

# Estudio experimental de elementos promotores de mezclado en elementos combustibles.

Silin, Nicolás, Juanicó, Luis\*, Delmastro, Darío

Centro Atómico Bariloche, Instituto Balseiro

\*CONUAR

[silin@cab.cnea.gov.ar](mailto:silin@cab.cnea.gov.ar), [juanico@cab.cnea.gov.ar](mailto:juanico@cab.cnea.gov.ar), [delmast@cab.cnea.gov.ar](mailto:delmast@cab.cnea.gov.ar)

## Resumen

En el presente trabajo se muestra la utilización de una nueva técnica de trazas térmicas para la evaluación de la variación del mezclado entre subcanales acoplados debida a la presencia de diferentes elementos. Como elementos representativos se consideraron un separador, un separador con aletas mezcladoras y botones sobre la superficie de las barras. Para realizar la evaluación se comparó el comportamiento de una traza térmica en cada caso. También se presentan las caídas de presión para cada caso. Los resultados presentan una guía sobre el efecto y posible uso de estos elementos en futuros elementos combustibles.

## Abstract

In the present work a thermal tracing technique is used to measure the increase of the mixing between subchannels in the presence of different mixing elements. As representative elements a spacer, a spacer with mixing vanes and turbulence promoter buttons were considered. The performance of these elements was evaluated by studying the behavior of a thermal trace in each case. Also the pressure drop for each case is presented. The results present a qualitative and quantitative guide for the application of each one of these appendages in future nuclear elements.

## Introducción

Los márgenes de seguridad termohidráulicos son, indudablemente, uno de los más importantes criterios de diseño y licenciamiento de los elementos combustibles.

En el núcleo de un reactor nuclear, el fluido refrigerante avanza axialmente entre las barras de combustible (subcanales) pero existe también un mezclado trasversal. Este mezclado tiene importantes consecuencias en el desempeño termohidráulico de los combustibles, dado que permite homogeneizar la temperatura entre subcanales que reciben diferentes cantidades de calor de las barras combustibles.

Existen diferentes elementos localizados cuyo efecto fluidodinámico contribuye a aumentar de alguna manera los márgenes de seguridad. Los promotores de turbulencia o “turbulence promoters” (botones) y los deflectores mezcladores o “mixing vanes” (aletas), son dos ejemplos de este tipo de elementos[1]. Estos producen varios fenómenos que mejoran el desempeño del elemento combustible, siendo uno de ellos el incremento del mezclado entre subcanales vecinos. Es decir, midiendo el incremento de mezclado producido por estos elementos obtenemos un parámetro importante para el modelado numérico de la distribución de entalpías en elementos combustibles que posean estos elementos.

Una forma de cuantificar los márgenes termohidráulicos de operación y seguridad para una geometría de elemento combustible dada, consiste en utilizar modelos que plantean la conservación de masa, momento y energía en cada subcanal, generalmente implementados éstos a través de códigos numéricos (COBRA, ASSERT, etc). Estos códigos modelan el mezclado según distintas correlaciones desarrolladas en una base de diseño establecida sobre elementos combustibles tipo “cluster” conocidos, o aún en los de arreglos cuadrados, como los empleados en reactores de agua liviana[2]. Sin embargo ante la incorporación de elementos promotores de mezclado se deben agregar modelos que representen su comportamiento. Estos modelos se pueden obtener partiendo de mediciones experimentales como las que aquí se presentan.

Existen diferentes técnicas experimentales que permiten la medición de mezclado entre subcanales aunque muy pocas son utilizables en presencia de elementos mezcladores. Como ejemplo tenemos el trabajo de Shen et al [3] en que el mezclado es calculado mediante la integración a lo largo del huelgo entre los subcanales de mediciones locales obtenidas por medio de láser doppler. Si bien este método de medición arroja información sumamente detallada sobre los campos de velocidades en los subcanales tiene serias limitaciones en cuanto a la geometría en la que puede ser aplicado. Este método tampoco provee información sobre la zona aguas arriba de los elementos y por lo tanto no se podrían observar efectos de flujo cruzado como se puede esperar en geometrías no homogéneas con mezcladores.

Igualmente se han realizado estudios numéricos sobre el comportamiento de elementos mezcladores[4] en subcanales. Si bien los métodos numéricos arrojan información sumamente valiosa resulta difícil realizar simulaciones que reproduzcan los detalles de la geometría y la variedad de fenómenos presentes en subcanales acoplados como flujos secundarios e inestabilidades de gran escala [5]. De esta forma la información experimental sigue siendo de gran valor en esta área.

Para realizar las mediciones de mezclado se utilizó una técnica de trazas térmicas y termómetros recientemente desarrollada ([6], [7]) y que consiste en la generación de calor en uno de los subcanales mediante calefactores, generando una diferencia de temperaturas entre subcanales vecinos. La medición del decaimiento de este gradiente da el mezclado térmico entre los subcanales involucrados.

En general la introducción de elementos que mejoren el mezclado conlleva también un aumento de pérdida de carga. Este aspecto resulta fundamental a la hora de evaluar de los beneficios de uno u otro tipo de elemento mezclador por lo cual también se incluyen las pérdidas de carga para cada caso.

### ***Método experimental***

El equipo de medición propuesto consiste fundamentalmente en dos sistemas que realizan las siguientes funciones: generación de la traza térmica en un subcanal dado, y la medición de la concentración de la misma aguas abajo.

La generación de la traza térmica se logra con calefactores cilíndricos intercalados en las barras que forman los subcanales. Estos calefactores proporcionan un calentamiento acotado al sector correspondiente a un subcanal dado, en nuestro caso el subcanal central. Los calefactores han sido presentados en un trabajo anterior y están contruidos con barras

de silimanita de idéntico diámetro que las barras de la sección y poseen una cinta niquelada que funciona como una resistencia eléctrica.

En un flujo de una fase con propiedades termodinámicas constantes la concentración de la traza térmica se mide como un incremento de la temperatura del flujo. Sin embargo estos incrementos son del orden de décimas de grado por lo cual se desarrolló un sistema de termómetros con una precisión de  $3 \times 10^{-3} \text{°C}$  para poder medir las variaciones de concentración de la traza. Como elementos sensores se utilizaron resistencias de platino de 100ohm conectadas a cuatro puntas. Para la medición de resistencia se emplearon dos puentes de corriente constante y amplificadores de instrumentación de ultra-baja deriva térmica (3ppm/°C). La adquisición se realizó mediante una placa conversora análogo-digital conectada a una computadora personal. La temperatura del agua se mantuvo constante dentro de dos grados centígrados durante todas las mediciones.

La caída de presión se midió utilizando un sensor de presión diferencial conectado a través de orificios de instrumentación en la sección de prueba.

Para realizar las mediciones se construyó una sección de prueba con geometría triangular y simetría de  $120^\circ$ . La sección posee tres barras que forman un subcanal central y tres subcanales periféricos. La relación de paso a diámetro es de 1,33 y la distancia a la pared con el diámetro es de 1,04.

Se realizó primero una medición de mezclado y caída de presión en la sección sin apéndices. Luego se colocó un separador compuesto por flejes de 0,5mm de espesor y 60mm de longitud, que ocupaba desde 0,21m hasta 0,27m aguas abajo del calefactor. Se midió el mezclado y la caída de presión. Se modificó este separador construyendo en su extremo de salida del flujo tres pequeñas aletas con una inclinación aproximada de  $10^\circ$  como se muestra en la Figura 1, realizando las correspondientes mediciones. En ambos casos el borde de salida del separador se ubicó a 0,25m aguas abajo del calefactor. Finalmente se retiró el separador y se adosaron 9 botones a 0,25m aguas abajo de los calefactores para lo cual se los adhirió directamente sobre las barras. Los botones utilizados fueron de 1,5mm de altura y 3mm de diámetro y se colocaron como se muestra en la Figura 2.

## **Análisis de las mediciones**

Supongamos dos subcanales  $i, j$  conectados por una ranura. Del balance de energía en un subcanal  $i$  tenemos:

$$\frac{d(A_i U_i \rho_i H_i)}{dz} = w'(H_j - H_i) + Q'_i, \quad (1)$$

donde  $A_i$  es el área de pasaje del subcanal  $i$ ,  $U_i$  es su velocidad media,  $\rho_i$  su densidad,  $H_i, H_j$  las entalpías de cada subcanal,  $Q_i$  el ingreso de calor al subcanal  $i$  por unidad de longitud y  $w'$  la razón de mezclado turbulento por unidad de longitud en [kg/(s m)]. Tomando  $w_i = A_i U_i \rho_i$  y restando los balances de energía de los dos subcanales  $i, j$ , obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{d(H_i - H_j)}{dz} = -w' \left( \frac{1}{w_i} + \frac{1}{w_j} \right) (H_i - H_j) + \left( \frac{q'_i}{w_i c} - \frac{q'_j}{w_j c} \right). \quad (2)$$

En un subcanal adiabático y despreciando el calentamiento viscoso tenemos  $q'_j = q'_i = 0$ . Resolviendo esta ecuación diferencial tenemos

$$\Delta T(z) = \Delta T(z=0) \times \exp\left(-\frac{w'}{\rho} X\right), \quad (3)$$

donde  $\Delta T = (H_i - H_j)/c$ , siendo  $c$  la capacidad calorífica del fluido, y  $X = (l/w_i + l/w_j)$ , que puede ser calculado con buen grado de aproximación conociendo el caudal de la sección de prueba.

De esta forma midiendo los valores de la diferencia de temperaturas entre dos subcanales para diferentes posiciones axiales y ajustándolas por un decaimiento exponencial se puede obtener el valor del mezclado turbulento  $w'$ .

Para cuantificar el efecto mezclador de apéndices podemos considerar que generan un intercambio local de masa y entalpía entre los subcanales. Si bien este es un modelo sumamente simplificado del funcionamiento de los apéndices es adecuado para realizar un análisis comparativo. Para ajustar este modelo tomamos dos decaimientos exponenciales, el primero ajusta las mediciones antes de los apéndices, el segundo ajusta los valores una vez finalizado el efecto de los elementos mezcladores (ver Figura 3). Partiendo de la suposición que el efecto de los apéndices es local calculamos la diferencia entre los dos ajustes ( $\Delta T_i - \Delta T_o$ ) en la posición de los apéndices  $z_a$

Planteando el balance de entalpías (2) entre antes y después de un mezclado localizado  $w_l$ , obteniendo la siguiente igualdad:

$$\Delta T_i - \Delta T_o = -\Delta T_i w_l \left( \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} \right). \quad (4)$$

Esta igualdad nos permite calcular el mezclado  $w_l$  como

$$w_l = \frac{\Delta T_i - \Delta T_o}{\Delta T_i} \left( \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} \right)^{-1}. \quad (5)$$

## Resultados

Se obtuvieron los mezclados localizados para cada uno de los elementos medidos así como el incremento de la caída de presión que provocan.

Las mediciones se realizaron con agua a 41°C en un flujo de Reynolds 68.000, calculado en base al diámetro hidráulico de la sección de prueba (6,6mm). Las mediciones de temperatura se detallan en la Figura 4. Con estas mediciones se calculó la disminución del gradiente entre subcanales ( $\Delta T_i - \Delta T_o$ ) y el valor de  $w_l$  (ecuación (5)). Estos valores se presentan en la Tabla 1.

	Separador plano	Aletas	Botones
$(\Delta T_i - \Delta T_o) / \Delta T_i$	0,17	0,50	0,27
$w' \text{ [kg/s]}$	0,04	0,12	0,06
$\Delta P \text{ [bar]}$	0,36	0,36	0,38

### **Tabla 1 Resultados de la medición del incremento del mezclado en presencia de distintos apéndices**

Las incertezas asociadas a estos resultados son de aproximadamente 15%.

La caída de presión medida en la sección sin apéndices es de 0,32bar. Podemos ver como tanto el separador plano (sin aletas) como el separador con aletas presentan, dentro de la precisión de la medición, un aumento de la caída de presión similar.

Para obtener alguna información cualitativa del efecto de los apéndices dentro de cada subcanal se realizaron mediciones de temperaturas a lo largo del eje transversal. Las mediciones realizadas se muestran en la Figura 5 para el caso de las aletas y en la Figura 6 para el caso de los botones. Son de destacar los perfiles para  $z=0,325\text{m}$  (a  $0,075\text{m}$  aguas abajo de los apéndices). Estos perfiles difieren notablemente para cada caso. En el caso de las aletas podemos ver que la temperatura tiende a uniformizarse en el subcanal central, esto se puede interpretar como la existencia de un fuerte mezclado. La interpretación del perfil en el caso de los botones es menos evidente ya que el gradiente en el subcanal central se incrementa. Esto se puede deber a una redistribución de zonas frías y calientes dentro del subcanal o entre los subcanales.

### **Conclusiones**

Se presentó una aplicación de una nueva técnica experimental para la medición de mezclado entre subcanales acoplados utilizando trazas térmicas. Se realizaron mediciones de desempeño en la mejora del mezclado para botones y aletas arrojando valiosa información sobre el comportamiento de cada uno.

Podemos decir que las aletas mezcladoras producen una reducción de los gradientes entre los subcanales afectados de un 50%, incrementando la pérdida de carga en aproximadamente un 13%.

En el caso de los botones es claro que imponen una gran penalidad en la pérdida de carga, que aumentó en un 18% con un solo plano de botones. Por otro lado genera una gran redistribución de entalpías pero no parece mejorar notablemente el mezclado entre subcanales.

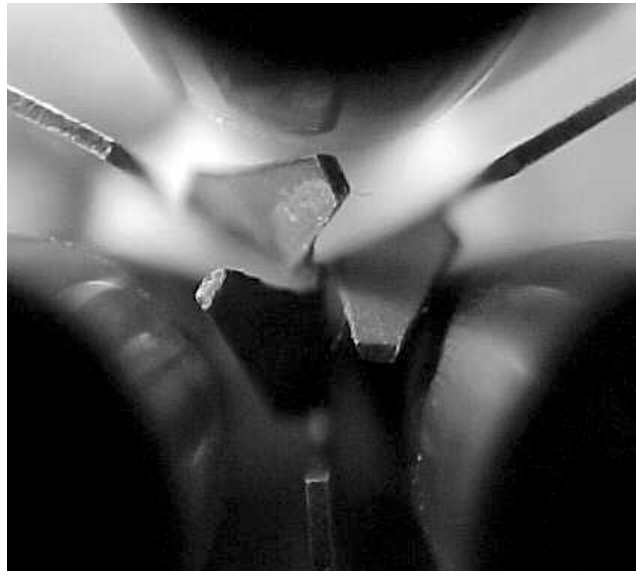
De la medición con el separador plano (sin aletas) vemos que su efecto en el mezclado es marginal, sin embargo la caída de presión que genera no difiere notoriamente al agregarle aletas (mediciones con aletas mezcladoras). Si bien las mediciones se realizan en un caso en particular esto parecería indicar que en elementos combustibles que utilicen separadores, el agregado de aletas al final de estos puede mejorar la distribución de entalpías sin causar un incremento en las pérdidas de carga.

### **Bibliografía**

- [1] I.P.L. Macdonald, Enhancement of Critical Heat Flux in Candu 37-Element Bundles, Canadian Nuclear Society 6. annual conference. Ottawa, ON (Canada). 3-4 Jun 1985
- [2] L.S. Tong, Joel Weisman, Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors (third edition), American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois USA
- [3] Y.F. Shen, Z.D. Cao, Q.G. Lu, An investigation of crossflow mixing effect caused by grid spacer with mixing blades in a rod bundle, Nucl. Eng. Des. 125 (1991) 111
- [4] Wang Kee In, Numerical Study of Coolant Mixing Caused By The Flow Deflectors in a Nuclear Fuel Bundle, Nuclear Technology 134 (May 2001) 187-195

- [5] J.D. Hooper, K. Rehme, Large-scale structural effects in developed turbulent flow through closely-spaced rod arrays, J. Fluid Mech. (1984), vol.145, pp.305-337
- [6] N. Silin, J. Barbero, E. Bubach, L. Juanicó, Medicion de mezclado entre subcanales combustibles: Desarrollo de una nueva técnica experimental, XXVII Reunión Anual Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, (2000) 104
- [7] N. Silin, L.E. Juanicó and D.F. Delmastro, A thermal tracing technique, 2001 enviada a Latin. App. Res.

## ***Figuras***



**Figura 1**Aletas mezcladoras

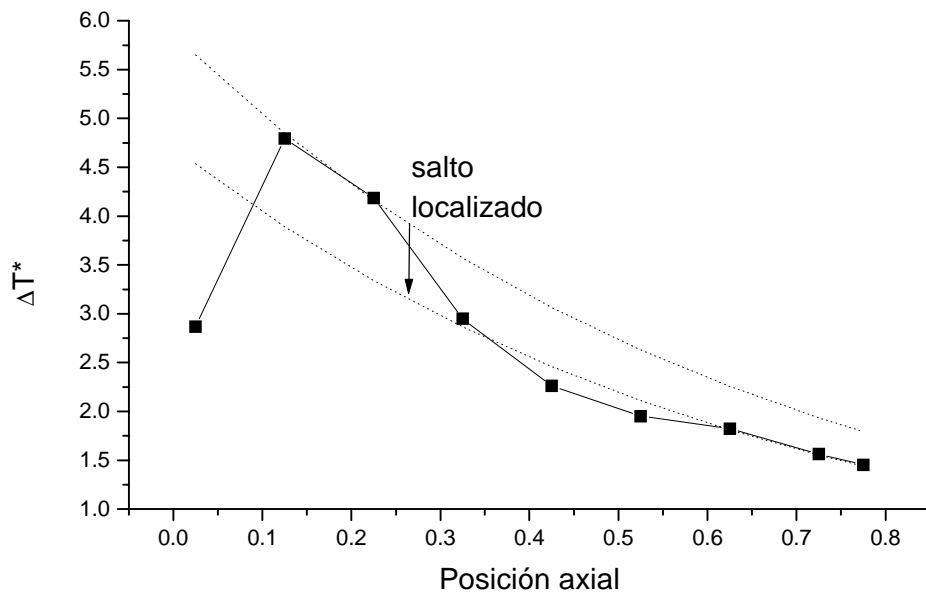


Figura 2 Promotores de turbulencia tipo botón

Figura 3 Modelo de salto localizado

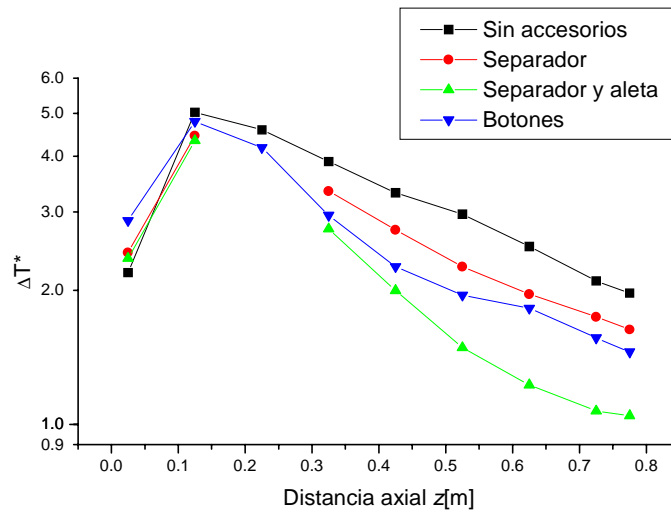


Figura 4 Decaimiento del gradiente de temperatura con la distancia axial para los diferentes elementos mezcladores

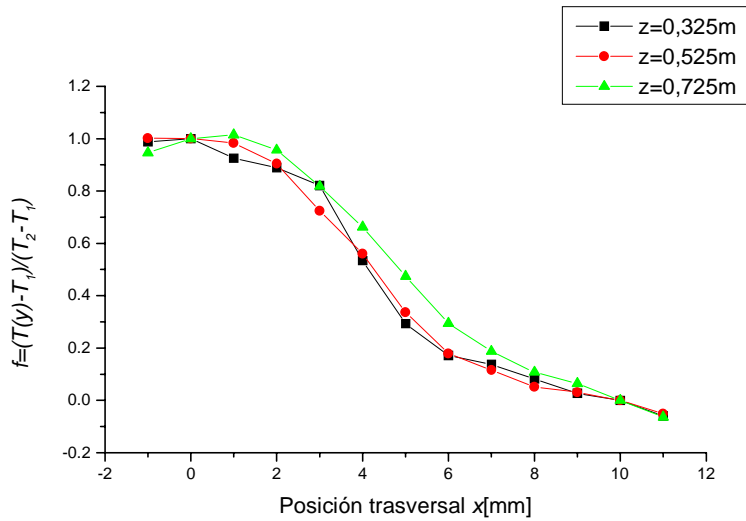


Figura 5 Perfiles de temperatura transversales en presencia de aletas en  $z = 0,250$  m



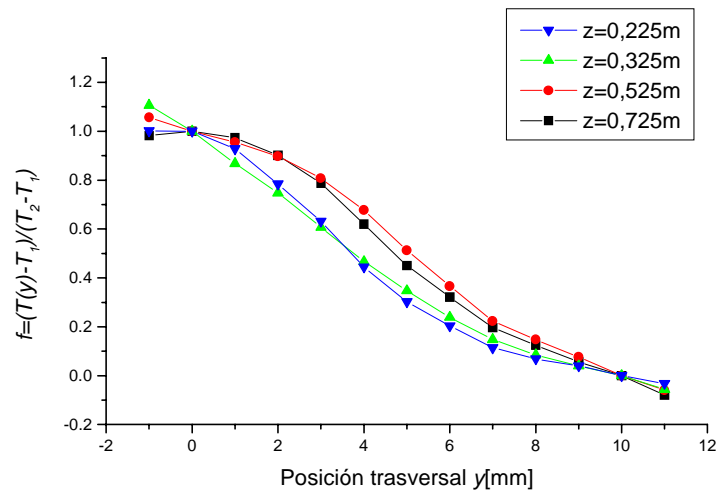


Figura 6 Perfiles de temperatura transversales en presencia de botones en  $z=0,250\text{m}$