a bordo de un navío. Se han de resolver serios problemas derivados del hecho de que el reactor no descansa sobre una base fija e inmóvil, sino que debe moverse y circular junto con el navío.

Los grandes buques que hacen largos recorridos y están poco tiempo en los puertos son, sin duda, los que presentan las condiciones más favo-

rables para la propulsión por reactores. Este es el caso de los petroleros. Es curioso, por otra parte, la situación que se crea.

Las perspectivas en el campo del petróleo parecen sombrías ante la posibilidad del agotamiento de las reservas mundiales de este combustible y se piensa remediarlo con el empleo del combustible nuclear. En fin de cuentas, si no hay petróleo que transportar, tampoco hay necesidad de petroleros movidos por reactores.

El tipo de reactores que actualmente parece más razonable emplear en la propulsión de buques es el reactor de agua ligera bajo presión. Pero lo que no es posible, es aplicar sin más los resultados obtenidos en los navíos de guerra, donde el gasto es secundario, a la marina mercante para la que el factor económico es decisivo.

### **Reactores que sirven para la obtención de isótopos y otros usos**

Un reactor también se puede considerar como una instalación productora de sustancias. Así, los reactores que producen plutonio suministran además calor y energía como subproductos. Otro ejemplo está en los reactores que por exposición a las radiaciones o a los neutrones de su interior producen isótopos radioactivos de todos los elementos fundamentales.

Una de las aplicaciones pacíficas de los reactores nucleares que cuenta con mayor porvenir es la derivada de la radiación gamma que tiene su origen en los productos resultantes de la escisión nuclear.

Los rayos gamma —que son casi idénticos a los rayos X— tienen un gran poder de penetración para muchos materiales, incluso metales, por lo que son capaces de destruir bacterias y microorganismos y provocar reacciones químicas importantes. Sus posibilidades como agente esterilizador de productos farmacéuticos y en la conservación de sustancias alimenticias son enormes. Estas posibilidades se encuentran bajo investigación en casi todos los centros atómicos del mundo.

\* \* \*

Al principio de esta charla nos referíamos a la cara risueña y prometedora de la energía nuclear, pensando en las inmensas posibilidades de progreso que significa una nueva fuente de energía.

Si bien se medita, los avances de la humanidad siempre han estado sincronizados con la entrada en juego de las reservas energéticas que la naturaleza guardaba en su seno desde el principio de los tiempos.

El carbón, el petróleo, la energía eléctrica... ya consumieron su turno. Ahora le toca el suyo a la energía nuclear.

Y todos nosotros, señores, somos testigos de mayor excepción.