

08.78.07

REGULACION

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº	AÑO
1	1978

DE

LA

CENTRAL

NUCLEAR

ATUCHA

Por
Ing. HORACIO HUBER

*Comisión Nacional
de Energía Atómica*

Introducción

La Central Nuclear cuenta con diversos sistemas que regulan las variables que determinan la potencia del bloque, asegurando que las mismas se mantengan dentro de intervalos de variación admisibles, aún en casos de perturbaciones, sin alcanzar los límites que inician acciones de protección.

Dentro de los sistemas de regulación de la planta distinguiremos:

a) Sistemas que sirven para regular la potencia del reactor y del generador.

b) Sistemas de regulación conexos.

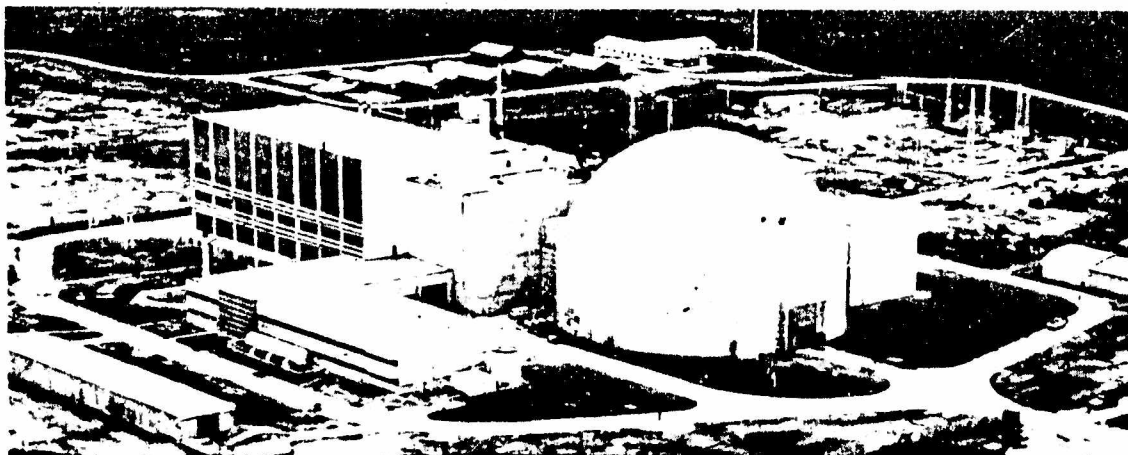
Con el fin de tratar los sistemas que regulan la potencia del reactor, se comenzará por dar una descripción general del reactor y de los circuitos más importantes de la planta. A continuación se enumerarán los parámetros que influyen sobre el comportamiento del reactor. Luego se describirá en qué forma se regula la potencia del reactor y la presión de vapor por el reactor y las formas posibles de seguimiento del valor de consigna de la potencia del bloque.

Finalmente se mostrará algunos resultados obtenidos durante los ensayos que actualmente se realizan, destacando la influencia que las variaciones de carga tienen sobre el reactor.

Tendremos seguidamente una exposición sobre la regulación de la potencia del generador y otra sobre regulación de la tensión generada.

1.- Descripción general del reactor y sistemas conexos

La Central Nuclear dispone para generar la energía térmica, de un reactor de agua pesada a presión, con combustible uranio natural y agua pesada como moderador. La fisión nuclear que se produce en el combustible libera una potencia de 1100 MW térmicos a plena carga; la circulación de 20.000 ton/hora de agua pesada, usada como refrigerante, a lo largo de los elementos combustibles permite extraer la potencia generada. La zona donde se dispone el combustible nuclear es



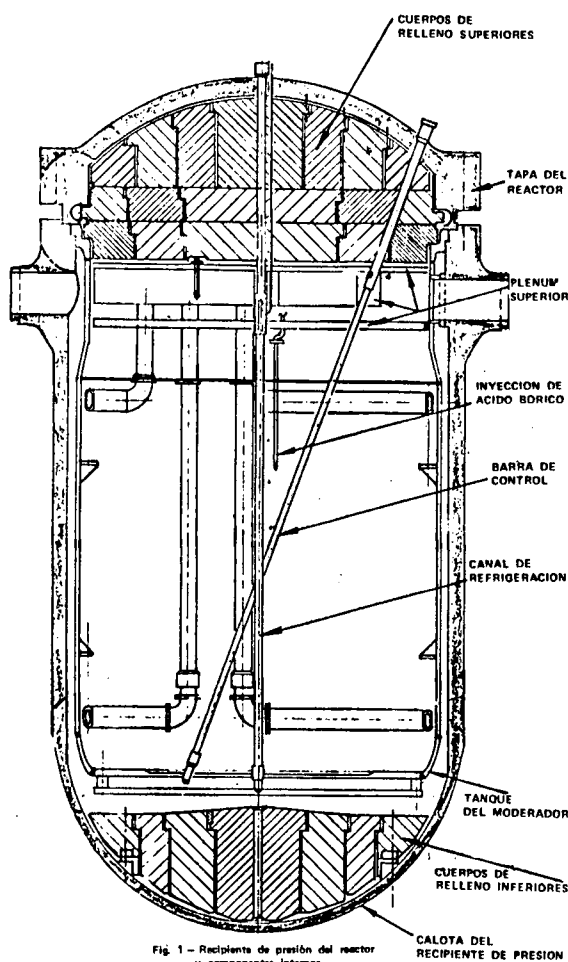


Fig. 1 - Recipiente de presión del reactor y componentes internos

el llamado núcleo del reactor. El combustible está constituido por óxido de uranio contenido dentro de tubos de zircaloy de aproximadamente 11 mm de diámetro. Un manojo de 36 tubos constituye un elemento combustible cuya parte activa tiene una longitud de 530 cm. La cantidad total de uranio necesario para producir la potencia térmica de diseño es de 38.6 toneladas que se distribuye en 253 elementos combustibles, cada uno de ellos dentro de un conducto o canal de refrigeración por donde circula el refrigerante. El conjunto de los 253 canales dispuestos en forma triangular, con un espacio de 27,2 cm entre centros, determina un diámetro del núcleo de 454 cm.

Todo el núcleo se encuentra dentro del llamado tanque del moderador y éste a su vez dentro del recipiente de presión. Otras piezas colocadas dentro del mismo permite guiar la corriente del refrigerante a lo largo de los canales de refrigeración (figura 1).

Para transferir el calor del reactor hacia el circuito de agua-vapor se dispone de dos circuitos de refrigeración, compuestos cada uno por un generador de vapor, una bomba de circulación y las tuberías correspondientes. En los generadores de vapor el refrigerante entrega el calor al agua de alimentación que se encuentra por fuera de

los tubos, generando el vapor necesario para la turbina. El vapor producido es saturado a una presión de 44 ata., 255° C y la producción a plena potencia es de 1737 t/h. (figura 2).

En el circuito primario la presión se mantiene a 115 atmósferas por medio del sistema de presurización, el que también tiene por misión absorber las variaciones de volumen del refrigerante durante las variaciones de carga. El recipiente de presión constituye así con los dos circuitos de refrigeración y el sistema presurizador un conjunto perfectamente estanco, a presión, en el que no se permite la producción neta de vapor. Esta construcción asegura que el refrigerante principal que gradualmente va tornándose muy radioactivo (por activación de impurezas o productos de corrosión o por la transformación del deuterio en tritio), queda perfectamente confinado.

El vapor saturado producido en los generadores de vapor es conducido por dos tuberías hacia la turbina y luego al condensador; completando el ciclo, el condensado vuelve a ser enviado a los generadores de vapor previo paso por las etapas de precalentamiento, todo esto como en una instalación convencional. Existe un segundo circuito de refrigeración del reactor que debe encargarse de eliminar el calor producido en el moderador. El moderador es el agua pesada dispuesta entre los canales de refrigeración que contienen los elementos combustibles. La función del moderador es reducir la energía de los neutrones producidos en la fisión de los núcleos de uranio. Estos neutrones son desprendidos con energías muy elevadas; solamente si son frenados convenientemente llegan a frenarse hasta energías del orden de la energía térmica de agitación de las moléculas del medio y pueden producir así nuevas fisiones, posibilitando el funcionamiento de la reacción en cadena.

El circuito del moderador es también doble y está compuesto por una bomba de circulación, un enfriador, tuberías y válvulas. En funcionamiento normal y a plena potencia se mantiene el moderador a menor temperatura que el refrigerante. Esto posibilita una mayor disponibilidad de neutrones para mantener la reacción nuclear, lo que finalmente se traduce en un mejor aprovechamiento del combustible.

El calor extraído por el moderador del núcleo del reactor se emplea en precalentar el agua de alimentación, por medio del enfriador del moderador (figura 2).

Los elementos combustibles están prolongados por un cuerpo macizo de acero y poseen en el extremo superior un tapón para efectuar el cierre hermético del canal. Los elementos combustibles consumidos son extraídos del reactor por la llamada máquina de carga que se puede desplazar colgada de un puente grúa sobre la tapa del reactor. Efectuando el acople entre máquina de carga y reactor, ésta procede a abrir el cierre

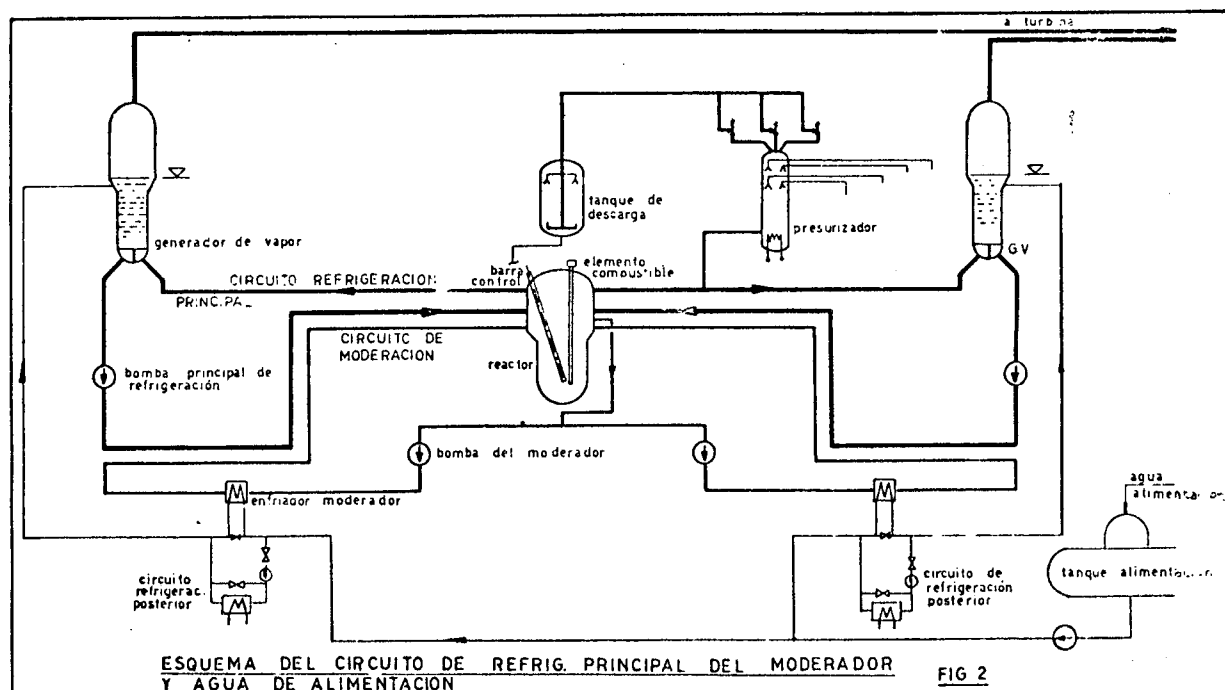


FIG 2

extraer el elemento gastado y colocar el nuevo, cerrando nuevamente el canal.

La potencia térmica del reactor es proporcional a la cantidad de combustible fisionable y a la densidad de neutrones en el núcleo. Para controlar esta potencia se modifica la cantidad de neutrones presentes empleando elementos absorbentes, llamados barras de control. La absorción de las barras depende del material con que están construidas y de su inserción dentro del núcleo. El reactor posee en total 29 barras que atraviesan el núcleo en forma inclinada (figura 1) con ángulos variables entre 15° y 22° . De estas, 24 son fuertemente absorbentes por estar construidas de Hafnio, material que posee alta probabilidad de captura de neutrones; las 5 restantes son de acero inoxidable, siendo 2 algo más cortas, es decir no se introducen totalmente en el núcleo.

No todas las barras se emplean para regular la potencia del reactor. En servicio normal sólo 3 de las de Hafnio (llamadas negras), 3 de acero (llamadas grises) y 2 cortas (llamadas parciales) se introducen dentro del núcleo para gobernar el nivel de potencia. El resto permanecen en el límite superior y constituyen la reserva necesaria para detener la marcha del reactor rápidamente y con seguridad en caso de emergencia.

2.- Parámetros físicos que influyen sobre el comportamiento del reactor

Si consideramos el reactor como una caja negra, cuya variable de salida es la potencia P megavatios térmicos, la variable de entrada es la llamada reactividad del reactor.

El comportamiento del reactor con respecto a la reactividad es de tipo proporcional integral; es decir que a una excitación de reactividad cons-

tante la potencia crece continuamente. Para mantener el reactor a potencia constante, la reactividad debe ser cero.

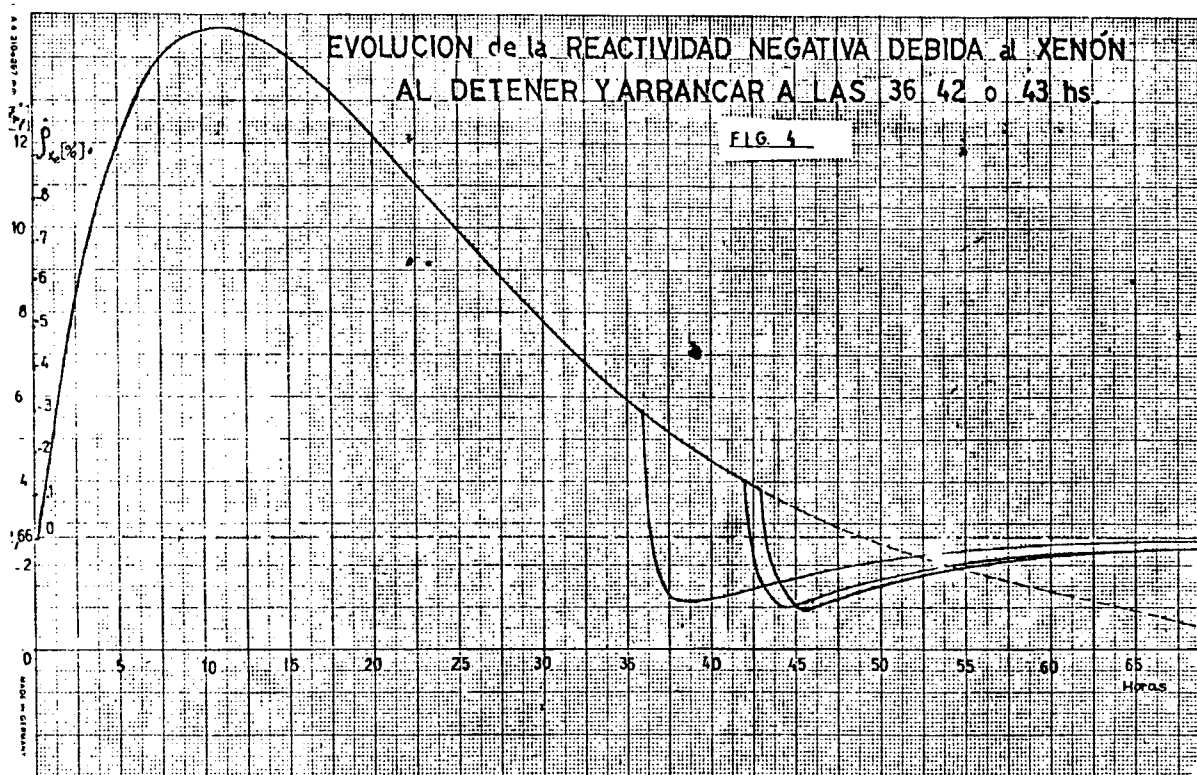
La reactividad es una magnitud que depende de características físicas del reactor, fundamentalmente de la producción y de la absorción de los neutrones, todo parámetro que actúe influenciando la producción o la absorción de los neutrones, modifica la reactividad y por ello la potencia.

Tal como se dijo, para regular la potencia del reactor como en general de cualquier otro reactor térmico, se emplean barras absorbentes de neutrones.

En primera aproximación podemos decir que la variación de reactividad es proporcional al desplazamiento de las barras de control. La reactividad puede ser positiva, negativa o nula. En el primer caso la potencia crece, en el segundo decrece continuamente hasta anularse y en el último se mantiene constante.

La reactividad se ve influenciada también por las temperaturas del combustible, del refrigerante y del moderador, a través de los llamados coeficientes de reactividad. Estos coeficientes dentro de márgenes de variación limitados, pueden considerarse constantes. Cuando el reactor es nuevo, o sea en el primer año de su servicio el signo de estos coeficientes es negativo para combustible y moderador y positivo para el refrigerante. Luego de varios años de operación, el coeficiente del combustible tiende a hacerse cero.

Otro efecto que influye la reactividad es el "quemado" del combustible. La desaparición del uranio 235 por fisión va reduciendo paulatinamente la cantidad de materia fisionable presente en el núcleo y con ello la reactividad; en último término los elementos de control que compensan esta reducción de reactividad para mantener la operación del reactor, no pueden ser extraídos a



mayor altura y se debe cambiar un elemento combustible. El consumo de Uranio de 235 es aproximadamente 1 gramo por megavatio-día térmico. Como cada elemento combustible posee 1 Kg. de Uranio 235, a plena potencia, se debe reemplazar aproximadamente un elemento por día.

Esta variación puede clasificarse como a largo término.

Otro efecto muy importante sobre la reactividad es el de los venenos. Así se llama a aquellos productos de la fisión del uranio que capturan fuertemente neutrones. Dos de ellos son dignos de mención: el Samario y el Xenón, pero por su influencia sobre el comportamiento de la planta es a este último al que nos referiremos. El Xenón se forma por dos vías diferentes: directamente como producto de fisión y por desintegración de otro producto de fisión, el Iodo 135. Al poner en marcha el reactor la concentración va en aumento hasta alcanzar un valor de equilibrio, resultado del balance entre la cantidad formada y la que se elimina por decaimiento radioactivo y por transformación al absorberse un neutrón. El Xenón formado, influye reduciendo la reactividad del reactor, el que debe ser compensado por los elementos de control. Este equilibrio se alcanza luego de unas 40 horas de operación continuada. En caso de detenerse el reactor, el Xenón deja de consumirse, pero se sigue formando a partir del Iodo acumulado. Por ello es que la concentración crece hasta valores de 4 a 5 veces el valor de la concentración de equilibrio alcanzando un máximo a las 10 horas y decreciendo luego hasta prácticamente cero. La ley de crecimiento y decreci-

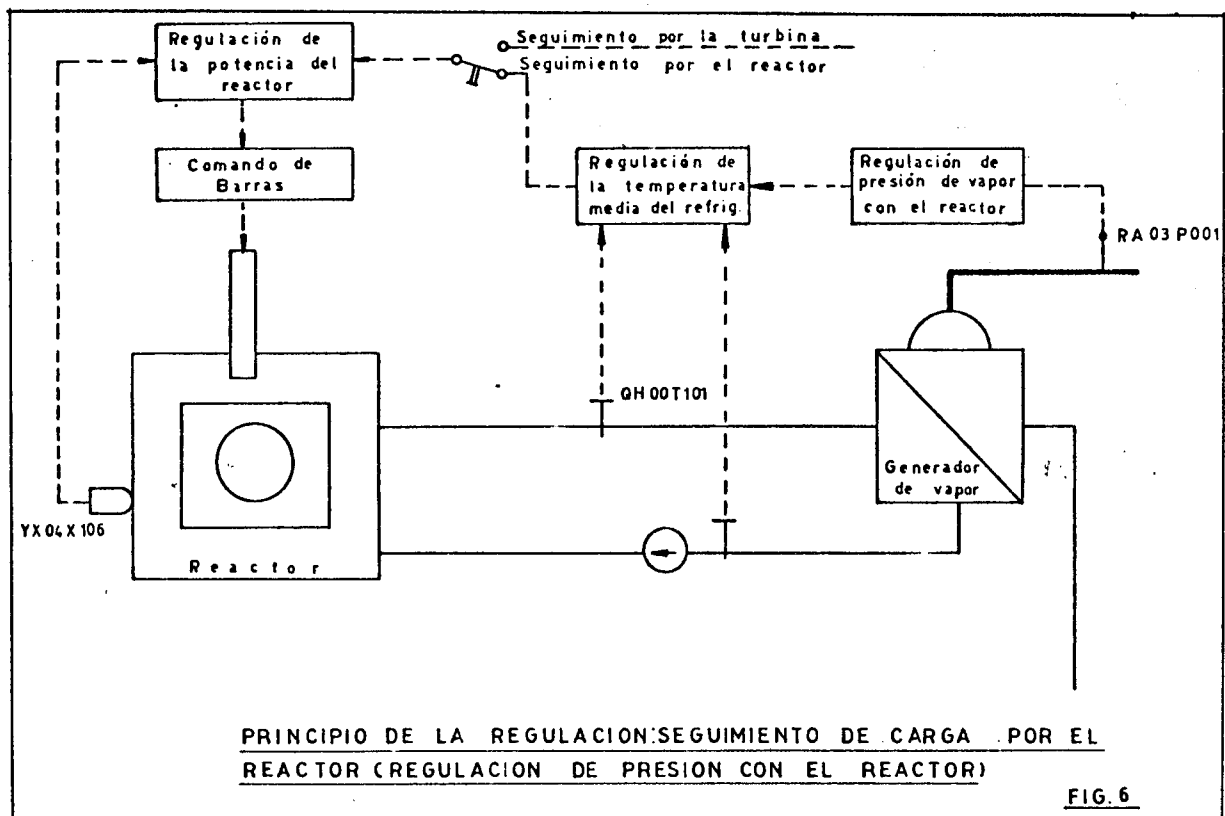
miento está dada por leyes naturales y no puede actuarse sobre ellas. En la Central Nuclear, en caso de cortar el reactor, el envenenamiento subsiguiente trae aparejado una reducción de reactividad tan considerable que imposibilita el arranque de la Central, durante casi dos días, a menos que se consiga arrancarla en los primeros 30 minutos posteriores al corte (ver Figura 4).

Similarmente, al bajar la carga del reactor, se produce una disminución de la reactividad por aumento de la concentración de Xenón. El reactor está diseñado para compensar con reactividad, mediante la acción de los elementos de control, el crecimiento del Xenón que se produce cuando la potencia baja no más allá del 60% del valor máximo.

Adicionalmente y con el fin de compensar reactividad positiva se utiliza a veces el agregado de un veneno químicamente disuelto en el moderador; en las Centrales Nucleares se emplea el ácido bórico, pues el boro es un gran absorbedor de neutrones.

En la Central Atucha, la variación de la temperatura del moderador es utilizada como elemento adicional del sistema de regulación.

La regulación de la temperatura se efectúa modificando el caudal de agua de alimentación que circula por el enfriador del moderador. En condiciones nominales, la potencia a disipar del moderador es de 105 megavatios; la temperatura media del moderador 170°C. En estas condiciones el agua de alimentación se calienta de 120°C a 170°C a su paso por el enfriador del moderador.



3. - Regulación de la potencia

Pueden distinguirse dos formas de servicio del bloque:

- 1) Seguimiento de carga por el reactor.
- 2) Seguimiento de carga por la turbina.

En el caso 1 el valor de consigna se da al regulador de potencia del generador. La potencia del reactor se ajusta en consecuencia a partir de las variaciones de las variables (Figura 6).

En el caso 2 el valor de consigna se da directamente a la regulación de potencia del reactor. El reactor produce la potencia requerida. La turbina consume el vapor que pone a su disposición el generador de vapor (Figura 7).

El programa de operación de la planta entre carga mínima y plena carga, prescribe que siempre la presión de vapor vivo se debe mantener constante.

Las temperaturas del circuito primario, varían en consecuencia, en forma proporcional a la potencia del reactor (Figura 8). En la forma de servicio 1, la variación de las temperaturas está vigilada por el regulador de temperatura media del primario; en la forma de servicio 2 la temperatura está determinada por la presión de vapor, por ello no es vigilada.

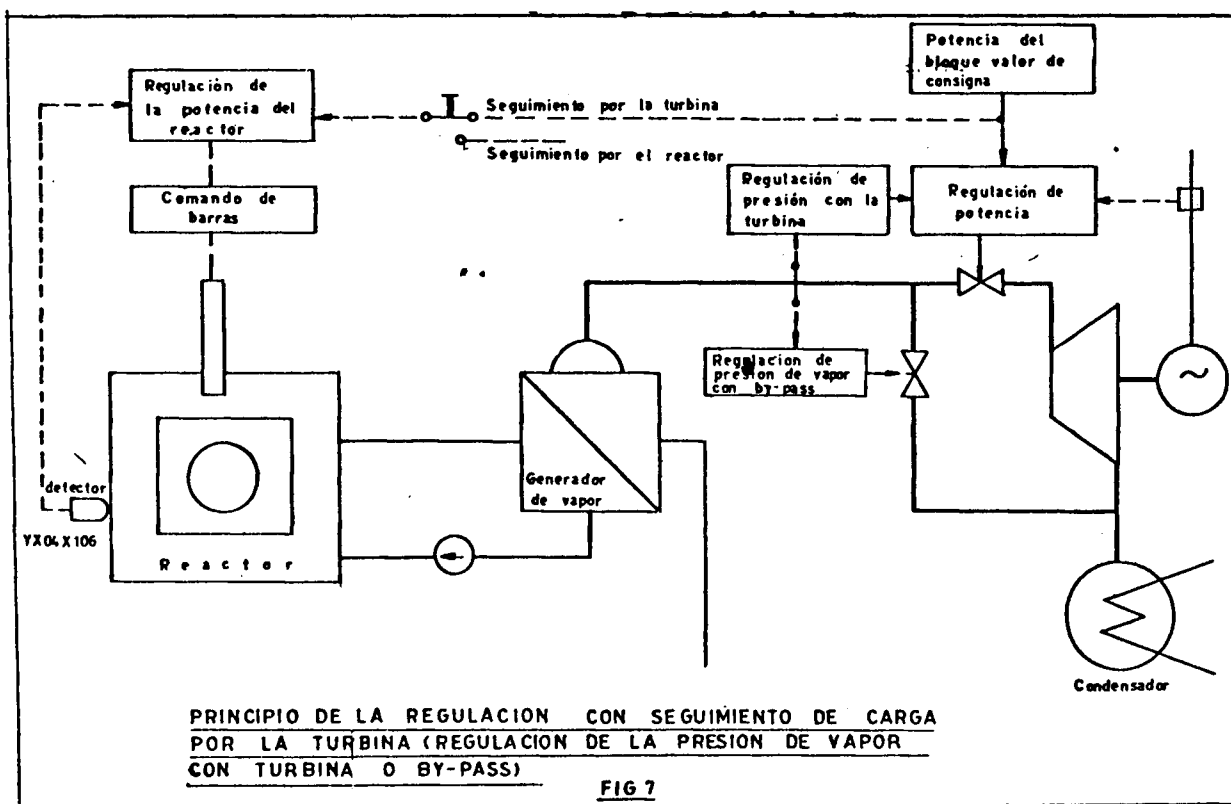
En cualquiera de ambos tipos de servicio, el valor de la densidad de neutrones en el reactor, es la variable que determina la potencia del reactor.

El reactor responde a su sistema de regulación de potencia en forma relativamente rápida. La medición de su potencia global se efectúa por

medio de cámaras de ionización ubicadas en las proximidades del recipiente de presión. Este valor representa la potencia térmica y se compara con el valor de referencia dado al sistema de regulación. La señal de error es convenientemente elaborada y actúa sobre el banco de barras grises con una zona muerta de 1%; en caso de alcanzarse un error de 1,5% también actúan las barras de regulación negras. Las barras de control son los órganos de ajuste del sistema que actúan modificando la reactividad. Este lazo de control es perfectamente estable y responde rápidamente a los requerimientos de cambio de potencia hasta velocidades de variación del valor de 5%/minuto. Variaciones de consigna de tipo escalón de hasta $\pm 10\%$ son admitidas.

3.1 - Sistema de regulación de la potencia del reactor

La potencia del reactor es controlada variando la reactividad, lo que se realiza desplazando las barras de regulación dentro del núcleo. La efectividad de las barras medida en unidad de reactividad por cm² depende de su introducción en el núcleo. Cuando las barras están muy introducidas (más allá de 80%) muy extraídas (menos de 20%), su efectividad disminuye considerablemente. A fin de mantener la eficacia de las barras, el sistema de regulación da una señal para modificar la temperatura del moderador en el sentido conveniente. La variación producida reajusta las barras a una nueva posición de eficacia adecuada.



El accionamiento de las barras de control es de tipo electromagnético; el desplazamiento se realiza por pasos de 1,2 cm de longitud. Cada paso realizado, representa una variación tipo escalón de la reactividad. Para evitar un continuo movimiento de las barras hacia arriba o hacia abajo alrededor del punto de equilibrio, la señal del regulador actuante sobre ellas lo hace a través de una banda muerta de $\pm 1\%$. El regulador que actúa sobre las barras de control es de tipo PD, obteniéndose así un avance de fase estabilizante del lazo de regulación propio del reactor. Este lazo de regulación del reactor podría obviarse de no ser necesario compensar las perturbaciones de reactividad ocasionadas por el cambio de elementos combustibles; los aumentos o disminuciones de reactividad producidos en consecuencia, son compensados rápidamente por este lazo moviendo las barras, sin variación apreciable de la potencia.

3.2 – Seguimiento de carga por el reactor

Ya se dijo que en este tipo de servicio, el reactor debe atender las demandas de carga de la turbina, sin que se produzcan variaciones importantes de la presión de vapor vivo. Para ello se dispone un primer regulador de presión cuya señal de entrada es la desviación entre el valor de consigna constante y el valor medido. El regulador es de tipo PI; a la salida se obtiene una señal de consigna para el regulador de temperatura del refrigerante primario. El valor medido de temperatura del refrigerante es el valor medio en-

tre las temperaturas de entrada y salida del reactor. La desviación es la señal de entrada para otro regulador, cuya salida es finalmente el valor de consigna para el lazo de regulación de potencia del reactor.

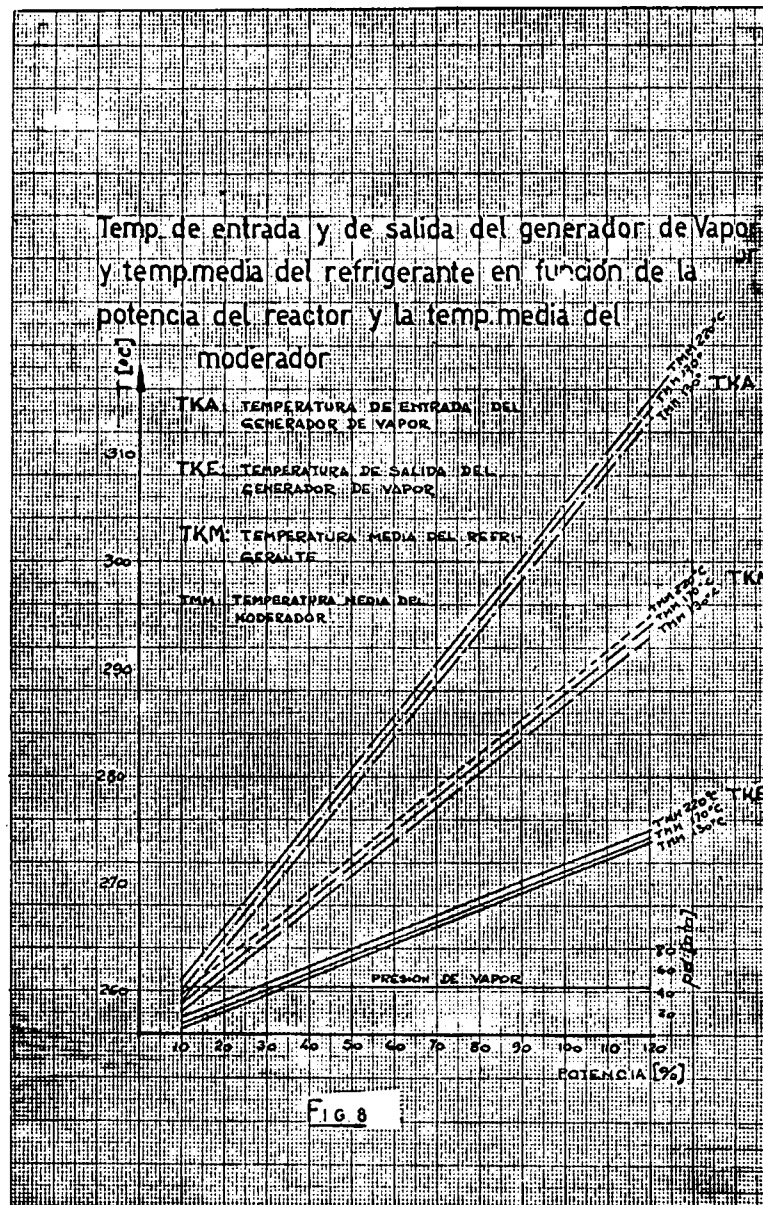
Con este tipo de regulación en servicio, la capacidad calorífica del sistema permite hacer frente a variaciones bruscas de carga de la turbina sin grandes variaciones de la presión de vapor; el sistema de regulación ajusta la potencia del reactor al nuevo valor, a través de las variaciones de presión y temperatura originales.

3.3 – Seguimiento de carga por la turbina

En este tipo de servicio la presión de vapor vivo se mantiene en un valor constante actuando directamente el regulador de presión sobre el regulador de apertura de la válvula reguladora de admisión de vapor a la turbina. El valor de consigna de la potencia a generar es suministrado directamente al regulador de la potencia del reactor.

Comparada esta regulación con el tipo anterior presenta una ventaja, como es que no se producen muchos pasos de barra para regular el reactor.

En contraposición, al regular directamente la presión de vapor antes de la turbina ajustando su carga con la válvula reguladora, no se aprovecha la capacidad calorífica para hacer frente a variaciones bruscas de carga.



4. - Regulación de la presión máxima y mínima de vapor

En todo caso de perturbación externa que lleve a desconectar la carga o de perturbación en la turbina que origine el cierre de las válvulas de cierre rápido, la turbina posee sistemas de protección y de regulación que o la mantienen en servicio en condiciones e aseguran el suministro de energía para consumo propio o bien la detienen sin riesgo para ella. Estas bruscas perturbaciones

en el consumo térmico dan lugar a variaciones de la presión de vapor que deben ser limitadas a un valor máximo. La Central Nuclear posee una instalación de desvío de vapor al condensador, con el fin fundamental de limitar la excursión de presión y de evitar la desconexión del reactor. Al evitarse el corte del reactor y mantener en espera la instalación para tomar nuevamente el servicio, gracias al desvío de vapor al condensador, la planta está disponible para tomar carga en breve lapso de tiempo.