

“ESTUDIO TERMOHIDRÁULICO PARA UNA FUTURA DUPLICACIÓN DE POTENCIA DEL REACTOR DE INVESTIGACIÓN RECH-1 DE CHILE, DE LA COMISIÓN CHILENA DE ENERGÍA NUCLEAR SEDE LA REINA”

CURSO: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE

Nombre Alumno: Claudio Mella
Director de Trabajo Final: David Parkansky



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

***“ESTUDIO TERMOHIDRÁULICO PARA UNA FUTURA DUPLICACIÓN DE
POTENCIA DEL REACTOR DE INVESTIGACIÓN RECH-1 DE CHILE, DE LA
COMISIÓN CHILENA DE ENERGÍA NUCLEAR SEDE LA REINA”***

Nombre Alumno: Claudio Mella
Director de Trabajo Final: David Parkansky

Diciembre - 2007

Resumen

Como parte del curso de especialización en “Reactores Nucleares y su Ciclo de Combustible”, es requisito desarrollar un proyecto de Seminario/Tesina en alguna de las áreas tratadas en el curso y que generen un aporte al desarrollo personal e institucional con los conocimientos adquiridos en las aplicaciones pacíficas de la energía atómica.

Este trabajo consiste en evaluar las condiciones necesarias para que el actual reactor de investigación RECH-1 de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, de 5 MW de Potencia pueda elevarla a 10 MW garantizando la integridad del núcleo y las condiciones termo hidráulicas de seguridad.

Para el estudio se fijó una configuración de núcleo para una potencia de 10 MW y se determinaron todos los parámetros termo hidráulicos más importantes para el núcleo como el caudal de refrigeración, temperaturas a lo largo del canal y del sistema en general, las condiciones de flujo calórico crítico, y otras modificaciones en el sistema, considerando situaciones lo más conservativas posibles, de tal manera que se garanticen las condiciones para una operación segura.

Considerando la disponibilidad de información, los alcances del trabajo incluyeron algunos aspectos del sistema primario y secundario de refrigeración.

Finalmente se fijaron los nuevos parámetros de operación y variación en los componentes del sistema de tal manera de cumplir con todos criterios termohidráulicos y limitantes del sistema.

Índice

Resumen	2
Introducción	6
Capítulo 1: El Reactor RECH1	8
1.1.- Condiciones de Operación.....	9
1.2.- Núcleo y Grilla del Reactor.....	9
1.3.- Los Elementos Combustibles LEU.....	10
1.4.- Circuito Primario de refrigeración.....	13
1.5.- Circuito Secundario de Refrigeración.....	14
Capítulo 2: Consideraciones y Fórmulas Utilizadas para los Cálculos Termohidráulicos	16
2.1.- Consideraciones para los Cálculos.....	16
2.2.- Cálculos Geométricos.....	16
2.3.- Cálculos físicos del Canal Caliente.....	17
2.4.- Singularidades en la Caída de Presión de la Caja de Elementos Combustibles.....	18
2.5.- Presión en el Punto Caliente.....	19
2.6.- Temperatura de Ebullición en el Punto Caliente.....	20
2.7.- Potencia de Redistribución.....	20
2.8.- Flujo Calórico (ϕ_{DNB}) de Burn Out y de la Relación Mínima de DNB (R_{DNB}).....	20
2.9.- Cálculo de la Potencia para Generar Ebullición en el Punto Caliente.....	21
2.10.- Coeficientes de Incertidumbre.....	21
2.11.- Ecuaciones Utilizadas en el Código “Termic I”.....	23
Capítulo 3: Validación del Modelo de Cálculo Termohidráulico para el Reactor a 5 MW	27
3.1.- Datos Físicos.....	27
3.2.- Canal Caliente.....	27

3.3.- Caída de Presión en una Caja de Elementos Combustibles.....	27
3.4.- Presión en el Punto Caliente.....	28
3.5.- Temperatura de Ebullición en el Punto Caliente.....	28
3.6.- Potencia de Redistribución.....	28
3.7.- Flujo Calórico (ϕ_{DNB}) de Burn Out y de la Relación Mínima de DNB (R_{DNB}).....	28
3.8.- Cálculo de la Potencia para Generar Ebullición en el Punto Caliente.....	29
3.9.- Comportamiento Térmico a lo largo del Canal Caliente Considerando Coeficientes de Incertidumbre.....	29
3.10.- Sistema Primario de Refrigeración.....	30
3.11.- Sistema Secundario de Refrigeración.....	30

**Capítulo 4: Desarrollo del Cálculo Termohidráulico para el Reactor a 10
MW.....**

4.1.- Información de Entrada para el Cálculo.....	32
4.2.- Cálculos Geométricos.....	33
4.3.- Cálculos Físicos del Canal Caliente.....	33
4.4.- Cálculo de la Caída de Presión en el Punto Caliente.....	33
4.5.- Cálculo de la Temperatura de Ebullición en el Canal Caliente.....	34
4.6.- Cálculo de la Potencia de Redistribución.....	34
4.7.- Cálculo del Flujo Calórico (ϕ_{DNB}) de Burn Out y de la Relación Mínima de DNB (R_{DNB}).....	34
4.8.- Cálculo de la Potencia para generar Ebullición en el Punto Caliente.....	34
4.9.- Cálculo de la Caída de Presión en una Caja de Elementos Combustibles..	34
4.10.- Comportamiento Térmico a lo largo del Canal Caliente Considerando Coeficientes de Incertidumbre.....	35
4.11.- Sistema Primario de Refrigeración.....	36
4.12.- Sistema Secundario de Refrigeración.....	36

Capítulo 5: Conclusiones.....

5.1.- Núcleo.....	38
5.2.- Sistema Primario de Refrigeración.....	38
5.3.- Sistema Secundario de Refrigeración.....	39
5.4.- Comentarios.....	40

Referencias	41
Anexo I	42
Anexo II	44
Anexo III	55

Introducción

El principal factor que limita la potencia que se puede tener en un reactor nuclear es la temperatura máxima que se alcanza en los elementos combustibles. Es por esto que el principal componente a analizar es el núcleo del reactor. Para el caso de aumentar la potencia de un reactor, determinar los parámetros de operación y evaluar su comportamiento frente a un aumento del flujo calórico y caudal de refrigeración es crucial para garantizar su integridad a lo largo de toda su vida útil.

Para los cálculos se considera la peor condición termohidráulica posible, lo que significa tener criterios sumamente conservativos al momento de evaluar su condición y los resultados que de esto se desprenden.

Esto conlleva a tener que realizar modificaciones y/o cambios de algunos de los equipos y a una alteración de su configuración de funcionamiento actual, tanto en el sistema primario como secundario de refrigeración.

Este informe presenta en detalle los cálculos necesarios para evaluar estos aspectos y que se dividen básicamente en tres partes, la primera relativa a las condiciones termo hidráulicas en el núcleo, la segunda al sistema primario de refrigeración y la tercera al sistema secundario de refrigeración.

Previo a los cálculos para determinar las condiciones del reactor para una potencia de 10 MW, se validó el modelo termohidráulico propuesto, comparando los cálculos teóricos obtenidos con los valores actuales de operación del reactor para una potencia de 5 MW.

La primera parte consiste en calcular:

- Las condiciones termohidráulicas de operación en el canal más caliente
- La caída de presión en el núcleo
- Los parámetros críticos en el núcleo como, temperatura de ebullición, potencia de redistribución y flujo calórico de DNB.

La segunda parte comprende el cálculo de:

- Las condiciones hidráulicas del caudal de refrigeración.
- Las condiciones térmicas del caudal de refrigeración en relación al intercambiador de calor
- Las características de operación del estanque de decaimiento

La tercera parte considera el evaluar:

- El estado y disponibilidad de los equipos de refrigeración actuales para el sistema secundario.
- La configuración de operación que haga factible la extracción de calor solicitada.

Para introducir los coeficientes de incertidumbre en los cálculos termohidráulicos realizados, se utilizó el código TERMIC I, el cual previamente se modificó y adaptó a las características y condiciones de operación del reactor de Chile Rech-1.

Capítulo 1: El Reactor RECH-1

El reactor RECH-1 fue diseñado basándose en el reactor HERALD perteneciente al United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA) ubicado en Aldermaston. La potencia del reactor es de 5 MW y es moderado y refrigerado con agua liviana desmineralizada, siendo el combustible del tipo MTR (Material Testing Reactor).

El calor generado por el núcleo es disipado por circulación forzada de agua a través de los canales que quedan entre las placas de los elementos combustibles. El flujo de agua es descendente y proporcionado por dos de cuatro bombas. El calor del núcleo es transferido a un segundo circuito, produciéndose la descarga térmica al ambiente mediante una torre de enfriamiento ubicada en las inmediaciones del edificio del reactor.

Entre los parámetros más importantes del reactor se encuentran los siguientes:

Combustible	Elemento combustible tipo MTR de 16 placas planas
Núcleo	Configurado con 32 elementos combustibles
Potencia térmica	5 MW
Núcleo crítico	20 elementos combustibles
Moderador	Agua liviana
Reflector	Berilio
Blindaje	Hormigón de alta densidad y agua liviana
Refrigeración	Comprende un circuito primario, intercambiador de calor de placa, circuito secundario y torre de enfriamiento.
Purificación de agua	Desmineralización continua de una parte del agua del circuito primario
Control del reactor	Mediante seis placas de control de cadmio envainadas en acero inoxidable
Instalaciones experimentales	Tres tubos de haces radiales Un tubo tangencial pasante con dos salidas Dos terminales para irradiación mediante inyección y extracción neumática de muestras Dos tubos verticales secos

1.1.- Condiciones de Operación:

Temperatura máx. de la placa	98 °C
Caudal del circuito primario	654 m ³ /h
Temperatura de entrada del agua al núcleo	35 °C
Temperatura media de salida del agua del núcleo	41,6 °C
Caída de presión en el núcleo	0,15 kg/cm ²
Caudal del circuito secundario	723 m ³ /h
Temperatura de entrada del agua del circuito secundario al intercambiador de calor	29 °C
Temperatura de salida del agua del intercambiador de calor	35 °C
Vida media efectiva de los neutrones instantáneos	6,63x10 ⁻⁵ s
Número de placas de control	6
Tipo de las placas de control	Vertical, caída por gravedad
Material absorbente	Cadmio
Reactividad de las placas de control	-16,0 \$
Velocidad de retiro de las placas de control	2,5 cm/min
Velocidad de inserción de reactividad por retiro de las placas de control	0,012 \$/s
Retardo en el desprendimiento de las placas de control	< 0,075 s

1.2.- Núcleo y Grilla del Reactor

El núcleo está configurado sobre una grilla de aluminio de 3 secciones de 10x8 perforaciones, en la cual se ubican los diferentes tipos de elementos que forman el núcleo: elementos combustibles, elementos reflectores de berilio, elementos de aluminio sólido, elementos de obturación, terminales del sistema neumático y posiciones de irradiación.

Sobre la caja soporte del núcleo se encuentra la grilla del reactor en la que se insertan los distintos elementos que configuran el núcleo.

La grilla es una placa rectangular de aluminio de 664 mm por 781 mm y 120 mm de espesor y tiene 80 perforaciones. La grilla está subdividida en tres placas que tienen 20, 30 y 30 perforaciones, respectivamente. Entre las uniones de estas placas existen tres ranuras que permiten el paso de las placas de control. Las perforaciones

tienen un arreglo cuadrado con paso de 76,2 mm, ocupando cada perforación un elemento del núcleo.

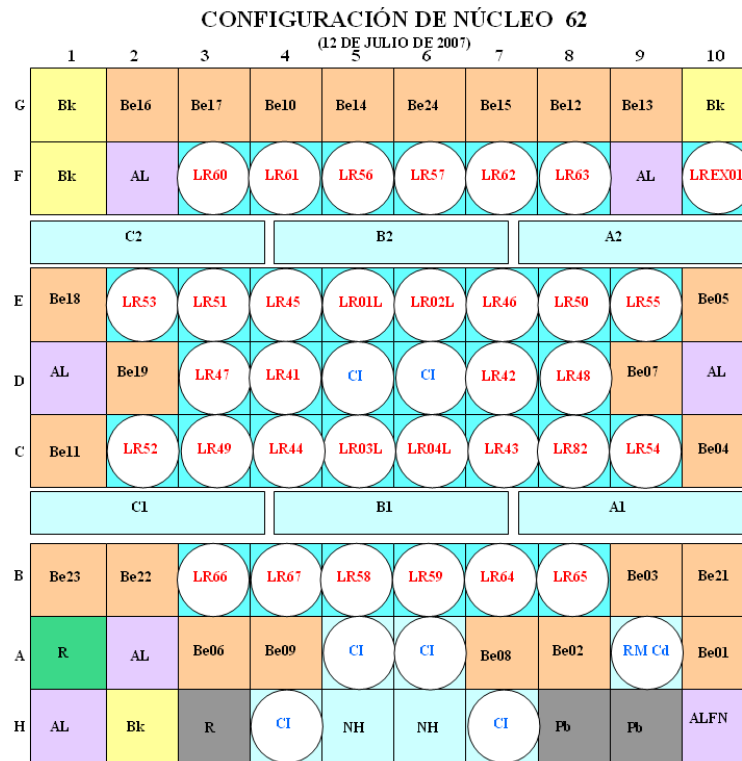


Figura n° 1: Configuración del Núcleo

1.3.- Los Elementos Combustibles LEU.

Dimensiones del EC, mm ³	74,740 x 74,549 x 985,7
Número de placas combustibles	16 placas planas
Espesor de la placa, mm	1,53
Espesor del canal de agua, mm	3,17
Composición del meat	U ₃ Si ₂ - Al
Dimensiones del meat:	
Espesor, mm	0,61
Ancho, mm	60,15
Longitud, mm	581,05
Espesor del cladding, mm	0,46
Enriquecimiento, % (de U-235)	19,75
Densidad del U-235 en el meat:	
Placa externa, g/cm ³	0,336

Placa interna, g/cm ³	0,672
U-235 por placa:	
Placa externa, g	7,16
Placa interna, g	14,32
Densidad del uranio en el meat:	
Placa externa, g/cm ³	1,7
Placa interna, g/cm ³	3,4
Uranio por placa:	
Placa externa, g	36,24
Placa interna, g	72,48
U-235 por elemento combustible, g	214,80
Uranio por elemento combustible, g	1087,59

Diagrama General del Elemento Combustible del RECH-1

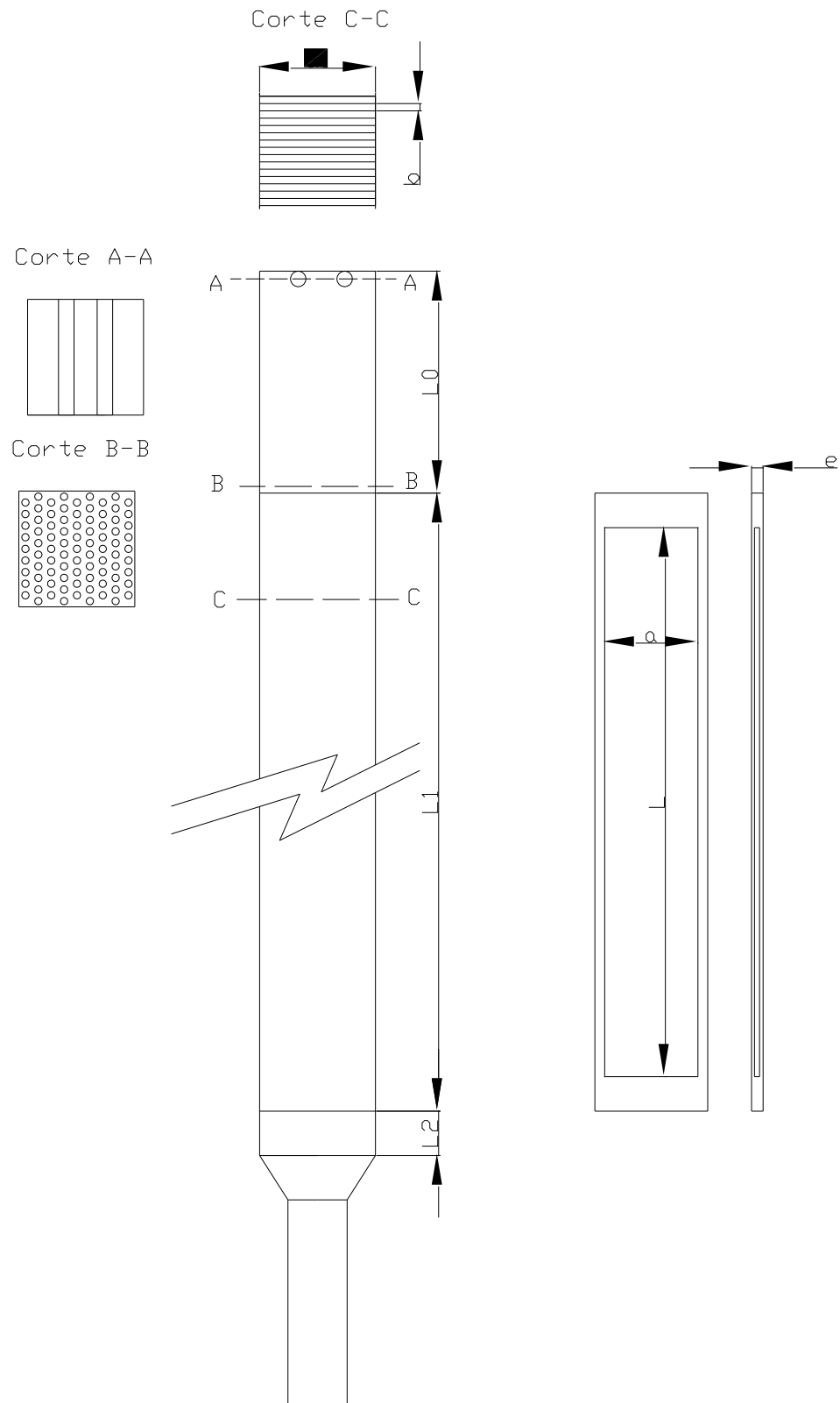


Figura n° 2: Elemento Combustible RECH-1

1.4.- Circuito Primario de refrigeración

El circuito primario de refrigeración extrae el calor generado en el núcleo del reactor y lo transfiere al circuito secundario a través de un intercambiador de calor para su descarga al ambiente a través de una torre de enfriamiento original o una torre de enfriamiento modular.

Disposición General: El circuito primario de refrigeración se encuentra en su totalidad en el interior del edificio de contención, para una potencia de operación del reactor de 5 MW, se utiliza un caudal de 655 m³/h

Los principales componentes de este circuito son:

- Tanque de decaimiento
- Bombas de agua
- Intercambiador de calor

El agua del circuito fluye en forma descendente a través de todos los elementos que configuran el núcleo, posteriormente pasa al tanque de decaimiento, desde donde es impulsada por las bombas hacia el intercambiador de calor, para volver al reactor pasando por la piscina secundaria.

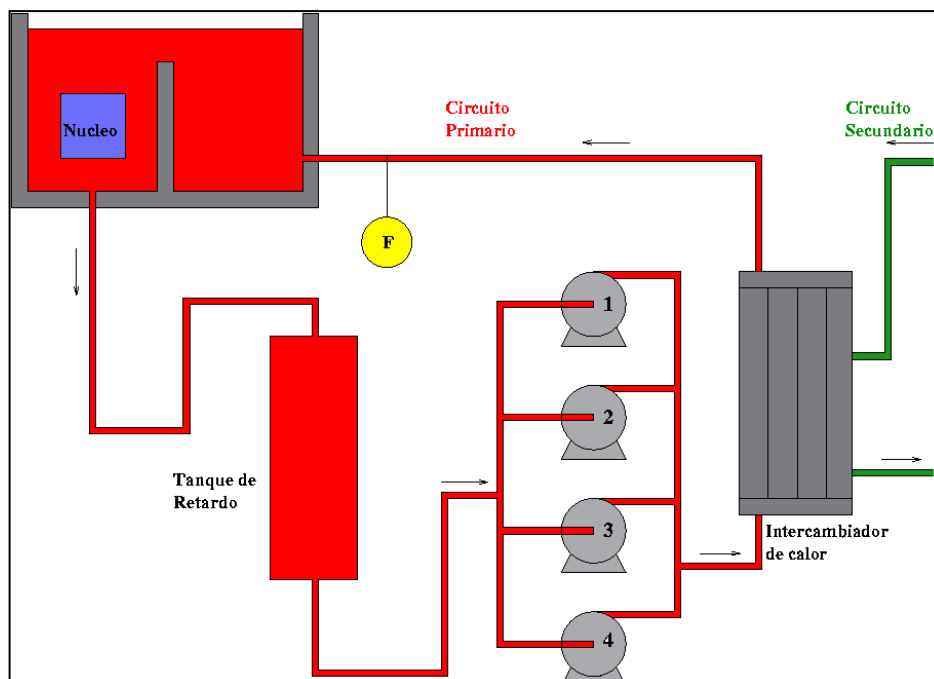


Figura nº 3: Circuito Primario de Refrigeración

1.5.- Circuito Secundario de Refrigeración

El circuito secundario de refrigeración toma el calor generado por el núcleo del reactor en el intercambiador de calor y lo descarga al ambiente mediante torres de enfriamiento ubicadas fuera del edificio del reactor.

Disposición General: El circuito secundario de refrigeración se encuentra casi en su totalidad en el exterior del edificio de contención del reactor, sólo las tuberías que llegan al intercambiador, se encuentran en el túnel de este edificio.

Se dispone de dos torres de enfriamiento de igual capacidad de descarga de calor, ambas se encuentra a unos 50 m al noreste del edificio del reactor. Las bombas del circuito secundario y sus correspondientes válvulas, se encuentran ubicadas en el costado sur de la torre original. La Fig. 5 muestra una ilustración de la torres.

El caudal del circuito secundario para la operación del reactor a 5 MW es de 723 m³/h, siendo el agua de refrigeración succionada por las bombas desde una pequeña piscina anexa a la torre de enfriamiento original. La temperatura media del agua a la entrada del intercambiador es de 29 °C y la temperatura media de salida es de 35 °C. El agua que alimenta al circuito secundario es agua potable tratada con anti incrustantes y antioxidantes, en verano, además, se le agrega un alguicida.

Los principales componentes de este circuito son:

- Torres de enfriamiento
- Bombas de agua
- Intercambiador de calor

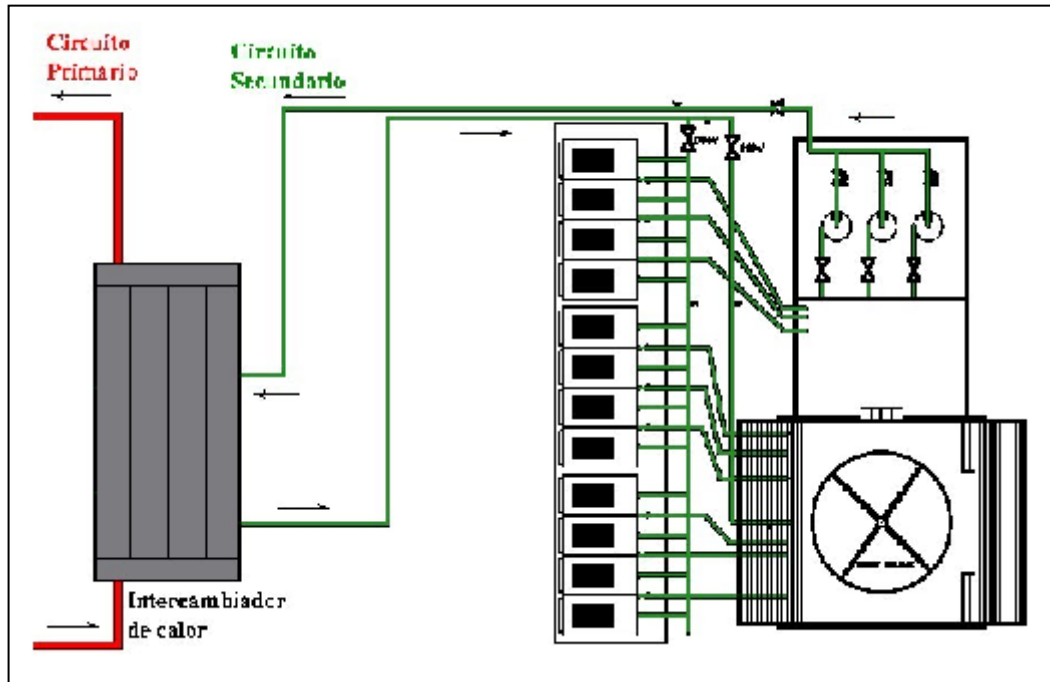


Figura nº 4: Circuito Secundario de Refrigeración



Figura nº 5: Circuito Secundario de Refrigeración

Capítulo 2: Consideraciones y Fórmulas Utilizadas para los Cálculos Termohidráulicos

2.1.- Consideraciones para los Cálculos

- Primero los cálculos se realizaron en una planilla Excel⁽¹⁾, sin considerar los coeficientes de incertidumbre. Y posteriormente se recalcularon usando el código de cálculo “TERMIC I”, el cual se modificó según las características y configuraciones del reactor Rech-1⁽²⁾.
- El caudal real de pasaje del núcleo corresponde al 97% del valor nominal. Información que fue calculada y medida por el personal del reactor, en trabajos anteriores a este.
- Se considerará una temperatura máxima de pared de 98 °C, que es el valor establecido como límite y condición de operación por la autoridad reguladora.

Este valor tiene como finalidad prevenir la ocurrencia de fenómenos críticos como el DNB y Redistribución. Existen 2 tipos de límites a considerar:

- Límite de Protección a largo plazo: T_{PARED}
- Límite de Seguridad de corto plazo: DNB y Redistribución

Como ambos fenómenos son posteriores a la ebullición nucleada, dada la gran diferencia, se prefiere fijar como límite la temperatura máxima de pared que es menor a la temperatura de ebullición para evitar que se produzcan los otros fenómenos destructivos.

- El caudal de refrigeración es una incógnita. Se utiliza un método de cálculo iterativo, donde el valor del caudal se va ajustando de acuerdo a los resultados obtenidos, comparándolo con los límites y condiciones de operación que se tienen para el reactor Rech-1.
- Al no conocer los factores de pico tanto axial como radial, se considerará un factor K total igual a 3, valor bastante conservador y que es conocido para los reactores de investigación en argentina.

2.2.- Cálculos Geométricos

Superficie calefactora de una placa:

$$S_{CP}(m^2) = 2 * a * L$$

Número de placas en el núcleo con Dens. 3,4:

(1) El archivo tiene el nombre “REACTOR RECH-1” y se encuentra como material digital anexo al informe.

(2) El programa fuente con sus modificaciones está incluido en el anexo II

$$NPN_1 = NC * (NP - 2)$$

Número de placas en el núcleo con Dens. 1,7:

$$NPN_2 = NC * 2$$

Superficie calefactora del núcleo: $S_{CN}(m^2)$

$$S_{CN}(m^2) = S_{CP} * \left(NPN_1 + \frac{NPN_2}{2} \right)$$

Superficie de pasaje de fluido de un canal entre placas:

$$S_{PC}(m^2) = a_1 * b$$

Perímetro mojado de un canal:

$$P_M(m) = 2 * (a_1 + b)$$

Diámetro hidráulico de un canal:

$$D_H(m) = \frac{4 * S_{PC}}{P_M}$$

Superficie de pasaje del núcleo:

$$S_{PN}(m^2) = S_{PC} * [NC * (NP-1)]$$

2.3.- Cálculos físicos del Canal Caliente

Potencia generada en el canal caliente:

$$Pot_{CC}(W) = \frac{Pot_N * 1000000}{NP_{N1} + NP_{N2} / 2} * \frac{K_T}{K_a}$$

Velocidad del refrigerante en el núcleo:

$$V\left(\frac{m}{seg}\right) = \frac{Q_N / 3600}{SP_N * 0.97}$$

Caudal de refrigeración del canal caliente:

$$Q_{CC}\left(\frac{m^3}{seg}\right) = V * S_{PC}$$

Temperatura de salida del canal caliente:

$$T_{SCC}(^{\circ}C) = T_E + \frac{Pot_{CC}}{Q_{CC} * \rho * Cp}$$

Temperatura media de salida en el Núcleo

$$T_{MN}(^{\circ}C) = T_E + \frac{Pot_N}{Q * \rho * Cp}$$

NOTA: Se asume que el punto caliente de mayor temperatura en la vaina, se produce en la cota $Z_{PC}=0.6*L$, a partir de la entrada al canal y una variación lineal de temperatura del refrigerante.

Cota punto caliente:

$$Z_{PC} \text{ (m)} = 0,6 * L$$

Temperatura refrigerante en ZPC:

$$T_{ZPC} \text{ (}^\circ\text{C)} = T_E + 0,6 * (T_{SCC} - T_E)$$

Flujo calórico medio:

$$\phi_{Med} \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{Pot_N}{S_{CN}}$$

Flujo calórico máximo:

$$\phi_{Max} \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{Pot_N}{S_{CN}} * K_T$$

NOTA: Para calcular la temperatura máxima de pared, se debe elegir la correlación de coeficiente h de convección ⁽³⁾ con el número de Reynolds (Re), y calcular T_{pmax}, utilizando como datos, la temperatura del refrigerante en el punto caliente (T_{ZPC}), la velocidad(V), el diámetro hidráulico(D_H) y el flujo calórico máximo ϕ_{max} .

Temperatura Máxima de Pared (vaina):

$$T_{P_{Max}} \text{ (}^\circ\text{C)} = T_{ZPC} + \frac{\phi_{Max}}{h}$$

2.4.- Singularidades en la Caída de Presión de la Caja de Elementos Combustibles

Tipo 1: Tramo recto:

$$\Delta P = \Lambda * \frac{L}{D_H} * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$Re = \frac{V * D_H * \rho}{\mu}$$

para $Re < 3500$, régimen laminar,

$$\text{para } 3500 < Re < 100000, \quad \Lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

$$\text{para } Re > 100000, \quad \Lambda = \frac{0.186}{Re^{0.2}}$$

Se asume pared lisa

Tipo 2: Puesta en velocidad:

$$\Delta P = 0.5 * \frac{V_2^2}{2 * g}$$

(3) Ver anexo I referido a H.Convección

Tipo 3: Contracción brusca:

$$\Delta P = K * \frac{V_2^2}{2 * g}$$

$$\text{Si } \frac{S_{P1}}{S_{P2}} < 0.715 \quad \Rightarrow \quad K = 0.4 * \left(1.25 - \frac{S_{P2}}{S_{P1}} \right)$$

$$\text{Si } \frac{S_{P1}}{S_{P2}} \geq 0.715 \quad \Rightarrow \quad K = 0.75 * \left(1 - \frac{S_{P2}}{S_{P1}} \right)$$

Tipo 4: Expansión brusca:

$$\Delta P = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2 * g}$$

Tipo 5: Reducción Venturi - Entrada Boquilla.

$$\Delta P = A_1 * L_C * \frac{V_M^{1.75}}{\phi_M^{1.25}}$$

$$A_1 = 0.316 * \frac{\sqrt[4]{\mu / \rho}}{2 * g}; \quad V_M = \frac{Q}{S_M}; \quad S_M = \frac{S_{P1} - S_{P2}}{\log(S_{P1} / S_{P2})}$$

2.5.- Presión en el Punto Caliente; Pzpc (m.c.a.)

La presión estática será igual a la suma de la presión hidrostática (presión atmosférica + la altura líquida), menos la caída de presión desde la entrada, hasta dicha cota y menos la componente dinámica de la presión ($V^2 / 2g$).

Presión atmosférica: Patm (m.c.a.)

Altura de agua de la pileta sobre el núcleo: HL (m.c.a.)

Altura de agua desde la entrada al canal hasta el punto caliente: HN (m.c.a.)

Presión hidrostática:

$$P_{HST} \text{ (m.c.a.)} = Patm + H_L + H_N$$

Caída de presión hasta punto caliente por fricción:

$$\Delta P_{PC} \text{ (m.c.a.)}^{(4)}$$

Componente dinámico de la presión:

$$P_{DIN} = \frac{V^2}{2 * g}$$

(4) Ver anexo I referido a Caída de Presión

Presión en el punto caliente:

$$P_{ZPC} \text{ (m.c.a.)} = P_{HST} - \Delta P_{PC} - P_{DIN}$$

2.6.- Temperatura de Ebullición en el Punto Caliente; T_{eb} ($^{\circ}C$)

Temperatura de saturación:

$$T_{ZPC \text{ sat}} (^{\circ}C) = 100 * \left(\frac{P(m.c.a.)}{10,33} \right)^{0,255}$$

Sobresaturación de ebullición (Correlación de Foster and Greif):

$$\Delta T_{sat} (^{\circ}C) = 4,57 * \frac{\left(\frac{\phi_{Max} (W / m^2)}{10000} \right)^{0,35}}{\left(\frac{P(m.c.a.)}{10} \right)^{0,23}}$$

Temperatura de Ebullición:

$$T_{EB} (^{\circ}C) = T_{SAT} + \Delta T_{SAT}$$

2.7.- Potencia de Redistribución (Fórmula de Fabrega - CNG - CEA)

Factor de redistribución:

$$R = \frac{1}{1 + 315 * \frac{D_H (m)}{100 * L(m)} * (108 * V(m/s))^{0,29}}$$

Presión a la salida del canal caliente: $P_{sal} \text{ (m.c.a.)}^{(5)}$

Temperatura de saturación a la salida del canal caliente:

$$T_{sat_s} (^{\circ}C) = 100 * \left(\frac{P_{Sal} (m.c.a.)}{10,33} \right)^{0,255}$$

Relación de redistribución:

$$R_{RED} = \frac{Pot_{RED}}{Pot_{REACTOR}} = R * \frac{T_{sat_s} - T_E}{T_{SCC} - T_E}$$

Potencia de Redistribución:

$$Pot_{RED} (MW) = Pot_N * R_{RED}$$

2.8.- Flujo Calórico (ϕ_{DNB}) de Burn Out y de la Relación Mínima de DNB (R_{DNB})

Se asume que $R_{DNB \text{ mín}}$ se produce en el punto caliente, siendo la relación entre ϕ_{DNB} y ϕ_{max} .

Flujo de DNB en ZPC (Correlación de Mirshark):

$$\phi_{DNB} \left(\frac{W}{cm^2} \right) = 98,15 * (1 + 0,12 * V(m/s)) * [1 + 0,00914 * (T_{ZPC sat} - T_{ZPC})] * \left(1 + 0,193 * \frac{P(m.c.a.)}{10,33} \right)$$

Relación mínima de DNB:

$$R_{DNB \min} = \frac{\phi_{DNB}}{\phi_{Max}}$$

2.9.- Cálculo de la Potencia para Generar Ebullición en el Punto Caliente

Potencia para Ebullición: Pot_{EB} (MW) ⁽⁶⁾

Relación Potencia para Ebull / Potencia Nominal: R_{EB}

$$R_{EB} = \frac{Pot_{EB}}{Pot_N}$$

2.10.- Coeficientes de Incertidumbre⁽⁷⁾:

Incertidumbre sobre la temperatura de entrada:

Se admite comúnmente DTE = 2 °C

Incertidumbre sobre el calentamiento del agua:

- Tenor de Uranio de una placa	F1 = 1,02
- Medida de la Potencia	F2 = 1,05
- Variación de la superficie	F3 = 1,05
- Variación de la sección del canal como consecuencia de la tolerancia sobre la distancia entre placas	F4 = 1,10
- Variación de la velocidad en el canal nominal con relación a las velocidad nominal	F5 = 1,10

$$Fa = F1 * F2 * F3 * F4 * F5 = 1,36$$

Incertidumbre sobre la caída de temperatura entre la pared y la vena líquida:

- Repartición del Uranio	F6 = 1,08
- Tenor de U de la placa	F1 = 1,02
- Espesor de U	F7 = 1,10
- Medida de potencia	F2 = 1,05
- Validez de la formula de Colburn	F8 = 1,25
- Variación de la velocidad a causa de la tolerancia entre placas	F5 = 1,10

(6) Ver anexo I referido a R1 en Ebull

(7) Información textual de la referencia nº (2)

$$F_b = F_6 * F_1 * F_7 * F_2 * F_8 * F_5 = 1,75$$

Incertidumbre sobre la temperatura de saturación del agua. (T_{sat})

1.- Incertidumbre sobre la presión estática al nivel de la extremidad superior de las placas.

- Variación de la presión atmosférica F9 = 4%
- Descenso del nivel del agua por debajo de su nivel normal F10 = 1%
- Variación del peso específico del agua debido a las variaciones de temperatura F11 = 0,5%

2.- Variación sobre la velocidad con relación a la velocidad nominal.

$$F5 = 10\%$$

3.- Variación de la expresión de pérdida de carga por frotamiento

$$F12 = 10\%$$

4.- Validez de la expresión de pérdida de cargas singulares

$$F13 = 10\%$$

Incertidumbre sobre el sobrecalentamiento (ΔT_{sat})

1.- Incertidumbre sobre el flujo superficial

- Repartición del Uranio F6 = 1,08
- Tenor en uranio de una placa F1 = 1,02
- Espesor del uranio F7 = 1,10
- Medida de potencia F2 = 1,05

$$F_c = F_2 * F_1 * F_7 * F_6 = 1,27$$

2.- Validez de la fórmula empleada

$$F14 = 20\%$$

Estos valores de los coeficientes de incertidumbre son los utilizados por los franceses para sus reactores de investigación. Lo correcto es determinar nuevamente los valores para cada reactor en particular.

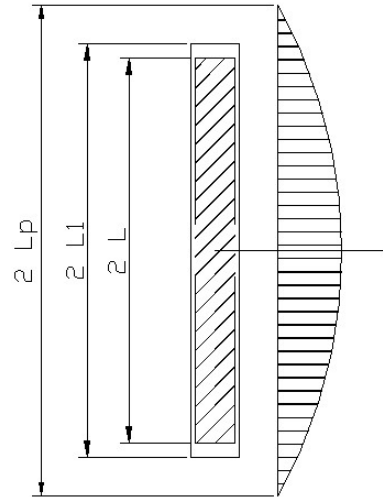
2.11.- Ecuaciones Utilizadas en el Código “Termic I”⁽⁸⁾:

1.- Se admite una distribución axial cosenoidal del flujo calórico $\phi(z)$ centrado en el plano medio del canal caliente.

$$\phi(z) = \phi_0 * \text{Cos}\left(\frac{\pi}{2 * L_p} * Z\right) \left(\frac{W}{\text{cm}^2}\right)$$

Donde L_p es la longitud extrapolada del flujo neutrónico (cm)

Para agua liviana $L_p = L + 7,5$



2.- Evolución de la temperatura del agua (°C) a lo largo del canal.

$$T(z) = T_E + \frac{1}{4,186 * \rho * C_p * V * P_B} * \int_{-L}^z \phi(z) dz$$

Siendo en el sistema de unidades utilizado

$\rho = 1$ (g/cm³) (densidad del agua)

$C_p = 1$ (cal/gr) (Calor específico del agua)

$P_B = \frac{S}{P_C}$ (área del canal/perímetro calefactor)

$$\text{Resultado: } T(z) = T_E + \frac{1}{4,186 * V * P_B} * \phi_0 * \frac{2 * L_p}{\pi} \left(\text{sen} \frac{\pi}{2 * L_p} * z + \text{sen} \frac{\pi}{2} \frac{L}{L_p} \right)$$

O bien $T(z) = T_E + \Delta(z)$

Teniendo en cuenta los coeficientes de incertidumbre correspondientes la ecuación es:

$$T(z) = T_E + \Delta T_E + Fa = \Delta(z)$$

3.- Evolución de la Temperatura de Pared:

El salto de temperatura entre la pared y el agua está dado para cada posición z por:

$$T_p(z) - T(z) = \frac{\phi(z)}{h(z)} \quad (5)$$

Donde $h(z)$, que es el coeficiente de intercambio para convección forzada, se expresa mediante la relación de Colburn.

$$Nu = \frac{h * D}{\lambda} = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,4} \quad (6)$$

$$\text{Y haciendo } K(T_F) = 4,18 * 0,023 * \rho^{0,8} \left(\frac{Cp}{\mu} \right)^{0,4} * K * 0,6 \quad (7)$$

$$\text{Se obtiene } h(z) = K(T_F) * \frac{V_1^{0,8}}{D_1^{0,2}} \quad (8)$$

Donde V_1 es la velocidad en (m/s), D_1 es el diámetro hidráulico expresado en (mm) y $T_F(z) = (T_P(z) + T(z)) / 2$ es la temperatura del film entre la pared y el líquido.

Reemplazando en (5) y si tenemos en cuenta el coeficiente de incertidumbre resulta:

$$T_P(z) = T(z) + F_B * \frac{\phi_0}{K(T_F) * \frac{V_1^{0,8}}{D_1^{0,2}}} * \cos\left(\frac{\pi}{2 * L_P} * z\right) \quad (9)$$

La función $K(T_F)$ se puede expresar con coeficientes de aproximación, dentro del rango de valores utilizados, mediante:

$$K(T_F) = 0,255 * T_F^{0,355} \quad (10)$$

Como $K(T_F)$ es función de $T_P(z)$, el cual inicialmente es desconocido, el programa realiza un cálculo iterativo, (comenzando con $T_P(z) = T_F(z) = T(z)$) hasta que la diferencia entre 2 valores sucesivos de $T_P(z)$ sea inferior a 0,1 °C.

4.- Evolución de la Temperatura de Saturación:

$$T(z) = 100 * \left(\frac{P(z)}{P_{ATM}} \right)^{0,255} \quad (11)$$

$P(z)$ es la presión estática absoluta en la cota z

P_{ATM} es la presión atmosférica

$T(z)$ sat se expresa en °C

4.1.- Evolución de la Presión $P(z)$ a lo largo del canal (cm.c.a)

$$P(z) = P_{ATM} + H_L + L + Z - \Delta P(z) - \frac{V^2}{2 * g} \quad (12)$$

Donde $\Delta P(z)$ es la pérdida de carga entre la entrada del canal y la cota z . $\Delta P(z)$ es la suma de un término $\Delta P(z)_e$ de pérdida singular de entrada y de la pérdida de carga en el canal $\Delta P(z)_L$.

$$\Delta P(z)_e \cong 0,5 * \frac{V^2}{2 * g} \quad (13)$$

$$\Delta P(z)_L = 0,316 * v^{0,25} * (L_1 + Z) * \frac{V^{1,75}}{2 * g * D^{1,25}} \quad (14)$$

Donde: $g = 981 \text{ (cm/s}^2\text{)}$

Y v en cm^2/s se calcula a partir de:

$$v = \frac{\frac{13,24/T(z) - 3,4321}{T(z)} + 0,3427}{T(z)} - 0,8258 * 10^{-4} \quad (15)$$

v (cm^2/s) es la viscosidad cinemática del agua

Si tomamos en cuenta los coeficientes de incertidumbre la ecuación (12) es:

$$P(z) = \frac{P_{atm}}{F_9} + \frac{H_L + L + Z}{F_{10} * F_{11}} - \Delta P(z) * F_5 * F_{12} - F_5 * \frac{V^2}{2 * g} \quad (16)$$

5.- Cálculo del sobrecalentamiento $\Delta T(z)_{sat}$ ($^{\circ}\text{C}$)

Para que se inicie la ebullición local en una zona de la vaina es necesario que su temperatura en dicha zona supere a la temperatura de saturación $T(z)_{SAT}$ en un cierto valor $\Delta T(z)_{sat}$ denominado sobre calentamiento. Para valores de presión $P(z)$ entre 1 y 50 atmósferas el valor de $\Delta T(z)_{sat}$ es expresable por la relación de Foster y Grif:

$$\Delta T(z)_{SAT} = 4,57 * \frac{\phi(z)^{0,35}}{PI(z)^{0,23}} \quad (17)$$

$PI(z)$ en $\text{Kg/cm}^2 = P(\text{cm.c.a}) \times 10^{-3}$

$\phi(z)$ en watt/cm^2

5.1.- Temperatura de Ebullición ($^{\circ}\text{C}$)

$$\text{Es: } T_{EB}(z) = T(z)_{SAT} + \Delta T(z)_{SAT} \quad (18)$$

En caso de tener en cuenta los factores de incertidumbre la ecuación sería:

$$T_{EB}(z) = T(z)_{SAT} + \frac{\Delta T(z)_{SAT}}{F_5} \quad (19)$$

6.- Finalmente el programa compara las curvas de $T_{eb}(z)$ y $T_p(z)$: buscando su punto de contacto, se encuentra el flujo calórico y la posición del punto caliente, que evitan justamente la ebullición local en el canal, teniendo en cuenta los factores de incertidumbre.

Capítulo 3: Verificación del Modelo de Cálculo e Información Termohidráulicas del Reactor a 5 MW

3.1.- Datos Físicos

Potencia generada en el núcleo: $POT_N(MW)$	5
Factor de forma radial: K_r	1.52
Factor de forma axial: K_a	1.32
Factor de Pico: K_P	1.5
Factor de forma total: $K_T = K_r * K_a * K_P$	3
Caudal de impulsión de las Bombas: Q_B	654
<u>Caudal de refrigeración del núcleo (97%): $Q_N(m^3/hr)$</u>	634
Temperatura de entrada del refrigerante al núcleo: $T_E(^{\circ}C)$	35

3.2.- Canal Caliente

Potencia generada en el canal caliente: $Pot_{CC}(W)$	23674
<u>Velocidad del refrigerante en el núcleo: $V(m/s)$</u>	1.78
Caudal de refrigeración del canal caliente: $Q_{CC}(m^3/s)$	0.000367
Temperatura de salida del canal caliente: $T_{SCC}(^{\circ}C)$	50.55
<u>Temperatura media a la salida del Núcleo: $T_{MSN}(^{\circ}C)$</u>	41.84
Cota en el punto caliente: $Z_{PC} (m)$	0.3486
Temperatura refrigerante en Z_{PC} : $T_{ZPC}(^{\circ}C)$:	44.3
Flujo calórico medio: $\phi_{Med}(W/m^2)$	149022
Flujo calórico máximo: $\phi_{Max}(W/m^2)$	447061
<u>Temperatura Máxima de Pared (vainas): $T_{PMax}(^{\circ}C)$</u>	84.47

3.3.- Caída de Presión en una Caja de Elementos Combustibles

1) Entrada a la caja, puesta en velocidad. Tipo 2	0.08252
2) Expansión brusca. Tipo 4	0.01674
3) Tramo recto de caja, previo a los canales combustibles. Tipo 1	0.00304
4) Contracción Brusca entrada Placa restrictora de caudal	0.24674
5) Expansión Brusca salida Placa restrictora de caudal	0.17664
6) Tramo recto, correspondiente a los canales combustibles. Tipo 1	0.47819
7) Expansión brusca, de salida de los canales combustibles. Tipo 4	0.01556
8) Tramo recto de caja, posterior a los canales combustibles. Tipo 1	0.00061

9) Reducción Venturi - Entrada Boquilla. Tipo 5	0.00028
10) Tramo recto, correspondiente a la boquilla. Tipo 1	0.06269
11) Expansión brusca, de salida de grilla. Tipo 4	0.7426
$\Delta P_{\text{NUCLEO(m.c.a.)}}$:	$\Sigma = 1.8256$
Caída de Presión Medida	1.76 (kg/cm ²)
	Error
	Diferencia 0.0656
	% 3.729

3.4.- Presión en el Punto Caliente; P (m.c.a.)

Presión atmosférica: $P_{\text{atm(m.c.a.)}}$	9.33
Altura de agua de la pileta sobre el núcleo: H_L (m.c.a.)	7.5
Altura de agua desde la entrada del canal hasta el punto caliente:	
H_N (m.c.a.)	0.52
Presión hidrostática: $P_{\text{HST}} \text{ (m.c.a.)} = P_{\text{atm}} + H_L + H_N$	17.35
Caída de presión hasta punto caliente por fricción: $\Delta P_{\text{PC(m.c.a.)}}$	0.810
Componente dinámico de la presión: $P_{\text{DIN(m.c.a.)}}$	0.16
<u>Presión en el punto caliente: $P_{\text{ZPC(m.c.a.)}}$</u>	16.38

3.5.- Temperatura de Ebullición en el Punto Caliente; T_{eb} (°C)

Temperatura de saturación: $T_{\text{ZPCsat}} \text{ (°C)}$	112.47
Sobresaturación de ebullición: $\Delta T_{\text{Sat}} \text{ (°C)}$	15.43
<u>Temperatura de Ebullición: $T_{\text{EB}} \text{ (°C)}$</u>	127.9

3.6.- Potencia de Redistribución (Fórmula de Fabrega - CNG - CEA)

Factor de redistribución: R	0.993
Presión a la salida del canal caliente: $P_{\text{sal(m.c.a.)}}$	16.19
Temperatura de saturación a la salida del canal caliente: $T_{\text{SatSal}} \text{ (°C)}$	112.14
<u>Relación de redistribución: R_{RED}</u>	4.93
<u>Potencia de Redistribución: $P_{\text{OTRED}} \text{ (MW)}$</u>	24.63

3.7.- Flujo Calórico (ϕ_{DNB}) de Burn Out y de la Relación Mínima de DNB (RDNB)

Flujo de DNB en ZPC: $\phi_{\text{DNB}} \text{ (W/cm}^2\text{)}$	252.41
--	--------

3.8.- Potencia para Generar Ebullición en el Punto Caliente

Potencia para Ebullición: $Pot_{Eb}(MW)$

13.55

Relación Potencia para Pot_{Eb} / Pot_N

2.711

3.9.- Comportamiento Térmico a lo largo del Canal Caliente Considerando Coeficientes de Incertidumbre.

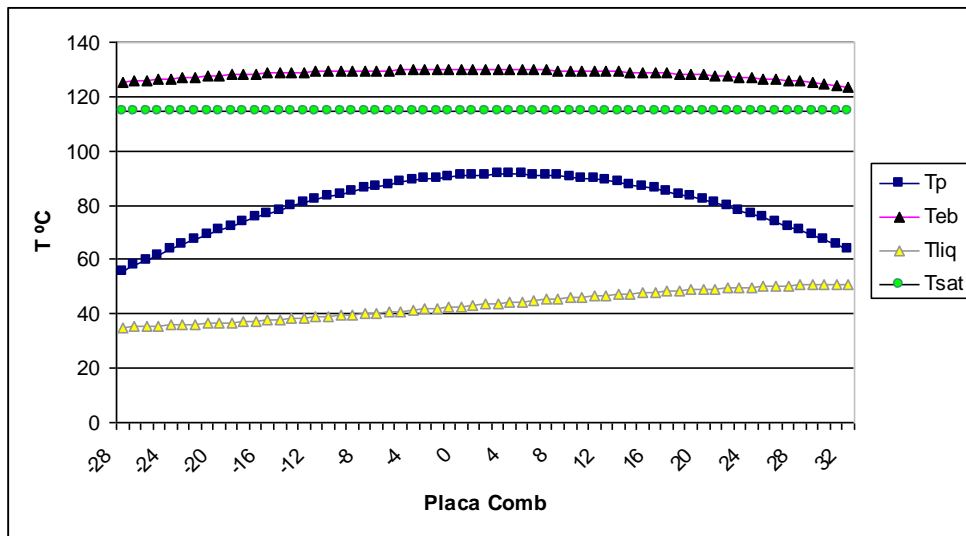


Figura n° 6.- Curvas de la T° Pared, Ebullición, Líquido y Saturación en el EC

$T_E =$	35	°C	$V =$	178	cm/s
$\varnothing =$	44.91	W/cm2	$Q =$	634.75	m3/h
Pot =	5.02	MW	$\Delta T =$	5.46	°C
REP =	17472.57		$\Delta H =$	177.52	cm.c.a
FRD =	199.08	W/cm2	$R_R =$	4.43	
$T_P \text{ max} =$	91.8	°C			

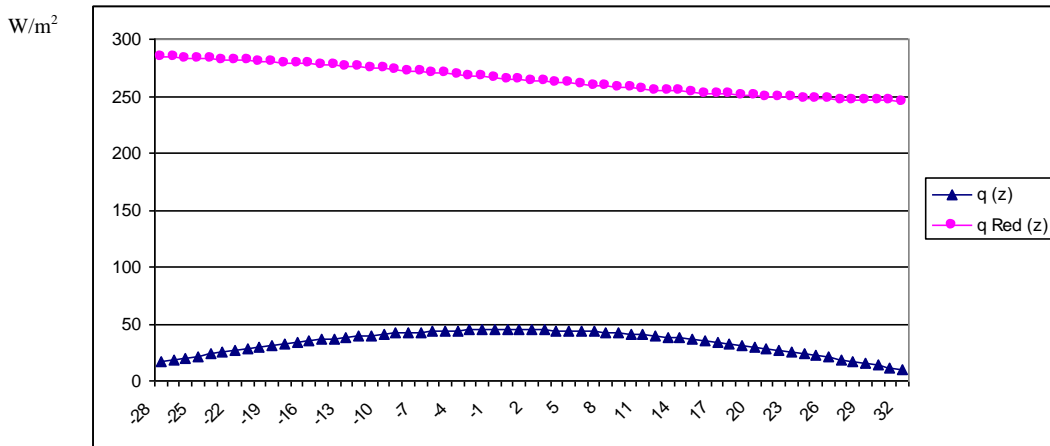


Figura n° 7.- Curva del flujo calórico y de Red a lo largo de la placa combustible

3.10.- Sistema Primario de Refrigeración

Caudal total de refrigeración (m ³ /h)	654
Caídas de Presión: (m.c.a)	
Núcleo	1.826
Tanque de Decaimiento	2.0
Intercambiador de Calor ⁽⁹⁾	9.5
Tuberías	2.74
Singularidades	3.1
$\Delta P_{\text{SISTEMA(m.c.a)}}:$	$\Sigma = 19.14$
$\Delta P_{\text{MEDIDO(m.c.a)}}:$	26

Las bombas de impulsión del sistema son marca J&S. El punto de operación es de 327 (m³/h) con una pérdida de carga de 26 (m.c.a.).

La altura máxima de carga es de 42.67 (m.c.a)

3.11.- Sistema Secundario de Refrigeración

Caudal total de refrigeración (m ³ /h)	723
Las características de la torre de enfriamiento en uso actual son:	
Tipo:	DZ
Modelo:	8M2-4-V100Z-5.5
T°C de Entrada	29
T°C de Salida	35
T°C Bulbo Húmedo	21
Disipación Máxima (KCal/h)	4320000
(MW)	5.0232
Bombas de impulsión:	
Nº Total disponibles	3
En funcionamiento normal	2
Capacidad individual (m ³ /h)	361.5

(9) Información declarada por la empresa APV proveedora del equipo.

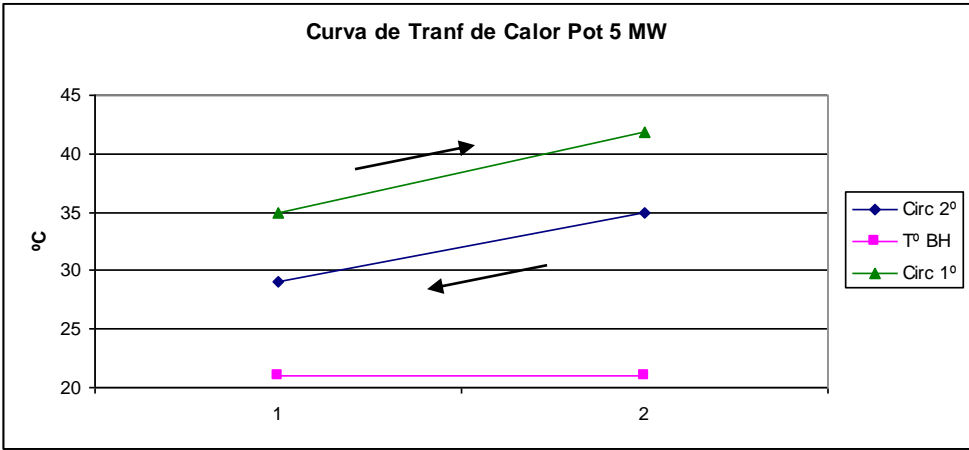


Figura n° 8.- Representación térmica de los circuito de refrigeración

Capítulo 4: Desarrollo del Cálculo Termohidráulico para el Reactor a 10 MW

4.1.- Información de Entrada para el Cálculo

Datos Geométricos

Núcleo y Elemento Combustible

Número de cajas tipo: NC	32
Número de cajas con barra de control: NCBC	0
Número de placas por caja normal: NP	16
Número de placas por caja con barra de control: NPBC	0

Placa Combustible

Espesor placa combustible e (m)	0.00153
Ancho activo: a(m)	0.06015
Largo activo: L(m)	0.5811

Canal de Refrigeración entre Placas

Espesor: b(m)	0.00317
Ancho: a1(m)	0.0651
L0 (m)	0.1429
L2 (m)	0.0285
Boquilla: L3 (m)	0.16558
Largo canal (largo placas Exteriores): L _{1e} (m)	0.6509
Largo canal (largo placas Interiores): L _{1i} (m)	0.6255

Datos Físicos

Potencia generada en el núcleo: POT _N (MW)	10
Factor de forma radial: K _r	1.52
Factor de forma axial: K _a	1.32
Factor de Pico: K _p	1.5
Factor de forma total ⁽¹⁰⁾ : K _T = K _r * K _a * K _p	3
<u>Caudal de impulsión de las Bombas: Q_B</u>	1300
<u>Caudal de refrigeración del núcleo (97%): Q_N(m³/hr)</u>	1261
Temperatura de entrada del refrigerante al núcleo: T _E (°C)	35

(10) Se considero el valor usado en los reactores de investigación argentinos, por ser un valor más conservativo.

4.2.- Cálculos Geométricos

Superficie calefactora de una placa: $S_{CP}(m^2)$	0.0699
Número de placas en el núcleo con Dens. 3,4: NPN_1	448
Número de placas en el núcleo con Dens. 1,7: NPN_2	64
Superficie calefactora del núcleo: $S_{CN}(m^2)$	33.55
Superficie de pasaje de fluido de un canal entre placas: $S_{PC}(m^2)$	0.00021
Perímetro mojado de un canal: P_M (m)	0.13654
Diámetro hidráulico de un canal: $D_H(m)$	0.00605
Superficie de pasaje del núcleo: $S_{PN}(m^2)$	0.09906

4.3.- Cálculos Físicos del Canal Caliente

Potencia generada en el canal caliente: $Pot_{CC}(W)$	47348
<u>Velocidad del refrigerante en el núcleo</u> : $V(m/s)$	3.536
Caudal de refrigeración del canal caliente: $Q_{CC}(m^3/s)$	0.000730
Temperatura de salida del canal caliente: $T_{SCC}(^{\circ}C)$	50.64
Temperatura media a la salida del Núcleo: $T_{MSN}(^{\circ}C)$	41.88
Cota en el punto caliente: Z_{PC} (m)	0.3486
Temperatura refrigerante en Z_{PC} : $T_{ZPC}(^{\circ}C)$:	44.4
Flujo calórico medio: $\phi_{Med}(W/m^2)$	298043
Flujo calórico máximo: $\phi_{Max}(W/m^2)$	894130
<u>Temperatura Máxima de Pared</u> (vaina): $T_{PMax}(^{\circ}C)$	89.86

4.4.- Cálculo de la Caída de Presión en el Punto Caliente P (m.c.a.)

Presión atmosférica: $P_{atm}(m.c.a.)$	9.33
Altura de agua de la pileta sobre el núcleo: H_L (m.c.a.)	7.5
Altura de agua desde la entrada del canal hasta el punto caliente: H_N (m.c.a.)	0.52
Presión hidrostática: P_{HST} (m.c.a.) = $P_{atm} + H_L + H_N$	17.35
Caída de presión hasta punto caliente por fricción: $\Delta P_{PC}(m.c.a.)$	3.03
Componente dinámico de la presión: $P_{DIN}(m.c.a.)$	0.64
<u>Presión en el punto caliente</u> : $P_{ZPC}(m.c.a.)$	13.68

4.5.- Cálculo de la Temperatura de Ebullición en el Canal Caliente, T_{EB} (°C)

Temperatura de saturación: T_{ZPCsat} (°C)	107.43
Sobresaturación de ebullición: ΔT_{Sat} (°C)	20.49
<u>Temperatura de Ebullición: T_{EB} (°C)</u>	127.92

4.6.- Cálculo de la Potencia de Redistribución (Fórmula de Fabrega-CNG-CEA)

Factor de redistribución: R	0.994
Presión a la salida del canal caliente: P_{sal} (m.c.a.)	13.04
Temperatura de saturación a la salida del canal caliente: T_{SatSal} (°C)	108.92
<u>Relación de redistribución: R_{RED}</u>	4.70
<u>Potencia de Redistribución: Pot_{RED}(MW)</u>	46.99

4.7.- Cálculo del Flujo Calórico (ϕ_{DNB}) de Burn Out y de la Relación Mínima de DNB (RDNB)

Flujo de DNB en ZPC: ϕ_{DNB} (W/cm ²)	276.68
<u>Relación mínima de DNB: $R_{DNBmín}$</u>	3.09

4.8.- Cálculo de la Potencia para generar Ebullición en el Punto Caliente

<u>Potencia para Ebullición: Pot_{Eb}(MW)</u>	25.63
Relación Potencia para Pot_{Eb} / Pot_N	2.563

4.9.- Cálculo de la Caída de Presión en una Caja de Elementos Combustibles

1) Entrada a la caja, puesta en velocidad. Tipo 2	0.32607
2) Expansión brusca. Tipo 4	0.06613
3) Tramo recto de caja, previo a los canales combustibles. Tipo 1	0.01046
4) Contracción Brusca entrada Placa restrictora de caudal	0.97492
5) Expansión Brusca salida Placa restrictora de caudal	0.69796
6) Tramo recto, correspondiente a los canales combustibles. Tipo 1	1.59126
7) Expansión brusca, de salida de los canales combustibles. Tipo 4	0.06147
8) Tramo recto de caja, posterior a los canales combustibles. Tipo 1	0.00209
9) Reducción Venturi - Entrada Boquilla. Tipo 5	0.00094
10) Tramo recto, correspondiente a la boquilla. Tipo 1	0.21592
11) Expansión brusca, de salida de grilla. Tipo 4	2.9343

$\Delta P_{\text{NUCLEO(m.c.a.)}}$:

6.8815

$\Delta P_{\text{PC(m.c.a.)}}$ desde la entrada al punto caliente:

3.030

$\Delta P_{\text{SC(m.c.a.)}}$ desde la entrada a la salida del canal:

3.667

$\Delta P_{\text{S(m.c.a.)}}$ desde el punto caliente a la salida

0.637

4.10.- Comportamiento Térmico a lo largo del Canal Caliente Considerando Coeficientes de Incertidumbre.

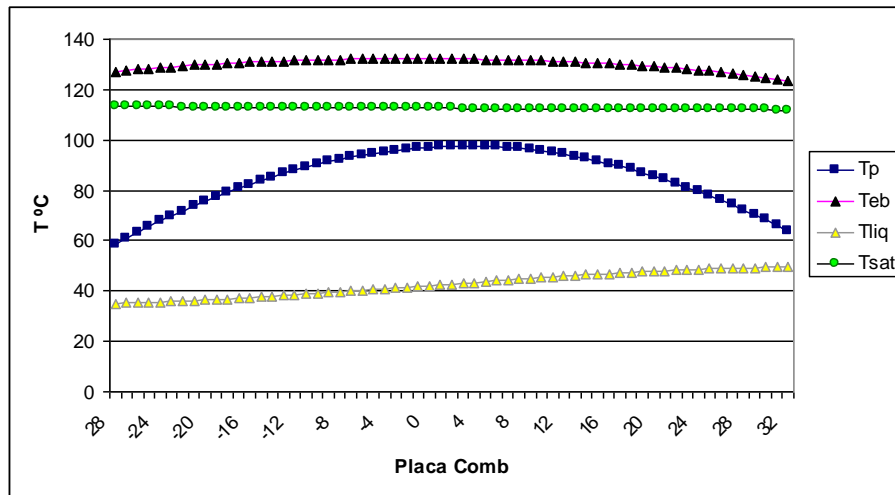


Figura nº 9.- Curvas de la T° Pared, Ebullición, Líquido y Saturación en el EC

$T_E =$	35	°C	$V =$	354	cm/s
$\emptyset =$	89.61	W/cm ²	$Q =$	1262.37	m ³ /h
Pot =	10.02	MW	$\Delta T =$	5.48	°C
REP =	34766.46		$\Delta H =$	697.39	cm.c.a
FRD =	370.48	W/cm ²	$R_R =$	4.13	
$T_P \text{ max} =$	97.56	°C			

Tabla nº 10.- Características de operación para el reactor a 10 MW

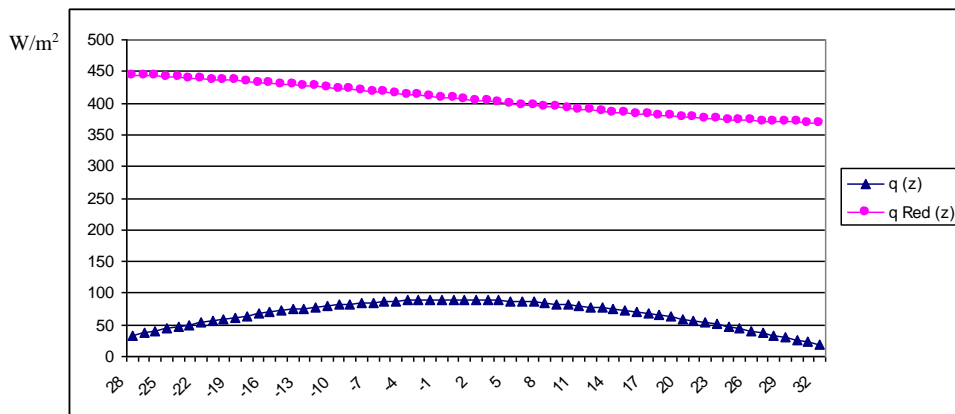


Figura nº 11.- Curva del flujo calórico y de Red a lo largo de la placa combustible

Las características de la torre de enfriamiento Modular en uso actual son:

Tipo:	DZ
Modelo:	8M2-4-V100Z-5.5
T°C de Entrada	29
T°C de Salida	35
T°C Bulbo Húmedo	21
Disipación Máxima (KCal/h)	4320000
(MW)	5.0232

Bombas de impulsión:

Nº Total disponibles	3
En funcionamiento normal	2
Capacidad individual (m ³ /h)	361.5

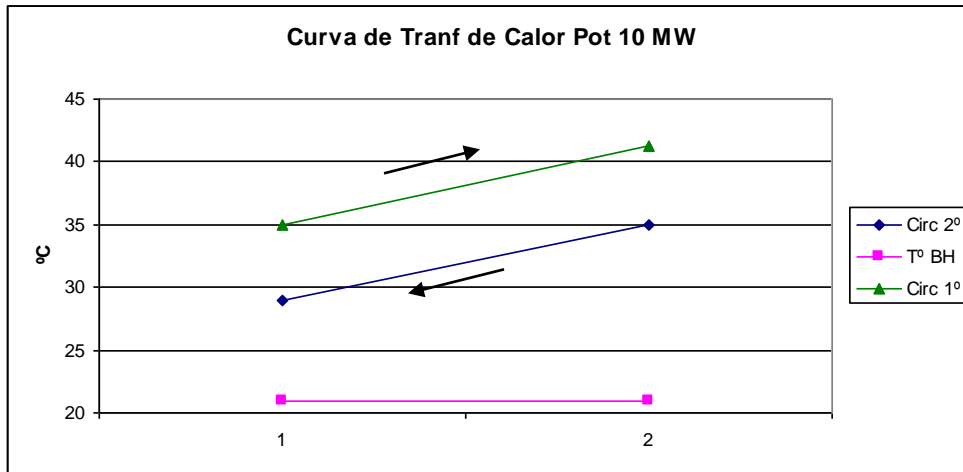


Figura nº 11.- Representación térmica de los circuito de refrigeración

Las dos torres de enfriamiento en paralelo y como están actualmente permiten sin problema su uso simultáneo, pero habría que corregir un diferencia de cotas en los ductos de entrada de alguna de las torres.

El actual sistema de impulsión no podrá cubrir la demanda de caudal necesario para extraer 10 MW de calor. Por lo que es necesario cambiar las 3 bombas actuales por 4 con una capacidad de 483 (m³/h), teniendo en cuenta que por aspectos de seguridad 1 debe siempre estar en stand by.

Capítulo 5: Conclusiones

Es factible duplicar la potencia del reactor, considerando los siguientes aspectos.

5.1.- Núcleo

- La configuración y geometría actual del núcleo permite sin problema aumentar el caudal real de refrigeración a 1261 (m³/h), llegando a una velocidad de circulación de 3.536 (m/s). Los criterios conservativos utilizados para el cálculo permiten tener factores de seguridad que aseguran no poner en riesgo la integridad del núcleo. Teniendo valores de R_{DNB} de 3.09 y una R_{RED} de 4.70, entre otras cosas.
- Los factores de incerteza considerados para el cálculo, garantizan una temperatura máxima de la placa combustible en el canal más caliente de 98 °C, condición y requisito impuesto por el órgano regulador para las condiciones de operación del reactor.
- Del punto de vista de diseño no es necesario realizar cambios en los elementos combustibles ni en el núcleo en general, pero queda abierta la posibilidad de optimizar la geometría de los EC para disminuir las pérdidas de carga que se generan en él.

5.2.- Sistema Primario de Refrigeración:

- Actualmente el sistema suministra un caudal de 654 (m³/h) que son alimentados por 2 de 4 bombas en paralelo, con una pérdida de carga total del sistema de 26 m.c.a. La necesidad de proporcionar un caudal de 1300 (m³/h) con una pérdida de carga mayor, de aproximadamente 35 m.c.a., implica el cambio de las actuales bombas por otras que impulsen 433 (m³/h) c/u con la pérdida de carga antes mencionada.

La configuración de funcionamiento de las bombas de 2 de 4 se pasaría a 3 de 4, lo que implicaría una disminución en el grado de seguridad del reactor y que debe ser evaluado por el órgano regulador, con la finalidad de determinar si el impacto debe ser compensado o no.

Además es necesario recalcular el tamaño de los volantes de inercia con que cuentan las bombas, para garantizar un tiempo mínimo de funcionamiento para la extracción de calor después de un corte del suministro energético.

- Dada la antigüedad de los equipos en general y particularmente el Intercambiador de Calor, no es posible reutilizarlo ⁽¹²⁾ o complementarlo para que sea capaz de extraer el calor del núcleo.

La empresa APV, proveedor del actual I/C con su representante en Chile propuso una alternativa de equipo para las condiciones Termohidráulicas requeridas para la duplicación de la potencia.

Como requisito del nuevo equipo, se deben cambiar las tuberías de entrada y salida de intercambiados a 12", actualmente son de 8".

- Actualmente el volumen del tanque de decaimiento es de 17.8 m³ lo que implica un tiempo de pasaje del refrigerante primario de 93 s aproximadamente. El aumento de caudal y de la Potencia necesariamente requiere de un aumento de volumen total para mantener sin variación el tiempo de pasaje del líquido. El volumen requerido debe ser más o menos 39 m³ el cual tiene 2 alternativas, montar otro tanque de decaimiento con el volumen faltante o montar un nuevo tanque con el volumen total necesario. La mejor opción dependerá de las facilidades de fabricación, montaje y operación del nuevo tanque.

5.3.- Sistema Secundario de Refrigeración

- Como fue descrito en el capítulo 1 – Sección 1.5, el reactor cuenta con 2 torres de enfriamiento de 5 MW de capacidad cada una. La torre modular es la que actualmente está en operación. La torre original debe ser reparada para entrar en funcionamiento, por lo que es factible que las 2 torres entren en servicio simultáneamente.

Las líneas de entrada de ambas torres se encuentran a diferente altura, por lo que es necesario ubicarlas a igual cota. La opción de nivelar cotas no es posible determinarla ahora, ya que es necesario hacer recorridos en terreno y determinar facilidades de desmontaje y montaje de los equipos.

- Es necesario cambiar las bombas y su configuración. Actualmente trabajan 2 de 3 bombas con una capacidad de 362 (m³/h) cada una. Con el reactor a 10 MW es

necesario tener un caudal total de 1446 (m³/h) y por seguridad se debe tener una configuración 3 de 4 bombas con una capacidad de 482 (m³/h) cada una.

- Ya que el caudal de refrigeración se duplicará es posible que sea necesario aumentar el volumen de la piscina para evitar problemas de operación de las nuevas bombas.

5.4.- Comentarios

- Desde una óptica termohidráulica es más económico utilizar cajas con menos espaciado entre placas, más placas por cajas y por lo tanto menor n° de cajas. Esto reduciría el caudal necesario para refrigerar el núcleo con la consiguiente disminución en los requerimientos en la potencia de impulsión de las bombas y las pérdidas de carga totales en el sistema.
- El considerar una temperatura máxima de pared algo mayor, también permitiría reducir un el caudal total de refrigeración del núcleo. Esto, solo si estudios en las placas combustibles indican que el aumento en la temperatura máxima de pared:
 - No reduce la vida útil ya sea por aspectos termohidráulicos, daño por radiación y/o corrosión o cualquier otro variable que tenga incidencia en la placa al interior del reactor.
 - Se pone en riesgo la integridad del núcleo.

Si se considerara una temperatura máxima de pared de 102 °C, el caudal real necesario para refrigeración sería de 1155 (m³/h)

- El cálculo del blindaje para esta nueva condición de potencia del reactor no es un alcance de este trabajo, pero es un aspecto muy importante que debe de ser analizado.

Referencias

- (1) David Parkansky, “Estudio del aumento de potencia del reactor RA-3”, CNEA-Re-36 (1969)
- (2) David Parkansky, “RA-3 TERMIC I, Código de Cálculo”, CNEA-Re-53 (1972)
- (3) David Parkansky, “Curso: Termohidráulica – Maestría en Reactores”
- (4) R. Corcuera, J. Testoni, J. Babino, V. Hoffmann, “Proyecto Reactor de 10 MW para Perú” (1976)
- (5) CCHEN- Dpto. de Aplicaciones Nucleares, “Descripción del Reactor Rech-1” (2004)
- (6) Collier and Thome, “Convective Boiling and Condensation”, (1996)
- (7) Michael Corradini, “Fundamentals of Multiphase Flow”
- (8) Donald Harleman, “Dinámica de los Fluidos” (1975)
- (9) Irving Shames, “Mecánica de Fluidos” (1995)
- (10) Claudio Mataix, “Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas” (1978)
- (11) J.P. Holman, “Transferencia de Calor” (1999)
- (12) Crane, “flow of Fluids”, (1980)

ANEXO I

“Contenido de la Planilla Excel REACTOR RECH-1”

La planilla de cálculo consta de 12 Pestañas, las cuales entregan y calculan los diferentes datos que son necesarios para determinar las condiciones termohidráulicas que se desean conocer para este trabajo. Cabe recordar que para estos cálculos no se consideraron factores de incertidumbre.

Las pestañas y la información que contienen son las siguientes:

- **H2O Prop:** Entrega información de las propiedades termodinámicas del agua para las diferentes temperaturas de interés.
- **H.Convección:** Sirve para calcular la temperatura máxima de pared mediante tanteo, ajustando el valor hasta obtener que el flujo calórico sea el máximo obtenido, que es un dato de entrada.
- **DP-Fórmulas:** Muestra las fórmulas utilizadas para calcular la caída de presión en el núcleo.
- **EC-Placa:** Muestra un vista general del elemento combustible y la configuración del núcleo.
- **Caída de Presión:** Calcula la caída de presión a lo largo de una caja de elementos combustibles refrigerado con agua. Y caídas de presión en puntos importantes a lo largo del canal
- **R1 en Ebullición:** Calcula la Potencia a la que debe llegar el reactor para que se produzca Ebullición
- **Circuito Primario Rech-1:** Muestra y calcula las pérdidas de carga del sistema primario tanto para el reactor con 5 MW como para 10 MW.
- **Circuito Secundario Rech-1:** Muestra y calcula las necesidades de caudal de refrigeración en el sistema secundario.
- **Gráficos 5 MW:** Muestra y grafica los datos entregados por el código TERMIC I, para la condición de operación del reactor RECH-1 en su estado actual.
- **Gráficos 10 MW:** Muestra y grafica los datos entregados por el código TERMIC I, para la condición de operación del reactor RECH-1 en su estado de duplicación de potencia.

- **Bba J&S:** Muestra y calcula datos relacionados con las bombas de impulsión del sistema primario de refrigeración.

ANEXO II

“Programa TERMIC I Ajustado para el Cálculo en el RECH-1”

```
*****
*****
**
**
**          TERMIC - 1E          **
**
**  CALCULO TERMOHIDRAULICO DEL NUCLEO DE REACTORES TIPO PISCINA  **
**          AJUSTADO PARA EL REACTOR RECH1 DE CHILE                **
**
**
*****
*****
```

```
' (Version con tratamiento estadístico de coeficientes de incertidumbre
' para barra y placa, y opción de coeficiente h experimental en régimen
' transitorio).
```

```
DECLARE SUB ESTAD2 (TP, TI, DTSAT, TE)
DECLARE SUB ESTAD1 (TP, TI, DTSAT, TE)
DECLARE FUNCTION TPTU (VV, DD, FI, F2, Z, h, TI, Lp)
DECLARE FUNCTION TPLA (TI, K, D, L1, RE, PR, FI, F2, Z, h, NU, Lp, NUFAC)
DECLARE FUNCTION TPTR (TI, L, D, RE, PR, V, FI, F2, Z, h, NU, Lp, NUFAC, CP)
DECLARE FUNCTION TPEXP (TI, RE, PR, V, FI, F2, Z, h, NU, TF, Lp)
```

```
DIM TPX(99), TEX(99), PEX(99), TZX(99), TSX(99), REX(99), QCX(99)
DIM FIRX(99), RRX(99), RBX(99), FIDX(99), RESULT(99, 99), FIN(99)
```

```
*****
```

```
' OPCIONES:
'   GEOMETRIA: NGEOM=0 (PLACA); NGEOM=1 (BARRA)
'   REFRIGERANTE: NREFRI=0 (H2O); NREFRI=1 (D2O)
'   ESCURRIMIENTO:
'   SENTIDO: NESCUR=0 (DESCENDENTE); NESCUR=1 (ASCENDENTE)
'   REGIMEN TRANSITORIO: NHEXP=0(CORRELACION
KREITH);NHEXP=1(EXPERIMENTAL)
'   INCERTEZA:JJ=0(COMBINACION ACUMULATIVA); JJ=1 (ESTADISTICA)
'   POTENCIA LIMITE:NTCOTP=0 (TEMP. DE VAINA = TEMP.LIMITE FIJADA)
'   NTCOTP=1 (TEMP. DE VAINA = TEMP. DE EBULLICION)
'   TEMERATURA LIMITE = COMT
```

CLS

```
OPEN "TERMICR9.dat" FOR INPUT AS #2
OPEN "TERMICR9.sal" FOR OUTPUT AS #3
```

```
***** LECTURA DE DATOS *****
```

```
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, NGEOM, NREFRI, NESCUR, NHEXP, JJ, NTCOTP, COMT
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, N, DZ, V1, V2, PV, TE, FIO, DFI, PIN, K, NUP
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, DTE, F1, F2, F3, F4, F5, F9, F10, F11, F12, F14, F20
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
```

```

IF NHEXP = 1 THEN
  INPUT #2, NFILA
  FOR I = 1 TO NFILA
    FOR J = 1 TO 4
      INPUT #2, RESULT(I, J)
    NEXT J
  NEXT I
END IF
INPUT #2, a1, b, a, L, L1, Lp, HL, NP, NC, kt
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, L0, S0, D0, L3, S3, D3, L4, S4, D4, L5, S5, D5
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, L6, s6, D6, L7, S7, L8, D8, S9
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, TOTO
INPUT #2, DE, DI, D1, Db, Nb

```

***** ESCRITURA DE DATOS EN ARCHIVO DE SALIDA *****

```

PRINT #3, " ***** DATOS DEL REACTOR *****"
PRINT #3,
  IF NESCUR = 0 THEN
    PRINT #3, "          * Esgurrimiento descendente"
  ELSE
    PRINT #3, "          * Esgurrimiento ascendente"
  END IF

  IF NGEOM = 0 THEN
    PRINT #3, "          * Combustible tipo placa"
  ELSE
    PRINT #3, "          * Combustible tipo barrita"
  END IF

  IF NREFRI = 0 THEN
    PRINT #3, "          * Refrigerante: agua liviana"
  ELSE
    PRINT #3, "          * Refrigerante: agua pesada"
  END IF
PRINT #3,
PRINT #3,
PRINT #3,

PRINT #3, " ***** METODOLOGIA DE CALCULO *****"
PRINT #3,
IF NTCOTP = 0 THEN
  PRINT #3, "          * Compara temperatura de pared con"; COMT; "C"
ELSE
  PRINT #3, "          * Compara temperatura de pared con temperatura de ebullicion"
END IF

IF NHEXP = 0 THEN
  PRINT #3, "          * Correlacion de Kreith para regimen transitorio"
ELSE
  PRINT #3, "          * Valores experimentales en regimen transitorio"

```

```

END IF

IF F1 = 1 AND JJ = 1 THEN
  PRINT #3, "      * Con coeficientes de incertidumbres tratados estadísticamente"
ELSEIF F1 > 1 AND JJ = 0 THEN
  PRINT #3, "      * Con coeficientes de incertidumbre en combinación acumulativa"
ELSE
  PRINT #3, "      * Sin coeficiente de incertidumbre"
END IF
PRINT #3,
PRINT #3,
PRINT #3,
PRINT #3, " * DATOS GEOMETRICOS DEL CANAL Y CARACTERISTICAS DEL NUCLEO "
PRINT #3,

```

```

IF NGEOM = 0 THEN

```

```

  PRINT #3, "      Ancho activo placa [cm] = "; a
  PRINT #3, "      Longitud activa placa [cm] = "; 2 * L
  PRINT #3, "      Ancho del canal [cm] = "; a1
  PRINT #3, "      Longitud total placa [cm] = "; 2 * L1
  PRINT #3, "      Espesor del canal [cm] = "; b
  PRINT #3, "      Longitud extrapolada [cm] = "; 2 * Lp
  PRINT #3, "      Número de placas por caja combustible = "; NP
  PRINT #3, "      Número de cajas combustibles en el núcleo = "; NC
  PRINT #3, "      Factor de forma total = "; kt
  PRINT #3, "      Longitud extrapolada [cm] = "; 2 * Lp

```

```

ELSE

```

```

  PRINT #3, "      DE="; DE; "DI="; DI; " Db="; Db; " Nb="; Nb; " lp="; Lp

```

```

END IF

```

```

***** CALCULOS GEOMETRICOS *****

```

```

PI = 3.14159

```

```

IF NGEOM = 0 THEN

```

```

  PC = 2 * a
  SP = a1 * b; pm = 2 * (a1 + b); dh = 4 * SP / pm; sc = 2 * (2 * L * a)
  S1 = SP; D = dh
  spn = ((NP - 1) * NC) * a1 * b
  scn = ((NP - 1) * NC) * sc

```

```

  PRINT #3, "      Superficie de pasaje del canal [cm2] = "; SP
  PRINT #3, "      Perímetro mojado canal [cm] = "; pm
  PRINT #3, "      Di metro hidráulico canal [cm] = "; D
  PRINT #3, "      Superficie calefactora del canal [cm2] = "; sc
  PRINT #3, "      Superficie de pasaje del núcleo [cm2] = "; spn
  PRINT #3, "      Superficie calefactora núcleo [cm] = "; scn

```

```

ELSE

```

```

  PC = PI * Db
  SP = (PI * (DE ^ 2 - DI ^ 2 - 4 * D1 ^ 2 - Nb * Db ^ 2) / 4) / Nb
  pm = PI * (DE + DI + 4 * D1 + Nb * Db)
  sc = PC * 2 * L
  dh = 4 * SP * Nb / pm
  DC = 4 * SP / PC

```

```

S1 = SP
D = dh
PRINT #3, "sp="; SP; " pm="; pm; " dh="; dh; " sc="; sc; "dc="; DC;

```

```

END IF
PRINT #3,
PRINT #3,
PRINT #3,
PRINT #3, " ***** RESULTADOS *****"

```

***** CALCULO TERMOHIDRAULICO *****

```

G = 981
DD = 10 * D

```

```

FOR V = V1 TO V2 STEP PV
W = S1 * V * (NP - 1)
VV = .01 * V

```

```

PRINT "Calculando para V="; V; : PRINT "cm/seg"

```

```

IF NESCUR = 1 THEN

```

```

DP1 = .5 * (W / S0) ^ 2 / (2 * G)
DP2 = (W / S0 - W / S3) ^ 2 / (2 * G)
DP3 = .0184 * L3 / D3 * (W / S3) ^ 2 / (2 * G)
DP4 = .4 * (1.25 - S4 / S3) * (W / S4) ^ 2 / (2 * G)
DP5 = (W / S4 - W / S5) ^ 2 / (2 * G)
DP6 = .0294 * L5 / D5 * (W / S5) ^ 2 / (2 * G)
DP7 = (W / S5 - W / s6) ^ 2 / (2 * G)
DP8 = .0184 * L6 / D6 * (W / s6) ^ 2 / (2 * G)
DP9 = .00047 * L7 * ((W / S7) ^ 1.75 / (W / s6) ^ 1.25)
DP10 = .0155 * L8 / D8 * (W / S7) ^ 2 / (2 * G)
DP11 = (W / S7 - W / S9) ^ 2 / (2 * G)

```

```

S = (DP1 + DP2 + DP3 + DP4 + DP5 + DP6 + DP7 + DP8 + DP9 + DP10 + DP11)
DPT = S * F5 * F12
RT = 2 * L1 + L0 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8
PS = PIN - RT - DPT
PIN = PIN - PS + HL / (F10 * F11 * F9) + 1033 / F9

```

```

ELSE

```

```

DH1 = .5 * (W / S0) ^ 2 / (2 * G)
DH2 = (W / S0 - W / S3) ^ 2 / (2 * G)
DH3 = .0184 * L3 / D3 * (W / S3) ^ 2 / (2 * G)
DH4 = .4 * (1.25 - S4 / S3) * (W / S4) ^ 2 / (2 * G)
DH5 = (W / S4 - W / S5) ^ 2 / (2 * G)
DH6 = .0294 * L5 / D5 * (W / S5) ^ 2 / (2 * G)
DH7 = (W / S5 - W / s6) ^ 2 / (2 * G)
DH8 = .0184 * L6 / D6 * (W / s6) ^ 2 / (2 * G)
DH9 = .00047 * L7 * ((W / S7) ^ 1.75 / (W / s6) ^ 1.25)
DH10 = .0155 * L8 / D8 * (W / S7) ^ 2 / (2 * G)
DH11 = (W / S7 - W / S9) ^ 2 / (2 * G)

```

```

S = (DH1 + DH2 + DH3 + DH4 + DH5 + DH6 + DH7 + DH8 + DH9 + DH10 + DH11)
DPT = S * F5 * F12

```

```

END IF

```

```

J = 0
LIM = 0

DO UNTIL LIM = 1
  I = 1
  FI = FIO + J * DFI

  SRE = 1

DO WHILE I <= N

  Z = -L + .95 + (I - 1) * DZ

***** CALCULO DE LA TEMPERATURA DEL FLUIDO EN EL SENO DEL CANAL *****

IF NREFRI = 1 THEN
  CP = 4.64: NUFAC = 1.17: RO = 1.09: C = 204.2: E = -.9829: F = .26
ELSE
  CP = 4.18: NUFAC = 1: RO = 1: C = 137.8: E = -.94092: F = .255
END IF

FID = FI * F1 * COS(3.1416 * Z / (Lp * 2))
AA = SIN(3.1416 * Z / (2 * Lp)) + SIN(3.1416 * L / (2 * Lp))
TI = TE + DTE + F1 * PC * FI * 2 * Lp / (CP * S1 * V * 3.1416) * AA
ZT = 1 / TI
NU = (((13.2409 * ZT - 3.43213) * ZT + .342724) * ZT - 8.25825E-05) * NUFAC
RE = V * D * RO / NU
SRE = SRE + RE
PR = C * TI ^ E

***** CALCULO DE LA PRESION A LO LARGO DEL CANAL *****

IF NESCUR = 1 THEN

  IF I = 1 THEN
    dh = (DP1 + DP2 + DP3 + DP4 + DP5 + DP6 + DP7) * F5 * F12
    dh = dh + .316 * (L1 + Z) * V ^ 1.75 * NU ^ .25 / (D ^ 1.25 * 2 * G)
  ELSE
    dh = dh + .316 * DZ * V ^ 1.75 * NU ^ .25 / (D ^ 1.25 * 2 * G) * F5 * F12
  END IF
  PE = (PIN - ((L5 + L4 + L3) + (L1 + Z) + dh + (V ^ 2 / (2 * G)) * F5)) * RO

ELSE
  dh = DH1 + DH2 + DH3 + (.316 * (L1 + Z) * (V ^ 1.75) * NU ^ .25 / D ^ 1.25) / (2 * G)

' ELSE
'   DH = .316 * NU ^ .25 * 2 * (L1 + Z) * V ^ 1.75 / D ^ 1.25 / (2 * G)

  A111 = 1033 / F9
  B111 = (HL + L1 + Z) / (F10 * F11)
  C111 = F5 * F12 * dh
  D111 = F5 * V ^ 2 / (2 * G)
  PE = A111 + (B111 - C111 - D111) * RO
'   PE = 1033 / F9 + ((HL + L1 + Z) / (F10 * F11) - F5 * F12 * DH - F5 * V ^ 2 / (2 * G)) * RO
END IF

***** CALCULO DE LA TEMPERATURA DE VAINA *****

IF RE > 2100 THEN
  IF RE > 10000 THEN

```

```

TP = TPTU(VV, DD, FI, F2, Z, h, TI, Lp)
ELSE
  IF NHEXP = 1 THEN
    TP = TPEXP(TI, RE, PR, V, FI, F2, Z, h, NU, TF, Lp)
  ELSE
    TP = TPTR(TI, L, D, RE, PR, V, FI, F2, Z, h, NU, Lp, NUFAC, CP)
  END IF
END IF
ELSE
  TP = TPLA(TI, K, D, L1, RE, PR, FI, F2, Z, h, NU, Lp, NUFAC)
END IF

```

***** CALCULO DE TEMPERATURA DE EBULLICION *****

```

TSAT = 100 * (PE / 1033) ^ F
DTSAT = 4.57 * (.001 * PE) ^ -.23 * (F20 * FI * COS(1.57 * Z / Lp)) ^ .35 / F14
TEB = TSAT + DTSAT

```

***** CALCULO DE FLUJO DE BURN OUT Y DE REDISTRIBUCION *****

```

P = PE * 1013 / (F9 * F10 * F11)
DS = D / F4
VS = V * F5
BB = 3.43 * DS / (DS + PC * F3 / 3.1416) + .000244 * VS * (DS / 100) ^ (-.6)
CC = 102.6 * LOG(P / 981000) - 97.2 * P / (P + 1000000) - .0476 * VS - 1.8 * TI + 276
QC = BB * CC
PRD = CP * V * S1 * RO * (TSAT - TE) / (1 + 3.15 * D / (2 * L) * (1.08 * V * RO) ^ .29)
RB = QC / FID

```

```

IF JJ = 1 THEN
  IF NGEOM = 0 THEN
    CALL ESTAD2(TP, TI, DTSAT, TE)
  ELSE
    CALL ESTAD1(TP, TI, DTSAT, TE)
  END IF
END IF

```

```

TPX(I) = TP
TEX(I) = TEB
TSX(I) = TSAT
PEX(I) = PE
TZX(I) = TI
REX(I) = RE
QCX(I) = QC
RBX(I) = RB
FIDX(I) = FID

```

```

IF NTCOTP = 0 THEN
  FIN = ABS(COMT - TP)
ELSE
  FIN = ABS(TEB - TP)
END IF

```

```

IF FIN < .5 THEN LIM = 1

```

```

I = I + 1
LOOP

```

```

J = J + 1
LOOP

```

```

160 POTCC = PC * FI * 4 * Lp / 3.1416 * SIN(3.1416 * L / (2 * Lp))
QCC = .0036 * S1 * V
DTCC = POTCC * .001 / (1.16 * QCC)
REP = SRE / N
FRD = PRD * FI / POTCC
RR = FRD / FI
FIMED = FI / kt
POT = FIMED * scn
Q = .0036 * spn * V
DT = POT * .001 / (1.16 * Q * 1.25)

```

```

***** RESULTADOS *****

```

```

PRINT #3,
PRINT #3, " TE ="; : PRINT #3, USING "###.##"; TE;
PRINT #3, " C V ="; : PRINT #3, USING "####.##"; V; : PRINT #3, " cm/s"
PRINT #3,
PRINT #3, " FI ="; : PRINT #3, USING "####.##"; FI;
PRINT #3, " W/cm2 Q ="; : PRINT #3, USING "####.##"; Q; : PRINT #3, " m3/h"
PRINT #3,
PRINT #3, " POT ="; : PRINT #3, USING "###.##"; POT * .000001;
PRINT #3, " MW DT ="; : PRINT #3, USING "###.##"; DT; : PRINT #3, " C"

```

```

IF NESCUR = 1 THEN

```

```

DELP = PIN - PE
PRINT #3,
PRINT #3, " REP ="; : PRINT #3, USING "#####.##"; REP;
PRINT #3, " PIN ="; : PRINT #3, USING "#####.##"; PIN; : PRINT #3, " cm c.a."
PRINT #3,
PRINT #3, " DELP ="; : PRINT #3, USING "#####.##"; DELP;
PRINT #3, " cm c.a. DH ="; : PRINT #3, USING "#####.##"; DPT; : PRINT #3, " cm c.a."

```

```

ELSE

```

```

PRINT #3,
PRINT #3, " REP ="; : PRINT #3, USING "#####.##"; REP; : PRINT #3, " DH =";
PRINT #3, USING "#####.##"; DPT; : PRINT #3, " cm c a"

```

```

END IF

```

```

PRINT #3,
PRINT #3, " FRD ="; : PRINT #3, USING "####.##"; FRD;
PRINT #3, " W/cm2 RR ="; : PRINT #3, USING "###.##"; RR

```

```

PRINT #3,
PRINT #3,
PRINT #3, " Z "; " TP "; " TEB "; " TSAT ";
PRINT #3, " PE "; " TI "; " RE"
PRINT #3,

```

```

FOR I = 1 TO N

```

```

Z = -L + .95 + (I - 1) * DZ
PRINT #3, USING "#####.## #####.## #####.##"; Z; TPX(I); TEX(I); TSX(I);
PRINT #3, USING "#####.## #####.## #####.##"; PEX(I); TZX(I); REX(I)

```

```

NEXT I

```

```

PRINT : PRINT
PRINT #3,
PRINT #3,

```

```

PRINT #3, " Z "; " QC "; " FID "; " RB"
PRINT #3,
FOR I = 1 TO N
  Z = -L + .95 + (I - 1) * DZ
  PRINT #3, USING "#####.##"; Z; QCX(I); FIDX(I); RBX(I)
NEXT I
NEXT V

```

END

SUB ESTAD1 (TP, TI, DTSAT, TE)

```

'Para combustible tipo barrita
DIM F(14), TA13S(10), TP3S(10), TPSQ3S(10), FF(10), TS3S(10), TSSQ(10), TA23S(10)
F(1) = .02: F(2) = .05: F(3) = .25: F(4) = .2
DTE = 2
FOR I = 1 TO 3
  TA13S(I) = 0
  TA23S(I) = 0
  TP3S(I) = 0
NEXT I
TAUX1 = TI - TE
TAUX2 = TP - TI
FOR I = 1 TO 2
  TA13S(I) = F(I) * TAUX1
NEXT I
FOR I = 1 TO 2
  TA23S(I) = F(I) * TAUX2
NEXT I
FOR I = 3 TO 3
  TA23S(I) = F(I) * TAUX2
NEXT I
FOR I = 1 TO 3
  TP3S(I) = TA13S(I) + TA23S(I)
NEXT I
TP3S(4) = DTE
FOR I = 1 TO 4
  TPSQ3S(I) = TP3S(I) ^ 2
NEXT I
TPSQ = 0
FOR I = 1 TO 4
  TPSQ = TPSQ + TPSQ3S(I)
NEXT I
'Temperatura de pared corregida
TP = TP + SQR(TPSQ)

FF(1) = 1 + F(1)
FF(2) = 1 + F(2)
FOR I = 1 TO 2
  TS3S(I) = (FF(I) ^ .35 - 1) * DTSAT
NEXT I
TS3S(3) = F(4) * DTSAT
FOR I = 1 TO 3
  TSSQ(I) = TS3S(I) ^ 2
NEXT I
TS = TSSQ(3) - TSSQ(1) - TSSQ(2)
'Temperatura DTSAT corregida
DTSAT = DTSAT - SQR(TS)
END SUB

```

SUB ESTAD2 (TP, TI, DTSAT, TE)

```

'Para combustible tipo placa
DIM F(14), TA13S(10), TP3S(10), TPSQ3S(10), FF(10), TS3S(10), TSSQ(10), TA23S(10)
F(1) = .02: F(2) = .05: F(3) = .05: F(4) = .1: F(5) = .1: F(6) = .08
F(7) = .1: F(8) = .25: F(9) = .04: F(10) = .01: F(11) = .005
F(12) = .1: F(13) = .1: F(14) = .2
DTE = 2
FOR I = 1 TO 10
  TA13S(I) = 0
  TA23S(I) = 0
  TP3S(I) = 0
NEXT I
TAUX1 = TI - TE
TAUX2 = TP - TI
FOR I = 1 TO 5
  TA13S(I) = F(I) * TAUX1
NEXT I
FOR I = 1 TO 2
  TA23S(I) = F(I) * TAUX2
NEXT I
FOR I = 5 TO 8
  TA23S(I) = F(I) * TAUX2
NEXT I
FOR I = 1 TO 8
  TP3S(I) = TA13S(I) + TA23S(I)
NEXT I
TP3S(9) = DTE
FOR I = 1 TO 9
  TPSQ3S(I) = TP3S(I) ^ 2
NEXT I
TPSQ = 0
FOR I = 1 TO 9
  TPSQ = TPSQ + TPSQ3S(I)
NEXT I
'Temperatura de pared corregida
TP = TP + SQR(TPSQ)

FF(1) = 1 + F(1)
FF(2) = 1 + F(2)
FF(3) = 1 + F(6)
FF(4) = 1 + F(7)
FOR I = 1 TO 4
  TS3S(I) = (FF(I) ^ .35 - 1) * DTSAT
NEXT I
TS3S(5) = F(14) * DTSAT
FOR I = 1 TO 5
  TSSQ(I) = TS3S(I) ^ 2
NEXT I
TS = TSSQ(5) - TSSQ(1) - TSSQ(2) - TSSQ(3) - TSSQ(4)
'Temperatura DTSAT corregida
DTSAT = DTSAT - SQR(TS)
END SUB

FUNCTION TPEXP (TI, RE, PR, V, FI, F2, Z, h, NU, TF, Lp)
'Temperatura de pared - flujo de transicion - correlacion experimental
SHARED RESULT(), H1, NFILA
TPP = TI
1005 TF = .5 * (TPP + TI)
FOR I = 1 TO NFILA
  IF V >= RESULT(I, 2) THEN 12
NEXT I

```

```

12 FOR J = 1 TO NFILA
    IF TF >= RESULT(J, 3) THEN 14
NEXT J
14 H1 = RESULT(J, 4)
TP = TI + FI * F2 * COS(.0406 * Z) / H1
IF TP <= TPP + .01 * TP THEN 422
TPP = TP
GOTO 1005
422 TPEXP = TP
END FUNCTION

```

FUNCTION TPLA (TI, K, D, L1, RE, PR, FI, F2, Z, h, NU, Lp, NUFAC)

```

'Temperatura de pared - flujo laminar
TPP = TI
33 ZT = 1 / TPP
NUTP = (((13.2409 * ZT - 3.43213) * ZT + .342724) * ZT - 8.25825E-05) * NUFAC
h = 1.86 * (K / D) * (RE * PR * D / (2 * L1)) ^ .33 * (NU / NUTP) ^ .14
TP = TI + FI * F2 * COS(1.57 * Z / Lp) / h
IF TP <= TPP + .01 * TP THEN 300
TPP = TP
GOTO 33
300 TPLA = TP
END FUNCTION

```

FUNCTION TPTR (TI, L, D, RE, PR, V, FI, F2, Z, h, NU, Lp, NUFAC, CP)

```

'Temperatura de pared - flujo de transicion - Correlacion de Kreith
TPP = TI
30 ZT = 1 / TPP
NUTP = (((13.2409 * ZT - 3.43213) * ZT + .342724) * ZT - 8.25825E-05) * NUFAC
IF L / D < 75 THEN
    IF RE < 5000 THEN
        TR = -6.6503E-14 * RE ^ 3 + 5.9257E-10 * RE ^ 2 - 1.1788E-06 * RE + .0036319
    ELSE
        TR = .00425
    END IF
ELSEIF L / D < 150 THEN
    IF RE < 5000 THEN
        TR = 6.1093E-14 * RE ^ 3 - 7.5616E-10 * RE ^ 2 + 3.5297E-06 * RE - .0022479
    ELSE
        TR = .00418
    END IF
ELSEIF L / D < 300 THEN
    IF RE < 6000 THEN
        TR = 2.658E-14 * RE ^ 3 - 4.3384E-10 * RE ^ 2 + 2.6667E-06 * RE - .0019919
    ELSE
        TR = .00416
    END IF
ELSE
    IF RE < 6000 THEN
        TR = 5.6238E-14 * RE ^ 3 - 7.9771E-10 * RE ^ 2 + 4.1627E-06 * RE - .0042815
    ELSE
        TR = .00416
    END IF
END IF
h = TR * (NU / NUTP) ^ .14 * CP * V / PR ^ (2 / 3)
TP = TI + FI * F2 * COS(1.57 * Z / Lp) / h
IF TP <= TPP + .01 * TP THEN 250
TPP = TP
GOTO 30

```

```
250 TPTR = TP  
END FUNCTION
```

```
FUNCTION TPTU (VV, DD, FI, F2, Z, h, TI, Lp)
```

```
  'Temperatura de pared - flujo turbulento
```

```
  TPP = TI
```

```
32  TF = .5 * (TPP + TI)
```

```
  KTF = .255 * TF ^ .355
```

```
  h = KTF * VV ^ .8 / DD ^ .2
```

```
  TP = TI + FI * F2 * COS(1.57 * Z / Lp) / h
```

```
  IF TP <= TPP + .1 * TP THEN 400
```

```
  TPP = TP
```

```
  GOTO 32
```

```
400 TPTU = TP
```

```
END FUNCTION
```

ANEXO III

“Resultados del Programa TERMIC I Ajustado para el Cálculo en el RECH-1”

***** DATOS DEL REACTOR *****

- * Escurrimiento descendente
- * Combustible tipo placa
- * Refrigerante: agua liviana

***** METODOLOGIA DE CALCULO *****

- * Compara temperatura de pared con 98 C
 - * Correlación de Kreith para régimen transitorio
 - * Con coeficientes de incertidumbres tratados estadísticamente
- * DATOS GEOMETRICOS DEL CANAL Y CARACTERISTICAS DEL NUCLEO *

Ancho activo placa [cm] = 6.015

Longitud activa placa [cm] = 58.11

Ancho del canal [cm] = 6.51

Longitud total placa [cm] = 62.55

Espesor del canal [cm] = .317

Longitud extrapolada [cm] = 74.11

Número de placas por caja combustible = 16

Número de cajas combustibles en el núcleo = 32

Factor de forma total = 3

Longitud extrapolada [cm] = 74.11

Superficie de pasaje del canal [cm²] = 2.06367

Perímetro mojado canal [cm] = 13.654

Di metro hidráulico canal [cm] = .6045613

Superficie calefactora del canal [cm²] = 699.0633

Superficie de pasaje del núcleo [cm²] = 990.5616

Superficie calefactora núcleo [cm] = 335550.4

***** RESULTADOS *****

Z	TP	TEB	TSAT	PE	TI	RE	QC	FID	RB
28	58.46	127.11	113.3	1685.62	35.12	29726.65	444.13	33.19	13.38
-27	60.76	127.58	113.27	1684.08	35.26	29809.39	443.39	36.69	12.09
-26	63.01	128.01	113.25	1682.55	35.41	29900.39	442.59	40.12	11.03
-25	65.2	128.41	113.22	1681.03	35.57	29999.5	441.73	43.48	10.16
-24	67.32	128.78	113.19	1679.51	35.75	30106.56	440.82	46.76	9.43
-23	69.38	129.12	113.17	1677.99	35.94	30221.4	439.86	49.96	8.8

-22	71.38	129.44	113.14	1676.48	36.14	30343.82	438.85	53.07	8.27
-21	73.31	129.73	113.12	1674.98	36.36	30473.62	437.78	56.08	7.81
-20	75.18	130.01	113.09	1673.49	36.58	30610.58	436.67	58.99	7.4
-19	76.97	130.26	113.07	1672	36.82	30754.47	435.51	61.8	7.05
-18	78.7	130.5	113.04	1670.52	37.07	30905.05	434.31	64.49	6.73
-17	80.36	130.72	113.01	1669.04	37.33	31062.07	433.06	67.07	6.46
-16	81.95	130.92	112.99	1667.58	37.6	31225.25	431.78	69.53	6.21
-15	83.47	131.11	112.96	1666.12	37.88	31394.32	430.45	71.86	5.99
-14	84.91	131.28	112.94	1664.67	38.17	31568.99	429.09	74.07	5.79
-13	86.28	131.44	112.91	1663.23	38.46	31748.95	427.7	76.14	5.62
-12	87.57	131.58	112.89	1661.8	38.77	31933.89	426.27	78.07	5.46
-11	88.79	131.71	112.86	1660.38	39.08	32123.5	424.81	79.87	5.32
-10	89.94	131.82	112.84	1658.97	39.39	32317.43	423.33	81.52	5.19
-9	91.01	131.92	112.82	1657.56	39.72	32515.36	421.82	83.02	5.08
-8	91.99	132.01	112.79	1656.16	40.05	32716.91	420.28	84.38	4.98
-7	92.91	132.08	112.77	1654.77	40.38	32921.75	418.73	85.58	4.89
-6	93.74	132.15	112.74	1653.39	40.72	33129.52	417.16	86.63	4.82
-5	94.49	132.2	112.72	1652.02	41.07	33339.82	415.57	87.52	4.75
-4	95.16	132.23	112.7	1650.66	41.41	33552.3	413.97	88.26	4.69
-3	95.75	132.26	112.67	1649.3	41.76	33766.57	412.37	88.84	4.64
-2	96.26	132.27	112.65	1647.95	42.11	33982.25	410.75	89.26	4.6
-1	96.68	132.27	112.63	1646.61	42.46	34198.94	409.13	89.51	4.57
0	97.03	132.26	112.6	1645.28	42.82	34416.26	407.5	89.61	4.55
1	97.29	132.23	112.58	1643.95	43.17	34633.81	405.88	89.55	4.53
2	97.46	132.2	112.56	1642.63	43.52	34851.2	404.26	89.32	4.53
3	97.56	132.15	112.53	1641.32	43.87	35068.02	402.65	88.94	4.53
4	97.56	132.09	112.51	1640.01	44.22	35283.89	401.04	88.39	4.54
5	97.49	132.01	112.49	1638.71	44.57	35498.41	399.45	87.69	4.56
6	97.33	131.93	112.46	1637.41	44.91	35711.2	397.86	86.83	4.58
7	97.08	131.83	112.44	1636.12	45.25	35921.84	396.3	85.81	4.62
8	96.75	131.72	112.42	1634.83	45.59	36129.97	394.75	84.64	4.66
9	96.34	131.59	112.4	1633.54	45.92	36335.2	393.22	83.32	4.72
10	95.84	131.45	112.37	1632.26	46.25	36537.15	391.72	81.84	4.79
11	95.26	131.3	112.35	1630.99	46.56	36735.45	390.24	80.22	4.86
12	94.6	131.13	112.33	1629.71	46.88	36929.73	388.79	78.46	4.96
13	93.85	130.95	112.31	1628.44	47.18	37119.63	387.37	76.55	5.06
14	93.02	130.76	112.28	1627.17	47.48	37304.8	385.99	74.51	5.18
15	92.11	130.55	112.26	1625.9	47.77	37484.91	384.64	72.34	5.32
16	91.11	130.33	112.24	1624.63	48.05	37659.6	383.32	70.03	5.47
17	90.04	130.08	112.22	1623.37	48.32	37828.57	382.04	67.6	5.65
18	88.89	129.83	112.2	1622.1	48.58	37991.5	380.81	65.04	5.85
19	87.66	129.55	112.17	1620.83	48.83	38148.09	379.62	62.37	6.09
20	86.35	129.26	112.15	1619.56	49.07	38298.03	378.47	59.59	6.35
21	84.96	128.94	112.13	1618.29	49.3	38441.06	377.37	56.7	6.66
22	83.5	128.61	112.11	1617.02	49.52	38576.91	376.31	53.71	7.01
23	81.97	128.25	112.08	1615.74	49.73	38705.32	375.31	50.62	7.41
24	80.37	127.87	112.06	1614.47	49.92	38826.06	374.36	47.44	7.89
25	78.7	127.46	112.04	1613.18	50.1	38938.91	373.46	44.17	8.45
26	76.96	127.02	112.01	1611.9	50.27	39043.64	372.61	40.83	9.13
27	75.15	126.55	111.99	1610.61	50.42	39140.07	371.82	37.41	9.94
28	73.29	126.04	111.97	1609.31	50.56	39228.02	371.08	33.93	10.94
29	71.37	125.49	111.95	1608.01	50.69	39307.32	370.41	30.38	12.19
30	69.4	124.88	111.92	1606.71	50.8	39377.82	369.79	26.78	13.81
31	67.38	124.22	111.9	1605.4	50.9	39439.39	369.22	23.14	15.96
32	65.32	123.47	111.88	1604.08	50.98	39491.92	368.72	19.45	18.96