

PRIMER EJERCICIO

GRUPO B - FÍSICA Y TECNOLOGÍA NUCLEARES

TEMA 12: Centrales nucleares de agua ligera tipo BWR. Características, análisis de las mismas.

INDICE

1. RESUMEN	1
2. DESCRIPCIÓN, PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y ANÁLISIS DE LAS MISMAS.....	1
2.1. <u>VASIJA</u>	1
2.2. <u>ELEMENTOS COMBUSTIBLES</u>	2
2.3. <u>BARRAS DE CONTROL</u>	2
2.4. <u>SEPARADORES Y SECADORES DE VAPOR</u>	2
2.5. <u>SISTEMA DE RECIRCULACIÓN</u>	3
2.6. <u>SISTEMAS AUXILIARES</u>	4
2.6.1. <i>Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo (ECCS)</i>	4
2.6.2. <i>Sistema de Evacuación de Calor Residual (RHR)</i>	5
2.6.3. <i>Sistema de Refrigeración del Núcleo Aislado (RCIC)</i>	6
2.6.4. <i>Sistema de Purificación del Agua del Reactor (RWCU)</i>	7
2.6.5. <i>Sistema de purificación y refrigeración de las piscinas de combustible y de contención</i>	7
2.6.6. <i>Sistema de Control Líquido de Reserva (SBLC)</i>	7
2.6.7. <i>Contención</i>	8
3. BIBLIOGRAFÍA.....	9
4. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE TEMARIO	9

INDICE DE FIGURAS

1. ESQUEMA DE UNA CENTRAL DE AGUA EN EBULLICIÓN
2. CICLO BWR DE REFERENCIA. EDIFICIOS
3. VASIJA DEL REACTOR
4. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN
5. DISTRIBUCIÓN DE CAUDAL EN LA VASIJA DEL REACTOR
6. SEPARADOR DE VAPOR
7. SECCIÓN DEL SECADOR DE VAPOR
8. CONEXIÓN DEL SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN CON LA VASIJA DEL REACTOR
9. ISOMÉTRICO DE LA BOMBA DE CHORRO
10. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LAS BOMBAS DE CHORRO
11. BARRA DE CONTROL
12. DISPOSICIÓN DE LAS BARRAS DE CONTROL
13. VARILLAS DE COMBUSTIBLE
14. CONJUNTO DE COMBUSTIBLE
15. CONTENCIÓN MARK III DE BWR-6
16. RWCU
17. SBLC
18. RCIC
19. ECCS
20. RHR

1. RESUMEN

El sistema nuclear de un reactor de agua en ebullición de ciclo directo es un sistema de generación de vapor que consiste en un núcleo y una estructura interna, encerrados dentro de una vasija de presión, unos sistemas auxiliares de operación y de seguridad del reactor nuclear y la instrumentación y control necesarios.

Los reactores de agua en ebullición tienen como fundamento el obtener vapor en la propia vasija del reactor así como aprovechar las mejores condiciones de transmisión de calor que pueden lograrse cuando hay ebullición en el líquido que actúa como moderador y refrigerante.

Una disposición general del tipo de Central BWR se puede ver en la figura 2.

Como se ve, el agua que circula a través del núcleo del reactor produce vapor saturado al cual es "separado" del circuito de recirculación, secado en la parte superior de la vasija y mandado directamente a la turbina.

En las figuras 1, 2, 3 y 4 se pueden ver el interior de la vasija y el sistema de recirculación.

2. DESCRIPCIÓN, PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y ANÁLISIS DE LAS MISMAS

2.1. Vasija

Tiene forma cilíndrica rematada por dos casquetes semiesféricos, de los cuales el superior es desmontable, estando unido a la parte inferior de la vasija mediante una brida con pernos.

El material utilizado es acero al carbono de grano fino, estando recubierto su interior por una capa de acero inoxidable.

Se apoya sobre un pedestal de hormigón y acero que se construye solidario a la cimentación del edificio.

Las barras de control y la totalidad de la instrumentación interior del núcleo penetran por la parte inferior de la vasija debido a la existencia en su parte superior de los separadores y secadores de vapor.

La tobera de salida del vapor se encuentra en la parte superior de la zona cilíndrica mientras que en la parte inferior están alojadas las toberas de entrada y salida del agua de recirculación.

Entre los elementos internos de la vasija del reactor vamos a considerar: los elementos combustibles que forman el núcleo y en los cuales se genera la energía, las barras de control que nos permiten controlar y parar el reactor, el barrilete o envuelta que rodea al núcleo separando la zona en donde se produce la ebullición de la zona que aloja las bombas de chorro, los separadores de vapor situados sobre el núcleo y los secadores de vapor colocados a su vez sobre los anteriores y que nos permiten obtener vapor saturado sin agua de arrastre.

2.2. Elementos combustibles

Los elementos combustibles están formados por barras combustibles y un canal que las envuelve.

Las barras son de Zircaloy-2 en las que se han introducido pastillas de UO_2 sinterizado y después de haber producido el vacío en el interior se rellenan con Helio y se cierran herméticamente.

Las barras se agrupan en una posición rectangular de 8x8 barras (también pueden ser de 9x9 o 10x10 dependiendo del diseño), coexistiendo las barras de combustible, de agua y de unión.

En la figura 12 se muestra una disposición de cuatro elementos de combustible y una barra de control (conjunto denominado "celda de control"), en la figura 13 se muestra una varilla de combustible, y en la figura 14 se muestra un conjunto de combustible.

2.3. Barras de control

Tienen sección cruciforme, con un material absorbente de B_4C compactado en el interior de tubos de acero inoxidable (18 en cada brazo de la cruz). Ver figura 11.

Estas barras de control se introducen en el núcleo por la parte inferior del reactor, lo que impide que las barras de control puedan introducirse simplemente por gravedad, con lo cual se tiene que diseñar un sistema que nos asegure la inserción de las barras en el núcleo con una gran fiabilidad cuando ello sea necesario.

2.4. Separadores y Secadores de Vapor

Los separadores de vapor tienen una estructura en forma de cúpula a la cual van soldadas una serie de tubos en cuya parte superior se encuentran los separadores de vapor que son de tres etapas (figura 6). Consisten en láminas dispuestas en forma helicoidal que obligan al vapor a realizar una trayectoria helicoidal, depositándose las gotas de agua sobre la pared del separador a la que llegan por la fuerza centrífuga que se les comunica.

El vapor que abandona los separadores entra en el conjunto de secadores de vapor, uno de cuyos paneles se representa en la figura 7, en donde las flechas representan la trayectoria del vapor, el cual se dirige a la tobera de salida para ser utilizado en la turbina. El agua depositada en los secadores desliza por las paredes de los mismos descargando después de pasar por una serie de tuberías en la zona anular desde donde es recirculada.

2.5. Sistema de Recirculación

La misión de este sistema es la de aumentar el caudal de recirculación en el núcleo. Consiste en dos lazos situados en el exterior de la vasija del reactor, pero en el interior de la contención, conteniendo cada uno de ellos una bomba de recirculación, una válvula de cierre, una válvula de regulación, una válvula de aspiración, una válvula de descarga y un paso en derivación; ya en el interior del reactor están las bombas de chorro. En las figs. 1 y 4 se ve con claridad el sistema y en la fig. 8 se representa en isométrica la vasija con un lazo de recirculación.

Formando parte de este sistema en el interior de la vasija del reactor se encuentran las bombas de chorro situadas en la región anular entre la envuelta y la vasija, no tienen partes móviles. Cada dos bombas están servidas por una única tubería de alimentación que atraviesa la vasija, para conectar a una tubería de distribución unida a la descarga de la bomba (figura 9).

Por lo tanto los posibles caminos del agua que fluye a través del núcleo del reactor son:

- a) Aproximadamente $1/2$ se transforma en vapor y vuelve a la vasija a través de la tobera de agua de alimentación después de haberse condensado en el condensador.
- b) $1/3$ aproximadamente es extraído de la vasija (plenum inferior) y recirculado de nuevo a través de las bombas de chorro al núcleo del reactor de donde pasa a través de los separadores de vapor y secadores al plenum superior.
- c) Agua que es absorbida por las bombas de chorro del anillo e inyectado a la cámara de aspiración volviendo al plenum inferior por el mismo camino señalado en el apartado b).

El sistema de recirculación puede controlar la potencia generada en el núcleo entre amplios márgenes, para ello basta modificar el flujo de refrigerante a través del reactor lo cual se consigue modificando la apertura de la válvula de control. En efecto, supongamos el reactor en estado estacionario y que en un instante determinado aumentamos el caudal del sistema de recirculación, abriendo la válvula de regulación, el caudal que circula a través del núcleo aumentará también disminuyendo la cantidad de burbujas en el mismo, lo cual equivale a un incremento positivo de reactividad que hará aumentar la temperatura del núcleo hasta que el correspondiente aumento de burbujas suponga una reactividad negativa que

compense la anterior, estabilizándose la potencia generadora a un nivel más alto. Un razonamiento análogo podemos utilizar para demostrar que una disminución en el caudal de recirculación originaría una disminución en la potencia generada en el núcleo. Lo que se acaba de exponer es muy favorable para el seguimiento de la carga por la Central, ya que con ello se permiten pequeños cambios de potencia mediante el control de flujo de recirculación, sin alterar la posición de las barras de control. El efecto de las burbujas tiene además la ventaja de que tiende a igualar la densidad de potencia en todo el volumen del núcleo y por tanto a disminuir los factores anteriormente, ya que si en algún punto por cualquier circunstancia aumenta la temperatura, aumenta también el coeficiente de burbujas y por tanto, disminuirá en ese punto el número de fisiones, tendiendo a disminuir la temperatura. Es evidente que esto favorecerá la homogeneidad en el quemado del combustible en todo el reactor y dificultará el que se produzcan daños en el núcleo para aumento locales de temperatura.

Formando parte de lo que hemos denominado sistema primario se encuentran las tuberías de vapor principal hasta las válvulas de aislamiento exteriores. Dichas tuberías arrancan desde la parte superior de la vasija y se dirigen separadamente a la alimentación de la turbina. Después de abandonar la vasija, las tuberías salen de la contención. En el interior de la contención se encuentran las válvulas de alivio, las de seguridad y las de 4 de aislamiento interior. En el exterior de la contención se encuentran las otras 4 válvulas de aislamiento exterior. Las de alivio y seguridad tienen por misión proteger automáticamente de sobrepresiones en el sistema primario del reactor y la descarga de vapor se realiza bajo agua en la piscina de supresión, donde se condensa el vapor.

2.6. Sistemas Auxiliares

2.6.1. Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo (ECCS)

El objetivo del sistema es reducir la liberación a la atmósfera, en caso de accidente de pérdida de refrigerante (LOCA), de los productos radiactivos, para lo cual se intenta mantener en condiciones de integridad la primera barrera que son las propias vainas de combustible.

Consta de 4 subsistemas, que se describen brevemente a continuación y que se representan en la figura 19.

A. HPCS.- Sistema de aspersión del núcleo a alta presión

Consiste en un dispositivo de rociadores que descargan sobre el núcleo y aspiran del depósito de almacenamiento de condensado, mediante una bomba de alta presión que se inicia automáticamente cuando desciende el nivel de agua en el núcleo o aumenta la presión en el pozo seco (estructura dentro de la contención).

B. LPCS.- Sistema de aspersión del núcleo a baja presión

Idem que el de alta presión, pero aspirando de la piscina de supresión y diseñado para condiciones de baja presión en vasija. Se inicia automáticamente ante las mismas condiciones.

C. ADS.- Sistema de despresurización automática

Se inicia cuando los sistemas de refrigeración de alta presión no son capaces de mantener el nivel de agua adecuado en el núcleo. Está constituido por un grupo de válvulas de alivio/seguridad, que permiten despresurizar el reactor para permitir la actuación de los sistemas de baja presión.

D. LPCI.- Sistema de inyección de refrigerante a baja presión

Utiliza las bombas y los cambiadores de calor del sistema de evacuación de calor residual (RHR), estableciendo un circuito cerrado aspirando de la piscina de supresión y volviendo a la misma a través de la rotura, de forma que se permita mantener el núcleo adecuadamente refrigerado con agua.

2.6.2. Sistema de Evacuación de Calor Residual (RHR)

Objetivos del sistema:

- Extraer el calor de desintegración de los productos de fisión durante la parada normal y recarga de combustible.
- Restaurar y mantener el nivel de agua en el reactor en condiciones normales y anormales, de forma que se mantenga la integridad de las vainas de combustible.
- Limitar la temperatura de la piscina de supresión.
- Suplementar la capacidad de refrigeración del sistema de purificación y refrigeración de las piscinas de contención y almacenamiento de combustible.

En la figura 20 se representan los diversos modos de operación del RHR que brevemente describimos a continuación.

1. LPCI.- Es parte del ECCS, ya descrito. Una Central BWR-6 dispone de 3 lazos del RHR que pueden ser alineados en modo LPCI (son los LPCI-A, B y C), 2 de los cuales (A y B) permiten la evacuación de calor a través de los cambiadores.

2. Refrigeración de la piscina de supresión: limita la temperatura de ésta cuando se tiene descarga de vapor a través de la misma. La bomba hace pasar el agua a través de los cambiadores de calor del sistema, donde se enfría, descargando el agua a la propia piscina.
3. Condensación de vapor del reactor: actúa en caso de aislamiento de la vasija y simultáneamente con la descarga de vapor a la piscina de supresión, empleando una combinación de RHR y sistema de refrigeración del núcleo aislado (RCIC). El vapor a temperatura y presión reducidas es dirigido a los cambiadores de calor donde se condensa pasando el condensado al RCIC que lo devuelve a vasija. (Modo raramente empleado en la práctica, aunque se dispone del mismo).
4. Refrigeración del núcleo en parada fría: extrae del mismo el calor residual después de parado el reactor para la recarga de combustible o para realizar un mantenimiento con la Central en parada fría. El sistema se inicia manualmente, una vez que se ha alcanzado en el núcleo una presión inferior a 135 psi, disminuyendo la temperatura a 120 °F en unas 20 horas. A través de la línea de succión del lazo de recirculación, el agua es conducida a los cambiadores de calor, descargando por las líneas de agua de alimentación.
5. Refrigeración de la contención por rociado: esta función del RHR permite refrigerar la contención, condensando cualquier vapor que se escapase del pozo seco, y protegiendo contra la sobrepresión de la contención.

2.6.3. Sistema de Refrigeración del Núcleo Aislado (RCIC)

Objetivos (ver figura 18):

- Mantener suficiente agua en la vasija para refrigerar el núcleo y mantenerlo en espera en condiciones de aislamiento del reactor (en estas condiciones queda aislado del condensador de la turbina y del agua de alimentación).
- Permitir la parada completa del reactor cuando ha habido interrupción de alimentación de agua a vasija.

El sistema RCIC dispone de una turbo bomba accionada por vapor de la vasija del reactor, el cual es descargado en la piscina de supresión. La bomba aspira del depósito de almacenamiento de condensado, de los cambiadores de calor del RHR, o en ultimo término de la piscina de supresión, descargando en el interior de la vasija a través del rociador de la parte superior de la misma. Por tanto el sistema no necesita de suministro exterior de energía.

2.6.4. Sistema de Purificación del Agua del Reactor (RWCU)

La misión de este sistema es mantener un alto nivel de pureza en el agua del reactor eliminando de ella los productos de corrosión y cualquier otras impurezas solubles o insolubles. El sistema proporciona además la posibilidad de mantener el inventario de agua en el sistema primario.

Este sistema de purificación fig. 16, se dimensiona para tratar la totalidad del volumen de agua del reactor cada cuatro horas y media y puede operar tanto en funcionamiento normal de la central como en períodos de arranque, parada y cambio de combustible. Consta de dos bombas del 50% de capacidad por cada uno y dos unidades filtro-desmineralizadoras del 50% de la capacidad.

El agua a tratar por este sistema se extrae de la aspiración de las bombas de recirculación, enfriando las por medio de dos cambiadores de calor, uno regenerativo y otro no regenerativo, antes de hacerlo circular por filtro y el lecho mixto de resinas, donde es purificado, posteriormente vuelve al cambiador de calor regenerativo en donde se recupera parte del calor cedido antes de ser inyectada a la tubería de agua de alimentación.

2.6.5. Sistema de purificación y refrigeración de las piscinas de combustible y de contención

Se proyecta este sistema para mantener puras el agua de las piscinas de la contención y del combustible así como para evacuar el calor desprendido por los elementos combustibles quemados y el calor que se transfiere a la piscina de la contención desde el denominado pozo seco donde se encuentra el reactor.

El sistema se dimensiona para poder evacuar además del proveniente del pozo seco, el calor residual de una carga de combustible recién salido del reactor y el de otra perteneciente a la recarga anterior. Si el calor a evacuar es superior debido a la existencia de mayor número de elementos combustibles puede utilizarse los cambiadores de calor del sistema de evacuación del calor residual.

2.6.6. Sistema de Control Líquido de Reserva (SBLC)

Es una salvaguardia de ingeniería, que deber actuar únicamente en caso de no poderse insertar en el núcleo del reactor suficiente número de barras de control, para conseguir la parada del mismo y su enfriamiento normal.

Consta, fig. 17, de un depósito de almacenamiento, de una solución

absorbente de neutrones, dos bombas de desplazamiento positivo, y dos válvulas explosivas con las tuberías correspondientes que inyectan la solución absorbente directamente en el núcleo a través de la línea de descarga del HPCS (tal es el diseño en la Central Nuclear de Cofrentes).

La cantidad de solución absorbente a introducir en el núcleo, se calcula para que la reactividad negativa equivalente mantenga subcrítico el reactor, incluso en la condición de frío, y teniendo en cuenta, además, el efecto de temperatura y de burbujas, el efecto Doppler y la variación por desintegración de la proporción de Xe en el combustible.

El absorbente normalmente utilizado es el pentaborato de Sodio que es mucho más soluble en agua que el ácido bórico, no obstante, para evitar taponamientos que pudieran originarse por la disposición de precipitados sobre el fondo del depósito se eleva la salida del mismo por encima del fondo, haciendo burbujear aire en el interior de la solución para facilitar la mezcla, además, para evitar la cristalización se mantiene mediante calentadores eléctricos la temperatura de la solución ligeramente por encima de la de saturación.

En la sala de control existen los indicadores y la instrumentación necesaria para el conocimiento de la operatividad del sistema, así como el interruptor de puesta en función con cerradura de seguridad.

Cuando el operador decide inyectar el agua con el veneno en el interior del núcleo introduce la llave en la cerradura y pone en marcha el sistema explotando los fulminantes de las válvulas de explosivo y poniéndose en acción una de las bombas de inyección.

2.6.7. Contención

Con el fin de reducir al mínimo el escape al medio ambiente de productos radiactivos el reactor se rodea de una envoltura denominada contención de acero al carbono en forma cilíndrica y cúpula elipsoidal y suelo plano (éste denominado "liner"). La parte cilíndrica está anclada a la losa de cimentación del edificio. El pozo seco, los muros de contención y el pedestal del reactor transmiten las cargas a la losa del suelo a través del liner. Es una estructura de Categoría sísmica I.

La totalidad del circuito primario está ubicado en el interior de la contención, que se proyecta para resistir las siguientes cargas:

- cargas térmicas
- cargas vivas
- cargas muertas
- cargas sísmicas
- fuerza del viento - cargas hidrostáticas

- cargas de pretensado

Siendo las cargas críticas las originadas por el accidente base de diseño y las sísmicas.

En la figura 15 se representa la contención denominada Mark III en la cual vemos el reactor confinado en un recinto denominado pozo seco. Es un cilindro de hormigón reforzado, con un techo plano de plancha de acero que tiene, en la parte Central, una cubierta extraíble, que sirve para las operaciones de recarga y mantenimiento. Es una estructura de Categoría sísmica I.

En el caso de accidente LOCA la presión de dicho pozo seco aumenta haciendo descender el agua situada en la piscina de supresión hasta que el vapor alcanza los venteos horizontales pasando a la contención después de haber burbujeado en el agua en donde una gran parte de él se condensa, consiguiéndose así reducir en gran medida la presión máxima que se alcanza en la contención.

También proporciona el blindaje contra radiaciones para permitir el acceso a zonas situadas fuera del propio pozo seco y provee protección contra proyectiles y contra roturas provocadas por golpes de ariete en tuberías.

3. BIBLIOGRAFÍA

1. Descripción de una Central de agua en ebullición. Lucila Izquierdo. 1982.
2. General Description of a Boiling Water Reactor. General Electric. 1980.

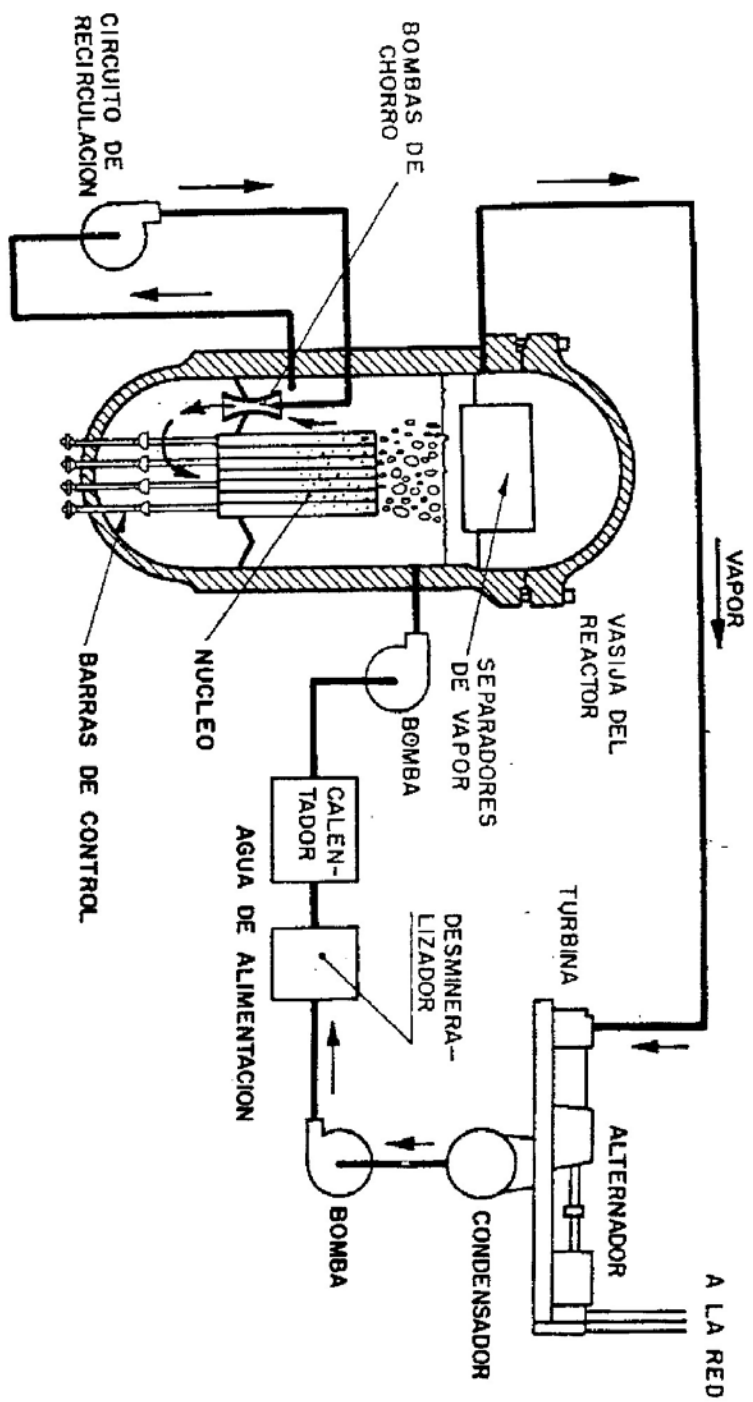
4. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE TEMARIO

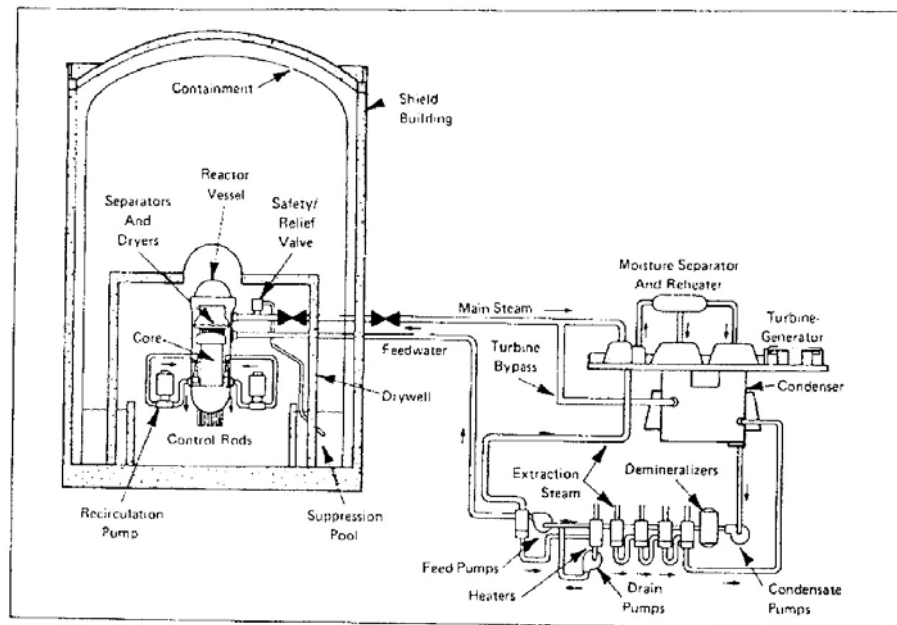
Este tema tiene relación directa con el contenido de los siguientes temas de temario:

B.4, B.9, B.11, B.13, B.14, B.15.

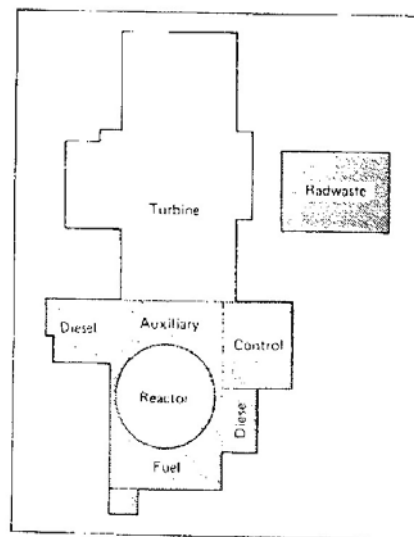
TEMA B-12

FIGURAS

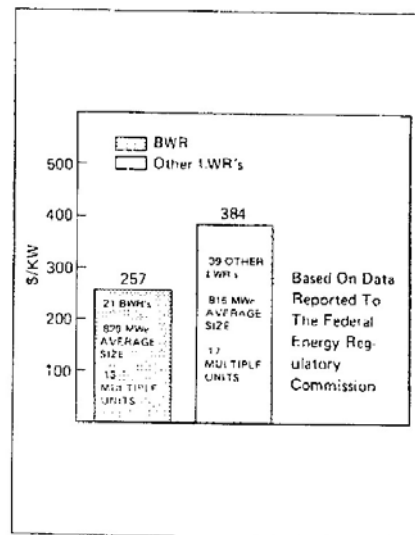




BWR Reference Cycle



Standard Reactor Island Plot Plan



U.S. LWR Plant Cost Comparison

Figura 2

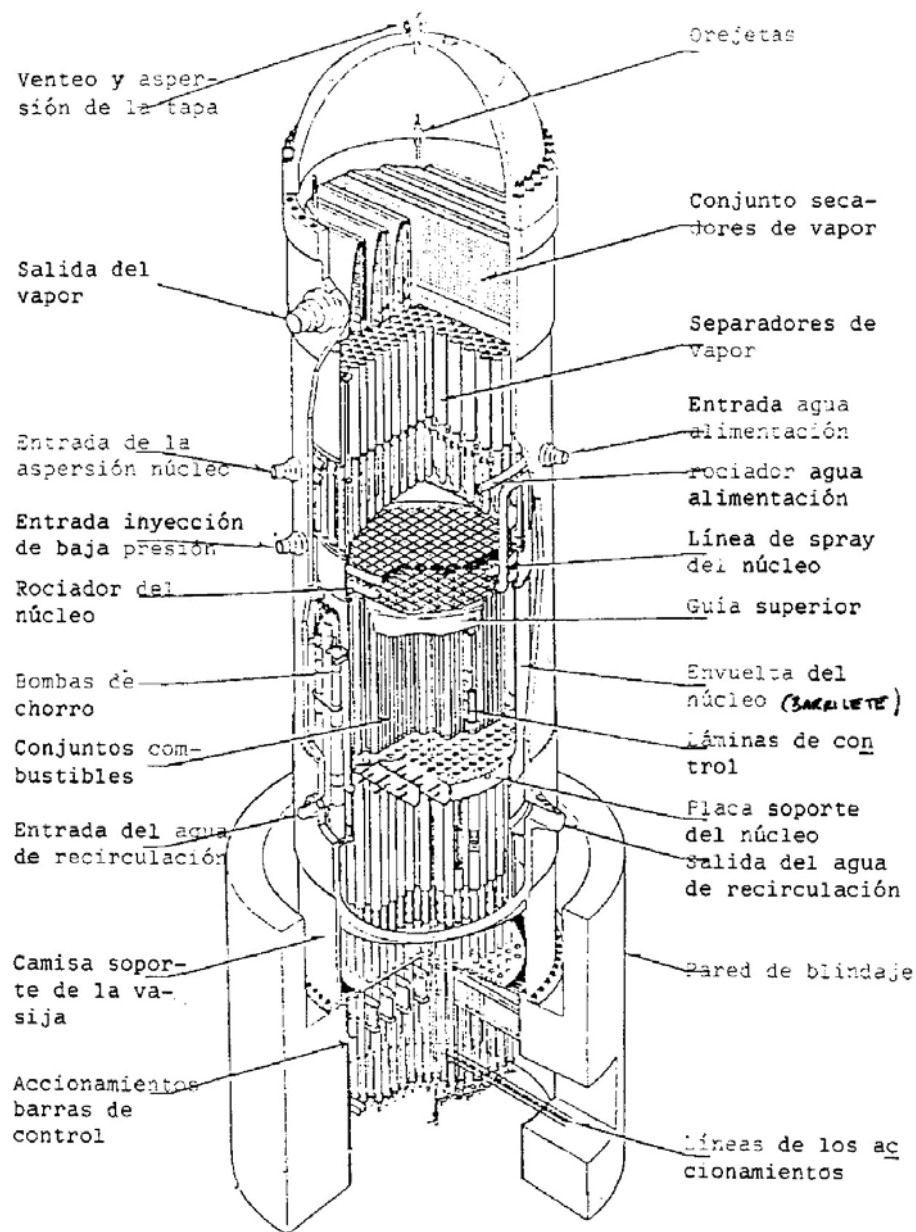


Figura 3

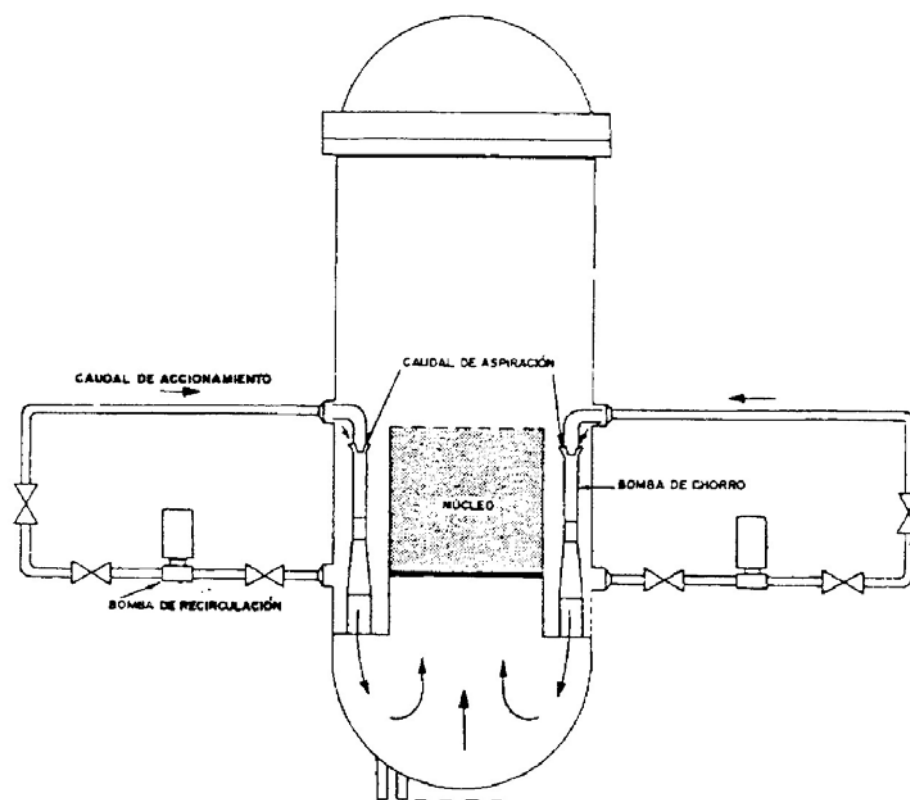


Figura 4

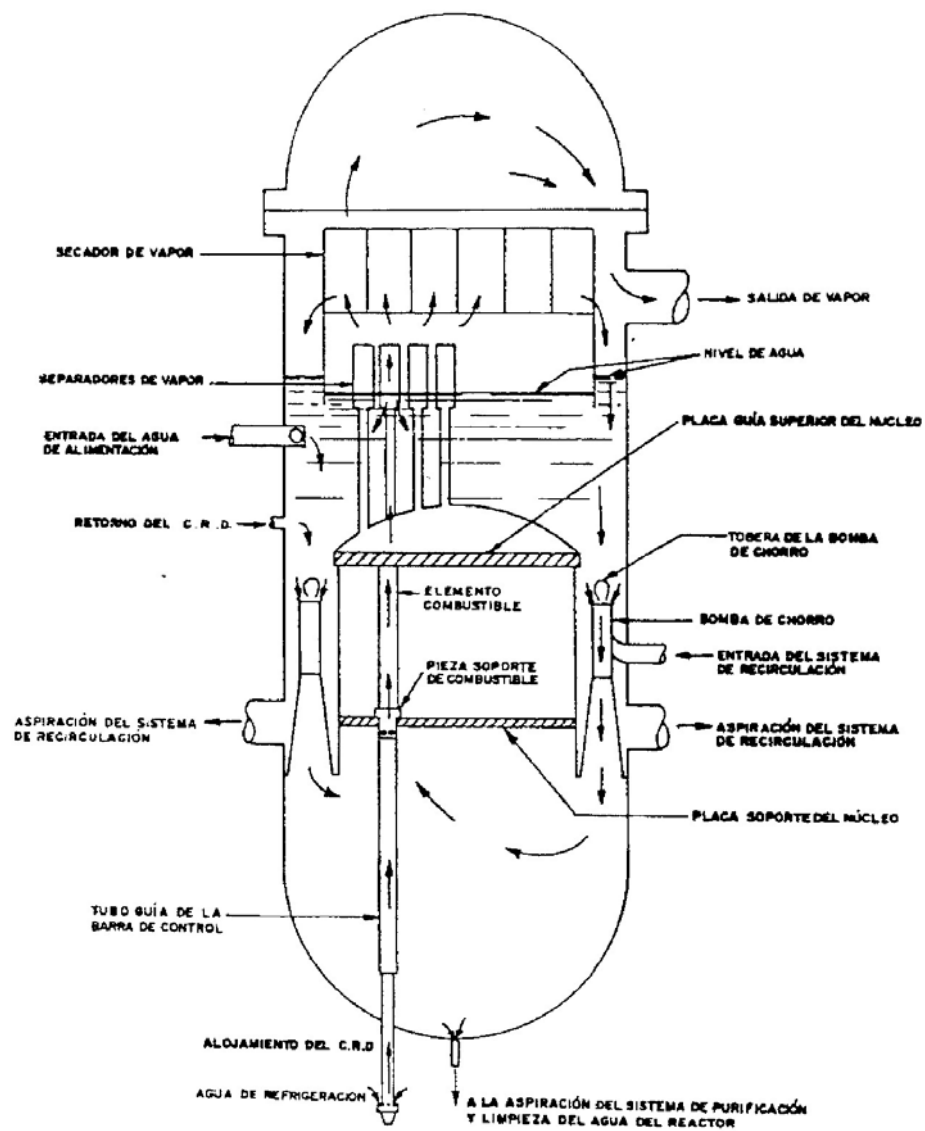
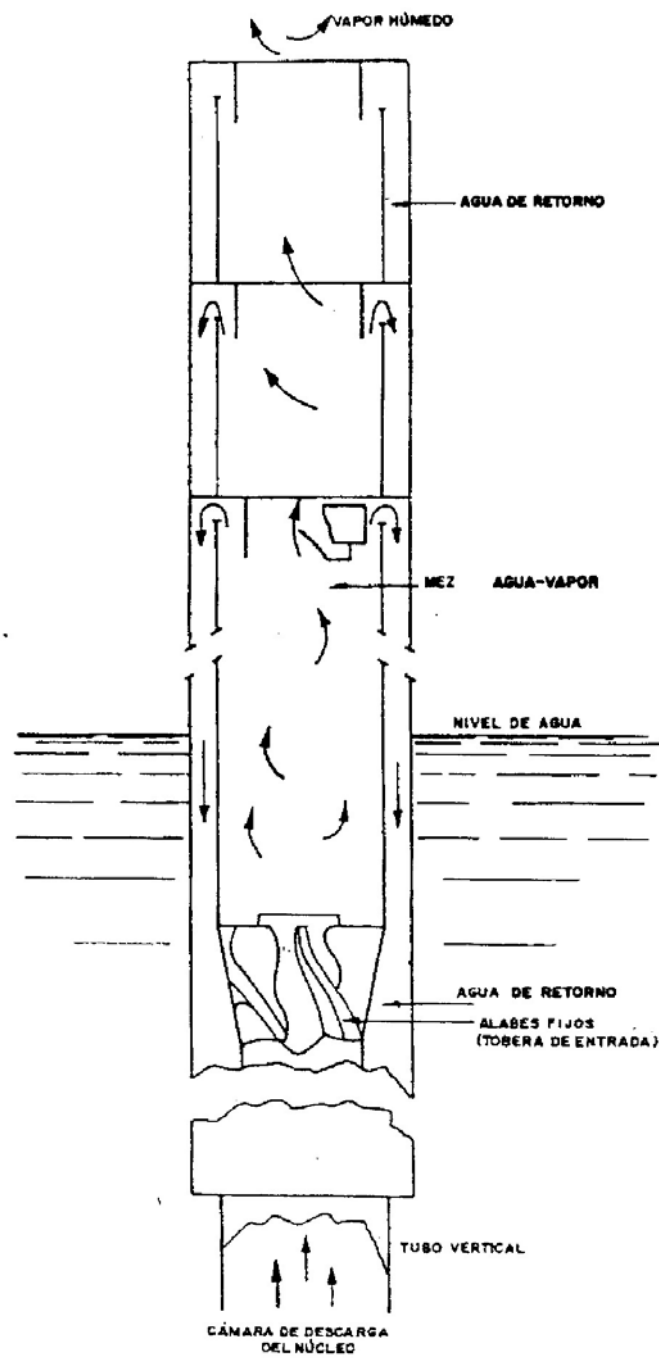


Figura 5



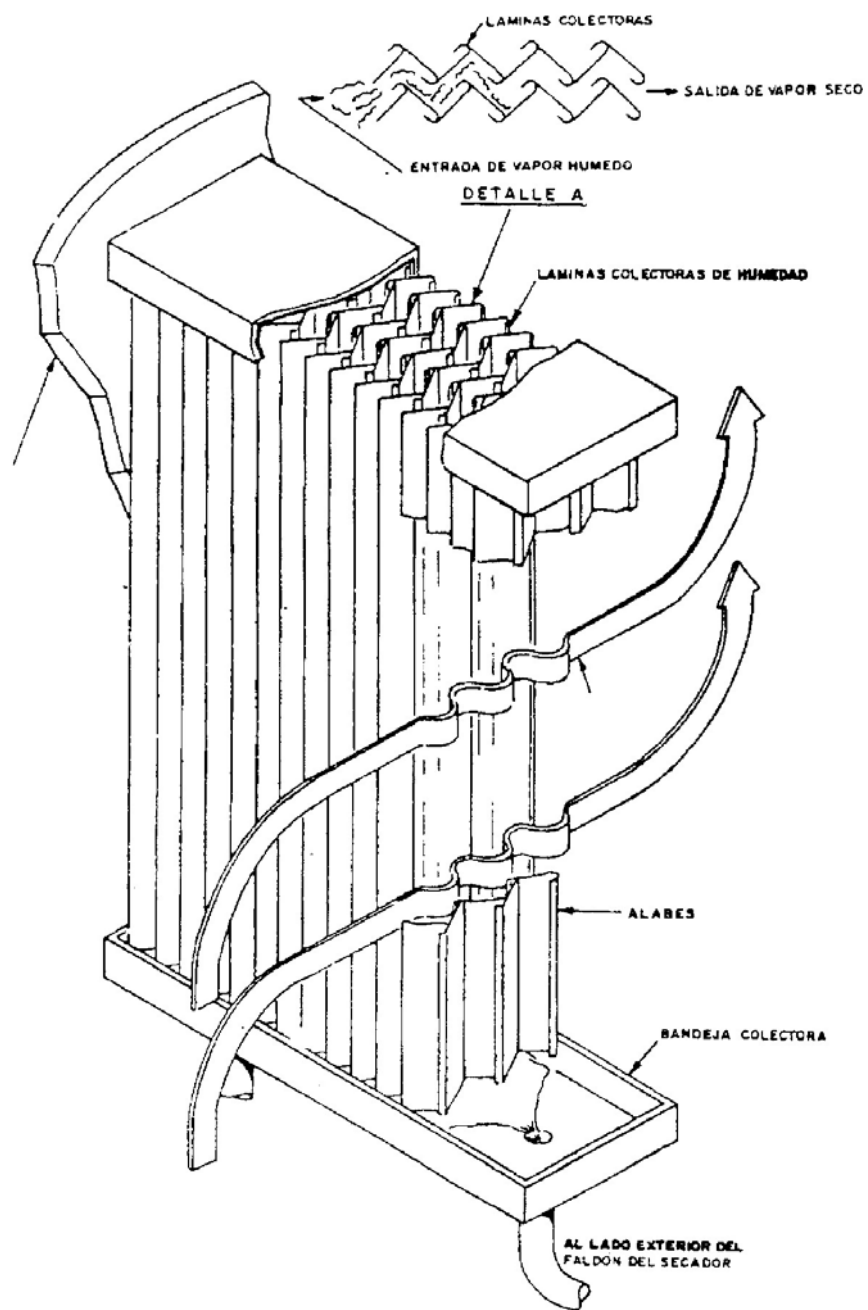


Figura 7

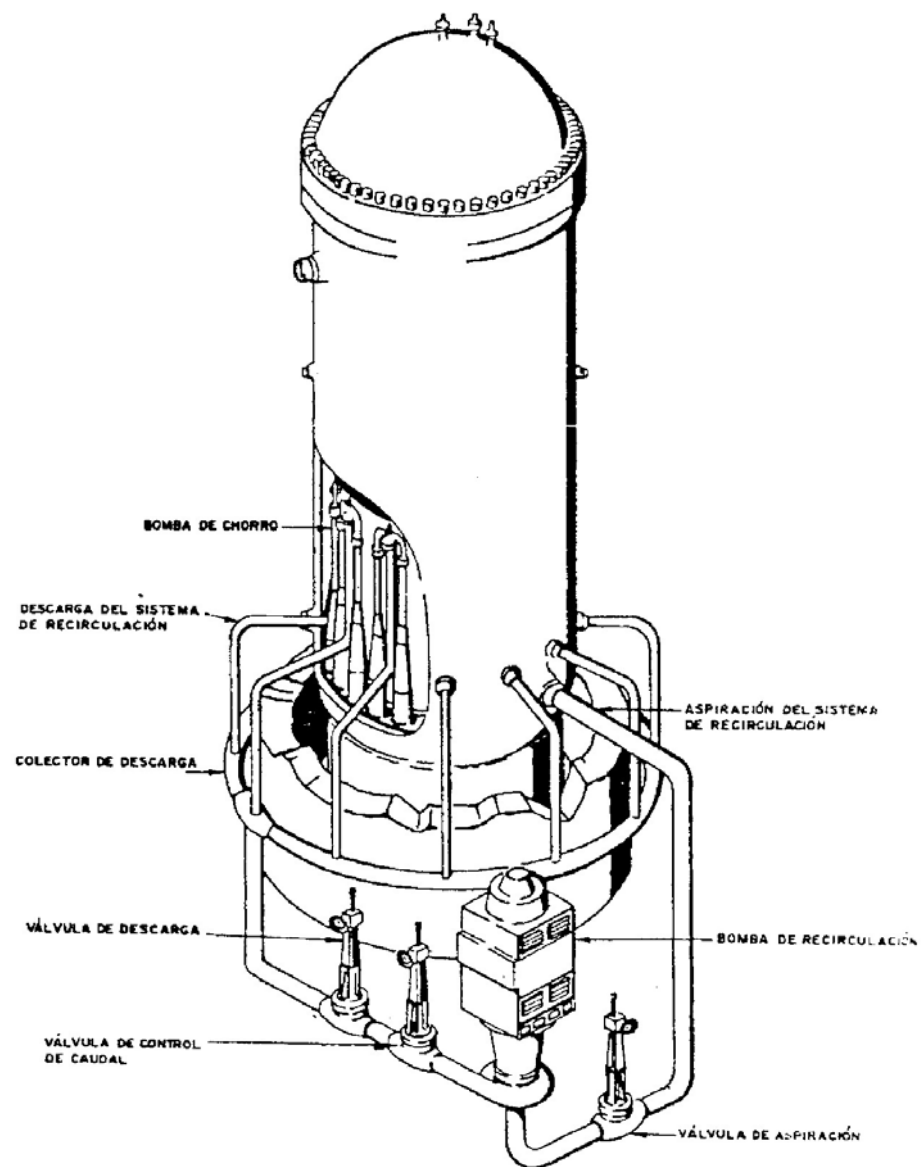


Figura 8

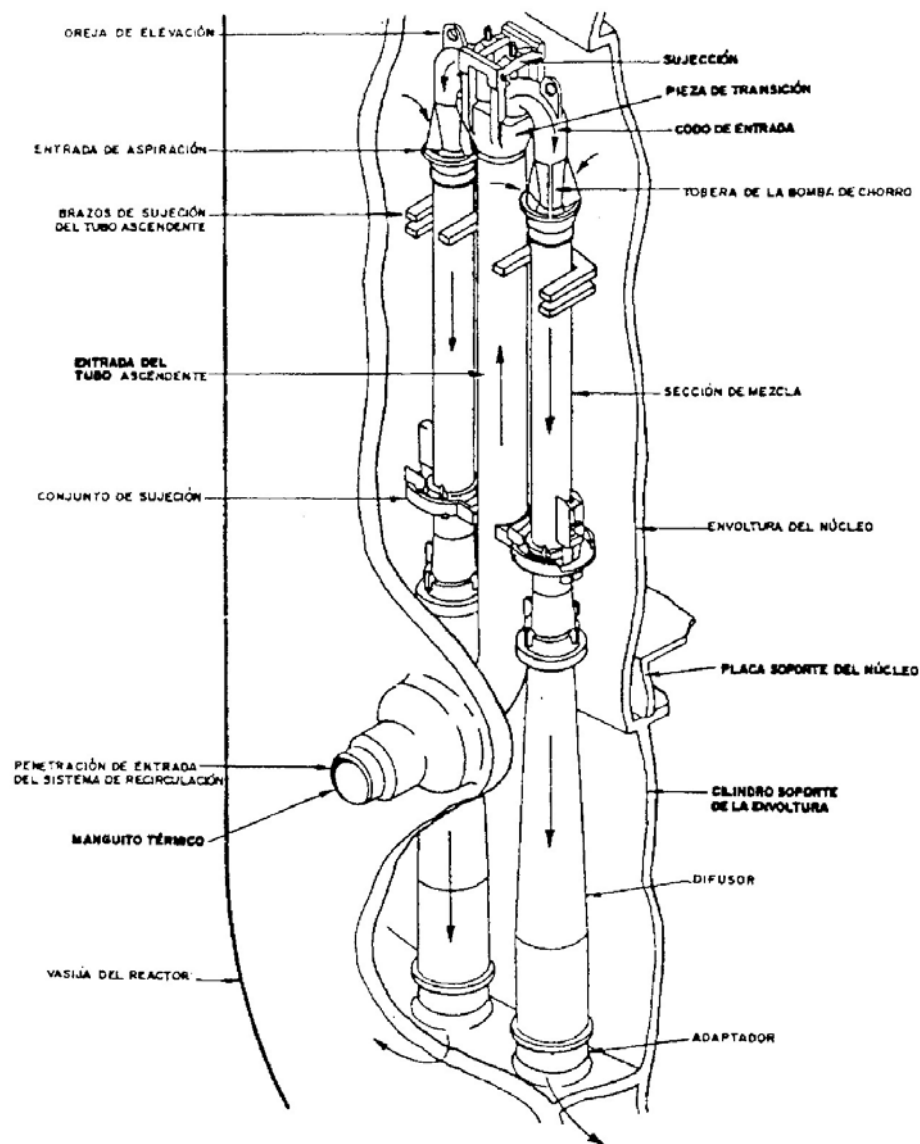
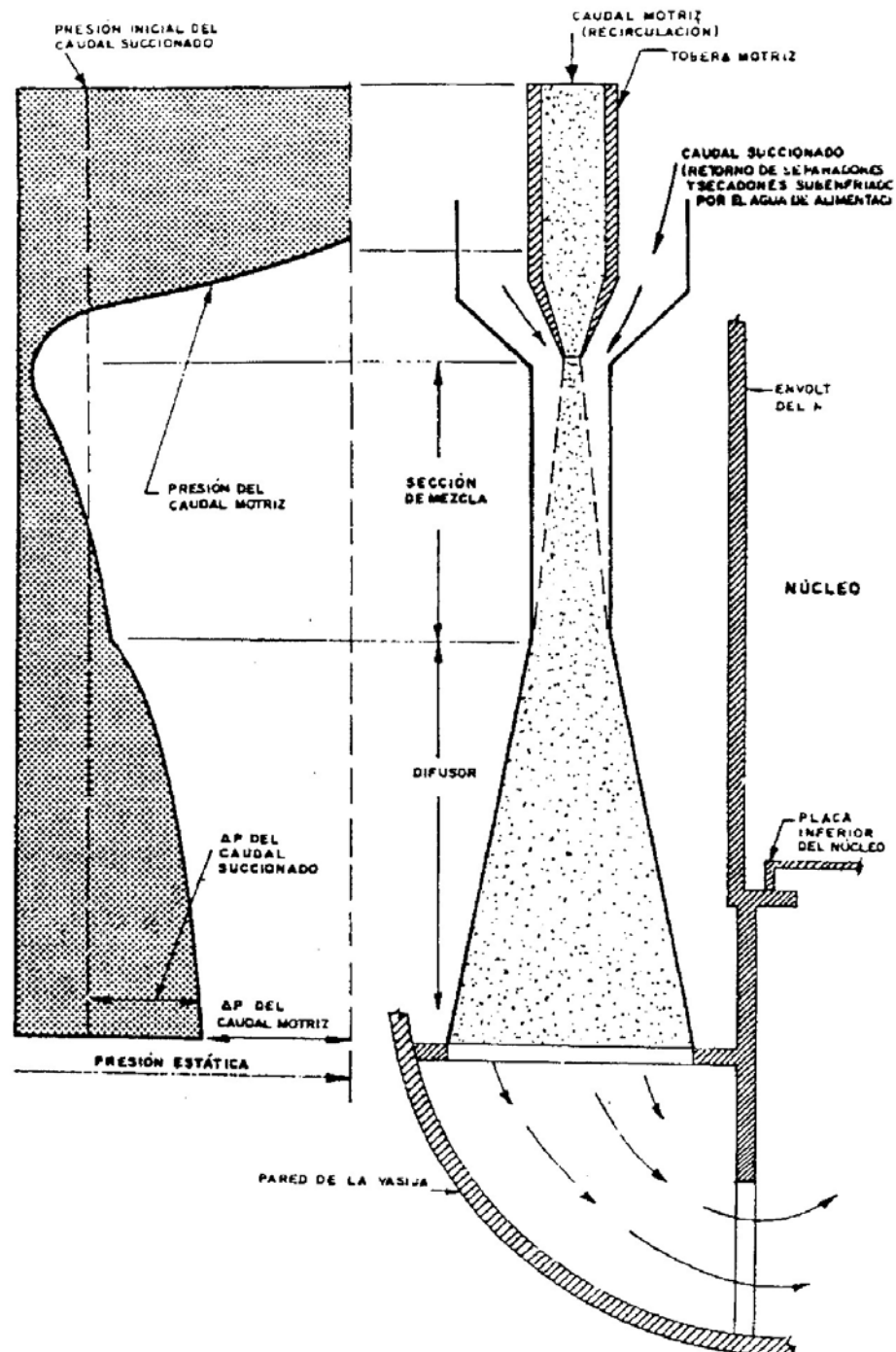


Figura 9



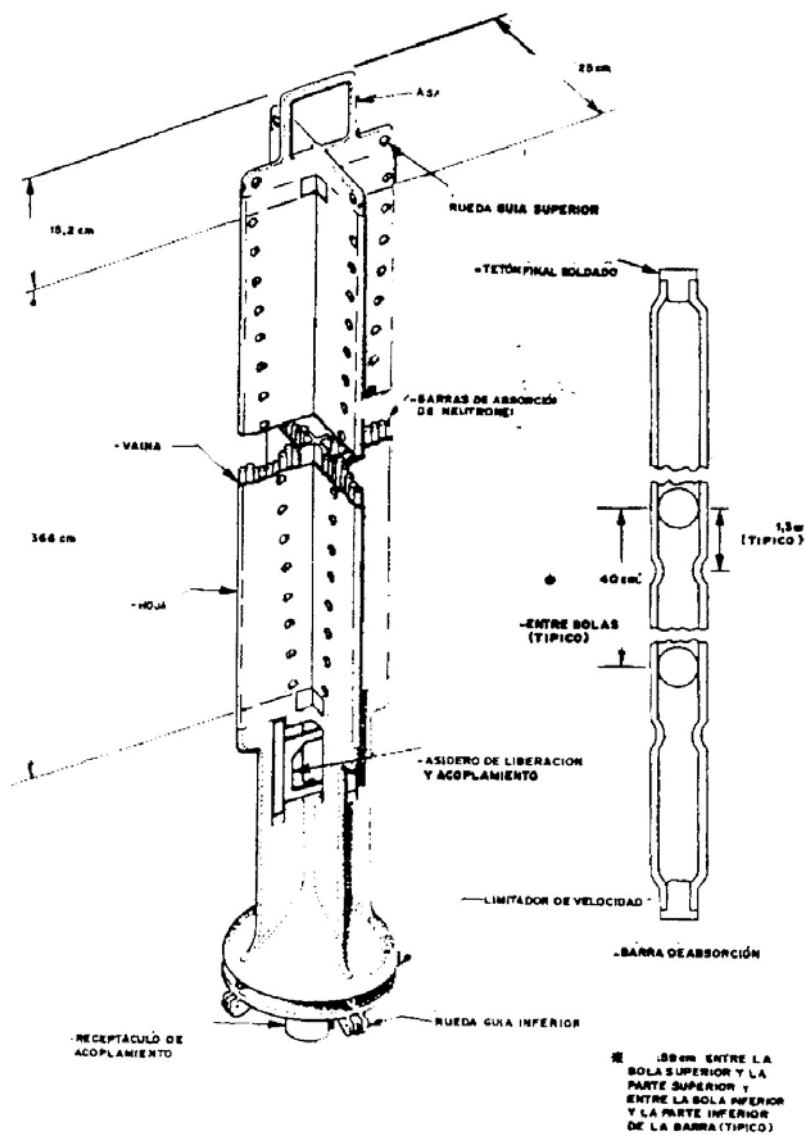
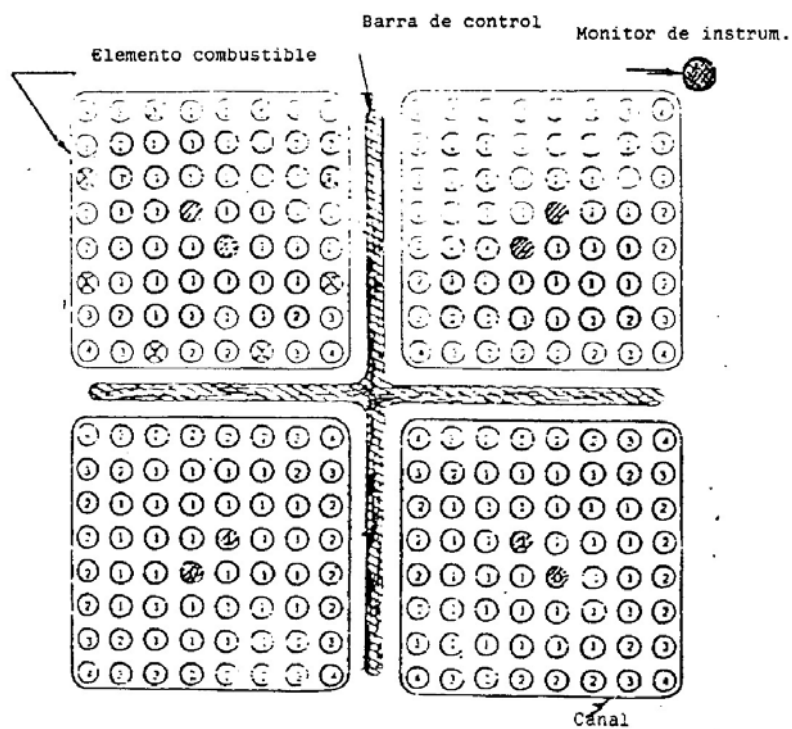
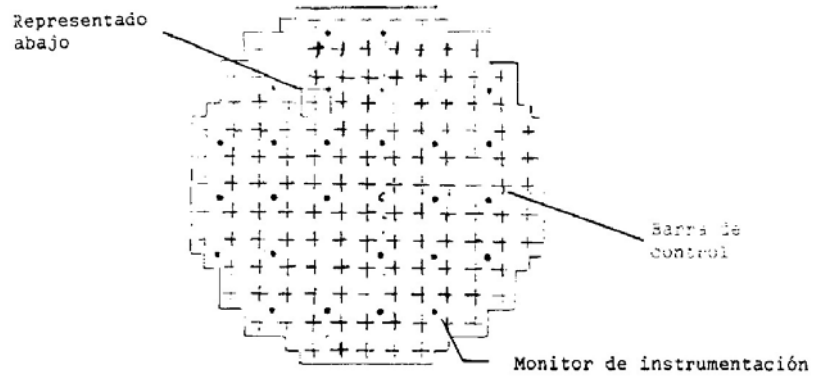


Figura 11



DISPOSICION DE LAS BARRAS DE CONTROL

1, 2, 3, 4 : Indican barras comb. de diferente enriquecimiento
0 : Indica barras de agua

Figura 13

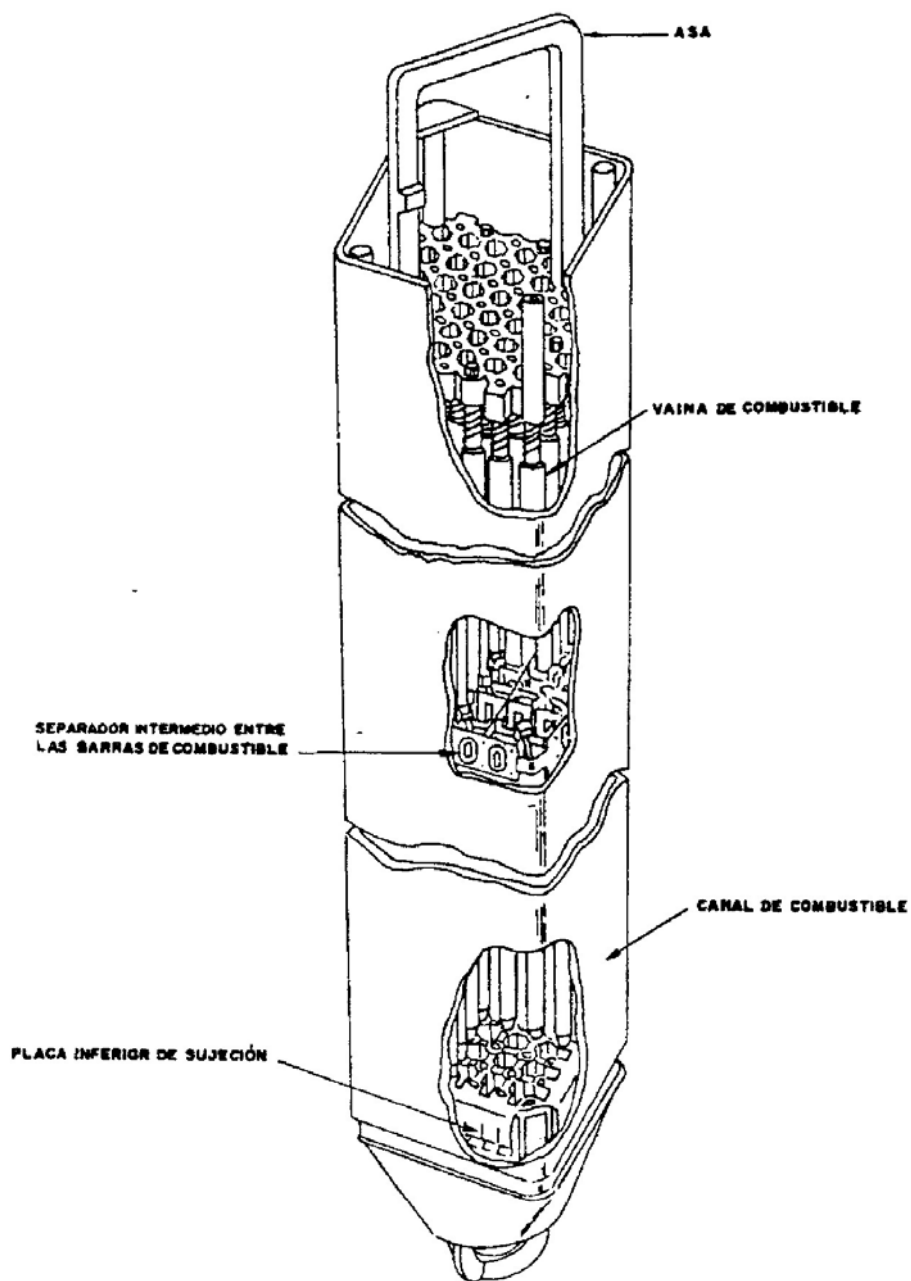


Figura 14

Multiple Layers of Safety at Nuclear Power Plants

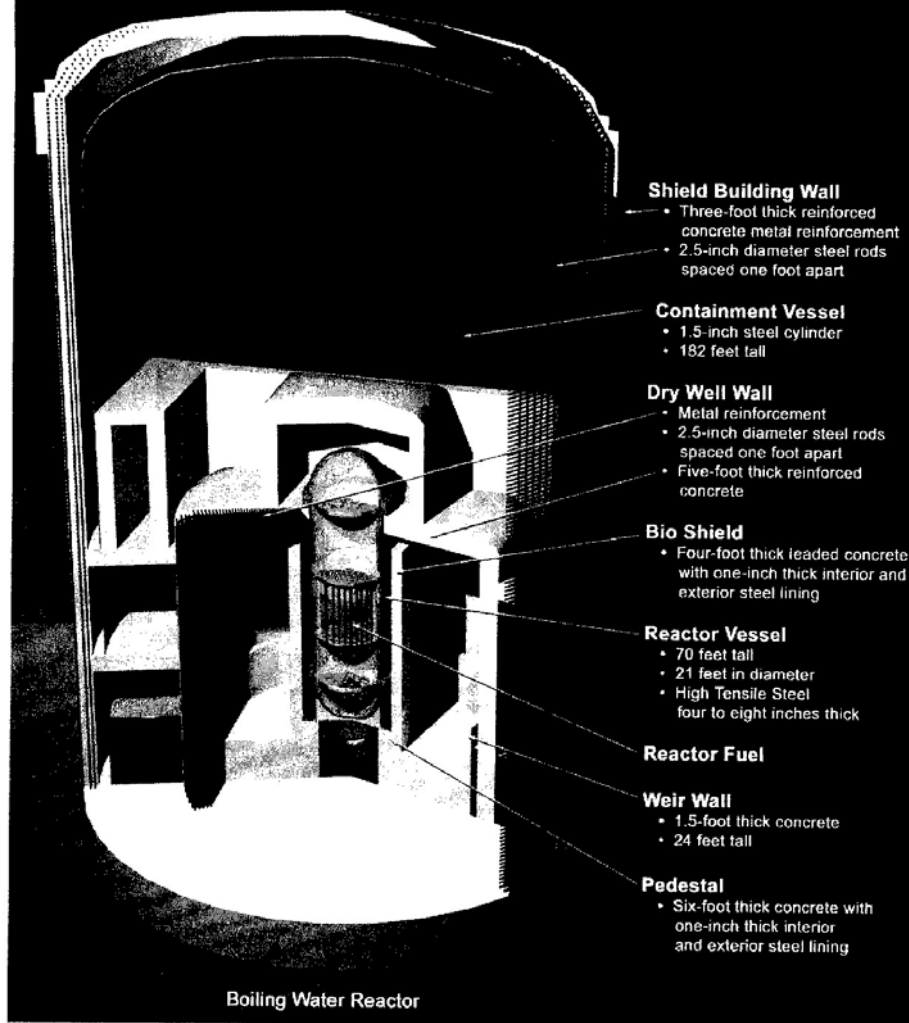
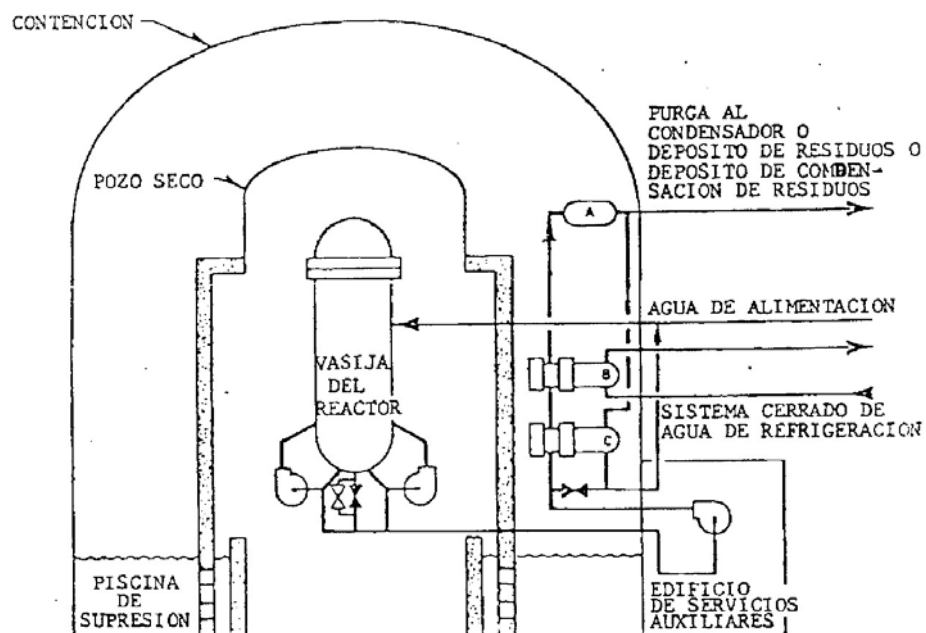


Figura 15



- A FILTRO/DESMINERALIZADOR
- B INTERCAMBIADOR DE CALOR NO REGENERATIVO
- C INTERCAMBIADOR DE CALOR REGENERATIVO

Figura 16

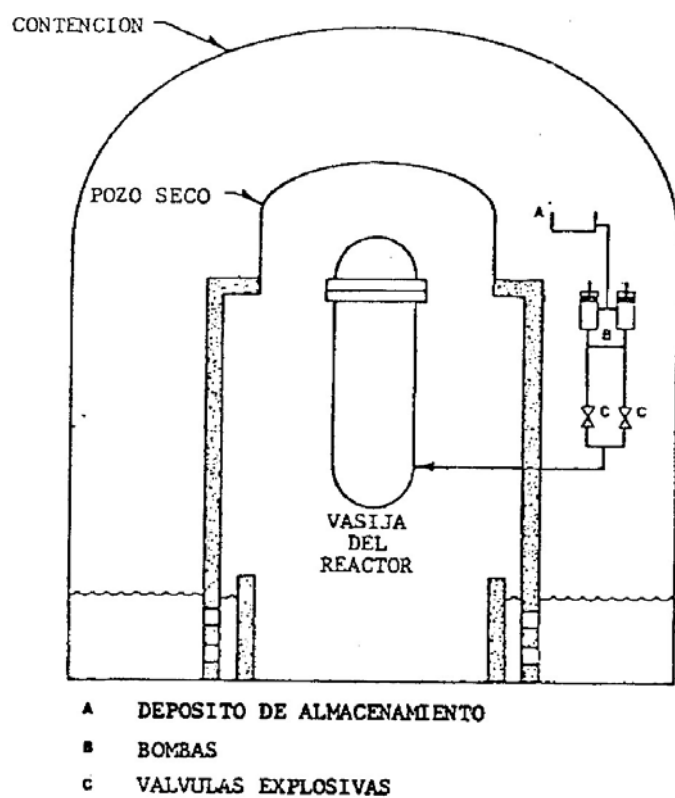


Figura 17

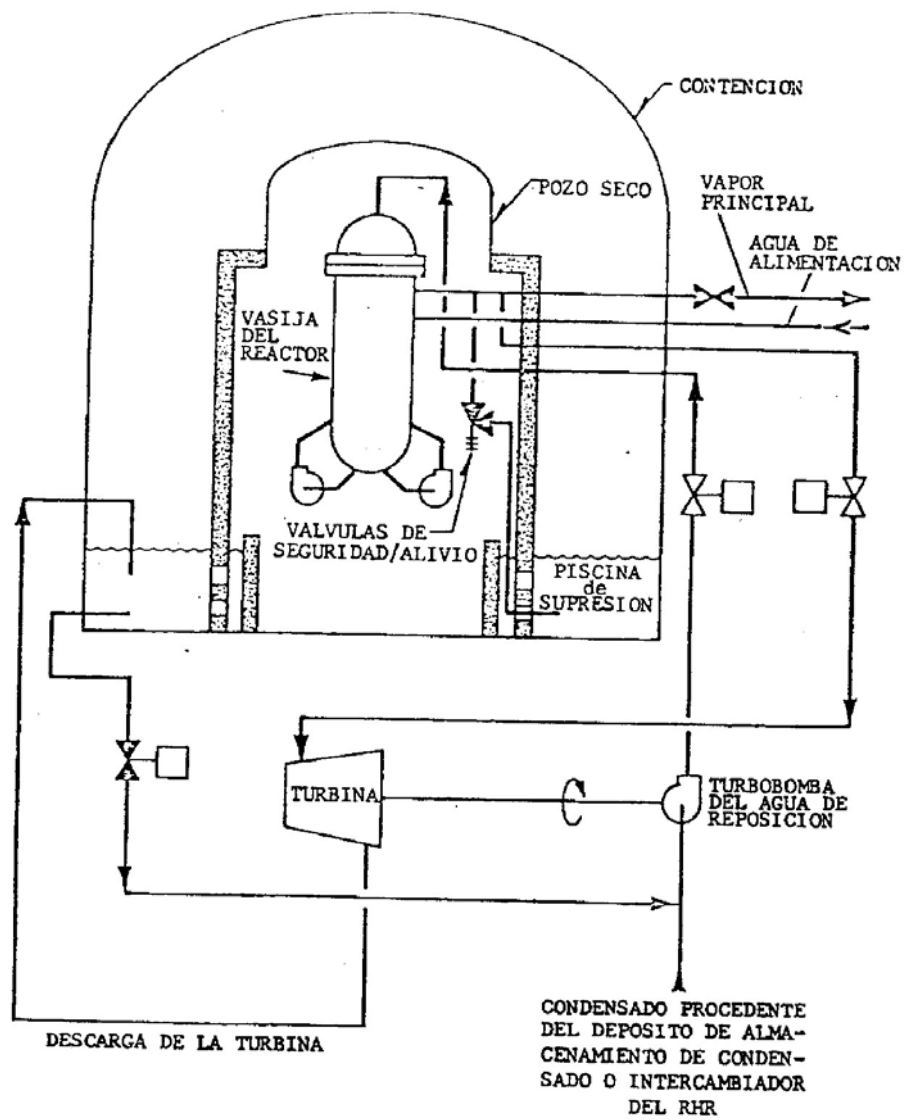
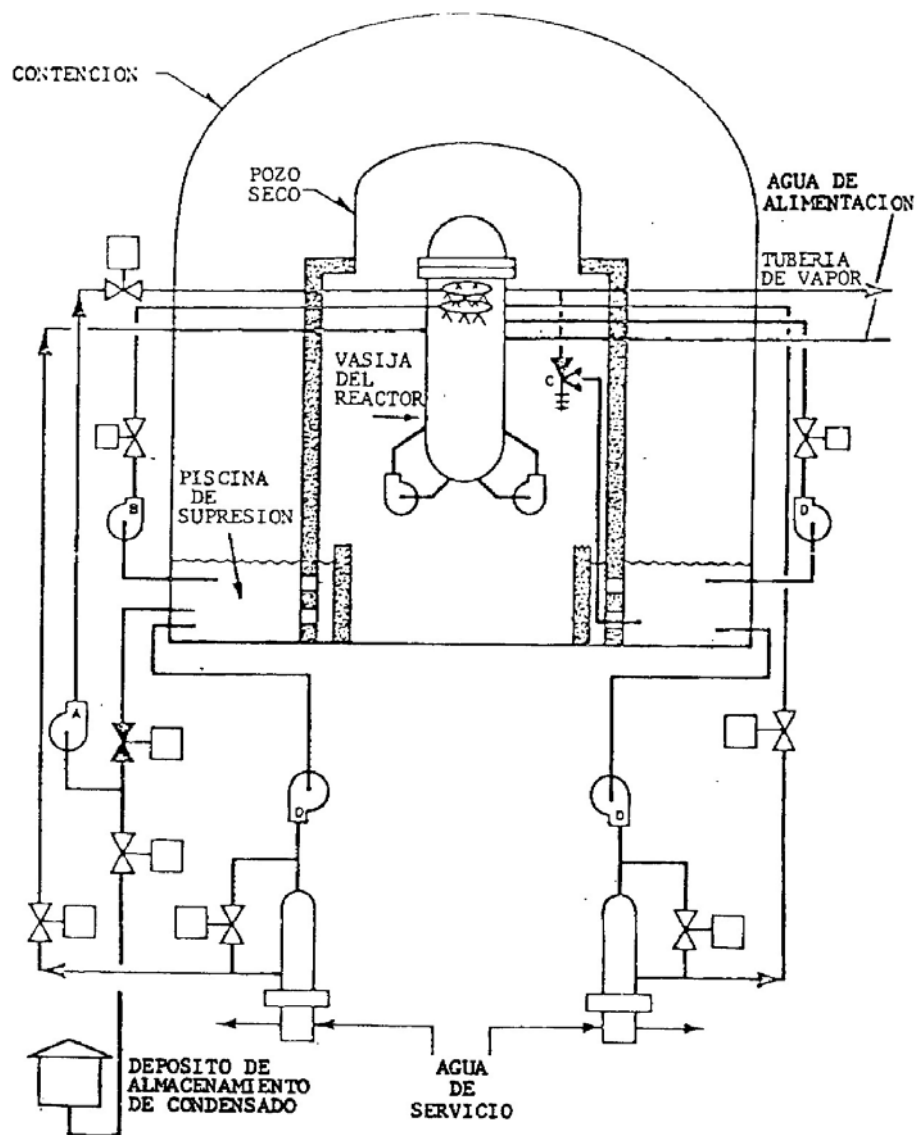
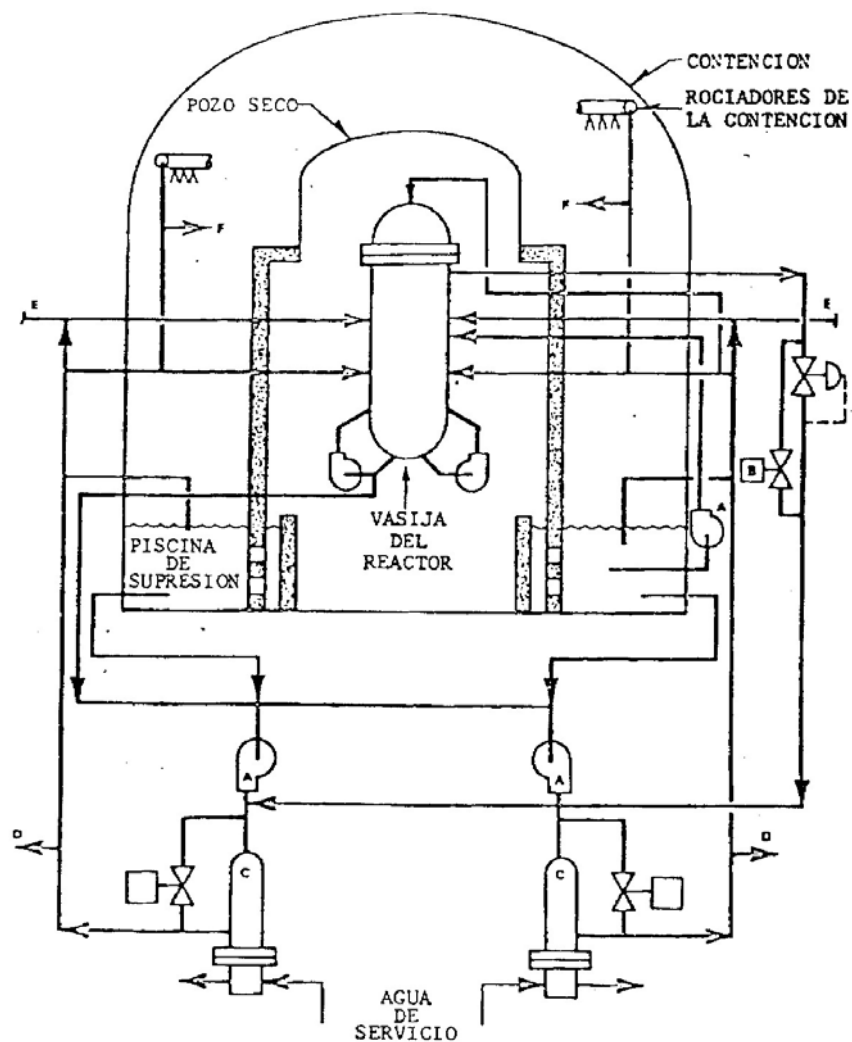


Figura 18



- A. ROCIADO DEL NUCLEO A ALTA PRESION
- B. ROCIADO DEL NUCLEO A BAJA PRESION
- C. VALVULA DE DESPRESURIZACION DE SEGURIDAD/ALIVIO
- D. MODALIDAD DE INYECCION DE REFRIGERANTE A BAJA PRESION DEL SISTEMA DE EVACUACION DE CALOR RESIDUAL

Figura 19



- A. BOMBAS DEL SISTEMA
- B. BYPASS DE PLENO CAUDAL
- C. INTERCAMBIADORES DE CALOR
- D. ASPIRACION DE LA BOMBA DEL SISTEMA INDEPENDIENTE DE REFRIGERACION DEL NUCLEO DEL REACTOR
- E. AGUA DE ALIMENTACION
- F. PISCINA SUPERIOR DE LA CONTENCION

Figura 20