

# PROGRAMA DE COMPUTO PARA EL CALCULO DEL ACCIDENTE DE PERDIDA DEL REFRIGERANTE DE UN REACTOR NUCLEAR DEL TIPO PISCINA

*Luis VILLANUEVA*

INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR, Apdo. 1678. Lima, 13 Perú.

## RESUMEN

Se ha elaborado un programa de cómputo que calcula el accidente de pérdida del refrigerante en la mitad superior de los elementos combustibles, producido por la rotura del tubo tangencial de irradiación de un reactor nuclear del tipo piscina. El programa está diseñado para canales rectangulares de refrigeración, formados por placas combustibles. Los modos de transferencia de calor considerados son: 1) Convección forzada turbulenta, 2) Convección forzada en régimen de transición, 3) Convección forzada laminar, 4) Convección natural en agua, 5) Convección natural en celdas rectangulares, 6) Convección natural en aire en canales parcialmente cerrados, 7) Ebullición nucleada en líquido estancado, 8) Convección laminar en vapor, 9) Radiación térmica entre placas paralelas y vapor.

## ABSTRACT

It has been developed a compute program for calculating the loss of coolant accident, on the upper half of the fuel elements, produced by the break of the tangential tube for irradiation in a pool type nuclear reactor. The compute program has been designed for rectangular cooling chanel formed by fuel plates. The heat transfer modes regarded are the following:

1) turbulent forced convection, 2) transition regime in forced convection, 3) laminar forced convection, 4) natural convection in water, 5) natural convection in rectangular cells, 6) natural convection in air in partially closed chanel, 7) nucleate boiling in stagnant liquid, 8) laminar convection in vapor, 9) thermal radiation between parallel plates and vapor.

---

(\*) Este trabajo fue presentado en la X Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (Nov. 1981).

## 1. INTRODUCCION.

Se ha desarrollado un programa de cómputo que calcula la evolución de los principales parámetros de un reactor nuclear del tipo piscina, durante el estado transitorio producido por la rotura del tubo tangencial de irradiación (fig. 1). Aún cuando el accidente es de escasa probabilidad, del orden de  $10^{-7}$  por ciclo normal de operación, es importante conocer sus consecuencias y las medidas a tomar a fin de mitigarlas.

En forma general, el accidente pasa por las siguientes etapas:

- a. Se inicia al producirse la rotura del tubo tangencial, ya sea por la caída de un objeto sobre el mismo, o como consecuencia de un sismo de gran magnitud. Al producirse la rotura, el agua de la piscina comienza a salir al exterior del block del reactor, a través de las aberturas del tubo tangencial. El nivel del líquido en la piscina empieza a disminuir.
- b. Al llegar el nivel de la piscina, en su descenso, a un punto determinado se produce el corte de las bombas. Como consecuencia de existir volantes de inercia acopladas a los ejes de las bombas del circuito primario, el caudal de refrigeración va a disminuir lentamente.
- c. Al llegar el nivel de la piscina a un punto determinado, sea por la detección de pérdida del refrigerante por los monitores, o por efecto de haberse detectado un sismo de considerable magnitud, la lógica del sistema de seguridad produce la caída de las barras de control y seguridad (scram). Este hecho da inicio al descenso de la potencia de generación de calor en el reactor.
- d. Mientras el nivel de la piscina y la potencia residual continúan descendiendo, el caudal de refrigeración disminuye, hasta que al alcanzar un determinado valor se produce la apertura de las clapetas (fig. 1) con la finalidad de favorecer el establecimiento de la convección natural. La velocidad del refrigerante disminuye rápidamente y luego se produce la inversión del flujo, el cual pasa de descendente a ascendente a través de los canales formados por las placas combustibles (fig. 2); esta inversión del flujo es consecuencia de la diferencia de temperaturas entre el refrigerante en el núcleo y el líquido en la piscina.
- e. En su descenso el nivel de la piscina alcanza el extremo superior del núcleo. En este momento se produce el estancamiento del flujo de convección natural. A la vez que el nivel del líquido continúa descendiendo, el fluido estancado incrementa su temperatura continuamente. En la parte superior del canal, las placas combustibles quedan al descubierto en contacto con aire.
- f. La temperatura del líquido en el canal alcanza la temperatura de saturación. A partir de este momento se inicia la generación neta de vapor, el cual asciende por el canal hacia el exterior del núcleo, mientras el nivel de la piscina continúa descendiendo.
- g. Al llegar el nivel a la altura de la parte inferior del tubo de irradiación, el descenso disminuye a valores despreciables, debido únicamente a la evaporación del líquido. El proceso continúa con el líquido estancado en la mitad inferior del canal, en ebullición nucleada, y con vapor emergiendo por la interfase líquido-vapor, refrigerando deficientemente la mitad superior de la placa combustible.

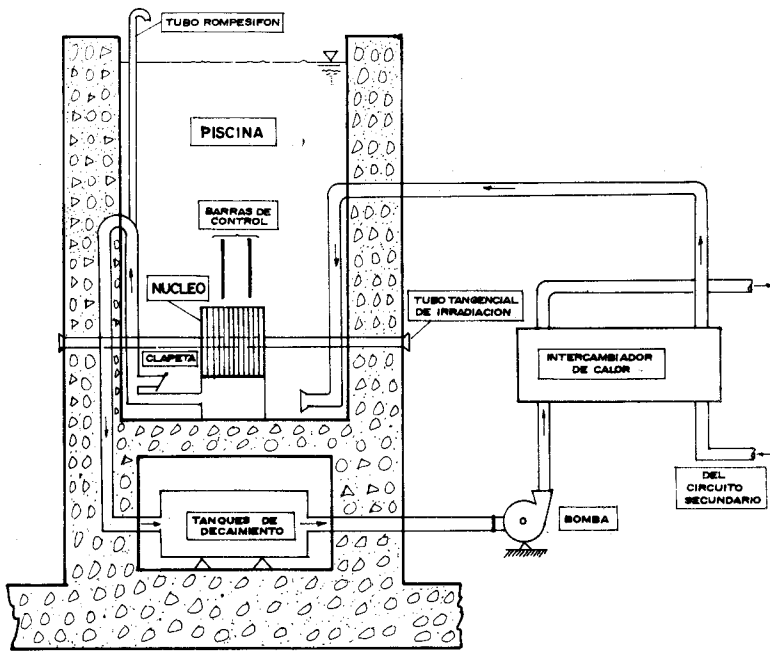


FIG. 1.a. ESQUEMA GENERAL DEL CIRCUITO PRIMARIO DE UN REACTOR NUCLEAR DEL TIPO PISCINA.

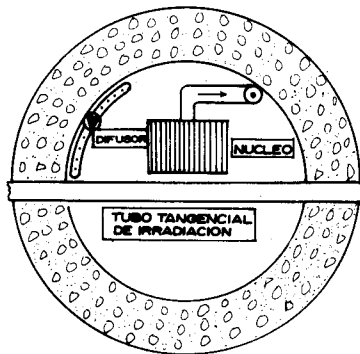


FIG. 1.b. VISTA SUPERIOR DE LA PISCINA

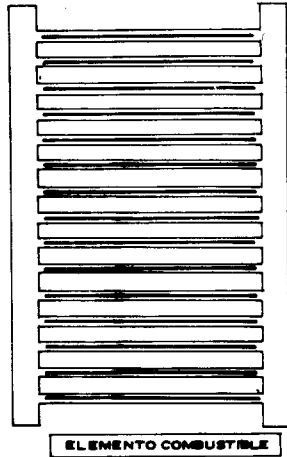
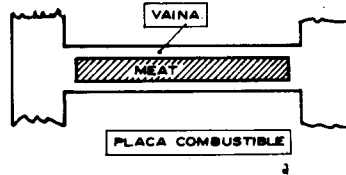


FIG. 2. ELEMENTO COMBUSTIBLE Y PLACA COMBUSTIBLE



## 2.FUNDAMENTO TEORICO.

### 2.1 Ecuaciones Fundamentales de la Transferencia de Calor.

2.1.1 Balance de Energía en la Placa Combustible.— Durante todo el estado transitorio el calor generado por unidad de volumen se mantiene a bajo valores, en base a lo cual se considera una temperatura promedio para cada sección de la placa combustible (\*).

$$\frac{\delta b \partial}{\partial z} (K_f \frac{\partial \theta}{\partial z}) + q' = \rho_f \delta b c_f \frac{\partial \theta}{\partial t} + 2bH(\theta - T) + 2b\sigma\epsilon(\theta^4 - T^4) \quad (1)$$

Esta ecuación es resuelta utilizando diferencias finitas explícitas.

2.1.2 Balance de Energía en el Refrigerante.— Durante la etapa del estado transitorio en la cual el refrigerante está en estado líquido, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\rho b e V C_p \frac{\partial \theta}{\partial z} = 2b\theta - \rho b e C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

(\*) La simbología de las fórmulas y ecuaciones se encuentran en el Apéndice.

Al producirse el estancamiento del fluido en el canal, se asume un modelo puntual para el líquido estancado. La temperatura promedio del refrigerante estancada se calcula de la siguiente forma,

$$\bar{T}(t) = \left( \sum_{i=1}^N T(t, i) \right) / N \quad (3)$$

Asimismo, el flujo de calor promedio transferido al fluido.

$$\bar{\phi}(t) = \sum_{i=1}^{N^*} \phi(t, i) / N^* \quad (4)$$

El incremento de la temperatura del fluido estancado se calcula de la forma siguiente:  
Si el nivel del líquido está por encima del punto N,

$$\Delta \bar{T} = \frac{2L \Delta t \bar{\phi}(t)}{\left( Z_{\ell} + \frac{L}{2} \right) C_P} \quad (5)$$

Si el nivel del líquido está por debajo de N,

$$\Delta \bar{T} = \frac{2 \Delta t \bar{\phi}(t)}{\rho e C_P} \quad (6)$$

Al alcanzarse la temperatura de saturación,  $T(t) + \Delta T = T_{sat}$ , cesa el incremento de la temperatura del líquido estancado, y se da inicio a la generación neta de vapor. El flujo de vapor en la interfase se calcula con la siguiente expresión,

$$\dot{m}_v(t + \Delta t) = \frac{1}{h_{fg}} \left( \bar{\phi} A - \frac{(\dot{m}_v(t) \Delta t - (Z_{\ell}(t) - Z_{\ell}(t + \Delta t)) b e \rho) C_P (T_{sat} - T_{PIS})}{\Delta t} \right) \quad (7)$$

donde: si el nivel del líquido está por encima de N,

$$A = 2bL \quad (8)$$

Si el nivel del líquido se encuentra por debajo de N,

$$A = 2b \left( \frac{L}{2} + Z_{\ell}(t) \right) \quad (9)$$

Por otro lado el flujo másico del vapor a lo largo de la parte descubierta del canal, se evalúa con la ecuación siguiente,

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial z} = - b e \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (10)$$

El incremento de la entalpía del canal se calcula de la ecuación siguiente,

$$\dot{m} \frac{\partial h}{\partial z} = 2b\theta - pbe \frac{\partial h}{\partial t} + 2b \sigma \epsilon (\theta^4 - T^4) \quad (11)$$

Conociendo la entalpía, la temperatura del vapor se calcula,

$$T(t, z) = f(h(t, z), p = 1 \text{ atm}) \quad (12)$$

Las ecuaciones (2), (10) y (11) se resuelven usando diferencias finitas explícitas, en forma simultánea con la ecuación (1).

**2.1.3 Temperatura de la Placa en los Extremos Inactivos.** Para evaluar la temperatura de la placa combustible en los extremos activos, se requiere conocer la temperatura en un punto adyacente, en el extremo inactivo. Se utiliza la siguiente ecuación,

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{2\bar{H}}{K_R} (\theta - T_\infty) + \frac{2\sigma\epsilon}{K_R \delta} (\theta^4 - T_\infty^4) \quad (13)$$

Quando se desprecia la radiación térmica, la ecuación anterior es de fácil integración analítica. Cuando la radiación adquiere importancia, la integración numérica se realiza utilizando la expansión de Taylor.

## 2.2 Generación y Distribución Longitudinal de la Potencia.

La potencia residual de generación de calor en toda la placa combustible se la evalúa separadamente en sus dos componentes. La potencia neutrónica es calculada a partir del modelo cinético puntual a 6 grupos de neutrones retardados, representado por el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales,

$$\frac{dP_n}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P_n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P_n - \lambda_i C_i \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (14)$$

La potencia residual de los productos de fisión es evaluada con un programa de cómputo especial.

Asumiendo la separabilidad de las variables espacial y temporal, el calor generado por unidad de longitud se calcula con la expresión siguiente,

$$q'(t, z) = \frac{RP(t)}{L \text{sen}(R)} \cos \left[ \frac{zR}{L} \left( z - \frac{L}{2} \right) \right] \quad (15)$$

## 2.3 Evolución del Caudal de Refrigeración.

$$v = v_o \sqrt{m_f} \operatorname{tg} \left( \operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{\sqrt{m_f}} - t \frac{\sqrt{m_f} \gamma Q_o H_c}{I \omega^2 \eta_i} \right) \quad (16)$$

Durante la etapa previa a la apertura de la clapeta se utiliza la siguiente expresión,

Después de la apertura de la clapeta y previamente el estancamiento del flujo se usa la ecuación siguiente,

$$\rho A_p \left( \sum \frac{\Delta L_i}{A_i} \right) \frac{dv}{dt} = - \rho g \beta L_t \Delta T - \left( \frac{\rho v^2}{2} + \Delta P_c \right) \quad (17)$$

Esta ecuación es resuelta con el método de Runge-Kutta de 4to. orden. Al producirse la inversión del flujo, la temperatura de ingreso del flujo de convección natural por la parte inferior del canal, es evaluada de la forma siguiente,

$$T_e = T_e^* + \frac{(T_s^* - T_e^*)}{FP} \quad (18)$$

Las pérdidas de carga en el circuito desde la clapeta hasta el extremo superior del núcleo, requeridas en la ecuación (17), se evalúan con la expresión siguiente,

$$\frac{\Delta P_c}{\gamma} = \sum f_i \frac{\Delta L_i}{D_i} \frac{v_i^2}{2g} + \sum K_i \frac{v_i^2}{2g} \quad (19)$$

## 2.4 Coeficientes de Convección.

2.4.1 Convección Forzada en Régimen Laminar.— Cuando el refrigerante, a su paso por el canal, se encuentra en régimen laminar,  $Re < 2100$ , se utiliza la correlación de Sieder-Tate [1].

$$Nu = 1.86 \left( Re \operatorname{Pr} \frac{D}{L_t} \right)^{0.33} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (20)$$

Las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura promedio del mismo, a excepción de  $\mu_s$  que se evalúa a la temperatura de la placa y  $Nu$  que se evalúa a la temperatura de película.

Si la velocidad de circulación es muy baja, el valor mínimo del  $Nu$ , correspondiente a la conducción de calor es el siguiente [2].

$$Nu = 3.66 \quad (21)$$

2.4.2 Convección Forzada en Régimen de Transición.— Cuando el  $Re$  está comprendido entre 2,100 y 10,000, se utiliza la correlación de Kreith [3].

$$\frac{H}{C_p} \frac{H}{V \rho} Pr^{0.66} \left(\frac{\mu_s}{\mu}\right)^{0.14} = A \quad (22)$$

donde para valores típicos de la relación  $L_t/D$  en elementos combustibles tipo MTR tenemos la expresión siguiente,

$$\log A = 0.683 \log^2 Re + 5.4576 \log Re - 13.2305 \quad (23)$$

Todas las propiedades se evalúan a la temperatura del fluido, a excepción de  $\mu_s$  que se calcula a la temperatura de la placa.

**2.4.3 Convección Forzada en Régimen Turbulento.-** Para valores de  $Re > 10,000$ , se emplea la analogía de Reynolds-Colburn [4].

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33} \quad (24)$$

Las propiedades se evalúan a la temperatura de película.

**2.4.4 Convección Natural con Flujo Invertido.-** Bajo este régimen el cálculo del coeficiente de convección se realiza utilizando la correlación de Vernier [5].

$$Nu = 3.83 \left( \frac{e^5 g \beta \theta Pr}{K v^2 L_t} \right)^{0.17} \quad (25)$$

Las propiedades se evalúan a la temperatura siguiente,

$$T_{0.6} = \theta - 0.6 (\theta - T) \quad (26)$$

El valor mínimo del  $Nu$ , correspondiente a la conducción de calor es  $Nu = 3.66$ .

**2.4.5 Convección Natural en Líquido Estancado.-** En este régimen se utiliza la correlación de Landis-Yanowitz [6].

$$H = \frac{2K}{e} 0.123 \left( \frac{e}{2L_t} \right)^{0.84} (Gr Pr)^{0.28} \quad (27)$$

Las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura de película.

El valor mínimo de  $H$ , correspondiente a la conducción de calor es el siguiente,

$$H = 0.2 \frac{K}{e} \quad (28)$$

**2.4.6 Líquido en Ebullición Sub-Enfriada y Saturada.-** Para el líquido estancado en ebullición, se utiliza la correlación de Rohsenow [7].

$$\frac{C_l(\theta - T_{sat})}{h_{fg}} = 0.013 \frac{d}{\mu_l h_{fg}} \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}^{0.33} \left( \frac{C_l \mu_l}{K_l} \right)^{1.7}$$



Las propiedades se evalúan de acuerdo a lo indicado por los subíndices.

2.4.7 Convección Natural en Aire.— En convección natural en canales parcialmente cerrados, se emplea la correlación de Siegel-Norris-Kreith [8].

$$Nu, e = 0.225 \left( Gr, e Pr \frac{e}{\Delta L} \right)^{0.325} \quad (30)$$

Las propiedades del aire se evalúan a la temperatura media, entre la de la placa y la del medio ambiente.

2.4.8 Flujo Laminar de Vapor.— Se utiliza la correlación de Sieder -Tate (20) o la de Hausen, [9].

$$Nu = 3.667 \frac{0.00668 Re Pr D/\Delta L}{1+0.04 (Re Pr D/\Delta L)^{0.66}} \quad (31)$$

Las propiedades se evalúan a la temperatura del fluido.

2.5 Grado Reducido de Radiación Integral.

El grado reducido de radiación integral, se define de la siguiente forma,

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_v} - 1} \quad (32)$$

donde  $\epsilon_p$ , la emisividad de la superficie de la placa, se calcula a la temperatura de la placa, y  $\epsilon_v$ , la emisividad del vapor, se evalúa a la temperatura del vapor si  $T > \theta$ , y a la temperatura de placa si  $T < \theta$

2.6 Descenso del Nivel del Líquido en la Piscina.

Cuando  $Z_l > R_t$ , el nivel del líquido es evaluado con la expresión siguiente,

$$Z_l(t) = \left( \sqrt{Z_0} - t \frac{A_s \sqrt{2g}}{A_e} \right)^2 \quad (33)$$

cuando  $Z_l < R_t$ ,  $Z_l$  es evaluada resolviendo la ecuación siguiente, [10].

$$\frac{dZ_l}{dt} = - \frac{2\sqrt{g}}{(Z_l + R_t)} \frac{\pi R_t^2}{A_e} \left( 1 - \frac{\alpha - \text{sen} \alpha}{2\pi} \right) (0.66 (Z_l + R_t))^{1.5} \quad (34)$$

donde se tiene lo siguiente,

$$\alpha = 2 \cos^{-1} \left( \frac{Z_l}{R_t} \right) \quad (35)$$

### 3. PROCEDIMIENTO DE CALCULO.

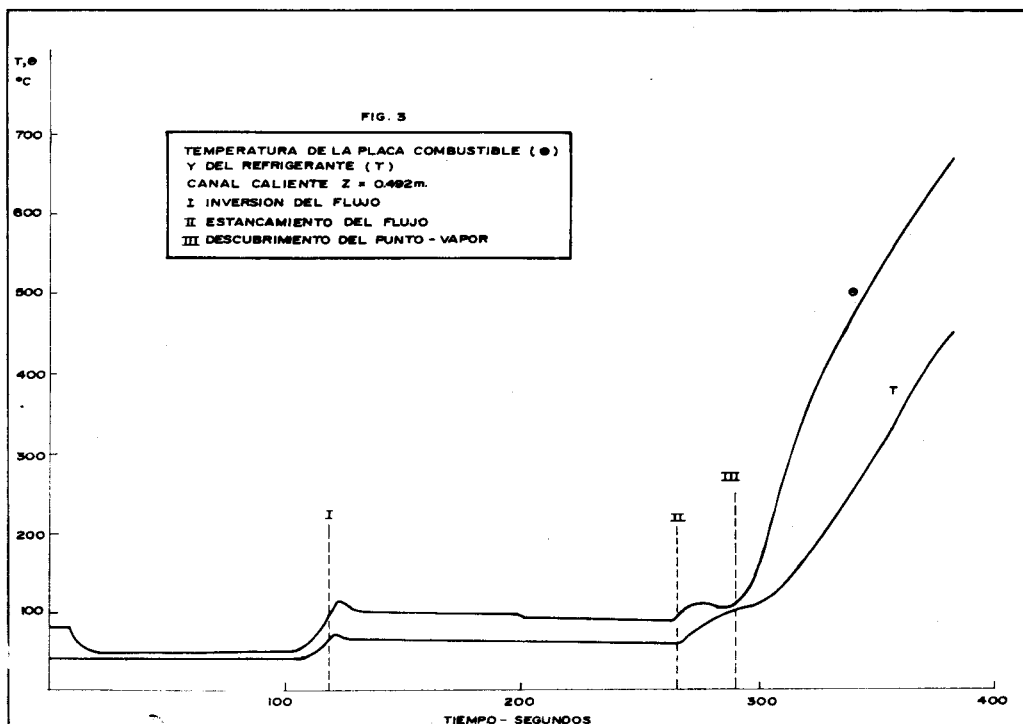
En forma resumida el procedimiento de solución de las ecuaciones descritas es el siguiente:

- Inicialmente se calcula el estado estacionario, con el reactor crítico. En el estado estacionario, para simplificar, se desprecia la conducción longitudinal de calor, encontrándose la distribución de temperaturas del refrigerante y de la placa combustible. No se considera la radiación térmica.
- En el estado transitorio, previamente a la apertura de la clapeta, la velocidad del refrigerante es calculada con la expresión (16). De (14) y la potencia residual de los productos de fisión

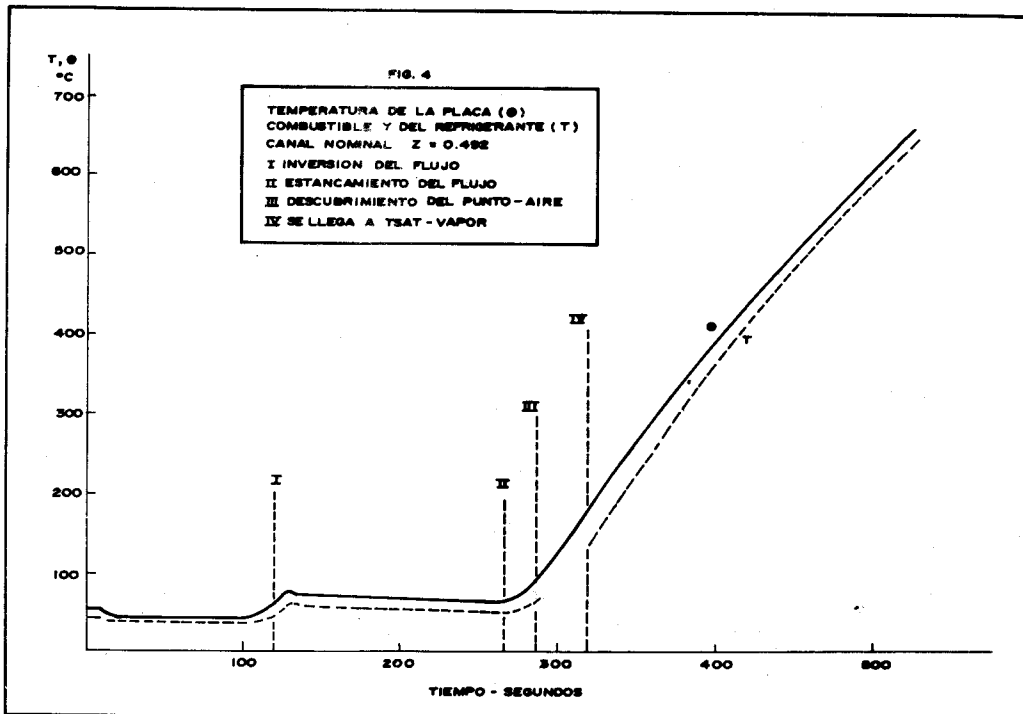
- se obtiene  $P(t)$ . Con (15) se calcula el calor generado por unidad de longitud. Resolviendo (13), con (1) y (2) van encontrándose las temperaturas de la placa y el refrigerante, para lo cual se ha utilizado el correspondiente valor de  $H$ . No se considera la radiación térmica.
- Cuando se produce la apertura de la clapeta, la velocidad se obtiene resolviendo (17), manteniéndose el mismo procedimiento descrito en b. Simultáneamente se calcula  $Z_l$  con la ecuación (33).
  - Al estancarse el flujo de convección natural, con (3) se evalúa la temperatura inicial del líquido estancado. El incremento de la temperatura del líquido se calcula con (4), (5) y (6). Mientras el fluido estancado no llega a la temperatura de saturación, se utiliza la expresión (30) y (1) para el cálculo de las temperaturas de la placa en la parte descubierta, y, (27), (28) ó (29), con (1), para la parte inferior. El nivel del líquido se sigue calculando con (33).
  - Al llegar el líquido a la temperatura de saturación, se calcula el flujo de vapor con (7), resolviendo (10), (11) y (12) se calcula la distribución de temperaturas en el vapor. Con (1) y (20) se evalúa la temperatura de la placa en la zona descubierta, considerando la radiación térmica. Con (1) y (29) se calcula la temperatura de la placa en la zona con el líquido en ebullición. Cuando el nivel del líquido en el canal ha descendido por debajo de la altura de la parte superior del tubo tangencial, el cálculo de  $Z_l$  se ejecuta resolviendo (35). El proceso continúa hasta que la placa llega a la temperatura de fusión, o se ha alcanzado el tiempo final de cálculo.

#### 4. EJEMPLO DE CALCULO.

Se han obtenido resultados para el caso de un reactor de 10Mw, con uranio enriquecido al 20 o/o, refrigerado y moderado con agua desmineralizada. Por razones de espacio, no se incluyen los datos requeridos por el programa.



Para el canal caliente la fusión de la vaina se produce a los 383 seg. y para el canal nominal a los 528 seg., de iniciado el accidente. Las figs. 3 y 4 ilustran la evolución de las temperaturas de la placa combustible y del refrigerante, en 1 punto de la zona crítica.



## 5. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.

- El programa de cómputo desarrollado permite efectuar el seguimiento del estado transitorio producido por la rotura del tubo tangencial de irradiación de un reactor tipo piscina.
- En el programa se asume que la transferencia de calor entre placas adyacentes y el flujo de calor por conducción desde el canal de refrigeración hacia la parte inferior son despreciables. Para tiempos largos esta asunción no es aceptable.
- La utilización de un sistema adicional de refrigeración que evitaría la fusión del núcleo depende de los resultados de un análisis del riesgo que se haga considerando el sistema de remoción de los productos de fisión y el recinto de contención, siendo factible que dada la escasa probabilidad del evento estemos en el caso de un riesgo aceptable.

## APENDICE : SIMBOLOGIA

- A Area o Sección transversal
- Ae Area de la sección transversal de la piscina
- Ap Area de la sección de paso del refrigerante en la zona de las placas combustibles
- As Area de la sección transversal del tubo tangencial
- b Ancho de la placa combustible
- C Concentración de los precursores de los neutrones retardados
- Cf Calor específico promedio de la placa combustible

$C_p$	Calor específico del refrigerante
$D$	Diámetro hidráulico
$e$	Distancia entre placas combustibles
$f$	Factor de fricción
$FP$	Factor de pico de concentración de potencia de generación de calor
$h$	Entalpía termodinámica
$H$	Coefficiente de convección, altura monométrica de la bomba hidráulica
$\bar{H}$	Coefficiente de convección promedio en el extremo inactivo de la placa
$I$	Momento de inercia
$K$	Conductividad térmica del refrigerante, constante de pérdida de carga secundaria
$K_f$	Conductividad térmica equivalente de la placa combustible
$K_r$	Conductividad térmica del material de la zona inactiva de la placa
$\varrho$	Tiempo entre generaciones de neutrones prontos
$L$	Longitud de la zona activa de la placa combustible
$L_t$	Longitud total de la placa combustible
$\Delta L$	Longitud desde el nivel del líquido al extremo superior de la placa, longitud de tramo de circuito hidráulico
$N$	Número de puntos de cálculo a lo largo de la placa combustible
$N^*$	Punto en el que se encuentra el nivel del líquido
$\dot{m}$	Flujo másico de vapor
$m_f$	Relación entre el momento por fricción y el de la bomba
$m_v$	Flujo másico de vapor en la interfase líquido-vapor
$p$	Presión
$\Delta p_c$	Pérdida de presión en circuito desde la clapeta y el extremo superior del núcleo
$P$	Potencia total generada en la placa combustible
$P_n$	Potencia neutrónica
$q'$	Calor generado por unidad de longitud
$Q$	Caudal
$R_t$	Radio de la sección transversal del tubo tangencial
$R$	Efecto del reflector
$t$	Tiempo
$\Delta t$	Intervalo temporal del cálculo
$T$	Temperatura del refrigerante
$\bar{T}$	Temperatura promedio del líquido estancado
$T^*$	Temperatura del refrigerante previa a la inversión del flujo
$T_{pis}$	Temperatura del líquido en la piscina
$T_{sat}$	Temperatura de saturación del refrigerante
$T_\infty$	Temperatura promedio del refrigerante en la zona inactiva de la placa
$\Delta T$	Diferencia de temperaturas entre la del canal y la de la piscina
$\Delta \bar{T}$	Incremento de la temperatura
$V$	Velocidad del refrigerante
$z$	Coordenada en la dirección longitudinal de la placa combustible
$Z_\varrho$	Distancia desde el centro de la placa combustible al nivel del líquido en la piscina
$Z_0$	Distancia desde el centro de la placa combustible al nivel inicial de la piscina.
$\alpha$	Angulo
$\beta$	Coefficiente de dilatación cúbica, fracción de neutrones retardados
$\gamma$	Peso específico
$\delta$	Espesor de la placa combustible
$\xi$	Grado reducido de radiación integral
$\eta_i$	Eficiencia interna de las bombas hidráulicas
$\theta$	Temperatura de las placas combustibles
$\lambda$	Constante de decaimiento de los precursores de los neutrones retardados
$\mu$	Viscosidad dinámica
$\nu$	Viscosidad cinemática

$\pi$	3.14159
$\rho$	Densidad del vapor, densidad del agua, reactividad
$\rho_f$	Densidad promedio de la placa combustible
$\sigma$	Constante de Stephan-Boltzman
$\phi$	Flujo de calor por unidad de área de convección
$\omega$	Velocidad angular de rotación

## SUB-INDICES

e	Entrada o aguas arriba
i	Término de serie
l	Líquido saturado
o	Estado inicial o estacionario
s	Salida o aguas abajo
v	Vapor saturado
fg	Evaporación

## NUMEROS ADIMENSIONALES

Número de Grashaf,  $Gr = \beta g L^3 \Delta T / \nu^2$

$$Gr, e = \beta g e^3 \Delta T / \nu^2$$

Número de Nusselt,  $Nu = HD / K$

$$Nu, e = He / K$$

Número de Prandtl,  $Pr = \mu C_p / K$

Número de Reynolds,  $Re = VD / \nu$

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Kreith, Frank, Principios de Transferencia de calor, Ed. Herrero Hermanos, Sucesores, S.A., México (1970) 422-423.
  2. Pitts, D.R. y Sissom, L.E., Transferencia de Calor, Ed. McGraw-Hill Latinoamericana S.A. (1979) 138-139.
  3. Kreith, Frank, Op. Cit., p. 424-425.
  4. Pitts, D.R. y Sissom, L.E., Op. cit., p. 168-170.
  5. Fábrega, Serge, Le Calcul Thermique des Reacteurs de Recherche Refroidis par Eau, Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, Informe CEA-R-4114 (1971) 40.
  6. Laudis, F. y Yanowitz, H. Transient Natural Convection in a narrow Vertical Cell, Actas de la tercera conferencia internacional de Transferencia de Calor (1966) 139-151.
  7. Tong, L.S. Boiling Heat Transfer and two Phase Flow, Ed. John Wiley & Sons, INC, New York (1965) 28-29.
  8. Siegel, R. y Norris, R.H., Tests of Free Convection in a Partially Enclosed Space Between Two Heated Vertical Plates, Transactions of the ASME, 79 (1957) 663-673.
  9. Pitts, D.R. y Sissom, L.E. Op. cit., p. 138-139.
  10. Shames, Irving, La Mecánica de los fluidos, Ed. McGraw-Hill, New York (1967) 535-537.
-

