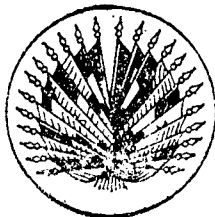


08.78.08



COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR Y
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA



**CURSO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA NUCLEAR
ORIENTADO A LA CAPACITACION BASICA PARA LA
IMPLEMENTACION DE PROGRAMAS NUCLEOELECTRICOS**

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 7	AÑO 1978

CNEA AC-43/78

REACTORES TIPO CANDU

Prof.: ING. MIGUEL A. JOSEPH

BUENOS AIRES - ARGENTINA

OCTUBRE - 1978

INTRODUCCION

El Candú es un reactor de diseño canadiense, cuyo nombre fue extraído de "Canadian Deuterium Uranium", que utiliza como combustible Uranio Natural y Agua Pesada (D_2O) como moderador.

Los orígenes de este concepto se remontan al año 1945, en que entró en operación en Canadá el primer reactor denominado ZEEP (Zero Energy Experimental Pile), que fue puesto crítico el 5 de septiembre de 1945 en Chalk River; Fue construido inicialmente como parte de un esfuerzo para producir plutonio. Fue diseñado por un núcleo de científicos canadienses, ingleses y franceses bajo la administración del NRC (Consejo Nacional de Investigación); en 1952 pasó a A.E.C.L. (Ver fig. 1a).

Este reactor tenía agua pesada como moderador y uranio natural como combustible en vainas de aluminio. El tanque del reactor era de aluminio de alrededor de 2,00 m de diámetro y 2,50 m de profundidad.

En 1947 se desarrolló el NRX, también con tanques de aluminio, conteniendo 200 canales verticales, a través de los cuales, y de acuerdo a cada experimento, se introducen distintas cantidades de barras con elementos combustibles de uranio enriquecido. El agua de refrigeración (agua liviana proveniente del río) pasa sobre estas barras y remueve el calor producido por fisión. Utiliza agua pesada como moderador y grafito como reflector. La potencia térmica es de 30 MWth; la que es controlada por el nivel del moderador. Se utilizó para producción de isótopos y como reactor experimental. (Ver fig. 1b).

En noviembre de 1957 se puso crítico el reactor denominado NRU, de una potencia de 125 MWth; fue el primero que contaba con una máquina de carga que podía recambiar elementos combustibles con el reactor en funcionamiento y a plena potencia. Estaba moderado y enfriado con agua pesada.

Se incursionó también en reactores refrigerados con líquidos orgánicos que tienen la ventaja de su bajo costo (comparados con el agua pesada) y su alto punto de ebullición que permite trabajar a menores presiones, lo que disminuye costos de materiales (menores espesores) y, además, hay menor absorción neutrónica; el refrigerante utilizado fue una mezcla de terphenil y se instaló en el reactor WR1. (Ver fig. 2).

Todos los adelantos logrados en estas investigaciones fueron utilizados para construir el primer reactor de potencia. Pero, contrariamente a la línea seguida hasta ese momento, hubo un cambio en la ingeniería y luego de iniciado el proyecto de reactores con vasijas de presión se pasó al concepto de tubos de presión, con el argumento de que era de ingeniería más sencilla y más acorde con la capacidad técnica canadiense.

Este reactor fue instalado en Rolphton y fue denominado NPD (Nuclear Power Demonstration). La construcción fue iniciada en 1958 y en junio de 1962 fue puesto crítico y su potencia es de 22,5 MW eléctricos con 132 canales horizontales y 15,5 tn de uranio natural. Actualmente sigue en operación, siendo utilizado principalmente como base de capacitación para el personal de operaciones de Centrales Nucleares.

En esa misma línea, pero con distintos módulos, se continuaron construyendo Centrales de potencia del tipo PHWR. También se incursionó con la Central Gentilly I, en la línea BHWB, o sea, una central Candu con agua pesada como moderador y agua liviana como refrigerante (del tipo agua hirviente) de 250 MWe, que entró en servicio en 1971.

Actualmente se encuentran en servicio, en construcción o con diseño aprobado las siguientes centrales tipo Candu:

NPD	Canadá	22 MWe	.....	En servicio en 1962
Douglas Point ...	Canadá	208 MWe	.....	En servicio en 1967
Gentilly I	Canadá	250 MWe	.....	En servicio en 1971
Kannup	Pakistan ..	125 MWe	.....	En servicio en 1971
Rapp I	India	203 MWe	.....	En servicio en 1972
Rapp II	India	203 MWe	.....	En servicio en 1976
Pickering A	Canadá	4 x 512 MWe	..	En servicio en 1971-73
Pickering B	Canadá	4 x 512 MWe	..	En servicio en 1981-83
Bruce A	Canadá	4 x 732 MWe	..	En servicio en 1976-79
Bruce B	Canadá	4 x 732 MWe	..	En servicio en 1983-86
Gentilly II	Canadá	600 MWe	.....	En servicio en 1980-81
Embalse	Argentina .	600 MWe	.....	En servicio en 198.
Point Lepreau ...	Canadá	600 MWe	.....	En servicio en 1980-81
Wolsung	Corea	600 MWe	.....	En servicio en 1981
Darlington	Canadá	4 x 800 MWe	..	En servicio en 1986-88

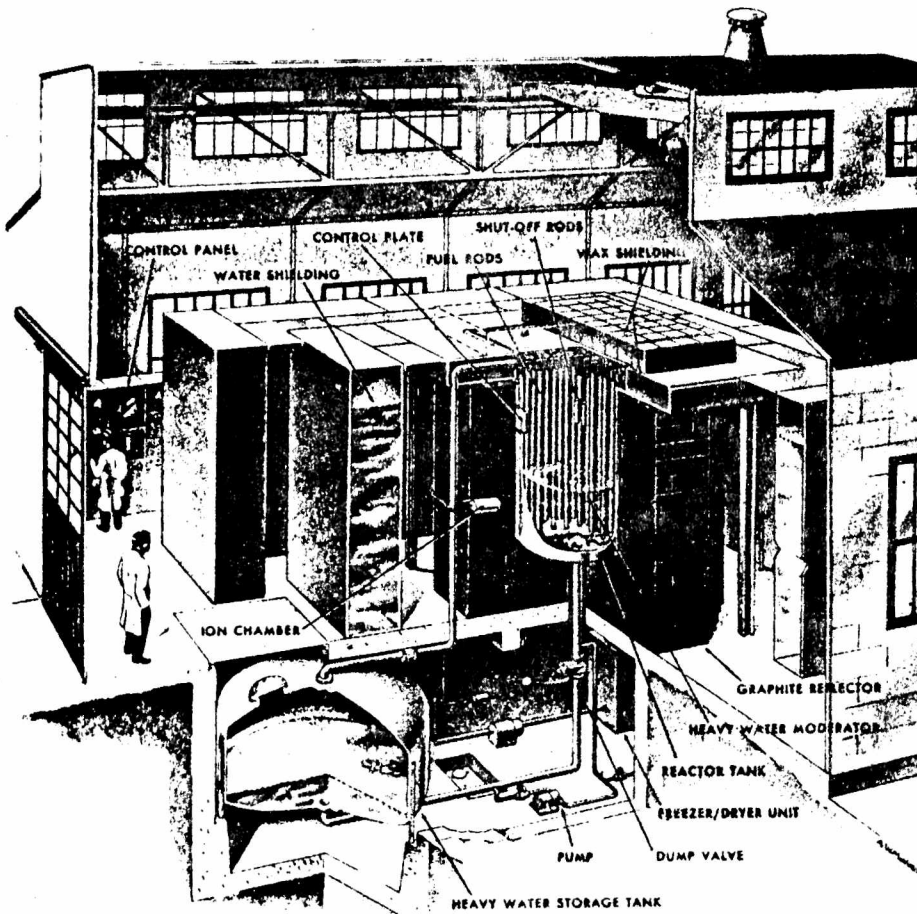


Figura 1a - Zeep Reactor (Zero Energy Experimental Pile)

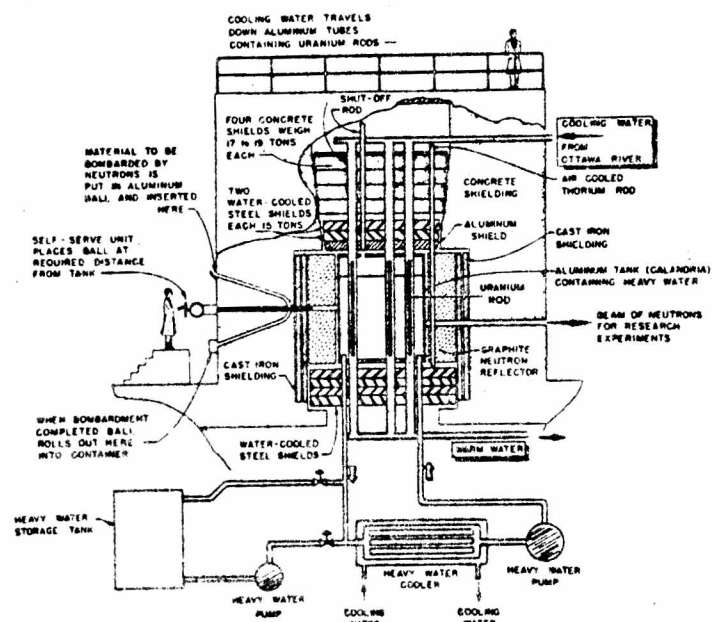


Figura 1b - NRX, diagrama de flujo

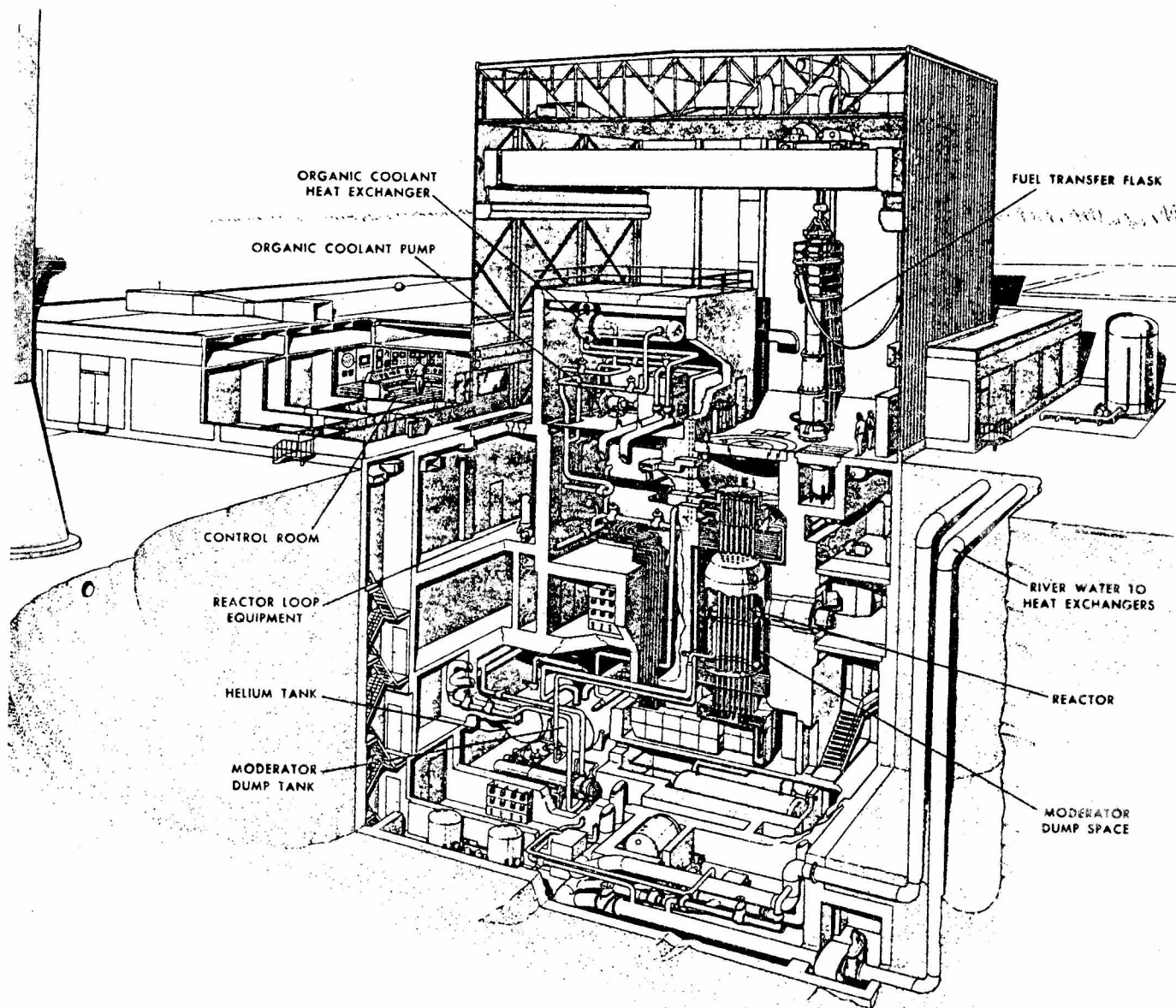


Figura 2 - Whiteshell Reactor N° 1 (WR-1)

CARACTERISTICAS PRINCIPALES

El reactor tipo Candu tiene como característica distintiva un recipiente cilíndrico de acero, denominado Calandria, el que se encuentra atravesado por tubos horizontales denominados tubos de calandria. En su interior se encuentran otros tubos que son los llamados tubos de presión y es donde se alojan los elementos combustibles y por donde circula el medio refrigerante principal.

El circuito del moderador está separado del primario y contenido en el recipiente de la Calandria, no aportando calor al proceso.

En la figura siguiente se esquematiza básicamente los principales procesos de transferencia de energía de este tipo. (Fig. 3).

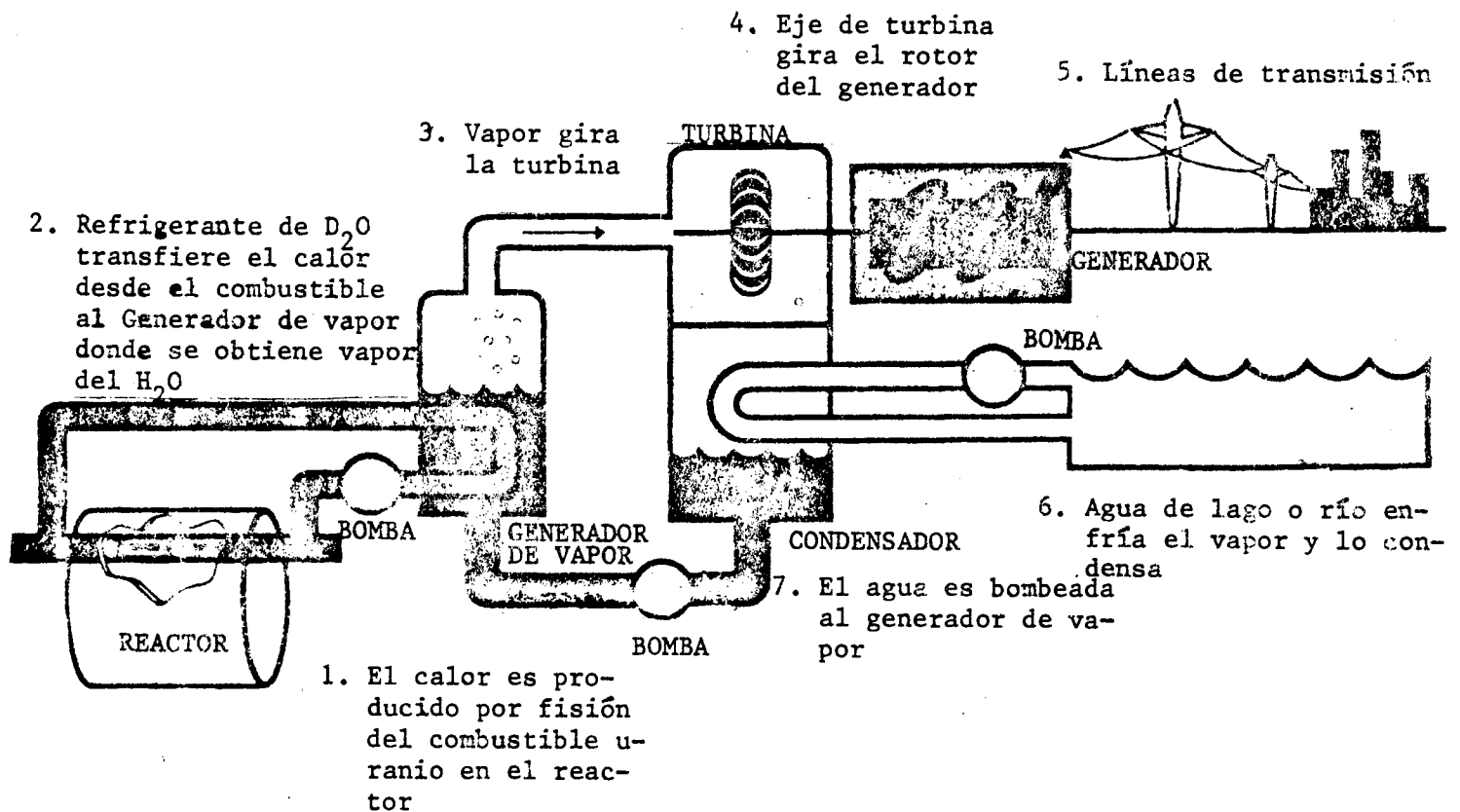


Figura 3 - CANDU, Agua Pesada presurizada

En la siguiente figura se muestra un esquema del sistema primario y del moderador en este tipo de reactor. (Fig. 4).

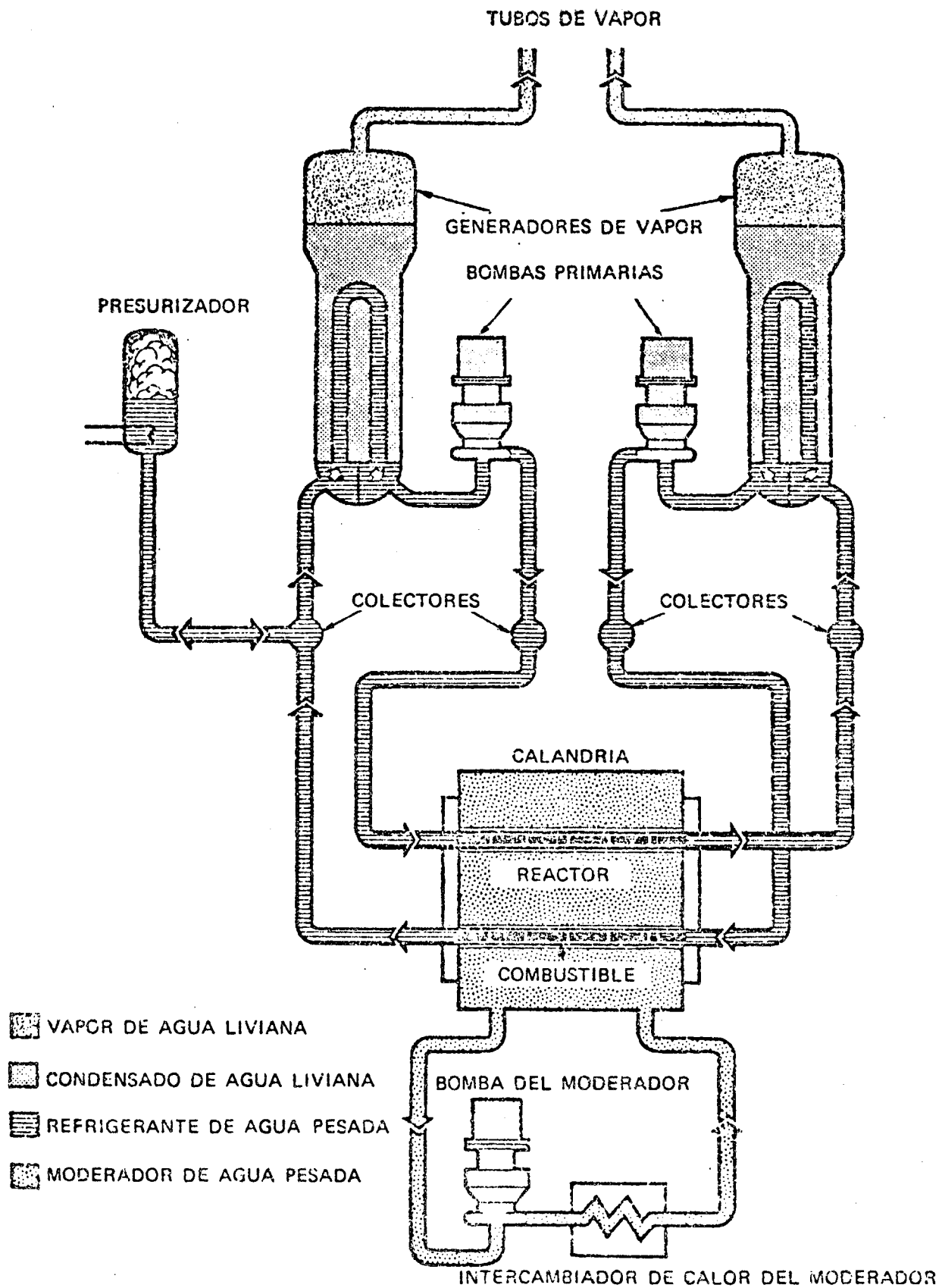


Figura 4 - Diagrama de flujo simplificado del Reactor Candu

CALANDRIA Y TUBOS DE PRESION

La Calandria es un recipiente horizontal y cilíndrico de acero inoxidable austenítico que contiene el agua pesada del moderador y reflector.

En cada extremo de la Calandria existe una combinación de blindajes térmicos y biológicos denominados blindajes extremos (end-shields) que a su vez proporcionan apoyo al cuerpo de la Calandria y a los tubos de Calandria que están rolados a las placas internas en cada blindaje extremo.

Cada blindaje extremo está compuesto por dos placas de acero unidas por un aro. En el interior existe un relleno de bolitas de acero que conforman en sí el blindaje y la refrigeración se hace posible por la circulación de agua liviana.

Externamente, la Calandria se encuentra rodeada de agua liviana contenida en una envuelta de hormigón ordinario.

Los blindajes extremos son penetrados por 380 alojamientos que contienen "lattice tubes" que soportan y guían a los "end fittings" o extremos de canales.

La principal función de los canales (compuestos por los ya citados tubos de presión), es la de alojar a los elementos combustibles y de dirigir el flujo del medio refrigerante del primario que remueve el calor nuclear.

Los tubos de presión son de una aleación de zirconio-niobio que provee una baja captura neutrónica al mismo tiempo que sirve de una adecuada contención del medio refrigerante dentro del núcleo.

Los "end fittings" poseen las conexiones de entrada y salida del medio refrigerante y permiten las operaciones de recambio de elementos combustibles a cargo del sistema de manejo de elementos combustibles.

Los tubos de presión se encuentran exteriormente rodeados por los tubos de Calandria y entre ambos tubos existe un gas anular (CO_2) que impide la transferencia térmica desde el medio refrigerante hacia el moderador y, al mismo tiempo, hace posible la detección de posibles pérdidas de los tubos de presión.

Verticalmente existen en la Calandria perforaciones que alojan los mecanismos de reactividad.

También en sentido vertical y horizontal existen alojamien-

tos que contienen los dispositivos de medición para el control del reactor.

En las figuras 5 a 9 se da una idea gráfica de lo expuesto.

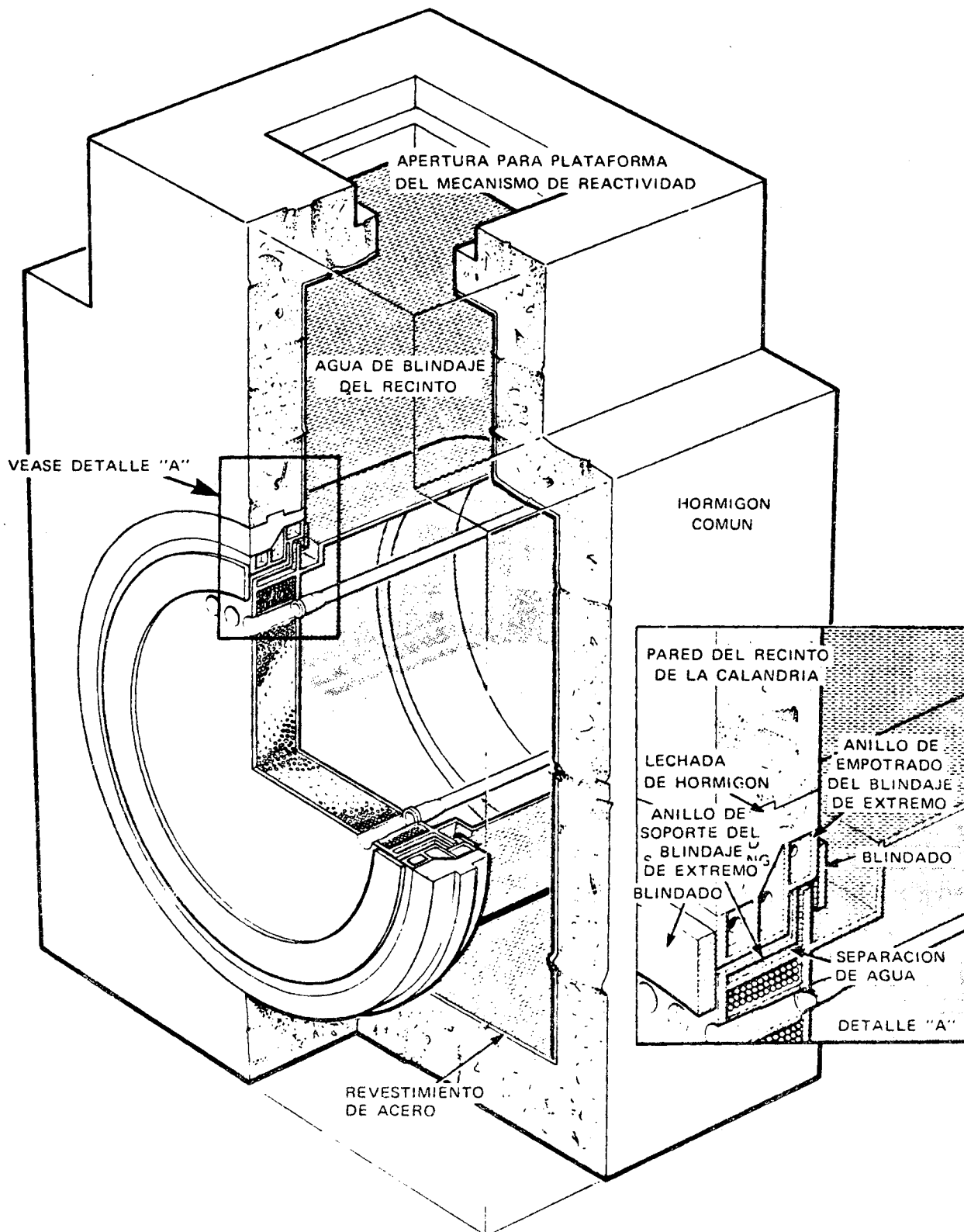


Figura 5 - Recinto de hormigón de la Calandria

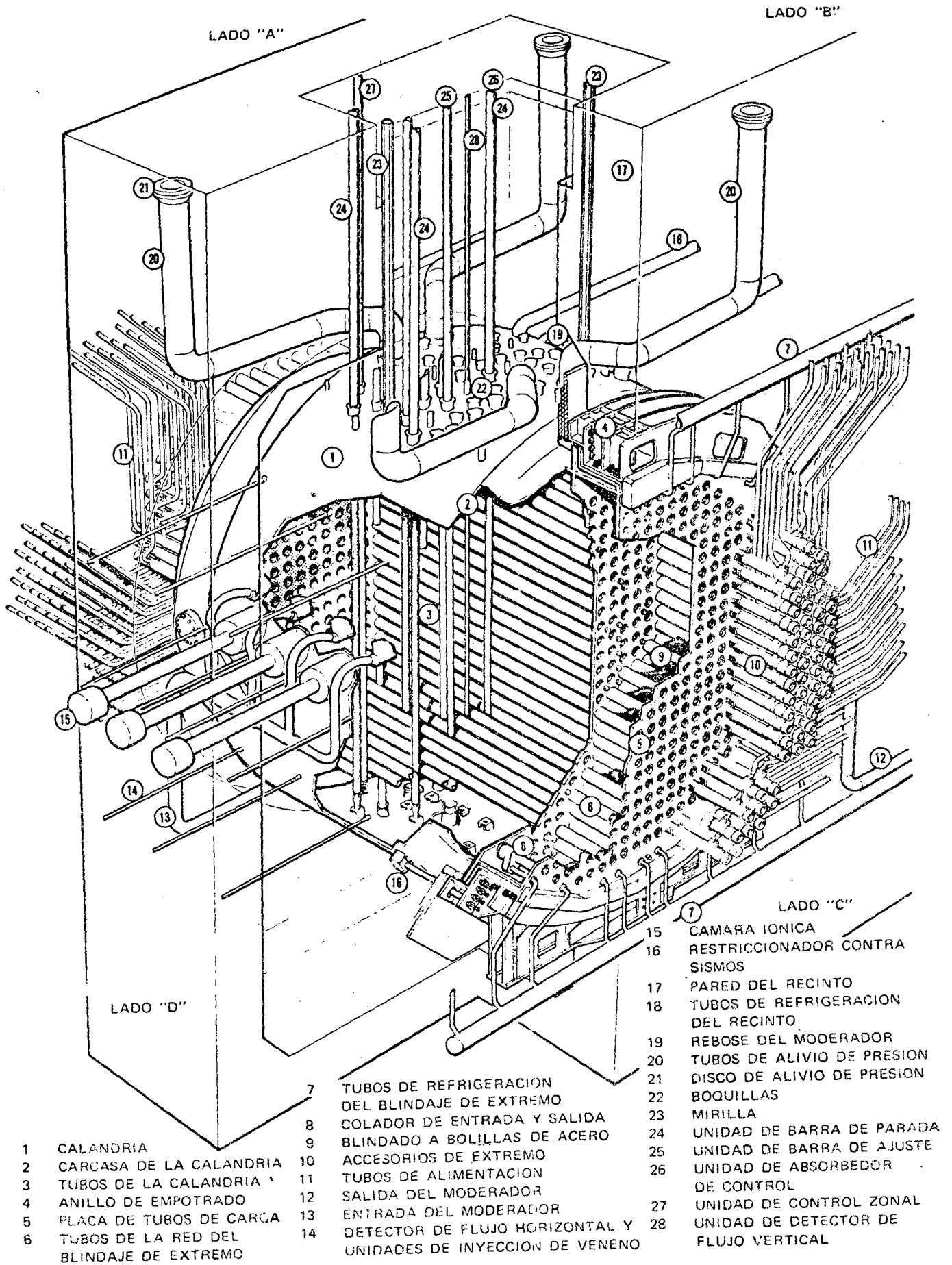


Figura 6 - Conjunto del Reactor

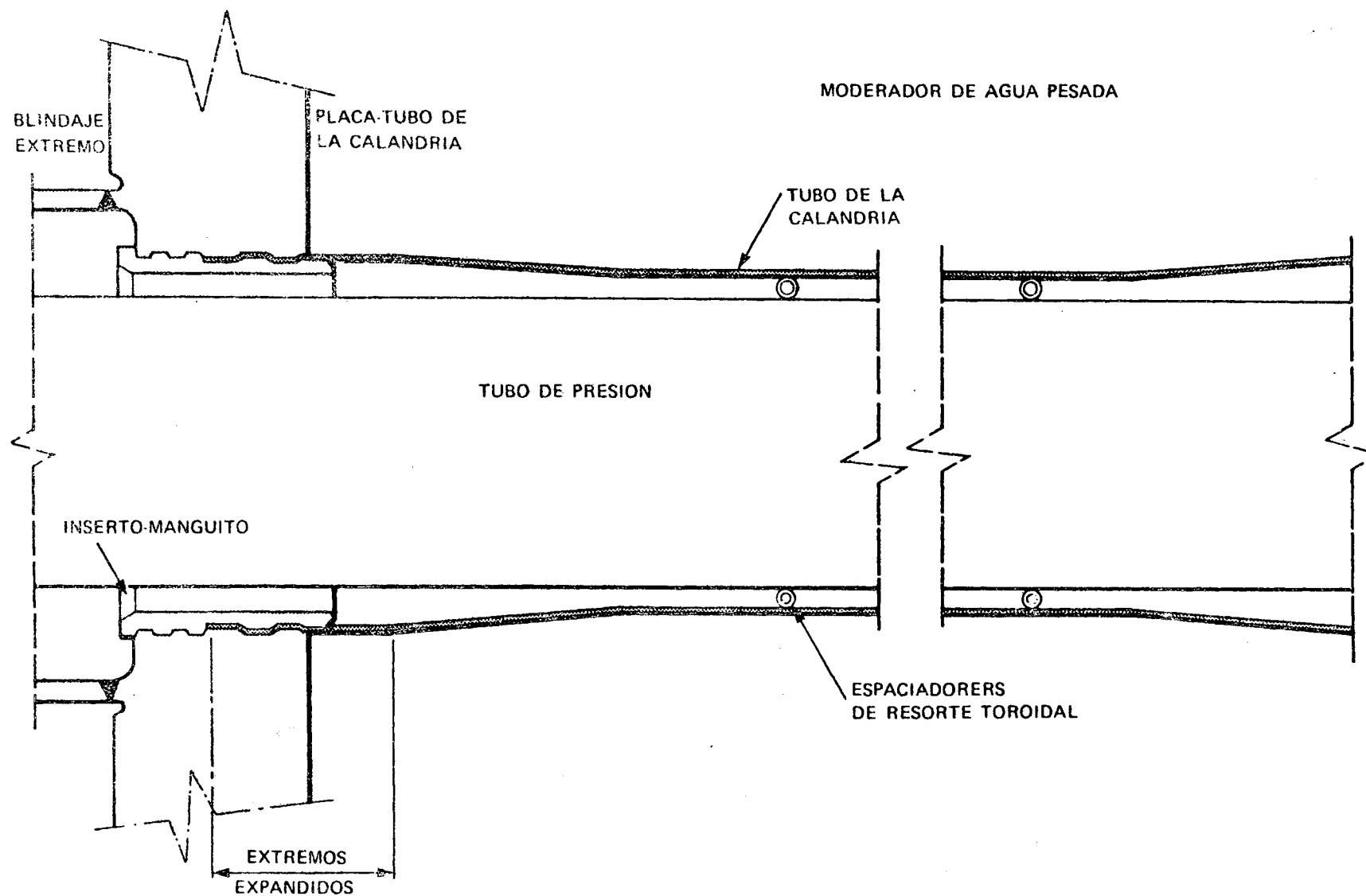


Figura 7 - Esquema de tubo de Calandria instalado

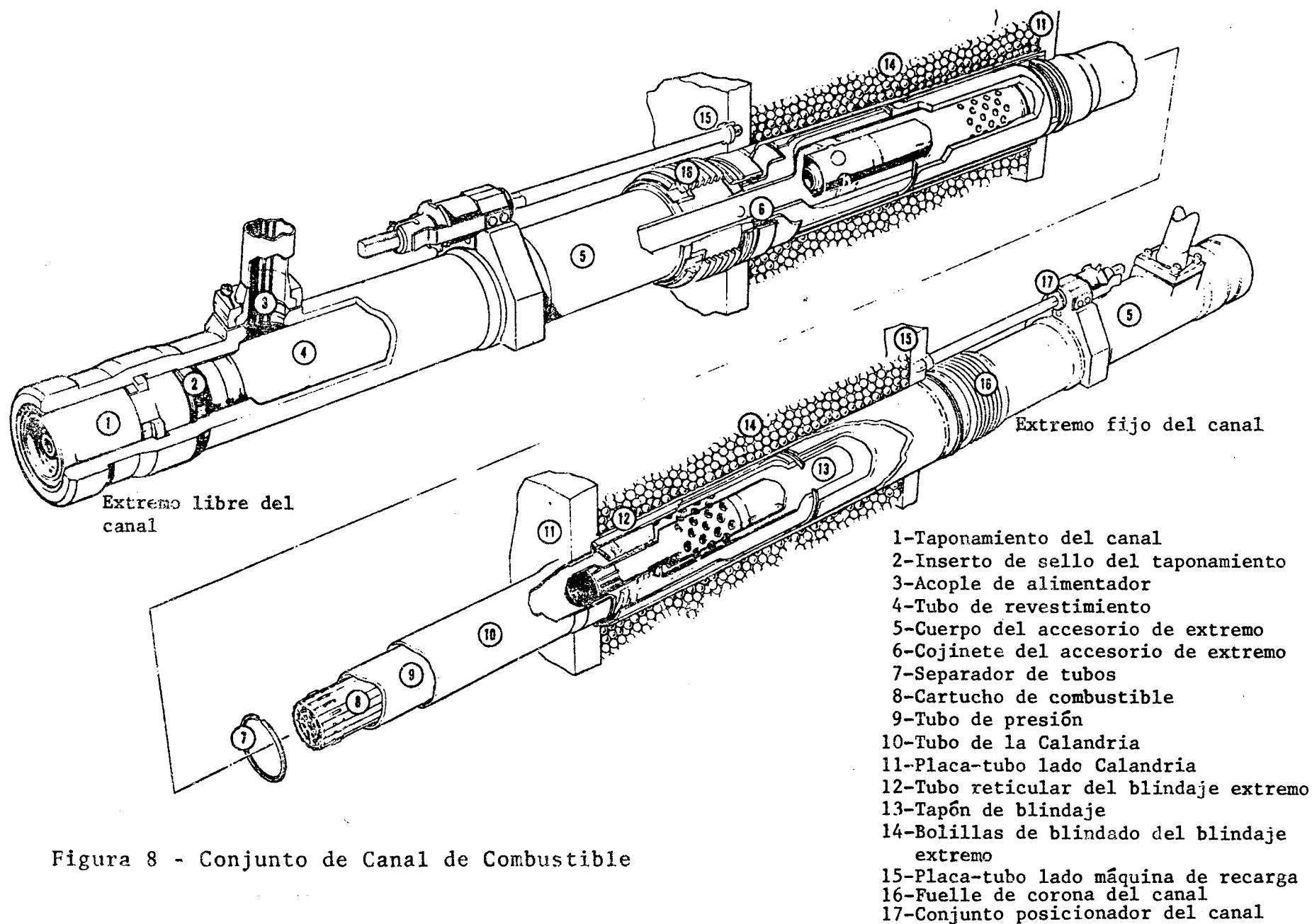


Figura 8 - Conjunto de Canal de Combustible

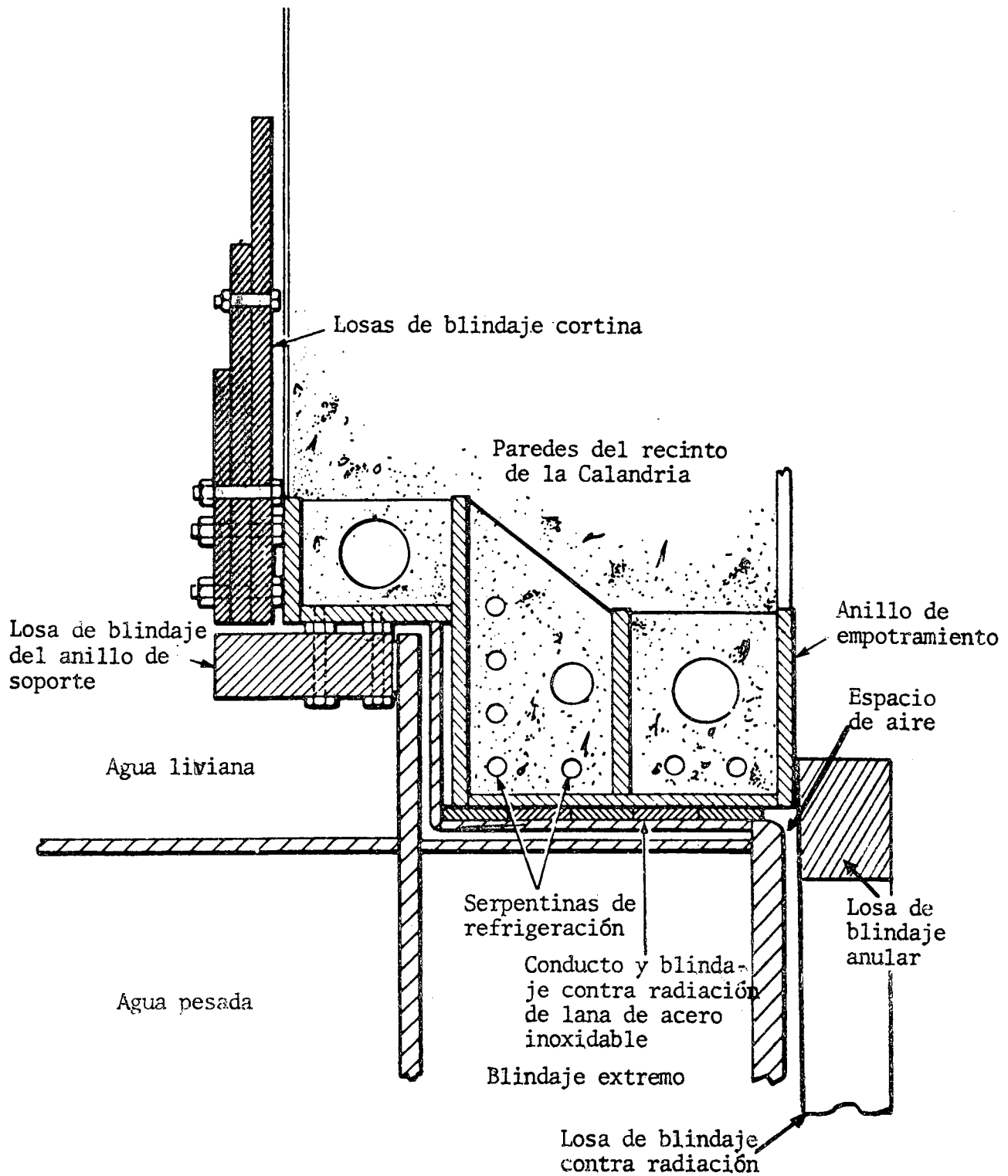


Figura 9 - Anillo de empotramiento

SISTEMA PRIMARIO

Este sistema tiene como objetivo extraer el calor producido en el combustible por fisión y transferir el calor colectado por medio de cada uno de los generadores de vapor al sistema secundario donde se producirá el vapor para la turbina. (Ver fig. 10 a 13).

El sistema primario está dividido en dos "loops". Existen diferencias en los distintos módulos de Centrales Candú con relación al número de bombas y de generadores de vapor.

Para el módulo de 600 MW cada "loop" consiste en dos bombas principales, dos generadores de vapor, dos colectores de entrada, dos colectores de salida, ciento noventa tubos de presión, las cañerías asociadas y los alimentadores (feeders).

El agua es alimentada desde el colector de entrada a cada canal por cañerías independientes, con diámetro variable desde 3,8 a 8.9 cm para proveer el caudal que cada canal necesita para conseguir un 4% de título de vapor en el colector de salida.

Alimentadores

Trescientos ochenta alimentadores en cada cara del reactor unen cada canal de refrigeración en el correspondiente colector.

Colectores

Hay cuatro de entrada y cuatro de salida. Cada uno está conectado a 95 alimentadores (feeders). El diseño es tal que el canal adyacente tiene el flujo del refrigerante en sentido contrario.

Operación normal

En operación normal la temperatura de entrada al reactor a 100% de potencia es de 266°C y la de salida de 312°C. Se encontrarán alineados sistemas como el de Purificación, Colección, Sello de la Bomba Principal y Control de Productos de Fisión, mientras que otros se encontrarán aislados pero disponibles como el de Refrigeración de Parada.

Operación en Parada

Durante una parada normal en preparación para llevar la Central a Parada Fría, la temperatura será bajada de 266°C a 177°C usando las válvulas de descarga al condensador y las de descarga a la atmósfera. La circulación del primario será realizada por termo-

sifón o con las bombas principales.

Desde 177°C a 54°C se utiliza el Sistema de Refrigeración de Parada que tiene bombas e intercambiadores propios.

Cuando se paran las bombas principales la presión puede ser bajada a través del Sistema Regulador de Presión.

Cuando se necesite, se puede drenar el sistema a través del Sistema de Refrigeración de Parada hacia el tanque de almacenamiento de agua pesada.

Operación anormal

Cuando sale de servicio una bomba principal, la potencia del reactor baja en un escalón a 65%.

Bajo tal circunstancia conviene parar la correspondiente bomba en el otro "loop", para evitar asimetrías entre los dos "loops".

Accidentes por pérdida de agua refrigerante

En una rotura importante de una cañería del sistema primario, ocurrirá una disminución de presión en el "loop" defectuoso y un aumento de presión en el "contaimment". Las acciones que se deben tomar tienden a conseguir los siguientes objetivos:

- 1) Que la liberación de radioactividad esté limitada al área interior del "contaimment".
- 2) Que los elementos combustibles estén continuamente refrigerados.
- 3) Minimizar los daños de las instalaciones.

Conjuntamente con estos objetivos y debido a un muy limitado tiempo de respuesta del operador, la acción correctiva requerida por medio de la operación de los sistemas de seguridad ha sido automatizada de modo tal que las siguientes secuencias de eventos tengan lugar:

- 1) Parada del Reactor con las barras o con el sistema de veneno (sistemas de paradas N° 1 y 2).
- 2) Aislación del circuito defectuoso para minimizar pérdidas de agua pesada.
- 3) Cerrar toda posible salida de radioactividad fuera del contenedor.
- 4) El sistema de Refrigeración de Emergencia será activado solamente en el circuito defectuoso.

- 5) Si la presión en el edificio del Reactor aumenta lo suficiente, el sistema de lluvia será excitado.

Sistema controlador de presión e inventario de agua del Sistema Primario

Puede haber dos tipos de control: en la Centrales como Douglas Point o Pickering hay un sistema llamado de Modo Sólido con válvulas de alimentación y retorno y bombas de alimentación; en la centrales como NPD y las de 600 MW, existe el presurizador además de las válvulas y bombas citadas y se puede trabajar en el modo llamado "Normal" y también en el modo sólido como en el caso anterior.

En el modo sólido la presión es controlada por las válvulas de envío o retorno, o sea, se saca más o menos agua para conseguir una determinada presión; en estos casos no hay un colchón de gas o vapor que sirva de pulmón para proveer de una respuesta elástica a fluctuaciones de presión, sin embargo la cañería tiene alguna elasticidad, y por ejemplo en Pickering a plena potencia, la adición de un pie cúbico de agua produce un aumento de 17 psi de presión en el primario. Esta compresibilidad permite al sistema de regulación mantener al primario bajo control.

En las Centrales que tienen presurizador, caso de las de 600 MW, hay más posibilidades de trabajo pues se puede trabajar de modo normal usando el presurizador con su colchón de vapor como medio elástico para las fluctuaciones de presión y variando la misma con calefacciones o con válvulas de salida de vapor; también se puede trabajar en modo sólido, aislando el presurizador y trabajando con las válvulas de alimentación y descarga.

Se adjunta figura en la que se muestra el sistema de Control de Presión y de Inventario y en el que se ven las bombas de alimentación, que son las encargadas de introducir al Sistema Primario, a través de las válvulas de alimentación, el caudal deseado, y las válvulas de purga que trabajan relacionadas con las de alimentación para conseguir la presión deseada cuando trabajan en modo sólido o para regular el nivel del presurizador cuando trabajan en modo normal.

El sistema con presurizador tiene la ventaja de que la

presión no puede bajar tan rápidamente cuando hay una pérdida de agua pesada y no corren peligro de cavitarse las bombas principales, pues hay tiempo suficiente para sacar de servicio las mismas. La desventaja sería que puede entrar agua fría del Sistema Primario cuando se habilita el presurizador y no se han igualado previamente las presiones entre primario y presurizador. Esto puede ocasionar en el presurizador fuertes solicitaciones. Por esta causa es una maniobra delicada la habilitación del presurizador y se deben vigilar las temperaturas y presiones de los dos sistemas.

Operación Normal

En los dos estados estacionarios se trabaja en modo normal con una o dos bombas de alimentación en servicio (depende del caudal que se esté desgasificando) con el presurizador regulando presión (con sus calefacciones y válvulas de descarga) y en las válvulas de alimentación y retorno regulando nivel en el presurizador. El modo sólido es utilizado solamente hasta cero potencia caliente.

Situaciones anormales

- 1) Pérdida de las dos bombas de alimentación. Se debe parar el reactor.
- 2) Pérdida de las computadoras: en este caso las válvulas de alimentación fallan abiertas y las de retorno cerradas. Hay que pasar a Modo Sólido que tiene controles analógicos de la presión.
- 3) Pérdida de aire de consumo: hay un aviso y luego del mismo hay capacidad para 5 minutos, en caso de no encontrarse la falla hay que parar el reactor.

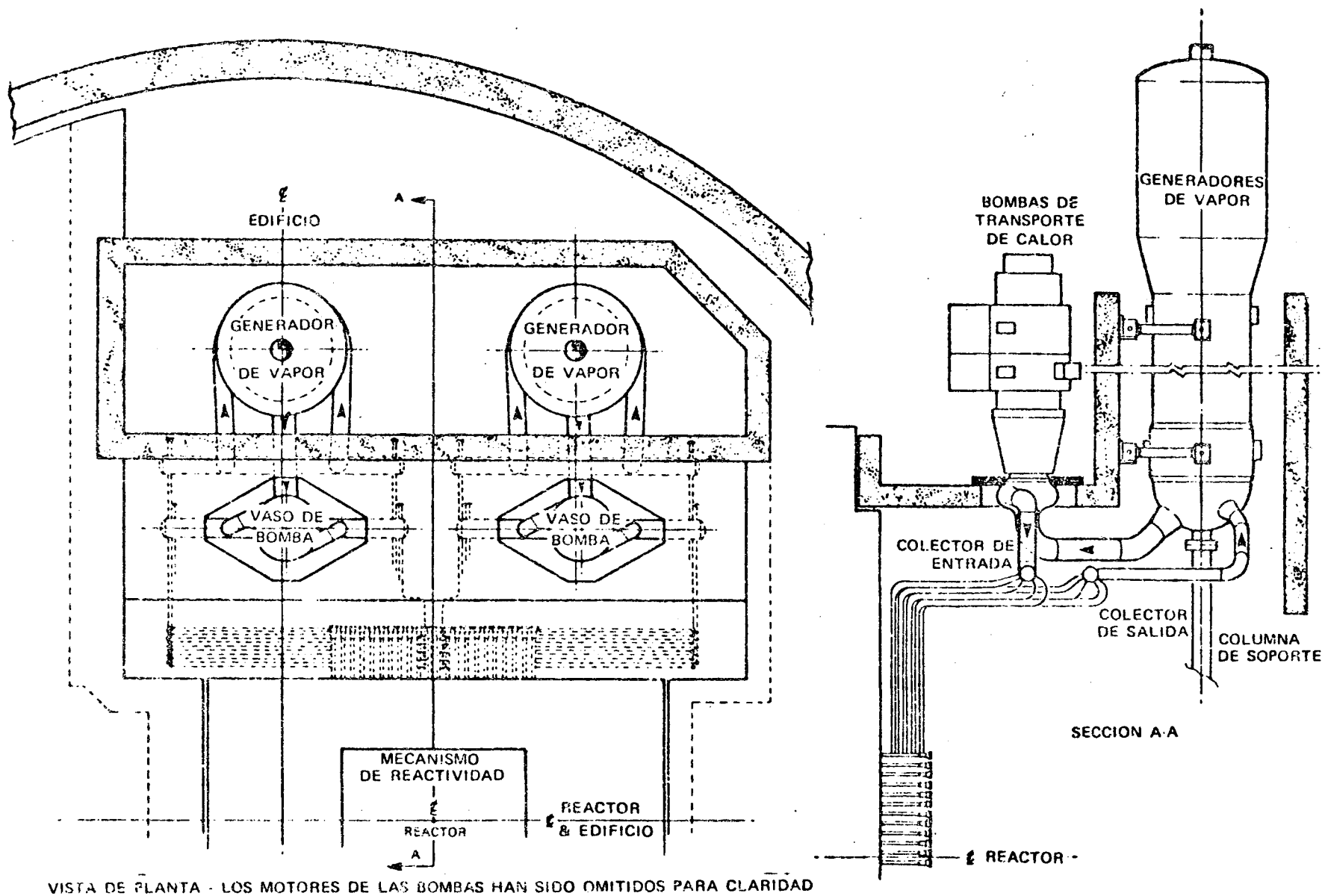


Figura 10 - Disposición del Sistema Primario de transporte de calor

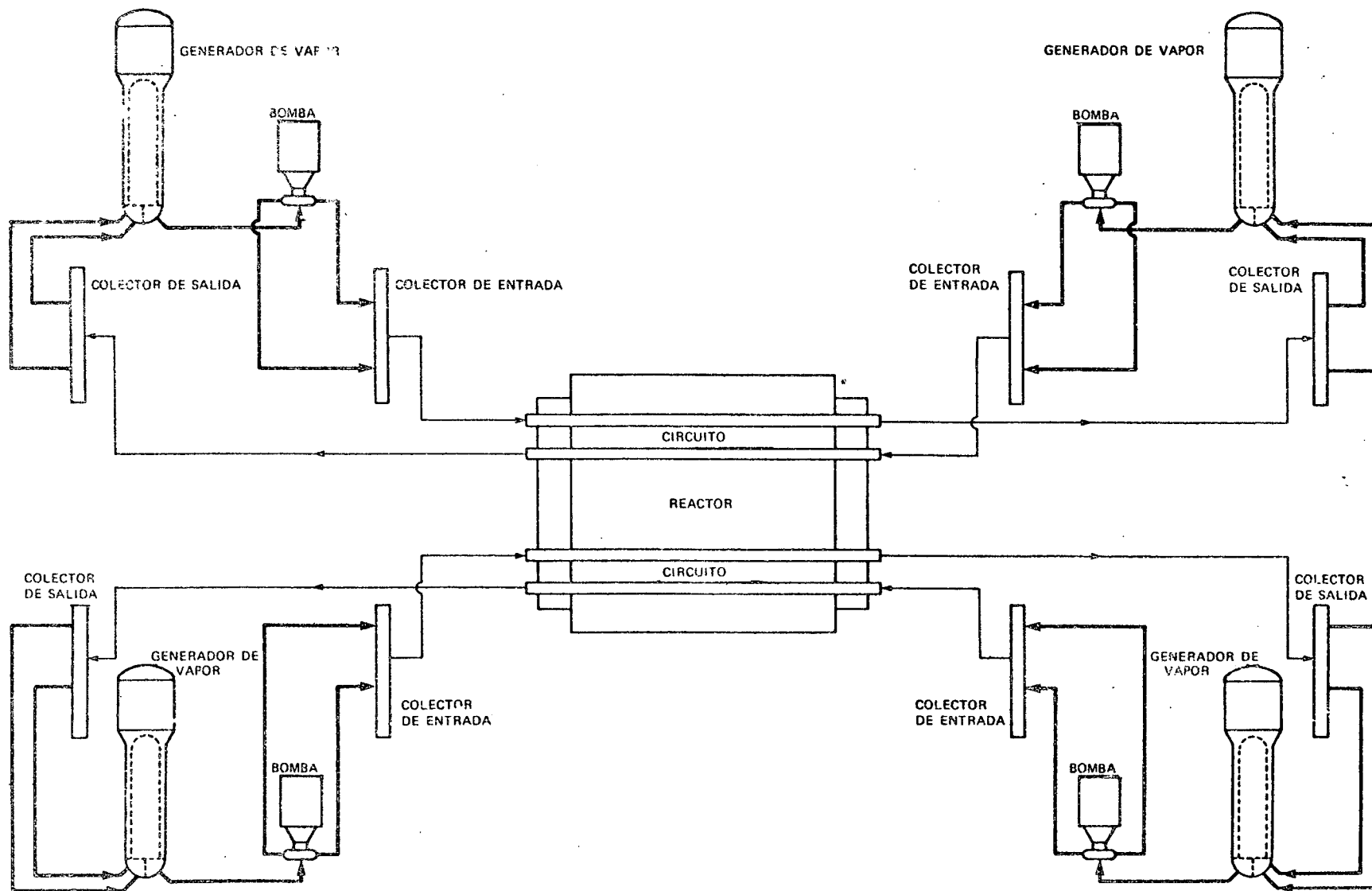


Figura 11 - Sistema Primario de transporte de calor
Circuito Principal

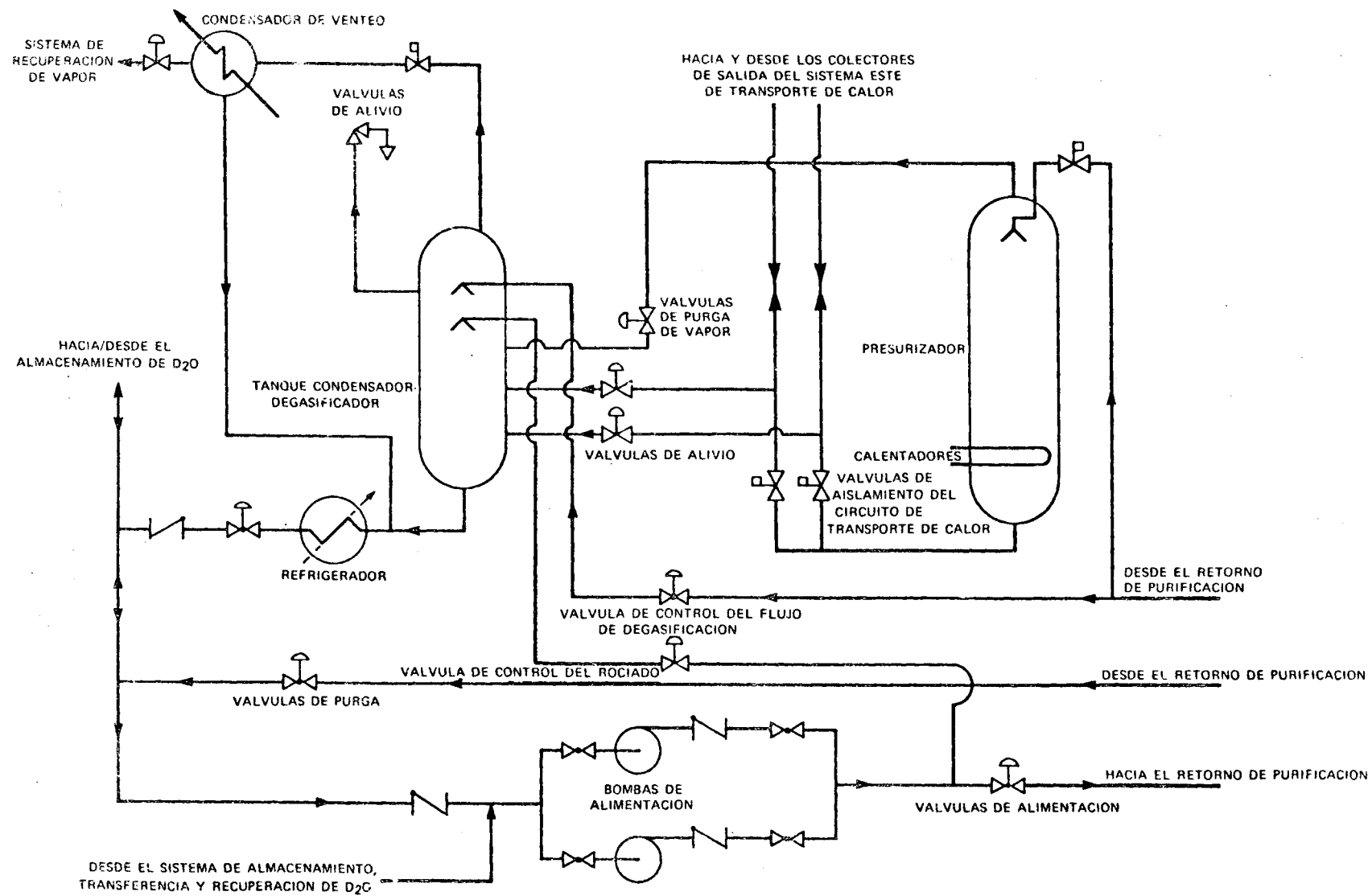


Figura 12 - Sistema Primario de transporte de calor - Sistema de control de presión y de inventario

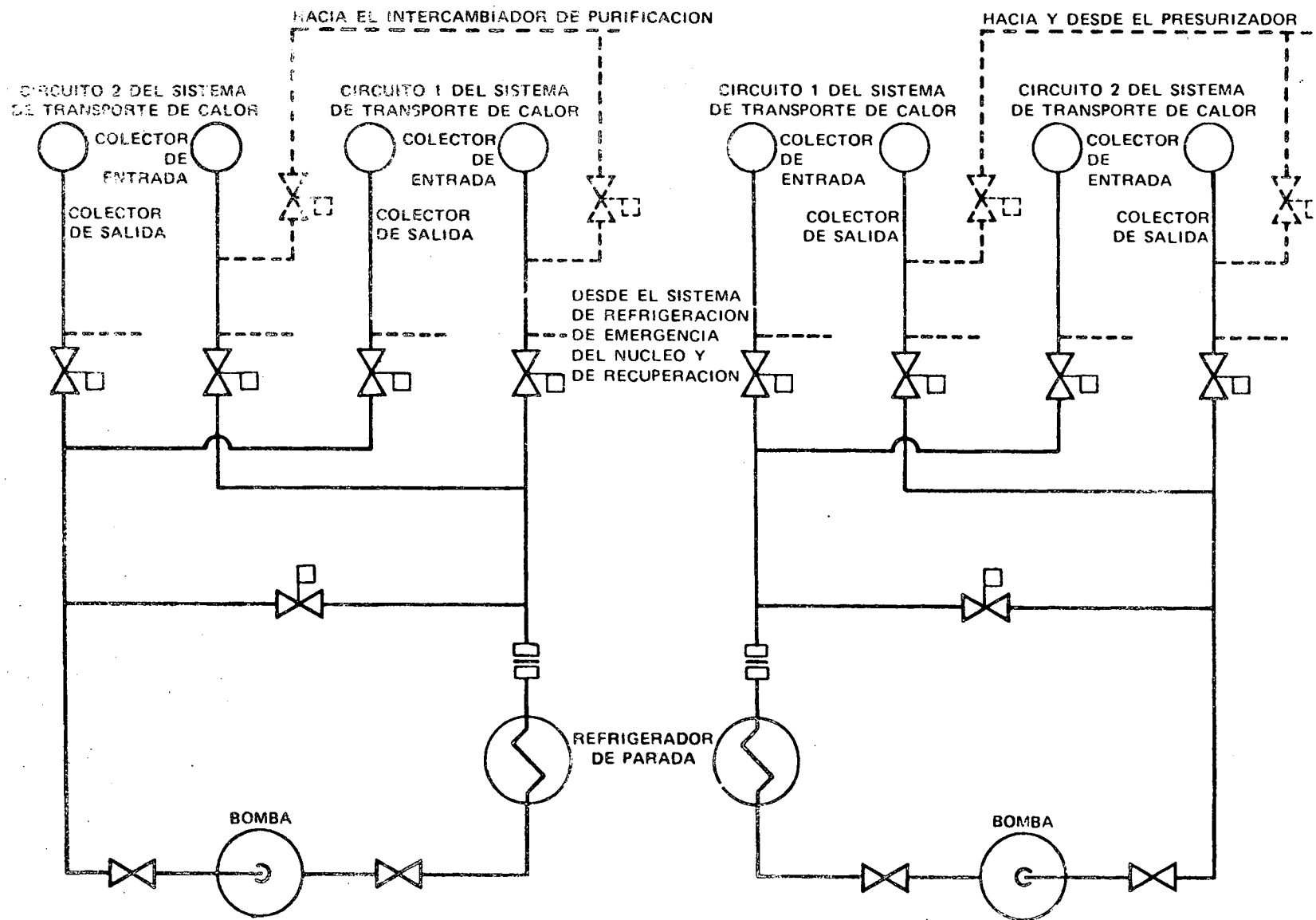


Figura 13 - Sistema Primario de transporte de calor - Refrigeración de parada

SISTEMA MODERADOR

Durante el desarrollo de los criterios de diseño que han sufrido los distintos diseños de los reactores Candú, el sistema del moderador ha sido modificado sustancialmente en un aspecto que es importante destacar.

En sus orígenes, como por ejemplo el NPD, el moderador se drenaba rápidamente con el objeto de producir un "shutdown" inmediato del reactor, actuando como sistema de seguridad. Este criterio se mantuvo hasta el diseño de los cuatro primeros reactores de Pickering donde se comprobó que debido a que la cantidad de masa del moderador se iba aumentando conforme a las potencias obtenidas, (540 MW por unidad en este caso), el drenado del moderador no resulta suficiente por el largo tiempo empleado. Debido a esto para módulos de 600 MW, (aproximadamente 240 ton de agua pesada son empleadas en el moderador), se optó por no emplear el método de drenaje rápido, quitando la factibilidad ya mencionada desde el punto de vista de seguridad, con que venían contando los moderadores de los reactores Candú. Hechas estas apreciaciones básicas de diseño, a continuación, nos referiremos exclusivamente al sistema del moderador de las unidades de 600 MW.

Funciones

- 1) Moderar los neutrones de fisión de alta energía en el núcleo del reactor a los niveles de energía térmica requeridos para obtener la fisión nuclear.
- 2) Extraer el calor generado por el proceso de moderación y el proveniente del Sistema Primario y de los componentes adyacentes. Por ejemplo, el calor extraído por el Agua de Servicio en los intercambiadores del moderador (de los que luego se hará mención) a plena potencia es de 120 MW. De estos últimos 117 MW son generados por moderación neutrónica, los 3 MW restantes se transmiten al moderador a través de transferencia calórica. La potencia térmica generada en el reactor es de 2061,4 MW, es decir, que los 120 MW puntualizados representan un 5,82% de estos.
- 3) Servir como medio de dispersión de los compuestos químicos necesarios para el control de la reactividad (Nitrato de gadolinio y/o anhídrido bórico).
- 4) Proveer un sumidero de calor para los elementos combus-

tibles en el caso de un accidente de pérdida de refrigerante coincidente con la indisponibilidad del sistema de refrigeración de emergencia. En este caso, la transferencia térmica desde el primario se incrementaría hacia el moderador porque es de esperar que los tubos de presión se deformen y hagan contacto con los tubos de calandria exteriormente cubiertos por el medio moderador.

Descripción

(Referirse a las figuras 14 y 15)

El sistema moderador consta esencialmente de dos circuitos interconectados y compuestos cada uno por una bomba del 100% y un intercambiador de calor del 50% cada uno, de manera de operar indistintamente y con ello mantener la temperatura media de la masa del moderador alrededor de los 68°C.

La temperatura de salida del agua pesada del moderador es de 71°C y luego de pasar por la bomba en operación (la otra se encuentra de reserva) y por ambos intercambiadores de calor, ingresa nuevamente a la Calandria vía 8 boquillas ubicadas según el eje axial, con una temperatura de 43°C con un caudal de 940 g l/seg.

La medición y control de la temperatura se realiza a la salida de la Calandria, actuando sobre las válvulas del sistema de agua de proceso por el lado de la carcasa de los intercambiadores de calor, con alarma por alta temperatura. La medición de nivel (ligada con el control de la presión realizada por el sistema de gas de cobertura que más adelante se describe como función auxiliar del moderador) se realiza en el tanque de cabeza, proveyendo alarma por alto y bajo nivel. El tanque de cabeza posee un volumen de 2,9 m³.

Como ya se dijo, el sistema de gas de cobertura cumple funciones auxiliares del sistema moderador que pueden resumirse así:

- a) Provee un gas inerte (helio) en los espacios libres de la calandria, conductos de alivio y tanque de cabeza por encima de los niveles de agua pesada, manteniendo la presión ligeramente por encima de la atmosférica con el objeto de:
 - Evitar el ingreso de aire externo a la calandria.
 - Mantener el nivel del agua pesada dentro de los lími-

tes operativos (aproximadamente 30 cm por encima del nivel de la calandria medidos en los conductos de alivio).

- b) Circula la mezcla de gas helio, vapor de agua pesada y pequeñas cantidades de D_2 , O_2 y otros gases, de manera que se evita una excesiva concentración de D_2 (máxima 4%) con el objeto de evitar mezclas explosivas con el O_2 presente.

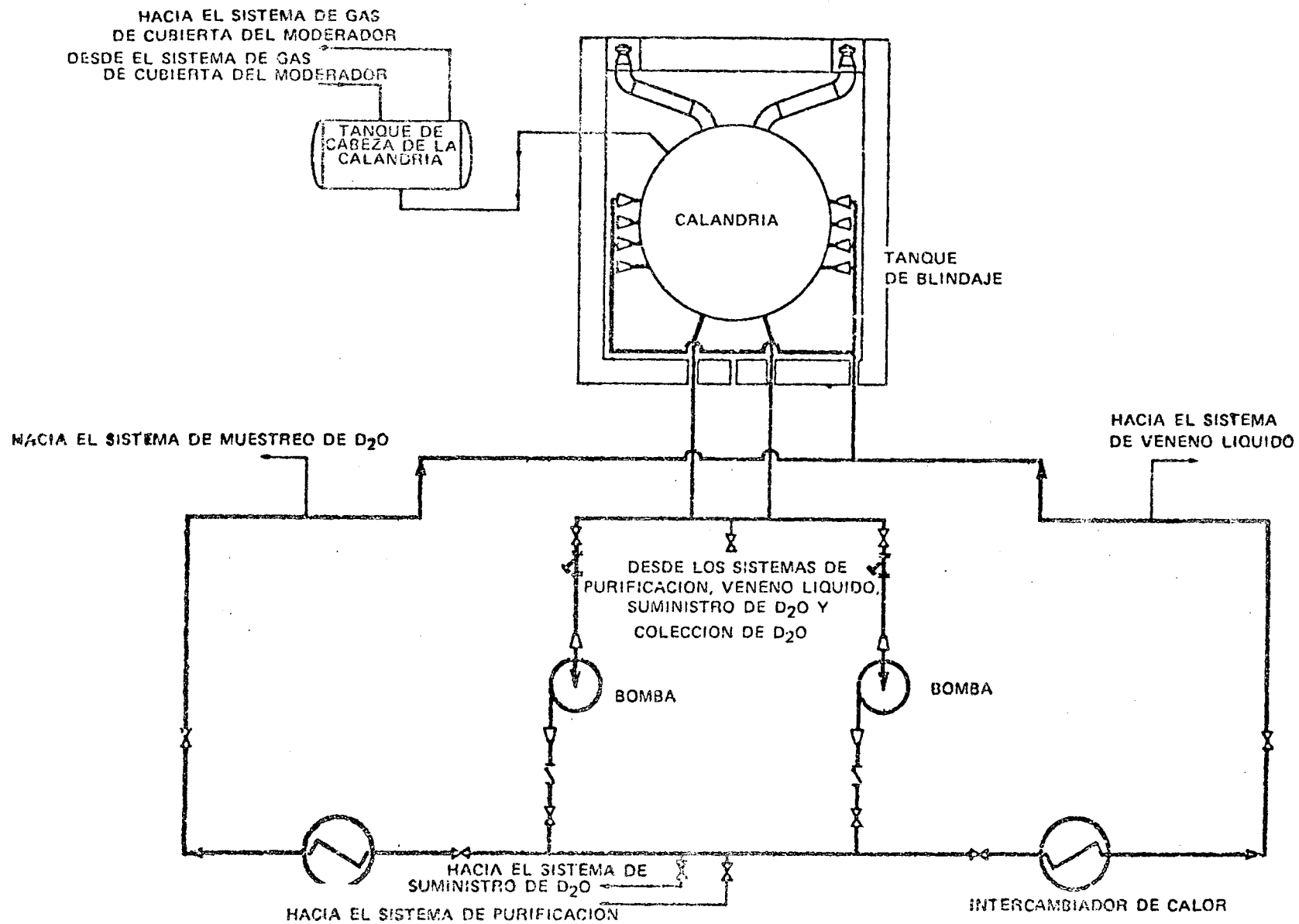


Figura 14 - Sistema principal del Moderador

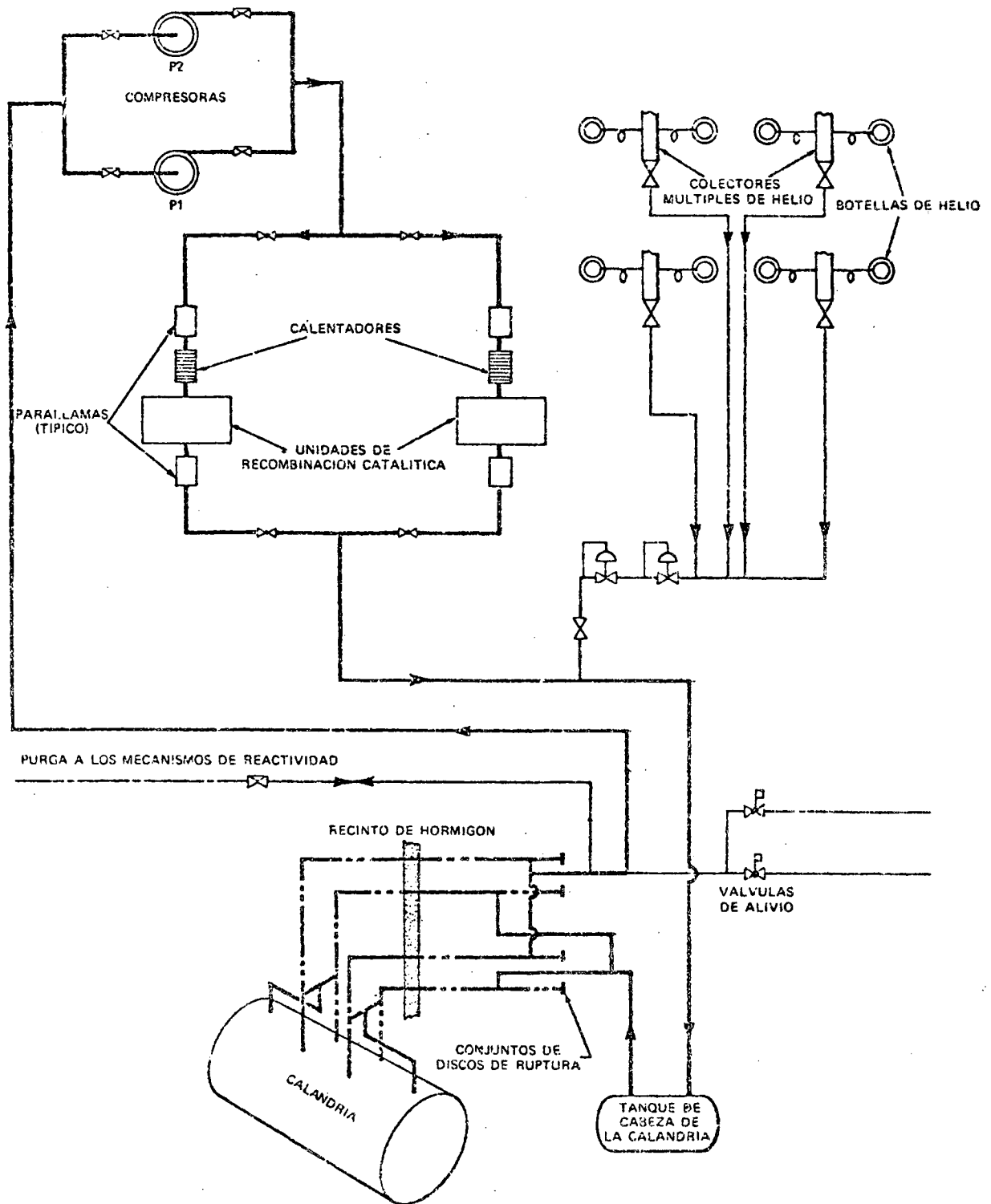


Figura 15 - Sistema de gas de cubierta del Moderador

SISTEMA DE RECAMBIO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Dentro del sistema de recambio, la máquina de carga es su componente principal. La máquina de carga se puede dividir en tres grandes componentes (Ver fig. 22):

Trompa
Magazine
Conjunto de Ram

Trompa

Tiene como misión lograr el acople con el canal seleccionado, conseguir que este acople sea estanco, y permitir el paso del elemento combustible a través de él.

Magazine

Tiene como misión almacenar los elementos combustibles, nuevos o quemados y los distintos accesorios o herramientas necesarias para la transferencia. (Ver fig. 16 a 18).

Conjunto de Ram

Tiene como misión realizar el traslado longitudinal de los elementos combustibles o de los accesorios necesarios para esta transferencia.

Principio de funcionamiento

Trompa: No tiene movimiento relativo con respecto a la máquina. Interiormente tiene un tapón que lo puede independizar del exterior (cuando tengo elementos quemados necesito refrigerarlos).

Magazine: Es un tambor con doce posiciones. Puede girar y cada uno de estos alojamientos se puede enfrentar con el canal deseado. En cinco de los recintos van elementos combustibles (x 2 en c/u), en el resto se coloca:

- Una posición para tapón de cierre del canal (de reserva)
- Una posición vacía (de reserva para el tapón posible del canal)
- Una posición para tapón de blindaje de reserva.
- Una posición para el tapón de blindaje que se sacará del canal
- Una posición para el manguito guía (se coloca para permitir el pasaje del elemento combustible por la zona de la

- trompa que tiene mayor diámetro)
- Una posición para el adaptador del Ram C que tiene la función de empujar el elemento combustible
 - Una posición para el almacenaje del tapón de la trompa durante la operación.

Se adjuntan detalles del magazine y del mecanismo de giro, notandose que el sistema Ferguson permite una tolerancia de 90° en el giro del mecanismo motor sin alterar de posición el magazine.

Ram: Es un conjunto de tubos concéntricos que forma tres cuerpos

Ram B

Ram C

Latch Ram

El Ram B y el Latch son movidos, cada uno de ellos, por un motor hidráulico de aceite, los cuales mueven un conjunto de tuercas y tornillos de bola que producen finalmente un movimiento longitudinal en cada uno de los Ram. El Ram C es movido por la presión de agua pesada.

Descripción de un cambio de elementos combustibles (Ver fig. 23)

- 1) Cargar la MC cargadora con 8 ó 10 elementos combustibles.
- 2) Acoplar ambas MC (cargadora y receptora) a ambos extremos de un mismo canal (el recambio se hace siempre en la dirección del flujo).
- 3) Presurizar ambas MC y quitar el tapón de la trompa de cada una de ellas, almacenándolos en los magazines de las MC.
- 4) Quitar el tapón de cierre de cada uno de los extremos del canal y almacenarlos en los magazines de las MC.
- 5) Quitar el tapón de blindaje del lado de la MC cargadora y almacenarlos en el magazine.
- 6) Tomar el tapón de blindaje del lado de la MC receptora.
- 7) Rotar el magazine de la MC cargadora hasta que un par de elementos combustibles nuevos quedan en la posición de carga.
- 8) Repetir el item 7) hasta cargar 8 elementos combustibles nuevos.
- 9) Quitar el tapón de blindaje de la MC receptora quedan-

do la columna de 12 elementos combustibles nuevos soportados por los separadores de esta MC.

10) Rotar el magazine de la MC receptora hasta que una posición de elemento combustible vacía queda en posición de descarga; descargando allí el primer par de elementos combustibles gastados, quedando la columna soportada por los separadores.

11) Repetir el ítem 10) hasta que se hayan descargado 8 elementos combustibles gastados.

12) Colocar el tapón de blindaje del lado de la MC cargadora.

13) Colocar el tapón de blindaje del lado de la MC receptora (esta acción ubica la columna de 12 elementos combustibles en su posición normal en el núcleo).

14) Colocar el tapón de cierre en cada uno de los extremos del canal.

15) Colocar el tapón de la trompa de cada MC y realizar la prueba de estanqueidad de los tapones de cierre.

16) La MC que fue cargadora se desacopla y queda en espera del nuevo recambio.

17) La MC que fue receptora y que tiene 8 elementos combustibles gastados se encamina al puerto de combustible gastado para descargarlos y luego queda a la espera del nuevo recambio.

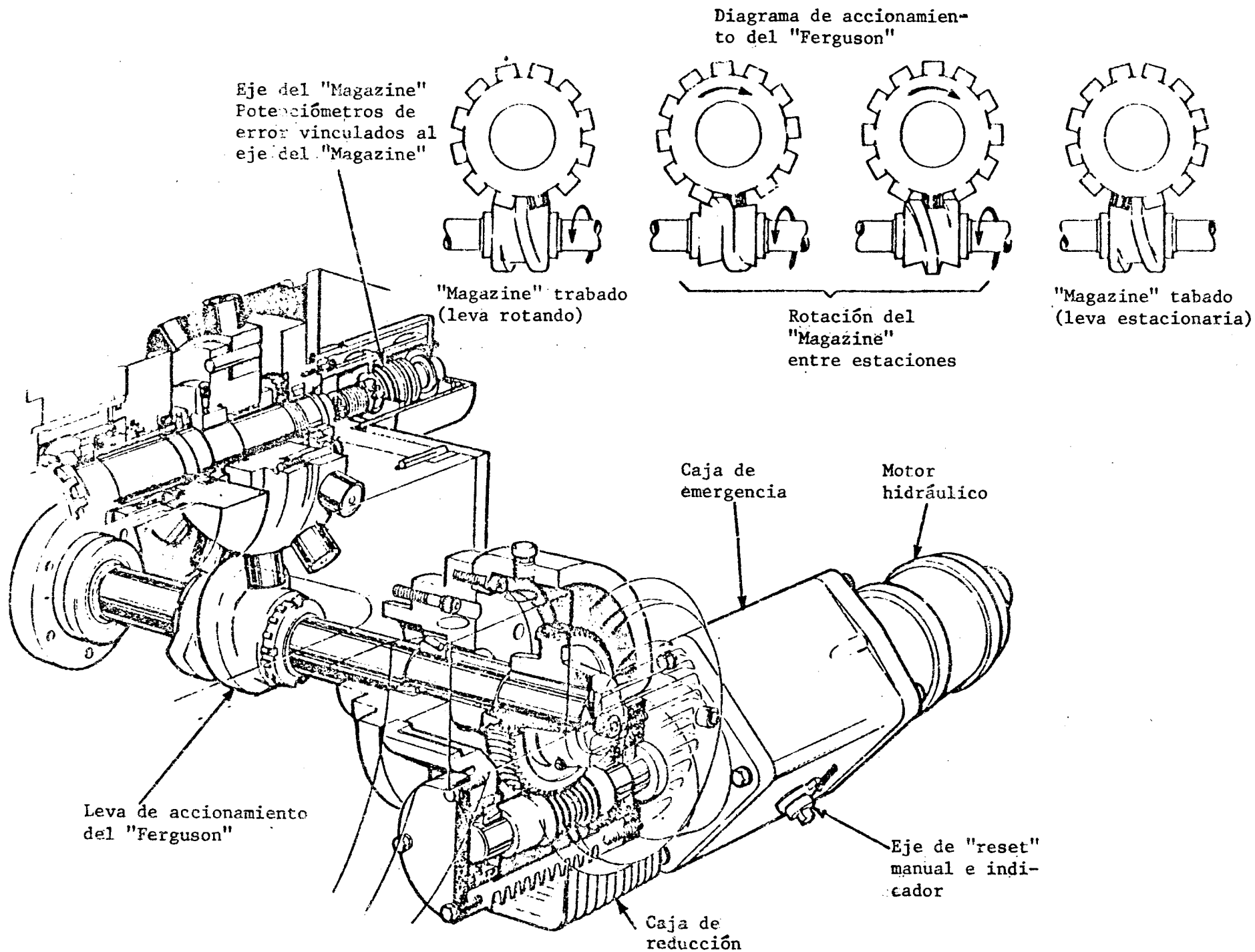
Sello flexible del tapón de cierre (Ver fig. 24 y 25)

Un detalle interesante es el diseño del sello flexible que forma parte del tapón del canal. Es un sello permanente, o sea, que no necesita recambio.

Está recubierto, en la parte del sello, con un plaqueado de níquel. De acuerdo a los antecedentes, en otras Centrales este sello ha dado buenos resultados.

El principio de funcionamiento se puede ver en la fig. 9. En posición 1 está la máquina de carga colocada y con igual presión en ambas caras del sello. En la posición 2 la máquina de carga colocada y empuja con el Ram. En la posición 3 se ve que cuando actúa la presión del primario solamente el sello apoyado en los puntos fijos del tapón se curva de tal manera de sellar aún más. La relación de áreas es tal que $y = 2x$, permitiendo tal deformación.

Figura 16 - Sistema de accionamiento del "Magazine"



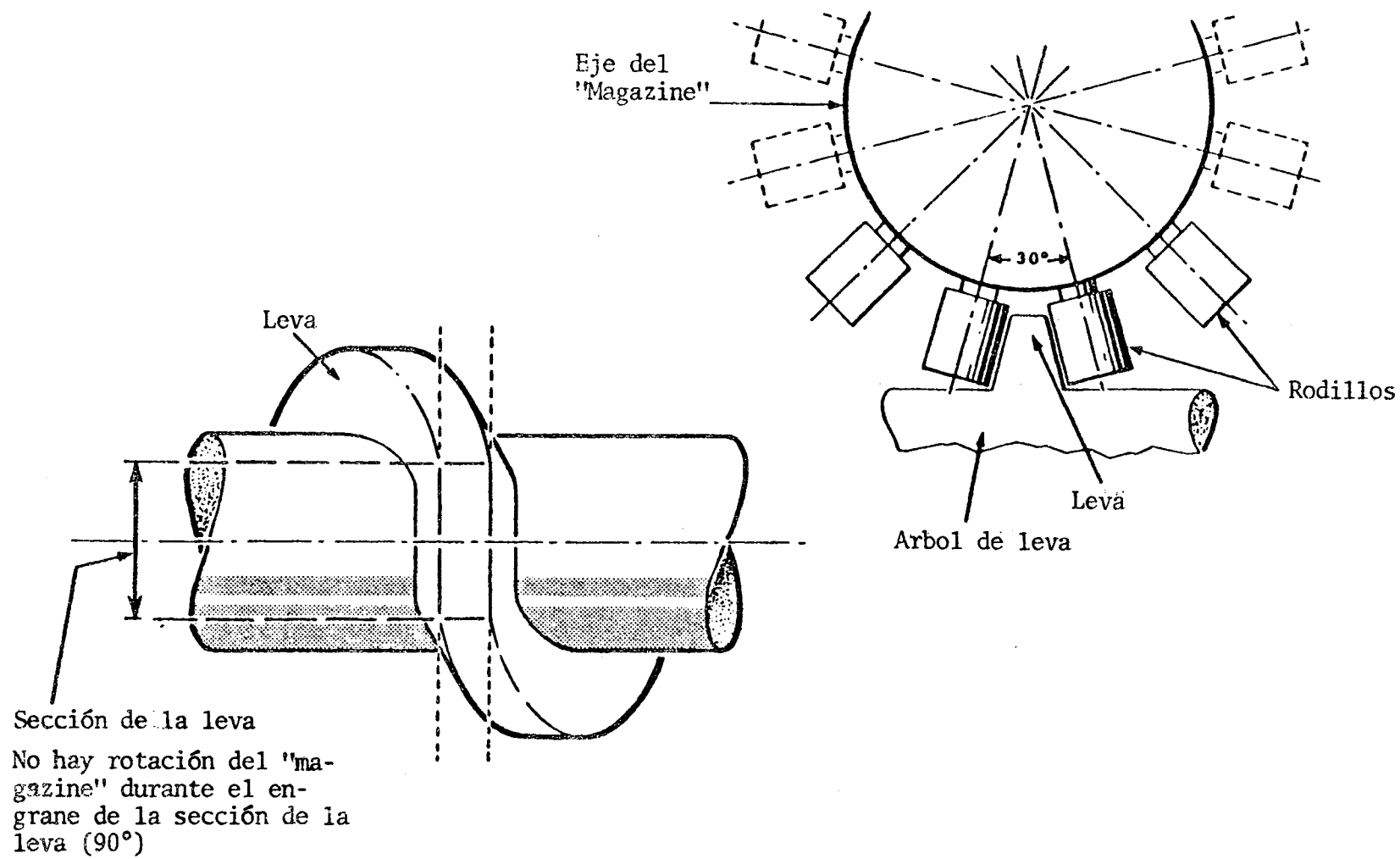


Figura 17 - Principio de accionamiento del mecanismo del "Magazine"

- A) Tapón de la trompa
- B) Combustible
- C) Cierre del canal
- D) Combustible
- E) Manguito de guía y herramienta de inserción
- F) Combustible
- H) Tapón de blindaje
- J) Adaptador
- K) Cierre del canal (reserva)
- L) Combustible
- M) Tapón de blindaje (reserva)
- N) Combustible

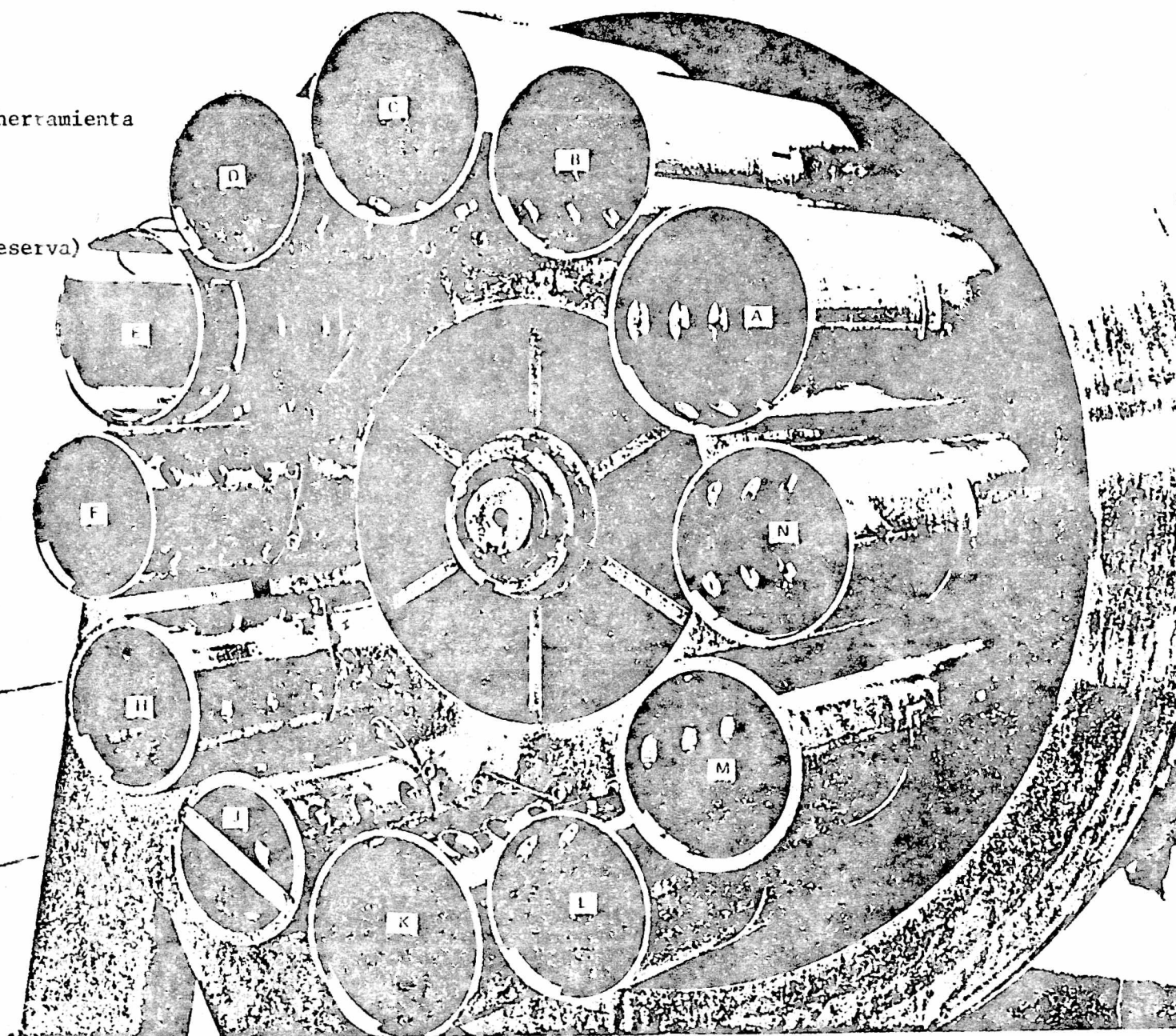


Figura 18 - Conjunto del rotor del "Magazine" de la Máquina de Carga

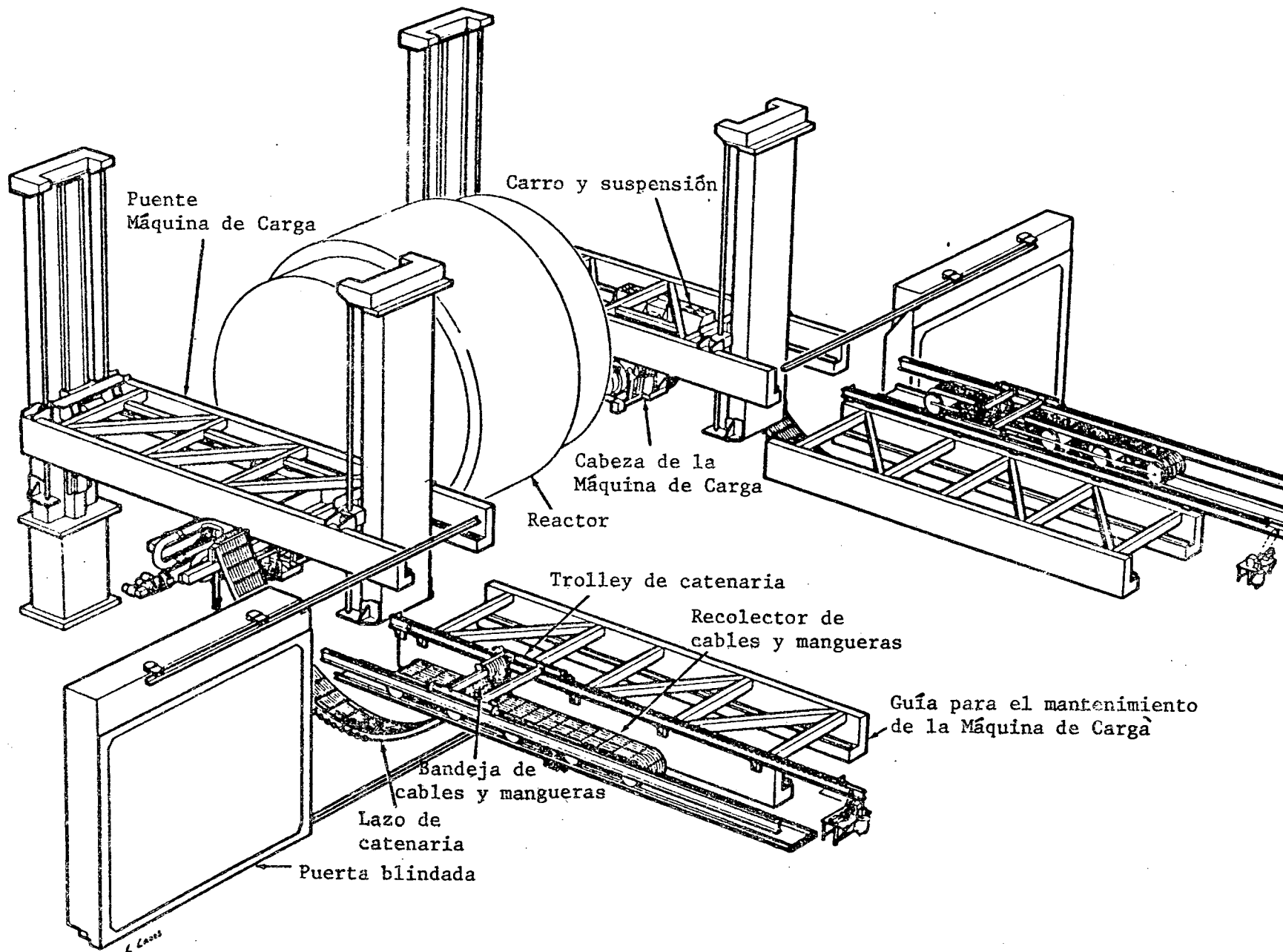


Figura 19 - Disposición general del puente de la Máquina de Carga, Carro y Catenaria

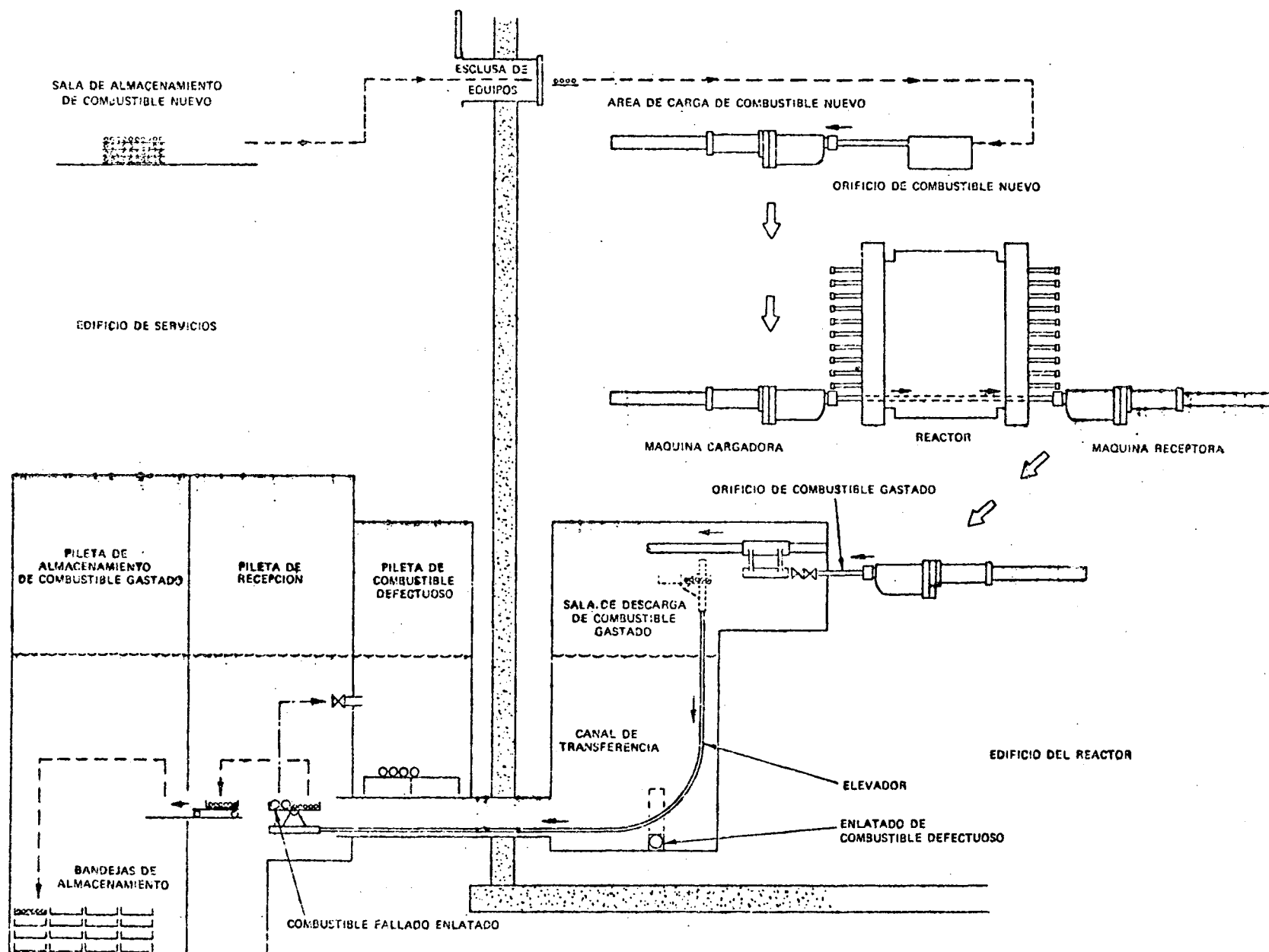


Figura 20 - Secuencia de manejo del combustible

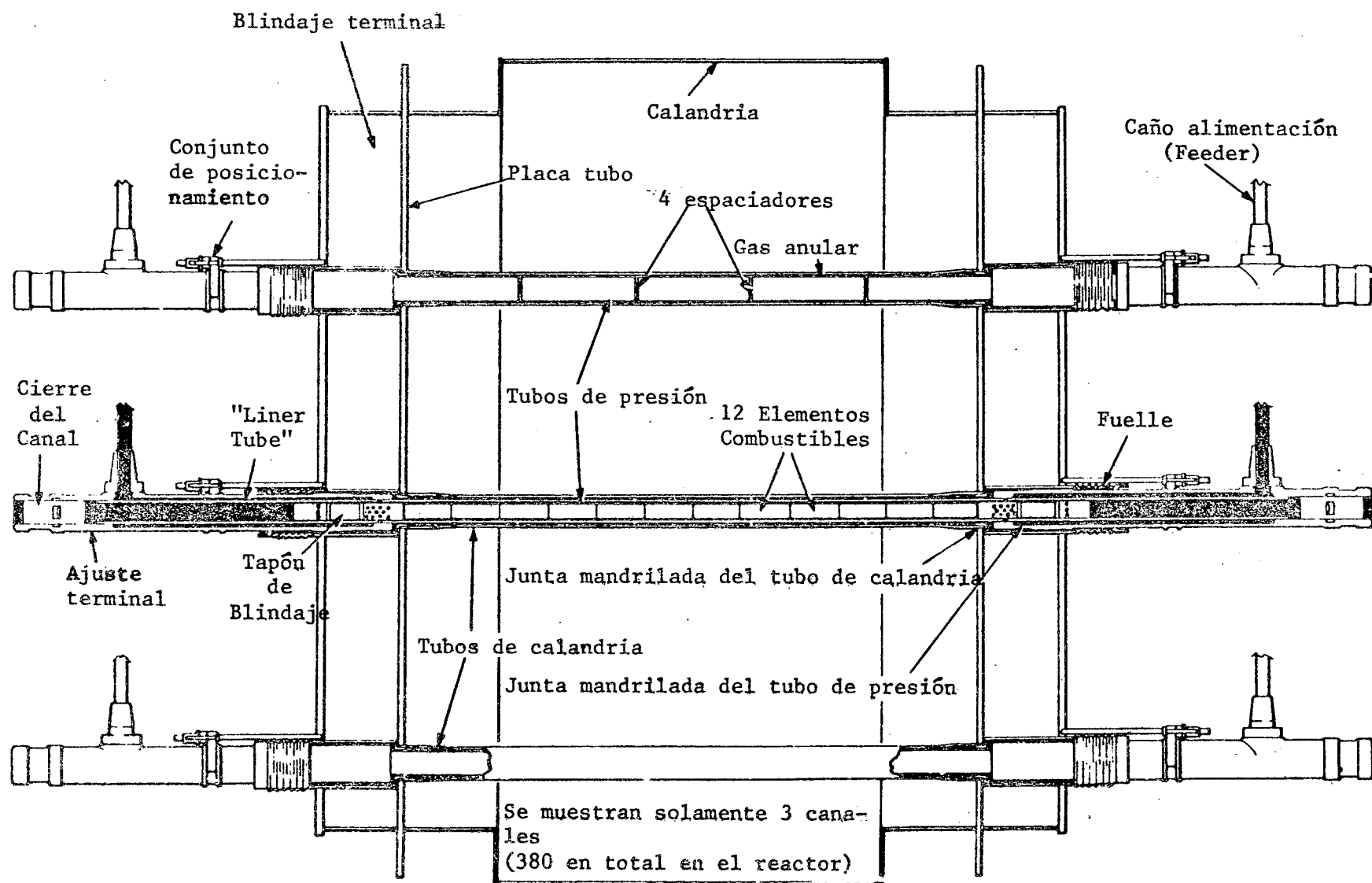


Figura 21 - Diagrama simplificado mostrando tubos de presión, tubos de calandria y elementos auxiliares

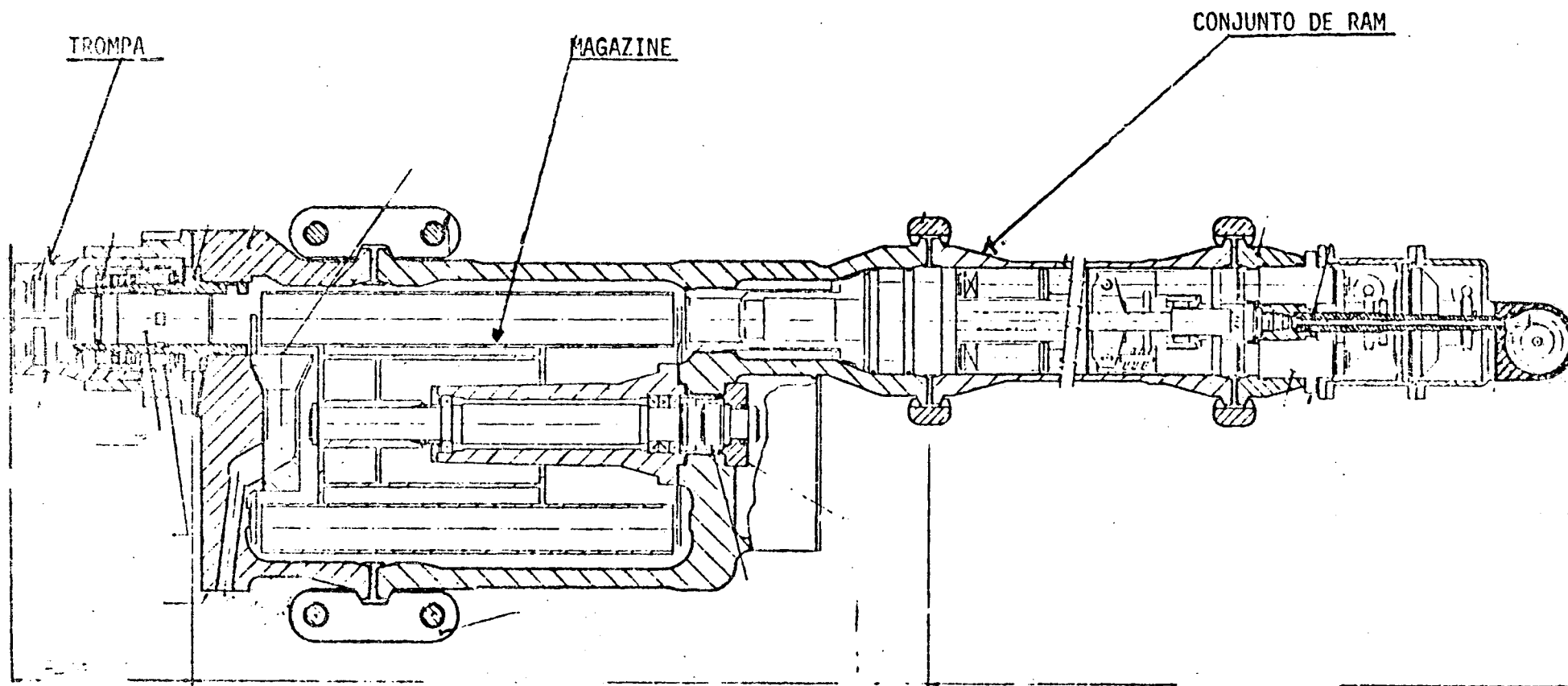


Figura 22 - Máquina de Carga - Central Nuclear de 600 MWe

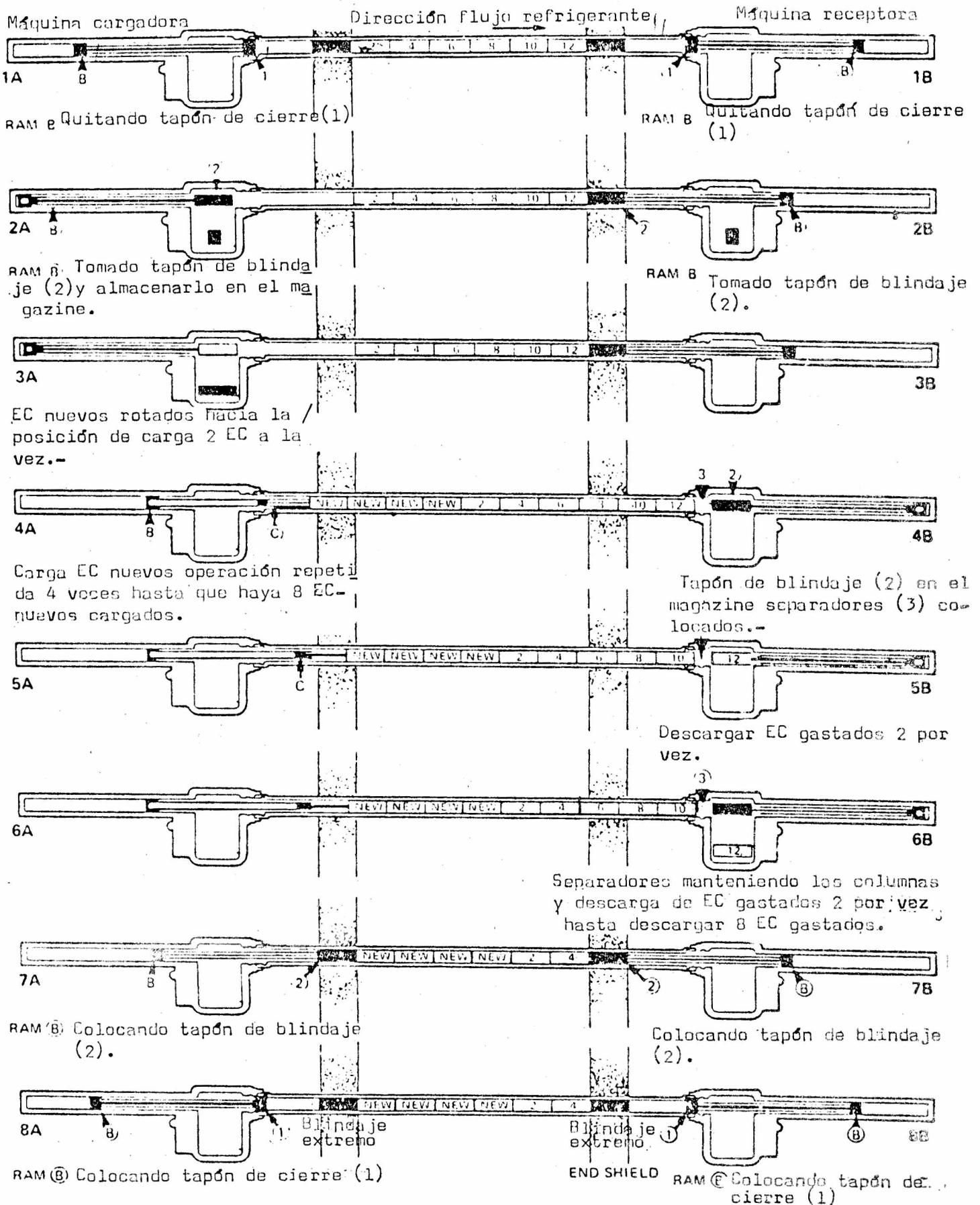


Figura 23 - Secuencia de cambio de Elementos Combustibles

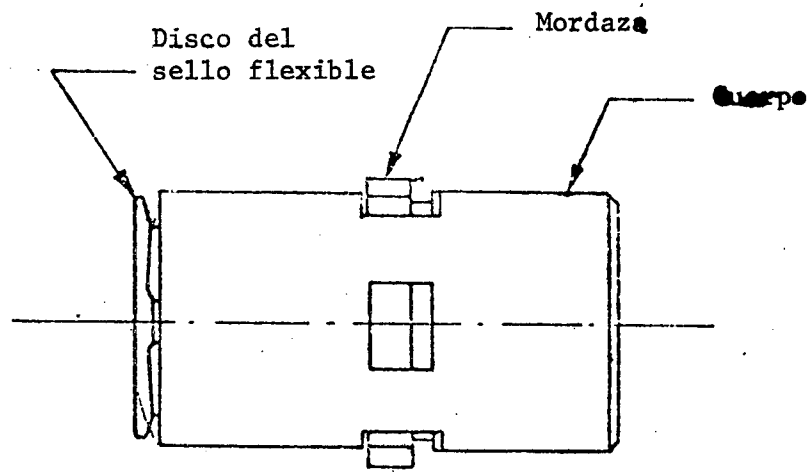


Figura 24 - Tapón de cierre del canal

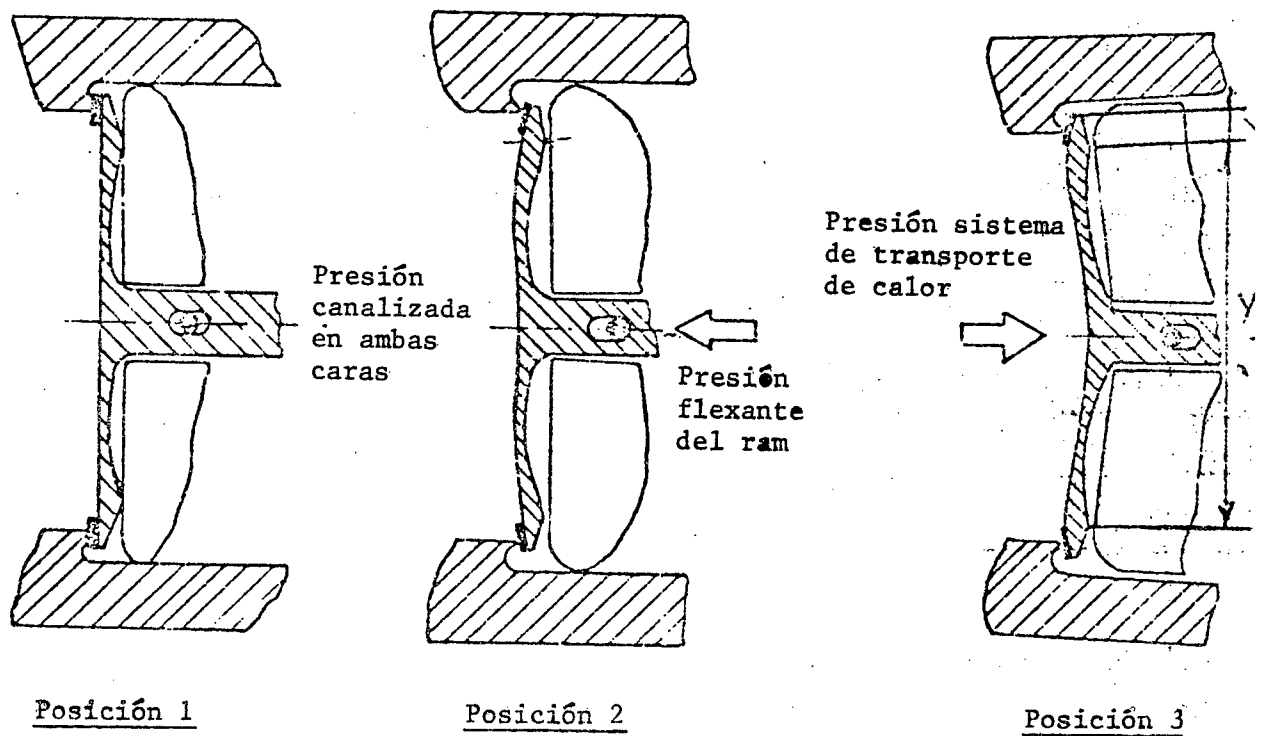


Figura 25 - Principio de funcionamiento del sello flexible del tapón de cierre

MECANISMOS DE REACTIVIDAD

Los reactores tipo Candú difieren notablemente con respecto a otros tipos de reactores en cuanto a los mecanismos de control de reactividad (que luego se enumeran en detalle). Básicamente, las características fundamentales radican en la existencia de las zonas líquidas que dan la posibilidad de contrarrestar las fluctuaciones del flujo, posibilitando controles zonales, que en conjunto hacen el control global de todo el reactor. Variando el nivel de agua liviana de un determinado compartimiento, o al unísono el conjunto de ellos, se logra tal propósito. Así, en primer lugar, se aplana adecuadamente al flujo en forma zonal y, en segundo lugar, se hace el control de la potencia total.

Las absorbedoras mecánicas completan la regulación de las zonas líquidas haciendo volver a nivel de trabajo las mismas.

Las barras ajustadoras están, normalmente, insertadas para configurar el flujo, pero también pueden extraerse para proveer reactividad positiva para compensar deficiencias de reactividad.

Cuando se produce un disparo del reactor por alguna causa, la extracción de estas barras da la posibilidad de disponer de un margen de reactividad positiva que contrarresta el efecto negativo del Xe, con lo que se logra un tiempo disponible de 30 minutos para intentar un rearranque, si se hace desaparecer la causa que motivó el "shutdown".

Por otro lado, el empleo de las barras ajustadoras de cobalto, una vez irradiadas en el núcleo por un período aproximado de dos años, permite contar con una fuente de isótopos radioactivos para uso industrial.

Además del uso de las barras ajustadoras de cobalto, en algunos diseños Candú se utilizaron las llamadas barras "Booster" que empleaban uranio enriquecido. Tenían idénticos fines que las ajustadoras de cobalto pero con la diferencia de que en operación normal estaban totalmente extraídas del núcleo y se las introducía para lograr los efectos de reactividad positiva deseados. (Ver fig. 26).

Su empleo no se extendió a los diseños más recientes atendiendo a problemas de regulación y seguridad. El principal inconveniente es que si se viene trabajando a plena potencia con el reactor y por causas accidentales se introducen las "Booster", se corre

un obvio peligro de excursión de potencia. En las figuras 26 a 28 se muestran detalles de lo expuesto.

Con fines de dar una idea más clara de los mecanismos de control de reactividad empleados en el módulo de 600 MW de la Central Nuclear en Embalse, se pasan a enumerar:

1) Zonas líquidas de control: Constan de 14 compartimientos con agua liviana y desmineralizada que introducen una reactividad negativa de -7.3 mk. Regulan dentro de un rango comprendido entre el 20 y el 70 por ciento del nivel de los compartimientos. (Ver fig. 29 y 30).

2) Absorbedoras mecánicas: Son 4 barras de cadmio que introducen -10 mk y complementan la regulación de las zonas líquidas de control. Se encuentran normalmente extraídas y/o parcialmente introducidas.

3) Ajustadoras de Cobalto: Son 21 y se encuentran normalmente introducidas para configurar la distribución de flujos aceptables, e introducen una reactividad de -15 mk.

4) Sistema de corte N° 1 (SDS # 1): Produce el corte del reactor por la introducción de 28 barras de cadmio (shut off rods), cuando se producen senales de disparo de algunos de los siguientes parámetros de "trip":

- a) Alta potencia neutrónica, con un "set-point" de 110% FP.
- b) Alta presión del HTS, "set-point" 107 Kg/cm².
- c) Bajo caudal del HTS, "set-point" 55% del valor nominal.
- d) Alto logaritmo del flujo neutrónico, "set-point" 55% del valor nominal.
- e) Alta presión del edificio del reactor, "set-point" de 1,3 Kg/cm².
- f) "Trip" manual.

El SDS # 1 introduce -48 mk en 1,8 seg.

5) Sistema de corte N° 2 (SDS # 2): Produce el corte del reactor por la introducción en el moderador de una reactividad negativa mayor que 300 mk, en 0,7 seg, lo cual se puede alcanzar con una solución de nitrato de gadolinio de 4.000 ppm como mínimo contenida en 6 tanques de 0,079 m³ cada uno.

Los parámetros que introducen el "trip" del reactor mediante el SDS # 2 son:

- a) Alta potencia neutrónica, con un "set-point" de 130% FP.

b) Alto logaritmo del flujo neutrónico, "set-point" de 25%/seg.

Nótese que los "set-points" de a) y b) de este sistema son mayores que los citados en a) y d) del SDS # 1, con lo que se concluye que el SDS # 2 actúa como "back-up" del # 1.

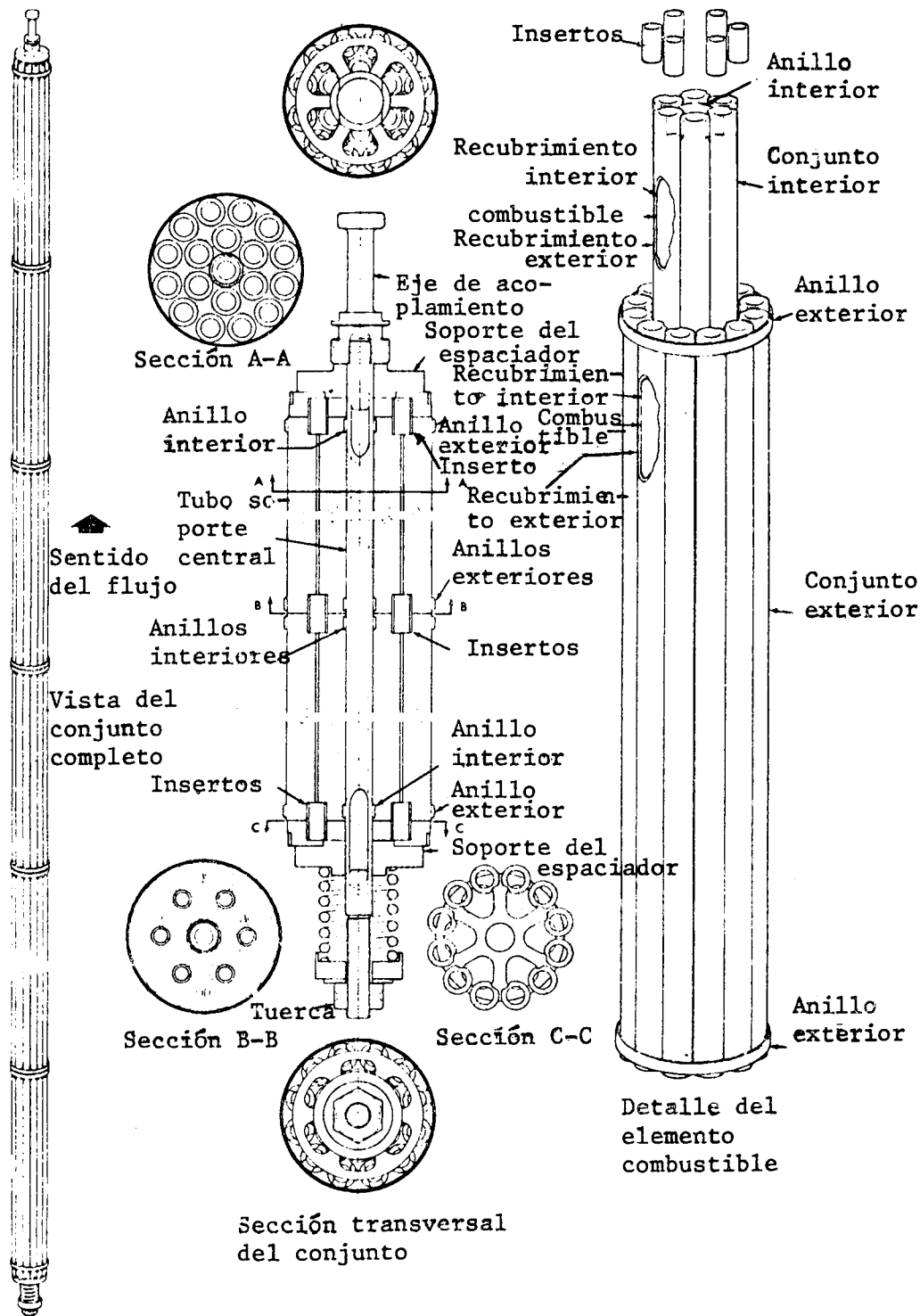


Figura 26 - Conjunto "Booster" del reactor de "Bruce"

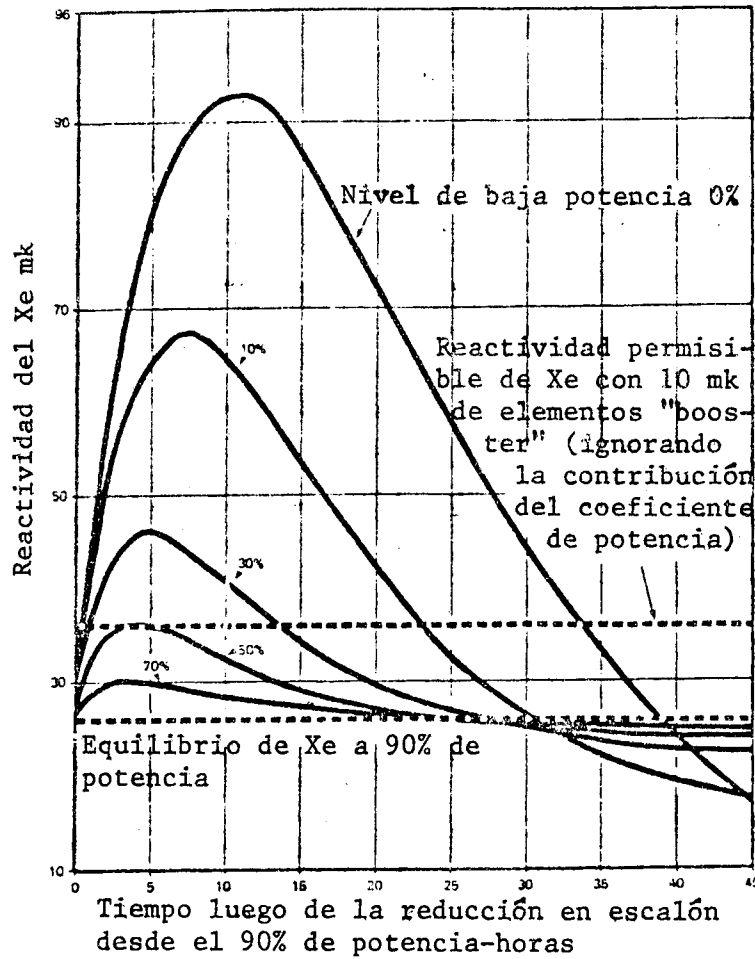


Figura 27 - Evolución del Xenón con el cambio de potencia

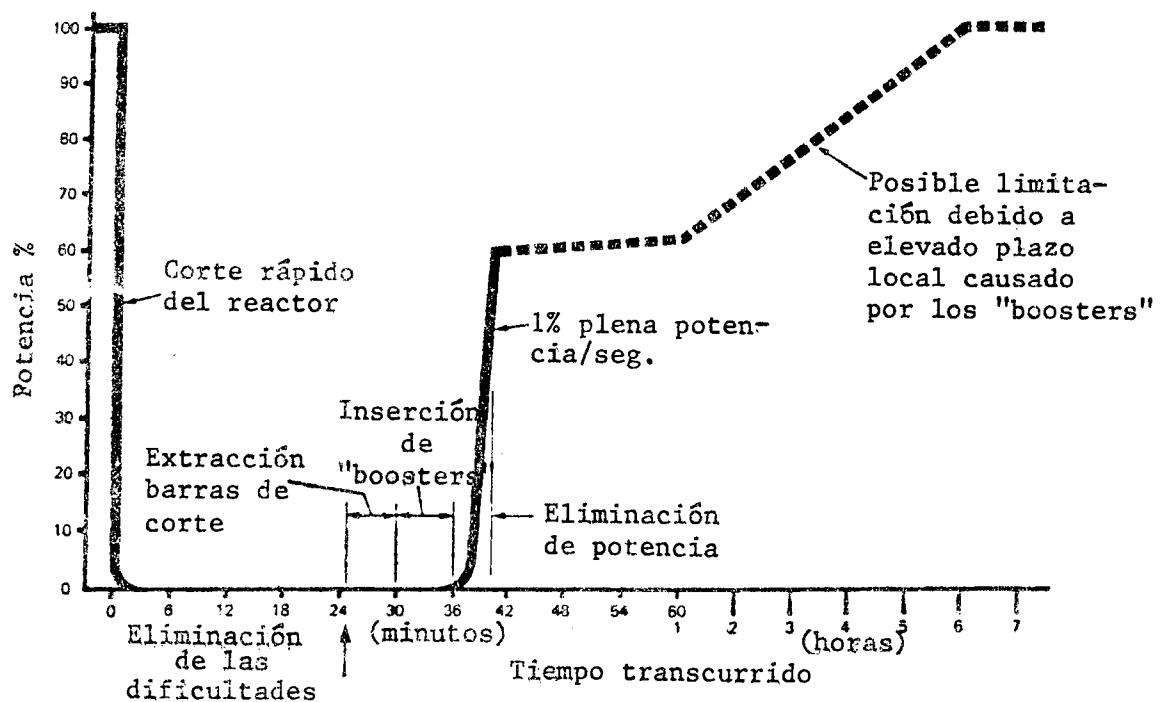


Figura 28 - Arranque rápido de una Central Candú

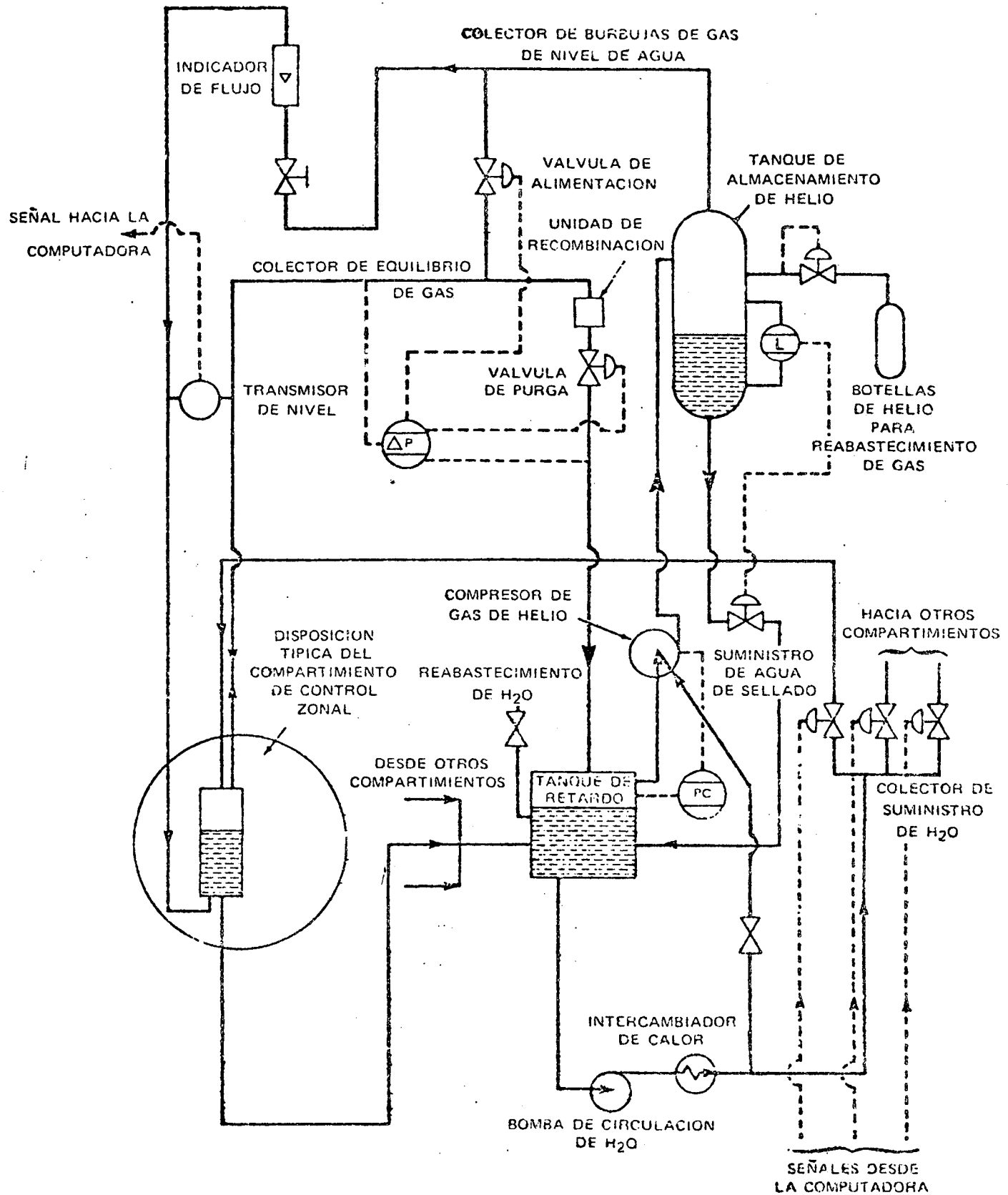


Figura 29 - Sistema de control zonal líquido

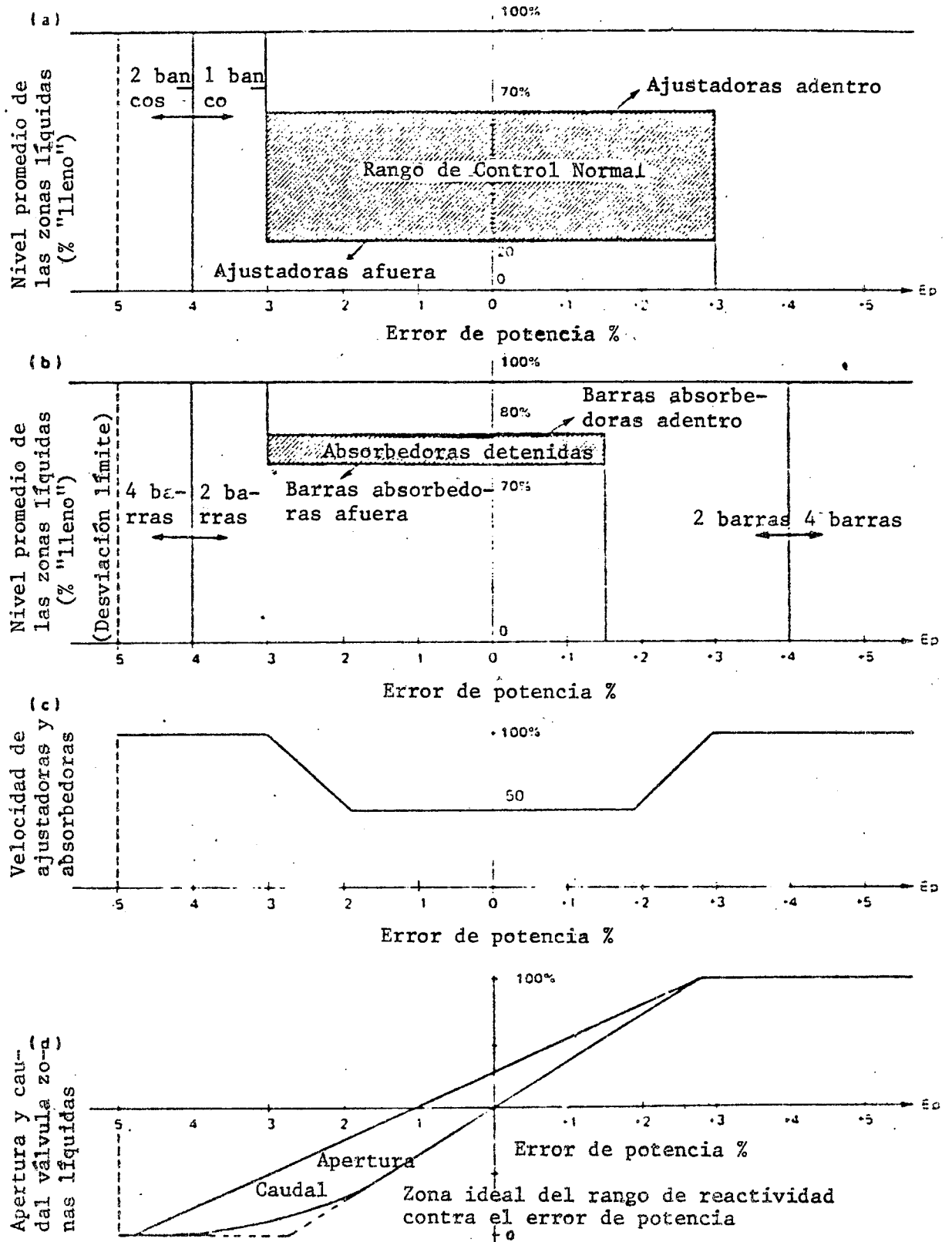


Figura 30 - Diagrama de control de los límites de mecanismos de reactividad.

SISTEMAS AUXILIARES

Entre los principales Sistemas Auxiliares se puede citar:

Sistema de detección de bloqueo del canal

Este sistema puede ser introducido en el primario durante un recambio de elementos combustibles o durante el mantenimiento, con el reactor fuera de servicio.

Se necesita, para conocer y evitar un secado del canal con las consecuencias en el elemento combustible (posible fusión del mismo).

El proceso de detección se basa en la medición de ΔP entre los alimentadores de entrada y salida, cuando se tienen las dos máquinas de carga conectadas y los tapones sacados. Esta medición entra a la computadora durante todo el proceso de cambio de elementos combustibles.

Medida de temperatura en los canales

Su función es alertar al operador de un posible bloqueo de canal durante el arranque. El detector está situado en cada uno de los alimentadores de salida, hay 380 "loops" idénticos. Los detectores son resistencias de platino y durante el arranque del reactor chequea las temperaturas de todos los canales cada 4 segundos.

Debido a que cuando se llega a la condición de agua en ebullición la temperatura se mantiene constante, este sistema es útil hasta el 80% de potencia, luego debe ser desconectado.

Sistema analizador de gases

Los sistemas que contienen líquidos que varían su nivel, necesitan llenar los espacios dejados por el líquido en sus cambios de nivel con un gas que sirva como colchón y que permita el movimiento del líquido. Normalmente se utiliza un gas inerte: el helio.

Estos líquidos, debido a la radiólisis, pueden descomponerse en gases que en el caso del Hidrógeno Deuterio puede llegar a producir mezcla explosiva.

Debido a esto, en el sistema de gases hay recambiadores que aceleran la recombinación de Hidrógeno con el Oxígeno. Si las mediciones en el cromatógrafo de gases (sistema que se encuentra

en línea y cuyas mediciones llegan a la computadora) indican que se acerca a valores peligrosos, es necesario purgar el sistema y el operador se entera por alarmas que llegan a la Sala de Control.

Medidor de actividad general en el primario

El sistema primario es monitoreado continuamente para controlar la existencia de productos de fisión en el circuito primario.

Con esto conseguimos detectar la presencia de un elemento fallado y controlar la actividad del I-131.

Es un sistema "on-line" que continuamente monitorea el sistema detectando presencia de Kr-88, I-131, Xe-133, Xe-135 y Actividad γ .

El detector es de Germanio puro montado en un botellón refrigerado con N₂ líquido.

Cuando hay señal de actividad el operador debe investigar de que "loop" proviene. Para detectar en cual de ellos está el elemento fallado tiene que elegir uno de los "loop" y tomar muestra sólo de ese.

Sistema de localización de elementos combustibles fallados

Una vez que se ha detectado que hay un elemento fallado, para localizar en que canal se encuentra se utiliza este sistema, basado en los neutrones retardados de los isótopos I-137 y Br-87 y con detectores de Bicloruro de Boro, para lo cual existe una conexión a cada canal y la reacción que tiene lugar es:



y el pulso es generado por la ionización producida por la partícula α .

ARRANQUE DE LA PLANTA

Asumimos que todos los sistemas están disponibles y en condiciones de entrar en servicio cuando les sea requerido. El sistema primario está frío y despresurizado y con suficiente cantidad de D_2O en el "Storage Tank". El sistema de refrigeración de parada deberá estar refrigerando el núcleo, manteniendo una temperatura de $54^{\circ}C$.

En el supuesto de que el arranque sea después de una parada prolongada, el presurizador estará frío y despresurizado por lo que debido a que su "rate" de calentamiento es menor que el del reactor, se deberá, como primera medida, activar los calefactores del presurizador. Si la parada no demandó tiempos prolongados y además no fue necesario realizar mantenimiento del presurizador, es posible mantener a éste a temperatura y presión de régimen previa excitación del sistema primario.

Con el control de la presión del primario en Modo Sólido, se arrancan las dos bombas de alimentación (feed pumps), con el objeto de llenar, ventear y presurizar el sistema primario mediante la operación de las válvulas de alimentación y retorno (feed and bleed).

A continuación se arrancan las bombas principales del primario parándose las bombas de refrigeración de parada. El sistema de refrigeración de parada será aislado del sistema primario.

Luego de arrancadas las bombas principales del primario se iniciará el calentamiento que puede ser ayudado mediante el arranque del reactor a baja potencia procurando no superar el "rate" de calentamiento de diseño ($2,8^{\circ}C/min.$).

Luego se empieza a aumentar la presión del generador de vapor hasta el valor de trabajo. De este modo irá aumentando gradualmente la temperatura del primario a la velocidad especificada.

Después que la presión en los generadores de vapor llega a 20 Kg/cm^2 , el operador podrá iniciar el arranque de turbina.

Cuando la temperatura del sistema primario se aproxime o alcance la de régimen se procederá a conectar el mismo con el presurizador pasando la regulación de presión a modo normal.

Para pasar la regulación de presión a modo "Normal", sólo es necesario igualar la presión del sistema primario a la del pre-

surizador. El riesgo que se corre al trabajar en esta forma es que ante cualquier variación de nivel en el presurizador se puede llegar a introducir agua fría en el mismo.

Cuando la turbina se encuentra a la velocidad de funcionamiento, el operador podrá sincronizarla a la red procediendo a tomar automáticamente una potencia de 5%. A continuación el operador podrá tomar carga como el servicio lo requiera respetando un máximo "rate" de 0.1% de potencia. El reactor subirá potencia siguiendo a la turbina y manteniendo constante en 46 Kg/cm^2 la presión en los generadores de vapor.