

			INFORME-1 Rev.:0			
	LABORATORIO II INGENIERÍA NUCLEAR		Página: 1 de 17			
TÍTULO: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL CAUDAL DE REFRIGERACIÓN DE UN EC NORMAL PARA EL NÚCLEO DEL REACTOR RA-6						
1. RESUMEN <p>Se determinó experimentalmente el caudal de refrigerante circulante por un EC en el núcleo del reactor RA-6 utilizando la instrumentación de planta y un caudalímetro de turbina. Se compararon ambos métodos, comprobándose que el caudalímetro de turbina tiene una precisión superior, inferior al 1%.</p> <p>Además, se analizaron los caudales ante distintos eventos postulados tipo LOFA, verificando que, de estos, la apertura de los rompesifones es el único que compromete los márgenes termohidráulicos del núcleo.</p> <p>También se constató que el caudal es mayor en los EC ubicados en el centro de succión del plenum inferior respecto a los periféricos.</p>						
Preparó			Revisó		Intervino calidad	Aprobó
Dáhn, Tomás	Mairotta, Agustín	Ovando, Lucas Ezequiel				
REVISIONES						
Rev.	Fecha	Modificaciones				
0	02/03/2025					
FECHA DE VIGENCIA:						
DISTRIBUCIÓN			ESTADO DEL DOCUMENTO			
Copia N°: Distribuyó			Fecha: Firma:			
NOTA: Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.						

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 2 de 17
-------------	---	--

ÍNDICE

1. Resumen	1
2. Objetivo	3
3. Alcance	3
4. Abreviaturas	3
5. Introducción - Bases Teóricas	3
6. Configuración Experimental - Desarrollo de la Experiencia	4
6.1. Método de ΔP	5
6.2. Método de caudalímetro de turbina	7
6.3. Mediciones de caudal en eventos LOFA	9
6.4. Mediciones de caudal en operación normal	10
7. Datos Obtenidos - Análisis de Resultados	10
7.1. Calibración de ΔP vs caudal de núcleo	10
7.2. Calibración del caudalímetro de turbina	11
7.3. Medición de caudal ante eventos LOFA	13
7.4. Medición de caudal en operación normal	14
8. Conclusiones	16
9. Referencias	16
10. Anexo	17

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 3 de 17
-------------	---	--

2. OBJETIVO

Determinar experimentalmente el caudal refrigerante que circula en un EC dentro del núcleo del RA-6, utilizando dos métodos independientes:

- Instrumentación de planta existente.
- Caudalímetro de turbina.

Comparar la precisión y exactitud de ambos métodos.

Determinar, con ambos métodos, el caudal que circula por EC ante eventos postulados base de diseño tipo LOFA.

Determinar el caudal refrigerante primario en diferentes posiciones del núcleo del RA-6.

3. ALCANCE

Las mediciones tomadas en el presente informe se realizaron con las barras de extinción totalmente insertadas, es decir, con el reactor sin potencia por fisiones.

4. ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
ΔP	Pérdida de carga
Q	Caudal de refrigeración
T	Temperatura
ΔT	Salto térmico
LOFA	Loss of Flow Accidents, Accidentes con pérdida de caudal
EC	Elemento Combustible
BC	Barra de Control
ONB	Onset of Nucleate Boiling, Inicio de la ebullición local
EECC	Elementos combustibles
SPR	Sistema de Protección del Reactor
SCRAM	Apagado del reactor por el sistema de extinción
DC	Desmineralizador continuo

5. INTRODUCCIÓN - BASES TEÓRICAS

En los reactores de investigación, es fundamental preservar la integridad de los EECC para garantizar el rendimiento esperado de cada uno de ellos. Para lograrlo, el núcleo del reactor debe contar con un sistema de refrigeración eficiente y confiable.

Según lo establecido en el Informe de Seguridad [1], el sistema de refrigeración del RA-6 debe estar diseñado específicamente para asegurar una refrigeración adecuada en todas las

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 4 de 17
-------------	---	--

condiciones operacionales. Además, durante el funcionamiento normal, no debe alcanzarse en ningún punto del circuito el inicio de la ebullición nucleada (ONB), a fin de preservar los márgenes termohidráulicos.

El refrigerante dentro del núcleo circula de forma descendente y en régimen turbulento, por lo tanto, utilizando la ecuación de Bernoulli, la caída de presión que sufre al atravesarlo sigue la siguiente relación:

$$\Delta P_{Núcleo} = \alpha \cdot Q_{Núcleo}^2 \quad (1)$$

donde la constante α está estrictamente ligada a las propiedades del fluido que se utiliza como refrigerante (en este caso agua) y a la configuración hidráulica del núcleo.

El caudal total de núcleo está constituido por todos los caudales que circulan por cada elemento combustible. En esta experiencia se busca determinar, con dos metodologías independientes, el caudal que circula por un elemento combustible en particular.

Los resultados de esta práctica se consideran conservativos respecto a la condición del núcleo operando a potencia. Esto significa que los caudales medidos y calculados por elemento combustible con el núcleo apagado serán menores que los caudales reales cuando el núcleo esté en funcionamiento.

Este fenómeno se debe a que, al aumentar la temperatura de los canales combustibles, disminuye el coeficiente de fricción del refrigerante dentro de ellos. Por lo tanto, presentan una menor impedancia hidráulica que en la condición en frío, lo que provoca que una mayor proporción de agua, que anteriormente circulaba por los intersticios de la grilla, se redireccione a través de los canales combustibles, aumentando así el caudal efectivo de refrigeración por elemento combustible.

6. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL - DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA

A continuación se presenta la figura 1, en la cual se muestra la configuración del núcleo del RA-6 utilizada a lo largo de la experiencia de laboratorio. Esta figura sirve como referencia de coordenadas para identificar los cambios que se realicen durante el trabajo. Como característica constructiva se puede identificar que el centro de succión del plenum inferior no coincide con el centro geométrico del núcleo.

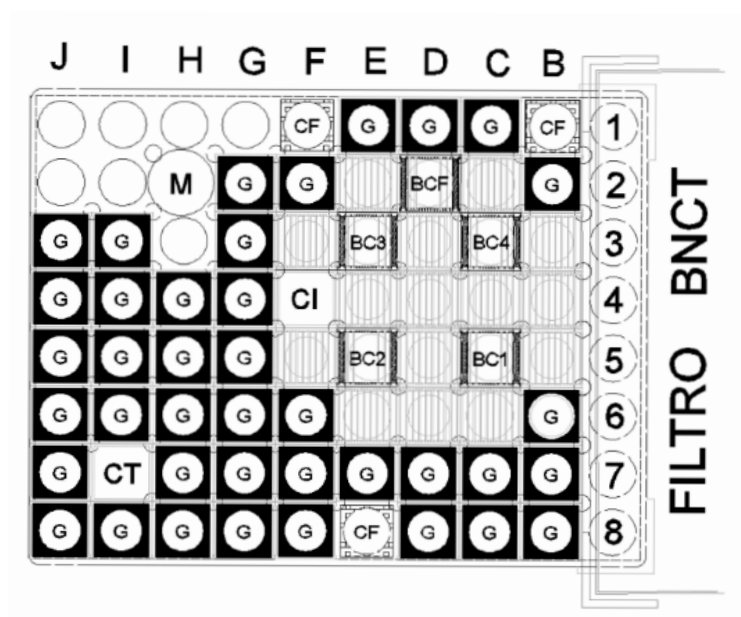


Figura 1. Configuración del núcleo del RA-6 utilizada.

Para poder cumplir con los objetivos propuestos, la experiencia de laboratorio se divide en 4 etapas. Las etapas 6.1 y 6.2 consisten en la explicación y desarrollo de los métodos utilizados para determinar el caudal de forma absoluta. Las etapas 6.3 y 6.4 consisten en la simulación de eventos tipo LOFA y determinación del caudal en diferentes partes del núcleo.

Para la determinación del caudal de refrigerante circulante por EC se utilizaron dos métodos independientes. Uno de ellos consistió en determinar indirectamente el caudal por EC mediante la instrumentación presente en la planta, mientras que el otro requirió el diseño de un dispositivo de medición de caudal y su implementación *in-core*.

6.1 MÉTODO DE ΔP

El RA-6 cuenta con transmisores de presión en la pileta, que se utilizan para medir la caída de presión en el núcleo. Uno de los transmisores de presión, que se encuentra dentro de un tubo colocado en una de las posiciones del núcleo, entrega una corriente proporcional a la altura de la columna de agua sobre el mismo. El otro transmisor da una referencia del pelo de agua. La diferencia en la altura de la columna de agua medida por los transmisores es proporcional a la caída de presión en el núcleo. La implementación puede observarse en la figura 2.

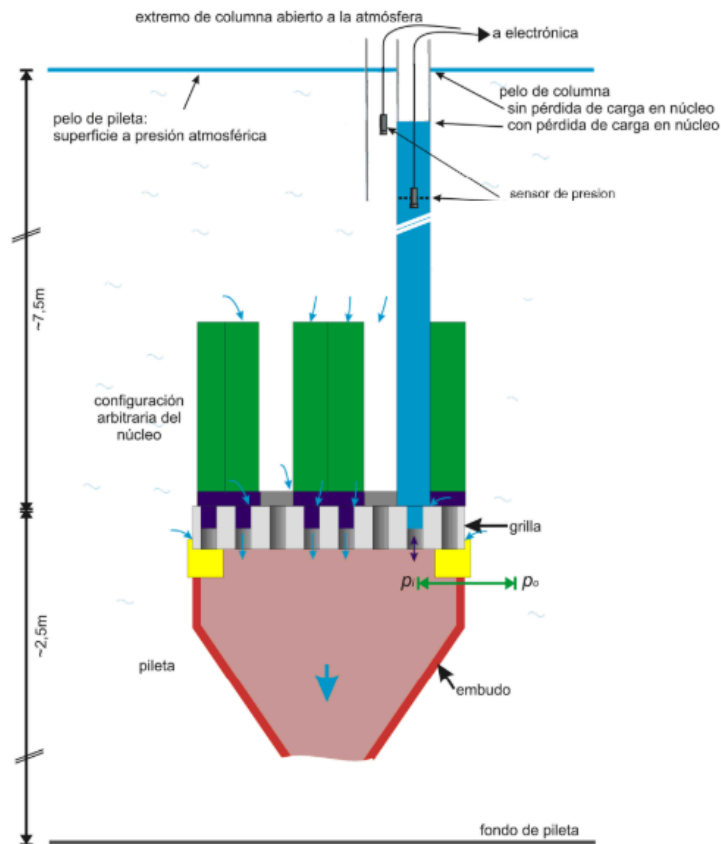


Figura 2. Implementación para la medición del ΔP de núcleo.

Utilizando el SEAD, se adquirieron mediciones de caída de presión del núcleo variando el caudal del primario entre un 70 y un 100% mediante la válvula de la rama de impulsión del circuito primario. Con los resultados obtenidos se obtuvo un coeficiente de correlación entre ΔP de núcleo y Q^2 del primario.

Para este método se utilizan tres hipótesis:

- El caudal de núcleo es aproximadamente igual al caudal de primario.
- El caudal de núcleo es invariante ante cambios en un EC.
- El coeficiente de correlación encontrado es invariante ante el taponamiento de un elemento combustible.

La bomba del circuito primario del RA-6 tiene una presión de impulsión de 50000 mmH₂O, mientras que la caída de presión en el núcleo es de aproximadamente 400 mmH₂O. De este modo, la caída de presión en el núcleo representa solo un 0.8% del ΔP del primario. Además, el núcleo posee

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 7 de 17
-------------	---	--

20 EECC, por lo que la impedancia de un EC solo representa un 5% del total del núcleo. Por este motivo, los cambios en los EECC no cambian la impedancia del primario y consecuentemente tampoco el caudal.

Por otro lado, la porción del caudal del circuito primario que no circula por el núcleo está compuesta por el refrigerante que circula por el circuito desmineralizador y el que circula por los huecos entre los grafitos de la grilla. El caudal por el circuito desmineralizador es un 1.5% del caudal del primario, mientras que el área de pasaje por los huecos de los grafitos es despreciable frente al área de pasaje del núcleo, lo que resulta en que el caudal del primario sea aproximadamente igual al del núcleo.

Al obstruir un EC, el caudal que pasaba por él ahora se redistribuye en los otros EECC, aumentando el caudal por cada uno de ellos. Es decir, la suma de los incrementos de caudal en cada EC es igual al caudal que pasaba por el EC obstruido. Esta obstrucción generará un aumento en ΔP del núcleo, debido al aumento de caudal en cada EC.

Según el modelo utilizado, un aumento de ΔP es debido únicamente a un aumento de caudal en el núcleo. Por lo tanto, el modelo arroja cuánto debería aumentar el caudal en el núcleo para el aumento medido en ΔP . Sin embargo, este aumento de caudal es equivalente al aumento de caudal total en todos los EECC por haber tapado uno de ellos. Entonces, el aumento de caudal arrojado por el modelo es igual al caudal que pasaba por el EC obstruido. Esto permite determinar el caudal de un EC a partir de mediciones de ΔP en el primario.

6.2 MÉTODO DE CAUDALÍMETRO DE TURBINA

Como método alternativo a la medición de caudal con instrumentación de planta, se optó por el diseño y la fabricación de un caudalímetro de turbina (figura 3), capaz de medir el caudal que circula por una posición específica del núcleo. Para ello se establecieron los siguientes requerimientos:

- Medir caudales de aproximadamente 10 m³/h, valor esperado para un EC, conociendo el caudal de primario y la cantidad de EECC.
- Tener una incerteza en la medición de caudal por EC acotada al 1%.
- Poseer una resistencia hidráulica despreciable frente a la de un EC, para no perturbar la medición.



Figura 3. Caudalímetro de turbina.

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 8 de 17
-------------	---	---

El caudalímetro de turbina posee un reed-switch (interruptor de lengüeta) el cual se acciona mediante la proximidad de un campo magnético ubicado en las paletas de la turbina.

A medida que las paletas giran por el paso de caudal a través del área de pasaje del caudalímetro, el interruptor se cierra y se abre de forma recurrente. Cuanto mayor sea el caudal, más rápido girará el eje de la turbina. Estos cambios de estado en el interruptor son procesados por una placa arduino, cuya resolución de cambio de estado está en el milisegundo. El tiempo entre que el imán acciona el interruptor, da una vuelta completa y vuelve a accionarlo es el periodo de giro de la turbina, el cual se puede traducir a una frecuencia de giro como la inversa del periodo.

Del modelo teórico planteado para el caudalímetro, se obtiene la siguiente relación:

$$Q = a \cdot f \quad (2)$$

Debido a la resolución del arduino para detectar cambios de estado, queda determinada una frecuencia máxima a la que la turbina puede girar, cuyo valor ronda los 7 Hz. Esto impacta directamente en las características constructivas de la misma ($a_{teórico}$) para poder garantizar que el instrumento determine el caudal con un error menor al 1%.

Para poder determinar el caudal con un error menor al 1% es necesario calibrar el caudalímetro de forma de cumplir este requerimiento. Para ello se diseñó un arreglo experimental, cuyas dimensiones fueron calculadas con este fin. El arreglo se muestra en la figura 4.

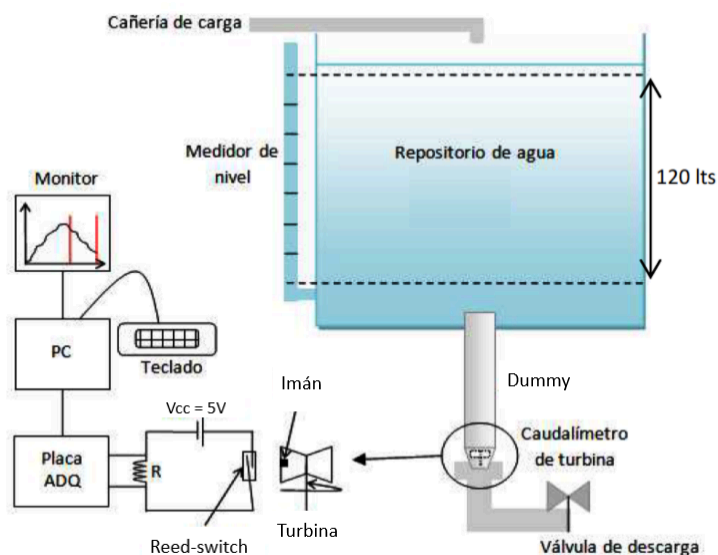


Figura 4. Arreglo experimental para calibración del caudalímetro de turbina.

El arreglo experimental para calibrar el caudalímetro de turbina cuenta con un tanque de 200 litros con un medidor de nivel visual conectado hidráulicamente con él. Sobre el medidor de nivel se colocaron marcas para garantizar que las descargas sean metodológicamente reproducibles. Para

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 9 de 17
------	---	--

evitar efectos de vórtices (debidos al agujero de descarga inferior), la marca inferior se colocó a una altura por encima del fondo del tanque.

En el agujero de descarga se encuentra un elemento combustible dummy, el cual posee las mismas características geométricas y de rugosidad que un elemento combustible real. Esto se hace con el fin de representar de la forma más fiel posible el comportamiento del agua al atravesar un EC. En la boquilla del dummy se encuentra el caudalímetro de turbina, conectado directamente a la placa arduino de adquisición y procesamiento de datos.

El agua que está contenida en el tanque se descarga a través del dummy, pasando por el caudalímetro de turbina y descargando en un desagüe ante la apertura de una válvula de descarga colocada en el caño de descarga.

La dinámica para poder calibrar el instrumento es la siguiente:

- Abrir la válvula de descarga.
- Cuando el nivel pasa por la primera marca se inicia el cronómetro (tiempo de reacción humano 0.2 segundos) y se indica al experimentador de la PC para que comience a registrar.
- Cuando el nivel pasa por la segunda marca se detiene el cronómetro y se indica finalizar la medición en la PC.
- Se repite el proceso para diferentes aperturas de la válvula de descarga, para así obtener diferentes frecuencias de giro y caudal.

Con las diferentes frecuencias y caudales promedio obtenidos, se obtiene el $\alpha_{experimental}$ que relaciona caudal con frecuencia de giro.

A modo de verificar si el modelo teórico $Q(f)$ se verifica experimentalmente, se comparan los valores de $\alpha_{teórico}$ y $\alpha_{experimental}$.

6.3 MEDICIONES DE CAUDAL EN LOFA

Colocando el dummy caudalímetro de turbina en la posición F5 de la grilla del núcleo, se simularon eventos operacionales previstos de tipo LOFA. En múltiples eventos postulados de esta índole, aunque el caudal por el núcleo disminuye, el caudal circulante por el circuito primario no, por lo que el canal de activación de caudal del primario del SPR es ciego ante estos eventos. Siendo así, se buscó verificar si las disminuciones en ΔP provocadas por estos eventos postulados eran detectables por la señal del canal de activación ΔP de la lógica del SPR.

Según el informe de seguridad del RA-6 [2], el SPR demanda SCRAM en caso de que ΔP de núcleo o el caudal del primario disminuyan un 10%. Acorde a la ecuación (1), una disminución en el caudal del 10% se corresponde a una disminución en ΔP de núcleo del 20%. Esta es la condición más demandante desde el punto de vista de los márgenes termohidráulicos. Si algún evento de tipo LOFA específico provocase una disminución de ΔP de núcleo mayor al 20%, entonces debería tener su propio canal de activación en la lógica de SCRAM del SPR.

Teniendo esto en cuenta, también se analizó si alguno de los eventos simulados compromete termohidráulicamente al núcleo del reactor.

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 10 de 17
-------------	---	---

Los eventos LOFA simulados fueron:

- Evento de bypass por agujero en la grilla. Para esto se retiró el reflector de grafito de la posición I4.
- Evento de apertura espuria de válvulas en el circuito primario de refrigeración. Para ello se accionaron secuencialmente los flotantes del conjunto rompe sifón.
- Evento de apagado o encendido del circuito de desmineralización continua. Esto se simuló cerrando por unos minutos el mismo. Este evento podría comprometer la refrigeración en caso de tratarse del encendido del sistema, debido a que disminuye el caudal por el núcleo.
- Evento de falla de refrigeración por reducción del caudal nominal de operación. Para esto se ajustó el caudal del primario hasta alcanzar el umbral de disparo por bajo caudal del SPR.

6.4 MEDICIONES DE CAUDAL EN OPERACIÓN NORMAL

En condición de operación normal, luego de verificar el caudal de primario y con el circuito desmineralizador encendido, se midieron, con ambos métodos, los caudales por EC en las posiciones F5, F3, D4 y B4, como indica la figura 1.

Para ello, primero se colocó el dummy caudalímetro en dichas posiciones. Luego, se retiró el dummy de la posición y se dejó estabilizar. Finalmente, se colocó en la posición vacía un reflector de grafito, simulando el bloqueo total de un EC normal. De este modo y siguiendo la metodología explicada en las secciones 6.1 y 6.2 se calculó, utilizando ambos métodos, el caudal por EC en cada una de las posiciones de grilla elegidas.

7. DATOS OBTENIDOS - ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 CALIBRACIÓN DE ΔP vs CAUDAL DE NÚCLEO

Como indica la sección 6.1, se obtuvo la relación entre ΔP_N y Q_p^2 . La misma se muestra en la figura 5. Los datos experimentales de la figura 5 se encuentran en la tabla 1.

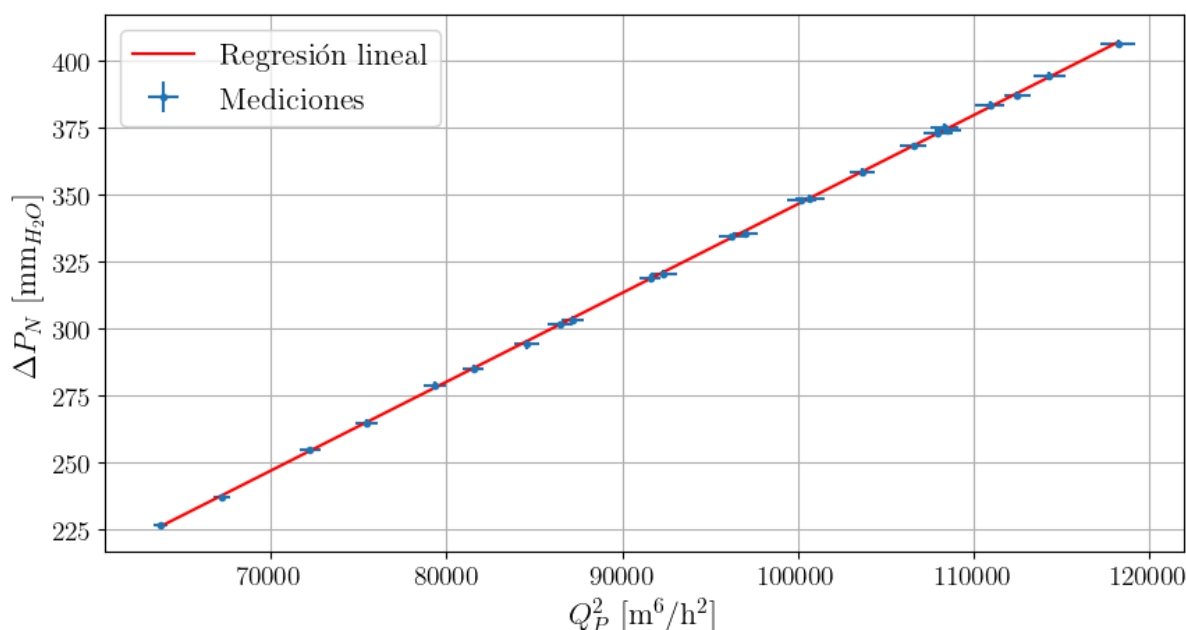


Figura 5. Relación entre ΔP_N y Q_P^2 obtenida experimentalmente. Ajuste lineal sobre los datos.

ΔP núcleo [mmH ₂ O]	279	255	226,6	294	302	321	336	349	368	384	395	387	375	359	348	335	319	304	285	265	237	374	407	373,3
Error ΔP núcleo [mmH ₂ O]	±1	±1	±0,8	±2	±1	±1	±1	±2	±1	±1	±1	±2	±2	±2	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±0,7
Q primario [m ³ /h]	282	269	252,5	291	294	304	311	317	326	333	338	335	329	322	317	310	303	295	286	275	259,3	329	344	329
Error Q primario [m ³ /h]	±1	±1	±0,8	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1

Tabla 1. Datos experimentales obtenidos de la etapa 6.1 de la experiencia.

El ajuste lineal realizado sobre los datos experimentales obtenidos fue el siguiente:

$$\Delta P_N = A \cdot Q_P^2 + B$$

$$A = (3320 \pm 7) \times 10^{-6} [\text{mmH}_2\text{O} \cdot \text{h}^2/\text{m}^6]$$

$$B = 14,7 \pm 0,6 [\text{mmH}_2\text{O}]$$

7.2 CALIBRACIÓN DEL CAUDALÍMETRO DE TURBINA

A partir de los datos experimentales obtenidos, se ajustó la relación entre ambos según la ecuación (2). El ajuste puede observarse en la figura 6. La tabla 2 contiene los valores de caudal y frecuencia medidos durante la experiencia de la sección 6.2.

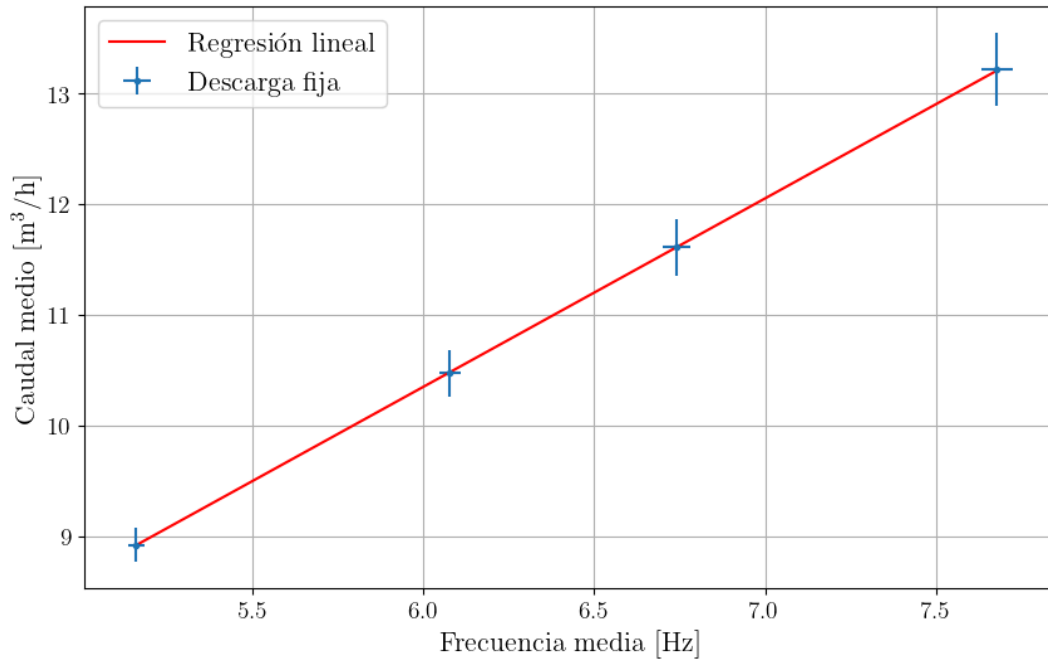


Figura 6. Caudal medio en función de la frecuencia media obtenida experimentalmente. Ajuste lineal sobre los datos.

$$\bar{Q} = a_{\text{experimental}} * \bar{f} + B$$

$$a_{\text{experimental}} = (1704 \pm 4) \times 10^{-3} [\text{m}^3 \text{s/h}]$$

$$B = (12 \pm 2) \times 10^{-2} [\text{m}^3/\text{h}]$$

Caudal [m³/h]	2.48	3.22	3.67	2.91
Error caudal [m³/h]	±0.04	±0.07	±0.09	±0.06
Frec. promedio [Hz]	5.16	6.74	7.68	6.08
Error frec. promedio [Hz]	±0.02	±0.04	±0.04	±0.03

Tabla 2. Datos experimentales obtenidos de la etapa 6.2 de la experiencia.

A partir de las características constructivas de la turbina del caudalímetro, se calculó que

$$a_{\text{teórico}} = (1620 \pm 40) \times 10^{-3} [\text{m}^3 \text{s/h}]$$

El valor de $a_{\text{experimental}}$ se contrastó con el valor obtenido para $a_{\text{teórico}}$. Si se tienen en cuenta los errores de ambos coeficientes, se observa que no coinciden. El coeficiente teórico se obtiene como resultado de un modelo que contiene simplificaciones. Estas mismas pueden ser la fuente de la diferencia entre ambos coeficientes.

7.3 MEDICIÓN DE CAUDAL ANTE EVENTOS LOFA

La figura 7 muestra la evolución de ΔP_N y Q_p a lo largo de la experiencia detallada en la sección 6.3. Se indica sobre la misma los diferentes eventos LOFA simulados en el RA-6.

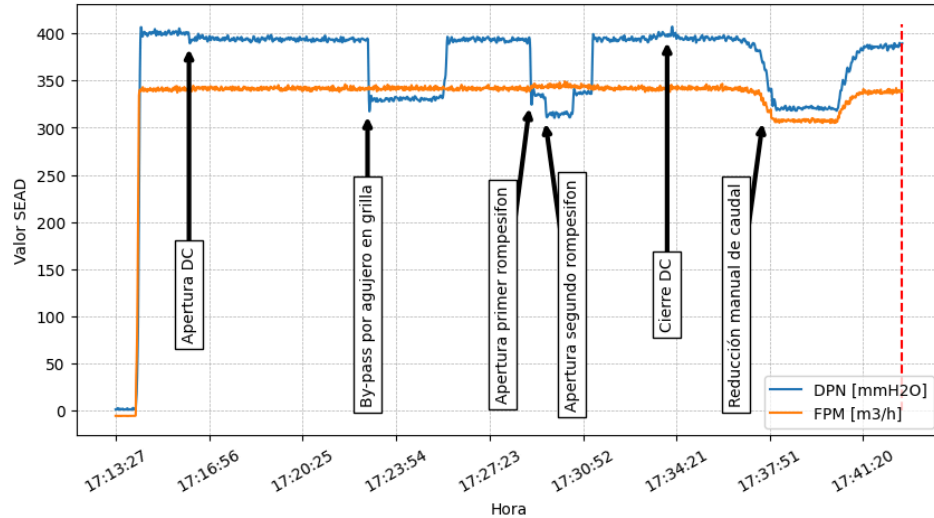


Figura 7. Evolución de ΔP_N (DPN) y Q_p (FPM) adquirida por el SEAD para diferentes eventos.

A continuación, la tabla 3 presenta los valores medidos en la experiencia.

	Caudal primario [m³/h]	Dummy caudalímetro [m³/h]	DeltaP [mmH2O]	DeltaP respecto al nominal con DC
Condición nominal sin DC	341 ± 1	12.08 ± 0.07	401 ± 2	101.5%
Apertura DC	342 ± 1	11.98 ± 0.07	395 ± 2	100.0%
By-pass por grilla	342 ± 1	11.07 ± 0.06	330 ± 1	83.5%
Rompesifon 1	344 ± 1	10.94 ± 0.06	334.5 ± 0.9	84.7%
Rompesifon 1 y 2	344 ± 2	10.59 ± 0.06	314 ± 2	79.5%
Rompesifon 2	344 ± 1	10.97 ± 0.06	337 ± 1	85.3%
Condición previa cierre DC	342 ± 1	11.96 ± 0.08	394 ± 2	99.7%
Cierre DC	342 ± 1	12.04 ± 0.08	395 ± 2	100.0%
Reducción caudal	308 ± 1	10.72 ± 0.06	321 ± 1	81.3%

Tabla 3. Valores de caudal y caída de presión del núcleo medidos para diferentes eventos LOFA simulados.

El evento operacional previsto de encendido/apagado del desmineralizador continuo presenta una disminución en la caída de presión del núcleo que no supera el 10% establecido en [2]. Por lo tanto estos eventos no demandarán SCARM.

El evento de apertura espuria de un rompesifón (ya sea el 1 o 2) y bypass por agujero en la grilla generan una disminución en la caída de presión del núcleo que supera el 10% establecido en [2]. Por lo tanto este evento demandará SCARM.

El evento de apertura espuria de ambos rompesifones genera una disminución en la caída de presión del núcleo que supera el 20%. Esta condición pone en juego la refrigeración del núcleo ya que supera los márgenes termohidráulicos. Es por esto que existe en la lógica de SCARM un canal

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 14 de 17
-------------	---	---

de activación denominado RS (figura 8), el cual detecta el estado de los rompесifones y demanda la desenergización de los electroimanes si estos se abren en operación normal.

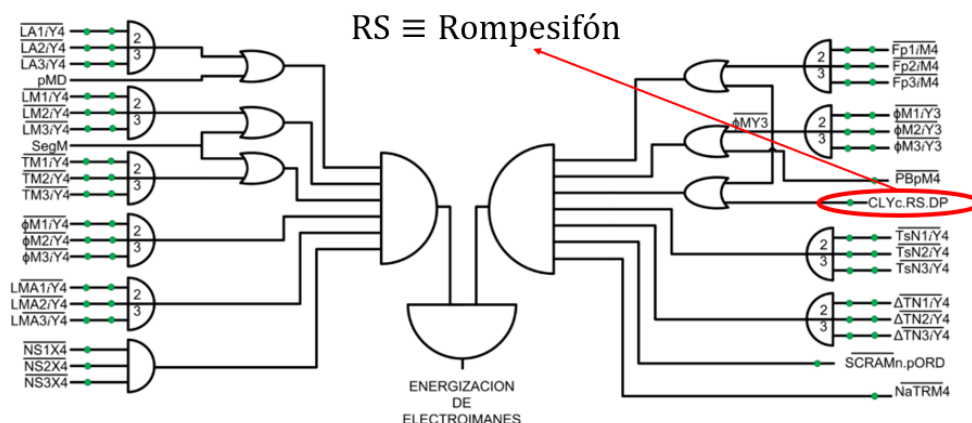


Figura 8. Lógica de SCRAM RA-6.

Por último, al cerrar la válvula de la rama de impulsión del circuito primario, se redujo el caudal en un 10% respecto al nominal. La disminución en la caída de presión para esta condición fue del 20%, por lo que se verifica la relación de variabilidad entre caudal del primario y caída de presión en el núcleo.

Si se mira la columna de caudal de primario se puede ver que los diferentes eventos LOFA simulados son indistinguibles frente a la condición nominal con el DC encendido. Esto indica que este tipo de eventos son imperceptibles frente a la variable caudal de primario, como se indica en la sección 6.3.

Adicionalmente, se puede concluir que el dummy-caudalímetro no es capaz de detectar el encendido/apagado del desmineralizador continuo (DC), sin embargo, para todos los otros eventos si fue capaz de discriminar los eventos LOFA respecto a la condición nominal con DC encendido.

Para finalizar la sección, se esperaba que la variabilidad del proceso de medición con el dummy caudalímetro dentro del reactor sea mayor a la que se tenía en el laboratorio. Sin embargo, estas son comparables entre sí.

7.4 MEDICIÓN DE CAUDAL EN OPERACIÓN NORMAL

La figura 9 muestra la evolución de ΔP_N y Q_p adquirida por el SEAD a lo largo de la experiencia detallada en la sección 6.4.

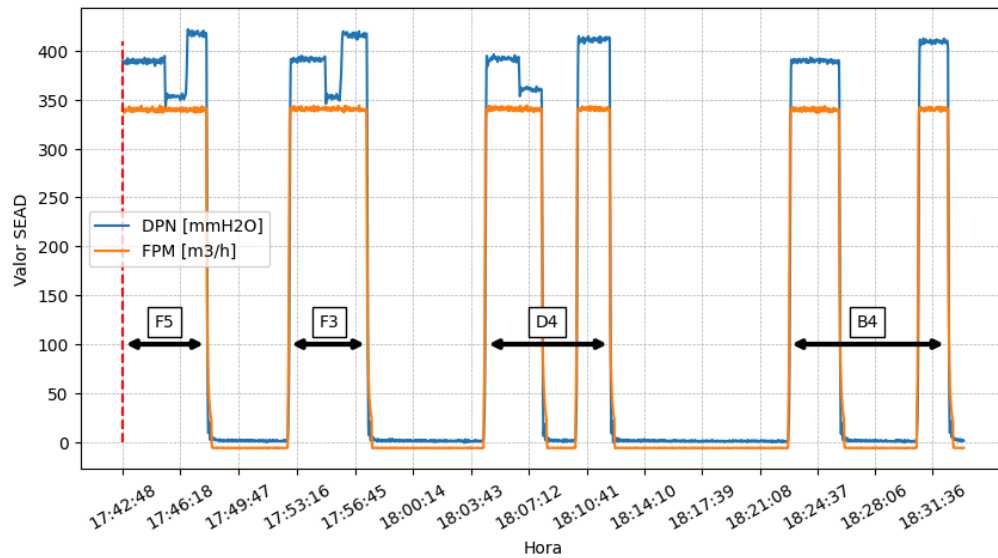


Figura 9. Evolución de ΔP_N (DPN) y Q_p (FPM) adquirido por el SEAD para cambios en las diferentes posiciones del núcleo.

La tabla 4 contiene los valores de caudal calculados utilizando ambos métodos, para las posiciones F5, F3, D4 y B4.

Posición	DeltaP dummy [mmH2O]	DeltaP grafito [mmH2O]	Caudal metodo DeltaP [m³/h]	Caudal dummy caudalimetro [m³/h]
F5	389 ± 2	417 ± 2	13 ± 1	11.89 ± 0.07
F3	392 ± 2	416 ± 2	11 ± 1	11.81 ± 0.07
D4	392 ± 2	411 ± 2	9 ± 1	11.33 ± 0.07
B4	390 ± 1	409 ± 1	9 ± 1	11.33 ± 0.07

Tabla 4. Valores de caudal calculados en la experiencia detallada en 6.4.

En esta parte de la experiencia se pueden contrastar ambos métodos de medición de caudal por elemento combustible. Solo la medición en la posición F3 coincide para ambos métodos con sus errores, mientras que en las demás posiciones los valores de caudal no se solapan.

Adicionalmente, el método del dummy-caudalímetro es capaz de discriminar el caudal que circula por la posición F3 y F5 (cercanas al centro de succión del núcleo) respecto de la D4 y B4 (más alejadas del centro de succión). Esto indica que el caudal que circula por los elementos combustibles ubicados en el centro de succión del plenum inferior tienen más caudal que los periféricos.

Esto no sucede así para el método de caída de presión en el núcleo, el cual presenta una incerteza mayor que el método del caudalímetro. Las mediciones de caída de presión del núcleo corresponden a la posición H3 de la grilla, es decir, se mide la caída de presión de forma local y no integral. Como resultado, este método resulta más inexacto para posiciones alejadas de H3.

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 16 de 17
-------------	---	---

La baja precisión del método de caída de presión en el núcleo se debe a que se busca registrar una diferencia en la caída de presión equivalente a 20 mmH₂O con una variabilidad de proceso de aproximadamente 1 mm.

8. CONCLUSIONES

Se logró determinar experimentalmente el caudal de refrigerante circulante por EC en el núcleo del reactor RA6 a través de la instrumentación de planta y utilizando un instrumento diseñado ad-hoc para obtener una precisión menor al 1%.

Se comparó la precisión obtenida a través de ambos métodos y se comprobó que la precisión del caudalímetro de turbina resultó un orden menor que utilizando la instrumentación de planta.

Se observó que la apertura de los rompesifones es el único de los eventos tipo LOFA simulados que compromete los márgenes termohidráulicos del núcleo. Por lo tanto se pudo explicar por qué constituyen un canal de activación en la lógica de SCRAM.

Se pudo verificar a través de ambos métodos utilizados que el caudal de refrigerante de los EC ubicados en el centro de succión del plenum inferior es mayor que el correspondiente a las posiciones periféricas.

9. REFERENCIAS

- [1] Informe de seguridad, capítulo 2: Objetivos de seguridad y requerimientos de diseño.
- [2] Informe de seguridad, capítulo 17: Límites y condiciones de operación.

CNEA	Determinación experimental del caudal de refrigeración de un EC normal para el núcleo del reactor RA-6	INFORME-1 Rev.:0 Página: 17 de 17
-------------	---	---

10. ANEXO

10.1 CAUDAL POR ELEMENTO COMBUSTIBLE

En esta sección se muestra la expresión para calcular el caudal por elemento combustible utilizando la instrumentación de planta con su respectiva propagación de errores.

$$Q_{EC} = Q_{Pf} - Q_{Po} = \frac{\sqrt{\Delta P_f - B} - \sqrt{\Delta P_o - B}}{\sqrt{A}}$$

$$\delta Q = \sqrt{\left(\frac{1}{2\sqrt{P_f - B}\sqrt{A}}\delta P_f\right)^2 + \left(\frac{1}{2\sqrt{P_o - B}\sqrt{A}}\delta P_o\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{A}}\left(\frac{1}{2\sqrt{P_o - B}} - \frac{1}{2\sqrt{P_f - B}}\right)\delta B\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{P_f - B} - \sqrt{P_o - B}}{2A\sqrt{A}}\delta A\right)^2}$$

10.2 CALIBRACIÓN DEL DUMMY CAUDALÍMETRO

En esta sección se muestra la expresión para calcular el caudal por el dummy caudalímetro para el experimento de la sección 6.2, con su respectiva propagación de errores.

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$\delta Q = \sqrt{\left(\frac{\delta V}{t}\right)^2 + \left(\frac{V\delta t}{t^2}\right)^2}$$

Experimentalmente, se obtuvo que $\delta V = 10^{-3} m^3$, mientras que $\delta t = 0.8 s$.

10.3 CÁLCULO DE $a_{TEÓRICO}$

En esta sección se muestra la expresión para calcular el $a_{teórico}$ con su respectiva propagación de errores.

$$a_{Teórico} = \frac{\pi^2 D^2 \bar{r}}{2 \tan \alpha}$$

$$\delta a_{Teórico} = \sqrt{\left(\frac{\pi^2 D^2 \bar{r}}{\tan \alpha} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\pi^2 D^2}{2 \tan \alpha} \delta \bar{r}\right)^2 + \left(\frac{\pi^2 D^2 \bar{r}}{2 \sin^2 \alpha} \delta \alpha\right)^2}$$