

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA AISLACIÓN TÉRMICA
DEL LOOP DE IRRADICACIÓN DEL REACTOR RA-10”**

**CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE**

Autor: Azpitarte, Ignacio A.
Director: Vázquez, Luis A.
Co-directora: Parlapiano, Mariela S.

Noviembre 2017



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Tabla de contenido

Resumen	3
1. Introducción	4
1.1 Características del Módulo de Irradiación	7
2. Objetivos	9
3. Desarrollo	9
3.1 Cálculo de potencia disipada	10
3.1.1 Datos	11
3.1.2 Propiedades físicas	11
3.1.3 Cálculos	12
3.1.4 Resultados	18
3.2 Temperaturas máximas en el cruce de Aislaciones	18
3.2.1 Discretización	19
3.2.2 Ecuaciones	19
3.2.3 Datos	22
3.2.4 Resolución y resultados	22
3.3 Verificación en CFD	25
3.3.1 Modelado	25
3.3.2 Resultados	26
4. Conclusiones y trabajos futuros	27
Referencias	28

Resumen

En el presente trabajo se planteó estudiar el comportamiento de la aislación de una facilidad de irradiación dentro del reactor de investigación RA-10. En su interior contiene un arreglo de barras de combustible nuclear de centrales de potencia a ser estudiadas. Dentro de la facilidad se generan las condiciones de operación del refrigerante. Debido a que dichas condiciones contemplan temperaturas altas respecto a la temperatura de la pileta del reactor, se propuso analizar el comportamiento de la aislación proyectada para una sección de la facilidad. Dicho estudio se realizó obteniendo la potencia disipada y las temperaturas máximas alcanzadas. El cálculo se hizo de forma analítica, por diferencias finitas y mediante dinámica de fluidos computacional.

Abstract

The present paper was aimed to study the behavior of the insulation of a irradiation facility inside the research reactor RA-10. In the inner side it contains an array of fuel rods of nuclear power plants to be analyzed. Inside the facility operating conditions for the coolant are generated. Because of those conditions involve higher temperatures than temperatures in the reactor pool, it was proposed to analyze the behavior of the projected insulation for a section of the facility. The study was carried out obtaining the dissipated power and the maximum temperatures reached. The calculation was made analytically, by finite differences and by computation fluid dynamics.

1. Introducción

Reactor RA-10

El Proyecto RA-10 (Reactor Argentino Multiprósito N°10) tiene por objetivo el diseño, la construcción y operación de un reactor nuclear para consolidar y ampliar la producción de radioisótopos y proveer facilidades de irradiación de materiales y combustibles, haces de neutrones y producción de silicio.

El reactor es del tipo piletta abierta, por lo que se encuentra a presión atmosférica, tiene una potencia de 30MW y su ciclo de operación continuo es de 29,5 días.

El núcleo está compuesto por EECC del tipo MTR, cada uno con 21 placas combustibles, con un enriquecimiento de 19,70% de U_{235} en peso. El mismo es refrigerado por medio de agua liviana, por convección forzada con escurrimiento ascendente.

El reactor está compuesto por dos piletas. La principal, denominada Pileta del Reactor (PRE) y una secundaria, Pileta de servicio (PSE). Ambas de agua liviana.

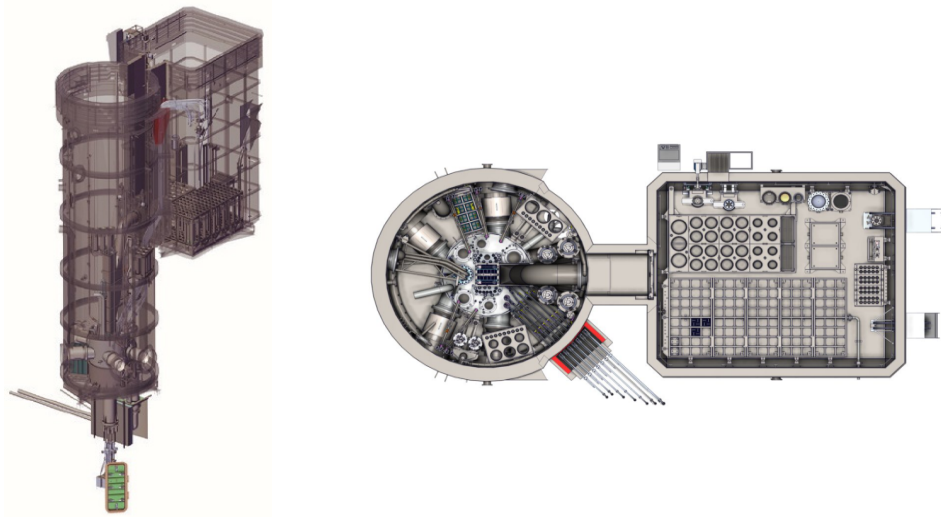


Figura 1.1- Piletas del Reactor

En la PRE se encuentra el núcleo y, en torno al mismo, se encuentra el tanque del reflector, el cual contiene al líquido reflector, que es agua pesada (D_2O). Además se encuentra parte del sistema primario de refrigeración (PRI), el cual está compuesto por el Plenum inferior para el ingreso del refrigerante y recirculación hacia el núcleo, la chimenea por donde egresa el refrigerante, válvulas rompesifones, válvulas para circulación por convección natural, etc.

La parte del circuito primario ubicada dentro de la pileta del reactor tendrá como función la refrigeración del núcleo:

- en convección forzada cuando el reactor está operando a potencia nominal
- en convección natural cuando el reactor este en parada.

La operación del reactor se realiza por medio de barras de control que atraviesan el fondo de la PRE, por medio de penetraciones mecánicas.

Es en el tanque del reflector donde se encuentran las facilidades de irradiación, haces de neutrones fríos y calientes y la producción de silicio y molibdeno.

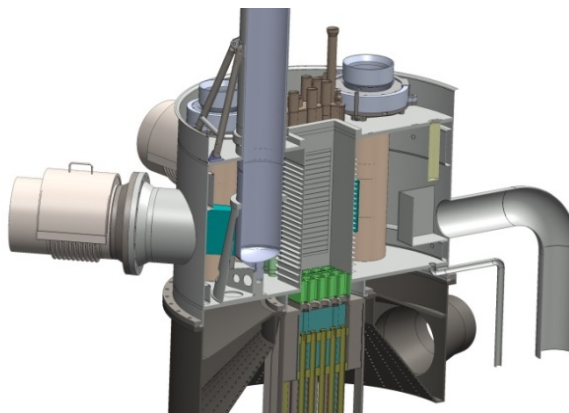


Figura 1.2 – Corte altura núcleo

Facilidad de Irradiación – LOOP

La facilidad que tiene por objeto este trabajo es aquella cuya función es la de irradiar barras combustibles de reactores de potencia en condiciones de operación a fin de estudiar su comportamiento. Esta facilidad es un circuito cerrado (LOOP) en el cual se generan las condiciones de presión, temperatura y química del refrigerante de las centrales nucleares argentinas (CNAI, CNAII, CNE y CAREM) y PWRs comerciales.

En operación la facilidad se encuentra ubicada en la PRE, pero luego es trasladada a la PSE, donde se esperará a que decaiga su nivel de actividad.

El LOOP está constituido básicamente por 3 partes o zonas:

- La primera se encuentra fuera de la pileta en un recinto (búnker) y una sala de servicios exterior, en ella se generan las condiciones de presión, temperatura y química del refrigerante y se realizan los procesos de control de volumen e inventario del mismo.
- La segunda parte se encuentra sumergida en la pileta del reactor, está compuesta por tuberías aisladas y su función es realizar la interfaz/conexión entre el búnker y el módulo de irradiación.

Además cuenta con una válvula bypass conectada a un tubo aletado que cortocircuita la entrada y salida de la facilidad. La función de este sistema es la de disipar la potencia de decaimiento por convección natural, luego de desconectar la interfaz de la rama de servicio.

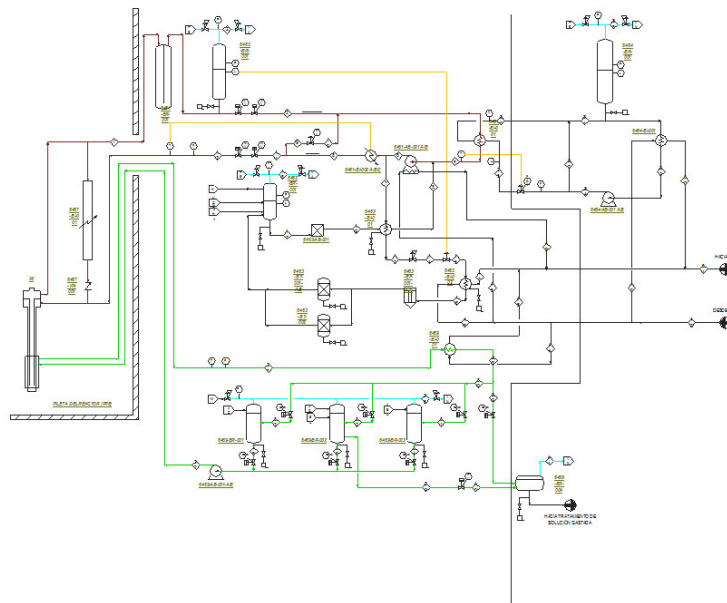


Figura 1.3 – Esquema LOOP

- La tercer parte es el módulo de irradiación que se encuentra inserto en el tanque del reflector, muy cerca del núcleo, en la posición H1 ($x=0$; $y=425$). La inserción es tal que el plano medio de las BBCC a ensayar quedan enfrentadas al núcleo 5 cm por debajo del plano medio del mismo (lugar donde se encuentra el pico de flujo neutrónico).

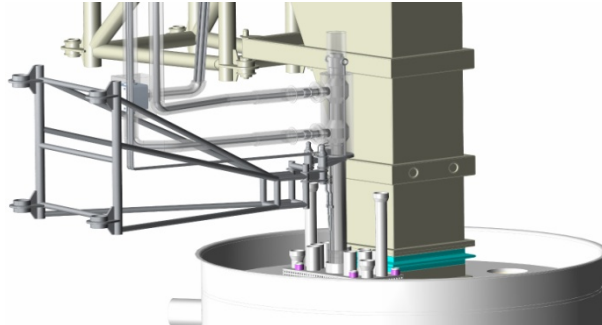


Figura 1.4 – MI inserto en el TQREF

Su función es contener las BBCC a ensayar y propiciar las condiciones de refrigeración y de flujo neutrónico requeridas para llevar a cabo el ensayo. En la parte inferior del MI se ubican las BBCC a estudiar y la parte superior es un cabezal que permite el ingreso y egreso de refrigerante. Además cuenta con una cámara de veneno neutrónico líquido, que se utiliza para modular el flujo neutrónico proveniente del reactor, a fin de poder realizar los ensayos que requieran ciertos flujos neutrónicos, establecer las rampas de potencia, enmascarar la rampa de arranque del reactor y permitir el funcionamiento del reactor con el LOOP funcionando a baja potencia.

1.1 Características del Módulo de Irradiación

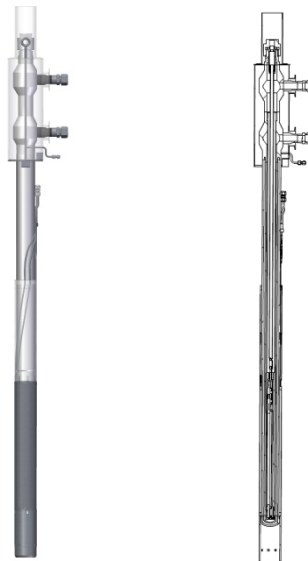


Figura 1.5 – Esquema Módulo de Irradiación

Está conformado principalmente por dos tubos concéntricos, llamados tubos de presión (TP) y de seguridad (TS), solidarios al cabezal con las cámaras de ingreso y egreso del refrigerante. Por el centro de este arreglo se sitúa el tubo divisor de flujo y el arreglo de BBCC. Tanto el cabezal como el tubo de presión soportan las condiciones de una central nuclear y se encuentran a la temperatura del refrigerante (aproximadamente a 280 °C), en cambio el de seguridad, exterior al de presión, se encuentra aislado térmicamente del mismo por un gas anular y, en su exterior, está en contacto con el agua del sistema de pileta (aproximadamente a 38°C) y con la cámara de veneno líquido necesaria para la operación.

La circulación del refrigerante a través del módulo se realiza ingresando por la cavidad inferior del cabezal, descendiendo anularmente entre el tubo de presión y el tubo divisor de flujo. Al arribar el fluido al extremo, el tubo divisor cuenta con lumbreras para invertir el sentido de circulación. Luego el fluido asciende por dentro del tubo divisor, pasa alrededor de las BBCC, donde refrigera a las mismas, para luego ascender hasta el cabezal y salir por la cavidad superior.

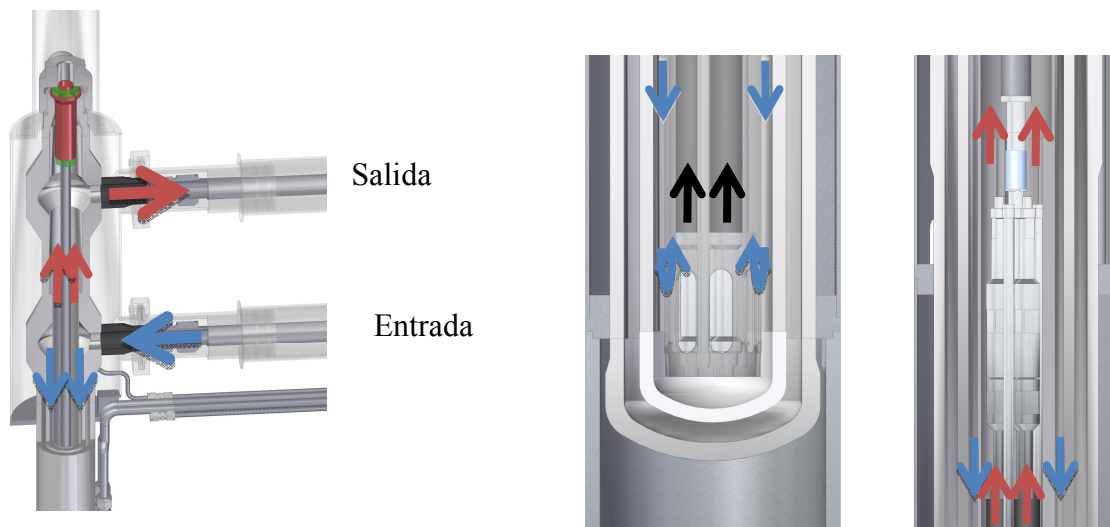


Figura 1.6 – Circulación de refrigerante por el módulo de irradiación.

Debido a las condiciones de alta temperatura dentro del MI, es necesario incorporar al mismo elementos que aíslen al mismo de la PRE. Es por ello que en la zona de tubos concéntricos, se dispone un gas aislante, dióxido de carbono. Además, a fin de aislar el cabezal de la pileta, se dispone de una barrera térmica proporcionada por un recipiente de vacío, solidario al tubo de seguridad. Dado que el tubo de seguridad está además unido al cabezal, se

produce una superposición de las aislaciones en esa zona. Es precisamente en esta zona, donde la conducción térmica es favorecida a través del cabezal y del tubo de seguridad hacia el exterior de la aislación, llegando a la PRE.

2. Objetivos

- Verificar el comportamiento de la aislación del módulo de irradiación.
- Calcular el calor disipado a través del tubo de seguridad hacia el sistema de pileta.
- Obtener valores de temperaturas máximas en el exterior de la aislación.

3. Desarrollo

El módulo de irradiación y sus condiciones de operación se ven influenciados por su entorno, la pileta del reactor, por lo que esta misma disipará parte del calor del refrigerante del LOOP, por lo que afectará el funcionamiento del mismo. A fin de minimizar dicha pérdida de calor se diseñó el módulo de tal manera que se encuentre aislado de la mejor manera. Por lo tanto se pretende determinar pues dicha pérdida de calor, es decir el comportamiento de la aislación del módulo.

Además se plantea la posibilidad de verificar la temperatura que alcanza el MI, ya que al estar inmerso en la pileta del reactor se busca eliminar la presencia de burbujas. Por lo tanto también se busca evitar alcanzar condiciones externas tales que produzcan vapor en la superficie externa al MI.

Por la manera en que está definida la geometría del módulo, la aislación se realiza en dos secciones. En la zona de tubos concéntricos y hasta el cabezal, mediante dióxido de carbono entre el tubo de presión y el de seguridad. Luego, en la zona del cabezal y la interfaz hasta la brida de conexión se dispuso un sistema de vacío, el que se encuentra confinado por medio de una carcasa metálica. En el presente estudio se busca calcular la potencia que se disipa a pileta y la temperatura alcanzada únicamente en la sección de tubos concéntricos.

Para el caso de estudio se opta por realizar el cálculo con las condiciones de ensayo de BBCC de la CNE. El ensayo que se estudia es el caso de acumulación de quemado, en el cual se implementan 3 BBCC en un arreglo triangular (Figura 3), con una potencia total de 48kW.

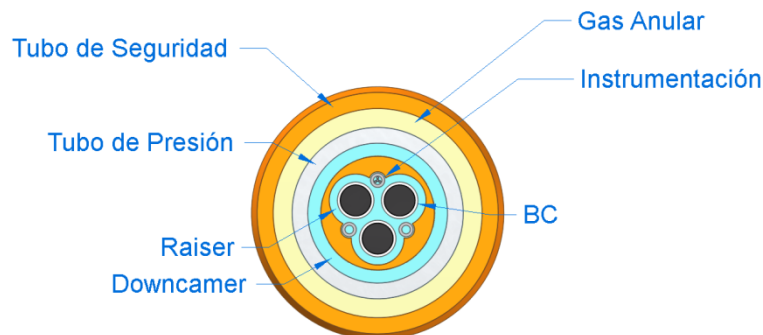


Figura 2.1 – Corte BBCC

3.1 Cálculo de potencia disipada

Para realizar el cálculo de la potencia disipada a través del TS se parte de las condiciones de temperaturas conocidas: la temperatura de pileta y la temperatura del down comer.

Conocidas las temperaturas de pileta y del refrigerante, los datos geométricos y físicos de las resistencias térmicas interpuestas entre estos, se asume un valor del calor transferido y partiendo de la temperatura de pileta se calcula la temperatura del down comer, tomada como referencia. Luego se itera variando el valor del calor transferido, hasta que la temperatura de referencia coincida con la temperatura del down comer, que es dato.

Para el cálculo sólo se considera la potencia que se disipa a través del tubo de seguridad, sin considerar al cabezal o la interfaz del módulo con el búnker, ni el comportamiento de la aislación de éstos.

A fin de simplificar el cálculo solamente se tiene en cuenta la potencia disipada a través de las paredes concéntricas, sin tener en cuenta las superficies de los casquetes de seguridad y presión, tampoco se considera el centrador inferior. Además no se considera la cámara de venenos líquidos. A pesar de ser varias las simplificaciones, se considera que por ser una aproximación inicial, las mismas no son relevantes.

La pérdida de calor desde el módulo de irradiación se produce a través de una serie de resistencias térmicas interpuestas, estas son:

- Resistencia a la transmisión del calor por convección natural desde la pared exterior del tubo de seguridad al agua de la pileta
- Resistencia a la transmisión del calor por conducción radial a través de la pared del tubo de seguridad.
- Resistencia a la transmisión del calor por conducción y radiación a través de la capa intermedia de CO₂

- Resistencia a la transmisión del calor por conducción radial a través de la pared del tubo de presión.
- Resistencia a la transmisión del calor por convección forzada desde el refrigerante a la pared interior del tubo de presión.

3.1.1 Datos

Los valores geométricos del módulo son:

Diámetros	[m]
$D_4(De\ TS)$	0,0889
$D_3(Di\ TS)$	0,07366
$D_2(De\ TP)$	0,06033
$D_1(Di\ TP)$	0,04925
$D_{TDF}(De\ TDF)$	0,04

Tabla 3.1 - Diámetros

Áreas asociadas al diámetro	[m ²]
A_4	0,48428
A_3	0,40126
A_2	0,32865
A_1	0,26829

Tabla 3.2 – Áreas asociadas al diámetro

Otros valores propios del módulo [5]

Longitud L	1,734 m
Caudal	1 kg/s

Tabla 3.3 – Otros valores

3.1.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de Densidad ρ , Viscosidad Dinámica μ , Coeficiente de Dilatación Volumétrica β , la conductividad K y número de Prandtl Pr del agua se obtienen de tablas [2]. Además la conductividad del Acero S316 K_{ss} se obtiene de la norma [3].

Para el caso de la conductividad térmica para el CO_2 aislante, se plantea utilizar una linealización de los valores, para ello se toman los siguientes valores [1].

Temperatura [K]	Conductividad K CO_2 [w / m · °C]
300	0,016572
350	0,02047
400	0,02461
450	0,02897
500	0,03352
550	0,03821
600	0,0411

Tabla 3.4 - Conductividad térmica del Dióxido de Carbono [1]

3.1.3 Cálculos

Partiendo de la temperatura del agua de la pileta (T_{pil}) y el valor asumido de la pérdida de calor, denominado Q_{mi} , se calculan radialmente, desde el exterior hacia el interior, los saltos térmicos a través de las resistencias térmicas. Durante el cálculo se requieren algunos valores de temperaturas para comenzar el proceso iterativo, para ello se asumen valores aproximados partiendo de un estudio en CFD (Computational Fluid Dynamics).

Resistencia a la transmisión del calor por convección natural desde la pared exterior del tubo de seguridad al agua de la pileta

La transferencia de calor hacia el agua de la pileta se produce por la convección natural del agua desde el exterior del tubo de seguridad.

Por lo tanto se calcula el número de Rayleigh:

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Ecuación 3.1

Donde Gr es el número de Grashoff que se obtiene de la siguiente manera:

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot \rho^2 \cdot L^3}{\mu^2}$$

Ecuación 3.2

Y Pr es el número de Prandtl (Pr) que se obtiene de tablas.

Con ambos valores, y, dado que Gr es mayor que 10^9 para un régimen turbulento se obtiene el número de Nussel:

$$Nu = a \cdot (Ra)^n \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Para valores de $2 \cdot 10^7 < Ra < 1 \cdot 10^{13}$

$$a = 0.135$$
$$n = 1/3$$

Para obtener los valores de las propiedades físicas se utiliza la temperatura del film

$$T_{film} = \frac{T_4 + T_{pil}}{2} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Luego se obtiene el coeficiente de transmisión de calor:

$$h_{CN} = \frac{Nu \cdot K}{L} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Y siendo

$$\phi = \frac{Q_{mi}}{A_4} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Entonces se obtiene la temperatura en la pared:

$$T_4 = T_{pil} + \frac{\phi}{h_{CN}} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Siendo la resistencia por convección natural:

$$RT_{CN} = \frac{T_4 - T_{pil}}{Q_{mi}} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Resistencia a la transmisión del calor por conducción radial a través de la pared del tubo de seguridad

Dado que se trata del caso de conducción radial se obtiene la temperatura de la pared interior del tubo de seguridad de la siguiente manera:

$$T_3 = T_4 + \frac{Q_{mi}}{2 \cdot \pi \cdot K_{SS} \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)$$

Ecuación 3.9

Siendo la resistencia por conducción en el tubo de seguridad:

$$RT_{TS} = \frac{T_3 - T_4}{Q_{mi}}$$

Ecuación 3.10

Resistencia a la transmisión de calor por conducción y radiación a través de la capa intermedia de CO₂

En el caso de la conducción, la presencia del dióxido en el módulo se debe a sus cualidades como aislante térmico. Dada la variación del valor de la conductividad térmica que presenta en CO₂, con la temperatura, se la aproxima por medio de la recta a fin de obtener un resultado más preciso.

$$K_{CO_2} = 8,4267 \cdot 10^{-5} T + -8,855 \cdot 10^{-3}$$

Ecuación 3.11

Donde T es la temperatura expresada en °C

Simbólicamente:

$$K_{CO_2} = M \cdot T + N$$

Ecuación 3.12

A fin de facilitar el cálculo, no se considera la convección en el gas. Además dado que el espesor de la capa de gas es pequeño en comparación con el diámetro de la misma, se asume despreciable la variación del área de transferencia con el radio y se supone la transmisión de calor a través de una placa plana. El área de referencia será una intermedia y se calcula como sigue:

$$Am = \pi \cdot \frac{D_2 + D_3}{2} \cdot L$$

Ecuación 3.13

Partiendo de la ecuación de Fourier:

$$Qc = K_{CO_2} \cdot Am \cdot \frac{dT}{dx}$$

Ecuación 3.14

Luego de sustituir K_{CO_2} , separa en variables y luego se integra:

$$\frac{Qc}{Am} dx = (M \cdot T + N) dT$$

Ecuación 3.15

$$\frac{Qc}{Am} x = \frac{M}{2} \cdot T^2 + NT$$

Ecuación 3.16

$$\frac{Qc}{Am} e_{CO_2} = \frac{M}{2} \cdot (T_2^2 - T_3^2) + N(T_2 - T_3)$$

Ecuación 3.17

$$Qc = \frac{Am}{e_{CO_2}} \left[\frac{M}{2} \cdot (T_2^2 - T_3^2) + N(T_2 - T_3) \right]$$

Ecuación 3.18

Además, se calcula el calor transferido por radiación térmica, para ello se considera una emisividad $\varepsilon = 0,7$. Para calcular se utiliza la siguiente ecuación, donde las temperaturas se encuentran en grados Kelvin.

$$Qr = \frac{\tau \cdot A_2 \cdot (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{2}{\varepsilon} - 1}$$

Ecuación 3.19

Finalmente se obtiene

$$Q_{mi} = Qc + Qr$$

Ecuación 3.20

Se asume un valor de T_2 y se lo va variando hasta que el valor de Q_{mi} calculado coincida con el valor de Q_{mi} asumido.

Siendo la resistencia en el CO₂,

$$RT_{CO_2} = \frac{T_2 - T_3}{Q_{mi}}$$

Ecuación 3.21

Resistencia a la transmisión del calor por conducción radial a través de la pared del tubo de presión

De igual manera que para el tubo de seguridad, se obtiene la temperatura de la pared interna del tubo de seguridad por medio de:

$$T_1 = T_2 + \frac{Q_{mi}}{2 \cdot \pi \cdot K_{SS} \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Ecuación 3.22

Siendo la resistencia por conducción en el tubo de presión:

$$RT_{TP} = \frac{T_1 - T_2}{Q_{mi}}$$

Ecuación 3.23

Resistencia a la transmisión del calor por convección forzada desde el refrigerante a la pared interior del tubo de presión.

El fluido refrigerante que circula dentro del módulo lo realiza a la temperatura de operación de la central a ensayar, para ello se regula la temperatura en el búnker. Es por ello que se toma a esta temperatura como referencia. El intercambio de calor entre este fluido y la pared interna del tubo de presión se realiza por medio de la convección forzada.

Para ello se procede a obtener el número de Reynolds. Antes se calculan la velocidad de circulación y el diámetro hidráulico.

Siendo el área de pasaje

$$A_{DC} = \pi \left(\frac{D_4}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{D_{TDF}}{2}\right)^2$$

Ecuación 3.24

$$v = \frac{\dot{w}}{\rho_{ref} \cdot A_{DC}}$$

Ecuación 3.25

Y el diámetro hidráulico

$$D_H = D_4 - D_{TDF}$$

Ecuación 3.26

Se calcula la temperatura de film como

$$T_{film} = \frac{T_1 + T_{ref}}{2}$$

Ecuación 3.27

Finalmente se obtiene el número Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_H}{\mu}$$

Ecuación 3.28

Y obteniendo el número de Prandtl (Pr) de tabla [2], se obtiene el valor de Nu. Con ambos valores y para un valor de Reynolds mayor a 10^3 , se tiene el valor de Nussel:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{1/3}$$

Ecuación 3.29

Dado que $L < 60 \cdot D$

$$h_{CF} = \frac{Nu \cdot K}{D_4}$$

Ecuación 3.30

Finalmente luego de obtener el coeficiente de transferencia de calor se calcula la temperatura de referencia.

$$T_{ref\ calculada} = T_1 + \frac{Q_{mi}}{h_{CF} \cdot A_1}$$

Ecuación 3.31

Una vez obtenida la T_{ref} calculada, se obtiene la resistencia total, se calcula el Q_{mi} y se procede a iterar nuevamente la T_2 .

3.1.4 Resultados

Luego de programar el sistema en MS Excel y realizar los cálculos iterativos se obtiene una pérdida de calor desde el módulo de irradiación de 1173,63 W. Lo que equivale al 2,44% de la potencia del caso a ensayar.

En el siguiente cuadro se muestran las temperaturas resultantes con sus respectivos valores de resistencia térmica

Temperaturas	[°C]	Resistencias [°C/W]
T _{pil}	38	
T ₄	42,96	R _{CN} = 4,227 · 10 ⁻³
T ₃	44,36	R = 1,195 · 10 ⁻³
T ₂	277,49	R = 1,986 · 10 ⁻¹
T ₁	278,71	R = 1,04 · 10 ⁻³
T _{ref calculada}	280	R _{CF} = 1,10 · 10 ⁻³

Tabla 3.5 - Resultados

3.2 Temperaturas máximas en el cruce de Aislaciones

La aislación de cabezal se produce mediante el sistema de vacío, cuya carcasa se encuentra solidaria al tubo de seguridad. La misma se encuentra solapada además con la aislación que propicia el gas anular. Dada pues la geometría del módulo, se produce un denominado puente térmico entre ambos tubos a través del cabezal, por lo que es importante verificar las temperaturas obtenidas luego de la aislación.

La verificación del comportamiento de la aislación se realizó por medio del cálculo numérico, para ello se utilizó el método de las diferencias finitas. Este método se utiliza para aproximar incrementos diferenciales en la temperatura, utilizando a la ecuación de Laplace. El desarrollo se puede observar en [1].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Ecuación 3.32

3.2.1 Discretización

Dada la simetría que presenta el cabezal en la zona a estudiar se optó por realizar un estudio en 2D. La zona a estudiar incluye la sección superior de los tubos y la sección inferior del cabezal con los mismos diámetros que los tubos. Además se incluyó parte de la plancha de apoyo.

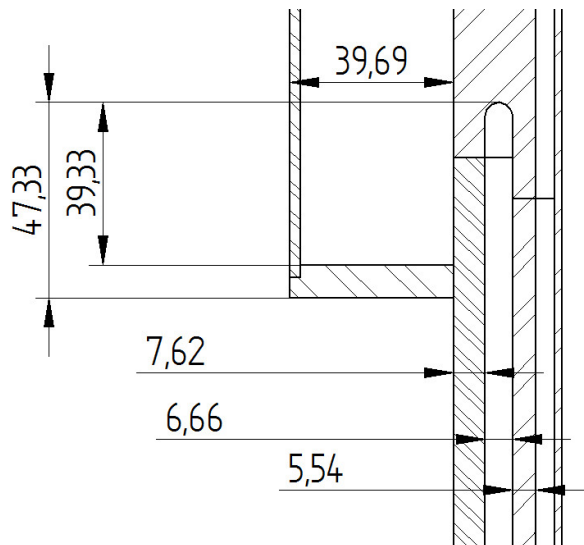


Figura 3.1 – Medidas en zona del Puente Térmico

Para utilizar el método de diferencias finitas es necesario discretizar la geometría, para simplificar el cálculo se optó por utilizar elementos cuadrados.

$$\Delta x = \Delta y = 0,001111m$$

Ecuación 3.33

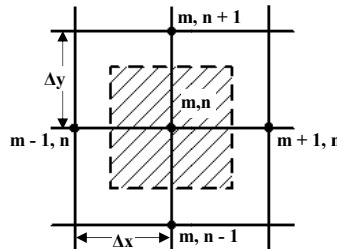
La fidelidad del cálculo depende del tamaño de los incrementos definidos por la discretización, cuanto más pequeños sean, mayor será la cantidad, lo que dará una distribución más exacta de temperaturas.

3.2.2 Ecuaciones

La resolución del método se hace por medio del balance de energía en cada elemento obteniendo la ecuación característica para cada elemento. El cálculo es realizado sólo para el estado estacionario. Estas ecuaciones se encuentran en tablas [1]. La resolución del sistema se realiza mediante el cálculo iterativo, resolviendo el balance de energía de cada elemento en cada iteración, hasta arribar a la convergencia.

Observando la geometría se plantea que el área donde se presenta el puente térmico es muy pequeña en comparación con la del largo total del tubo de presión, se desprecia la implicancia de la radiación en el resultado. A pesar de despreciarse la radiación ocurrida entre tubos, debido a la presencia del aislante entre medio de ellos, sí se tiene en cuenta la diferencia de conductividad entre el Acero Inoxidable y el Dióxido de Carbono. Dadas las condiciones de conducción y convección las ecuaciones a utilizar son:

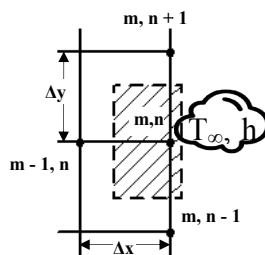
- Nodo interno



$$T_{m,n} = \frac{T_{m,n-1} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m+1,n}}{4}$$

Ecuación 3.34

- Nodo con Convección



Siendo:

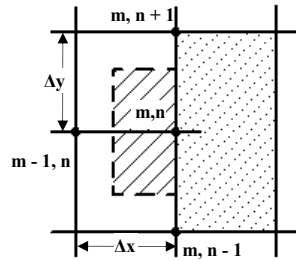
$$Bi = \frac{h \cdot \Delta x}{K}$$

Ecuación 3.35

$$T_{m,n} = \frac{T_{m-1,n} + Bi \cdot T_{\infty} + \left(\frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1}}{2} \right)}{2 + Bi}$$

Ecuación 3.36

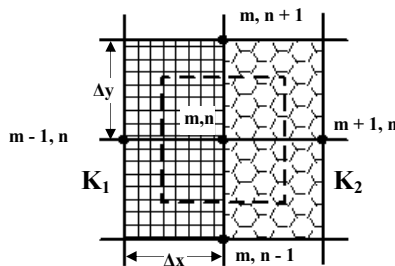
- Nodo con Aislación



$$T_{m,n} = \frac{T_{m,n-1} + T_{m,n+1} + 2 \cdot T_{m-1,n}}{4}$$

Ecuación 3.37

- Nodo en Material Compuesto



Siendo

$$\kappa = \frac{K_2}{K_1}$$

$$T_{m,n} = \frac{2(T_{m+1,n} + \kappa \cdot T_{m-1,n}) + (1 + \kappa)(T_{m,n-1} + T_{m,n+1})}{4(1 + \kappa)}$$

Ecuación 3.38

3.2.3 Datos

Las condiciones de contorno tomadas para el cálculo son la temperatura de la pileta y la temperatura de entrada del refrigerante. Se utiliza esta última temperatura debido a que dada la forma constructiva del módulo, la temperatura de salida (levemente mayor) se encuentra encubierta por la de entrada.

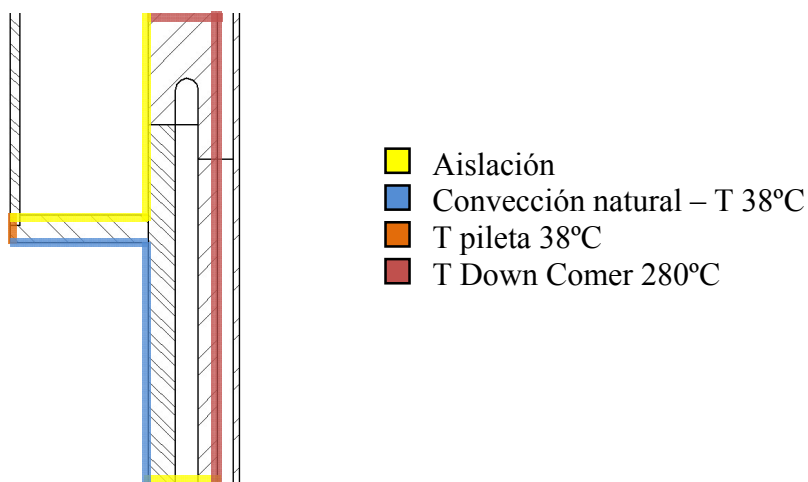


Figura 3.2 – Condiciones de contorno en el Puente Térmico

Para el caso de los coeficientes de transferencia de calor son tomados a partir del cálculo de la potencia disipada.

3.2.4 Resolución y resultados

Una vez definida la discretización, el sistema de ecuaciones y las condiciones de borde, se procede al armado del problema en el programa MS Excel.

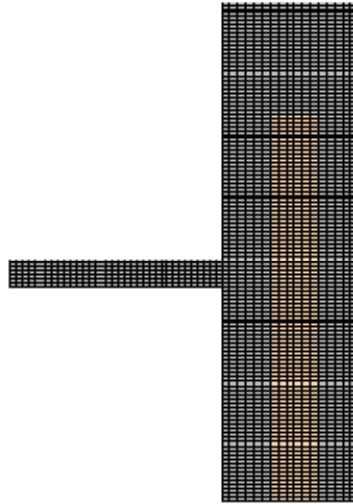


Figura 3.3 – Discretización del Puente térmico

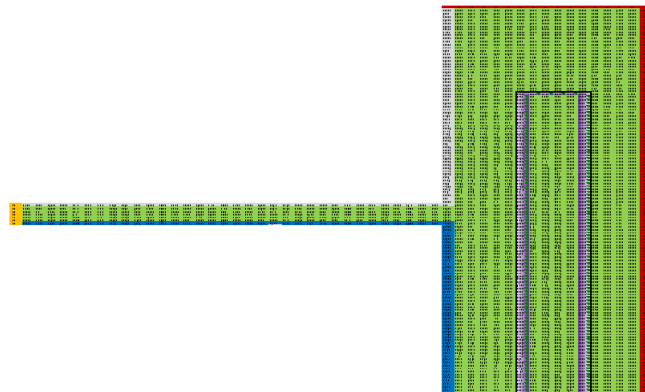


Figura 3.4 - Condiciones de borde en Diferencia Finitas

Al activar y realizar el cálculo iterativo en MS Excel se obtiene la distribución de temperaturas.

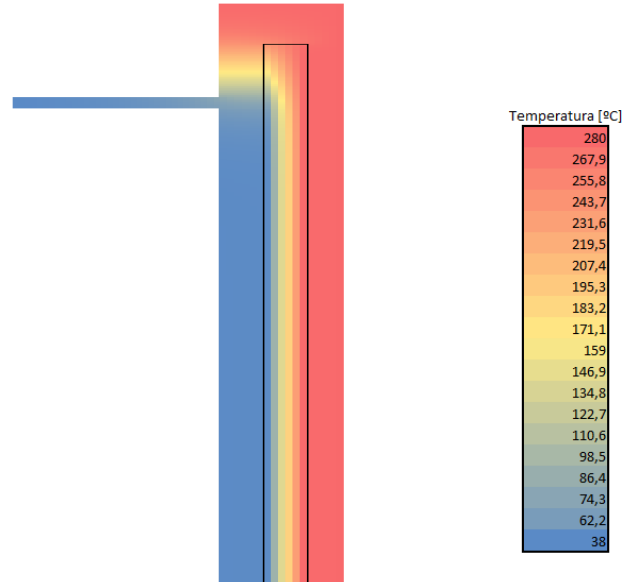


Figura 3.5 – Resultados en el Puente Térmico

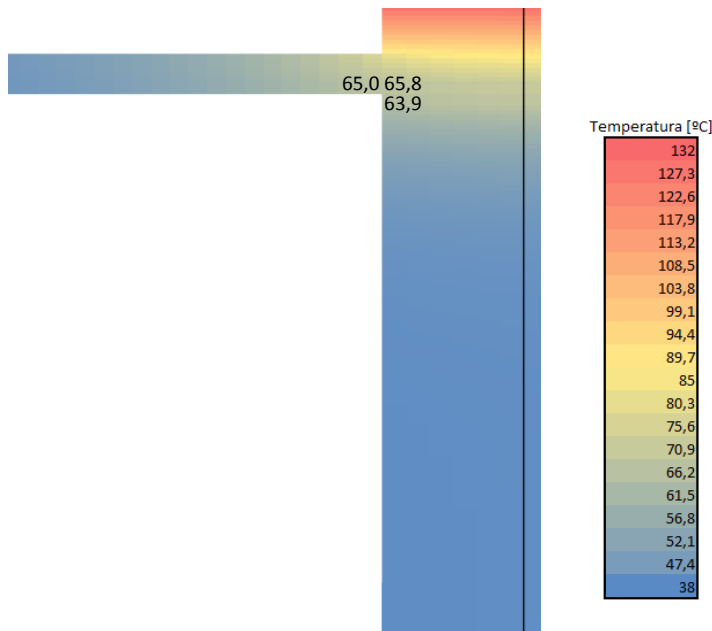


Figura 3.6 – Temperaturas máximas expuestas a la PRE.

3.3 Verificación en CFD

Con el objetivo de verificar los valores anteriormente presentados, se comparan con un estudio realizado en CFD, particularmente en ANSYS Fluent 18.2. Para el caso se tuvieron en cuenta condiciones similares de operación, en el mismo se incluyeron las 3 BBCC, totalizando una potencia de 48 kW.

3.3.1 Modelado

El sistema modelado para este caso considera al módulo de irradiación completo y la porción de agua del sistema PRE circundante al MI. De igual manera que en la sección 3.1, no se considera la presencia del centrador inferior, tampoco la cámara de veneno líquido, aunque sí se tiene en cuenta el cabezal y su plancha de apoyo. En el mismo se incluyó, por debajo de la plancha de apoyo, una sección del agua del sistema PRE.

En cuanto al modelado se activan las ecuaciones de energía, turbulencia y radiación. En cuanto a la turbulencia se optó por utilizar un modelo “k – ϵ ”, con funciones de pared estándar, discretización upwind de segundo orden y valores de y^+ menores a 300. Además a fin de resolver la radiación se incluyó un modelo de ordenadas discretas.

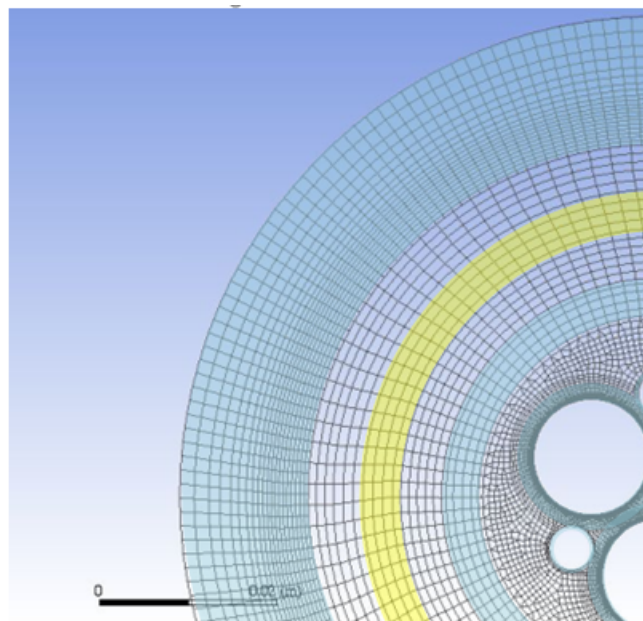


Figura 3.7 - discretización en la zona de BBCC

Condiciones de Borde y Materiales

Las condiciones de borde del modelo incluyen una condición de flujo de calor de 400 W/cm en la zona activa BBCC. Se establece una condición adiabática en toda la superficie exterior del Cabezal y Plancha de Apoyo. Además se fija una temperatura de 38°C en la capa exterior del volumen de agua de pileta incluido.

Se incluyen materiales con densidad variable, a fin de que se produzca la convección natural, particularmente en el agua del sistema PRE. Para el caso del dióxido de carbono, las condiciones modeladas no son las reales, debido a que en el diseño real se plantea que el mismo tiene circulación en un sólo sentido dentro del MI y por lo tanto una convección forzada, siendo sus condiciones controladas en la sala de procesos. Por esta razón, a fin de sólo tener en cuenta la conducción a través del mismo, sin posibilidad de generar las condiciones reales, se idealizó un sólido con las propiedades de conducción del dióxido de carbono, a fin de restringir el movimiento convectivo en el mismo.

3.3.2 Resultados.

Finalmente se observa que la potencia disipada a través del tubo de seguridad es 1284W, es decir un 2,7% de la generada en las BBCC.

Además se obtuvo una temperatura exterior en la zona superior del TS entorno a 70 °C. Llegando a valores de 84°C en la plancha de apoyo.

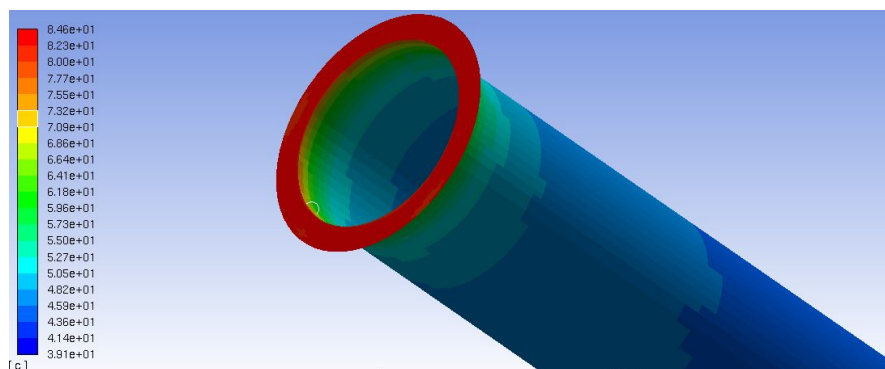


Figura 3.8 - Temperaturas en zona de plancha de apoyo.

4 Conclusiones y trabajos futuros

Al finalizar el presente estudio, luego de analizar y comparar los resultados se concluye que el diseño propuesto para la aislación del Módulo de Irradiación cumple con la función de minimizar las pérdidas de calor y de evitar la formación de vapor en su superficie. A pesar de su diseño compacto, por las restricciones impuestas por el proyecto, la aislación confina las altas temperaturas al interior del módulo, aumentando la eficiencia térmica del sistema.

Considerando los resultados se observa que la primer aproximación del cálculo de la potencia disipada se encuentra dentro de los valores obtenidos por el CFD. La diferencia entorno al 9,3% entre ellos se debe a la discretización geométrica, la consideración más real de la geometría. Respecto a las temperaturas a pesar de las diferencias de valores en los últimos elementos del volumen en CFD, se verifica que ambos valores se encuentran lejos de la temperatura de saturación. En la plancha de apoyo se observan temperaturas mayores a las calculadas en las diferencias finitas, esto se debe a las condiciones idealizadas de borde adiabáticas en zonas donde aún hay presencia de agua del sistema PRE. Para ello se propone un estudio más detallado en la zona, con condiciones más cercanas a la realidad y una resolución de la discretización de la zona más detallada.

Referencias

- [1] Holman J.P. Heat Transfer - 4th Edition. McGraw Hill - Kogakusha
- [2] Mills A.F. - Transferencia de Calor. McGraw Hill – Irwin
- [3] ASME Boiler & Pressure Vessel Code – 2010
- [4] IT-006-RA-10-6413-2-001-1 Diseño Termohidráulico del LOOP en Operación Normal