

## ANÁLISIS DEL FLUJO DE REFRIGERANTE A TRAVÉS DE UN ELEMENTO COMBUSTIBLE DE UN REACTOR DE INVESTIGACIÓN USANDO OPENFOAM

Ezequiel O. Fogliatto<sup>a</sup> y Federico E. Teruel<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>*División de Mecánica Computacional, Centro Atómico Bariloche, Av. Ezequiel Bustillo 9500,  
8400 San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina, [fogliatto@cab.cnea.gov.ar](mailto:fogliatto@cab.cnea.gov.ar)*

<sup>b</sup>*CONICET, Centro Atómico Bariloche, Av. Ezequiel Bustillo 9500, 8400 San Carlos de Bariloche, Río  
Negro, Argentina*

**Palabras Clave:** CFD, OpenFOAM, SALOME, Reactores de investigación.

**Resumen.** En el presente trabajo se llevó a cabo un análisis de la dinámica de fluido refrigerante a través de un elemento combustible de placas planas paralelas, empleando las herramientas OpenFOAM® para la generación de mallas y solución de ecuaciones diferenciales, y SALOME para la construcción de modelos CAD. En primer lugar, se obtuvieron campos de presión y velocidad para un elemento combustible completo en condiciones normales de refrigeración, empleando un modelo computacional con el mismo nivel de detalle que en el diseño real. Los resultados obtenidos fueron empleados para determinar valores medios de velocidad en los canales entre placas combustibles, y se realizó además un análisis del comportamiento de la presión en la cercanía de la ventana, ubicada en las placas combustibles externas. Por otro lado, se analizó la sensibilidad de los resultados numéricos frente al uso de modelos computacionales reducidos, que involucran menor tiempo de cálculo. En particular, se estudiaron los efectos de la presencia de un plenum en el extremo de salida del elemento combustible, utilizando modelos de longitud menor que la real. Finalmente, se cuantificó la influencia de la longitud del modelo computacional en la distribución del caudal de refrigeración entre placas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre los diferentes tipos de reactores nucleares pueden distinguirse dos grupos principales: reactores nucleares de potencia y de investigación. Los llamados reactores de potencia se caracterizan por un diseño orientado a la producción de energía eléctrica en forma segura, permitiendo el control de las reacciones de fisión bajo múltiples condiciones de operación. Para favorecer este comportamiento, los elementos combustibles empleados en estos reactores consisten típicamente en arreglos de barras combustibles, las cuales están compuestas por pastillas de material físil contenidas en vainas metálicas. La utilidad de los reactores de investigación, en cambio, no radica en el aprovechamiento de reacciones nucleares para producir energía eléctrica, sino en la producción de radiación para uso en áreas como interacción de radiación con materiales, técnicas de análisis no destructivas, investigación en física nuclear, desarrollo e implementación de terapias contra el cáncer, producción de radioisótopos, etc.

Los reactores de investigación son más sencillos que los de potencia. En general, utilizan refrigerante en estado líquido a presión atmosférica (agua liviana en la mayoría de los casos), y en condiciones normales de operación las temperaturas alcanzadas en los elementos combustibles son relativamente bajas, de modo que se permite el empleo de materiales con bajo punto de fusión, como Al o Cd. En los reactores más pequeños, donde la potencia no supera las decenas de kW, suele operarse con refrigerante en régimen de convección natural.

Con el fin de lograr posiciones de alto flujo neutrónico a baja potencia, se utilizan elementos combustibles compactos. Entre los diseños más difundidos se encuentran los reactores identificados como MTR (*Materials Test Reactor*), los cuales incorporan elementos combustibles que consisten principalmente en partículas de algún compuesto de uranio, colaminado entre placas de aluminio de entre 1 y 2 mm de espesor. En elementos combustibles de reactores como RA-6, un conjunto de 21 placas planas paralelas es fijado mecánicamente a dos marcos laterales, manteniendo una separación uniforme entre placas para permitir la libre circulación del fluido refrigerante. La presencia de una boquilla permite la fijación de estos elementos a una grilla, de modo que es posible conformar el núcleo del reactor como un arreglo ordenado de elementos combustibles. En la Fig. 1 se muestra un diagrama de un combustible MTR de placas paralelas típico, en donde se puede distinguir la disposición de las placas combustibles, boquilla de ingreso, plenum de salida y ventana para permitir la circulación de fluido por el exterior del combustible. Además, se indica el sentido de circulación del refrigerante.

En condiciones normales de operación, el refrigerante ingresa por la boquilla y se distribuye en los diferentes canales que separan las placas combustibles (canales refrigerantes). Esta distribución de caudal no es homogénea, y resulta de gran importancia para conseguir una adecuada remoción de la potencia térmica generada en el combustible, ya que es necesario evitar un incremento excesivo de temperatura en todas las placas. Por otro lado, un diseño incorrecto puede conducir a la presencia de regiones donde ocurra el fenómeno de cavitación del refrigerante, proceso que acelera la degradación del elemento combustible. Por lo tanto, es imprescindible el conocimiento de una metodología de análisis que permita efectuar un cálculo preciso de la dinámica del refrigerante a través del elemento combustible, y que permita obtener características globales del flujo (como caudal por canal refrigerante) que puedan ser empleadas en otras etapas de diseño (por ejemplo ver (García et al., 2008)). En el presente trabajo se muestran los resultados del cálculo de la distribución de presiones y caudales en los canales refrigerantes de un elemento combustible de placas planas paralelas, obtenidos a partir de un modelo computacional detallado. Adicionalmente, se evalúa la sensibilidad en el cálculo de caudales y pérdidas de carga para los canales del elemento combustible utilizando distintos modelos com-

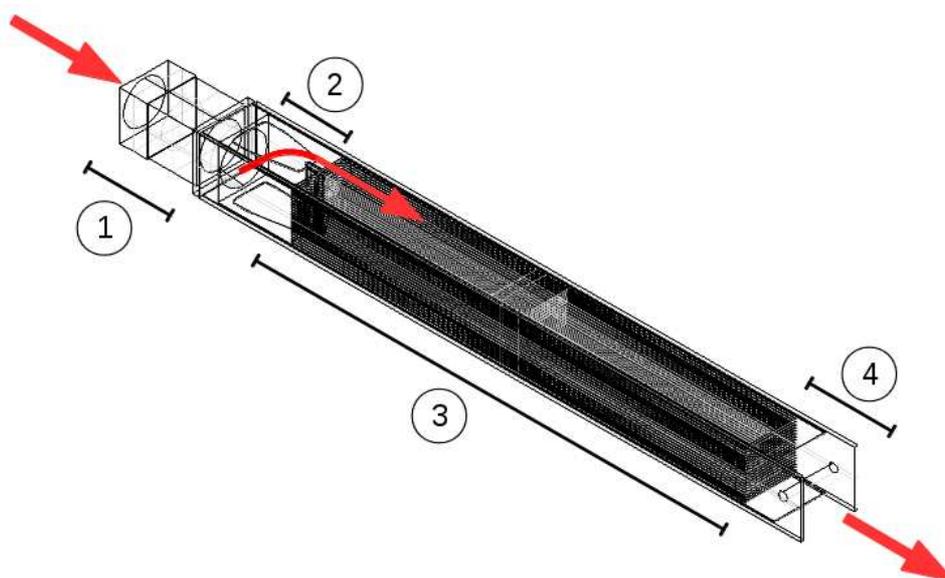


Figura 1: Diagrama de un elemento combustible de placas planas paralelas. Puede distinguirse la boquilla (1), ventana (2), placas combustibles (3) y plenum (4).

putacionales. En particular, se estudian los efectos de la presencia del plenum en el extremo de salida, y se evalúan los cambios en la redistribución de caudal entre placas con el uso de modelos de longitud reducida. Este último caso resulta de interés para evaluar la respuesta de modelos computacionales económicos que resultan adecuados para análisis de diseño.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA, ECUACIONES Y CONDICIONES DE CONTORNO

### 2.1. Ecuaciones y herramienta numérica

Para lograr una descripción detallada de la dinámica del refrigerante a través del elemento combustible, de forma de poder calcular al caudal entre placas combustibles, es necesario resolver las ecuaciones de conservación de masa y momento (Navier-Stokes), que para un fluido incompresible y sin fuerzas volumétricas externas resultan

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Conservación de masa} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \text{Conservación de momento} \quad (2)$$

Junto con estas ecuaciones se utilizan las aproximaciones de no-deslizamiento para la velocidad y gradiente de presión nulo sobre las paredes

$$u|_{pared} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} \Big|_{pared} = 0 \quad (4)$$

En el caso bajo estudio, el fluido refrigerante se encuentra circulando bajo un régimen turbulento ( $Re_d \sim 10^6$  en la boquilla). Si se desea representar adecuadamente la dinámica del mismo,

la presencia de fenómenos que tienen lugar en un amplio rango de escalas espaciales y temporales limita el análisis numérico, ya que los tiempos de cálculo involucrados resultan excesivos. Una de las soluciones más difundidas para este tipo de problemas consiste en utilizar sistemas de ecuaciones “promediadas”, conocidas como RANS (Reynolds Average Navier-Stokes). La complejidad principal de las ecuaciones RANS radica en representar correctamente los términos asociados al tensor de Reynolds; tomando como base la idea de difusión asociada a la turbulencia, la dinámica asociada al transporte de los mismos suele representarse como un fenómeno difusivo, incorporando el parámetro  $\nu_t$  (viscosidad turbulenta)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) \sim \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

de modo que resta calcular adecuadamente  $\nu_t$ . Para llevar a cabo el presente trabajo se hizo uso de uno de los modelos más difundidos para calcular este coeficiente, conocido como Spalart-Allmaras, en el que se propone que la viscosidad efectiva  $\tilde{\nu}$  satisface una ecuación de transporte prototipo (Durbin y Reif, 2011)

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + U \cdot \nabla \tilde{\nu} = P_\nu - \epsilon_\nu + \frac{1}{\sigma_\nu} \left[ \nabla \cdot ((\nu + \alpha_\nu \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}) + c_{b2} |\nabla \tilde{\nu}|^2 \right] \quad (6)$$

En base a lo observado anteriormente, el cálculo de los campos de velocidad y presión requiere el uso de una herramienta numérica capaz de resolver sistemas de ecuaciones diferenciales en geometrías arbitrarias. Si bien existe un gran número de utilidades disponibles para tal fin, se decidió emplear el conjunto de bibliotecas de uso libre OpenFOAM® v2.2.2 (OpenFOAM Website) haciendo uso de la aplicación **simpleFoam**, diseñada para resolver las ecuaciones RANS en estado estacionario mediante la implementación del algoritmo SIMPLE (Patankar, 1981).

La definición de las constantes y de los términos de producción ( $P_\nu$ ) y disipación viscosa ( $\epsilon_\nu$ ) incorporados en OpenFOAM® pueden encontrarse en (Jasak, 2009). La utilización del modelo de Spalart-Allmaras implica, en principio, menor costo computacional que el modelo de amplia difusión  $k - \epsilon$ , ya que el comportamiento de  $\tilde{\nu}$  cerca de la pared hace que ésta sea más fácil de resolver que  $k$  o  $\epsilon$  (Pope, 2001). Simulaciones previas de flujo turbulento en canales, muestran que la utilización de este modelo conduce a una representación satisfactoria de los perfiles de velocidad para números de Reynolds moderados y altos, en comparación con resultados de simulación directa de turbulencia (Fogliatto, 2012).

## 2.2. Descripción de elementos combustibles de placas planas paralelas

En los elementos combustibles de placas paralelas como el de la Fig. 1 pueden distinguirse dos tipos de placas combustibles: exteriores e interiores. Las primeras presentan una longitud y espesor diferente, ya que cumplen funciones estructurales e hidráulicas adicionales. En particular, presentan ventanas para permitir la circulación de refrigerante por fuera del combustible, como se muestra en la Fig. 1. La estabilidad de las placas interiores y de los canales refrigerantes se asegura a través de la presencia de un peine en el extremo inferior del conjunto de placas. Dicho conjunto se encuentra montado sobre una boquilla que permite la circulación de refrigerante, a la vez que posibilita la sujeción del elemento combustible a la grilla del núcleo. Un diagrama del ensamble general de estos elementos se muestra en la Fig. 2, en donde puede apreciarse la ubicación de la boquilla de ingreso, ventana sobre las placas combustibles externas, peine, y plenum en el extremo de salida del elemento combustible.

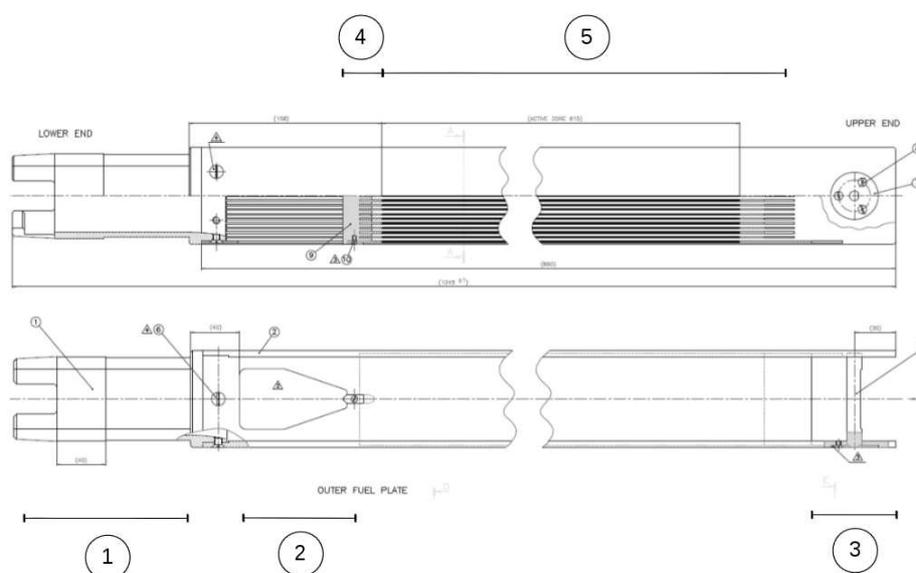


Figura 2: Ensamble general del elemento combustible. Puede distinguirse la posición de la boquilla (1), ventana (2), plenum (3), peine de sujeción (4) y placas combustibles (5).

### 2.3. Modelos computacionales

Con el fin de establecer el dominio de cálculo con la mayor fidelidad posible y permitir una imposición natural de las condiciones de contorno, se realizó un mallado detallado del elemento combustible ([Elemento Combustible, Ensamble General](#)) incluyendo desde la boquilla de entrada hasta el plenum de salida, teniendo en cuenta los detalles geométricos provistos en ([Elemento Combustible, Ensamble General](#)) para las placas combustibles internas y externas, ventana, boquilla, peine, placas laterales y perno de sujeción en el plenum de salida. Debido a la simetría del problema, se efectuaron simulaciones sobre un cuarto del dominio real.

El dominio de cálculo fue discretizado con elementos hexaédricos utilizando la herramienta **snappyHexMesh** provista por OpenFOAM®. Las superficies del elemento combustible, requeridas por **snappyHexMesh**, fueron generadas con la herramienta SALOME v7.2.0 ([SALOME Website](#)), una herramienta libre que incorpora módulos para la construcción de modelos CAD y motores de mallado en tres dimensiones. La geometría completa para un cuarto del elemento combustible fue discretizada con un total de 8.5 millones de elementos.

La simulación numérica de la geometría completa resulta costosa computacionalmente y no es en principio práctica para realizar diseño. Se simulaban entonces geometrías alternativas que permiten reducir el tiempo de cálculo y dan información sobre la sensibilidad de los resultados respecto a la geometría real. De esta forma, se trabajó sobre un elemento combustible con longitud menor a la real, considerando además dos variantes que se diferencian en la inclusión del plenum a la salida del combustible, como se muestra en las Figs. 3 y 4. En particular, ambos modelos son iguales hasta el extremo de las placas combustibles internas (misma boquilla, peine, ventana y longitud de placas internas). Sin embargo, el modelo de la Fig. 4 presenta una extensión de la placa combustible externa y laterales, e incluye un perno de sujeción. La longitud de esta sección, medida desde el extremo de las placas combustibles internas, es igual a la descripta en ([Elemento Combustible, Ensamble General](#)). De esta forma, se busca representar un elemento combustible con la misma boquilla, peine, ventana y plenum que el real, pero con placas combustibles de longitud reducida. Esto permite, en principio, una imposición natural de las condiciones de borde en la simulación numérica.

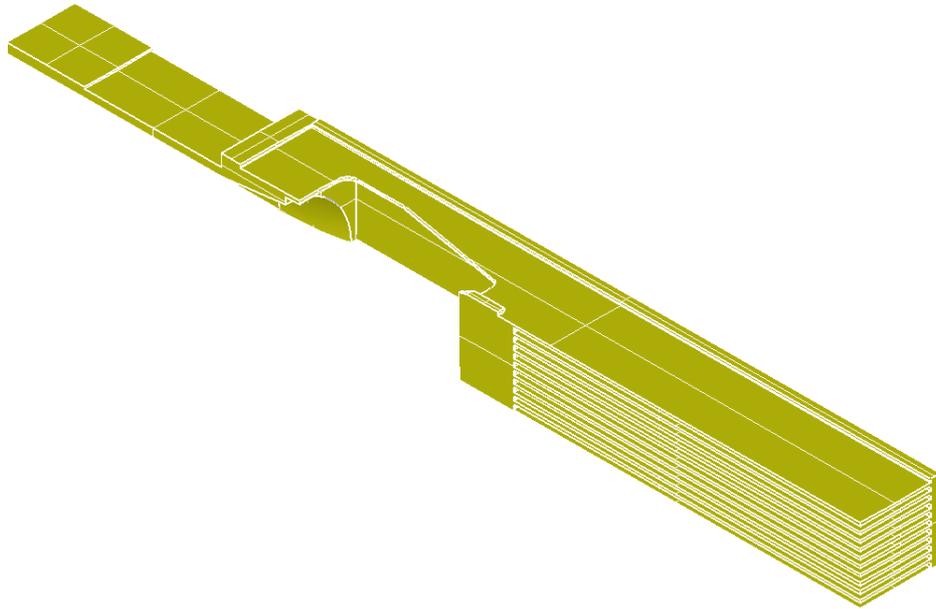


Figura 3: Modelo de elemento combustible con placas internas y externa de longitud reducida, sin plenum a la salida.

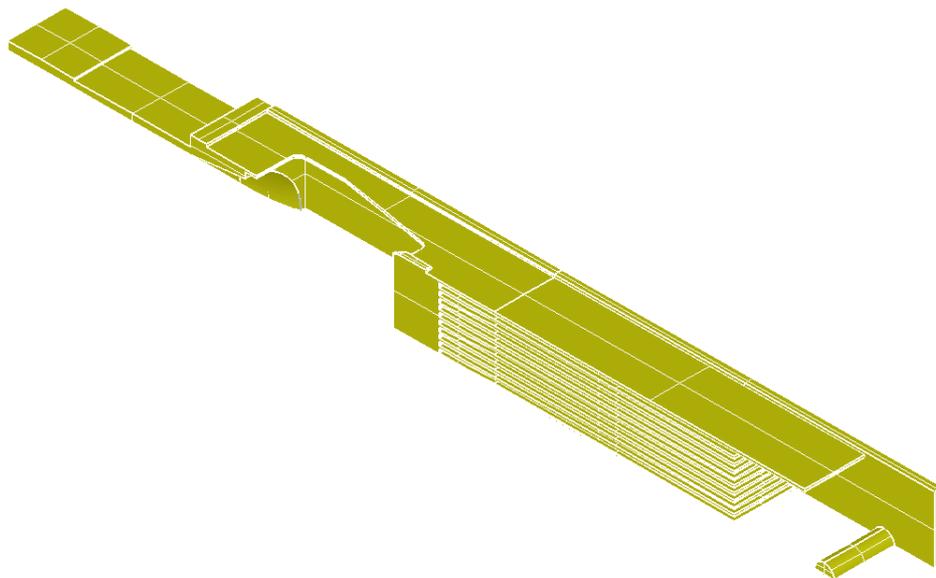


Figura 4: Modelo de elemento combustible con placas internas y externa de longitud reducida, con plenum a la salida.

## 2.4. Condiciones de contorno y opciones de la simulación en OpenFOAM®

Las condiciones de contorno usadas para las diferentes variables sobre la pared de la región de fluido se detallan en la Tabla 1, empleando la notación de OpenFOAM®.

Variable	Condición de contorno
U	fixedValue, value uniform (0 0 0)
p	zeroGradient
nuTilda	fixedValue, value uniform 0
nut	nutkWallFunction

Tabla 1: Condiciones de contorno sobre las paredes de la región de fluido.

En la totalidad de las simulaciones se impusieron valores de velocidad medios en el ingreso de la boquilla, junto con una condición de presión fija y uniforme a la salida del elemento combustible (en ambas configuraciones). Como fue mencionado previamente, se impuso condición de simetría en los planos de corte del combustible y en aquel que separa dos elementos combustibles adyacentes (por encima de la ventana de la placa externa). La resolución de las ecuaciones RANS se llevó a cabo empleando el modelo de turbulencia de Spalart-Allmaras, utilizando el esquema de discretización linearUpwind para los términos convectivos.

Las características principales del refrigerante empleadas en las simulaciones, fueron obtenidas de (REFPROP). La velocidad media de ingreso corresponde al caudal promedio por elemento combustible para condiciones nominales de operación, según las indicaciones de (Francioni y Doval, 2012).

## 2.5. Numeración de los canales entre placas combustibles

Con el fin de facilitar referencias futuras, se establece una numeración del 1 al 19 para las placas combustibles internas, de modo que se nombra Canal  $i$ -( $i+1$ ) al que separa las placas  $i$  e  $i+1$ , y Canal Externo al que separa elementos combustibles adyacentes. Como los modelos computacionales corresponden a 1/4 de combustible, se utilizarán los canales interiores a partir del Canal 10-11.

## 3. RESULTADOS

En esta sección se muestran resultados obtenidos de la solución de ecuaciones RANS para determinar la dinámica del fluido refrigerante a través de un elemento combustible. Las mismas fueron realizadas con el fin de estimar la distribución de caudal entre placas combustibles, obtener una distribución de presión sobre la placa externa, principalmente en la zona cercana a la ventana, y evaluar la sensibilidad de los resultados al utilizar distintos modelos computacionales. Es necesario destacar que todos los valores de velocidad mostrados en esta sección, se encuentran normalizados por la velocidad media de ingreso a la boquilla.

### 3.1. Modelo completo: distribución de caudales y presión sobre la placa externa

La simulación del elemento combustible completo con imposición del caudal total a la entrada (a través de una velocidad media) y presión uniforme a la salida, permite obtener valores de velocidad media por canal, magnitud que posibilita la estimación en forma directa el caudal entre placas. Este dato es de interés ya que es necesario, por ejemplo, para evaluar cantidades como flujo crítico de calor. En la Tabla 2 se muestran los valores de velocidad media normaliza-

da ( $\bar{V}$ ) en cada canal obtenidos en la simulación, junto con aquellos utilizados en la etapa básica de diseño del elemento combustible (ver por ejemplo (Gramajo y García, 2013)). Notar que en (Gramajo y García, 2013) se utiliza un caudal por elemento combustible aproximadamente un 10 % mayor al utilizado en este informe, mientras que se fija la velocidad media por canal según indicaciones de (Francioni y Doval, 2012).

Canal	$\bar{V}$	
	Con plenum	(Gramajo y García, 2013)
10-11	0.740	0.816
11-12	0.745	0.816
12-13	0.747	0.816
13-14	0.747	0.816
14-15	0.745	0.816
15-16	0.741	0.816
16-17	0.735	0.816
17-18	0.719	0.816
18-19	0.704	0.816
19-Externo	0.683	0.816
Externo	0.834	0.972

Tabla 2: Velocidad media normalizada por canal en un modelo de elemento combustible completo, y comparación con (Gramajo y García, 2013).

Puede observarse en la Tabla 2 que existe una distribución no homogénea de  $\bar{V}$  entre placas internas. Se observa, además, un incremento significativo del caudal en el canal externo, hecho que concuerda con las condiciones impuestas por (Gramajo y García, 2013).

En forma conjunta con el campo de velocidades del refrigerante, la resolución del problema involucró el cálculo del campo de presión en el fluido. Para este problema en particular, resulta de interés estudiar la distribución del campo de presión sobre la placa externa, en la zona cercana a la ventana, dado que esta zona presenta baja presión y podría dar lugar al fenómeno de cavitación (Gramajo y García, 2013). En la Fig. 5 se muestra la distribución de presión sobre la placa externa, en la zona cercana a la ventana. Los valores de presión mostrados están referenciados a una presión de salida de 0 Pa.

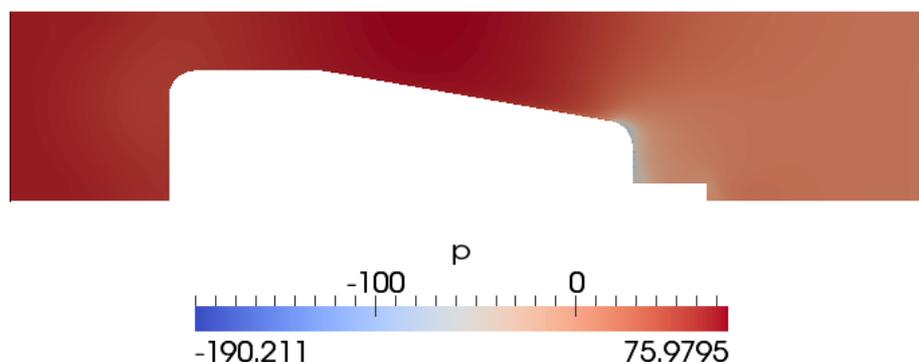


Figura 5: Presión sobre la placa externa, en la zona cercana a la ventana.

Adicionalmente, en la Fig. 6 se muestran valores de presión en planos perpendiculares al que contiene la ventana, de forma que puede apreciarse la distribución de presión a la salida de la ventana sobre secciones paralelas a la dirección principal del flujo. Como puede observarse en las Fig. 5 y 6, se tiene una caída significativa de presión sobre el borde de la ventana (en la cercanía del peine), aunque el valor mínimo calculado no se encuentra por debajo de la presión de vapor del refrigerante. Este fenómeno presenta un patrón similar al observado en (Gramajo y García, 2013).

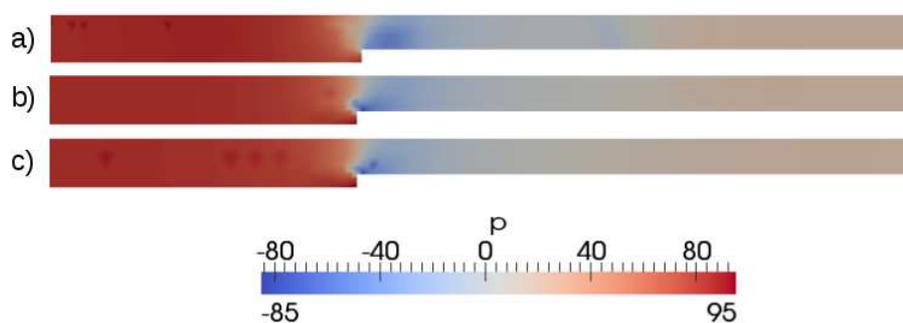


Figura 6: Campo de presión en una zona cercana a la ventana, tomada en planos ubicados a 3.5 (a), 6.8 (b) y 10 mm (c) del plano de simetría del modelo.

### 3.2. Influencia de la presencia del plenum en la distribución de caudal

La inclusión de un plenum en el extremo del dominio de cálculo, como en el elemento combustible de la Fig. 4, produce un cambio significativo en la condición de salida del flujo, lo que origina diferencias en los campos de velocidad y presión obtenidos para los modelos de las Figs. 3 y 4. En la Tabla 3 se incluyen las velocidades medias normalizadas, calculadas en los canales entre placas de ambos modelos, junto con la diferencia porcentual entre ambos casos. En ambos modelos se utilizan longitudes de placas reducidas (32 % de la longitud real).

Puede observarse que existen diferencias entre las velocidades medias calculadas para ambos modelos, resultando esta discrepancia significativa para el caso del canal exterior ( $\sim 10\%$ ). El origen principal de estas diferencias radica en el ya mencionado cambio de las condiciones de salida del flujo: si bien en el modelo sin plenum se impone un valor de presión uniforme e igual en todos los canales, la presencia del plenum (con presión uniforme en el extremo de salida del mismo) origina la pérdida de validez de la suposición anterior. Este hecho queda ejemplificado en la Fig. 7, en donde se muestran los valores de presión para diversos canales, muestreados en una línea ubicada en el centro de cada canal, sobre el plano de simetría. En este caso, el eje horizontal representa la posición respecto al extremo del peine.

Como se puede apreciar en la Fig. 7, la introducción del plenum produce dos efectos principales. Por un lado, existe una zona de fluido donde se produce el mezclado de los diferentes caudales refrigerantes, y en donde tiene lugar una recuperación de la presión. Por otro lado, la longitud de la placa externa es mayor que en el modelo sin plenum, de modo que se produce un aumento de la pérdida de carga en el canal exterior, con la consecuente reducción del caudal a través del mismo.

Canal	$\bar{V}$		
	Con plenum	Sin Plenum	$\Delta V$ (%)
10-11	0.764	0.745	2.4
11-12	0.767	0.752	1.8
12-13	0.768	0.749	2.6
13-14	0.774	0.748	3.6
14-15	0.765	0.747	2.4
15-16	0.755	0.743	1.6
16-17	0.748	0.732	2.2
17-18	0.726	0.714	1.6
18-19	0.695	0.694	0.1
19-Externo	0.662	0.682	-2.8
Externo	0.685	0.755	-9.6

Tabla 3: Velocidad media normalizada por canal, para los modelos con y sin plenum.

### 3.3. Influencia de la longitud del modelo en la distribución de caudal

La longitud del elemento combustible simulado presenta una influencia significativa en la distribución de caudal entre placas. Con el fin de cuantificar este efecto, se analizaron diferentes modelos de combustible, los cuales se diferencian en la longitud de las placas combustibles. En todos los casos, las dimensiones del plenum (desde el fin de las placas combustibles internas hasta el extremo de las placas laterales) se mantuvieron constantes.

En la Tabla 4 se muestran los valores de velocidad media normalizada calculados en el Canal Externo y en el 10-11, para el modelo con plenum, en función de la longitud de la placa externa ( $L_{PE}$ ). El caso con  $L_{PE} = 1$  corresponde a un modelo de elemento combustible con longitud igual a la real.

$L_{PE}$	$\bar{V}$	
	Canal Externo	Canal 10-11
0.32	0.618	0.732
0.44	0.685	0.764
0.56	0.738	0.754
0.68	0.765	0.750
1	0.834	0.740

Tabla 4: Velocidad media normalizada en los canales Externo y 10-11, en función de la longitud de la placa externa. Modelo con plenum.

En las Figs. 8 y 9 se muestran los valores de presión en el centro de los canales Externo y 10-11 respectivamente, para elementos combustibles de diferente longitud (notar que se han desplazado los valores de longitud de los combustibles de manera de que todos coincidan en el extremo de salida). En la Fig. 8 se observa, luego de una pérdida significativa generada en la zona de la ventana, una disminución lineal de la presión en el interior del canal externo, con una recuperación abrupta en la zona del plenum. En lo que respecta a la caída de presión en el canal, pueden distinguirse dos efectos principales. Por un lado, el incremento de presión en la zona del plenum es aproximadamente constante a medida que se incrementa la longitud del combustible. Por otro lado, la pérdida de presión por unidad de longitud en el canal externo se incrementa con

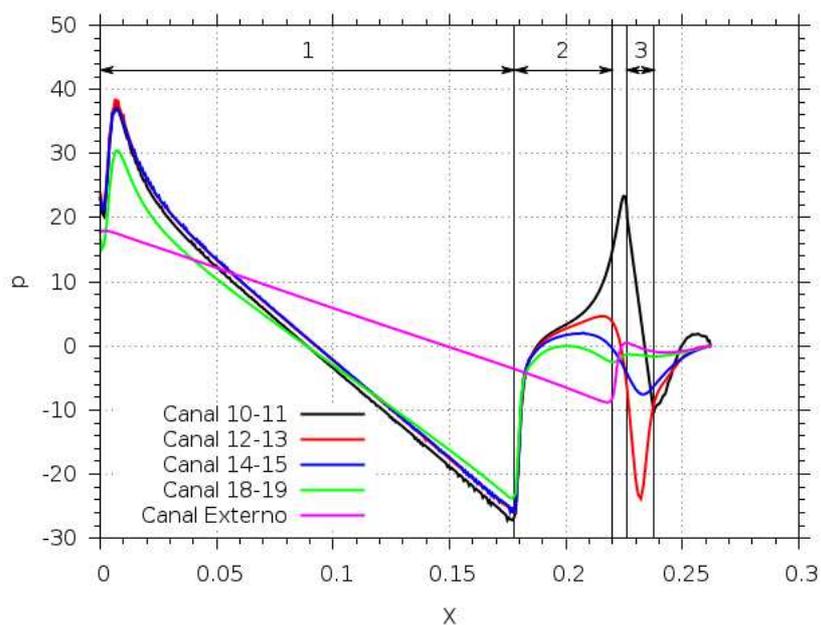


Figura 7: Presión sobre la línea media de diferentes canales refrigerantes. Zona 1: placas int. + placa ext. Zona 2: placa ext.. Zona 3: Perno de sujeción.

dicha longitud. Esto ocurre debido a que la pérdida de carga por unidad de longitud es inferior en el canal externo que en los canales internos (ver Fig. 8). Por lo tanto, al aumentar la longitud se reduce levemente el caudal de los internos y aumenta el correspondiente al canal externo. La disminución de caudal en los canales internos al incrementarse su longitud puede verse como una leve disminución de la pérdida de carga por unidad de longitud (ver Fig. 9).

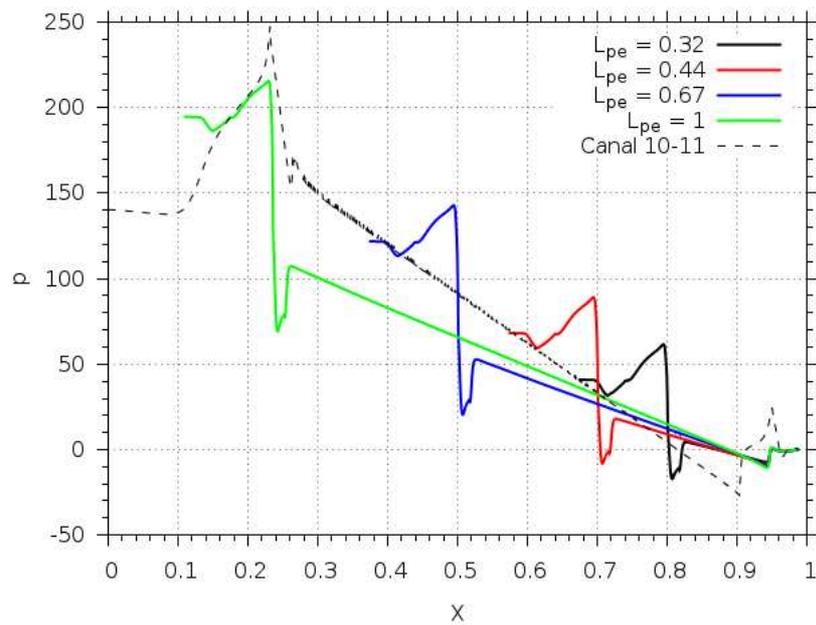


Figura 8: Presión sobre la línea media del Canal Externo, para combustibles de diferente longitud (las curvas se han desplazado en la abscisa para que coincidan a la salida del elemento combustible). Se incluye la presión en el Canal 10-11 para  $L_{PE} = 1$ , en líneas punteadas.

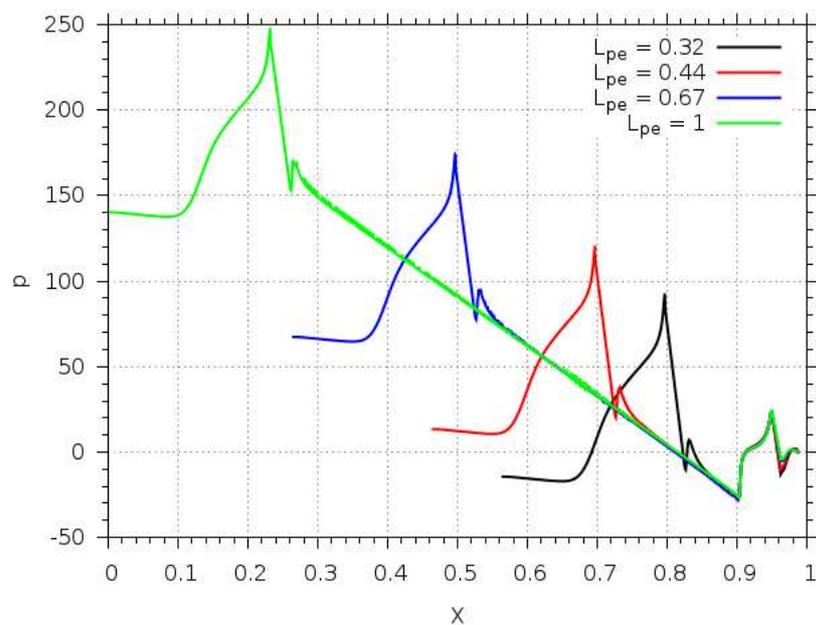


Figura 9: Presión sobre la línea media del Canal 10-11, para combustibles de diferente longitud (las curvas se han desplazado en la abscisa para que coincidan a la salida del elemento combustible).

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se llevó a cabo un análisis de la dinámica de fluido refrigerante a través de un elemento combustible de placas planas paralelas, empleando las herramientas OpenFOAM® para la generación de mallas y solución de ecuaciones diferenciales, y SALOME para la construcción de modelos CAD. En primer lugar, se obtuvieron campos de presión y velocidad para un elemento combustible completo en condiciones normales de refrigeración, empleando un modelo computacional con el mismo nivel de detalle que en el diseño real. Los resultados obtenidos fueron empleados para determinar valores medios de velocidad en los canales entre placas combustibles, y se realizó además un análisis del comportamiento de la presión en la cercanía de la ventana, ubicada en las placas combustibles externas. En este caso, se observó una marcada pérdida de presión local en la zona de unión con el peine que sostiene las placas combustibles, aunque el valor mínimo de presión no se encuentra por debajo de la presión de saturación del refrigerante.

Por otro lado, se analizó la sensibilidad de los resultados numéricos frente al uso de modelos computacionales reducidos, que involucran menor tiempo de cálculo. En particular, se estudiaron los efectos de la presencia de un plenum en el extremo de salida del elemento combustible, utilizando modelos de longitud menor que la real. En este caso, se observó que la presencia del plenum modifica la condición de presión a la salida de los canales refrigerantes, con lo que se produce un cambio significativo en la redistribución del caudal entre placas. Para los modelos analizados, se observaron diferencias cercanas a 10 % en el valor de caudal en el canal exterior (entre elementos combustibles adyacentes).

Finalmente, se cuantificó la influencia de la longitud del modelo computacional en la distribución del caudal de refrigeración entre placas. Se pudo observar que el caudal por el canal de refrigeración exterior se modifica significativamente con el cambio en la longitud del combustible, efecto que pudo atribuirse a una modificación en la pérdida de presión por unidad de longitud en dicho canal. Por lo tanto, en el caso que no sea posible utilizar un modelo computacional del combustible completo, es recomendable la imposición de velocidad en el extremo de salida de los canales refrigerantes.

#### REFERENCIAS

- Durbin P.A. y Reif B.A.P. *Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows, 2nd Ed.* Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-68931-8.
- Elemento Combustible, Ensamble General. *Archivo electrónico: 09DPL0-B-001-r1*, 2013.
- Fogliatto E.O. *Informe Anual de Beca*. Comisión Nacional de Energía Atómica, 2012.
- Francioni F. y Doval A. IT-INV/RA-10/0130-2-005. Informe Técnico, 2012.
- García J., Delmastro D., Chasseur A., Silin N., y Masson V. Modelado numérico de la transferencia de calor en los canales del núcleo de un reactor tipo MTR. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 27:1545–1554, 2008.
- Gramajo M. y García J. IT-44/RA-10/0110-2-001-0. Informe Técnico, 2013.
- Jasak H. *Turbulence Modeling for CFD. NUMAP-FOAM Summer School, Zagreb*, 2009.
- OpenFOAM Website. OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox. 2013.
- Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation, 1981.
- Pope S.B. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2001.
- REFPROP. NIST Standard Reference Database 23, Versión 8.0. 2013.
- SALOME Website. Salome, The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. 2013. URL <http://www.salome-platform.org>.