

## IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS EN SUBCANALES DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES MEDIANTE ANÁLISIS NÚMÉRICO

**Paola A. Códoba, Enzo A. Dari**

*Grupo de Mecánica Computacional, Centro Atómico Bariloche, Av. Bustillo 9500, San Carlos de Bariloche, Argentina, paolaco@cab.cnea.gov.ar, darie@cab.cnea.gov.ar, <http://cabmec1.cnea.gov.ar>*

**Palabras clave:** Estructuras de vórtices, elementos combustibles, subcanales, simulación de la dinámica de flujo.

**Resumen.** En este trabajo se muestran resultados de la simulación de la dinámica del fluido en subcanales de elementos combustibles nucleares en dos configuraciones de interés en el campo de los reactores nucleares. Se busca comparar la configuración de 5 subcanales con una de 4 bajo las mismas condiciones hidrodinámicas con el fin de identificar estructuras en la dinámica del refrigerante. La simulación se realiza mediante el programa PARGPFEP, herramienta computacional elaborada en el grupo de Mecánica Computacional del Centro Atómico Bariloche. Mediante ésta es posible resolver numéricamente, por el método de elementos finitos, las ecuaciones de Navier-Stokes para diferentes aplicaciones. Con este trabajo se busca simular el problema complejo de mezclado turbulento que aparece en este tipo de configuraciones y que son de gran aplicación en el ámbito de los reactores nucleares.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las barras combustibles son elementos esenciales en reactores nucleares. Estos últimos consisten de grandes arreglos de barras, las cuales contienen combustible nuclear y están rodeadas de líquido refrigerante. El flujo del refrigerante que pasa a lo largo del canal experimenta una dinámica compleja y exhibe un patrón determinado que no se presenta en canales sin barras combustibles. En particular, la actividad en regiones entre barra y barra y entre pared del canal y barra (que de aquí en adelante se denominarán como gaps), se caracteriza por fuertes pulsaciones de flujo transversal, las cuales son responsables de la transferencia de calor y momento a través de ellos. Se dice que estas pulsaciones están asociadas con vórtices de gran escala, los cuales se forman en pares y ocurren de forma cuasi-periódica a lado y lado del gap, éstas pueden ser clasificadas como estructuras coherentes (Chang y Tavoularis, 2006). Este fenómeno también es conocido como mezclado turbulento y cobra gran importancia en los elementos combustibles donde aparece de forma natural y conforma un parámetro importante para mejorar el desempeño del mismo.

En este trabajo se busca este tipo de estructuras en un canal combustible de cinco subcanales y se compararán resultados con una geometría de cuatro subcanales bajo las mismas condiciones hidrodinámicas por medio de simulación numérica mediante elementos finitos. Se busca además medir el mezclado turbulento mediante la calefacción de regiones de la superficie de las barras combustibles con el objeto de observar la dinámica del refrigerante que circunda la superficie calefaccionada. Para la obtención de los resultados se emplea el programa PAR-GPFEP elaborado en el grupo de Mecánica Computacional del Centro atómico Bariloche, que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes por el método de elementos finitos

## 2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA 3D

Se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método de elementos finitos para el problema del flujo de agua refrigerante a lo largo de un canal combustible de tres y cuatro barras como los que se muestran en las figuras 1 y 2. El canal y las barras tienen un diámetro de 29,8 mm y 10 mm respectivamente con un diámetro hidráulico de 7 mm. Detalles de la geometría se pueden ver en la figura 3.

Para la simulación numérica de cinco subcanales, se elaboró una malla periódica con las dimensiones del canal combustible y con una longitud de 12 cm en la que se han refinado las zonas adyacentes al canal y a las barras con el fin de capturar los efectos de menor escala propios de las cercanías a las superficies. Para lograr esto se siguió la misma metodología utilizada en el caso de 4 subcanales, en donde se ensamblaron dos capas de elementos mas finas a la malla general por cada superficie en contacto con el fluido. La malla se pueden observar en la figura 1, donde el tipo de elemento utilizado es el tetraedro lineal.

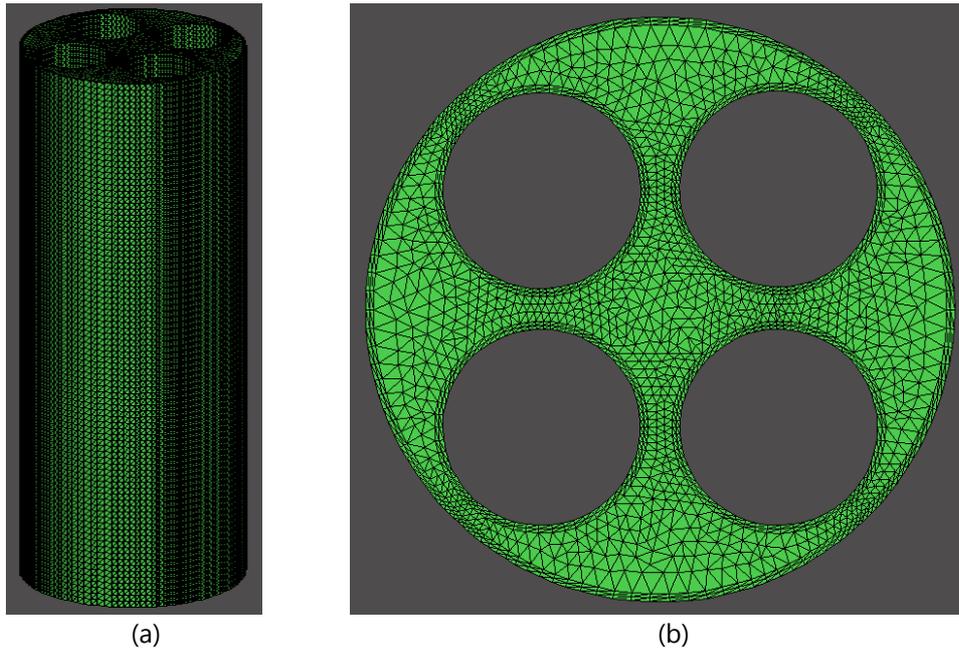


Figura 1. Vista lateral (a) y transversal (b) de la malla de visualización 3D del canal combustible de 5 subcanales.

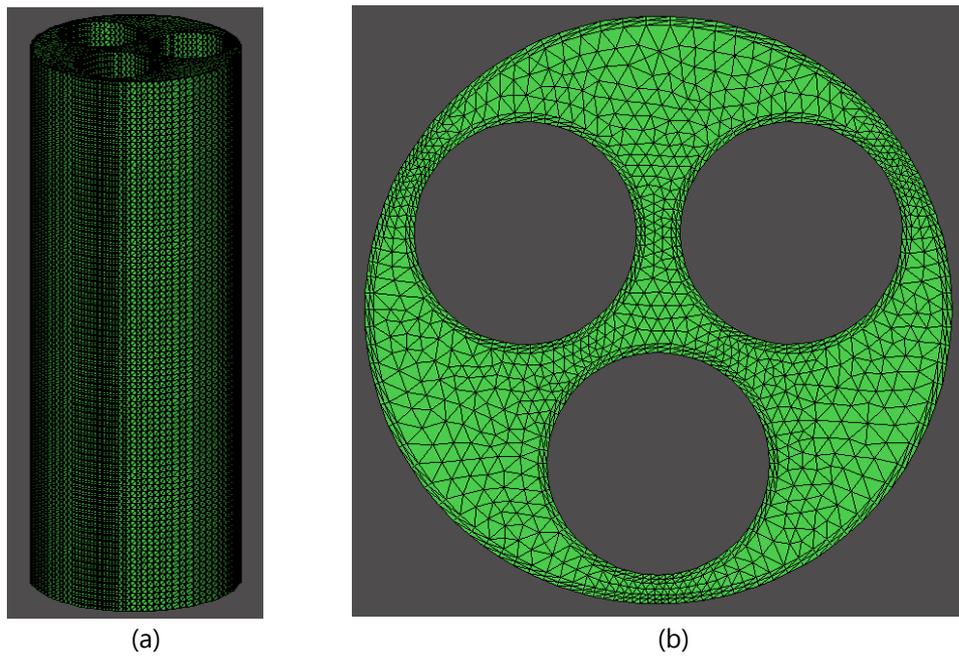


Figura 2. Vista lateral (a) y transversal (b) de la malla de visualización 3D del canal combustible de 4 subcanales.

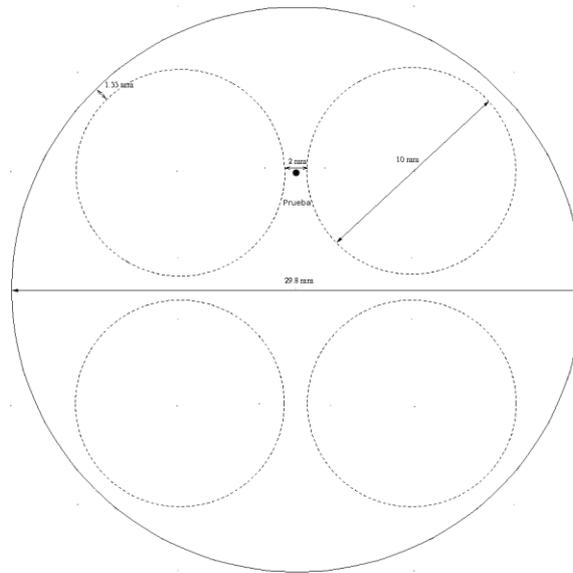


Figura 3. Dimensiones del canal combustible de 4 barras.

Con esta malla se simula el flujo axial (eje z) de refrigerante que pasa paralelo y entre las distintas barras combustibles. Para observar la actividad de intercambio de energía entre los distintos subcanales se impone un flujo de calor constante en las superficies de las barras correspondientes al subcanal central.

La tabla 1.0 muestra las dimensiones de las mallas para los casos de interés.

Caso	No. Elementos	No. Nodos
4 subcanales	920883	171859
5 subcanales	658956	123532

Tabla 1. Dimensiones de las mallas periódicas utilizadas.

### 3 IDENTIFICACIÓN Y MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE LAS ESTRUCTURAS

Para identificar estructuras de vórtices, se mide la autocorrelación de velocidades en dirección transversal al gap. Si la forma de esta curva de autocorrelación se repite en estos dos puntos podemos inferir la presencia de una estructura que se desplaza en dirección axial. La figura 4 muestra dos medidas de autocorrelación tomadas en dos puntos de prueba ubicados en el interior del gap superior (punto de prueba en la figura 3) y separados 4 cm sobre el eje z. Como se puede observar en ella, ambas presentan oscilaciones que pueden interpretarse como la manifestación de una estructura que desciende en el canal combustible.

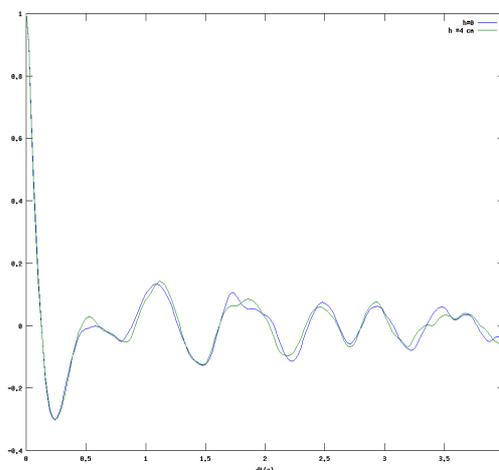


Figura 4. Auto-correlación de velocidades en dos puntos de prueba ubicados como se muestra en la figura 3 y separados una distancia de 4 cm.

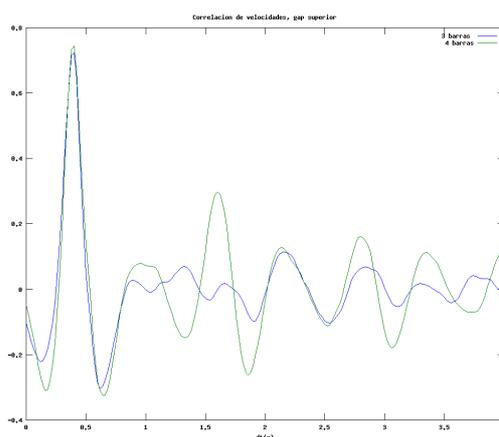


Figura 5. Correlación de velocidades en dirección transversal a distintos gaps (central y derecho).

Al correlacionar las señales en estos dos puntos se halla el  $\Delta t$  que maximiza la correlación, así, se obtiene el tiempo en que tarda el vórtice en pasar de un punto al otro y es posible determinar la velocidad de las estructuras. La figura 5 muestra la correlación de estos patrones de velocidad para las dos configuraciones geométricas estudiadas. El máximo en ambos caso se da para un  $\Delta t = 0.4s$  y considerando la separación de aproximadamente 4 cm se obtienen las velocidades de la tabla 2.

Caso	$\vec{V}_z (cm/s)$	Separación (cm)	$V_{est} (cm/s)$
3 barras	-9.18	4.04494	10.112
4 barras	-9.09	4.04659	10.116

Tabla 2. Velocidad media del fluido, distancia entre los puntos de prueba y velocidad de las estructuras en cada caso obtenidas de la simulación numérica.

En la tabla 2 se presentan los valores obtenidos de velocidad media del fluido y los de velocidad de las estructuras para ambos casos. Se obtuvo valores similares de velocidad de estructuras en ambos casos para los valores de velocidad media axial dadas y que corresponden a un número de Reynolds de 4500. Se puede decir entonces que tanto para la geometría de 3 barras como para la de 4, para este valor de Reynolds, las estructuras no cambian de velocidad, sin embargo, la configuración sí influye en el mezclado turbulento.

#### 4 MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE MEZCLADO

Se puede distinguir entre dos tipos de mezclado, el flujo cruzado divergente y el mezclado turbulento. El primero resulta de diferencias de presión entre subcanales vecinos. Se presentan por ejemplo: en la región de entrada donde el flujo es redistribuido entre los subcanales, ante el aumento de la fracción de vacío en algún subcanal, o en presencia de elementos localizados (espaciadores, grillas, etc.). Este tipo de mezclado es siempre dirigido desde un subcanal a otro. En contraposición, el mezclado turbulento es causado por vórtices naturales que intercambian momento, masa y energía entre subcanales, pero que en promedio no producen un transporte neto de masa.

El mezclado turbulento se define como el caudal másico intercambiado por unidad de longitud  $w'$ :

$$w'_{ij} = \rho w_{eff} S_{ij} \quad (1)$$

donde  $w_{eff}$  es la velocidad efectiva de mezcla y  $S_{ij}$  es el ancho del gap.

El calor intercambiado por unidad de longitud entre dos subcanales vecinos  $i$  y  $j$  a través del gap que los vincula, por un mezclado turbulento, se calcula como:

$$q'_{ij} = c_p w' (T_i - T_j) \quad (2)$$

donde  $T$  es la temperatura media de cada subcanal y  $c_p$  es el calor específico del fluido (Silin, 2004).

La evolución temporal de la temperatura media de dos subcanales vecinos obtenidas de la simulación para las dos configuraciones de barras combustibles se muestran en la figura 6. Aquí el refrigerante tiene una velocidad axial media constante, y debido al flujo de calor impuesto en las barras, la temperatura media crece linealmente con el tiempo. La diferencia de temperaturas media es por lo tanto la distancia entre las dos rectas evolutivas.

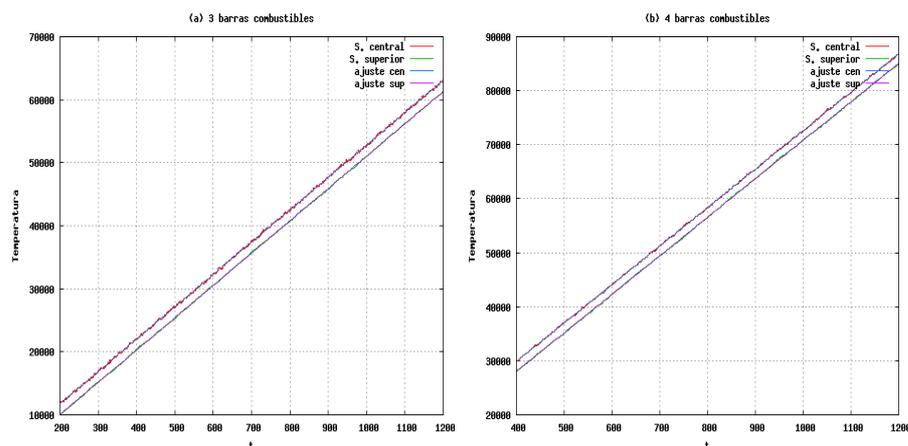


Figura 6. Evolución temporal de la temperatura media en dos subcanales. (a) Caso de 3 barras, (b) caso de 4 barras combustibles.

Haciendo un balance de energía, es posible determinar el mezclado usando las evoluciones temporales de temperaturas. Debido a que el sistema está aislado, el fluido se calienta únicamente por la acción del flujo de calor impuesto en las paredes de las barras y éste a su vez es transferido por el mezclado a través del gap entre los subcanales. De modo que el calor intercambiado por unidad de longitud es igual al cambio en la energía interna del fluido que está dado por la derivada de la temperatura respecto del tiempo:

$$q' = \rho A c \frac{dT}{dt} = w'_{ij} c_p (T_i - T_j) \quad (3)$$

Caso	$dT/dt$ (K/s)	$T_i - T_j$ (K)	$w'$ (kg/m·s)	$w_{eff}$ (m/s)
3 barras	59.53315	1758.6130	0.006999194	0.003499597
4 barras	71.22214	1820.4365	0.009389679	0.004694839

Tabla 3. Resultados de la simulación numérica para el cálculo del mezclado turbulento.

La tabla 3 muestra los valores calculados del mezclado turbulento para los dos casos de interés, también se incluyen los valores de la derivada temporal de la temperatura, la diferencia de temperaturas entre los subcanales y la velocidad media efectiva de mezcla. Estos resultados muestran que el mezclado es mayor en el caso del canal con 4 barras combustibles.

## 5 CAMPOS DE VELOCIDAD, TEMPERATURA Y PRESIÓN OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

Los campos de temperatura, velocidades y presión típicos obtenidos de la simulación se pueden ver en la figura 7.

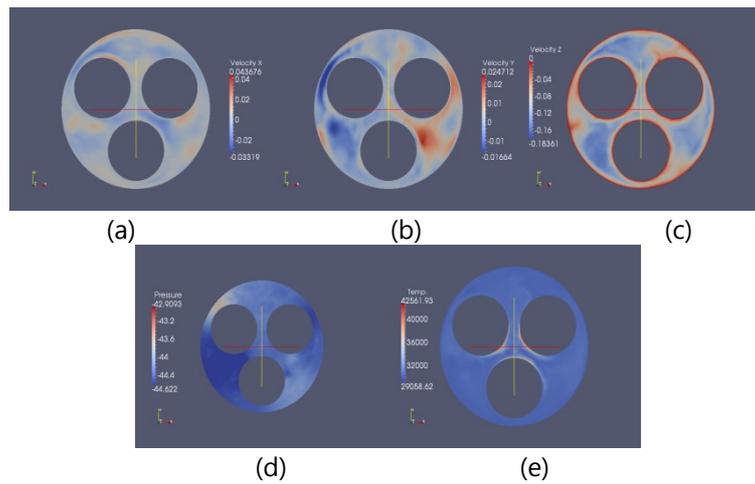


Figura 7. Campos de velocidades en x, y, z (a, b y c respectivamente), presión (d) y temperatura (e) obtenidos de la simulación para el canal de 3 barras combustibles.

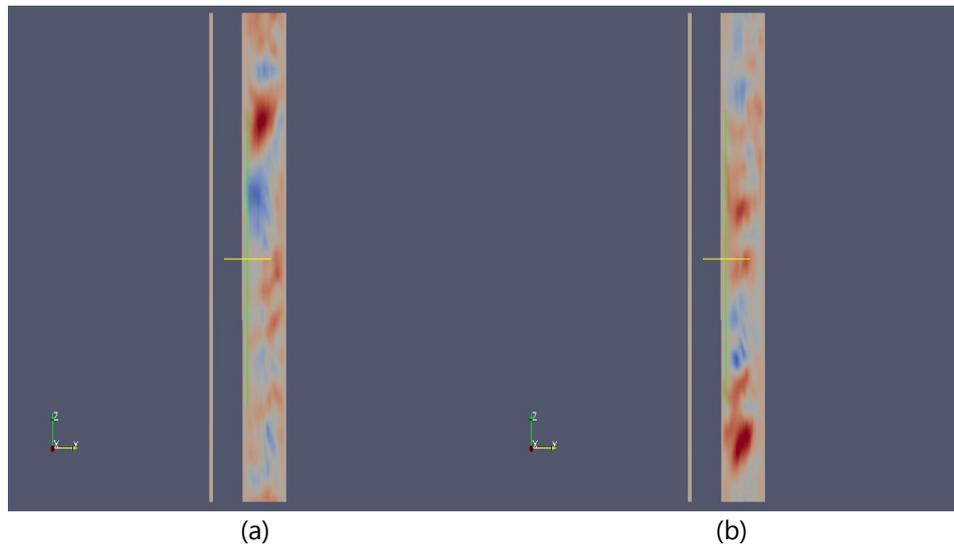


Figura 8. Campos de velocidad transversal al gap en un corte longitudinal del canal combustible. (a) y (b) muestra el paso de un vórtice de un punto a otro.

La figura 8 ilustra el movimiento de una estructura por el subcanal. Ésta muestra un corte longitudinal del canal donde se ha capturado el campo de velocidades en dirección 'y' en dos pasos de tiempo distintos (a y b) y que ejemplifica el descenso de una estructura sobre el eje axial del canal.

## 6 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la simulación muestran la existencia de estructuras de vórtices en canales combustibles de 3 y 4 barras para un número de Reynolds de 4500, además constituye un método para la determinación del mezclado turbulento en canales combustibles de la geometría estudiada, así como la identificación y cuantificación de la velocidad de las estructuras presentes. Conviene realizar simulaciones para números de Reynolds del orden de  $10^4$  con el fin de comparar con

resultados experimentales obtenidos para geometrías de 3 barras combustibles y que están disponibles en (Silin, 2004).

## REFERENCIAS

- D. Chang, S. Tavoularis, "*Numerical simulation of turbulent flow in a 37-rod bundle*", Nuclear Engineering and Design, Agosto de 2006. Disponible en [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- Silin, N, "*Desarrollo y aplicación de una nueva técnica para la medición de mezclado entre subcanales*", Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad Nacional de Cuyo, Octubre 2004.