

## Potencia máxima del reactor RP-10 refrigerado por convección natural

Alberto Gallardo\*

Dirección de Instalaciones, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

### Resumen

En este reporte se describe el modelo de cálculo termohidráulico usado por el código NATCON para determinar la potencia máxima del RP-10 refrigerado por convección natural. Los resultados fueron analizados con datos experimentales para regímenes en ebullición. De los resultados y análisis resulta una potencia máxima de 427 kW antes de la ebullición nucleada para periodos largos de operación.

### Abstract

This report describes the thermal-hydraulics calculation model used by NATCON code to determine the maximum power of the RP-10 cooled by natural convection. The results obtained were analyzed with experimental data for boiling regimes. From the calculations and analysis it was obtained a maximum power of 427 kW before the nucleate boiling for long periods of operation.

### 1. Introducción

El reactor RP-10 está destinado a la producción de radioisótopos e investigación de materiales. También se utiliza para análisis por activación neutrónica a baja potencia, siendo refrigerado por convección natural.

En convección natural el movimiento del agua refrigerante se produce debido a la diferencia de densidad del agua dentro del canal con el del medio. El calentamiento del agua dentro del canal se debe a la energía generada en la fisión del combustible nuclear en las placas combustibles.

Como la energía liberada depende del nivel de potencia del reactor, es de interés conocer la máxima potencia que pueda ser refrigerado por convección natural, de modo tal, que la temperatura de las placas combustibles no supere la temperatura de pared para el inicio de la ebullición nucleada y así evitar que se pueda producir una falla de la placa. Esto conlleva a realiza el análisis termohidráulico, para lo cual se usa un programa de cálculo, cuyo modelo de cálculo y resultados serán mostrados para su discusión de acuerdo con la información actual.

### 2. Metodología de cálculo

El programa NATCON [1] se usa para la evaluación termohidráulica en convección natural en estado estable. El núcleo se modela como una placa combustible con su respectivo canal asociado (Figura 1).

El flujo por convección natural resulta de la diferencia de densidades; es decir, por la fuerza boyante ( $F_B$ ) que está dada por:

$$F_B = (\rho_{amb} - \rho_r) g A_c L_a \quad (1)$$

Donde:

$\rho_r = \Sigma[\Delta z_i \rho_i] / L_a$  densidad media del agua en el canal

$\rho_{amb}$  : densidad del agua en tanque del reactor

$A_c$  : área de sección transversal del canal

$L_a$  : longitud activa de calefacción en el canal

$g$  : aceleración de la gravedad

Al movimiento ascendente producido por la fuerza boyante se opone la fuerza de fricción, dado por:

$$F_F = (\rho_{in} V_{in})^2 A_c / (2 \rho_e) \quad (2)$$

Donde:

$\rho_{in}$  : densidad del agua al ingreso al canal

$V_{in}$  : velocidad del agua al ingreso al canal

$\rho_e$  : densidad equivalente pérdidas de fricción

$$1/\rho_e = 1/(2 \rho_{in}) + 1/(2 \rho_{sal}) + \Sigma[f \Delta z_i / (D_h \rho_i)]$$

$f = C_f / Re$  es el factor de fricción constante,  $D_h$  es el diámetro hidráulico,  $C_f$  es la constante de fricción y  $Re$  es el número de Reynolds.

\* Correspondencia autor: agallardo@ipen.gob.pe

En cada región  $i$  a lo largo del canal se tiene un flujo de calor  $Q''_i$ , obtenido de datos, que es extraído por el flujo de agua en el canal.

$$Q''_i = M_r \cdot C_{p_i} (Tr_i - Tr_{i-1}) \quad (3)$$

Donde:

$M_r = \rho_{in} V_{in} A_c$  es el flujo de refrigerante.

La temperatura del refrigerante  $Tr_i$  a lo largo del canal afecta la densidad del agua  $\rho_i$  y el cálculo de  $V_{in}$ ,  $F_B$  y  $F_F$ , por lo tanto, las ecuaciones 1, 2, 3 se resuelven iterativamente hasta que en el estado estable se tiene que:

$$F_{Boyante} = F_{Fricción}$$

De otro lado,  $Q''_i$  es el calor generado en la placa combustible que es transferido al agua por convección natural.

$$Q''_i = h_i A_i (Tp_i - Tr_i) \quad (4)$$

De donde:  $Tp_i = Tr_i + Q''_i / (h_i A_i) \quad (5)$

$Tp_i$ : temperatura en superficie de la placa

$h_i$ : coeficiente de transferencia de calor

$A_i$ : área de placa activa (calor) región  $i$

De la ecuación 5 se obtiene la temperatura de pared de la placa combustible  $Tp_i$  en la superficie de la región  $A_i$ , donde  $h_i$  se obtiene de correlaciones empíricas de transferencia de calor para convección natural.

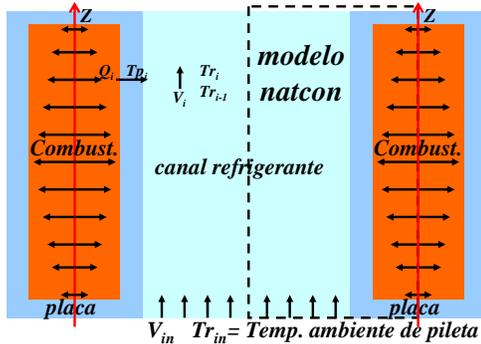


Figura 1. Modelo termohidráulico NATCON.

Dado que se tiene un modelo de conducción unidimensional, la temperatura en el centro del combustible,  $Tc_i$ , está dado por:

$$Tc_i = Tp_i + Q_i / [A_i (E_v/k_v + E_c/(2 k_c))] \quad (6)$$

Donde:

$E_v/k_v$ : espesor/conductividad térmica vaina

$E_c/k_c$ : espesor/conductividad térmica del combustible.

La temperatura de pared para el inicio de la ebullición nucleada  $Tp_{ONB}$  será determinada de la correlación de Bergles–Roshenow.

$$(Q/A)_{ONB} = 15.6 P^{1.156} (Tp_{ONB} - T_{sat})^{0.0234 (2.3/P)} \quad (7)$$

Correlación dada en unidades inglesas, donde  $T_{sat}$  es la temperatura de saturación del agua a la presión absoluta  $P$ .

Para tener en cuenta las tolerancias de fabricación, aproximación de correlaciones, incertidumbres de datos termofísicos, etc., se usaran factores de incertidumbre para el cálculo de  $Q$ ,  $h$ ,  $M_r$ .

De la ecuación (7) se obtiene la potencia máxima del reactor RP-10, limitada por el inicio de la ebullición nucleada.

Para determinar la potencia máxima del reactor refrigerado por convección natural, se considera además el tiempo de operación, ya que el calor producido es transferido al agua de la pileta.

En experiencia de operaciones de menos de una hora el agua de la pileta llega hasta 30 °C aumentando su temperatura en función a las horas de operación.

En las especificaciones técnicas del reactor, en convección natural, se admite una temperatura en la pileta hasta 50 °C, luego para la determinación de la potencia máxima se tendrá las temperaturas entre 30 a 50 °C para el agua de la pileta, y se usará el programa NATCON.

### 3. Resultados y Discusión

Los resultados para la potencia y flujo de calor máximo se muestran en figura 2.

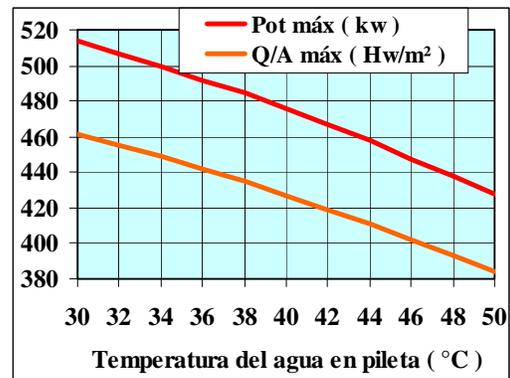


Figura 2. Potencia y flujo de calor máximos vs temperatura del agua en pileta.

En la figura 2 se observa que la potencia y el flujo de calor máximo decrecen con el aumento de la temperatura del agua en la pileta. Esto es debido a que conforme la temperatura del agua en la pileta aumenta, se requiere menor flujo de calor para alcanzar la temperatura para el inicio de la ebullición.

En la figura 3 se muestran los resultados de las temperaturas de pared para el inicio de la ebullición y la de saturación, observándose entre ellas una diferencia de 2 °C. También, se muestran los resultados de la temperatura del agua a la salida del canal que aumenta en 8 °C cuando la temperatura del agua en la pileta del reactor aumenta en 20 °C.

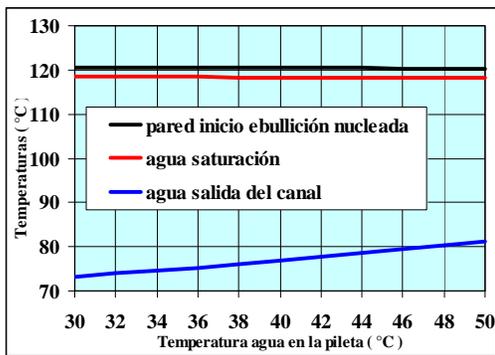


Figura 3. Temperaturas vs temperatura del agua en pileta del reactor.

En la figura 4 se muestran los resultados del flujo másico y de la fuerza boyante. La fuerza boyante disminuye con el aumento de la temperatura del agua en la pileta. En la figura 3 podemos observar que la temperatura del agua en la pileta aumenta mucho más que en el canal; por lo tanto, en la ecuación 1 la diferencia de densidades disminuye junto con la fuerza boyante.

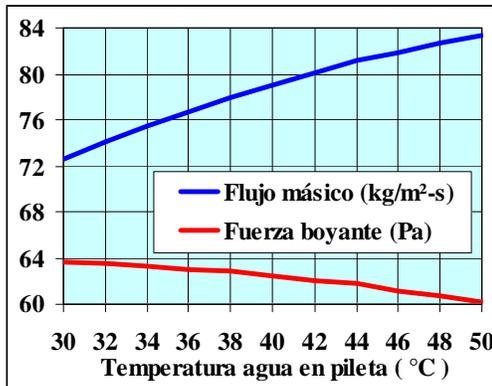


Figura 4. Flujo másico y fuerza boyante vs temperatura del agua en pileta del reactor.

En la figura 4 también se observa que el flujo másico se incrementa, esto se debe a la mayor temperatura del agua en la pileta y en el canal hacen que la densidad y la fricción disminuyan lo cual aumenta en mayor grado la velocidad y por lo tanto el flujo másico.

Ahora compararemos los resultados del flujo de calor de la figura 2 con valores de datos experimentales según [2]. En la figura 5 para condiciones a partir de la saturación y en la figura 6 para agua subenfriada.

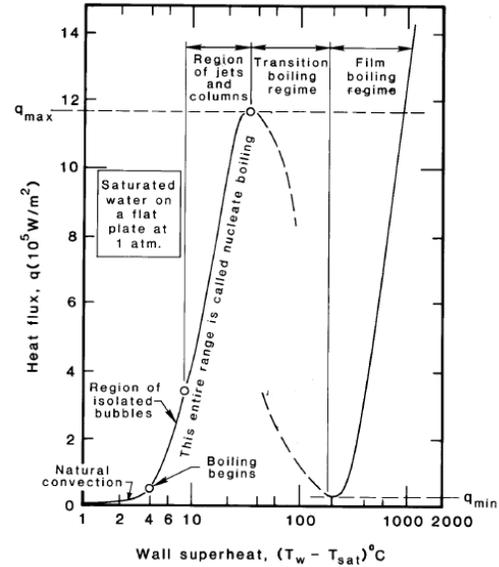


Figura 5. Valores típicos de regímenes de ebullición saturados en convección natural.

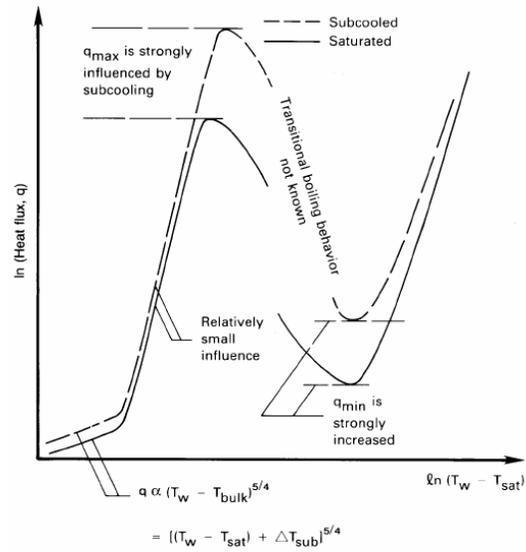


Figura 6. Regímenes de ebullición en convección natural con subenfriamiento.

En la figura 2 se observa que el flujo de calor para el inicio de la ebullición nucleada es de  $3.84E4 \text{ w/m}^2$ , para la temperatura del agua en la pileta  $T_{r_{in}}$  de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . En la figura 3, se observa que la diferencia de temperatura  $T_{p_{ONB}} - T_{sat}$  es de  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

En cambio, en la figura 5 los valores típicos para el inicio de la ebullición nucleada son de un flujo de calor alrededor de  $6E4 \text{ w/m}^2$  y una diferencia  $T_{p_{ONB}} - T_{sat}$  de  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esto es para condiciones de saturación del agua.

De otro lado, en la figura 6 se señala que para agua subenfriada, como es en el caso del RP-10, los valores del flujo de calor y de la diferencia  $T_{p_{ONB}} - T_{sat}$  deben ser mayores que los mostrados en la figura 5.

Por lo tanto, los resultados obtenidos están por debajo de los valores esperados, siendo conservadores y teniendo en cuenta que los resultados se han obtenido con factores de incertidumbre.

Considerando los límites de seguridad, tenemos que, para las potencias máximas, la temperatura de pared  $T_{p_{ONB}}$  es  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  aprox. y está por debajo del límite de  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  para evitar la corrosión. Con respecto al flujo crítico de calor, de  $1.2E6 \text{ w/m}^2$  según la figura 5, el margen de seguridad es aprox. de 1 a 20.

Según la figura 5, en el régimen de ebullición nucleada hasta el flujo crítico de calor,  $T_{p_{ONB}} - T_{sat}$  puede llegar a tener hasta aprox.  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , es decir que la placa alcanzaría hasta  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , muy por debajo de los  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  para la fluencia del aluminio de la placa.

Analizando lo que ocurriría si se supera las máximas potencias o flujo de calor. De la figura 5, en un régimen de ebullición nucleada, para un flujo de calor de  $1E5 \text{ w/m}^2$ , es decir, más de 2 veces los flujos máximos del reactor RP-10 dados en la figura 2, se tendría que el margen de seguridad con

respecto al flujo crítico de calor sería de 1 a 12.

Además, si es que se alcanzase el flujo de calor de  $1E5 \text{ w/m}^2$ , de la figura 5 se tendría que  $T_{p_{ONB}} - T_{sat}$  es  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  aprox., es decir, que la placa alcanzaría  $123 \text{ }^\circ\text{C}$  por debajo del límite de  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  y muy por debajo de los  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  para la fluencia del aluminio de la placa.

Por lo tanto, desde el punto de vista de seguridad se puede afirmar que el reactor RP-10 puede operar a la potencia máxima de  $427 \text{ kW}$  para una temperatura del agua en la pileta hasta  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , en condiciones de seguridad.

#### 4. Conclusiones

La potencia máxima para el reactor RP-10 con refrigeración por convección natural puede ser de  $427 \text{ kW}$  para períodos largos de operación con la condición que el agua en la pileta no supere una temperatura de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Esa potencia máxima es muy conservadora debido a que se han empleado factores de incertidumbre y los resultados obtenidos están por debajo de datos experimentales.

A la potencia máxima, la temperatura máxima de la placa y el flujo de calor están por debajo de los límites de seguridad, por lo tanto, la operación es segura.

#### 5. Bibliografía

- [1] Smith R S, Woodruff W L. A computer code, NATCON, for the analyses of steady-state thermal-hydraulics and safety margins in plate-type research reactors cooled by natural convection. ANL/RERTR/TM-12. 1998.
- [2] Lienhard IV J H, Lienhard V J H. A heat transfer textbook. 3rd ed. Cambridge Massachusetts: Phlogiston Press; 2008.