EL CIRCUITO DE REFRIGERACION DE UN REACTOR NUCLEAR

Por ANTONIO OSUNA MARTINEZ,
Ingeniero de Caminos.

El autor, afecto a la Sociedad Tecnatom y graduado en el Imperial College de Londres, expone en este artículo algunos aspectos de los circuitos hidráulicos de las Centrales nucleares.

1. Introducción.

El circuito de refrigeración de un reactor nuclear, o circuito primario, tiene por misión extraer el calor producido en el núcleo del reactor, permitiendo utilizarlo prácticamente. Además, este circuito mantiene yendo, mediante el refrigerante, el calor producido por la fisión nuclear (fig. 1.ª).

Si M es el gasto del refrigerante en Kg./seg., W la potencia térmica del reactor en Kcal./seg., c el calor específico a presión constante en $\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$, y T la

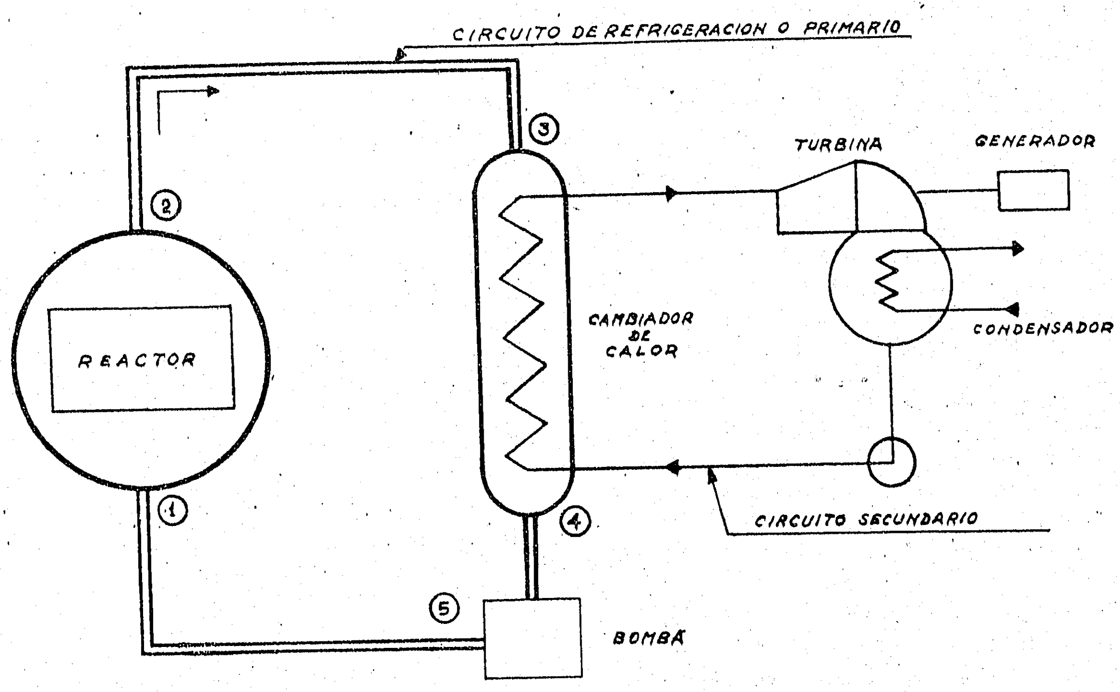

Fig. 1.ª — Esquema del circuito de refrigeración de un reactor nuclear.

los elementos combustibles y la propia estructura del núcleo y reactor a temperaturas inferiores a las máximas para las que han sido proyectados.

temperatura del refrigerante en grados centígrados, el balance térmico a través del núcleo del reactor será:

$$W = M\,c\,(T_2 - T_1) \qquad [1]$$

Así, pues, el refrigerante eleva su temperatura de T_1 a T_2 a su paso por el reactor, absorbiendo por unidad de tiempo una cantidad de calor igual a la producida en el reactor.

2. Funcionamiento a plena carga.

Fijada la potencia térmica del reactor, se consigue una distribución permanente de temperaturas extra-

Recíprocamente, al pasar el refrigerante a través del cambiador de calor, cede al circuito secundario por unidad de tiempo una cierta cantidad de calor, ligeramente superior — como pronto se verá — a la tomada del reactor.

Si W' es la cantidad de calor cedida al circuito secundario por unidad de tiempo, se tendrá:

$$W' = Mc(T_3 - T_4) \quad [II]$$

Este calor cedido al circuito secundario se utiliza en vaporizar el agua de alimentación de la turbina.

Parte del calor de este vapor se emplea en trabajo útil — recogido en el generador —, mediante la

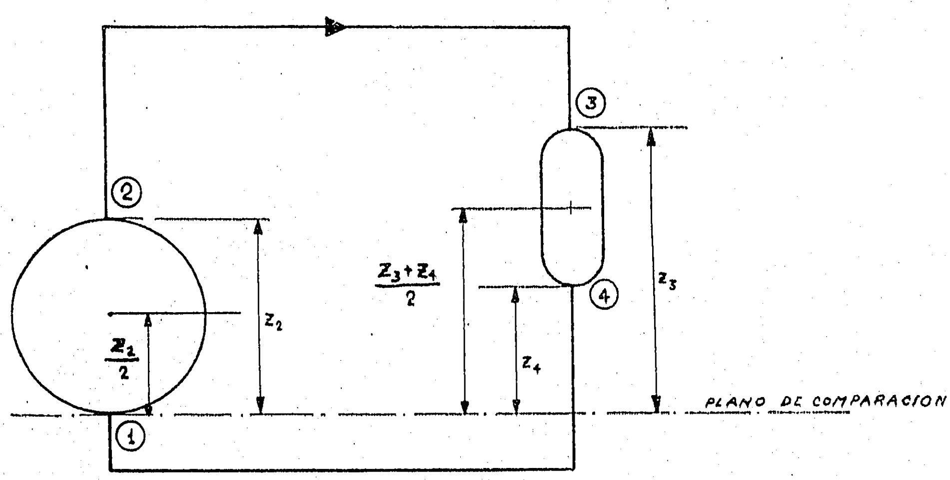

Fig. 2.ª — Circulación por convección natural.

expansión en la turbina, y parte se pierde en el condensador, calentando el agua de refrigeración, para satisfacer al inexorable Segundo Principio de la Termodinámica.

Los balances térmicos I y II están basados en la circulación de un caudal másico de M Kg./seg. en el circuito primario, y como a lo largo del movimiento se producen pérdidas de presiones por fricción, la circulación ha de ser forzada por una bomba.

Presión de la bomba: $\Delta p_b = p_5 - p_4$.

La potencia de la bomba será:

$$\Delta W = M \frac{\Delta p_b}{\gamma} \frac{\text{Kgm}}{\text{seg}}, \quad [III]$$

en que γ es el peso específico del refrigerante en $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ y Δp_b el incremento de presión en Kg./m.^{2}.

Así, pues, la presión p_4 pasa a p_5 gracias a la energía ΔW que suministra la bomba por unidad de tiempo. Ahora bien, esta presión p_5 disminuye por fricción a lo largo del circuito, de forma que al llegar al punto 4 queda reducida a p_4. Por tanto, la potencia de bombeo ΔW se transforma íntegramente en calor a lo largo del circuito.

Dicha potencia en Kcal./seg. es:

$$(\Delta W) = \frac{1}{427} M \frac{\Delta p_b}{\gamma} \text{ Kcal/seg.} \quad [IV]$$

Para que el refrigerante reciba la potencia (ΔW) es preciso suministrar a la bomba $\frac{\Delta W}{r_1}$, siendo r_1 el rendimiento interno de la bomba, y toda esta energía se transforma en calor.

Así, pues, la cantidad de calor cedida en el cambiador al circuito secundario será (*):

$$W' = W + \frac{(\Delta W)}{r_1}. \quad [V]$$

Discusión.

La potencia térmica total cedida al circuito secundario se compone de la potencia nuclear W más la potencia de las bombas $\frac{(\Delta W)}{r_1}$.

(*) Suponiendo que en (II) no se incluya el aumento de temperatura debido a la fricción en el reactor.

Si η es el rendimiento del sistema turbogenerador, la potencia eléctrica bruta será:

$$W_e = \eta \left(W + \frac{(\Delta W)}{r_1} \right), \qquad [VI]$$

y la potencia eléctrica neta:

$$W_e \text{ net.} = \eta \left(W + \frac{(\Delta W)}{r_1} \right) - \frac{(\Delta W)}{r_1 r'_1} - (\Delta W)_a, \qquad [VII]$$

siendo $\frac{(\Delta W)}{r_1 r'_1}$ la potencia eléctrica empleada en la bomba; r'_1, el rendimiento del motor eléctrico, y $(\Delta W)_a$, la potencia eléctrica empleada en los servicios auxiliares de turbina y reactor.

Así, pues, de la potencia eléctrica $\frac{(\Delta W)}{r_1 r'_1}$ empleada en la bomba del circuito primario sólo se pierde la cantidad:

$$\frac{(\Delta W)}{r_1 r'_1} (1 - \eta r'_1). \qquad [VIII]$$

Como el rendimiento η es del orden del 28 por 100 y el rendimiento eléctrico r'_1 del motor es próximo a la unidad, se pierde aproximadamente el 72 por 100 de la potencia de bombeo.

Según la ecuación [III], la potencia de bombeo es proporcional al producto del gasto M por la pérdida de presión Δp_b, y como la pérdida de presión es proporcional al cuadrado del gasto (movimiento turbulento), la potencia de bombeo varía con el cubo del gasto.

Para extraer una determinada cantidad de energía del reactor, la ecuación [I] indica que el gasto M es inversamente proporcional al salto térmico $T_1 - T_2$ que experimenta el refrigerante. Así, pues, debe tenderse a utilizar el mayor salto térmico posible para disminuir el gasto y, por consiguiente, la potencia de bombeo.

Sin embargo, la magnitud del salto térmico tiene las siguientes limitaciones:

a) Existe una temperatura máxima admisible en los elementos combustibles.

b) La temperatura T_1 a la entrada del reactor es ligeramente superior a la temperatura T_4 a la salida del cambiador y ésta ha de ser superior a la temperatura de alimentación del circuito secundario.

c) La transmisión de calor entre los elementos combustibles y el refrigerante ha de ser igual a la potencia térmica del reactor, y como esta transmisión aumenta con la velocidad del refrigerante, existe un valor mínimo del gasto compatible con la extracción de la potencia W y las dimensiones del reactor.

3. Funcionamiento con circulación natural.

Es de suma importancia, en el proyecto de reactores nucleares, el cálculo del calor que puede extraerse del núcleo del reactor en caso de parada de las bombas, de forma que la circulación natural impida que se fundan los elementos combustibles, dando tiempo a que la inserción de las barras de control rebaje la potencia térmica del reactor.

A lo largo del circuito la integral del trinomio de Bernoulli ha de ser igual al trabajo realizado por la

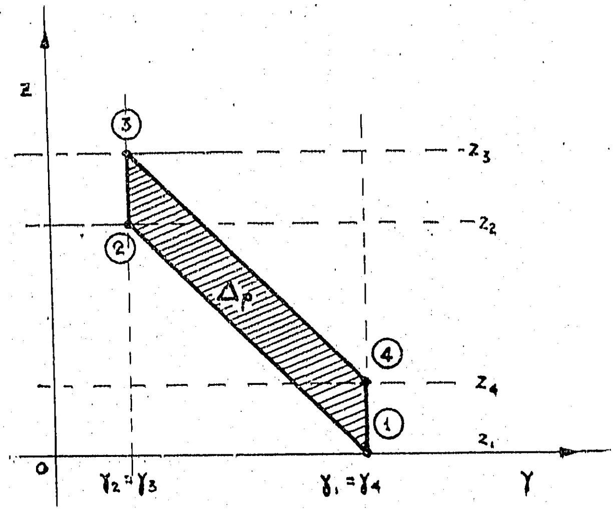

Fig. 3.ª — Diagramas pesos específicos. Cotas en la circulación natural.

fuerza de fricción, que expresaremos en dimensiones de presión Δp:

$$\oint \left(\gamma\, d z + d p + \rho\, d \cdot \frac{v^2}{2} \right) = \Delta p; \qquad [IX]$$

las velocidades debidas a la circulación natural son pequeñas, y puede prescindirse del término cinético, además $\oint d p = 0$; luego la expresión anterior se reduce a:

$$\oint \gamma\, d z = \Delta p. \qquad [X]$$

En la figura 2.ª se ha representado esquemáticamente el circuito, indicando las cotas de los puntos características; y en la figura 3.ª el diagrama (z, γ)

en que se representan los pesos específicos y las cotas de los puntos característicos. Se ha supuesto que los puntos 2 y 3 están a la misma temperatura y, por tanto, tienen igual peso específico; igualmente se ha supuesto para los puntos 1 y 4.

Como $\oint \gamma \, d z$ viene representada por el área rayada en la figura 3.ª, resulta:

$$\Delta p = \frac{(z_3 + z_4 - z_2)(\gamma_1 - \gamma_2)}{2} . \qquad [XI]$$

Admitiendo que tanto en el funcionamiento a plena carga como en el que estamos ahora estudiando de circulación natural el movimiento es turbulento, se tendrá:

$$\Delta p = \Delta p_b \frac{m^2}{M^2} , \qquad [XII]$$

siendo:

Δp_b = incremento de presión a plena carga.
M = gasto a plena carga.
Δp = incremento de presión con circulación natural.
m = gasto con circulación natural.

Así, pues, las fórmulas [XI] y [XII] permiten deducir la circulación natural m.

Discusión.

Según la ecuación [XII] la circulación natural es proporcional a la raíz cuadrada de la presión Δp, y según [XI], dicha presión es proporcional a la diferencia de cotas entre el centro de gravedad del cambiador $\frac{z_3 + z_4}{2}$ y el centro de gravedad del reactor $\frac{z_2}{2}$.

Por tanto, al proyectar el circuito ha de tenerse muy en cuenta esta diferencia de alturas.