

REACTORES NUCLEARES

Tte. de Navío Ingeniero JORGE CASAS S.



Introducción.

El empleo de la energía nuclear tanto con fines pacíficos como militares, ocupa, actualmente, el interés de los científicos de aquellos países que dirigen el mundo. Militarmente, el perfeccionamiento de armas atómicas que hagan posible su empleo sin poner en peligro a quien las utiliza para atacar o defenderse, significa el ejercer un mayor dominio psicológico sobre un enemigo posible. En el campo de la utilización pacífica surge la posibilidad de poder obtener energía eléctrica a bajo costo para la industria con el consecuente mejoramiento del estándar de vida de los habitantes del país. La "lucha pacífica" por el dominio de la energía atómica se hace más significativa cuando en su éxito final está involucrada la posibilidad de un desarrollo mejor y más económico de la sociedad que logre diseñar, construir y explotar un reactor cuya energía producida sea más económica, comparativamente, que la que produciría una planta eléctrica convencional instalada en el mismo lugar al mismo tiempo.

Para muchos de nosotros, desafortunadamente, pierde todo interés el reactor cuando nos enteramos de que sus aplicaciones prácticas se reducen, por ahora, a producir energía eléctrica o a propulsar buques y submari-

nos. Los costos de producción de energía eléctrica no han sido ni lo serán por algún tiempo, motivo de mayor preocupación. El ambiente de Candil y de Noria en que nos hemos creado no ha sido superado aún y es lógico y perdonable. El fluido eléctrico es todavía un lujo del que nos podemos privar sin sufrir graves consecuencias. Tenemos en la escala del bienestar social un sinnúmero de cosas, más elementales, aún sin resolver.

Los lectores seguramente me excusarán esta desviación del tema que me he propuesto tratar pero creo que se hacía inevitable una excusa previa a nuestra innata indiferencia por las cosas de la ciencia.

Básicamente la única diferencia entre una planta eléctrica convencional y una planta atómica, reside en la fuente de calor. La caldera es reemplazada por el reactor que produce el calor dividiendo los núcleos de uranio. El éxito de su aplicación está en encontrar el reactor o el sistema que aproveche al máximo las cualidades de alta concentración de energía y bajo costo de transporte que caracteriza a los combustibles nucleares; este artículo describe los diferentes tipos de reactores en experimentación en la actualidad sin que de ninguno de ellos se pueda decir que es típico en ningún sentido.

El proceso de fisión. Antes de seguir

sión en un reactor. El neutrón puede ser capturado por el U235 y causar otras fisiones, como ya vimos, sin embargo, puede ser capturado por los otros materiales contenidos en el conjunto, no ocurriendo por lo tanto, fisión, puede también producir colisiones al azar en el material, sin que sea capturado y también es posible que sea proyectado en tal sentido durante su trayecto que rebote fuera del reactor y se pierda. Aquellos neutrones que son capturados en el núcleo del U235 o Th232 no se pierden completamente, excepto momentáneamente, ya que el neutrón capturado en cualquiera de estos materiales produce Pu239 y U233 respectivamente por medio de ciertos cambios espontáneos en el núcleo. Este proceso, conocido como crianza, produce material fisionable que puede ser empleado para fisiones más amplias. (Ver figura 1).

De lo anterior es evidente que el primer requisito que debe llenar un reactor nuclear es el de proveer en su interior suficiente material fisionable para conservar la reacción durante el tiempo a que está diseñado que opere. El segundo requisito es que el reactor debe producir por lo menos un nuevo neutrón disponible a causa de la fisión producida por cada neutrón capturado. (Esta condición es indispensable para que exista una reacción en cadena). Así el reactor debe construirse en forma tal que cada neutrón que nace tenga la mayor posibilidad de causar fisión; esta posibilidad aumenta, aumentando el tamaño del reactor pues así los neutrones tendrán menos oportunidad de escapar y perderse. En la realidad, por determinadas condiciones de forma y material hay un mínimo de tamaño crítico bajo el cual el porcentaje de neutrones que escapa es excesivo y el reactor no sostendría una reacción en cadena.

Existe aún una condición necesaria

y favorable por aumentar las posibilidades de obtener una reacción en cadena y ella es la que todo el material no fisionable existente en el reactor, el cual tiene una fuerte tendencia a capturar los neutrones, debe eliminarse en cuanto sea posible. Esto se ha logrado purificando los materiales empleados como combustibles y usando materiales de construcción con poca tendencia a capturar neutrones.

Se ha descubierto que ciertos materiales tienen la propiedad de capturar neutrones a baja velocidad y que en general las probabilidades de que los neutrones sean capturados por el material fisionable es inversamente proporcional a su energía. Lo anterior sugiere un cuarto método para obtener la fisión y es el de emplear neutrones moderados, obteniendo, claro está, con más lentitud el cambio de energía de fisión a energía térmica (La energía de los átomos a la temperatura ambiente). La moderación de los neutrones se consume cuando ellos chocan elásticamente con los núcleos y rebotan sin ser capturados. En este proceso el neutrón da algo de su energía sinéctica al núcleo golpeado. Los núcleos con los cuales ocurre la colisión en este caso son los de un material llamado moderador y del cual se hablará más tarde.

Hemos discutido el proceso de fisión aplicado a mezclas homogéneas de materiales fisionables y los otros materiales radioactivos. Sin embargo, para aplicación práctica y por razones de facilidad de construcción y operación, los reactores no siguen al reactor ideal. Algunas de estas razones prácticas son:

1. Para remover el calor generado dentro del reactor por el proceso de fisión la estructura debe ser interrumpida por pasajes enfriadores.
2. Para prevenir que los productores de fisión, que son peligrosamente ra-

dioactivos, escapen del núcleo del reactor, los pasajes o conductos enfriadores deben forrarse con un material impermeable que no contenga ningún combustible fisionable en su estructura.

3. La estructura debe estar provista de medios para remover parte del combustible así como de accesorios para su manipulación sin que se destruya la integridad del reactor.

Componentes básicos de un reactor térmico. En general, el diseño y la operación de los reactores nucleares presenta varios problemas únicos de naturaleza técnica. La apreciación de dichos problemas es necesaria si se desean evaluar sus posibilidades como fuentes de energía que produzca trabajo aprovechable por el ser humano.

Hemos visto que "resumiendo":

1. Haciendo que los neutrones choquen contra los núcleos de los átomos de materiales fisionables y en razón de ello, estos últimos exploten, o se fisionen, se libera una tremenda cantidad de energía.

2. La mayor cantidad de esta energía aparece como energía cinética de los fragmentos fisionados. En su recorrido estos fragmentos chocan con otros átomos poniéndolos en movimiento, lo que resulta en un aumento total de la temperatura de todo el conjunto.

Con los anteriores principios en la mente, los componentes de un sistema práctico para obtener energía mecánica teniendo como fuente de energía la fisión deberán ser entonces los siguientes:

- 1—Material fisionable o combustible radioactivo.
- 2—Moderador.
- 3—Material estructural.
- 4—Reflector.
- 5—Agente refrigerante.

6—Protector biológico.

7—Mecanismos de control incluyendo instrumentos y aparatos de manipulación.

Material fisionable. Los materiales que se pueden emplear como combustibles fisionables se han discutido previamente. Además, la distribución del combustible dentro del reactor debe satisfacer los siguientes requisitos: su cantidad debe ser tal que sea capaz de mantener la reacción en cadena. Debe tener tal forma y estar localizado de tal manera que la distribución del flujo de electrones dentro del centro del reactor y por lo tanto la producción de calor, se distribuya en todo el reactor de una manera uniforme; si esta contribución no se efectúa se originan puntos calientes que pueden alcanzar temperaturas en exceso a la del punto de fusión de los materiales empleados en aquellas áreas donde existe la radiación extrema o un máximo promedio de flujo. En las otras secciones, en cambio, debido a que el flujo estará por debajo de su promedio normal, la corriente refrigerante no recibirá la cantidad de energía térmica requerida en el ciclo.

Como consecuencia lógica de lo arriba dicho, la temperatura en el centro de los elementos combustibles llegaría a ser tan alta que produciría deformaciones térmicas y rotura de los elementos. Por esta razón los elementos combustibles deben ser de pequeño tamaño y la corriente refrigerante debe poseer alta velocidad. (Cabe anotar aquí que esta condición de "alta velocidad del refrigerante" ha creado problemas de construcción en las tuberías que lo conducen).

Ya que es de gran importancia disminuir la distancia entre el lugar donde ocurre la fisión y la corriente refrigerante, los materiales fisionables deberán colocarse, consecuentemente, directamente en los canales refrigeran-

tes, protegiendo estos con una capa impermeable que los separe del combustible y evite su contaminación.

Moderador. Como vimos, el propósito del moderador en el reactor es el de reducir la velocidad de los neutrones, es decir, disminuir su energía a los niveles térmicos. Las propiedades, de un moderador varían inversamente con el peso atómico del núcleo del material empleado; por ese motivo los mejores materiales moderadores son elementos ligeros tales como el Hidrógeno, Grafito y Berilo. El deuterio es un elemento que contiene un neutrón más en su núcleo que el hidrógeno y es por esta razón llamado hidrógeno pesado.

Reflectores. Si el centro de un reactor no fuera encerrado dentro de una especie de recipiente, gran cantidad de los neutrones se escaparían. Para disminuir esta fuga de neutrones se rodea el núcleo del reactor con un material que tenga la propiedad de regresar los neutrones que traten de escapar, enviándolos de nuevo al núcleo del reactor. Este material es llamado reflector. Además de su capacidad reflectora, el valor de un buen reflector depende de su capacidad para salvar el material fisiónable.

Refrigerantes. La energía térmica producida en el núcleo del reactor debe transmitirse por medio de una sustancia al equipo diseñado para convertir esta energía en energía mecánica o potencia aprovechable. (El refrigerante vendría entonces a hacer el papel que el agua desempeña en el ciclo de vapor). La escogencia de la sustancia refrigerante se limita cuando, añadidos a los estrictos requerimientos de ingeniería, agregamos los requerimientos adicionales peculiares a los reactores nucleares. Las restricciones impuestas a la escogencia de la sustancia refrigerante van desde las consideraciones de su punto de fisión has-

ta la de poseer una baja tendencia a absorber neutrones. Entre las sustancias más empleadas se encuentran:

a) **Agua.** Este refrigerante tiene la propiedad que sus características y comportamiento están bien establecidas; pura y libre de gases es compatible con la mayoría de los materiales estructurables; es además un buen moderador. Sin embargo, el agua debe ser presionada para prevenir su vaporización, pues cualquier cambio de estado del refrigerante durante su paso por el reactor es indeseable.

El reactor construido por la Westinghouse Electric Corporation y que está instalado en el primer submarino nuclear "Nautilus" emplea agua como refrigerante a una presión de 2.000 libras por pulgada cuadrada y a una temperatura de 525 grados F.

b) **Agua pesada.** Las propiedades de esta clase de agua son casi idénticas a las del agua común, con la diferencia de que tiene una más baja tendencia a absorber neutrones.

c) **Metales líquidos.** Los metales de bajo punto de fusión tales como el Hg, Na y aleaciones de Na y K, tienen características que los catalogan como posibles refrigerantes. Los metales líquidos se caracterizan por su alta conductividad térmica, propiedad que reduce la rata volumétrica de flujo requerido para extraer una cantidad dada de calor. Desafortunadamente la tecnología para el empleo de los materiales líquidos no se encuentra aún bien desarrollada. Por ejemplo, es desconocido si los materiales comunmente usados como estructurales, tales como el hierro, son solubles en ciertos metales líquidos.

Control. Antes de enumerar los diferentes tipos de reactores diremos algo sobre la forma como se controla el funcionamiento de uno. Usualmente este control se lleva a cabo variando la posición dentro de su interior de

unas varillas o barras de material con alta capacidad de capturar neutrones. Cuando dichas barras están completamente insertadas dentro de la masa de material fisiónable, absorben tantos neutrones que suspenden la reacción en cadena. A medida que son sacadas, lentamente, se llega a un punto en el cual la reacción es capaz de mantenerse por sí misma, es decir, el número de neutrones en cada generación es igual al número en cualquier otra generación. Si las barras se sacan aún más, los neutrones pueden multiplicarse todavía más, aumentando en esta forma la potencia generada por el reactor.

Para reducir la tasa de multiplicación de los neutrones, basta solamente con insertar nuevamente las barras dentro de la masa de material fisiónable.

La habilidad del material de las barras de control para absorber neutrones, disminuye con gran intensidad a medida que la energía de los neutrones absorbidos aumenta. Por esta razón, el empleo de barras de control no es aplicable en los reactores llamados "rápidos" (reactores en los cuales la mayoría de la fisión es causada por neutrones con alta energía, neutrones no moderados), en estos reactores el control se efectúa moviendo el reflector, es decir regulando el escape de neutrones.

Tipos básicos de Reactores.

De acuerdo con su desarrollo podemos reunir los reactores en dos grupos: los que emplean agua como refrigerante y los que usan, en cambio, metales líquidos como el sodio. Dentro de cada uno de estos grupos existen múltiples posibilidades de variaciones, por ejemplo, un tipo dado de reactor puede usar U o Th como combustible o puede que únicamente opere con su carga original. Como se di-

jo al principio, todos los reactores actuales son experimentales y de su desempeño se aclararán el sinnúmero de incógnitas de carácter técnico que ahora los rodean.

Reactor de Agua a presión. (Fig. 2).

El calor generado por el núcleo es transferido por medio de agua a 2.000 libras por pulgada cuadrada de presión y 525 grados F de temperatura a un intercambiador de calor en el cual se produce vapor saturado a 600 libras por pulgada cuadrada de presión; este vapor, a su turno, va a mover una turbina convencional acoplada a un generador eléctrico.

De este tipo es el primer reactor instalado en el primer submarino atómico.

Debido a su alta presión de trabajo, el núcleo del reactor está encerrado dentro de un recipiente de acero al carbono, de 9 pies de diámetro y recubierto de acero inoxidable.

Reactor de agua en ebullición (Fig. 3)

La manera más lógica de mejorar el desempeño de un reactor enfriado por agua es el de generar el vapor para la turbina directamente en el núcleo, en cambio de hacerlo en el intercambiador de calor. De esa manera se elimina un circuito de circulación de agua y se puede bajar la presión del sistema.

Este método tiene, desafortunadamente, entre sus varias desventajas la de que el vapor radioactivo produce contaminación a la turbina dificultando su mantenimiento.

Reactor homogéneo (Fig. 4)

Los dos reactores anteriores comparan las limitaciones esenciales de todos los reactores heterogéneos. Aquellos en los que el combustible, moderador y

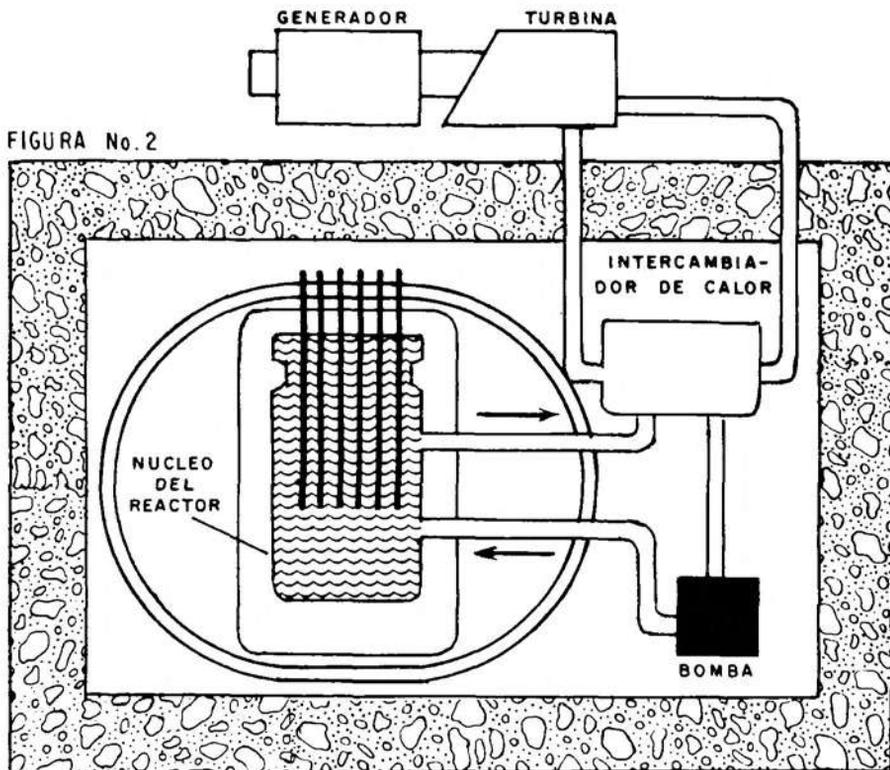


FIGURA No. 2

FIGURA No. 2

refrigerante están separados, tienen un problema de transferencia de calor, son susceptibles a avería por radiación y el reproceso de su combustible es difícil. En consideración a estas circunstancias se introdujo el sistema homogéneo en el cual el combustible (U o Th) se disuelve en agua. El uranio se emplea en forma de sal. Esta salmuera circula a través de bombas e intercambiadores de calor para extraer el calor generado por los átomos en fisión. El aspecto más atractivo de este reactor está en su simplicidad, pues no requiere varillas para su control, ya que es autorregulado.

Reactor enfriado por sodio (Fig. 5)

El sodio líquido que rodea el núcleo circula a través de un par de sistemas de enfriamiento para generar el vapor que va a la turbina. Con el fin de evitar la contaminación del vapor, en el primer intercambio del vapor, el sodio primario da su calor a un segundo circuito de sodio el cual en el intercambiador de calor secundario hace hervir el agua y produce el vapor que va a la turbina.

Reactor-generator rápido (Fig. 6)

El calor de fisión producido por neutrones rápidos es transferido, emplean-

FIGURA No.3

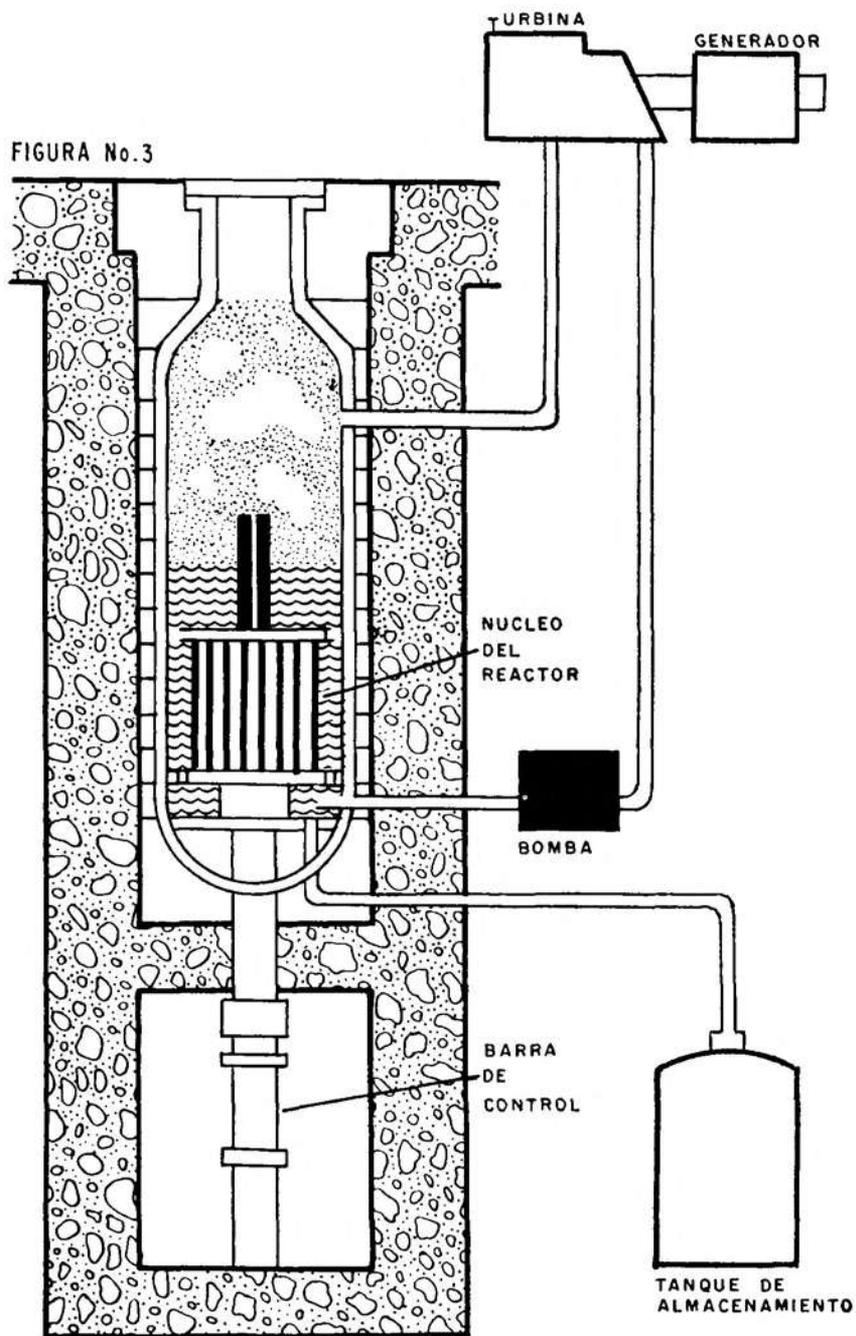


FIGURA No. 3

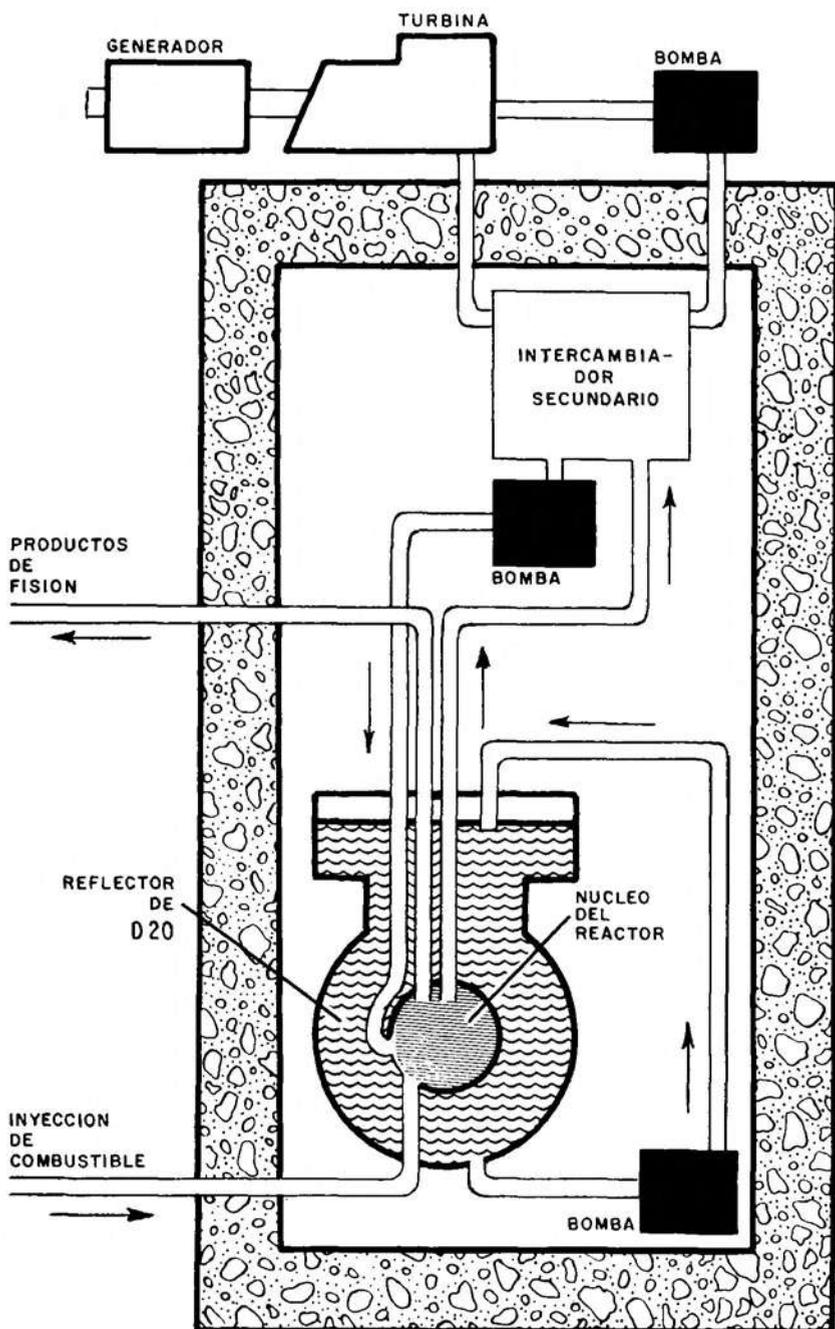


FIGURA No. 4

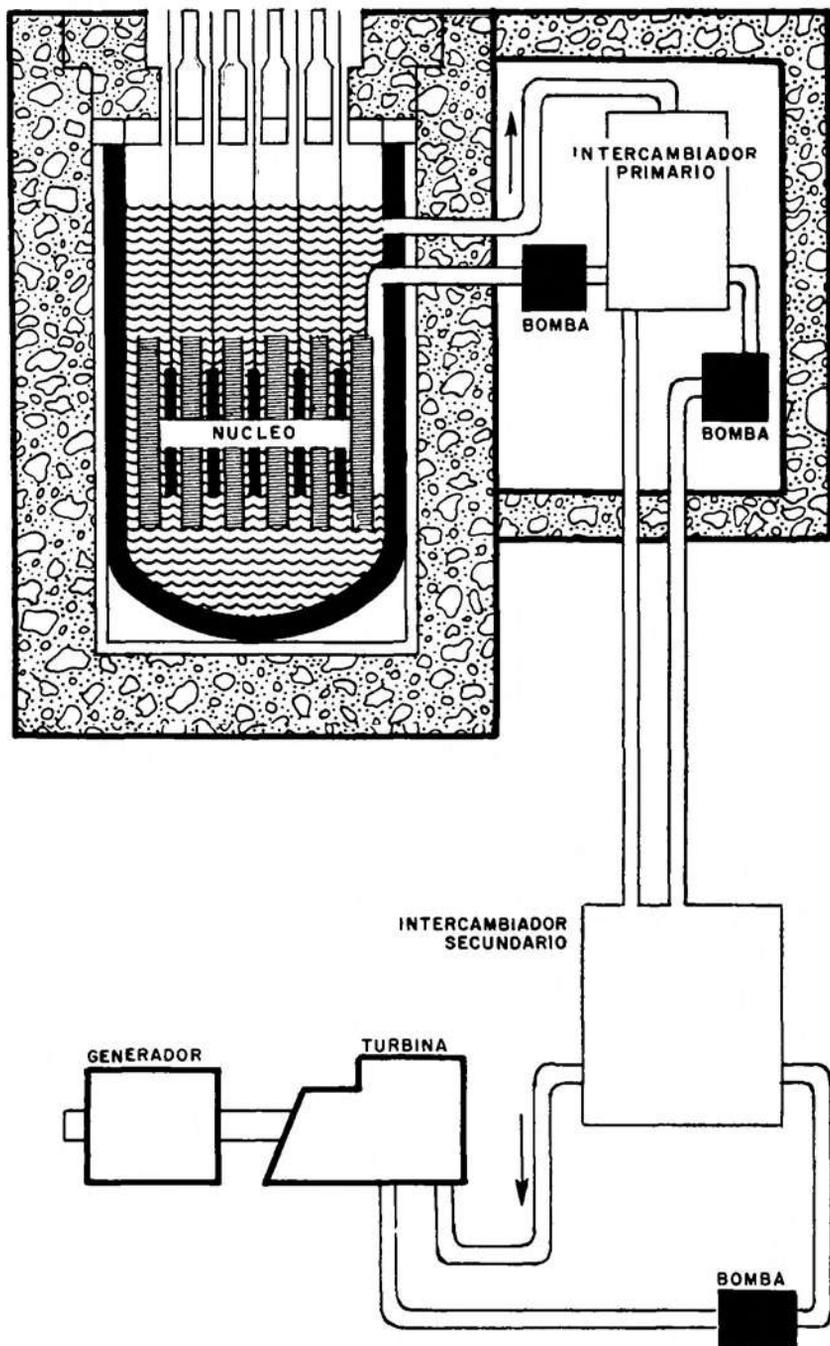


FIGURA No. 5

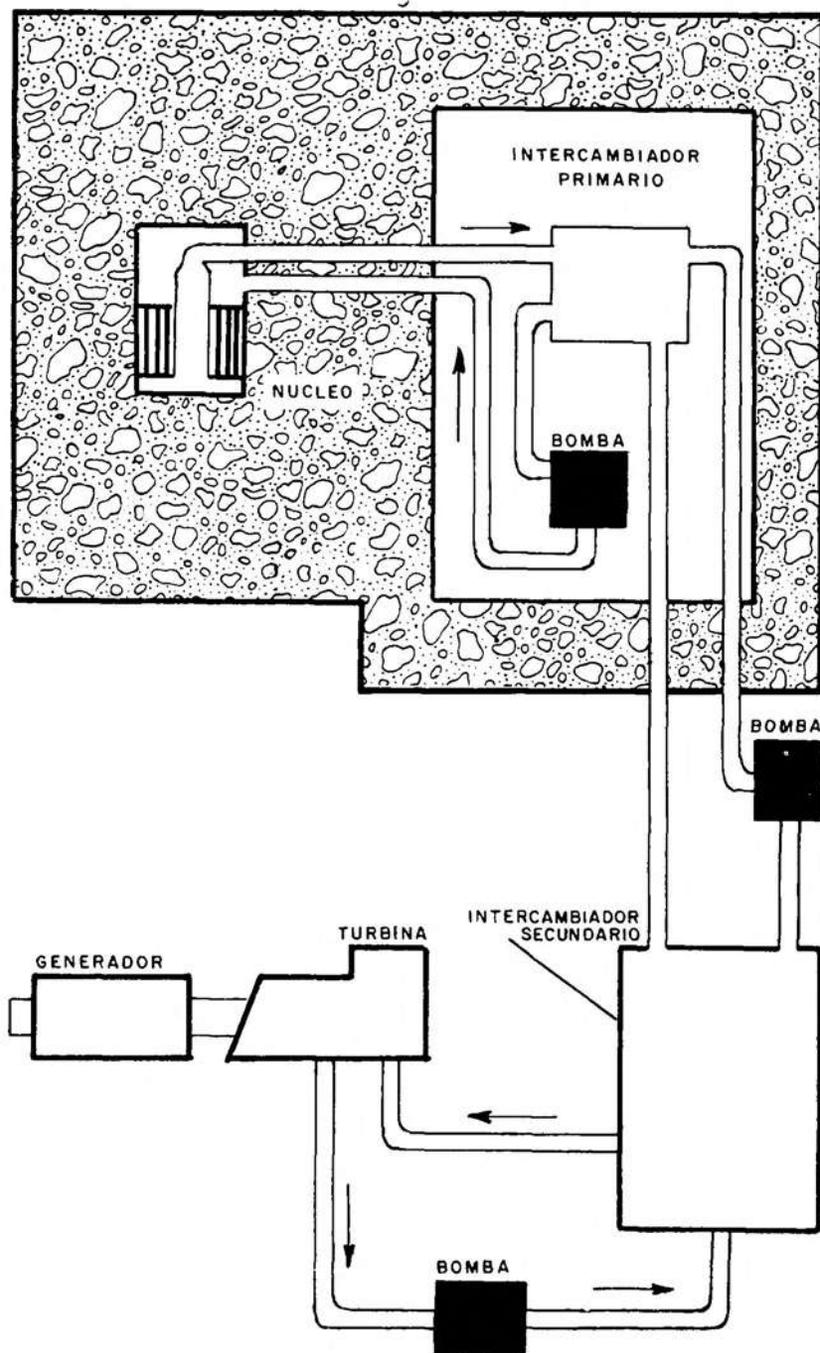


FIGURA No. 6

do sodio, a través de un ciclo intermedio (como el reactor anterior), a la turbina en forma de vapor. Los neutrones que escapan del núcleo producen plutonio 239 a partir del U238. Este reactor está diseñado para generar, es decir, producir más material fisionable del que consume. Su control es difícil.

Reactor enfriado por gas (Fig 7)

De este tipo es el instalado por los ingleses en Calder Hall. Emplea CO₂ como gas refrigerante y es muy posible que sea cambiado por helio en el futuro. La instalación requiere una chimenea por donde descarga el aire empleado en enfriar el reactor.

Este tipo se ha empleado, con algunas modificaciones, para mover directamente turbinas de gas. El calor transportado por el gas desde el reactor, es empleado en una turbina donde se transforma en energía mecánica.

El gas regresa al reactor después de haber trabajado en la turbina.

Perspectiva.

El futuro de la energía atómica es brillante. La humanidad tiene en empleo grandes posibilidades de bienestar social y progreso económico y científico. El futuro puede ser también terriblemente nefasto si toda esa energía ahora desatada, se emplea en destruir en cambio de edificar. Las fuerzas políticas que han dividido el mundo en dos grandes bloques conocen, afortunadamente, las características de esta energía descomunal ahora

en sus manos y no la utilizarán para destruir a un enemigo potencial pues significará su propia destrucción. En la estrategia moderna de la guerra atómica, quien pegue primero morirá de segundo.

Mil conceptos nuevos de ingeniería se han incorporado a los ya existentes como consecuencia del empleo del átomo. Materiales que hasta hace algunos años no pasaban de ser curiosidades de laboratorio, son producidos en escala industrial para ser empleados en la confección de equipos y estructuras usadas para manipular el átomo, aún los materiales convencionales han sufrido modificaciones para adaptarlos a los nuevos usos. El concreto es un ejemplo característico, sus propiedades protectoras han tenido que mejorarse.

Para el hombre, ser por naturaleza dispuesto a aceptar desafíos, el átomo ofrece un nuevo reto a sus capacidades intelectuales, un estímulo a su espíritu de explorador innato, una oportunidad de crear bienestar y progreso.

La sociedad que primero domine esta nueva fuente de energía, dominará el mundo sin necesidad de ir a la guerra para imponerse.

Bibliografía.

Para escribir este artículo se consultaron las siguientes obras:

- Combustion Engines Manual USN. Power Reactors. Alvin M. Weingberg.
- Modern Physics Thomas B. Brown.
- Nuclear Power Reactors. Otto F. Joklik.