

CRISIS DE EBULLICION: Redistribución de Caudal

D. Parkansky, A. Garcia, A. Vertullo y J. Dellepiane

1. INTRODUCCION

La potencia de los reactores refrigerados y moderados por agua está limitada, desde el punto de vista térmico, por los fenómenos ligados a la ebullición. A bajas presiones (< 10 atmósferas) y a velocidades de algunos m/seg. la crisis de ebullición es, en general, consecuencia de una brusca disminución del caudal en el canal caliente del núcleo. Este fenómeno denominado "Redistribución del caudal" se debe a la obstrucción del canal por el vapor.

En el gráfico siguiente se muestra en una curva (Fig. 1) la relación que existe entre la pérdida de presión y el caudal circulante para los casos de que el escurrimiento sea en la fase líquida, doble fase (curva en "S") y fase vapor. Estas relaciones son del tipo lineal para flujos laminares y del tipo cuadrático para flujos turbulentos en simple fase. El inicio de la ebullición con la consecuente formación de vapor, incrementa la pérdida de carga con disminución del caudal másico, ésta situación persiste hasta que todo el caudal circulante sea de fase vapor.

Asumiendo que el sistema en cuestión es el núcleo de un reactor tipo piletas; éste estará formado por placas combustibles, cuya separación forma un canal de refrigeración, por donde, usualmente el fluido circula a una cierta velocidad en sentido descendente (W_i). Estos múltiples canales paralelos estarán sometidos a diferentes niveles de potencia, de acuerdo a una distribución radial de potencia del núcleo. Tomando una distribución de potencia del tipo cosenoidal, obtendremos un canal que será el más exigido y que se le denomina "canal caliente", mientras que al resto de canales se le denomina "canales promedio".

Si llamamos $\Delta p_i (W_i)$ a la caída de presión en un canal cualquiera, i , en función de su caudal W_i ($i=1$ a n ; llamando $i=1$ al canal caliente) tendremos que el Δp impuesto por las bombas entre la entrada y salida del núcleo, que es función del caudal total,

$$W = \sum_{i=1}^n W_i$$

será (canales en paralelo) común a los n canales. Luego para la condición de equilibrio los caudales serán solución del siguiente sistema:

$$\Delta p_1 (W_1) = \Delta p_2 (W_2) = \dots \dots \dots \Delta p_n (W_n) = \Delta p_n (W) = H(W)$$

Dado que en el núcleo se conoce el caudal total (W) y la característica de la bomba $H(W)$, será posible obtener los caudales W_i cuando se conozcan las leyes $\Delta p_i (W_i)$. En la figura 2 se observa que el caudal W_1 será el correspondiente a la intersección de las curvas $\Delta p_1 (W_1)$ con $H(W)$.

Conforme se incrementa la potencia, la curva característica interna de un canal se desplaza conforme a lo señalado en la siguiente figura obteniéndose para cada potencia un caudal del canal diferente, el cual será mayor cuanto mayor sea la potencia. (Fig 3)

2. Condiciones de aparición de la redistribución

Se tendrá redistribución del caudal si, al decrecer el caudal W_1 (del canal caliente) a partir de su valor de equilibrio W_1^0 , existe una inestabilidad de funcionamiento que hace tender a W_1 a seguir decreciendo. Fenómeno divergente.

Matemáticamente, puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \Delta p_1}{\partial W_1} < \frac{\partial H}{\partial W_1} \quad \text{para } W_1 < W_1^0$$

(ver figura 4)

Cuando el número de canales es elevado, el caudal total W variará poco cuando varía W_1 , resultando como se mencionó anteriormente que $\Delta p_N(W)$ permanecerá constante, luego la condición necesaria para redistribución será:

$$\frac{\partial \Delta p_1}{\partial W_1} \leq 0 \quad \text{para } W_1 = W_1^0$$

(ver figura 5)

Esta última condición será suficiente y permitirá calcular el caudal total W por encima del cual no habrá redistribución. Las condiciones que deberá satisfacer serán:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta p_1}{\partial W_1} = 0 \\ \Delta p_1(W_1) = H(W) \end{cases}$$

(ver figura 6)

3. Metodología para la obtención del caudal y potencia de redistribución.

La secuencia de cálculos que se deben efectuar es la siguiente:

- A- Elección de una configuración del núcleo (Nº de cajas combustibles)
- B- Selección de una potencia superior a la de ebullición local (El fenómeno de la redistribución aparece a posteriori).
- C- Se obtiene por cálculo la potencia de los canales promedio y la del canal caliente.
- D- Se calcula el caudal en el canal promedio tomando el caudal total (W) y la configuración.

- E- Haciendo uso de un código de cálculo (Curvas en S) se obtiene, de los datos calculados (A + D) para el canal caliente, la curva característica interna (o curva en S) del canal caliente. Tiene la forma de una "S" invertida ($\sim$) el mínimo de la cual es la primera condición de redistribución (W_{1R}).
- F- Con el mismo código, introduciendo los parámetros (caudal y potencia) del canal promedio, se obtiene la caída de presión en el núcleo tal que:

$$H(W) = \Delta P_N(W) = \Delta P_1(W_1) = \Delta P_2(W_2) = \dots \dots \dots \Delta P_n(W_n)$$

- G- Con los datos obtenidos en E y F se pueden dar los siguientes casos:

(Fig. 7) A) $\left(\frac{\partial \Delta P_1}{\partial W_1}\right)_A > \frac{\partial H}{\partial W_1}$ operación estable, para encontrar la potencia de redistribución habrá que incrementar la potencia de cálculo.

(Fig. 8) B) $\left(\frac{\partial \Delta P_1}{\partial W_1}\right)_A = 0 ; \Delta P_1(W_1) = H(W)$ "Redistribución"
La potencia de cálculo coincide con la correspondiente a la redistribución para las condiciones presentes.

(Fig. 9) C) La potencia de cálculo será mayor que la de redistribución, habrá que reducirla hasta obtener las condiciones del caso B.

Trabajando con una misma configuración y paravarias potencias, se podrá obtener una curva de potencias vs. caudales de redistribución. Dicho trabajo se deberá efectuar para varias configuraciones.

4. Resultados obtenidos

Estudios se han efectuado al respecto para diferentes situaciones, comparando los resultados con los obtenidos en forma experimental en los laboratorios termohidráulicos de Grenoble (Loop SUPER-BOB) (FRANCIA). A continuación se dan algunos valores normalizados para el siguiente caso:

Temperatura de entrada = 40°C

Canal rectangular de espaciamiento = 0.343 cm.

Presión en la entrada = 1.8 atm.

Forma del calentamiento axial = cosenoidal

Factor de forma total = 2.5

Longitud del canal = 61.5 cm.

Configuración : 23 cajas combustibles de 15 placas (5 de control de 11 placas)

CAUDAL _{ER} (m ³ /h)	Potencia de Redistribución (Mw)	
	CODIGO CURVAS EN "S"	EXPERIMENTAL GRENOBLE
621	17	15.5
745	20	18
1242	32	27
1740	44	34

5. Conclusiones.

Los valores obtenidos experimentalmente son más conservadores que los calculados por medio del código. Dado que estos valores son base del diseño es conveniente optar por los que ofrezcan mayor seguridad. Así por ejemplo tenemos para el caso del RP-10 los siguientes valores.

Q _T	Q _{ER}	Nº CAJAS	P _{nominal}	P _{redist.}	R _{red}
1650 m ³ /h	1320 m ³ /h	23	10 Mw.	29.5 →	2.95
1100 m ³ /h	880 m ³ /h	23	7 Mw.	21.6 →	3.08
550 m ³ /h	440 m ³ /h	23	1.4 Mw.	12 →	8.57

Cumpliendo con los requisitos de seguridad en el diseño termo-hidráulico.

D. PARKANSKY
J.J. DELLEPIANE
A. GARCIA
A. VERTULLO

Parámetros característicos del reactor RA-6:

Cajas combustibles con 15 placas.

Temperatura del refrigerante a la entrada del núcleo $T_E = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Altura de la columna de agua por encima de los elementos combustibles hasta el pelo de agua. $H = 6.60\text{ cm.}$

Espesor de canal entre placas: 0.343 cm.

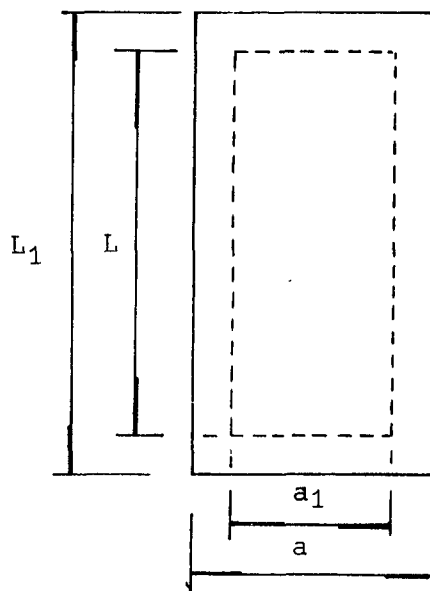
Geometría de las placas combustibles:

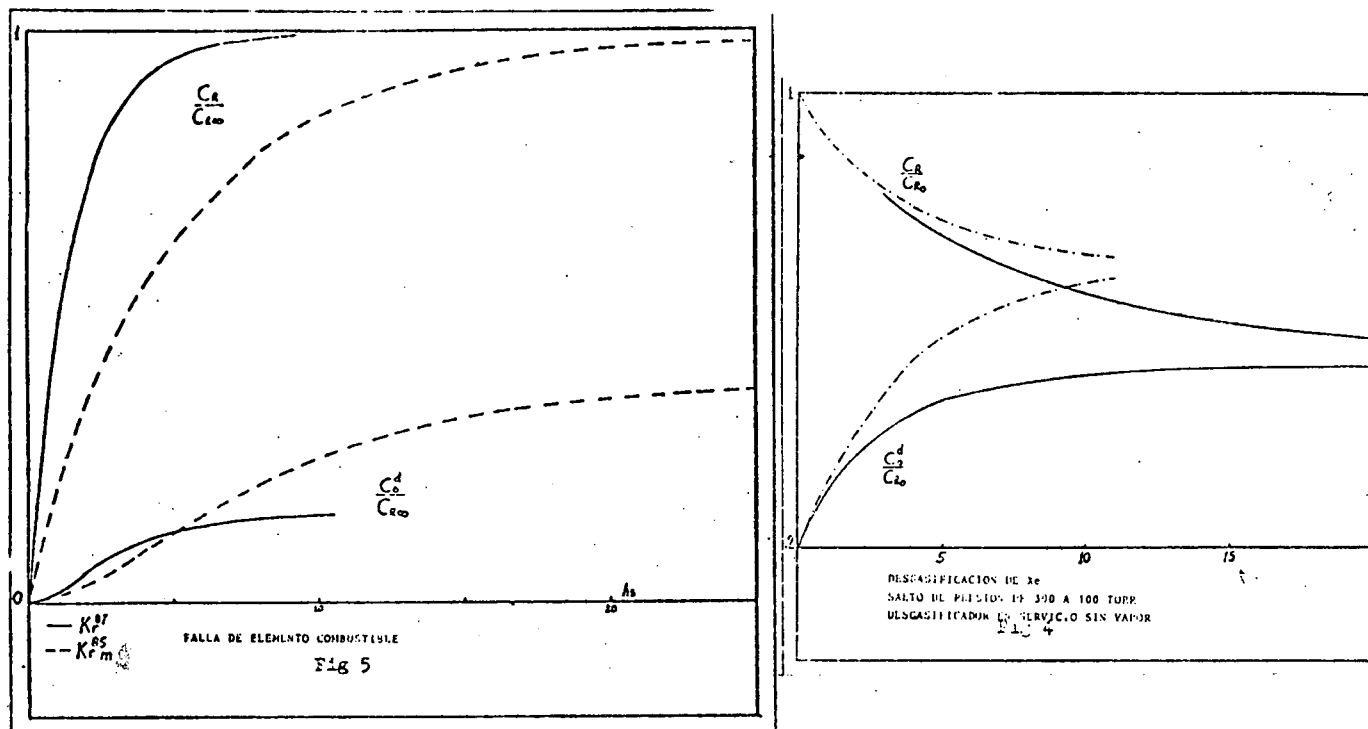
L_1 : 65.5 cm.

L : 61.5 cm.

a_1 : 6.62 cm.

a : 6 cm.





- C_R Concentración de gas en el medio refrigerante-moderador (moles por unidad de masa).
- C_R^d Concentración de gas a la salida del desgasificador (moles por unidad de masa).
- C_P^d Concentración de gas a la salida del presurizador (moles por unidad de masa).
- Q_d Caudal de líquido a ser desgasificado.
- Q_P Caudal de ducha en presurizador.
- λ Constante de desintegración.
- M_R Masa total de refrigerante.
- n_g^d Número de moles en el volumen libre del desgasificador y tanque de regulación de volumen.
- n_g^P Número de moles en el volumen libre del presurizador.
- f_R Moles que se crean o ingresan en el refrigerante en la unidad de tiempo.
- f_P Moles que se crean o ingresan en el presurizador en la unidad de tiempo.
- f_d Moles que salen o entran en la fase gaseosa del desgasificador en la unidad de tiempo.
- λ Constante de desintegración
- H_d Constante de Henry a la temperatura de operación del desgasificador.
- H_P Constante de Henry a la temperatura de operación del presurizador.
- V_P Volumen libre de presurizador.
- V_d Volumen libre del desgasificador y tanque de regulación de volumen.