



Trabajo final presentado para optar al título de
"Especialista en Reactores Nucleares y su Ciclo de Combustible"

***ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ASPECTOS
TERMOHIDRAULICOS DE ELEMENTOS
COMBUSTIBLES TIPO MTR***

Alumno: Ernesto Paolo Chiacchiarini

Director: Luis Vazquez

CoDirector: Anahí Ottaviani

Octubre de 2009



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Indice General

Resumen	1
Nomenclatura y Definiciones	2
1. Introducción	4
1.1. Objetivos	4
1.2. Motivación	4
1.3. Reactor RA-6	5
1.3.1. El Núcleo	5
1.3.2. Sistema de refrigeración	7
2. Estudio Hidráulico	9
2.1. Generalidades	9
2.2. Determinación Analítica	10
2.3. Determinación Experimental	12
2.3.1. Dispositivo Experimental	13
2.3.2. Ensayo	14
2.4. Análisis de los Resultados	15
3. Estudio Termohidráulico	16
3.1. Generalidades	16
3.2. Determinación Analítica	17
3.2.1. Método de Cálculo	17
3.3. Determinación Experimental	20
3.3.1. Descripción del Circuito	20
3.3.2. Sección de Ensayo	21
3.3.3. Esquema de Medición	22
3.3.4. Ensayos	24
3.4. Análisis de los Resultados	25
4. Conclusiones	27
A. Resultados	28
A.1. Ensayo Hidráulico	28
A.2. Ensayo Termohidráulico	29

Bibliografía y Referencias

33

Resumen

En el marco del proyecto de aumento de potencia del reactor RA-6, se realizaron en el *Laboratorio de Termohidráulica* del *CAC*, una serie de ensayos hidráulicos y termohidráulicos para estudiar el comportamiento de los elementos combustibles tipo *MTR* en las nuevas condiciones de operación.

El desarrollo de estos ensayos conforman el tema de estudio sobre el que se elabora el presente informe con el objetivo de completar los trabajos correspondientes al curso de especialización en cuestión.

Se presenta el marco analítico, se describen las secciones de ensayo y los procedimientos usados en los ensayos hidráulicos y termohidráulicos. Además se presentan algunos resultados obtenidos experimentalmente y se comparan con aquellos obtenidos analíticamente.

Nomenclatura y Definiciones

MTR : *Material Test Reactor*.

ONB : (*Onset of Nucleate Boiling*) Inicio de la Ebullición Nucleada.

m.c.a. : (*metros de columna de agua*) Unidad de medida de presión.

ΔP : Diferencia de presión entre dos puntos del flujo [*Pa*]

ΔH : Diferencia de presión entre dos puntos del flujo [*mca*]

Q : Caudal volumétrico [$\frac{m^3}{seg}$]

L : Largo de la cañería [*m*]

A : Area de la sección transversal al flujo de fluido [m^2]

p_m : Perímetro mojado [*m*]

D_h : Diámetro hidráulico

$$D_h = 4 \frac{A}{p_m}$$

p_c : Perímetro calefactor [*m*]

e : Espesor del canal combustible [*m*]

Λ : factor de fricción en cañerías.

K : Coeficiente de pérdida de carga.

T_e : Temperatura de refrigerante de entrada al canal combustible [$^{\circ}C$]

P_e : Presión de refrigerante de entrada al canal combustible [*Pa*]

z : Altura o cota a lo largo del canal combustible tomada desde la entrada de refrigerante [*m*]

T_p : Temperatura de pared en el canal combustible [$^{\circ}C$]

T_b : Temperatura media del refrigerante [$^{\circ}C$]

ρ : Densidad del refrigerante [$\frac{Kg}{m^3}$]

C : Calor específico [$\frac{J}{Kg^{\circ}C}$]

μ : Viscosidad dinámica [$Pa\ seg$]

ϕ : Flujo calórico [$\frac{W}{m^2}$]

v : Velocidad del refrigerante [$\frac{m}{seg}$]

G : Velocidad Másica [$\frac{Kg}{m^2seg}$]

$$G = v\rho$$

h : coeficiente de transferencia de calor en convección forzada [$\frac{W}{m^2^{\circ}C}$]

k : Coeficiente de conductividad térmica [$\frac{W}{m^{\circ}C}$]

Re : Número de Reynolds []

$$Re = \frac{D_h v \rho}{\mu}$$

Nu : Número de Nusselt []

$$Nu = \frac{h D_h}{k}$$

Pr : Número de Prandtl []

$$Pr = \frac{C\mu}{k}$$

Los subíndices p y b indican las propiedades del fluido o parámetros del refrigerante en contacto con la pared del conducto que conduce el flujo, y en el seno del fluido respectivamente. Cuando se indica el subíndice f las propiedades del fluido se refieren a la temperatura de film que es la semisuma de las temperaturas de pared y del seno del fluido.

$$T_f = \frac{T_p + T_b}{2}$$

El subíndice i indica el número ordinal del conjunto en cuestión. El significado de otros subíndices y superíndices usados se dará donde sean aplicados.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivos

El presente trabajo tiene por objetivo realizar un estudio de los aspectos hidráulico y termohidráulico de elementos combustibles tipo *MTR* en el marco del proyecto de aumento de potencia del reactor *RA-6*.

1.2. Motivación

Este trabajo encuentra motivación con el proyecto de aumento de potencia del reactor *RA-6*.

El aumento de potencia del reactor, está ligado a un aumento del caudal del refrigerante que circula por el núcleo. Existe una limitación para este caudal debido a las instalaciones existentes. Esta reside en la imposibilidad de reemplazar las cañerías que están empotradas en las paredes de hormigón. Existe por diseño un límite máximo para la velocidad de circulación del refrigerante en estas cañerías, de manera de evitar problemas asociados a la alta velocidad del fluido en circulación como por ejemplo las vibraciones.

En las nuevas condiciones de operación se requiere analizar la refrigeración de los elementos combustibles. El régimen del escurrimiento del refrigerante por los canales combustibles, caracterizado por el número de Reynolds, podría encontrarse en la región de transición entre régimen laminar y turbulento ($2500 < Re < 7000$) y podría ser inestable.

Un parámetro del diseño termohidráulico del núcleo es la temperatura de pared en el canal mas caliente, y se propone como objetivo que ésta permanezca cierto margen por debajo de la de *ONB*. En el cálculo del nuevo núcleo se deben introducir correcciones para compensar incertezas, con lo que resulta de interés contar con datos experimentales específicos.

Con estos ensayos se busca determinar la temperatura alcanzada en la pared de las placas combustibles para las distintas geometrías de los canales combustibles y distintas condiciones de operación, dadas por la temperatura de entrada y velocidad del refrige-

rante, en las que pueda trabajar el reactor.

Por otra parte en los reactores de este tipo se cuenta con mediciones de diferencia de presión, ΔP , a través del núcleo y caudal total del circuito primario. No todo el caudal atraviesa el núcleo. Como no existe una medición directa del caudal del refrigerante que circula por los canales combustibles, para conocer la velocidad del refrigerante en los mismos es necesario contar con la relación entre el ΔP y el caudal (caracterización hidráulica) en los canales combustibles. Para esto se propone realizar ensayos hidráulicos de los elementos combustibles.

1.3. Reactor RA-6

El RA-6 está ubicado en el Centro Atómico Bariloche. Es un reactor de tipo piscina con elementos combustibles tipo *MTR* (Material Test Reactor) de uranio enriquecido, con un enriquecimiento levemente menor al 20 % y diseñado originalmente con una potencia de máxima operación de 500KW térmicos. El núcleo es refrigerado y moderado por agua liviana. La circulación del refrigerante primario es forzada en sentido descendente, y un sistema secundario evacúa el calor a la atmósfera.

El reactor, propiamente dicho, consiste en un tanque cilíndrico de 2,40m de diámetro y 9,70m de altura construido de acero inoxidable y ubicado verticalmente con el extremo superior abierto, dentro del cual se encuentra el núcleo. El núcleo está sostenido por una grilla de fijación ubicada a 6,60m por debajo del nivel de agua del tanque.

A los efectos de blindar las radiaciones originadas en el núcleo, el tanque está revestido por una pared de hormigón pesado. A través suyo pasan los conductos que forman parte de los sistemas propios del reactor y de las facilidades experimentales instaladas.

Durante la operación normal del reactor el tanque se encuentra totalmente lleno de agua desmineralizada. Esta cumple las veces de refrigerante, moderador y blindaje para las radiaciones con dirección axial y sentido hacia la boca del tanque.

1.3.1. El Núcleo

El núcleo está constituido por una grilla de aluminio en la que se ubican los elementos combustibles tipo *MTR*.

Los elementos combustibles tipo *MTR* están formados por 19 placas planas, dispuestas verticalmente y paralelas, entre otras dos estructurales formando todo el conjunto una *caja* de sección rectangular de 76mm por 80mm y de 885mm de alto. Esta caja está unida en la parte inferior a una boquilla cilíndrica que posiciona el elemento combustible en la grilla y permite la circulación del refrigerante. La figura 1.1 muestra un esquema de una caja combustible.

Cada placa se compone de una parte central donde se encuentra el material físil denominada *meat*. El *meat* consiste en una dispersión de U_3Si_2 , con un enriquecimiento menor al 20 % en U^{235} , en una matriz de *Al*. El *meat* se recubre con una capa de 0,4mm de espesor de *Al* que denominamos *vaina*. Este arreglo, así compuesto, se denomina *placa combustible*. Son placas de 682mm de largo y 72mm de ancho.

Se define el *largo activo* y el *ancho activo*, de una placa, como las dimensiones del *meat* dentro de la placa: 615mm y 60mm respectivamente. En el extremo superior la

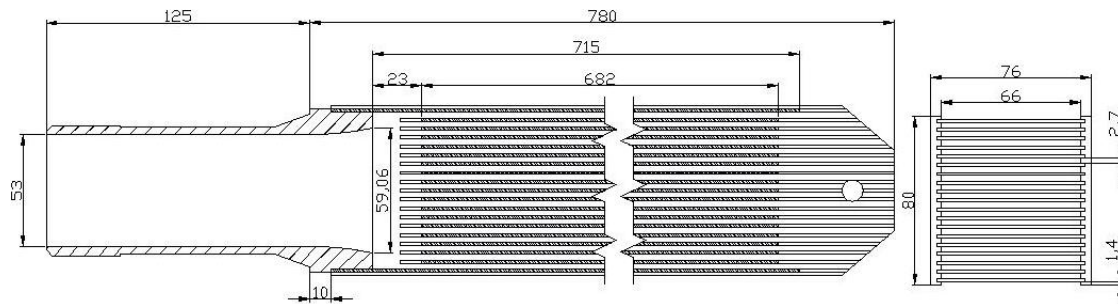


Figura 1.1: Elemento Combustible Tipo *MTR*

caja posee un travesaño que permite la manipulación del elemento combustible desde la boca la piletta del reactor. Por la parte inferior posee una boquilla cilíndrica por la que circula el refrigerante. Por otra parte la boquilla es el componente que posiciona el elemento combustible en la grilla que lo fija en el núcleo.

Llamamos *Canales Combustibles* a los canales por los que circula el fluido refrigerante dentro y entre las cajas o elementos combustibles. Aquellos dentro de las cajas los llamamos *canales internos* y están formados por el espacio entre 2 placas contiguas de una misma caja combustible. Es un canal de sección de geometría rectangular de 66mm de ancho y de 2,7mm de espesor. En cada caja se forman 18 de estos canales. Por otra parte aquellos entre cajas los llamamos *canales externos* y están formados por las placas externas de dos elementos combustible en posiciones de grilla contiguas y tienen geometría rectangular de 66mm de ancho y de 3,9mm de espesor.

La grilla es una placa rectangular que tiene 80 perforaciones de 61,7mm de diámetro, denominadas *perforaciones grandes* y 63 perforaciones de 22,25mm de diámetro denominadas *perforaciones pequeñas*. En las perforaciones grandes se colocan los elementos combustibles que forman el núcleo y a través de los cuales sale el refrigerante que ingresa por la parte superior de la caja y circula por los canales internos. Las perforaciones pequeñas evacúan el refrigerante que circula por los canales externos.

La reacción en cadena es controlada por medio de 4 *elementos de control*. Estos tienen el aspecto y dimensiones de un elemento combustible estándar pero el número de placas combustibles es menor. En éstos 4 placas están compuestas por un material que actúa como absorbente de neutrones. Estas placas absorbentes se deslizan verticalmente dentro de guías en la caja combustible por acción de un mecanismo de control ubicado por encima del tanque del reactor.

La disposición de los elementos combustibles en la grilla da las distintas configuraciones del núcleo. En el caso de este reactor, para las configuraciones posibles, se tiene que el número de cajas combustibles es mayor a 16 y menor a 30. En las posiciones de grilla de la periferia respecto de aquellas donde se ubican los elementos combustibles se colocan cajas de grafito que tiene la función de reflector neutrónico.

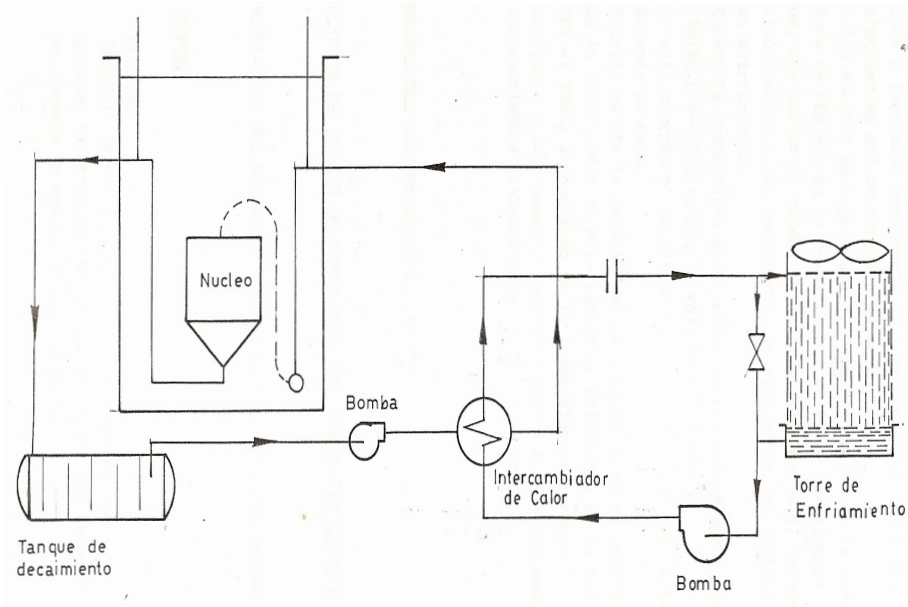


Figura 1.2: Sistema de Refrigeración

1.3.2. Sistema de refrigeración

Este sistema tiene por objetivo extraer el calor generado en el núcleo. Está compuesto por dos circuitos uno primario, que transporta el refrigerante que circula a través del núcleo, y uno secundario que libera el calor a la atmósfera.

El sistema primario tiene como función refrigerar el núcleo en operación y parada, y en los transitorios operacionales previstos. Sus componentes principales son:

- Tanque del reactor
- Tanques de decaimiento
- Cañería del sistema rompe-sifón
- Bombas de circulación
- Intercambiadores de calor
- Clapeta de convección natural

El tanque del reactor contiene el núcleo, los dispositivos de irradiación, una columna térmica, la clapeta de circulación natural y parte de la instrumentación (principalmente la asociada al control de la reacción) y sistemas necesarios para la operación del reactor.

En condiciones de operación normal la circulación de refrigerante es en sentido descendente por el núcleo. Luego de atravesar el núcleo, el refrigerante es recogido debajo de la grilla en un embudo que lo canaliza hacia las cañerías del sistema primario. Aguas abajo de este colector se encuentra la derivación hacia la clapeta de convección natural

y la cañería del rompe-sifón. Siguiendo la cañería aguas abajo y ubicado ya fuera del tanque se encuentra el tanque de decaimiento que tiene por función prolongar el tiempo de tránsito del refrigerante de manera que los productos radiactivos de corta vida media (O_{17} , N_{16}) decaigan a niveles aceptables antes de ingresar a la sala de bombas.

Luego del tanque de decaimiento se ubica la bomba de impulsión del refrigerante. La bomba de circulación es de tipo centrífuga, de acero inoxidable impulsada por un motor eléctrico. Entre la bomba y el motor se encuentra un volante de inercia cuya función es la de prolongar la circulación del refrigerante en caso de pérdida de energía eléctrica. Entre la bomba y el tanque de decaimiento se ubica la placa orificio usada para medir el caudal de circulación.

La bomba impulsa el fluido hacia los intercambiadores de calor. Estos son de tipo placas. Luego de los intercambiadores el refrigerante retorna al tanque del reactor por una cañería que ingresa a media altura y desciende hasta el fondo del mismo. En este extremo el conducto se une a un difusor toroidal perforado que reduce la velocidad de ingreso del refrigerante para evitar perturbaciones indeseables en la piletta.

El calor extraído del núcleo por el refrigerante primario es transferido en los intercambiadores de calor al refrigerante del circuito secundario (agua desmineralizada). Este circuito finalmente disipa el calor a la atmósfera en una torre de enfriamiento de tiro inducido.

Capítulo 2

Estudio Hidráulico

2.1. Generalidades

Para una cierta condición de operación definida en términos de presión y temperatura del refrigerante a la entrada del núcleo, el flujo calórico máximo extraíble desde una placa combustible depende de la velocidad de circulación del refrigerante en los canales combustibles. Por otra parte, no es posible determinar la velocidad del refrigerante en el reactor a través de la medición del caudal total medido en el circuito primario dado que éste no es totalmente usado para refrigerar el núcleo.

Surge entonces la necesidad de definir el *caudal efectivo de refrigeración* que es aquel que circula exclusivamente por los canales combustibles. El *caudal externo o de fuga* es aquel que circula junto con el anterior por el circuito primario, pero no es utilizado para refrigerar los elementos combustibles. Este caudal externo refrigera distintos componentes del núcleo o cercanos a él como por ejemplo: los reflectores de grafito y los dispositivos de irradiación. Además podrían existir caudales de by-pass al núcleo, que podrían circular, por ejemplo, por los tapones de las posiciones de grilla no usadas, por la clapeta de convección natural, por el tubo rompesifón etc.[10].

De este modo la velocidad del refrigerante por los canales combustibles no se puede obtener directamente a partir de la medición del caudal del circuito primario. Esta velocidad se determina a partir de la medición de ΔP en el núcleo que sí es una medición directa, y para ello es necesario conocer la relación entre el ΔP y la velocidad o el caudal refrigerante.

Para esto se requirió de un ensayo en el circuito hidráulico del *Laboratorio de Termohidráulica* del *CAC*, que permita tener mediciones para obtener la relación existente entre caudal de refrigerante y el ΔP para combustibles tipo *MTR*. En este circuito todo el caudal circula por los canales combustibles y los puntos de las mediciones de ΔP y Q obtenidos permiten generar la caracterización hidráulica de los combustibles.

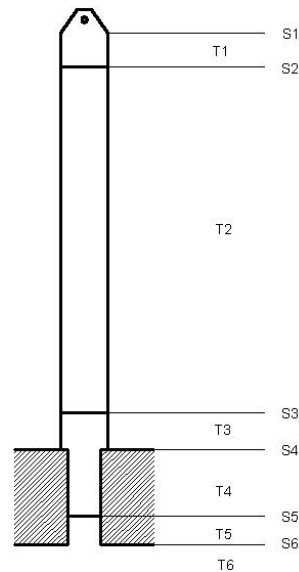


Figura 2.1: Tramos Rectos y Singularidades

2.2. Determinación Analítica

Para un dado caudal que circula por dentro de una caja combustible, Q_{cc} , puede determinarse la pérdida de carga establecida, por fricción en los tramos rectos, y las localizadas en las singularidades, usando correlaciones experimentales que se encuentran en la bibliografía específica[2].

Para ello se divide el canal combustible en 6 (T_1 a T_6) zonas como muestra la figura 2.1. Cada una de ellas caracterizada por su geometría (área de pasaje, perímetro mojado, etc). Además entre zonas adyacentes aparecen singularidades (S_1 a S_6) por cambio de geometría; por lo tanto, se pueden identificar 11 resistencias hidráulicas parciales en serie a lo largo del canal combustible.

Las singularidades vienen identificadas como S_i y los tramos rectos como T_i , y se caracterizan según su tipo y geometría del siguiente modo:

- S_1 : Singularidad tipo *puesta en velocidad*.
- T_1 : Tramo recto, geometría rectangular.
- S_2 : Singularidad tipo *contracción brusca*.
- T_2 : Tramo recto, geometría rectangular.
- S_3 : Singularidad tipo *expansión brusca*.
- T_3 : Tramo recto, geometría rectangular.
- S_4 : Singularidad tipo *contracción brusca*.
- T_4 : Tramo recto, geometría cilíndrica.

- S_5 : Singularidad tipo *expansión brusca*.
- T_5 : Tramo recto, geometría cilíndrica.
- S_6 : Singularidad tipo *expansión brusca*.
- T_6 : Tramo rector, geometría rectangular.

La pérdida de carga total se obtiene como la sumatoria de las pérdidas de carga parciales en cada tramo recto y las localizadas en cada singularidad. Para cada uno de los tramos rectos o singularidades la pérdida de carga se calcula según la siguiente expresión:

$$\Delta H = \frac{Kv^2}{2g} \quad (2.1)$$

$$\Delta P = \frac{K\rho v^2}{2} \quad (2.2)$$

A continuación se detalla las fórmulas usadas para estimar el coeficiente K en cada tipo de singularidad:

Puesta en velocidad

$$K = 0,5 \quad (2.3)$$

Expansión brusca

$$K_1 = \left(1 - \frac{D_{h1}^2}{D_{h2}^2}\right)^2 \quad (2.4)$$

Contracción brusca

$$K_2 = 0,5 \left(1 - \frac{D_{h2}^2}{D_{h1}^2}\right) \quad (2.5)$$

Los subíndices 1 y 2 hacen referencia aquí a las magnitudes aguas arriba y aguas abajo respectivamente del punto en cuestión. Esto es, para el caso de una expansión brusca, la ecuación 2.1 o 2.2 se aplica con K calculado según la 2.4 y v calculado aguas arriba de la singularidad, y para el caso de una contracción brusca se usa la 2.5 con v aguas abajo de la singularidad.

Tramo Recto Para tramo recto la siguiente:

$$K = \Lambda \frac{L}{D_h} \quad (2.6)$$

para Λ se usan las siguientes expresiones para tubo liso:

$$\Lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}, \quad \text{para} \quad 3500 < Re < 100000 \quad (2.7)$$

$$\Lambda = \frac{0,186}{Re^{0,2}}, \quad \text{para} \quad Re > 100000 \quad (2.8)$$

Para realizar el cálculo se consideran las dimensiones de cada tramo de la caja combustible según se muestra en el Cuadro 2.1.

Tramo	Dimensiones				
	Ancho [m]	Largo [m]	D_h [m]	A [m ²]	L [m]
T_1	0.066	0.074	0.06977	0.004884	0.085
T_2	0.066	0.0027	0.005187	0.0001782	0.656
T_3	0.074	0.066	0.06977	0.004884	0.024
T_4	X	X	0.054	0.00229	0.125
T_5	X	X	0.062	0.003019	0.073
T_6	0.256	0.266	0.26090	0.06809	0.117

Cuadro 2.1: Dimensiones consideradas en la determinación analítica del ΔP

En el caso de la singularidades de tipo expansión brusca interesa para reemplazar en las fórmulas 2.1 y 2.4, las velocidades de circulación del refrigerante inmediatamente antes y después de la singularidad.

Para poder comparar directamente los resultados obtenidos analíticamente con las mediciones de la experiencia, para el cálculo de ΔP debido a la singularidad S_6 se considera, como velocidad del refrigerante en el colector, la que resulta de 4 cajas combustibles en posiciones de grilla, esto es,

$$v_{T6} = \frac{4Q_{cc}}{A_{T6}} \quad (2.9)$$

También para poder comparar directamente se propone realizar los cálculos con temperatura de refrigerante de $30^\circ C$, que es la temperatura a la que se realizaron los ensayos. Las propiedades relevantes del agua a $30^\circ C$ son: $\rho = 997 \frac{Kg}{m^3}$ y $\mu = 0,0008998 Paseg$.

El cálculo se realiza para valores del caudal, por una caja combustible, que van desde 10 a $20 \frac{m^3}{h}$; y se toma como velocidad de referencia la velocidad del refrigerante entre placas combustibles, esto es, en el tramo T_2 (y que llamamos v_{ref}).

El Cuadro A.1 en la página 29, muestra los resultados del cálculo en términos de ΔP_{total} en la caja combustible para distintos valores de Q_{cc} y v_{ref} .

2.3. Determinación Experimental

Para determinar experimentalmente la relación que existe entre el caudal que circula por dentro de una caja combustible y el ΔP que se establece entre su entrada y la descarga de la grilla se usó el circuito de ensayos hidráulicos del *Laboratorio de Termohidráulica de Reactores* del CAC.

2.3.1. Dispositivo Experimental

El dispositivo de ensayos hidráulicos está compuesto por un tanque de sección cilíndrica de $5m$ de alto y $40cm$ de diámetro que simula el tanque del reactor. La base del tanque es de sección rectangular y en ella se ubica la sección de grilla de 9 posiciones para cajas combustibles y 1 agujero pequeño por el que circula el caudal del canal entre cajas (Ver figura 2.4 en la página 15).

La grilla descarga en el colector inferior del tanque. Este es un tramo de sección rectangular que se conecta al circuito mediante una válvula de aislación tipo esclusa. En la parte superior del tanque se coloca una pieza perforada de sección tipo *panal de abejas* a los efectos de reducir la turbulencia del fluido que ingresa al tanque. El ingreso del flujo al tanque se realiza a través de un difusor toroidal perforado con agujeros de aproximadamente $4mm$ de diámetro orientados hacia arriba para lograr una mejor distribución del flujo en toda la sección del tanque. El agua luego desciende a través del *panal de abejas* y el tanque propiamente dicho hasta alcanzar los elementos combustibles.

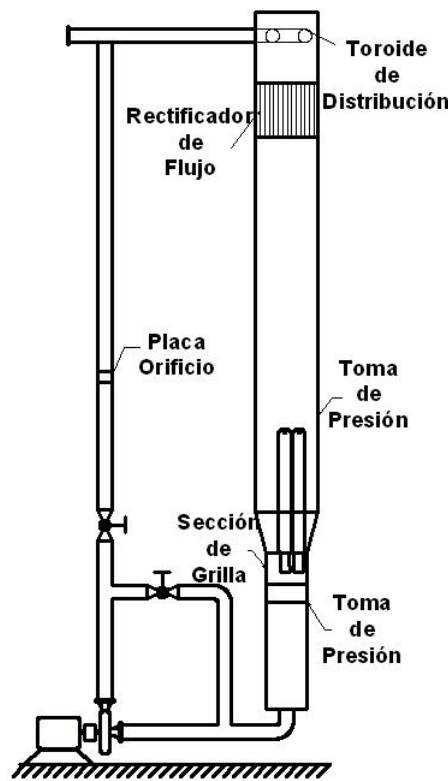


Figura 2.2: Esquema del Circuito Hidráulico.

Por la parte inferior el tanque descarga en la cañería de succión de la bomba instalada en el circuito hidráulico. El diámetro de la cañería es $57,15mm$ y la bomba tiene como punto nominal de trabajo $Q = 70 \frac{m^3}{h}$ y $H = 70m.c.a.$ Para controlar el caudal por el circuito existen dos válvulas tipo globo, una en la cañería de impulsión y la otra en el by-pass entre la impulsión y la succión de la bomba. Aguas abajo de la válvula globo

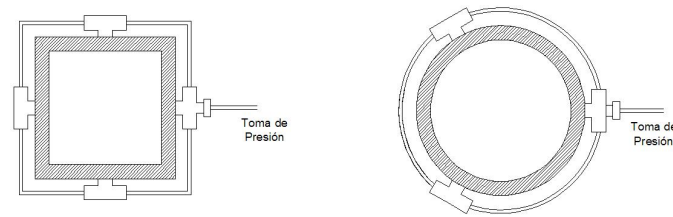


Figura 2.3: Tomas de Presión en el Tanque.

en el caño de impulsión se encuentra instalada la placa orificio, elemento primario de la medición de caudal del circuito[6]. El flujo retorna el tanque por la parte superior. La figura 2.2 muestra un esquema del circuito.

Para medir el ΔP en las cajas combustibles se instalaron tomas de presión en la pared del tanque a la altura del ingreso del fluido a las cajas combustibles y a 17cm de la descarga de la grilla al colector inferior. Cada una de estas dos tomas de presión se compone de varias tomas individuales, 3 para la superior y 4 para la inferior, realizadas a la misma altura en distintos puntos de la sección transversal, conectadas entre sí a los efectos de igualar la presión y evitar efectos espaciales en una misma cota. Un esquema se muestra en la figura 2.3.

La medición se realizó con transmisores de presión diferencial. En la medición del ΔP en la zona de sección de grilla se usó uno de marca *Rosmount3051* con calibración $0 - 250\text{mm.c.a}$ y salida en corriente $4 - 20\text{mA}$, y en la placa orificio se usó uno de marca *Endress+HauserDeltaBar* con calibración $0 - 2\text{Bar}$ y salida $4 - 20\text{mA}$. La temperatura se midió con una termocupla tipo *K* envainada en acero inoxidable instalada en el colector de descarga del tanque.

2.3.2. Ensayo

En este trabajo se reportan solamente los resultados obtenidos para la condición de flujo por los canales internos.

El ensayo se realizó con cuatro cajas combustibles, ubicadas según se muestra en la figura 2.4, para la condición de flujo solamente por dentro de las cajas combustibles (canales internos).

Las posiciones de grilla no usadas quedaron tapadas. Los elementos combustibles usados son "dummy" (geoméricamente idénticos a los reales pero sin combustible) de aluminio a escala $1 : 1$ de los elementos combustibles reales.

El ensayo se llevó a cabo realizando un *barrido de caudales* registrando en cada caso los valores de ΔP en la sección de grilla y en la placa orificio y la temperatura del fluido en el tanque. El caudal se hizo variar entre 10 y $20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ por caja combustible en pasos de $4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ aproximadamente, a través de la válvula del *by-pass* del circuito.

Para disponer de los valores correspondientes a las mediciones de ΔP en la placa orificio, y de esta manera facilitar la operación durante los ensayos se implementó un programa para ejecutar en una PC con una interfaz visual. En ella se ingresan los valores de ΔP correspondiente a la señal del transmisor y la condición de presión y temperatura

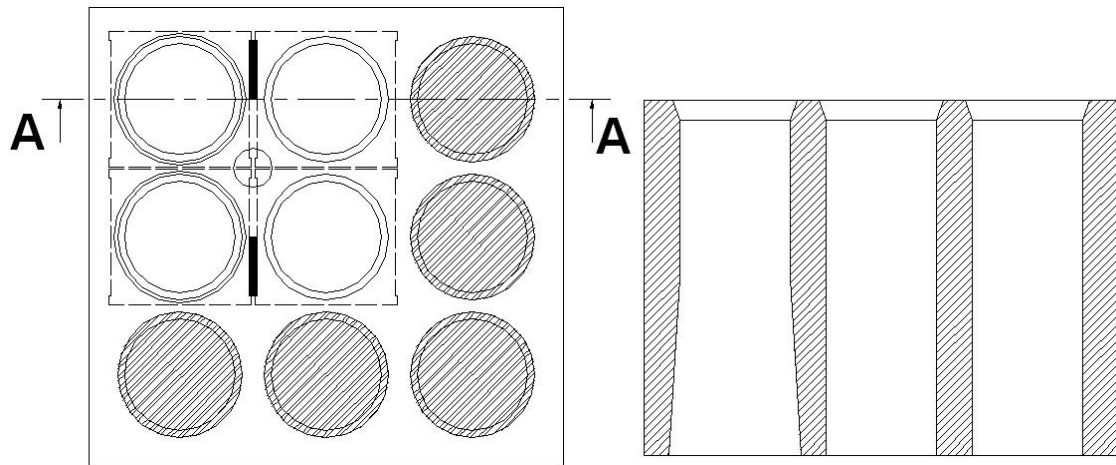


Figura 2.4: Vista Superior y Corte de Sección de Grilla.

del fluido, y se obtiene el valor de caudal. Los cálculos implementados para realizar esta conversión siguen las recomendaciones *ISO-R541* [6].

2.4. Análisis de los Resultados

El Cuadro A.1 en la página 29, se muestran los resultados de las mediciones junto con el cálculo.

Observando los resultados obtenidos por cálculo y experimentalmente, se ve que el cálculo, por una parte, resulta en una buena aproximación de la situación experimental con errores que no superan el 15%; y por otro lado, proporciona un resultado conservativo.

Capítulo 3

Estudio Termohidráulico

3.1. Generalidades

Dadas las limitaciones de caudal en el marco del aumento de potencia del Reactor *RA-6* se requieren nuevos análisis relacionados al tipo de escurrimiento que se establecerá en los canales refrigerantes.

Para velocidades de circulación relativamente bajas del refrigerante por los canales combustibles las condiciones del escurrimiento, caracterizadas por el número de Reynolds, pueden estar en la zona de transición entre régimen laminar y turbulento. En estas condiciones el coeficiente de transferencia de calor en convección forzada entre el refrigerante y las placas combustibles es muy sensible a las variaciones de los parámetros del refrigerante. No se encuentra en la bibliografía información específica para geometrías no circulares, que permita realizar una caracterización analítica satisfactoria del proceso termohidráulico.

Por tal motivo se requiere un ensayo en el *Laboratorio de Termohidráulica de Reactores* del *CAC* que permita determinar experimentalmente la temperatura de pared alcanzada a distintas cotas para diversas condiciones de refrigeración determinadas por el flujo calórico, la velocidad del refrigerante y la temperatura de entrada.

Para realizar este estudio experimental se propusieron dispositivos que simulan los dos tipos de canales refrigerantes existentes en el núcleo del reactor sobre los que se realizaron los ensayos para medir la temperatura de pared en las condiciones propuestas.[1]

Por otra parte se realiza un estudio analítico del problema usando correlaciones experimentales que se obtuvieron de la bibliografía específica. Este estudio analítico permite obtener, previo al ensayo, valores que sirvan de base de referencia; y luego permitirá comparar los resultados de ambos dominios (analítico y experimental).

Por razones de extensión, en este trabajo se considera sólo el estudio para el caso de canales externos y algunos valores, dentro del rango requerido, de los parámetros que definen las condiciones de refrigeración.

El flujo calórico, ϕ , se simuló constante a lo largo del canal. En el núcleo del reactor la potencia tiene un perfil axial que podría aproximarse en forma cosenoidal, donde el *valor de pico* se ubica en el centro aproximadamente, de la longitud total. La realización las

experiencias con ϕ igual al máximo del canal más caliente del núcleo, a una determinada potencia, permite ubicarse en una situación más conservativa respecto de la real.

Tanto el estudio analítico como el experimental se desarrolló para diversas condiciones de refrigeración del canal, dadas por combinaciones de valores de los parámetros v , ϕ y Te . Los rangos analizados tienen los siguientes valores extremos $0,45 - 2 \frac{m}{seg}$, $24 - 40 \frac{W}{cm^2}$ y $10 - 40^\circ C$ respectivamente. En este trabajo sólo se tuvieron en cuenta 4 de estas combinaciones (también por razones de extensión) según se muestra en la tabla 3.2 en la página 25.

3.2. Determinación Analítica

Con el objetivo de contar con una base de referencia para los ensayos, se realizó una determinación analítica de la temperatura de pared, usando correlaciones empíricas obtenidas de la bibliografía específica para determinar el coeficiente h , de transferencia de calor en convección forzada (Kreith, Colburn, Gnielinski y Petukhov).

Para poder comparar directamente los resultados de estos cálculos con la determinación experimental de la temperatura de pared, ésta se calcula para las cotas (z_i) en las que se colocaron las termocuplas para realizar las mediciones en el dispositivo de ensayo[1]. Las cotas en la longitud del canal, con el origen en el extremo superior son las siguientes:

Cotas [m]	
z_1	0.245
z_2	0.31
z_3	0.365
z_4	0.43
z_5	0.595

Cuadro 3.1: Cotas de los Puntos de Medición de T_p .

3.2.1. Método de Cálculo

A partir de la ley de enfriamiento de Newton se obtiene la siguiente expresión para el salto de temperatura entre el refrigerante y la pared del canal:

$$T_p(z) = T_b(z) + \frac{\phi}{h(z)} \quad (3.1)$$

La temperatura de la masa de refrigerante, $T_b(z)$, a distintas cotas, z , a lo largo del canal depende de su temperatura de entrada al canal, T_e , se calcula según la siguiente fórmula[11]:

$$T(z) = T_e + \frac{p_c z \phi}{Av\rho C} \quad (3.2)$$

que resulta del balance unidimensional de energía térmica para el canal. En este cálculo se supone que ρ y C permanecen constantes a lo largo del canal. En el esquema de cálculo

implementado se toma como buena aproximación, el valor medio entre la densidad que corresponde a la temperatura de entrada y a la de salida. Para obtener este valor es necesario realizar un proceso iterativo partiendo de un valor inicial para la temperatura de salida del refrigerante que permita obtener el valor de densidad media para calcular nuevamente la temperatura de salida hasta lograr una diferencia aceptable de convergencia. Al considerar constante la densidad a lo largo del canal la velocidad del refrigerante también permanece constante.

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se usaron las diferentes correlaciones experimentales expuestas a continuación¹. En términos generales ellas relacionan el número adimensional de Nusselt con los parámetros de flujo caracterizados por los números adimensionales: número de Reynolds y Prandtl.

Para el caso de flujo en escurrimiento de transición, esto es: $2100 < Re < 10000$, se aplicó al cálculo la siguiente correlación:

Fórmula de Kreith [8]

$$\frac{h}{CG} Pr^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\mu_p}{\mu_b} \right)^{0,14} := A' = F(Re) \quad (3.3)$$

$F(Re)$ es una función del número de Reynolds para el seno del fluido y paramétrica con la relación L/D_h para el conducto[8]. En estos cálculos se usa una aproximación cuadrática para el rango $3000 < Re < 10000$, dada por $y = ax^2 + bx + c$; donde las coordenadas son, $y = \text{Log}(A')$, y $x = \text{Log}(Re)$; y los coeficientes,

$$\begin{cases} a = -0,683 \\ b = 5,45376 \\ c = -13,2305 \end{cases}$$

han sido obtenidos por mínimos cuadrados en [12].

La aplicación de esta fórmula requiere conocer las propiedades del fluido a la temperatura de pared del canal. Por lo tanto para aplicar la correlación y luego calcular $T_p(z)$ según la 3.1 es necesario realizar un proceso iterativo, suponiendo un valor inicial para $T_p(z)$, superior a $T(z)$, obtener h usando la correlación, resolver la 3.1, ajustar $T_p(z)$ y repetir el ciclo hasta lograr una error de convergencia satisfactorio. En los cálculos realizados aquí, la convergencia satisfactoria se considera cuando en el proceso iterativo se obtiene una diferencia de $0,1^\circ C$ para $T_p(z)$.

Por otra parte para el escurrimiento o régimen turbulento se usarán las siguientes correlaciones:

- Correlación de Colburn
- Correlación de Gnielinski
- Correlación de Petukhov

¹Estas han sido obtenidas de la bibliografía en referencia

Fórmula de Colburn [9]

$$h = \frac{0,023}{\left(\frac{GD_h}{\mu_f}\right)^{0,2}} \left(\frac{k}{\mu C}\right)_f^{2/3} C_b G = \frac{0,023}{Re_f^{0,2} Pr_f^{2/3}} C_b G \quad (3.4)$$

La aplicación de esta correlación requiere que las propiedades del refrigerante sean calculadas a la *temperatura de film*, salvo C_b . La temperatura de film es la semisuma de la temperatura de pared y del seno del refrigerante. Nuevamente esto requiere que en el esquema de cálculo se realice un proceso iterativo como el descrito para la correlación de *Kreith*.

Por otra parte se aconseja aplicarla en condiciones de régimen turbulento y totalmente desarrollado en conductos circulares y para ΔT (entre la pared y el refrigerante) moderados([9]). No obstante esto, en las situaciones de flujo en régimen de transición, también se realizará el cálculo usando la correlación de *Colburn*, a los efectos de tener como una referencia inicial que permita comparar los resultados de la correlación de *Kreith*.

Fórmula de Gnielinski [5]

$$Nu = \frac{\frac{f}{8}(Re - 1000)Pr}{(1 + 12,7(Pr^{2/3} - 1))\sqrt{\frac{f}{8}}} \quad (3.5)$$

Fórmula de Petukhov [5]

$$Nu = \frac{\frac{f}{8}RePr}{(1,07 + 12,7(Pr^{2/3} - 1))\sqrt{\frac{f}{8}}} \quad (3.6)$$

En este caso, el factor f , representa el factor de fricción. En la situación considerada se puede tomar f con el correspondiente a tubos lisos, lo que permite obtenerlo de la siguiente expresión

$$f = \frac{1}{(0,79 \ln(Re) - 1,64)^2} \quad (3.7)$$

Del mismo modo que la ecuación 3.4(correlación de Colburn), estas 2 últimas correlaciones fueron desarrolladas para conductos circulares y su aplicación queda sujeta al siguiente rango de validez con las propiedades del refrigerante calculadas a la temperatura del seno del flujo:

$$\begin{cases} 0,5 < Pr < 2000 \\ 10^4 < Re < 5 \times 10^6 \end{cases}$$

3.3. Determinación Experimental

El objetivo principal de los ensayos es determinar la temperatura de pared alcanzada en los canales combustibles (simulados mediante dispositivos diseñados con este propósito[1]) para las situaciones de operación consideradas. Posteriormente se determina el coeficiente h de transferencia de calor por convección, usando la expresión 3.1.

Por este motivo es necesario reproducir en forma adecuada la geometría del canal, y por otra parte, controlar las condiciones de operación.

3.3.1. Descripción del Circuito

El circuito experimental consiste de dos loops, uno primario sobre el que se instala la sección de ensayos, y uno secundario que se usa para refrigerar el primario.

El primario se compone de dos bombas de impulsión, de tipo centrífugas, instaladas en paralelo, con las siguientes características nominales, $5m^3/h$ y $60m.c.a.$ de impulsión una y $2m^3/h$ y $60m.c.a.$ la otra. Entre la succión y la impulsión de cada bomba hay un by-pass con una válvula globo que permite regular el caudal del circuito principal.

Aguas abajo de las bombas se ubica el intercambiador de calor de tipo casco y tubos en el que el primario circula por el lado tubos. En la rama de salida del intercambiador de calor se encuentra el caudalímetro de tipo turbina axial y aguas abajo de éste un cuadro de 3 válvulas de distintas capacidades, (las 2 mayores de tipo globo y la menor de tipo aguja), en paralelo que permiten regular el caudal para distintos rangos de operación.

Siguiendo aguas abajo se ubica un precalentador eléctrico que permite regular la temperatura del refrigerante al ingreso a la sección de ensayos. El circuito tiene instaladas termocuplas y tomas de presión en posiciones que permiten monitorear el funcionamiento del proceso. El punto más alto del circuito se encuentra entre la salida del precalentador y la entrada a la sección de ensayos. En este lugar se conecta la rama de presurización; un conducto que asciende $3,30m$ hasta un tanque hermético parcialmente lleno de agua y presurizado con aire comprimido. Esto permite lograr la presión adecuada del refrigerante al ingreso de la sección de ensayo.

El circuito secundario consiste en una bomba centrífuga de $5m^3/h$ y $60m.c.a.$ de impulsión, que hace circular el agua a través del intercambiador de calor del primario y luego a una torre de enfriamiento instalada al aire libre. Entre la rama de impulsión y succión de la bomba hay un by-pass que permite variar manualmente el caudal de este circuito.

La figura 3.1 muestra en forma esquemática el circuito termohidráulico y la ubicación relativa de sus componentes.

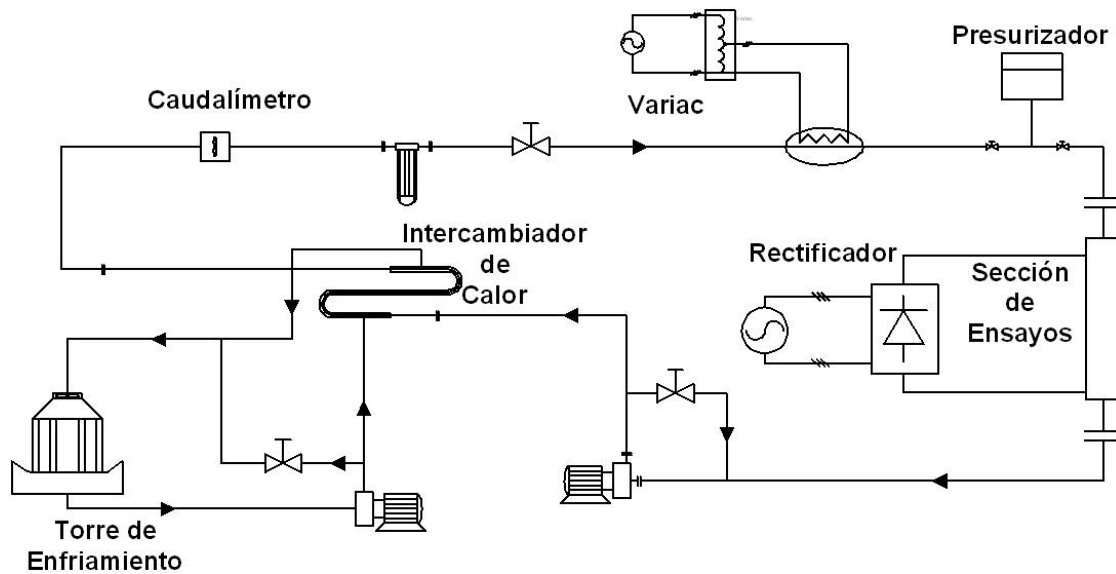


Figura 3.1: Circuito Termohidráulico

3.3.2. Sección de Ensayo

La sección de ensayos es un canal calefaccionado eléctricamente y refrigerado por agua, que tiene las dimensiones y la geometría iguales a los canales del combustible *MTR*. Se fabricaron dos secciones de ensayos: una para representar los canales internos y otra para los canales externos o canales entre cajas.

El diseño[1] consiste en un canal rectangular formado con placas de aluminio de 3mm de espesor. Tanto el ancho como el largo del canal en ambas secciones de ensayo son iguales. En ambos extremos del canal se soldaron bridas para montar la sección en dirección vertical en el circuito termohidráulico del *Laboratorio*. El refrigerante circula en sentido descendente. La figura 3.2 muestra un esquema de esta sección de ensayos.

En la parte superior la sección se conecta al circuito a través de un tramo de caño de $76,2\text{mm}$ de diámetro interno y 200mm de largo. Este componente, que llamamos plenum superior, tiene por función ser una zona de área mayor a la cañería principal del circuito, y de este modo conseguir que flujo de refrigerante que ingresa a la sección de ensayo lo haga desde una zona de baja velocidad, para simular en cierto modo el ingreso de refrigerante desde el tanque en el reactor.

En la parte inferior la sección de ensayos contiene una pieza compuesta por un tramo de caño de longitud igual al largo del tramo de grilla en el que se descarga el refrigerante que circula por el elemento combustible. Luego nuevamente se colocó una tramo de caño de $76,2\text{mm}$ de diámetro con el objetivo de obtener en la descarga una zona de baja velocidad que simula el colector inferior de la grilla del reactor.

Un esquema de estos componentes se muestra en la figura 3.3.

Para simular el flujo térmico hacia el refrigerante a través de las paredes del canal, se instalaron láminas de acero inoxidable de $0,5\text{mm}$ de espesor, aisladas a ambos lados por láminas de *Micanita*: de $0,2\text{mm}$ de espesor entre el calefactor y el canal, y 2 láminas

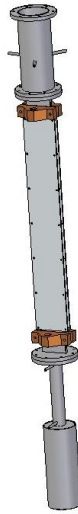


Figura 3.2: Sección de Ensayos



Figura 3.3: Plenum Superior e Inferior

de $0,5\text{mm}$ hacia el exterior. Todo este conjunto es soportado por 2 placas estructurales externas de acero de 17mm de espesor que permiten ajustar el conjunto para conseguir buen contacto térmico entre el calefactor, la *Micanita* interior y el canal. Las placas calefactoras se conectan eléctricamente a la fuente de potencia a través de dos bornes de cobre que quedan expuestos en los extremos de la sección. La figura 3.4 muestra un esquema de los componentes de la sección de ensayo y cómo se encuentran ordenados.

Para medir la temperatura de pared del canal calefaccionado se instalaron termocuplas *tipo K* envainadas en acero inoxidable, de 1mm de diámetro a lo largo del canal, ubicadas sobre el eje longitudinal, en las cotas mostradas en el Cuadro 3.1 en la página 17. Para instalarlas se hicieron ranuras en de $1,5\text{mm}$ de profundidad con un ángulo de 45° respecto de la horizontal.

La fuente de potencia eléctrica es un rectificador de tensión, que toma en su entrada la línea trifásica de 380V c.a., y tiene por salida una tensión regulable en el rango que va de 0V a 40V c.c., con pasos de $0,1\text{V}$ y con una capacidad de corriente de 2000A .

3.3.3. Esquema de Medición

La medición de temperatura usando termocuplas como elemento primario requiere que la unión de cada uno de los terminales del termopar con los bornes del instrumen-

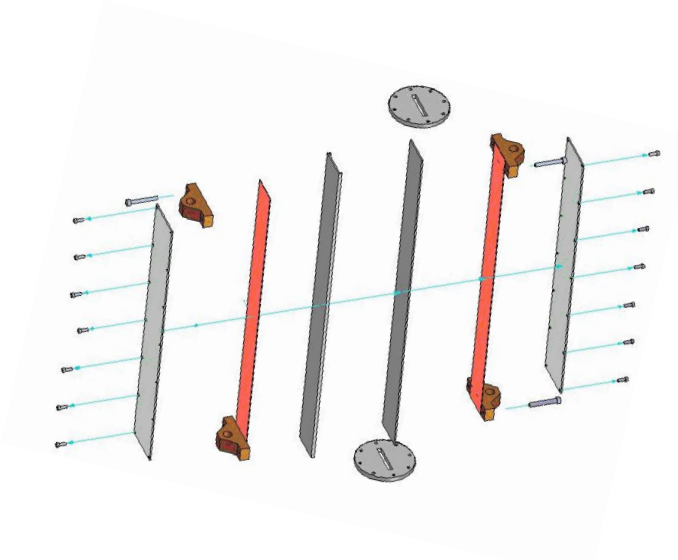


Figura 3.4: Canal y Placas Calefactoras

to usado (que no son del mismo material que el termopar), se mantenga a la misma temperatura para que las tensiones eléctricas debidas a esa nueva unión sean iguales. Por otra parte esa temperatura necesita ser conocida dado que los valores de tensión eléctrica en función de la temperatura de una termocupla standard se tabulan para sus terminales a $0^{\circ}C$, con lo que la temperatura del punto de medición se obtiene sumando ambas. La temperatura ambiente se midió con un termómetro digital marca Fluke. Este usa como elemento sensor una termocupla pero compensa automáticamente la lectura por los efectos de la temperatura ambiente.

La adquisición de datos se realiza con un multímetro marca Keithley[7] con una tarjeta de ampliación a 10 canales de medición. A este equipo se conectan todas las termocuplas del proceso (7 en total: 5 del dispositivo de ensayo y 2 del circuito primario).

El esquema de medición se arma como muestra la siguiente figura:

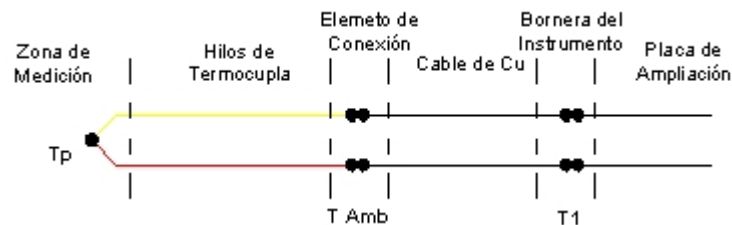


Figura 3.5: Esquema de Adquisición

Los terminales de la termocupla no se conectan directamente a los bornes de la tarjeta del multímetro, sino que la transición de material de termocupla se realiza previamente con cable de cobre, dado que la tarjeta de ampliación reside dentro del multímetro y resulta inaccesible para medir la temperatura ambiente.

El multímetro cuenta con una interfaz de comunicación digital conforme al estándar $RS-232$ que permite ejecutar comandos de operación en forma remota. Para comandar el equipo y, visualizar y registrar, las mediciones y otros parámetros del ensayo, se implementó un software de interfaz ejecutado en una PC que implementa el protocolo de comunicación adecuado (según ref. [7]).

De esta manera desde esta interfaz se realiza la configuración de los parámetros del multímetro relativos a la medición, la adquisición de datos y almacenamiento en disco, e implementa los gráficos de visualización en pantalla que permiten seguir la evolución temporal de las variables medidas. Una vista de la pantalla principal se muestra en la siguiente imagen

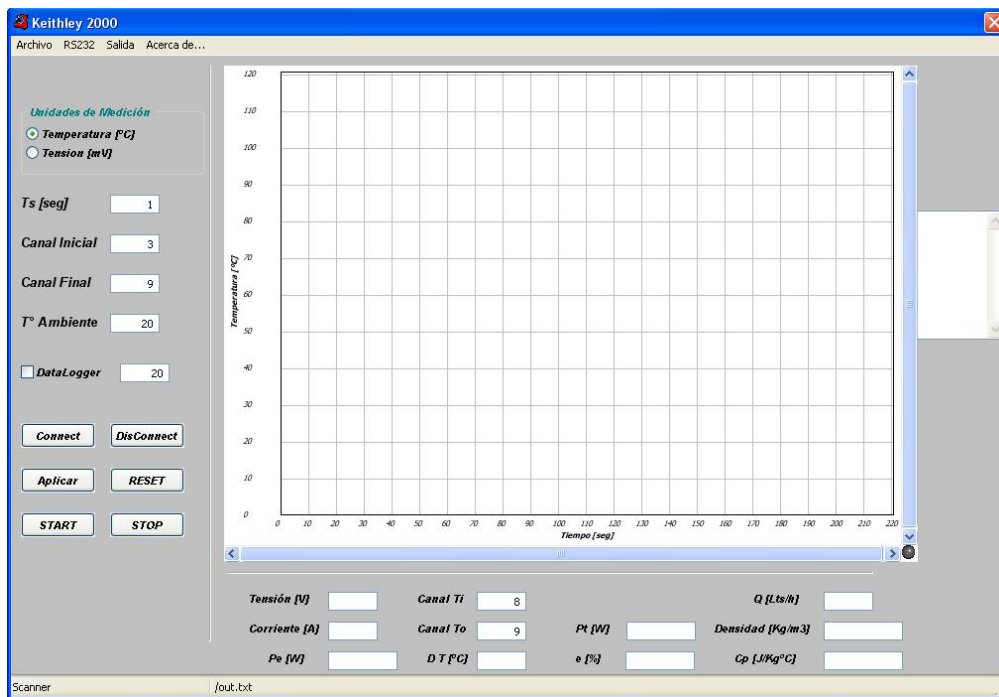


Figura 3.6: HMI. Pantalla Principal

3.3.4. Ensayos

El ensayo consiste en obtener mediciones de la temperatura alcanzada en la pared del canal, una vez alcanzado el estado estacionario, para cada condición de refrigeración propuesta.

Las condiciones de refrigeración o condiciones de ensayo quedan definidas por los valores del siguiente conjunto de parámetros: v , velocidad de circulación del refrigerante en el canal, Te , temperatura de del refrigerante en la entrada del canal, ϕ , flujo calórico. Las condiciones estudiadas se muestran en la siguiente tabla:

Estos valores del conjunto de parámetros son sólo una parte de los requerimientos de ensayo.

Parámetros	Condición			
	1	2	3	4
ϕ [W/cm^2]	42,53	39,91	21,79	21,89
v [m/seg]	1,078	1,086	0,453	0,480
T_e [$^{\circ}C$]	17,81	39,26	17,02	13,46

Cuadro 3.2: Condiciones de Refrigeración Ensayadas.

Para lograr el estado estacionario, el procedimiento de operación seguido consiste en las siguientes etapas generales: en primera instancia se pone en circulación el refrigerante del circuito secundario y la torre de enfriamiento; luego se pone en circulación el refrigerante primario y se varía manualmente el caudal para conseguir la velocidad a ensayar; luego se enciende el suministro de potencia eléctrica a los calefactores.

Para evitar grandes gradientes térmicos en el dispositivo experimental, que pudieran arruinarlo, el aumento del nivel de potencia se realiza en forma gradual desde cero al valor final a ensayar. Una vez alcanzado el nivel de potencia de ensayo, se monitorea la evolución temporal de las temperaturas tanto del dispositivo de ensayo como las del circuito, por una parte para determinar cuando se ha alcanzado el estado estacionario y por otra para detectar situaciones que pudieran resultar no deseadas (por ejemplo un atascamiento que obstruya el flujo del refrigerante del circuito secundario por el intercambiador de calor se vería reflejado en una elevación de la temperatura del refrigerante primario en la salida del intercambiador de calor).

3.4. Análisis de los Resultados

Los resultados obtenidos para las distintas condiciones de refrigeración se exponen en el apéndice A.2 en la página 29.

Las condiciones de refrigeración **1** y **2** corresponden a condiciones de flujo en régimen turbulento, aún cuando en el primer caso en el que el número de *Reynolds*, en las condiciones de entrada al canal es ~ 7500 , a la altura de la cota z_1 ya toma el valor de 9900. El parámetro que varía entre estas dos condiciones es la temperatura del refrigerante de entrada al canal, T_e : $20^{\circ}C$ en el primer caso y $40^{\circ}C$ en el otro.

Observamos lo siguiente:

- Comparando las mediciones de los dos ensayos se ve que las temperaturas de pared alcanzadas son mayores en el caso de $T_e = 40^{\circ}C$ que en el caso de $T_e = 20^{\circ}C$. Esto concuerda con las previsiones de los cálculos para el régimen turbulento.
- Los cálculos realizados usando las correlaciones expuestas para régimen turbulento, resultaron en los dos casos en valores de T_p *más conservativos* que los resultados experimentales, y en porcentajes que concuerdan con lo expuesto en la bibliografía: por ejemplo en ref. [5] se menciona que es esperable hasta $\sim 15\%$ de error al aplicar las correlaciones de *Gnielinski* y *Petukov*.

Por otra parte las condiciones de refrigeración **3** y **4** corresponden ambas a flujo de refrigerante en régimen de transición: $2100 < Re_{1/2} < 10000$.

- En ambas condiciones de refrigeración los valores de T_p calculados aplicando la correlación de *Kreith* resultan en valores *más conservativos* que los medidos en los ensayos, no es así para los valores calculados con la correlación de *Colburn*. Esto se justifica teniendo presente que estas condiciones de refrigeración no están comprendidas en el rango de aplicación sugerido (aún así se la motivación para su uso quedó expresada en la página [19](#)).
- La condición de refrigeración nombrada **Condición 3** propone menor velocidad de circulación y mayor temperatura de entrada para el refrigerante. Esto podría considerarse como una condición de refrigeración *más exigente* para el canal que la **Condición 4**. Los ensayos muestran que la situación es inversa. Los valores de T_p medidos en los ensayos para las **Condición 3** son inferiores que los medidos para las **Condición 4**. Esto encuentra justificación al considerar el valor del número de Reynolds promedio, $Re_{1/2}$, a lo largo del canal: resulta mayor para el caso de $v = 0,453 \frac{m}{seg}$ y $T_e = 17,02^\circ C$ que para el caso de $v = 0,48 \frac{m}{seg}$ y $T_e = 13,46^\circ C$. Esta diferencia se debe a que la variación relativa de la velocidad másica, G , (presente en el numerador de Re) es menor, en valor absoluto, que la variación relativa de μ por efectos de la temperatura.

Capítulo 4

Conclusiones

El estudio propuesto para ambos aspectos (hidráulico y termohidráulico) se completó satisfactoriamente. De los ensayos realizados en el *Laboratorio* se obtuvo un conjunto de datos experimentales que podrán ser usados en el actual proyecto de aumento de potencia del reactor *RA-6* y en posteriores diseños o estudios que involucren este tipo de elementos combustibles. Por otra parte se comprobó que los esquemas de cálculo usados aportan datos conservativos con un margen alrededor del 20 %, que resultan aceptables, para etapas preliminares en proyectos de este tipo.

Las experiencias en el *Laboratorio* de la parte experimental del estudio termohidráulico resultaron mucho más demandantes que las de del estudio hidráulico. Una vez completado el diseño y la construcción de la sección de ensayos la puesta en marcha y la puesta a punto de todo el conjunto fue más demandante. Esto se debió a la complejidad involucrada al de prever los fenómenos asociados a las altas intensidades de corriente involucradas (que en algunos de los casos estudiados superó los 1200A) en el dispositivo experimental y sus componentes.

Apéndice A

Resultados

En este apéndice se reportan los resultados de ambos estudios (hidráulico y termo-hidráulico), obtenidos por cálculo y los datos obtenidos experimentalmente.

A.1. Ensayo Hidráulico

Los resultados del estudio hidráulico se presentan a continuación. La figura A.1 es un gráfico del ΔP obtenido por cálculo y experimentalmente (trazos azul y rojo respectivamente) para los distintos valores de caudal. En la tabla A.1 se exponen los valores graficados junto con la velocidad de referencia (v_{ref}) y en la última columna la diferencia porcentual relativa a los valores de ΔP obtenidos en el ensayo.

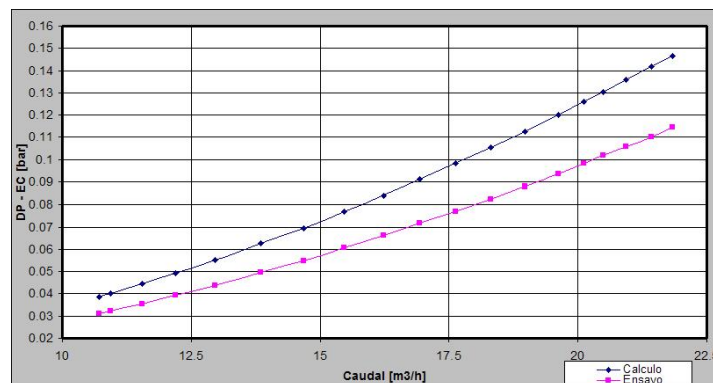


Figura A.1: Q vs ΔP

Flujo		Resultados		
		Cálculo	Ensayo	% Error
$Q[\frac{m^3}{h}]$	$v_{ref}[\frac{m}{seg}]$	$\Delta P[bar]$		%
10.6991	0.9265	0,0347	0.0310	11,5
10.9263	0.9462	0,0361	0.0322	11,8
11.5407	0.9994	0,0399	0.0355	12,3
12.1991	1.0564	0,0443	0.0392	12,8
12.9603	1.1223	0,0495	0.0437	13,3
13.8563	1.1999	0,0561	0.0495	13,1
14.6673	1.2701	0,0623	0.0548	13,6
15.4567	1.3385	0,0687	0.0607	13,0
16.2353	1.4059	0,0752	0.0661	13,7
16.9321	1.4663	0,0814	0.0717	13,4
17.6219	1.5260	0,0876	0.0771	13,6
18.3010	1.5848	0,0940	0.0823	14,2
18.9714	1.6429	0,1005	0.0879	14,4
19.6267	1.6996	0,1071	0.0937	14,3
20.1254	1.7428	0,1122	0.0981	14,3
20.5030	1.7755	0,1162	0.1016	14,2
20.9412	1.8135	0,1209	0.1057	14,3
21.4255	1.8554	0,1261	0.1101	14,5
21.8288	1.8903	0,1306	0.1144	14,1

Cuadro A.1: Estudio Hidráulico.

A.2. Ensayo Termohidráulico

Las tablas expuestas a continuación contienen los resultados del estudio termo-hidráulico. En todos los casos los datos de las primeras 5 filas corresponden a la temperatura de pared obtenidas por cálculo, la 6ª fila de datos contiene la temperatura promedio, $T_{1/2}$, entre la entrada y la salida del canal en ambos análisis; y la última fila el número de Reynolds promedio, $Re_{1/2}$, obtenido a partir de las propiedades del refrigerante a la temperatura de $T_{1/2}$.

En cada una de las tablas A.2 y A.3 se muestran los resultados obtenidos para las condiciones de refrigeración 1 y 2 expuestas en la tabla 3.2 en la página 25. En las primeras 3 columnas se encuentran los resultados de la temperatura de pared obtenidos por cálculo y en la última columna los resultados de la mediciones obtenidas en los ensayos. Además en la figura A.2 y A.2 se grafican los datos de ambas tablas.

Del mismo modo, en las tablas A.4 y A.5 se muestran los datos correspondientes a las condiciones 3 y 4 de la tabla 3.2. Nuevamente los datos de la temperatura de pared obtenidos en las mediciones de los ensayos se muestran en la última columna, y los cálculos en las anteriores. En las últimas figuras, A.4 y A.4, se grafican estos últimos resultados.

$$\phi = 42,53W/cm^2, v = 1,078m/seg, T_e = 17,81^\circ C$$

Cota	Colburn	Gnielinski	Petukhov	Ensayo
	T_p			
z_1	89,97	101,19	95,69	87,88
z_2	91,80	101,62	96,80	98,93
z_3	93,34	102,16	97,84	93,44
z_4	95,55	103,15	99,45	92,78
z_5	100,77	106,26	103,69	97,51
$T_{1/2}$	32,77			32,75
$Re_{1/2}$	10482,83			10489,2

Cuadro A.2: Condición 1.

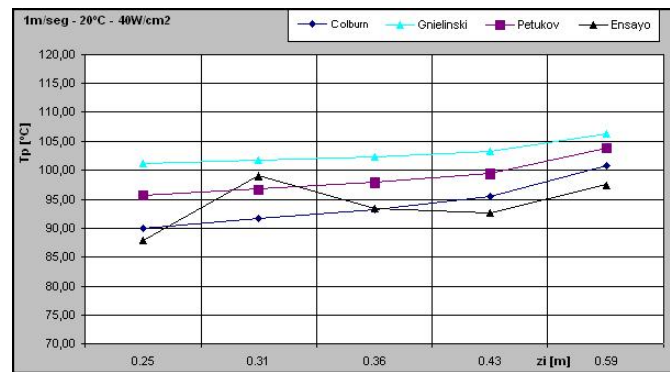


Figura A.2: Condición 1

$$\phi = 39,91W/cm^2, v = 1,086m/seg, T_e = 39,26^\circ C$$

Cota	Colburn	Gnielinski	Petukhov	Ensayo
	T_p			
z_1	100,84	103,53	101,62	98,35
z_2	102,80	105,09	103,43	97,88
z_3	104,45	106,45	104,98	102,92
z_4	106,80	108,44	107,22	100,41
z_5	112,27	113,32	112,57	109,73
$T_{1/2}$	53,33			53,31
$Re_{1/2}$	15224,30			15223,7

Cuadro A.3: Condición 2

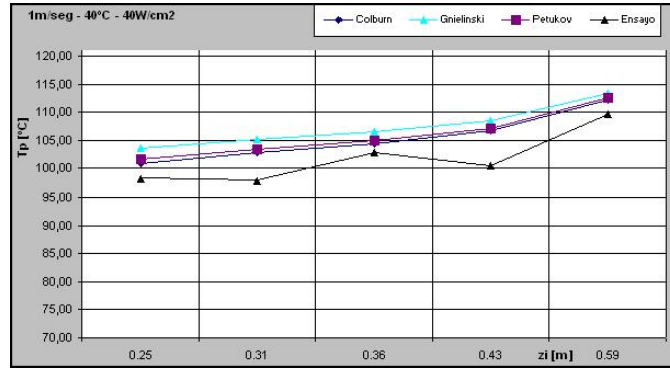


Figura A.3: Condición 2

$\phi = 21,79W/cm^2, v = 0,453m/seg, T_e = 17,02^\circ C$

Cota	Colburn	Kreith	Ensayo
	T_p		
z_1	112,30	111,39	85,21
z_2	112,85	109,30	86,99
z_3	113,51	108,15	93,12
z_4	114,68	107,28	91,38
z_5	118,33	107,80	93,97
$T_{1/2}$	35,28		35,27
$Re_{1/2}$	4628,70		4636,5

Cuadro A.4: Condición 3

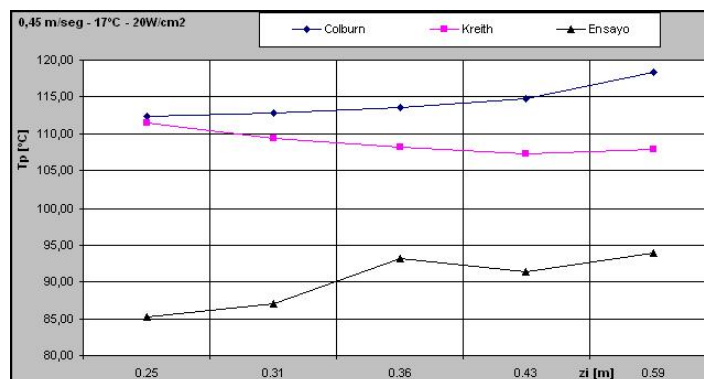


Figura A.4: Condición 3

$$\phi = 21,89W/cm^2, v = 0,48m/seg, T_e = 13,46^\circ C$$

Cota	Colburn	Kreith	Ensayo
	T_p		
z_1	108,55	108,84	95,30
z_2	108,87	106,35	100,92
z_3	109,32	104,88	98,87
z_4	110,22	103,60	97,55
z_5	113,24	103,26	97,16
$T_{1/2}$	30,73		30,74
$Re_{1/2}$	4474,77		4483,7

Cuadro A.5: Condición 4

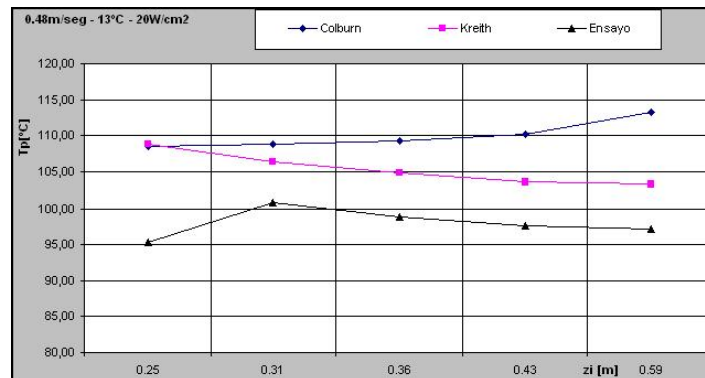


Figura A.5: Condición 4

Bibliografía y Referencias

- [1] CAILLET-BOIS, Andrés. *Diseño de una sección de ensayos para la determinación de temperaturas de vaina, velocidad de circulación de refrigerante y pérdida de carga en canales combustible tipo MTR para el reactor RA-6*. Trabajo de tesis. Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson. 2007.
- [2] CRANE. *Flow of Fluids through valves, fittings and pipe*. CRANE Co. 1980.
- [3] CNEA. DEPARTAMENTO REACTORES Y CENTRALES NUCLEARES. *RA-6. Informe Preliminar de Seguridad*.
- [4] HOLMAN, J. P. *Heat Transfer*. 4ª edición. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. 1976.
- [5] INCROPERA, F. y DEWITT, D. *Fundamentos de transferencia de Calor*. 4ª edición. Prentice Hall. México. 1999.
- [6] ISO. *ISO Recommendation R541. Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates and Nozzles*. International Organization for Standardization. 1ª edición. 1967.
- [7] KEITHLEY INSTRUMENTS, Inc. *Model 2000 Multimeter. User's Manual*. Cleveland, U.S.A. 1994.
- [8] KREITH, Frank. *Principles of Heat Transfer*. 2ª edición. International Textbook Company. Scranton, Pennsylvania. 1965.
- [9] MCADAMS, William. *Heat Transmission*. 3ª Edición. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1954.
- [10] PARKANSKY, D. y GARCIA, A. *RA-3. Caudal Efectivo de Refrigeración*. CNEA-Re-150. Comisión Nacional de Energía Atómica, Departamento de Reactores. Mayo, 1978.
- [11] PARKANSKY, D. y GARCIA, A. *Refrigeración de Reactores de tipo Pileta*. Informe de Trabajo 1017/83. Comisión Nacional de Energía Atómica, Gerencia de Ingeniería. 1983.

- [12] PARKANSKY, D., VERTULLO, A., y TAIN, V. *Informe de Trabajo: TERMIC1C*
- *Código de Cálculo Termohidráulico*. Gerencia de Ingeniería, CNEA. 1984.