

ANALISIS DEL ACCIDENTE DE PERDIDA DE CAUDAL DE REFRIGERACION
SIN SCRAM DEL REACTOR RA-6 MEDIANTE EL PROGRAMA SPONVEC

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 1	AÑO 1985

Sergio Pissanetzky Rubén Carcagno*
Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro
Comisión Nacional de Energía Atómica
y Universidad Nacional de Cuyo

RESUMEN

En este trabajo analizamos el accidente de pérdida de caudal de refrigeración sin SCRAM (apagado rápido) del reactor RA-6. El estudio de este accidente es importante desde el punto de vista de la seguridad, porque la evolución de la temperatura máxima presenta un pico entre el estado inicial de refrigeración por convección forzada y el estado estacionario de refrigeración por convección natural.

Para el análisis de este accidente, hallamos los campos de velocidad y temperatura en el canal caliente durante todo el transitorio, el cual incluye convección forzada, mixta y natural con condiciones de contorno que varían en el espacio y en el tiempo donde es de destacar la complejidad introducida por la inversión del caudal de refrigeración. Los campos mencionados fueron hallados por el programa de Elementos Finitos SPONVEC para convección transitoria natural y forzada.

Como resultado del estudio efectuado, encontramos que aún en las peores condiciones, si se permite que la clapeta permanezca abierta, la temperatura máxima de la vaina no supera el valor máximo admisible correspondiente al principio de la ebullición local.

INTRODUCCION

El accidente de pérdida de caudal de refrigeración estudiado en reactores tipo piscina tiene las siguientes características:

- Como consecuencia de un corte del suministro de energía eléctrica a la bomba del circuito primario, el caudal de refrigeración (que circula atravesando el núcleo en sentido descendente, Fig. 1) comienza a disminuir con una rapidez que depende del momento de inercia de las piezas en rotación, la inercia del mismo fluido y las pérdidas de carga del circuito primario.
- Simultáneamente la lógica del sistema de seguridad solicita SCRAM (apagado rápido mediante la caída de las barras absorbedoras). En este trabajo postulamos que el SCRAM no se produce, y que el reactor sigue operando a plena potencia durante el transitorio. En realidad, la potencia disminuye como consecuencia del aumento de temperatura y la hipótesis efectuada es conservativa.
- Cuando el caudal del circuito primario llega a un cierto valor, se abre la clapeta (Fig. 1) porque la presión dinámica y la pérdida de presión que sufre el fluido al atravesar el núcleo no alcanzan para mantener la depresión requerida para sujetar la clapeta cerrada, la cual se abre por gravedad. De esta manera se dan las condiciones para facilitar el establecimiento de la convección natural.

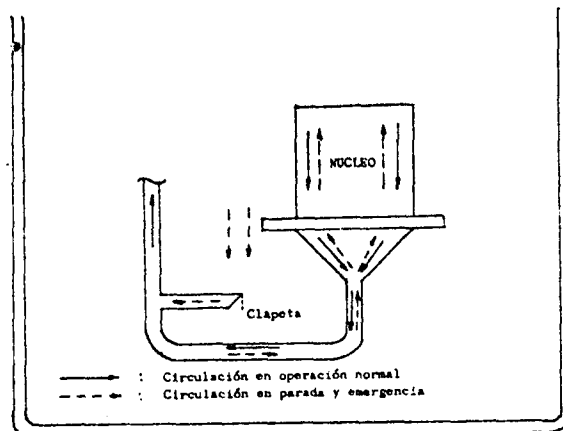


Fig. 1: Esquema de circulación del refrigerante a través del núcleo.

- En algún momento se produce la inversión del caudal en el núcleo, circulando ahora el refrigerante en sentido ascendente por convección natural (Fig. 1). La inversión ocurre porque la densidad del refrigerante disminuye con la temperatura, la cual aumenta dentro del núcleo debido a la disminución del caudal, generándose una fuerza de empuje que en cierto momento es suficiente como para invertirlo.

El mecanismo de refrigeración por convección natural puede utilizarse en operación normal de reactores tipo piscina de potencias de hasta 1 MW en forma segura desde el punto de vista termo-hidráulico. Pero aún en reactores de potencias inferiores a 1 MW, no es posible garantizar a priori la refrigeración del núcleo durante todo el transitorio, cerca del punto de inversión, el coeficiente de transferencia térmica disminuye sensiblemente respecto a su valor en el estado

* Actualmente en TECHINT S.A.
Maipú 1800
1006 - Buenos Aires

DISPOSITIVO DE ENSAYO

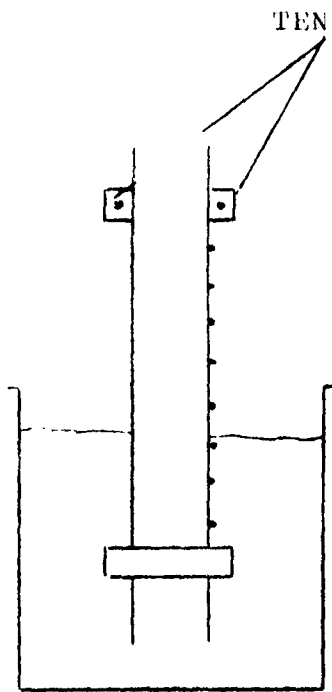


FIGURA I

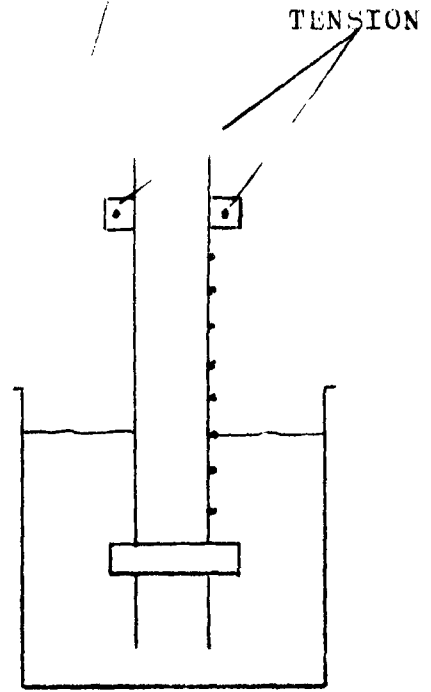


FIGURA II

ROCIADOR

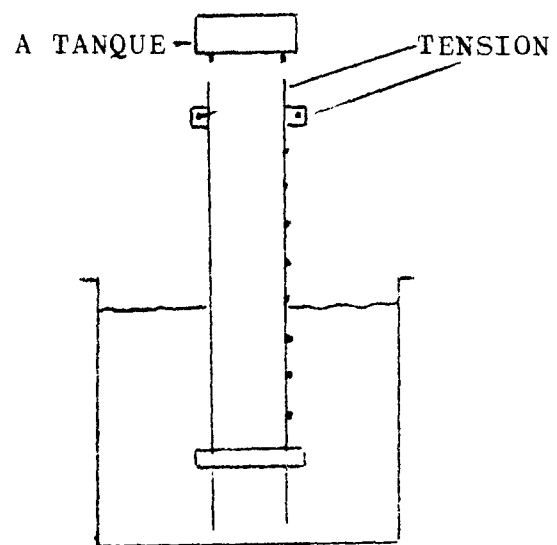


FIGURA III

DATOS SECCION DE ENSAYOS

Dint. = 0,553 cm

Dext. = 0,635 cm

W = 0,040 cm

L_T = 65,5 cm

L_a = 61,5 cm

estacionario debido a las bajas velocidades del refrigerante. Se requiere entonces un salto térmico mayor entre la vaina y el refrigerante para transferir aproximadamente la misma cantidad de calor. También como consecuencia de la baja velocidad del refrigerante, éste aumenta su temperatura, provocando un aumento en la temperatura de la vaina para el mismo salto térmico.

Como conclusión de este análisis simplificado de la situación se desprende que la evolución de la temperatura de la vaina presenta un pico entre el punto de inversión y el estado estacionario final. La altura del pico depende de diversos factores, tales como el flujo térmico, la duración y características del proceso de inversión.

Para poder garantizar que la temperatura de vaina no supere el valor máximo admisible durante el transitorio, es necesario hallar las distribuciones temporales y espaciales de la velocidad y temperatura en el canal caliente, que es el que posee carga térmica máxima. Este problema incluye convección forzada, mixta y natural con condiciones de contorno variables en el espacio y en el tiempo.

ANÁLISIS DEL ACCIDENTE DESCRIPTO PARA EL REACTOR RA-6

El reactor RA-6, ubicado en el Centro Atómico Bariloche, es un reactor de tipo experimental de 500 KW térmicos refrigerado con agua liviana y pertenece a la clase de reactores de tanque abierto o piscina. La refrigeración en operación normal se efectúa mediante la circulación forzada del refrigerante en sentido descendente, y cuando el reactor está detenido la potencia residual se evacúa al refrigerante por convección natural, siendo la circulación a través del núcleo en sentido ascendente y facilitada por la apertura de la clapeta situada en el tramo ascendente de la cañería (Fig. 1).

Para resolver el problema utilizamos el programa SPONVEC que desarrollamos previamente [1,4] SPONVEC en un programa general para convección transitoria natural y forzada en régimen laminar, que utiliza el método de Elementos Finitos como técnica de discretización espacial y un esquema explícito en diferencias finitas para la integración temporal.

Consideramos una configuración del núcleo de 25 elementos combustibles, con 19 placas combustibles por elemento combustible normal. La Fig. 2 muestra una vista del elemento combustible. En el reactor RA-6, la temperatura máxima admisible por condición límite de seguridad corresponde al comienzo de la ebullición local [2]. Utilizando la relación de Foster y Greif, obtenimos:

$$T_{\text{achu}}^{\text{max}} = 118^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

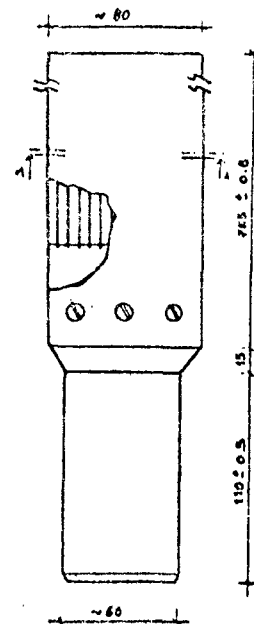


Fig. 2: Corte vista lateral izquierdo del elemento combustible (en mm).

Discretización espacial

La Fig. 3 muestra un corte de un canal de refrigeración, junto con la región de interés estudiada. Por simetría resolvimos el problema para $0 \leq x \leq e_c/2$, y consideramos la longitud activa $-l_A/2$ y $l_A/2$. Discretizamos la región de interés en 18 elementos finitos regulares, tal como muestra la Fig. 4.

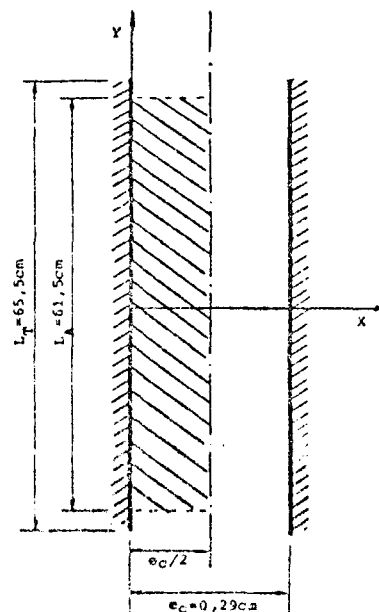


Fig. 3: Corte del canal de refrigeración y zona de interés. Ancho de la placa combustible: 6,62 cm.

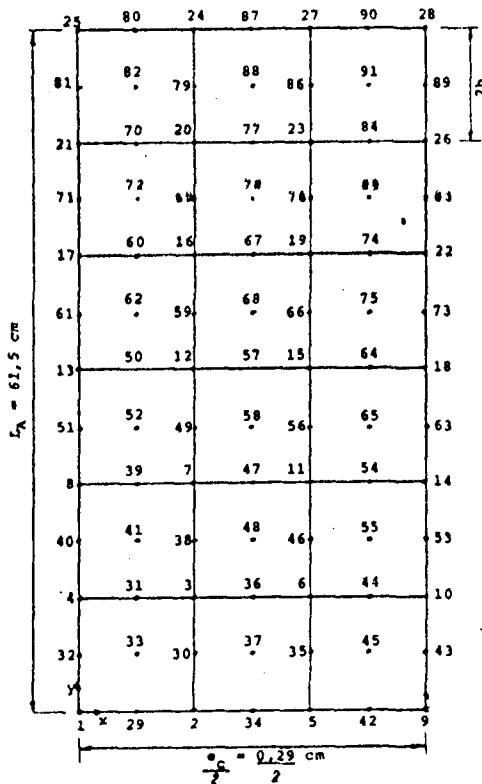


Fig. 4: Discretización espacial de la zona de interés.

Condiciones iniciales

Corresponden a los campos de velocidad y temperatura en la región de interés para el estado estacionario en convección forzada en operación normal y a plena potencia (500 KW). Estos campos fueron hallados con el programa SPCONVEC, para las siguientes condiciones /3/:

- Caudal efectivo de refrigeración: 120 m³/h (2)
- Flujo térmico

(factor de canal caliente = 2,5):

$$q'' = 0,87 \cos\left(\frac{y}{77,5}\right), \quad [q''] = \frac{\text{cal}}{\text{seg cm}^2} \quad (3)$$

- Temperatura de entrada: 40 °C (4)

Los resultados obtenidos fueron verificados con correlaciones empíricas y expresiones analíticas para convección forzada en estado estacionario.

Condiciones de contorno

En la Fig. 5 pueden verse las condiciones de contorno para la ecuación de impulso y la ecuación de energía.

A continuación discutimos las condiciones de contorno más significativas.

- Para la ecuación de impulso:

Como el flujo térmico es diferente para cada canal, no es posible suponer una distribución

uniforme de velocidades en todos los canales durante el transitorio. El caudal se invertirá antes en el canal caliente que en un canal promedio, con lo cual la condición de contorno adecuada es el esfuerzo normal, que obtuvimos de la siguiente manera: efectuamos una serie de mediciones en el reactor RA-6 para obtener la variación del caudal de refrigeración total en el tiempo con el reactor apagado cuando se detiene la bomba. A partir de la curva obtenida (Fig. 6), de la ecuación de impulso dependiente del tiempo para flujo paralelo en canal recto y de la relación entre esfuerzo normal y velocidad media, hallamos la expresión (5) del esfuerzo normal como función del tiempo:

$$\sigma_n = L_A \times [\sigma_0 + \sigma_1 t + \sigma_2 t^2 + \sigma_3 t^3 + \sigma_4 t^4] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 1,434382 \times 10^1 & [\sigma_n] &= \text{dynas/cm}^2 \\ \sigma_1 &= -5,641116 \\ \sigma_2 &= 1,452345 \\ \sigma_3 &= -1,700191 \times 10^{-1} \\ \sigma_4 &= 6,683030 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

En determinado momento, antes de la detención del caudal total se produce la apertura de la clapeta. Suponemos que la misma no se cierra en todo el transitorio, y que la pérdida de carga entre la clapeta y el núcleo es despreciable.

Esta es la única hipótesis no conservativa efectuada en el trabajo, y volvemos sobre ella más adelante.

Por lo tanto, luego de que el caudal total es nulo (a los 12 seg) tomamos $\sigma_n = 0$.

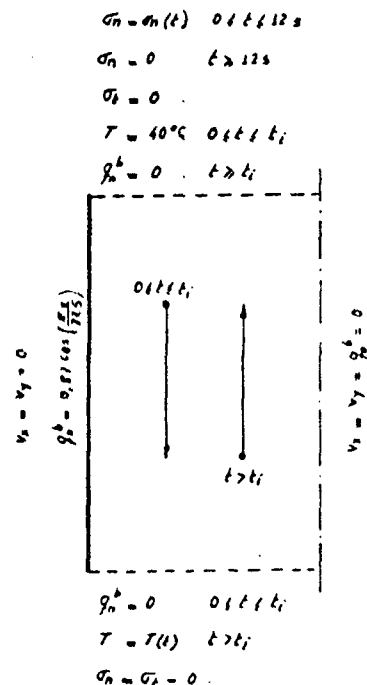


Fig. 5: condiciones de contorno.

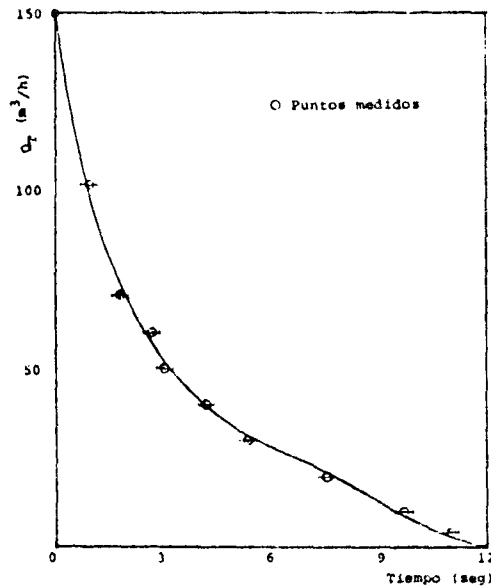


Fig. 6: Aproximación polinómica al caudal residual.

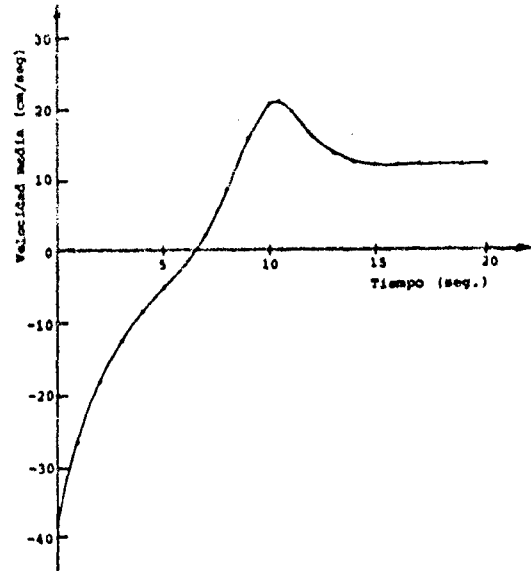


Fig. 7: Velocidad media en el canal caliente vs. tiempo.

- Para la ecuación de energía:

Mientras el caudal es descendente en el canal caliente, consideramos una temperatura de entrada del refrigerante de 40 °C, y salida adiabática. También vamos calculando la temperatura de mezcla en la boquilla (parte inferior del elemento combustible) con la ecuación diferencial de mezclado. Cuando el caudal se invierte en el canal caliente, la temperatura de entrada del refrigerante corresponde a la temperatura de mezcla en la boquilla, y salida adiabática. La temperatura de mezcla varía debido a la entrada de refrigerante a la boquilla proveniente del embudo. Los valores de la temperatura de entrada los obtuvimos resolviendo la ecuación diferencial de mezclado con un esquema explícito (6):

$$T^{j+\Delta t} = T^j + \Delta t \frac{Q_{EC}^j}{V_R} (43 - T^j)$$

donde: Q_{EC}^j : Caudal que pasa por el elemento; combustible al tiempo t_j .

V_R : Volumen de la boquilla del elemento combustible.

El flujo térmico en la pared del canal es el de distribución coseno utilizado para hallar las condiciones iniciales.

RESULTADOS OBTENIDOS

La figura 7 muestra la velocidad media en el canal caliente en función del tiempo. Vemos que la inversión del caudal en este canal ocurre a los 6,5 seg. El pico que se observa está determinado por la disminución de la fuerza de empuje, la inercia del fluido y la fricción viscosa.

La Fig. 8 muestra en detalle como ocurre el proceso de inversión en el canal caliente, el cual dura 1,5 seg. aproximadamente. Observamos una recirculación de refrigerante, que asciende cerca de la pared y desciende en el centro (la componente x de la velocidad no se aprecia en la figura debido a la escala). Por esta causa, aunque la velocidad media es la misma los perfiles de velocidad son diferentes a lo largo del canal.

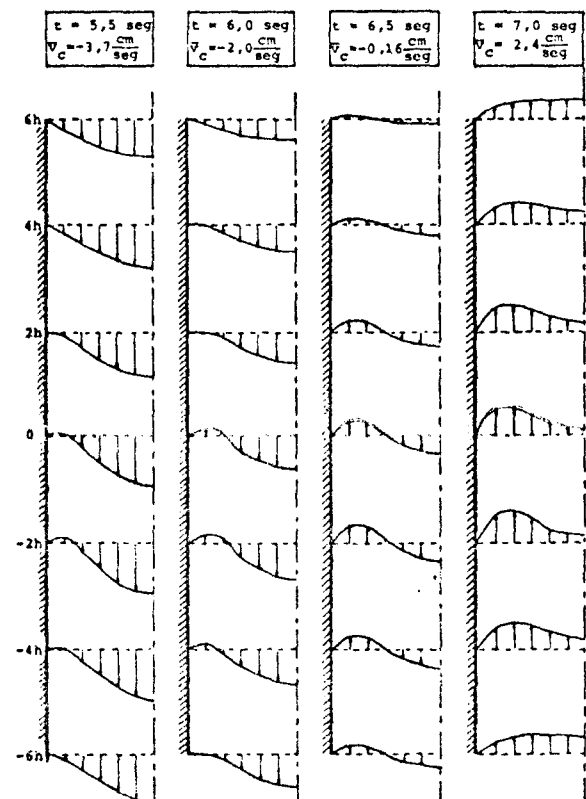


Fig. 8: Inversión del caudal en el canal caliente.

También vemos que las primeras velocidades ascendentes aparecen cerca de la pared y en la zona de mayor temperatura, donde la fuerza de empuje es mayor.

La Fig. 9 muestra la evolución y localización de la temperatura máxima de pared en el canal caliente. Vemos que no se supera la temperatura máxima admisible, existiendo un margen de unos 5 °C.

El estado estacionario de refrigeración por convección natural fue verificado con expresiones analíticas y correlaciones empíricas para convección natural, estado estacionario

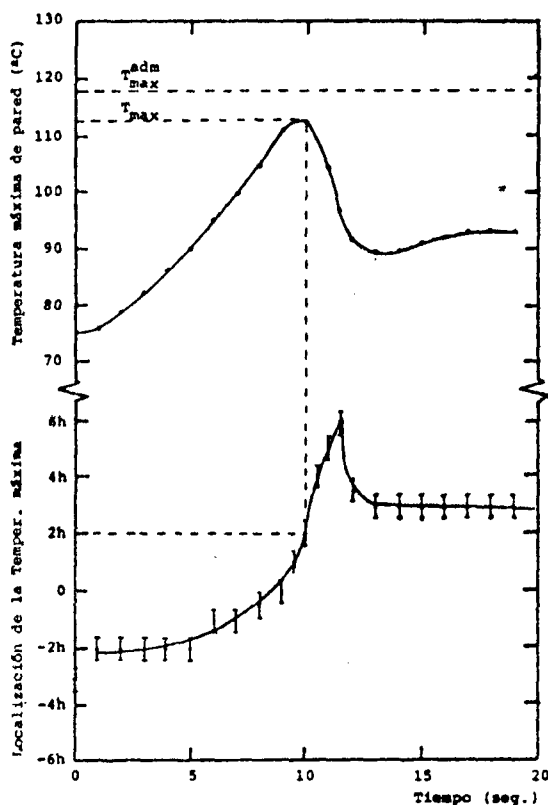


Fig. 9: Evolución y localización de la temperatura máxima de pared en el canal caliente.

DISCUSION DE RESULTADOS

La evolución de la temperatura máxima de pared presenta un pico (Fig. 9) tal como se mencionó en la introducción, cuya altura (113°C) resulta inferior a la temperatura máxima admisible (118°C). Esta altura está limitada fundamentalmente por el ingreso de refrigerante por la boquilla, que va enfriando la pared a medida que avanza. Esto se aprecia claramente en la curva de la localización de la temperatura máxima de pared, que se desplaza hacia la zona superior de la placa luego de la inversión.

El valle que se observa en la curva de temperatura máxima luego del pico se debe a que la velocidad media en ese instante es superior a la del estado estacionario final (ver Fig. 7), con lo cual el coeficiente de transferencia térmica es mayor.

El brusco descenso de la localización de la temperatura máxima de pared luego de los 11,5 seg se debe a que el "frente frío" ha llegado al extremo superior de la placa combustible.

El principal error en la solución está dado por la incerteza en las condiciones de contorno. Si la hipótesis de pérdida de carga nula entre la clapeta y el núcleo no es cierta, el "frente frío" avanzará más lentamente. En base a las velocidades halladas encontramos que la clapeta se cierra, superándose entonces muy probablemente la temperatura máxima admisible. Las restantes hipótesis son conservativas.

Como conclusión, recomendamos estudiar la posibilidad de idear un mecanismo que mantenga abierta la clapeta mientras la circulación sea ascendente, cualquiera sea el caudal, para evitar la superación de la temperatura máxima admisible si se produce este accidente. Además, dado que el reactor RA-6 tiene previsto operar en convección natural, podría utilizarse este mecanismo para mantener abierta la clapeta si se desea operar en este modo.

REFERENCIAS

- /1/ R. Carcagno. "SPCONVEC: Programa Para Flujo Transitorio Incompresible En Régimen Laminar. Su Aplicación al Análisis del Accidente de Pérdida de Caudal de Refrigeración del Reactor RA-6". Trabajo Especial Para la Carrera de Ingeniería Nuclear (Director del Trabajo: Sergio Pissanetzky), Instituto Balseiro, 1983.
- /2/ CNEA, Departamento de Reactores Nucleares, INVAP S.E., "Informe Preliminar de Seguridad Capítulos XII al XVI". Proyecto RA-6.
- /3/ CNEA, Departamento de Reactores Nucleares, INVAP S.E., "Sistemas de Refrigeración y Tratamiento de aguas, Tomo I". Proyecto RA-6.
- /4/ R. Carcagno y S. Pissanetzky. "SPCONVEC: Programa para problemas de convección natural y forzada por Elementos Finitos". Trabajo presentado en la XI Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (AATN), 14 al 18 de Nov. de 1983.