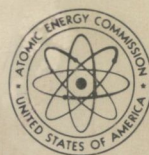


REACTORES NUCLEARES ■ EE. UU.



COMISION DE ENERGIA ATOMICA DE LOS EE.UU./ División de Información Técnica



REACTORES NUCLEARES ■ EE. UU. / SUMARIO

- 1 INTRODUCCION
- 2 COMO FUNCIONAN LOS REACTORES
- 10 VARIACIONES SOBRE UN TEMA
- 12 REACTORES DE INVESTIGACION, DE INSTRUCCION Y DE PRUEBA DE MATERIALES
- 16 REACTORES DE PRODUCCION
- 19 REACTORES PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA
- 25 REACTORES ABASTECEDORES DE CALOR PARA PROCESOS INDUSTRIALES
- 25 REACTORES PARA PROPULSION DE BARCOS
- 27 REACTORES PARA APLICACIONES EN EL ESPACIO
- 32 SOBRE LA SEGURIDAD DE LOS REACTORES
- 35 REACTORES DEL MAÑANA
- 36 APENDICE
- 36 Características típicas de los más importantes Reactores de Potencia para Usos Civiles de los EE.UU.
- 40 Proyectos de Centrales de Energia Atómica de Alta Capacidad de los EE.UU.
- 41 • REFERENCIAS RECOMENDABLES



LA PORTADA

Gran mosaico instalado en una de las paredes del blindaje del reactor de investigación e instrucción "TRIGA" de la Kansas State University (Universidad del Estado de Kansas). Representa el alcance ilimitado de la energía del átomo para usos pacíficos. Fué creado por los estudiantes del Departamento de Arquitectura de la universidad en consulta con el Departamento de Ingeniería Nuclear. Mide 2 metros de alto por 1,2 metros de ancho y está compuesto de cerca de 10.000 pedazos de vidrio en colores. Al lado inferior izquierdo las "manos suplicantes" imploran a la humanidad que la energía nuclear se use con prudencia. (Fotografía de Kansas State University y General Dynamics).

EL AUTOR

John Hogerton, Ingeniero Químico (B.E., Yale, 1941) e Ingeniero Nuclear, ha participado en la industria nuclear desde su comienzo. Es en la actualidad consultor independiente.

El Ing. Hogerton fué coautor del informe final relacionado con el proyecto de difusión de gases de Oak Ridge desarrollado durante la guerra. Sirvió además, en el grupo "Manhattan Project Editorial Advisory Board" que coordinó la publicación de la National Nuclear Energy Series, la cual consiste de varios tomos.

El Ing. Hogerton fué editor de la primera edición en cuatro tomos titulada **Reactor Handbook** (Manual de Reactores). Contribuyó también a la publicación titulada **A Glossary of Terms in Nuclear Science and Technology** (Glosario de Términos en Tecnología y Ciencia Nuclear), publicada por la American Society of Mechanical Engineers (Sociedad de Ingenieros Mecánicos de los EE.UU.) y escribió el folleto titulado **Uranium, Plutonium and Industry** (Uranio, Plutonio y la Industria), cuyo uso es extensísimo. En el 1958 escribió el tomo conmemorativo de la Conferencia de Ginebra de ese año para la USAEC con el título **Atoms for Peace — U.S.A. — 1958** (Átomos Para la Paz — EE.UU. — 1958). También escribió para la USAEC la enciclopedia en un tomo titulada **The Atomic Energy Deskbook** (Manual de Energía Atómica), publicada en el 1963, y **Atomic Fuel** (Combustible Atómico), otro de los folletos de este serie.

REACTORES NUCLEARES ■ EE. UU.

Por John F. Hogerton

INTRODUCCION

El descubrimiento de la fisión nuclear anunciado por Hahn y Strassmann en enero del año 1939 puso en marcha la era del desarrollo de la energía atómica. El verdadero auge, sin embargo, no empezó hasta tres años después, cuando un grupo de científicos bajo la dirección de Enrico Fermi demostró que, no sólo era posible obtener una reacción de fisión en cadena automantenida, sino que, aún más importante, ésta podía regularse.

La operación del primer reactor nuclear se logró el día 2 de diciembre del año 1942 a las 3:25 de la tarde en un laboratorio provisional instalado bajo las gradas occidentales del estadio Stagg de la Universidad de Chicago. En comparación con los reactores modernos, este primer modelo era sumamente rudo pues consistía sólo en un montaje rústico de lingotes de uranio y bloques de grafito de unos 24½ pies (7,5 metros) de ancho y unos 19 pies (5,8 metros) de alto. Ya que el método de construcción consistió simplemente en colocar bloques de grafito sobre lingotes de uranio sistemáticamente arreglados, se le dió el nombre de "pila atómica" al montaje original. El nombre ahora preferido es "reactor nuclear".

Centenares de reactores se han puesto en operación en los EE.UU. después del experimento de Stagg Field. Más adelante explicaremos los diversos usos de los reactores y el desarrollo de diversos programas importantes relacionados con los reactores. Antes de entrar en esta discusión debemos primero explicar los principios fundamentales sobre reactores en general.



COMO FUNCIONAN LOS REACTORES

Empezaremos con la reacción de fisión en sí. En esta reacción, cuando una partícula subatómica llamada neutrón se hace chocar con el centro o núcleo de ciertos átomos, éste último se divide en fragmentos radiactivos llamados productos de fisión. Estas partículas o fragmentos se desprenden a gran velocidad y generan calor al chocar con la materia que les rodea. La fractura o fisión de este núcleo atómico va acompañada de la emisión de radiaciones gamma, parecidas a los rayos X. Al mismo tiempo se emiten dos o tres neutrones adicionales. Estos, a su vez, pueden chocar con otros núcleos, causando así fisiones o fracturas adicionales. Si este proceso continúa sin interrupción, tenemos entonces lo que se conoce por "reacción en cadena".

Un reactor nuclear es un aparato que sirve para empezar y regular una reacción en cadena autosostenida. Por razones que más adelante se explicarán, bien podría este aparato llamarse "máquina neutrónica" (neutron machine).

Los reactores nucleares tienen varios usos, por ejemplo:

1. Para proveer haces de neutrones intensísimos para experimentos científicos.
2. Para producir nuevos elementos o materiales por medio de irradiación con neutrones.
3. Para producir calor y generar energía eléctrica, para propulsión, para procesos industriales y muchas otras aplicaciones.

Cada uno de estos usos se explicará en detalle más adelante.

Los componentes básicos de un reactor se ilustran en la Figura 1. Son éstos los siguientes:

Un "núcleo" de combustible (Núm. 5 en la Fig. 1).

Un "moderador" que reduce la velocidad de los neutrones y ayuda así el proceso de fisión (Núm. 6 en la Fig. 1).

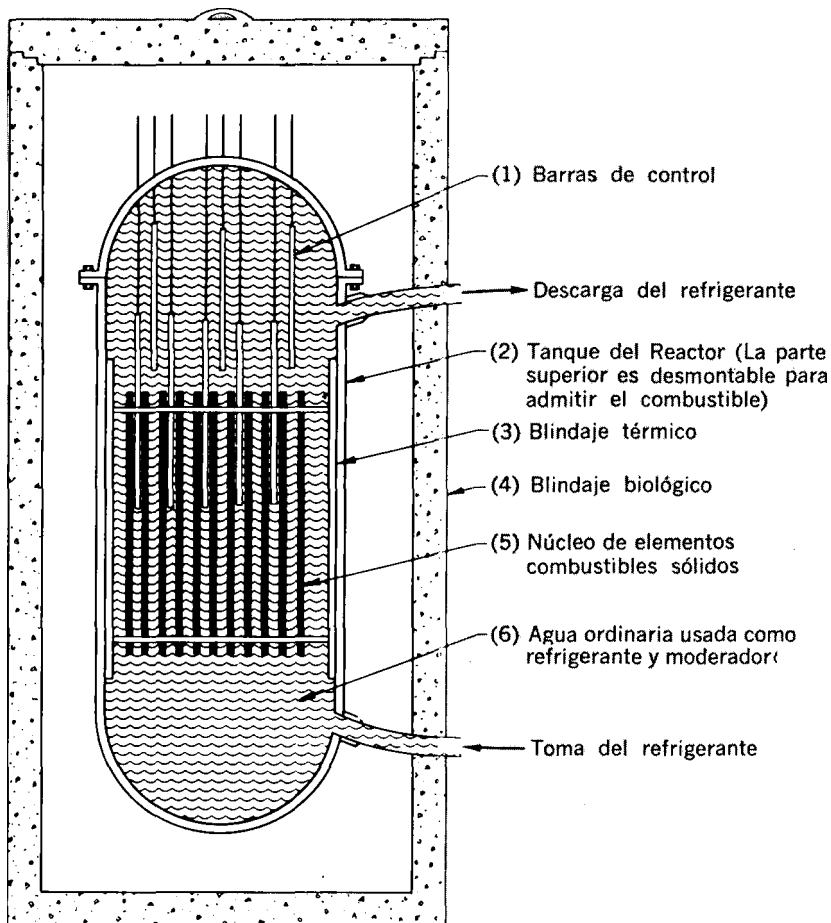


Figura 1. Reactor Nuclear (Tipo – Agua a presión)

Un medio de regular el número de neutrones libres y así regular la fisión (Núm. 1 en la Fig. 1).

Un medio de extraer el calor generado en el núcleo del reactor (en el reactor de la Fig. 1 esto se logra con el agua refrigerante). (Núm. 6 en la Fig. 1).

Un “blindaje” o protector contra radiaciones (Núms. 3 y 4 en la Fig. 1).

Estos componentes se describen a continuación:

EL COMBUSTIBLE. El ingrediente esencial del combustible de un reactor ha de ser un material que sea

fisionable, esto es, una sustancia que se fisione o desintegre fácilmente al ser bombardeada con neutrones. La única sustancia que en su estado natural es fácilmente fisionada o fracturada por neutrones lentos es el uranio-235. Este elemento es un isótopo de uranio y constituye menos del uno por ciento (actualmente 0,71%) del elemento uranio tal como existe en su estado natural. Casi todo el resto del uranio natural consiste en uranio-238, el cual se conoce por "material fértil" pues puede transformarse en otra sustancia fisionable llamada plutonio. Esta transformación ocurre al irradiar el uranio-238 con neutrones.*

El combustible de un reactor consiste por lo regular en una mezcla de materiales fisionables con materiales fértiles. Durante la operación del reactor, según se va irradiando el combustible, los átomos del material fisionable se van consumiendo pero al mismo tiempo el material fértil va produciendo NUEVOS átomos fisionables. La proporción de nuevos átomos fisionables consumidos a la de nuevos átomos formados depende del diseño del reactor. En el reactor "reproductor" es posible lograr una pequeña ganancia neta de material fisionable; sin embargo, actualmente, casi todos los reactores funcionan con una pérdida neta de material fisionable. Debe indicarse, no obstante, que aunque el reactor "reproductor" produce más material fisionable que el que consume, no es por esto una "máquina mágica". El proceso de reproducción es simplemente un medio de convertir material fértil en material fisionable asegurando así el buen uso de nuestras fuentes de combustible nuclear.

El porcentaje de átomos fisionables en la mezcla de combustible es un factor de suma importancia pues afecta el tamaño físico del reactor. Cuanto más rico en átomos fisionables es el combustible, más compacto puede ser el reactor. Aunque hay limitaciones prácticas

*De la misma manera, el uranio-233 que es otra sustancia fisionable, puede producirse irradiando el elemento torio con neutrones. Hay, por consiguiente, tres materiales fisionables básicos, (uranio-235, plutonio y uranio-233) y dos materiales fértiles (uranio-238 y torio).

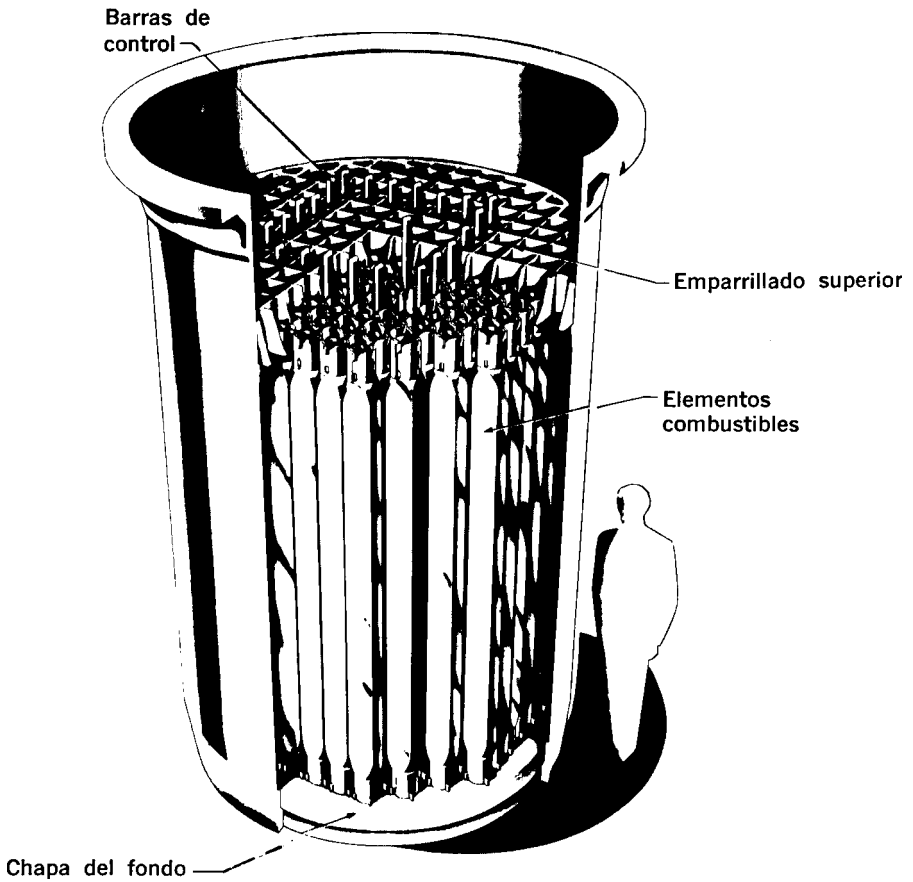


Figura 2. Representación del núcleo del reactor de la Central Eléctrica Nuclear de Shippingport (Estado de Pensilvania, EE.UU.). Los elementos combustibles van sostenidos por el emparrillado superior y la plancha del fondo. Este arreglo compacto constituye una masa crítica. La reacción en cadena resultante genera calor, el cual es extraído por el agua refrigerante que circula de la parte inferior a la superior por los canales. Las varillas que sobresalen en la parte superior son barras de control que se utilizan para regular o "controlar" la reacción y además, como dispositivos de seguridad.

Fotografía — Cortesía de la División de Energía Atómica de la Westinghouse.

en este punto de diseño, no es necesario discutirlos al presente. Algunos reactores se abastecen con uranio natural que, como hemos indicado anteriormente, tiene una concentración de átomos fisionables de menos de un uno por ciento. Otros se abastecen con uranio un poco

más enriquecido; y aún otros, especialmente los que se usan para propulsión, donde el tamaño compacto es esencial, utilizan uranio bien enriquecido.†

Otro aspecto importante del combustible para reactores es su forma física. Algunos reactores utilizan combustible líquido, como por ejemplo una solución líquida de uranio enriquecido. Generalmente, sin embargo, el combustible se usa casi siempre en estado sólido, bien sea uranio metálico, óxido de uranio o carburo de uranio. El combustible sólido se fabrica en varias formas, como pequeñas placas, bolines, clavillos, etc., las cuales se empacan en unidades compactas llamadas "elementos combustibles". El núcleo de un reactor puede contener desde diez hasta cientos de estos elementos, sostenidos y geoméricamente ordenados por emparrillados.

Casi todos los elementos combustibles sólidos van provistos de un revestimiento o camisilla que, además de servir como parte integral del elemento, impide el contacto directo entre el líquido refrigerante y el combustible en sí. Los materiales más comunes para revestimiento son el acero inoxidable y el circonio, para reactores de potencia, y el aluminio cuando se trata de reactores de investigación.

EL MODERADOR. Los neutrones liberados en una reacción en cadena se mueven a grandes velocidades al principio, pero al chocar con el material componente del núcleo del reactor pierden velocidad. Esta reducción en velocidad es ventajosa, pues los neutrones lentos producen fisión más efectivamente que los rápidos. Sin embargo, si las colisiones son numerosas, se corre el riesgo de que algunos neutrones choquen con átomos y sean absorbidos sin producir fisión. (Los productos de fisión, por ejemplo, absorben neutrones rápidamente). Lo que se necesita es un material que pueda frenar los neutrones rápidamente pero sin absorberlos. A este material se le da el nombre de "moderador".

†El uranio enriquecido, con variaciones desde un uno por ciento a un 90 por ciento o más de material fisionable, se obtiene sometiendo el elemento a un proceso conocido por "separación de isótopos".

La masa de un neutrón es casi igual a la de un átomo de hidrógeno; así pues, aquellos materiales con concentraciones de hidrógeno u otros átomos livianos, son los moderadores más eficientes.*

Entre los materiales que más se usan como moderadores pueden enumerarse el agua ordinaria, el agua pesada, el grafito, el berilio y algunos compuestos orgánicos.

El moderador debe estar bien distribuido en el envase o recipiente. En algunos reactores esto se logra mediante un arreglo simétrico del material moderador y en otros, mezclando íntimamente el material moderador con el combustible.

Debe advertirse que los reactores en los cuales se utilizan elementos combustibles con alto enriquecimiento y con montajes bien compactos, no necesitan moderador, pues pueden funcionar eficazmente con neutrones rápidos. Estos reactores se conocen por "reactores rápidos".

SISTEMA DE CONTROL (REGULACION) — La mayoría de los reactores nucleares se controlan regulando la cantidad de neutrones presentes en el núcleo del reactor. Esto se logra usando substancias, como el boro o el cadmio, que poseen altos coeficientes de absorción neutrónica. (En efecto, estas substancias actúan como reprimentes de neutrones). Generalmente, estas substancias se insertan en el reactor en forma de varillas conocidas por "barras de control". El reactor típico viene ya provisto de un juego de barras de control (o barras reguladoras) para regulación rutinaria y un juego suplementario conocido por "barras de seguridad" las cuales se usan para paralizar la reacción en cadena del reactor en caso de emergencia.

Debe recordarse que cada átomo de combustible que se fisiona emite o libera dos o tres neutrones. Estos neutrones quedan libres sólo por un instante mínimo (del orden de $1/10.000$ de un segundo) entre el momento de emisión y el momento en que realizan una nueva fisión

*Para entender mejor este argumento, imagínese tratar de retardar el movimiento de una bolita de "ping-pong" (tenis de mesa), con una de boleo.

o son absorbidos. Por lo tanto, el más mínimo aumento en la población neutrónica, entre “generaciones” consecutivas, sería suficiente para multiplicar la velocidad de fisiones cientos de veces por segundo. Afortunadamente, algunos neutrones no se desprenden instantáneamente. Manteniendo la cantidad de neutrones en el sistema a un nivel tal que haya siempre necesidad de estos neutrones “retardados” para sostener la reacción en cadena, el aumento en la velocidad de fisión es sólo de un uno a un dos por ciento por segundo. Esto es suficientemente bajo para mantener la reacción regulada.

Con estos datos básicos los rudimentos de la regulación del reactor se hacen fáciles de entender. Cuando el reactor se abastece de combustible, las barras de control y las de seguridad están completamente insertadas o en posición “adentro”. Una vez abastecido, el reactor se pone en operación sacando por completo las barras de seguridad y parcialmente las barras de control. Esta última operación se hace gradualmente en respuesta a señales emitidas por instrumentos contadores de neutrones que supervisan la velocidad de fisión. Una vez que el reactor logra su “criticalidad” o sea reacción en cadena autosostenida, sólo resta ajustar las barras de control para obtener las condiciones de operación deseables. Si el operador desea aumentar el nivel de reacción automantenida, lo consigue sacando aún más las barras de control y ajustándolas luego debidamente. Si, por el contrario, desea suspender la operación del reactor por completo, puede lograrlo insertando las barras de control por completo.

Un aspecto, con respecto a la operación de reactores, que merece mención en esta discusión es la “pérdida de reactividad”. Hemos visto que a medida que el combustible se consume, se van formando productos de fisión. Estas sustancias absorben neutrones que al acumularse reducen la reactividad del combustible. (Es como si un fuego se ahogase lentamente por sus propias cenizas). Para compensar este efecto (y también el consumo de combustible) es necesario sobrecargar el reactor con más combustible del mínimo necesario para lograr el comienzo de la reacción. Este combustible extra provee “exceso

de reactividad" lo cual asegura la continuidad de la reacción. Esta se retiene en balance por medio de contaminantes de control, los cuales deben retirarse gradualmente según la operación va progresando. La cantidad de "reactividad excesiva" necesaria es de suma importancia en el diseño del sistema de regulación.

SISTEMA DE EXTRAER EL CALOR. La energía liberada en el proceso de fisión consiste más o menos en los siguientes componentes:

Energía cinética de productos de fisión	84,0%
Energía cinética de neutrones	2,5%
Liberación instantánea de rayos gamma	2,5%
Desintegración gradual radiactiva de productos de fisión	11,0%
	<hr/>
	100,0%

Tan pronto los productos de fisión (y los neutrones) chocan con la materia contigua, casi toda su energía cinética se convierte instantáneamente en calor. Casi todo este calor se genera en el núcleo del reactor.

Si el reactor se ajusta para funcionar a nivel "cero" de energía térmica (esto es, unos pocos vatios), la cantidad de calor generada es tan pequeña que puede disiparse sin necesidad de refrigerante en el sistema. Sin embargo, casi todos los reactores funcionan a niveles de potencia elevados (en cantidades de kilovatios o megavatios de energía térmica). Para evitar que el núcleo se derrita con el exceso de calor, se necesita, por lo tanto, enfriar el sistema. En los reactores de potencia y en los de propulsión, el calor extraído es el producto principal.

Uno de los aspectos más interesantes de los reactores nucleares es que, básicamente, pueden funcionar a cualquier nivel de potencia deseado. En la práctica, el factor restrictivo es la rapidez con que el refrigerante pueda extraer el calor del núcleo del reactor. Algunos reactores cuentan con la convección natural del refrigerante para este propósito; no obstante, la gran mayoría de los reactores vienen ya equipados con sistema de circulación

forzada. Existe al presente una gran variedad de refrigerantes. Entre los gases merecen mención el aire, el helio y el dióxido de carbono; entre los líquidos, el agua ordinaria, el agua pesada y algunos compuestos orgánicos; y por último, algunos metales líquidos como sodio y litio. En algunos reactores el refrigerante sirve además de moderador, mientras que en otros el refrigerante y el moderador van separados.

Los reactores utilizados en investigación funcionan, por lo regular, a temperaturas relativamente bajas (a menos de 200° F), mientras que los de potencia y los de propulsión funcionan a temperaturas relativamente elevadas (sobre los 500° F) para facilitar así la conversión de rendimiento calorífico a energía eléctrica o a fuerza motriz.

EL BLINDAJE CONTRA RADIACIONES. La parte de energía de fisión que no se transforma instantáneamente en calor, se emite en forma de penetrantes radiaciones atómicas. Los reactores nucleares, por consiguiente, deben estar fuertemente blindados. A propósito, debe indicarse aquí la diferencia entre el “blindaje térmico” interno y el “blindaje biológico” externo. El primero se utiliza en los reactores de alta potencia para proteger el tanque principal contra radiaciones y el segundo, con el cual estamos más familiarizados, es el que protege el personal contra exposición a irradiaciones. El blindaje térmico interno consiste comúnmente en un revestimiento o forro de acero y el blindaje externo consiste casi siempre en una cubierta o armazón de hormigón de varios pies (1 pie = 30 cm.) de espesor que cubre la instalación completa.



VARIACIONES SOBRE UN TEMA

Hasta aquí el lector muy bien ha podido concebir el reactor como un envase tri-dimensional dentro del cual aparentemente se juega un partido de tenis miniatura

rapidísimo, jugado con neutrones, en una caja llena de átomos de combustible y moderadores, y varias varillas ajustables para la regulación y un ventilador para enfriamiento.

¿Cuál es en realidad la forma física de un reactor? En verdad puede decirse que hay un gran número de diseños básicamente diferentes y cabida para muchos más.

La multitud de diseños se debe a varias razones. En primer lugar, como ya se ha mencionado anteriormente, el diseñador tiene gran variedad de material a escoger. En segundo lugar, la variedad de usos es amplísima y, en tercer lugar, cada diseñador tiene su propia idea de cómo variar el diseño de acuerdo con el uso futuro.

En cuanto a este último extremo, es hasta cierto punto conveniente que los expertos no lleguen a un acuerdo unánime de uniformidad de diseño pues, de ser así, la tecnología de reactores perdería tal vez el ímpetu tan dramático que actualmente lleva. El funcionamiento de un reactor depende de los límites de función de sus materiales componentes. La investigación de los materiales y, en particular, la de los combustibles y accesorios como bombas, válvulas, etc. está creando constantemente nuevas posibilidades de diseño. Por consiguiente, el mérito relativo de cada diseño requiere reevaluación frecuente, estimulándose aún más su desarrollo.

Es tiempo ya de que hablemos sobre el uso de los reactores y sobre los programas de fomento más importantes. Estos se discutirán en el orden siguiente:

Reactores de investigación, de instrucción y de prueba de materiales.

Reactores de producción.

Reactores para generar energía eléctrica.

Reactores proveedores de calor para procesos industriales.

Reactores para la propulsión de barcos.

Reactores para aplicaciones en el espacio.

Más adelante se discutirán en breve ciertos aspectos relacionados con la seguridad de reactores.



REACTORES DE INVESTIGACION, DE INSTRUCCION Y DE PRUEBA DE MATERIALES

REACTORES DE INVESTIGACION. El reactor de investigación es en realidad la única fuente verdaderamente versátil en la producción de radiaciones atómicas para propósitos experimentales. Como ejemplo de las adaptaciones que estos reactores tienen en la ciencia, pueden enumerarse las siguientes:

En física nuclear. Estudio de reacciones nucleares, irradiando muestras de diversos materiales.

En física del estado sólido. Determinación de la estructura del cristal de materiales por medio de la difracción de neutrones.

En química de la radiación. Estudio de los efectos producidos por las irradiaciones en las reacciones químicas y en las propiedades de algunos materiales como los plásticos.

En química analítica. Identificación de indicios de impurezas en materiales a base de análisis por activación.*

En biología. Inducción de mutaciones genéticas en las plantas, irradiando la semilla.

En medicina. Tratamiento experimental de ciertos cánceres del cerebro por un método conocido por "terapia por captura neutrónica".

Otros. Producción de radioisótopos para el uso en los laboratorios. En algunos experimentos el material se inserta directamente en el reactor para irradiarse, mientras que en otros el material se coloca en el trayecto de los rayos neutrónicos disparados a través de orificios en el blindaje del reactor.

Los reactores se clasifican comúnmente de acuerdo con su "flujo neutrónico" o sea, de acuerdo con la intensidad de sus campos o haces neutrónicos emitidos. El

*Cada especie de átomo radiactivo tiene su modo distintivo de desintegración. En el análisis por activación, la muestra se hace radiactiva por medio de activación neutrónica. Analizando, luego, la muestra con instrumentos de detección sensibles, pueden identificarse las substancias en dicha muestra.

flujo neutrónico tiene cierta relación con el nivel de potencia de operación pero depende, además, del diseño del reactor.

Entre los reactores de investigación existe mucha diversidad de diseño básico. Los más conocidos son el "reactor de piscina" y el "reactor de depósito" o "de cuba". En el primero, como lo demuestra la Fotografía 1, el núcleo del reactor va suspendido dentro de un estanque (o piscina) descubierta, relativamente hondo y lleno de agua ordinaria. El agua, en este caso, sirve como refrigerante, como moderador y como blindaje. Este arreglo ofrece mucha flexibilidad pues la posición del núcleo puede cambiarse y ajustarse fácilmente. Además, los dispositivos de investigación pueden colocarse debidamente y el diseño al descubierta permite la observación directa del procedimiento.

En el reactor de depósito (o de cuba) el núcleo va fijamente colocado dentro de un tanque cerrado. El refrigerante más común para esta clase de reactores es el agua ordinaria pero en algunos modelos se usa el agua pesada para este fin. El reactor de depósito funciona generalmente a niveles de potencia más elevados que los reactores de piscina y proveen, por consiguiente, más flujo neutrónico.

Es difícil evaluar el costo relativo de los reactores de investigación ya que este costo depende en gran parte de la variedad de dispositivos y componentes auxiliares. La inversión total en la instalación de un reactor de piscina, incluyendo el edificio y la instalación de sus correspondientes servicios es, en números redondos, de uno a tres millones de dólares. El capital correspondiente para un reactor de depósito es de uno a cinco millones de dólares.

REACTORES DE INSTRUCCION. Los reactores de instrucción son generalmente pequeños y de bajo flujo, diseñados expresamente para facilitar la enseñanza sobre reactores y al mismo tiempo para proveer medios, aunque limitados, de investigación y producción de radioisótopos. Existe en el mercado una variedad de tipos. Algunos vienen ya del todo montados y preparados para instalarse en el laboratorio inmediatamente. El precio de estos



Fotografía 1. Reactor de investigación tipo "piscina". El brillo emitido por el núcleo del reactor en el fondo de la piscina se llama "Radiación Cherenkov" y ocurre cuando partículas cargadas de electricidad pasan a través de un medio transparente a velocidades superiores a la velocidad de la luz.

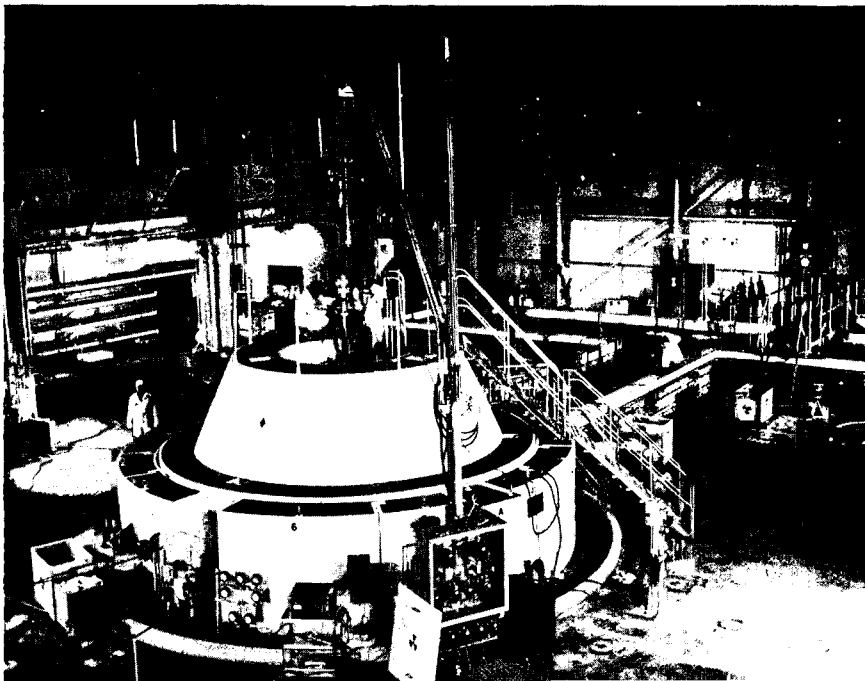
Fotografía-cortesía de la Universidad de Michigan, EE.UU.

reactores fluctúa entre los cien mil y doscientos mil dólares, incluyendo servicio de entrega e instalación. Otros, aún con más detalles de construcción pero también más versátiles, fluctúan en precio hasta los quinientos mil dólares.

REACTORES DE PRUEBA DE MATERIALES. Estos reactores son de flujo neutrónico elevado y se utilizan para probar las características funcionales de los materiales y demás componentes utilizados en la construcción de reactores bajo condiciones de irradiación. Se pueden obtener, de este modo, los datos esenciales para el diseño de nuevos reactores. Generalmente, pueden funcionar a diversos niveles de carga y se utilizan principalmente en los programas de fomento y desarrollo de reactores de potencia. Al presente, la instalación más grande en servicio en los EE.UU. es el Engineering Test Reactor (ETR) (Fotografía 2), instalado en la Estación de Pruebas de la USAEC en la vecindad de Idaho Falls, Idaho, EE.UU. El ETR, cuyo diseño es parecido al de los reactores de depósito, pero mucho más grande, funciona a niveles de potencia hasta los 175.000 kilovatios (rendimiento termal) y representa una inversión de dieciseis millones de dólares aproximadamente. Este reactor está provisto de dispositivos con los cuales se pueden conducir diversos experimentos de irradiación bajo condiciones de temperatura, presión y flujo sinónimos a los de un reactor de potencia actualmente en operación.

Fotografía 2. Vista general del Engineering Test Reactor (Reactor de Pruebas) demostrando la parte superior del blindaje.

Fotografía-cortesía de Phillips Petroleum Company.



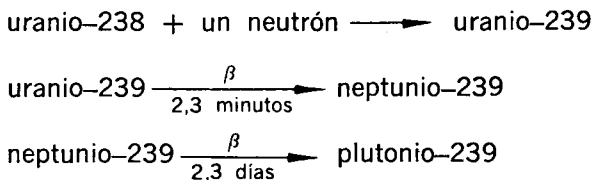
Otra instalación, aún más grande, conocida por "Advanced Test Reactor" está actualmente en construcción en la vecindad del ETR de Idaho y se espera que esté terminada y en operación en el 1965. Su rendimiento termal será de 250.000 kilovatios.



REACTORES DE PRODUCCION

Trece reactores hay ya construídos en los EE.UU. dedicados a la producción de plutonio para surtir las reservas de la defensa y aún otro está actualmente en construcción. Estas facilidades están instaladas en dos centros de producción de la USAEC, en el centro "Hanford" en la vecindad de Richland, estado de Washington, EE.UU. y en la Savannah River Plant, Aiken, Carolina del Sur, EE.UU.

Haciendo referencia de nuevo a la discusión anterior sobre los materiales fértiles y los fisionables, el lector recordará que el plutonio se forma al irradiar uranio-238 con neutrones. El término que se le da al proceso de producir un elemento derivándolo de otro es "transmutación". La reacción que toma efecto en este caso puede expresarse en la siguiente forma:



Esto quiere decir que el uranio-239 y el neptunio-239, ambas substancias sumamente inestables, con un período de semidesintegración (media vida) relativamente corto

(2,3 minutos y 2,3* días respectivamente), se forman como productos intermedarios, éste último emitiendo una partícula beta† y transformándose así en plutonio.

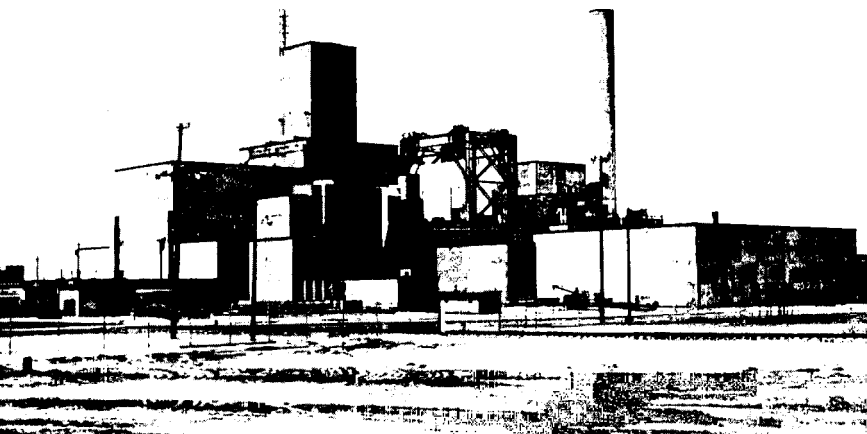
Las etapas de producción son actualmente las siguientes: (1) La fabricación de los elementos combustibles, utilizándose para este propósito el uranio metálico; (2) la operación del reactor con estos elementos combustibles, en cuyo proceso se irradia el isótopo uranio-238; (3) el almacenaje de los elementos combustibles, sumergiéndolos en agua por un periodo de tiempo dejando que las desintegraciones tengan lugar. Esta acción se conoce por el término de "enfriamiento por desintegración"; (4) el tratamiento químico del material, aún intensamente radiactivo, para extraer los productos de fisión, los cuales se almacenan en tanques subterráneos y para separar el plutonio del residuo de uranio.

Los reactores de la instalación de Hanford utilizan grafito como moderador y agua ordinaria como refrigerante. Consisten éstos esencialmente en una estructura de grafito tan grande como un edificio común y perforada simétricamente por tubería para la circulación del refrigerante y para la inserción de elementos combustibles. Los reactores de la instalación de Savannah River, uno de los cuales aparece en la Figura 3, son unidades del tipo de depósito y utilizan agua pesada como moderador y también como refrigerante.

El calor generado por los reactores que se usan en la producción de plutonio es de temperaturas muy bajas para poderse utilizar económicamente. Sin embargo, el nuevo reactor de producción que se está construyendo actualmente en Hanford funcionará a temperaturas más elevadas y estará provisto de facilidades para convertir el calor en electricidad como producto secundario.

*Esto quiere decir que en el caso del neptunio, por ejemplo, la mitad de sus átomos sufren desintegración radiactiva cada 2,3 días. Por consiguiente, si una muestra contiene 100 átomos de neptunio a la hora "cero", al transcurrir 2,3 días a partir de esta hora, sólo quedarán 50 átomos; al transcurrir otros 2,3 días quedarán solamente 25 átomos y así sucesivamente.

†Al electrón emitido por un núcleo atómico se le da el nombre de "partícula beta" y su símbolo es la letra griega β .

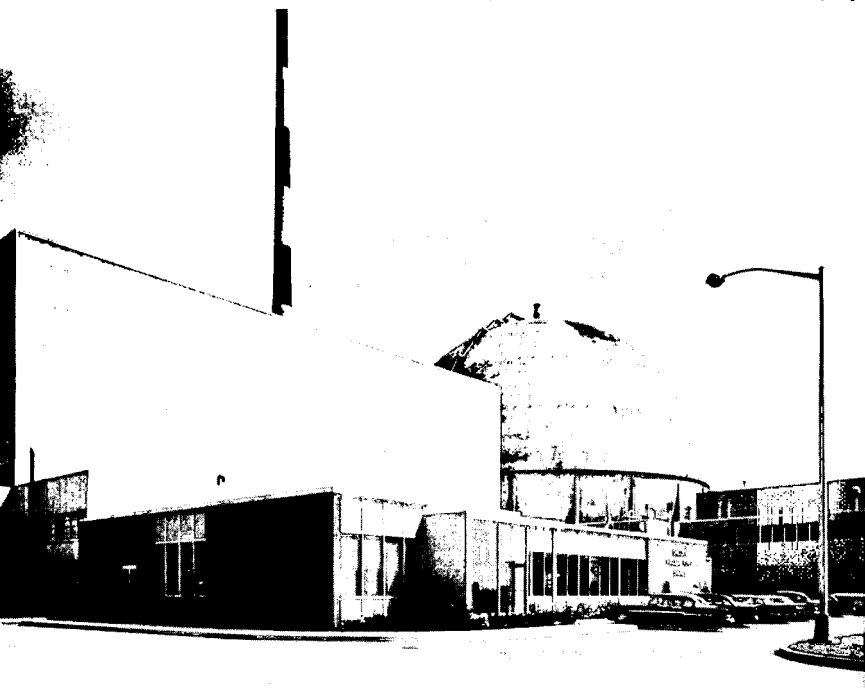


Fotografía 3. Uno de los reactores de producción de plutonio de la instalación de Savannah River.

Fotografía-cortesía de E. I. du Pont de Nemours & Co.

Fotografía 4. La planta eléctrica nuclear de Dresden, una instalación de 208.000 kilovatios cerca de Dresden, Illinois.

Fotografía-cortesía de General Electric Company.





REACTORES PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA

PROGRAMAS DE ENERGIA ATOMICA PARA SERVICIO PUBLICO. En las plantas eléctricas convencionales el combustible fósil (carbón, petróleo o gas natural) se quema en una caldera y el calor resultante se utiliza para producir vapor. El vapor, a su vez, se utiliza para mover la turbina generadora y así producir electricidad. En una planta generadora atómica un reactor nuclear provee el calor; el reactor, por lo tanto, reemplaza la caldera convencional.

Ya para mediados de la presente década, casi millón y medio de kilovatios de energía eléctrica se estarán generando en los EE.UU. (Un reactor de energía, tamaño grande, aparece en la Fotografía 4). Esta capacidad es bastante considerable pues puede compararse con la del proyecto hidroeléctrico más grande de los EE.UU. (el Grand Coulee Hydroelectric Project), o bien con la capacidad del estado de Connecticut o con la generada en Dinamarca. Sin embargo, comparada con la capacidad total que los EE.UU. esperan generar para mediados de la presente década, la capacidad generada por reactores hasta la fecha es sólo un uno por ciento de la capacidad total en proyecto. El hecho es que la energía atómica está todavía en su comienzo de investigación y desarrollo. Lo que en realidad es notable en el programa de energía atómica de los EE.UU. no es tanto la cantidad de kilovatios generados, sino el alcance técnico.

Para sufragar los gastos del desarrollo de una planta nuclear modelo, desde que se concibe la idea hasta que el proyecto pueda empezar a funcionar, se necesitan muchos millones de dólares y miles de horas de trabajo. Además, la terminación de un modelo demostrativo no es el final de la jornada. Para en realidad llegar a la meta y poder formar un juicio conclusivo de la magnitud y el potencial del concepto se necesitan muchas más horas de trabajo y de estudio adicional. En el programa de los EE.UU. varios conceptos sobre reactores de potencia han

pasado ya la etapa de demostración; otros están en esta etapa y aún otros están en su desarrollo inicial.*

Aunque el espacio en este folleto no nos permite entrar en detalles sobre estos conceptos, hemos hecho el esfuerzo de indicar los aspectos más importantes en el apéndice. Tampoco es posible describir aquí más de veinticuatro proyectos experimentales o de demostración en energía atómica emprendidos hasta la fecha. Solamente los proyectos de mayor magnitud se han enumerado (Véase la lista en la página 40). En conjunto, estos proyectos representan una inversión de casi 7 50 millones de dólares de capital.

El programa de desarrollo de reactores de energía funciona en los EE.UU. a base de sociedad entre el Gobierno y la industria. El gobierno sufraga la mayoría del costo de investigación y fomento y la industria provee la gran mayoría del capital invertido. El objeto es desarrollar plantas nucleares que puedan competir económicamente con las plantas térmicas convencionales. De este programa se espera doble beneficio. En primer lugar se espera que a medida que la energía atómica se vaya produciendo a un nivel competitivo, esto ayude a estabilizar el costo de la energía eléctrica en aquellas regiones de la nación donde el costo del combustible fósil es elevado. En segundo lugar, la habilidad de utilizar combustible atómico ayudará considerablemente a reforzar nuestra posición en el abastecimiento de energía futura.

Refiriéndonos a este último objetivo, es en realidad extraordinario que los EE.UU., con solamente un cinco por ciento de la población mundial, produzca y consuma más de una tercera parte de la electricidad producida en el mundo entero. Igual de extraordinario es también el hecho que, de acuerdo con las estadísticas y tomando en cuenta todas las fuentes de energía, los EE.UU. consu-

*Poco después de haberse terminado el manuscrito de este folleto, la Comisión de Energía Atómica de los EE.UU. sometió al Presidente un informe sobre "Energía Nuclear para Usos Civiles" en el cual la USAEC expresa su opinión en cuanto a las necesidades, perspectivas y programas en el desarrollo de fuerza nuclear para la producción de energía eléctrica. Véase la lista de Referencias Recomendables en la página 41.

mirán en los próximos veinte años, tanto combustible como el que han consumido durante toda su pasada historia. Además, se espera que el promedio de consumo de combustible se doble de nuevo en los veinte años siguientes. Si esta tendencia continúa, nuestras reservas de combustibles fósiles, aunque inmensas, disminuirían rápidamente. Existen diferencias de opinión en cuanto a esta cuestión, pero, aún contando con el descubrimiento de nuevos depósitos de combustibles fósiles, si éste se continúa consumiendo en las proporciones en que hasta ahora se está consumiendo, es posible que ya para fines de este siglo empiece a notarse su escasez. Nuestras reservas de combustibles atómicos son mucho más grandes en comparación, pues se calcula que son más de diez veces mayores que la reserva de combustible fósil. Si el desarrollo de la Tecnología de reproducción (la cual consiste en producir más combustible material fértil que el que se consume en la operación del reactor) tiene éxito, nuestras reservas de combustible fisionable serán entonces casi ilimitadas. Para el futuro, desde luego, tendremos que buscar nuevas fuentes de abastecimiento. Es precisamente en este caso, donde la energía **termonuclear** ha de tomar puesto importante. (Véase la discusión más adelante).

Tratar de poner la energía nuclear a base competitiva con la energía convencional es una tarea verdaderamente ardua pues las plantas convencionales han tenido el beneficio de muchísimas décadas de desarrollo y cada día van mejorándose aún más. Un buen ejemplo del progreso realizado en este campo es la eficiencia con que se utiliza el combustible en la actualidad. Durante la segunda guerra mundial las plantas eléctricas de servicio público utilizaban 1,3 libras (0,6 kg) de carbón (o su equivalente) para producir un kilovatio-hora de electricidad. Hoy día se produce la misma cantidad con solamente 0,9 libras (0,4 kg) o sea un 30% de aumento en eficiencia. Aún mejor es el ejemplo del costo de generación, que a base del promedio nacional es hoy más o menos el mismo que el de veinte años atrás, no obstante el gran aumento en el precio del combustible y el precio de producción.

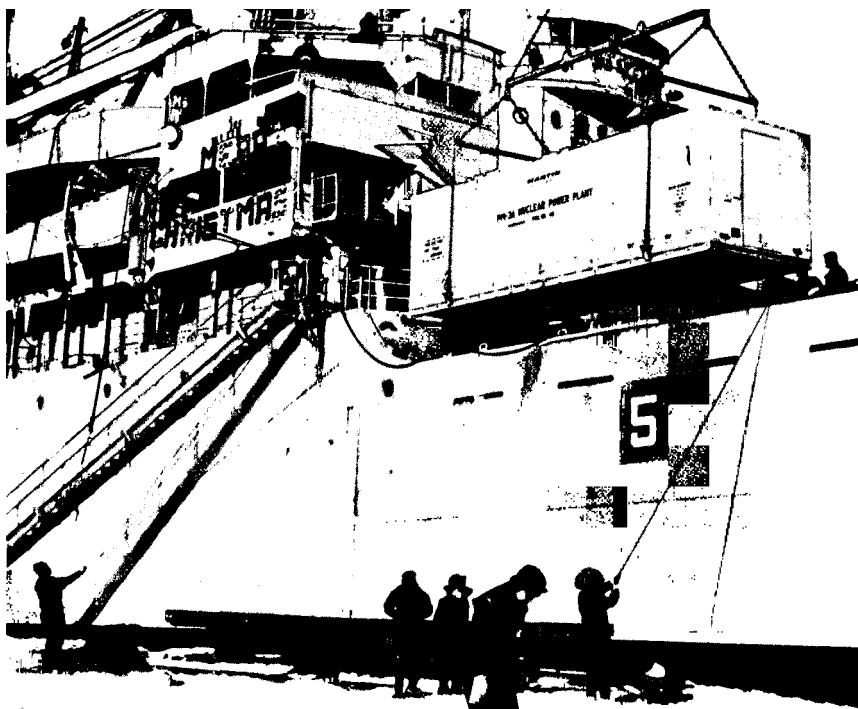
El progreso hecho por la industria en la producción

de energía eléctrica se debe a tres factores principales: (1) La operación de calderas a temperaturas y presiones elevadas, obteniendo así mejor calidad de vapor para mover el turbogenerador y lográndose al mismo tiempo mayor eficiencia en la conversión de calor térmico a electricidad; (2) el aumento del tamaño de las plantas generadoras, lo cual tiende a reducir el costo de capital invertido por unidad de producción y a su vez la rebaja en cargos fijos por unidad producida; y (3) el perfeccionamiento en diseño de las plantas y equipo auxiliar. Estos mismos factores se están aplicando también al desarrollo de la tecnología en energía atómica.

¿Cómo va el progreso en la energía atómica? En general puede decirse que va bastante bien. Hace algunos años la USAEC fijó el año 1968 como meta para lograr la terminación de plantas de energía atómica competitivas en aquellas regiones de los EE.UU. donde el precio del combustible fósil es elevado. Parece ahora, que no sólo llegaremos a tiempo a esa meta sino que hay buenas indicaciones de que por lo menos en una de las regiones en cuestión, se logren nuestros propósitos ya por los años 1965 o 1966. Debe advertirse, no obstante, que solamente una quinta parte de la electricidad generada en los EE.UU. se produce en regiones donde el costo de combustible fósil es alto y que tardarán muchos años para conseguir que la energía atómica se produzca a base competitiva con la producida convencionalmente a través de la nación.

PLANTAS ELECTRICAS ATOMICAS DE BAJA CAPACIDAD.

— Aunque la Antártica no parece ser de primera intención la región donde comúnmente se encontraría una planta de energía nuclear, actualmente existe ya una en operación en dicha región. Es ésta una pequeña instalación (de 1.500 kilovatios) situada en McMurdo Sound, base principal de actividad científica de los EE.UU. en la Antártica. Fué trasladada a su destino en semiunidades ya montadas y embaladas y llegó al local de instalación precisamente el día del quincuagésimo aniversario de la expedición al Polo Sur por el explorador Roald Amundsen, o sea el 14 de diciembre del 1961. Empezó ésta a fun-



Fotografías 5A y 5B — La planta de energía atómica portátil PM-3A. En la fotografía superior aparece una sección de la planta en los momentos de descargarse en McMurdo Sound, Antártica. Fotografía inferior — Vista panorámica de la instalación completa.



cionar 80 días más tarde.

La instalación de McMurdo Sound se ha designado con la numeración PM-3A que significa simbólicamente "Portable Medium Power Plant N° 3A" (Planta Portátil de Mediana Capacidad Núm. 3A). Es ésta una de las plantas atómicas pequeñas de un grupo que se está desarrollando bajo los auspicios del Departamento de Defensa y la USAEC, para proveer electricidad y calefacción en bases remotas y, además, para caso de emergencia en áreas de desastre. Estas plantas varían en capacidad desde varios cientos de kilovatios hasta diez mil kilovatios y se clasifican en tres tipos distintos: (1) fijas o estacionarias, (2) portátiles, y (3) móviles.*

Las plantas que hasta la fecha se han puesto en servicio son del tipo que funciona con agua a presión; sin embargo, un modelo refrigerado por gas para aplicaciones en plantas móviles se está actualmente sometiendo a pruebas. También se está desarrollando un modelo cuyo reactor utiliza metal líquido a alta temperatura. Este tipo de planta extremadamente compacta se utilizará para proveer los requisitos de instalaciones militares.

El programa de desarrollo de los reactores pequeños fué incitado por las ventajas logísticas del combustible atómico que, por ser extremadamente compacto, es fácil de transportar.

¿Cómo es de compacto, en realidad, el combustible atómico? A saber: La fisión de un gramo de material fisionable genera 23.000 kilovatios-hora de calor. Esto indica que una tonelada de uranio tiene un rendimiento potencial de combustible equivalente al de 3 millones de toneladas de carbón o al de 12 millones de barriles de aceite. En la actualidad, durante un ciclo de operación de un reactor, sólo se extrae una pequeña fracción de la energía potencial total del combustible usado. Aún así, una sola tonelada de combustible atómico produce mucho más que muchos trenes cargados de combustible convencional.

*Plantas móviles se refiere en este caso a plantas montadas en lanchones, barcas, etc., en remolques o arrastres (trailers) o en vagones-plataforma.



REACTORES ABASTECEDORES DE CALOR PARA PROCESOS INDUSTRIALES

Los reactores nucleares son de interés como dispositivos para la producción de calor para usos directos. Debemos primero distinguir entre las aplicaciones del calor a baja temperatura y aplicaciones del calor a temperaturas elevadas. En las aplicaciones a baja temperatura pueden incluirse la producción de vapor a baja presión con temperaturas hasta los 400°F, el cual se utiliza en varios procesos de manufactura (por ejemplo, para secar, evaporar, destilar, etc.) o para calefacción de edificios. En las aplicaciones a temperaturas elevadas pueden incluirse procesos químicos, como por ejemplo, la gasificación de carbón, para lo cual se utilizan temperaturas de 1.500 a 3.000°F.

De acuerdo con estudios efectuados, tardará algún tiempo antes de que esta clase de reactores pueda producirse lo suficientemente económica para substituir las calderas a baja presión actualmente en servicio. No obstante, en casos donde hay demanda continua de cantidades considerables de vapor y a su vez demanda de electricidad, hay posibilidades de que en el futuro inmediato puedan utilizarse reactores de doble servicio; en este caso para vapor y para energía eléctrica.



REACTORES PARA PROPULSION DE BARCOS

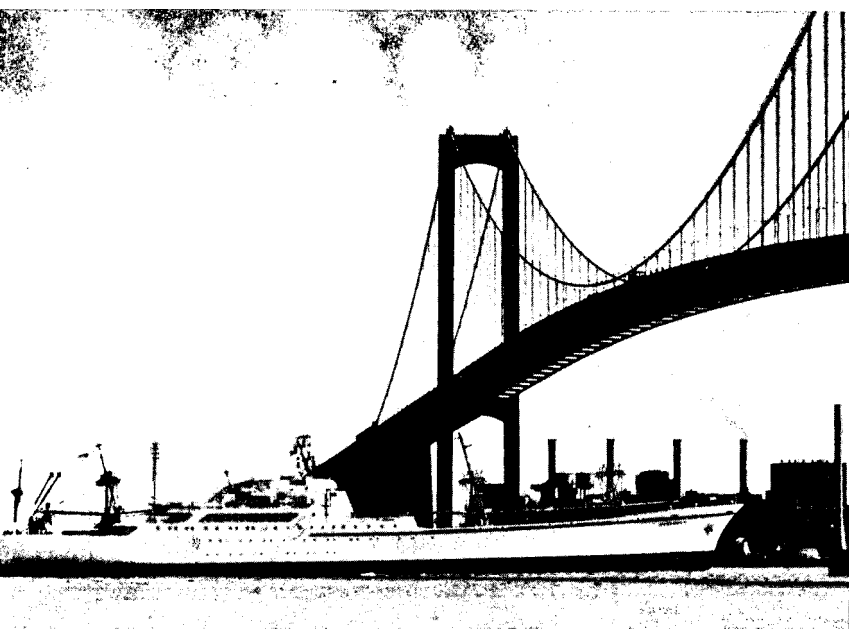
La U.S. Maritime Administration (Administración Marítima), en asociación con la USAEC, acaba de construir un barco de carga y pasajeros, el N.S. SAVANNAH (Barco Nuclear Savannah), con el propósito de demostrar la seguridad y buen funcionamiento de la propulsión nuclear en esta aplicación. El Savannah desplaza unas 22.000 toneladas y utiliza el sistema de reactor de agua

a presión para proveer la propulsión necesaria. Este reactor provee 22.000 caballos de fuerza al eje de hélice. Su radio de crucero es de 350.000 millas. En el 1962 se completaron satisfactoriamente todas las pruebas de operación y está actualmente en servicio experimental.

Las ventajas potenciales económicas de la propulsión nuclear para barcos comerciales son las siguientes: (1) la eliminación de tanques de combustible (petróleo) o carboneras cuyo espacio puede utilizarse para carga adicional y, (2) mejoramiento en la utilización del barco con velocidades más altas y distancias más largas al mismo tiempo que se elimina el reabastecimiento frecuente.

Al presente estas ventajas quedan canceladas pues el costo del equipo de producir propulsión nuclear es más elevado que el del equipo convencional diesel. Hay varias diferencias de opinión en cuanto a la fecha en que la propulsión nuclear pueda competir económicamente con la propulsión convencional. Es de esperar que se instale en barcos de carga, para el transporte de minerales y petróleo, antes de que se use en barcos de pasajeros.

Fotografía 6 — El barco mercante SAVANNAH al partir en viaje de pruebas. Fotografía_cortesía de Babcock and Wilcox Co.





REACTORES PARA APLICACIONES EN EL ESPACIO

Aunque sea prematuro establecer pronósticos, hay motivo para creer que sólo con el buen uso de combustibles atómicos podrá obtenerse suficiente independencia de las facilidades en tierra para el manejo y operación de vehículos en la exploración interplanetaria. Se debe esto a la creencia de que sería impracticable depender de procesos químicos para proveer la fuerza necesaria que requerirían las naves en órbita, la protección del personal contra radiaciones, la movilidad en la superficie de otros planetas y demás requisitos de dicha exploración. En conclusión, bien sea en la tierra como en el mar o en el espacio, la energía atómica promete ser un factor importantísimo en nuestro futuro.

POTENCIA AUXILIAR. La primera aplicación de energía atómica en el espacio no fué a base de un reactor sino de una "batería nuclear". Este es un dispositivo que genera pequeñas cantidades de electricidad (vatios) utilizando el calor producido por radioisótopos al desintegrarse. El día 29 de junio del 1961 el satélite TRANSIT-4A de la Marina de los EE.UU., fué puesto en órbita llevando consigo una batería nuclear que pesa 5 libras (2,3 kg) y genera 2,7 vatios de electricidad. Esta se utiliza para proveer la potencia necesaria en dos de los cuatro transmisores instalados en el satélite. También se instaló una batería en el satélite TRANSIT-4B que fué puesto en órbita el día 15 de noviembre del 1961. Los satélites TRANSIT se utilizan principalmente para determinar la posición de los buques y aviones en tránsito a través del mundo por medio de circuitos electrónicos.

Los dispositivos nucleares de los satélites TRANSIT fueron desarrollados bajo el programa SNAP (Systems for Nuclear Auxiliary Power) (Sistemas de Potencia Nuclear Auxiliar) de la USAEC. Bajo este mismo programa se están desarrollando también dispositivos parecidos para una variedad de aplicaciones especiales, como estaciones

para pronóstico del tiempo, señales costeras montadas en boyas, etc.

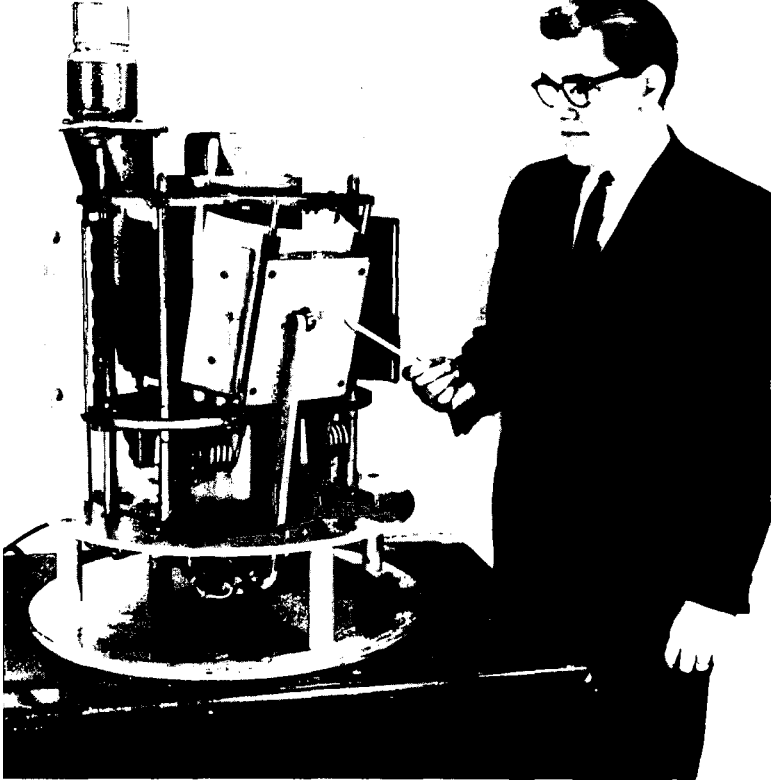
También incluídos en el programa SNAP, y de sumo interés para los lectores de este folleto, son los proyectos para el desarrollo de una serie de reactores extremadamente compactos especialmente para aplicaciones en el espacio. Generarán potencias desde los 500 vatios hasta varios cientos de kilovatios.

El primer reactor en esta serie es el SNAP-2*. Este reactor utiliza metal líquido como refrigerante e hidruro metálico como moderador, y opera un turbogenerador de vapor de mercurio. Dicho sistema se está desarrollando para aplicaciones de la Fuerza Aérea de los EE.UU. El reactor es del tamaño de un recipiente de cinco galones, pesa unas 200 libras (90 kg) y no necesita blindaje. Su rendimiento potencial es de tres kilovatios.

Actualmente se están sometiendo a pruebas ambientales todos los componentes individualmente, en preparación para la construcción de equipo prototipo que ha de utilizarse en las pruebas en vuelo.

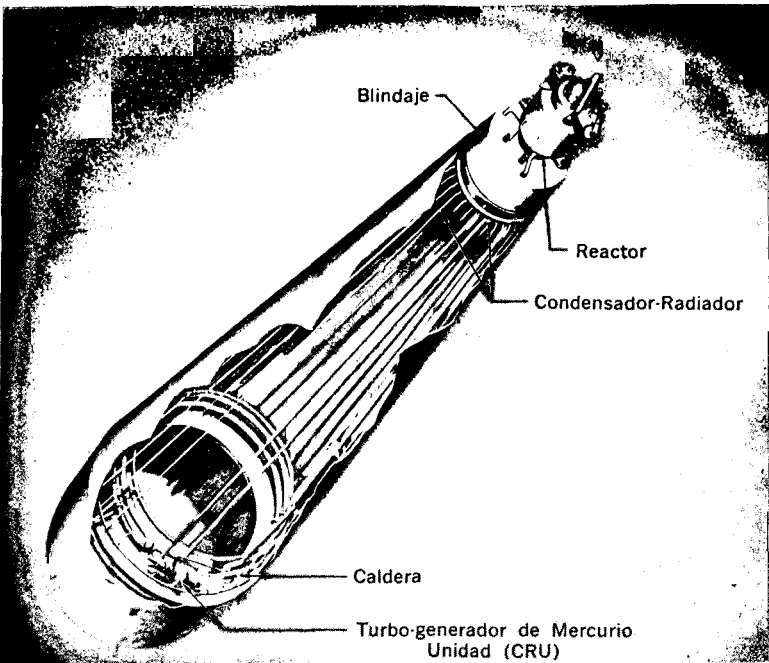
Mientras escribimos este folleto se están desarrollando otros tres proyectos de reactores SNAP. Uno de éstos, designado SNAP-10, se dedica al desarrollo de un sistema de 500 vatios para aplicación en el programa de satélites de la Fuerza Aérea. En este caso el calor generado por el reactor se convertirá directamente en electricidad (por técnicas termoeléctricas) en vez de utilizarse una turbina. La USAEC está desarrollando el SNAP-8 en colaboración con la National Aeronautics and Space Administration (NASA). La potencia de este reactor será de 30 kilovatios iniciales pero con provisión para un aumento a 60 kilovatios aproximadamente. Aún más grande y más potente será el SNAP-50 con una potencia de 300 a 1.000 kilovatios. Este se desarrollará para suplir propulsión eléctrica (véase discusión más adelante) y además para proveer fuerza auxiliar.

*En el programa SNAP los reactores se designan con números pares y los proyectos de radioisótopos con números nones.



Fotografías 7A y 7B — Reactor compacto para aplicaciones del espacio. Arriba, un modelo tamaño actual del reactor SNAP-2. Abajo, versión artística del sistema de generación de potencia completo SNAP-2.

Fotografía-cortesía de Atomics International



PROPULSION PARA COHETES. La NASA, en unión con la USAEC, están auspiciando un programa para el desarrollo de máquinas de cohetes nucleares para utilizarse en la propulsión de aeronaves.

Un cohete nuclear, como se concibe al presente, sería un aparato donde el hidrógeno líquido se vaporizaría; el gas resultante se calentaría a una temperatura elevada en un reactor y luego se expulsaría por un orificio trasero desarrollando así impulso o empuje.

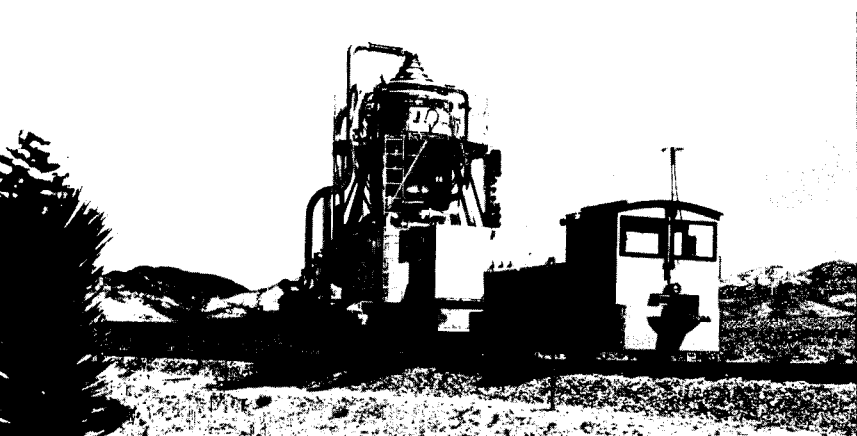
El empuje "específico", o sea las libras (o kg) de empuje por libra (o kg) de propulsante expulsado por segundo, que puede obtenerse en este sistema, se calcula sea dos o tres veces mayor que el obtenido con cohetes químicos.

Para que el funcionamiento del cohete nuclear sea eficiente, es necesario que las temperaturas generadas por el reactor sean extremadamente elevadas. Además, el rendimiento de potencia debe ser sumamente alto, del orden de millones de kilovatios de rendimiento térmico; y aún más, el reactor debe arrancar y parar con rapidez y precisión.

Bajo el programa NASA-AEC conocido por "Proyecto Rover" se han conducido varios experimentos (terrestres) con reactores de ciclos abiertos en los que se utiliza hidrógeno como refrigerante y además se están planeando otros tipos. La fase del programa que se dedica al desa-

Fotografía 8 — Investigación en propulsión de cohetes nucleares para aplicaciones en el espacio. Se presenta aquí uno de los dispositivos experimentales, en la serie de pruebas Kiwi en los momentos en que se remolca uno de dichos aparatos, después de retirarse del montaje de prueba, para someterse a estudio.

Fotografía-cortesía de Los Alamos Scientific Laboratory



rrollo de reactores se conoce con el seudónimo "Kiwi", asociándolo con el ave de Nueva Zelandia kiwi, que no puede volar.

También se están planeando pruebas terrestres en el desarrollo de la máquina del proyecto Rover. Esta parte del programa se conoce por la fase NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application) (Máquina Nuclear para Aplicación en Vehículos Cohetes). Aun otro proyecto acompañante conocido por el RIFT (Reactor in Flight Test) (Prueba de Reactor en Vuelo) se dedica al desarrollo de una de las partes de un cohete nuclear para el vehículo avanzado Saturn y a las pruebas en vuelo.

PROPULSION ELECTRICA. Anteriormente nos hemos referido al SNAP-50 como un reactor desarrollado para proveer propulsión y además suplir energía auxiliar. El concepto de la propulsión eléctrica para astronaves no se ha probado aún. Consistiría este concepto en producir empuje o impulso a base de la expulsión de partículas electricamente cargadas de elevadas energías (iones y electrones). Teóricamente sería posible producir por este método impulsos específicos elevadísimos (del orden de 10.000 libras [4.550 kg] de empuje por libra [o kg] de material expulsado por segundo). No obstante, en la realidad, el promedio de masa disponible es inherentemente bajísimo (del orden de milésimas de libras o kg por segundo). La propulsión eléctrica, por sus características intrínsecas, es un concepto de bajo empuje (deceñas de libras o kg). Sólo sería de interés para impeler o manejar astronaves una vez puestas fuera del alcance de la acción de gravedad por otros sistemas de propulsión.

Debido a que el combustible atómico es verdaderamente compacto, se cree que los reactores nucleares ofrecerán los medios más prácticos de proveer la energía eléctrica necesaria para ionizar y acelerar las partículas cargadas. La aceleración podría obtenerse aplicándosele potencial eléctrico a haces separados de iones y de electrones; o tal vez podría realizarse el mismo objetivo excitando "plasma" compuesto de iones y electrones y confinado por campos magnéticos.



SOBRE LA SEGURIDAD DE LOS REACTORES

Una pregunta que a menudo se hace es: ¿Podría un reactor explotar como una bomba atómica? La respuesta es: No. En primer lugar, el combustible que se usa en casi todos los reactores no podría explotar aún en una bomba. En segundo lugar, los principios de diseño son completamente diferentes. En un tipo de bomba simple, dos o más partes de material fisionable esencialmente puro se someten rápidamente a una configuración de "criticalidad" y se sostienen en compresión hasta que se genera una fuerza explosiva sumamente elevada. En un reactor no hay dispositivos que puedan sostener el combustible en contacto. Si ocurriese una reacción supercrítica, el intenso calor generado derretiría o desintegraría el combustible. Los reactores están diseñados en tal forma que si esto sucediese, el combustible tendería a dispersarse y la reacción cesaría automáticamente. En realidad, casi todos los tipos de reactores tienen una característica inherente, y es que tan pronto la temperatura empieza a subir la reacción empieza a retardarse; en este caso sería casi imposible derretir aún el núcleo del reactor.

Aparte del daño físico que pudiera sufrir el reactor en sí, el peligro más serio en caso de derretimiento del núcleo, de ruptura estructural o de cualquier otro accidente en el reactor, sería la posibilidad de escape de radiactividad. Hay, por consiguiente, dos factores a considerar en cuanto a la seguridad de reactores: (1) prevención de accidentes en el reactor, y (2) confinamiento de la radiactividad en caso de accidente.

Para evitar los accidentes en los reactores se aplican altos coeficientes de seguridad en el diseño del núcleo y en el diseño del sistema de control. Además, en el diseño de la instalación se aplica la ingeniería prudente y cuidadosamente. Para que el sistema incluya toda característica de seguridad posible, se hace uso de cuanta ventaja nos ofrezcan las leyes naturales. Con esta idea presente, el

diseñador trata de anticipar toda posibilidad de error humano o fracaso electromecánico y provee las correspondientes medidas preventivas en el diseño. Por ejemplo, las barras de seguridad van diseñadas "a prueba de fallo" o sea que van preajustadas en tal forma que, bajo ciertas circunstancias de operación, éstas se insertan o caen automáticamente a su posición predeterminada.

Para la protección contra accidentes se toman muchas precauciones. En particular se toma cuidado esmerado en la selección y entrenamiento del personal de operaciones y en la preparación de las especificaciones del manual de operación. Además, antes de empezarse la construcción de una planta nuclear en los EE.UU., han de cumplirse al pie de la letra rigurosos dictámenes de seguridad, incluyendo entre ellos, un repaso minucioso de las especificaciones de seguridad del proyecto, por un grupo imparcial de expertos en seguridad de reactores. Este grupo se conoce por "Advisory Committee on Reactor Safeguards" (Comité de Consejeros en Seguridad de Reactores). Este repaso o examen toma en consideración, no sólo las características del diseño de la instalación, sino también las características ambientales de la localidad, la distancia a áreas habitadas, el terreno, las condiciones meteorológicas y demás factores pertinentes. Otro examen, aún más estricto es el que se hace antes de otorgarse la licencia de operación de la planta. Además, una vez que la planta está en operación, para hacer cambios importantes, como por ejemplo, la forma de arrancar o parar el sistema, cambios de niveles de potencia, etc., se requiere primero una enmienda oficial a la licencia de operación.

Volviendo de nuevo a la discusión sobre la seguridad del tanque o estructura externa del reactor en sí, sabemos que casi toda la reactividad proviene de los productos de fisión. Son éstos, por consiguiente, los que deben contenerse. En operaciones normales, éstos van restringidos por el revestimiento de las unidades de combustible. Este detalle puede bien considerarse como el primer paso en la prevención del escape de radiactividad.*

*Con referencia a este punto, la habilidad del combustible y del

Tan pronto las unidades de combustible usadas se sacan del reactor, se retiran del local y se trasladan a la planta de reproceso de combustible.† Si, por casualidad, alguna traza de productos de fisión se escapa por alguna grieta o cualquier otro defecto en el revestimiento de las unidades de combustible y contamina el refrigerante, éste se purifica, el residuo se empaqueta debidamente y se envía a sitios predeterminados por la AEC para ser debidamente enterrados.

En caso de accidentes graves, como por ejemplo derretimiento del núcleo del reactor, se escaparían cantidades elevadas de productos de fisión del confinamiento normal del combustible. Por consiguiente, todo reactor construido para usos civiles, excepto aquellos instalados en regiones bien remotas, van provistos de una protección adicional que consiste en una cubierta o albergue total especialmente construido a prueba de gases. En casi todas las plantas esta estructura protectora toma la forma de una especie de bóveda que cubre la instalación completa del reactor.‡ Dicha estructura va diseñada para soportar la presión máxima de vapor que pueda generarse. Sus paredes son de suficiente espesor para soportar cualquier avería de tipo explosivo que pudiera disparar metralla o fragmentos a altas velocidades. Esta bóveda o revestimiento total externo es la estructura esférica o semiesférica familiar que se ve en casi todas las plantas atómicas.

En todos los años que han transcurrido desde el experimento de Fermi, durante los cuales se han diseñado y puesto en operación cientos de reactores para diversos usos, el historial de seguridad ha sido verdaderamente

material de revestimiento o enchape, para soportar deformación física bajo condiciones de irradiación, es lo que determina el "consumo de combustible nuclear permisible" o sea el período de tiempo máximo que las unidades de combustible pueden permanecer dentro del reactor.

†O sea una planta donde se recupera el combustible residual.

‡En algunos casos, un edificio hermético es suficiente protección; además, por lo menos en una planta existente, las partes principales que componen el sistema del reactor, van individualmente montadas en tanques de acero.

notable. Con cada nuevo reactor y con cada año de experiencia adicional en operación, se van adquiriendo nuevos conocimientos constantemente lo cual es, sin duda, la protección más importante. Otra fuente de nuevos conocimientos y de igual importancia es el programa de seguridad de reactores de la Comisión de Energía Atómica de los EE.UU. (USAEC). Este esfuerzo de vital magnitud, esta dividido en dos proyectos: (1) el estudio de las causas básicas de los accidentes, y (2) la prueba de las características de seguridad. Esto último consiste en hacer rigurosos ensayos en sistemas de reactores, someténdolos a condiciones de operación extremadamente severas para determinar los límites de seguridad, tanto del diseño en sí, como de los materiales y equipo auxiliar componente.



REACTORES DEL MAÑANA

Debemos hacer una observación final en cuanto a los reactores del “mañana”: en el no muy lejano futuro tal vez tengamos a nuestra disposición un sistema de reactores completamente diferente: “reactores termonucleares”. En este reactor la energía sería generada por la fusión regulada (controlada) de átomos ligeros* en vez de la fisión controlada de átomos pesados. Cómo lograr este fin es un tema nuevo de por sí. Basta sólo informar en esta ocasión que por lo menos media docena de laboratorios importantes aquí en los EE.UU. y sus contrapartes en el extranjero están trabajando árdamente en este problema.

Así, pues, vemos claramente que los reactores nucleares, bien sean activados por fisión o por fusión, han de tomar una parte importantísima en la vida futura del género humano.

*Específicamente deuterio o tritio o ambos combinados. Estos son isótopos de hidrógeno que llamamos “hidrógeno pesado” e “hidrógeno hiperpesado” (heavy-heavy hydrogen).

CARACTERISTICAS TIPICAS DE LOS MAS IMPORTANTES REACTORES DE POTENCIA PARA USOS CIVILES DE LOS EE.UU.

Reactor de Agua a Presión (PWR)

COMBUSTIBLE — Oxido de uranio levemente enriquecido y revestido con acero inoxidable o con aleación de circonio.

MODERADOR — Agua.

REFRIGERANTE — Agua.

PRESION DEL SISTEMA PRIMARIO — 2.000 libras por pulgada cuadrada (140 kg por cm cuadrado).

TEMPERATURA DE SALIDA DEL REFRIGERANTE—550°F.

NOTAS — Tecnología bien desarrollada. Refrigerante a presión para evitar ebullición en el núcleo; por consiguiente, presión de funcionamiento elevada.

Reactor de Agua Hirviente (BWR)

COMBUSTIBLE — El mismo usado en el PWR.

MODERADOR — Agua hirviente.

REFRIGERANTE — Agua hirviente.

PRESION DEL SISTEMA PRIMARIO — 1.000 libras por pulgada cuadrada (71 kg por cm cuadrado).

TEMPERATURA DE SALIDA DEL REFRIGERANTE—550°F.

NOTAS — Tecnología bien desarrollada. El refrigerante se deja hervir en el núcleo; por consiguiente, presión de funcionamiento más baja que la del PWR. Tamaño físico del núcleo — más grande que el del PWR.

Reactor Sodio-Grafito (SGR)

COMBUSTIBLE — Aleación de uranio o carburo de uranio levemente enriquecido y revestido con acero inoxidable.

MODERADOR — Grafito.

REFRIGERANTE — Sodio líquido.

PRESION DEL SISTEMA PRIMARIO — Nominal.

TEMPERATURA DE SALIDA DEL REFRIGERANTE—950°F.

NOTAS — Con el uso del sodio como refrigerante es

posible obtener temperaturas elevadas a presiones nominales; además, el sodio es un medio de transferir calor muy eficiente. El manejo del sodio introduce ciertas complicaciones en el diseño y operación.

Reactor Reprodutor Rápido (FBR)

COMBUSTIBLE — Aleación de uranio altamente enriquecido y revestido de acero inoxidable (se proyecta el uso de óxidos o carburos de uranio-plutonio).

MODERADOR — Ninguno.

REFRIGERANTE — Sodio líquido.

PRESION DEL SISTEMA PRIMARIO — Nominal.

TEMPERATURA DE SALIDA DEL REFRIGERANTE—800°F. a 1150°F.

NOTAS — Promete bajo costo y buena utilización de las fuentes de combustible por el proceso de regeneración. (Véanse las notas sobre sodio en la descripción del SGR).

Reactor de Alta Temperatura Enfriado con Gas (HTGR)

COMBUSTIBLE — Carburo de uranio altamente enriquecido, mezclado con carburo de torio y revestido con grafito.

MODERADOR — Grafito.

REFRIGERANTE — Helio.

PRESION DEL SISTEMA PRIMARIO — 300 a 400 libras por pulgada cuadrada (21 a 28 kg por cm cuadrado).

TEMPERATURA DE SALIDA DEL REFRIGERANTE — 1380°F.

NOTAS — Aunque los gases no son los medios más adecuados de transferir calor, esta deficiencia se compensa con el uso de helio pues, como refrigerante, provee temperaturas altas a presiones moderadas y reduce el problema de corrosión a un mínimo. Desde el punto de vista de la física, el diseño del núcleo del HTGR tiene muchas características excelentes. Sin embargo, es difícil evaluar sus características desde el punto de vista de ingeniería hasta tanto se ponga en funcionamiento la primera planta HTGR (para el 1964-1965).

Reactor Moderado con Agua Pesada (tipo-tubería a presión).

COMBUSTIBLE — Uranio metálico u óxido de uranio revestido con aleación de circonio.

MODERADOR — Agua pesada.

REFRIGERANTE — Agua pesada.

PRESION DEL SISTEMA PRIMARIO — 750 libras por pulgada cuadrada (53 kg por cm cuadrado).

TEMPERATURA DE SALIDA DEL REFRIGERANTE—500°F.

NOTAS — Mediante el uso del uranio natural o levemente enriquecido el combustible promete ser de bajo costo.

Supercalentamiento Nuclear

COMBUSTIBLE — Oxido de uranio levemente enriquecido y revestido con acero inoxidable u otras aleaciones.

MODERADOR—Agua y vapor, o vapor solamente.

REFRIGERANTE — Agua y vapor, o vapor solamente.

PRESION DEL SISTEMA PRIMARIO — 600 a 3.500 libras por pulgada cuadrada (42 a 63,5 kg por cm cuadrado).

TEMPERATURA DE SALIDA DEL REFRIGERANTE — 825° a 1050°F.

NOTAS — Dos esquemas: "Supercalentamiento integral" en cuya esquema el vapor se hace recircular por una zona supercalentada en el núcleo, aumentando así el valor máximo de temperatura. "Supercalentamiento separado", o sea usándose un reactor enfriado por vapor saturado para aumentar la temperatura del vapor producido por otro reactor.

Reactor de Sal Derretida (MSR)

COMBUSTIBLE — Una solución derretida de una mezcla de fluoruro de uranio altamente enriquecido y torio.

MODERADOR — Grafito.

REFRIGERANTE — Véanse notas que siguen.

PRESION DEL SISTEMA PRIMARIO — Nominal.

TEMPERATURA DE SALIDA DEL REFRIGERANTE — 1000°F.

NOTAS — Circulación del combustible como en el

caso anterior, pero no a presión, y con menos posibilidades de corrosión, hacen que los problemas de ingeniería sean más fáciles de resolver. Este concepto está en su etapa experimental.

PROYECTOS DE CENTRALES DE ENERGIA ATOMICA DE ALTA CAPACIDAD DE LOS EE.UU.*

Enero de 1964

Nombre	Situada en	Tipo	Capacidad	Dueño	Puesta en Operación
Central de Energía Atómica — Shippingport	Shippingport, Pennsylvania	Agua a Presión	60,000 [†]	AEC (La porción de vapor) Duquesne Light Co. (La porción eléctrica)	1957
Central de Energía Nuclear de Dresden	Morris, Illinois	Agua Hirviente	208,000	Commonwealth Edison Co.	1959
Central Atomelectrica Yankee §	Rowe, Massachusetts	Agua a Presión	175,000	Yankee Atomic Electric Co.	1960
Central Indian Point	Indian Point, New York	Agua a Presión	245,000 [†]	Consolidated Edison Co. of N.Y.	1962
Facilidades de Energía Nuclear de Hailam §	Hailam, Nebraska	Sodio-Grafito	75,000	AEC (La porción de vapor) — Consumers Public Power District of Nebraska (La porción eléctrica)	1962
Central Humboldt Bay	Eureka, California	Agua Hirviente	48,500	Pacific Gas and Electric Co.	1963
Central de Energía Nuclear Big Rock §	Charlevoix, Michigan	Agua Hirviente	47,800	Consumers Power Co.	1962
Central de Energía Atómica Enrico Fermi §	Lagona Beach, Michigan	Reproductor Rápido	60,900	Power Reactor Development Co. (La porción de vapor) — Detroit Edison Co. (La porción eléctrica)	1963
Central Pathfinder §	Sioux Falls, South Dakota	Agua Hirviente con Recalentador Nuclear Integral	58,500	Northern States Power Co.	1964
Central de Energía Atómica- Peach Bottom §	Peach Bottom, Pennsylvania	Alta Temperatura Enfriada con Gas	40,000	Philadelphia Electric Co.	1964
Reactor de Agua Hirviente La Crosse §	Genoa, Wisconsin	Agua Hirviente	50,000	AEC (La porción de vapor) — Dairyland Power Cooperative (La porción eléctrica)	1965
Proyecto Atómico Bodega Bay (Bodega Bay Atomic Park)	Bodega Bay, California	Agua Hirviente	313,000	Pacific Gas and Electric Co.	1966
Central de Energía Nuclear de San Onofre §	San Clemente, California	Agua a Presión	375,000	Southern California Edison Co. y San Diego Electric Co.	1966
Nuevo Reactor de Producción y Central**	Richland, Washington	Grafito	800,000	AEC y Washington Public Power Service System	1966
Planta Nuclear de Malibu §	Corral Canyon, California	Agua a Presión	463,000	Los Angeles Department of Water and Power	1967
Central de Energía Nuclear Connecticut Yankee §	Haddam-Neck, Connecticut	Agua a Presión	463,000	Connecticut Yankee Atomic Power Co.	1967
Central Oyster Creek	Oyster Creek, New Jersey	Agua Hirviente	515,000	Jersey Central Power and Light Co.	1968
Central Nine Mile Point	Oswego, New York	Agua Hirviente	500,000	Niagara Mohawk Power Co.	1968

*Las centrales de menos de 40,000 kilovatios no aparecen en la lista. Los proyectos que, aunque planeados, no se habían formalizado para el 10 de enero de 1964, tampoco aparecen en la lista.

† Kilovatios de electricidad netos.

‡ Se aumentará a 100,000 kilovatios.

§ Proyectos que han recibido ayuda del gobierno bajo el Programa de Demostración de Reactores de Potencia de la USAEC.

¶ Incluye la contribución de los recalentadores alimentados con combustible fósil.

** Central de doble servicio para la producción de plutonio y energía eléctrica.

LIBROS

ABOUT ATOMIC POWER FOR PEOPLE (Sobre Potencia Atómica para el Público). Edward Radlauer and Ruth S. Shaw Radlauer. Melmont Publishers, Inc., 310 S. Racine Ave., Chicago, Illinois, U.S.A., 1960, 47 páginas, \$1.88.

ATOMS AT WORK (Atomos Trabajando). John Mander. Transatlantic Art, Inc., Hollywood-by-the-Sea, Florida, U.S.A. 1957, 118 páginas, \$3.00.

ATOM POWER (Potencia Atómica). Joseph M. Dukert. Coward-McCann, Inc., 210 Madison Ave., New York 16, N.Y., U.S.A. 1962, 127 páginas, \$3.50.

DIRECTORY OF NUCLEAR REACTORS (Guía de Reactores Nucleares). International Atomic Energy Agency (Agencia de Energía Atómica Internacional), Viena, Austria, Tomo II — Research, Test and Experimental Reactors (Reactores de Investigación, Prueba y Experimentación), 1959, 372 páginas, \$3.50. Tomo III — Suplemento al original, 1960, 378 páginas, \$4.00. Tomo IV—POWER REACTORS (Reactores de Potencia), 1962, 324 páginas, \$5.00. National Agency for International Publications, 801 3rd Ave., New York 22, N.Y., U.S.A.

FUNDAMENTALS OF NUCLEAR ENERGY AND POWER REACTORS (Fundamentos de Energía Nuclear y Reactores de Potencia). Henry Jacobowitz. John F. Rider Publishers, Inc., 116 West 14th Street, New York 11, N.Y., U.S.A., 1959, 118 páginas, \$2.95.

MAN AND POWER: THE STORY OF POWER FROM THE PYRAMIDS TO THE ATOMIC AGE (El Hombre y la Energía: La Historia de la Energía desde la Era de las Pirámides hasta la Era Atómica). L. Sprague de Camp. Golden Press, 630 5th Avenue, New York 20, N.Y., U.S.A., 1961, 189 páginas, \$5.00.

NUCLEAR PROPULSION FOR MERCHANT SHIPS (Propulsión Nuclear para Barcos Mercantes). A. W. Kramer. U.S.

Atomic Energy Commission (Comisión de Energía Atómica de los EE.UU.), 1962, 609 páginas, \$2.25, del Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington 25, D.C., U.S.A.

NUCLEAR REACTORS FOR INDUSTRY AND UNIVERSITIES (Reactores Nucleares para la Industria y para Universidades). Ernest H. Wakefield, Editor. Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. Instruments Publishing Co., Inc., 1954, 94 páginas, \$2.00.

SOURCEBOOK ON ATOMIC ENERGY (2nd. Ed.) (Fuente de Información Sobre Energía Atómica — Segunda Edición). Samuel Glasstone. D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton, New Jersey, U.S.A., 1958, 641 páginas, \$4.40.

ATOMIC ENERGY DESK BOOK (Manual de Energía Atómica). John F. Hogerton. Reinhold Publishing Corp., New York, N.Y., U.S.A., 1963, 650 páginas, \$11.00.

U.S. RESEARCH REACTOR OPERATION AND USE (Operación y Uso de Reactores de Investigación de los EE.UU.). Joel W. Chastain, Jr. Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Massachusetts, 1958, 366 páginas, \$7.00.

HEARINGS BEFORE THE JOINT COMMITTEE ON ATOMIC ENERGY, CONGRESS OF THE UNITED STATES, 87th CONGRESS, 2nd. SESSION, ON DEVELOPMENT, GROWTH AND STATE OF THE ATOMIC ENERGY INDUSTRY (Vista Pública Ante el Comité de Energía Atómica, Congreso de los EE. UU., Asamblea Núm. 87 — Segunda Sesión, Relacionada con el Desarrollo, Crecimiento y Estado de la Industria en Energía Atómica). Marzo 20, 21, 22 y 23 del 1962. 696 páginas, \$2.25, Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington 25, D.C., U.S.A.

NOTA — Todos los precios indicados son a base de moneda de los EE.UU.

ARTICULOS

ARTICLES ON THE LENIN ICEBREAKER (Artículos Sobre el Barco Rompehielos "LENIN"). Traducción de Sudo-stroenie. Núms. 8, 11-14, 21-9, 30-8 (Agosto del 1961). 79 páginas — JPRS — 12183, \$2.00 (moneda de los EE.UU.).—Office of Technical Services, U.S. Department of Commerce, Washington 25, D.C., U.S.A.

BRIGHT FUTURE FOR FAST REACTORS. (Futuro Brillante para Reactores Rápidos). Roy Herbert. New Scientist, 14:336-8 (1962) Mayo 17.

BREEDER REACTORS (Reactores Regeneradores). A. M. Weinberg. Scientific American, 202:82-94 (1960) Enero.

PACKAGED NUCLEAR REACTORS (Reactores Nucleares-Tipo Unitario). C. H. Fox. New Scientist, 12:611-15. (1961) Diciembre 7.

NUCLEAR ENERGY IN SPACE (Energía Nuclear en el Espacio). Catorce artículos sobre diversos temas. Nucleonics, 19: (1961) Abril.

SURFACE SHIPS JOIN THE SUBS IN OUR GROWING NUCLEAR NAVY (Los Barcos se Unen a los Submarinos en el Desarrollo de Nuestra Marina Nuclear). John E. Kenton. Nucleonics 19: (1961) Septiembre, 67-78.

NUCLEAR ENERGY — WHAT IT IS AND HOW IT ACTS (Energía Nuclear — Lo que Es y lo que Hace). Andrew W. Kramer. Atomics. Una serie de artículos, empezando con la edición de Julio del 1961.

NUCLEAR POWER ON THE MARCH (Potencia Nuclear en Marcha). Business Week, Septiembre 15, 1962. 88-92.

INFORMES

CIVILIAN NUCLEAR POWER — A REPORT TO THE PRESIDENT (Energía Nuclear para Usos Civiles—Informe para el Presidente de los EE.UU.) — 1962. U.S. Atomic Energy Commission. 67 páginas. Gratis, solicitándolo a A E C Division of Technical Information Extension, P.O. Box 62, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

NUCLEAR REACTORS BUILT, BEING BUILT, OR PLANNED IN THE UNITED STATES (Reactores Nucleares Construídos, en Construcción o en Planificación en los EE.UU.). Revisado semianualmente. U.S. Atomic Energy Commission. 23 páginas. \$0,50 solicitándolo a Office of Technical Services, U.S. Department of Commerce, Washington 25, D.C.

PELICULAS CINEMATOGRAFICAS

Disponibles a base de préstamo gratis de la Division of Public Information, U.S. Atomic Energy Commission, Washington 25, D.C.

NUCLEAR REACTORS FOR SPACE (Reactores Nucleares Para el Espacio), 17 minutos, 16mm, en colores y con sonido, 1961.

NUCLEAR POWER PLANT (Planta de Energía Nuclear), 20 minutos, 16mm, en colores y con sonido, 1962.

NUCLEAR REACTIONS (Reacciones Nucleares), 29½ minutos, 16mm, en blanco y negro y con sonido, 1963.