

MODELADO TERMOHIDRÁULICO DE LOS DISPOSITIVOS DE IRRADIACIÓN DE Mo E IR-M DEL REACTOR RA10

Gramajo, M.^a; García, J.^{a,b}; Marcel, C.P.^{a,b,c};

^a *Departamento de Termohidráulica, Centro Atómico Bariloche, CNEA, Avenida Bustillo 9500, San Carlos de Bariloche, Argentina,;* <http://www.cab.cnea.gov.ar/>

^b *Instituto Balseiro, Avenida Bustillo 9500, San Carlos de Bariloche, Argentina,;* <http://www.ib.edu.ar/>

^c *CONICET, Av. Rivadavia 1917, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina,* <http://www.conicet.gov.ar/>

Palabras clave: RA-10, CFD, Computational Fluid Mechanics.

Resumen.

El reactor RA-10 es un reactor de investigación multipropósito de piletta abierta, cuyo núcleo está constituido por elementos combustibles tipo *Material Test Reactor (MTR)* dispuestos en un arreglo rectangular. La potencia nominal de diseño es de 30 MW térmicos, la refrigeración se realiza a través de un caudal de flujo ascendente que circula a través del núcleo. El reflector del reactor consiste en un tanque estanco alrededor del núcleo lleno con agua pesada.

El diseño del reactor prevé diversas facilidades para usos industriales, medicinales y de investigación. Entre las facilidades más relevantes se encuentran las de producción de Molibdeno (Mo) por irradiación de mini-placas y la de irradiación de Iridio medicinal (Ir-m) por activación de alambres.

Durante la operación del reactor se prevé la extracción de los porta-blancos de los molibdenos y otras facilidades. Es por ello que se debe estudiar la pérdida de carga generada en los dispositivos de irradiación en operación normal y cuando éstos son retirados para evitar el fenómeno de *by-pass* excesivo. Se debe verificar también que los caudales de refrigeración sean los adecuados para mantener el sistema en condiciones de funcionamiento seguro.

Para realizar estos cálculos se utiliza el código CFD, FLUENT v14.0. Se modelan las geometrías con todos los detalles de diseño y se aplican a los modelos condiciones de borde y simetría adecuadas. Los resultados obtenidos permiten evaluar el diseño propuesto desde el punto de vista termo hidráulico.

1 INTRODUCTION

Una de las aplicaciones civiles más importantes de la fisión nuclear es el uso en los reactores de investigación o experimentales. Este tipo de instalaciones se utilizan principalmente para investigación, entrenamiento, irradiación de materiales y producción de radioisótopos medicinales e industriales. El interés de este tipo de reactores está en su capacidad de producir y utilizar la radiación proveniente del proceso de fisión nuclear para múltiples aplicaciones.

Uno de los propósitos de los reactores de investigación es proveer una fuente de neutrones para diversos fines. Los haces de neutrones resultantes pueden tener características muy diversas dependiendo de la utilización que se les dé a los mismos. Los reactores experimentales operan usualmente en condiciones de presión y temperatura muy inferiores a los de los reactores de potencia. Asimismo estos reactores utilizan una cantidad mucho menor de combustible, el cual típicamente tiene un enriquecimiento no mayor al 20 %.

1.1 Usos principales

Los haces de neutrones son particularmente útiles para estudiar la estructura y dinámica de los materiales. El *scattering* de neutrones se utiliza para examinar muestras bajo diferentes condiciones tales como variaciones de presión, a altas y bajas temperaturas, campos magnéticos, etc. Por otro lado, mediante el análisis por activación neutrónica se pueden identificar cantidades muy pequeñas de un elemento presente en una muestra.

Otra aplicación muy extendida es el uso de materiales emisores de radiación gamma para usos médicos. El isótopo más utilizado en medicina nuclear es el Tecnecio-99m que se genera por el decaimiento del Molibdeno-99. Este se produce al irradiar una hojuela de U-235 con neutrones durante una semana aproximadamente y luego se separa el Mo de los otros productos de fisión en las llamadas celdas calientes. El Mo representa aproximadamente el 6% de los productos de fisión resultantes.

Los reactores también se utilizan para fines industriales. La transmutación por dopaje neutrónico (NTD) cambia las propiedades del silicio, haciéndolo conductor de la electricidad. Para hacer esto se irradian grandes cristales de silicio en forma de lingotes. Una vez irradiados se cortan en delgadas láminas para ser utilizadas fundamentalmente como material semiconductor en la industria electrónica y de computación.

1.2 Descripción general del RA-10

El reactor RA-10 ([Informe Técnico IT-40/RA-10/0000-1-002](#)) es un reactor de investigación del tipo piletta abierta. El núcleo es un arreglo rectangular de elementos combustibles del tipo MTR con un enriquecimiento del orden del 20 %. La potencia de diseño es de 30 MW térmicos. Las placas absorbentes de neutrones para control y extinción del reactor son de *Hafnio* (*Hf*). Todas las placas absorbentes tienen la doble función de control y apagado.

El moderador a utilizar es agua liviana desmineralizada. El moderador también cumple la función de refrigerante y ocupa los canales ubicados entre placas combustibles permitiendo la moderación de los neutrones rápidos hasta llevarlos al rango térmico. El reflector de neutrones es en este caso agua pesada. Esta está contenida por un tanque reflector, rodeando la superficie lateral del núcleo y manteniendo una estricta estanqueidad, lo que quiere decir que no existe en ningún punto y bajo ninguna circunstancia contacto alguno entre el refrigerante y el reflector (ver [Figura 1](#)).

El tanque reflector es una estructura metálica cilíndrica de Zr-4. La superficie interior del tanque está en contacto con el agua pesada y la externa con el refrigerante. A lo largo de su eje central tiene un pasante de sección rectangular donde se ubica el núcleo. El tanque está atravesado verticalmente por tubos de diferentes dimensiones para alojar las distintas facilidades de irradiación. También alojará un contenedor para la fuente fría y en un plano medio horizontal se ubicarán 2 haces de neutrones fríos y 2 haces térmicos. Todos los haces se dispondrán tangenciales al núcleo.

El Primer Sistema de Extinción del Reactor llevará a cabo la acción de apagado rápido del reactor mediante la inserción de las placas absorbentes de Hafnio en el núcleo, aumentando la captura de neutrones. Cada barra de control es accionada desde abajo por un mecanismo neumático localizado en el cuarto de mecanismos. Las placas de control estarán conectadas con los mecanismos a través de varillas macizas de accionamiento las cuales penetrarán por la base de la Pileta de Reactor.

El Segundo Sistema de Extinción del Reactor tendrá como función principal el rápido apagado del reactor mediante el drenaje parcial de agua pesada desde el tanque reflector hacia el tanque de almacenamiento de D₂O. El drenado será por gravedad y se logrará por la apertura de un grupo de válvulas de actuación neumática. La disminución del nivel de agua pesada en el tanque reflector se traducirá en una disminución en la capacidad de reflejar neutrones lo cual dejará al núcleo en una condición de sub-criticidad y por lo tanto detendrá la reacción.

Las Facilidades de Irradiación exteriores al núcleo se ubican en el tanque reflector, su función es albergar los blancos/porta-blancos para las aplicaciones requeridas. Serán utilizadas con diferentes exigencias de flujo neutrónico y/o disipación de potencia térmica.

Un esquema con la disposición de las facilidades se muestra en la [Figura 1](#).

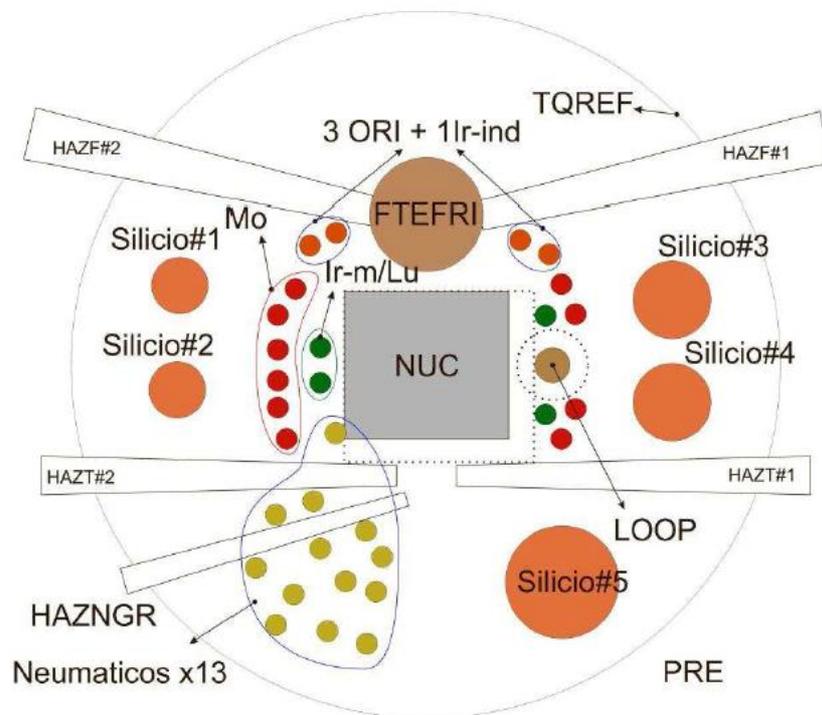


Figura 1: Disposición de las facilidades en el tanque reflector del reactor.

El objetivo a lograr en el diseño, es que todas las facilidades tengan una pérdida de carga de 70 kPa, para lograr una distribución uniforme de los caudales a través de las mismas.

1.3 Facilidades a estudiar

Molibdeno por fisión de mini-placas.

La función de este dispositivo es irradiar blancos de uranio enriquecido al 20 %. La geometría básica conceptual de este dispositivo se muestra en la [Figura 2](#). De la fisión del U-235 se obtendrá Mo-99 como producto y luego se separará mediante métodos químicos. Se irradiarán 8 mini-placas por dispositivo.

Se asumirán diez posiciones de irradiación aptas para los dispositivos de Mo, ubicándolos según ciertos criterios de prioridad que incluyen: perturbación a la criticidad, intensidad de flujo neutrónico, etc.

Mayor información acerca de los dispositivos para irradiación de Molibdeno se puede encontrar en el [Informe Técnico IT-47/RA-10/0430-2-003](#).

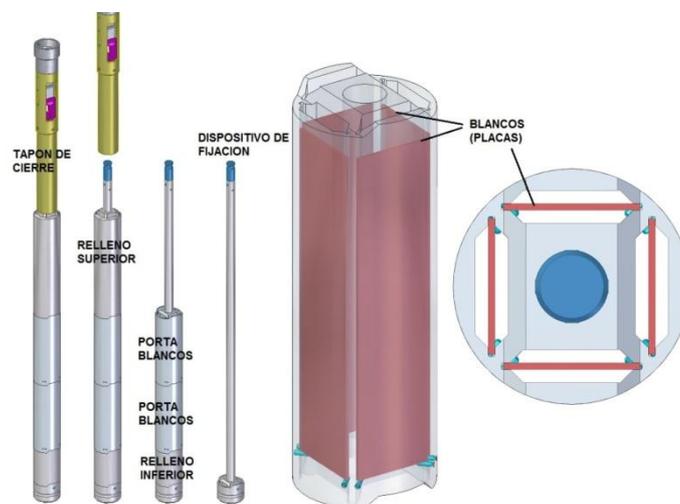


Figura 2: Dispositivo de irradiación de miniplacas para Mo. Se observan las placas junto con el portablancos.

Iridio medicinal por activación de alambres.

Se disponen 4 posiciones de irradiación en el tanque de reflector considerando el orden de ubicación según los mismos criterios asignados para el Mo. Un esquema básico de este dispositivo se muestra en la [Figura 3](#).

Mayor información acerca de los dispositivos para irradiación de Iridio medicinal se puede encontrar en el [Informe Técnico IT-47/RA-10/0430-2-002](#).



Figura 3: Dispositivo de irradiación de alambres de Iridio. Se observan los porta-alambres junto con el portablancos.

2 DESARROLLO

Se realizó un modelado CFD de las facilidades con la geometría tridimensional detallada de las mismas. El código utilizado es **FLUENT v14.0**. Para el modelado de las geometrías correspondientes se aprovecharon las simetrías que cada una de ellas presentaba. Para el estudio del Mo se modeló el dispositivo con una simetría 1/8 mientras que para el Iridio se utilizó simetría 1/2 en vez de 1/12. Esto se debe a que el diseño de este dispositivo incluye una terminación sobre la base del tanque de reflector que limita la simetría. Los modelos realizados incluyen como condiciones de borde los caudales de diseño, que se transforman en condiciones de borde de velocidad a la entrada, y como el objetivo es evaluar la pérdida de carga se utilizó como condición de borde a la salida el valor de presión, $p_{out}=0$.

Los modelos de turbulencia que se usaron fueron *k-ε realizable* para el Mo y *k-ω SST* con corrección para bajo Reynolds para el caso del Ir. Todas las variables se resolvieron utilizando un esquema *upwind* de segundo orden, considerándose convergidos los resultados cuando los residuos alcanzados se encontraban por debajo de 10^{-4} . En todos los casos se realizó un refinado de la malla según los gradientes de presiones y se verificó que el valor de *y-plus* se mantuviese entre 30 y 300.

3 RESULTADOS

3.1 Molibdeno

Para el Molibdeno se obtuvieron los resultados mostrados en la **Figura 4** entre los que se destacan los valores de pérdida de carga según los dos modelos de turbulencia utilizados. Se observa una diferencia de un 3,23 % entre los valores de pérdida de carga máxima, entre la entrada y la salida de los dispositivos, predicha por los cálculos con los dos modelos. Estos valores se verificarán durante el próximo año, mediante un experimento a escala real.

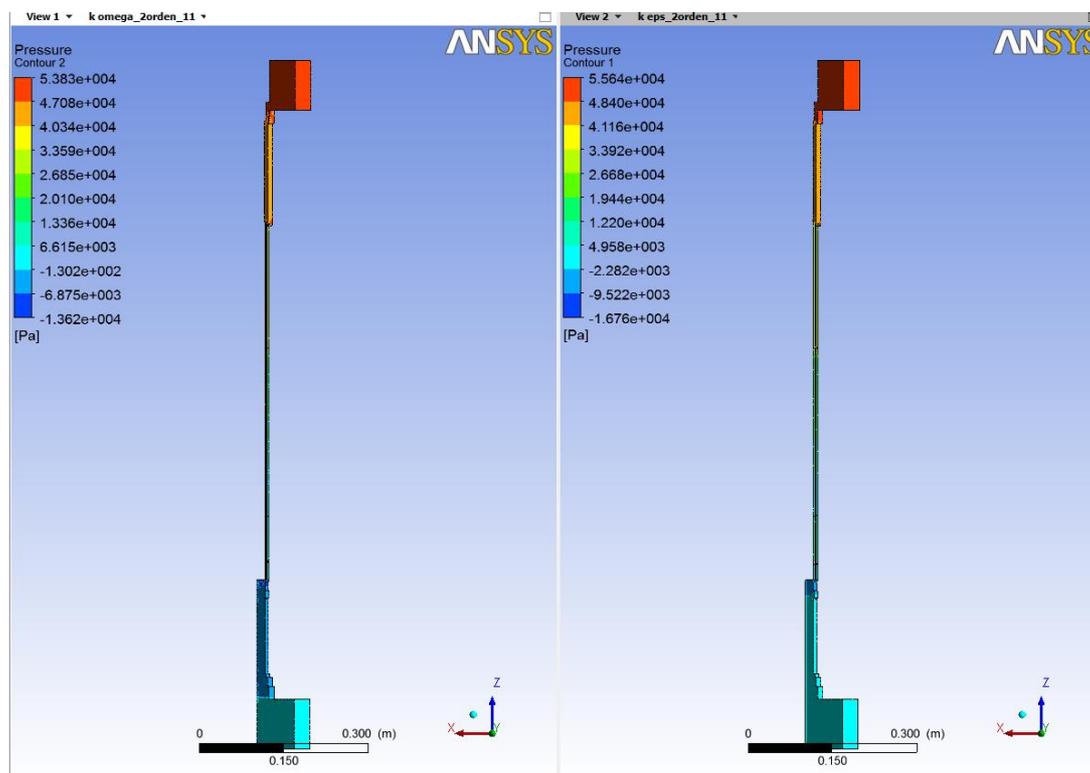


Figura 4: Pérdida de carga en los dispositivos de irradiación de Mo, para dos modelos de turbulencia utilizados. Se observa una diferencia menor al 3,5% entre los resultados de ambos modelos.

En la [Figura 5](#) se muestran las líneas de corriente del fluido coloreadas según la velocidad. Al observar estos resultados se pueden determinar las zonas donde el fluido presenta desviaciones o aumentos bruscos de la velocidad asociadas a altos gradientes de presión. Esto permite analizar la performance de la geometría propuesta pues uno de los requerimientos de diseño es que la mayor pérdida de carga se concentre en el restrictor inferior, lo que facilita la maniobra necesaria para retirar el componente.

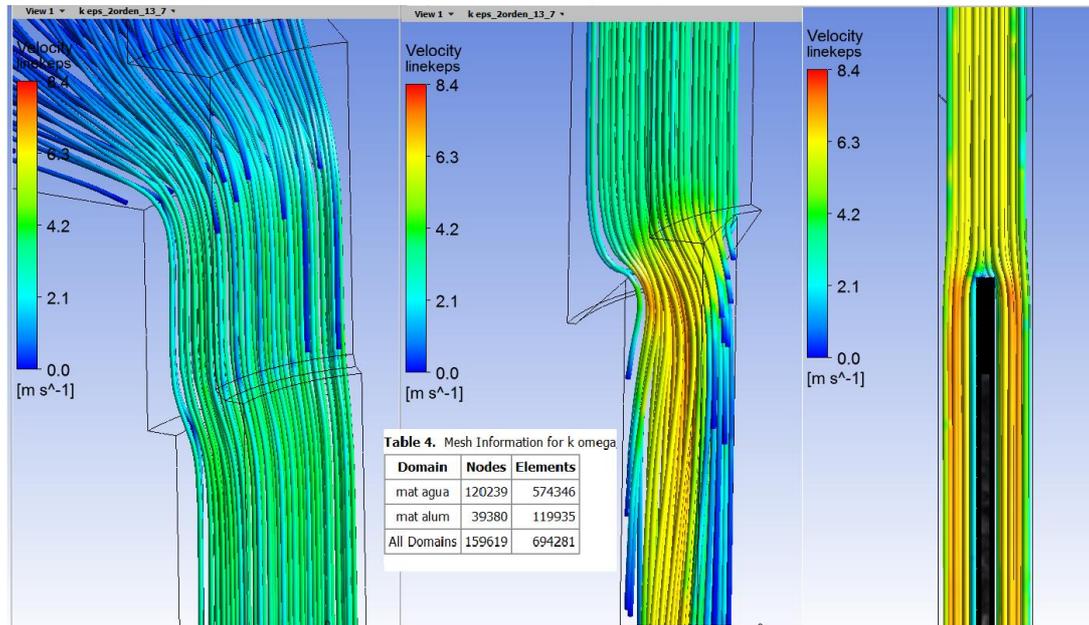


Figura 5: Se muestran las líneas de corriente para el dispositivo. Se puede observar como la velocidad aumenta en las zonas donde se presenta un estrechamiento y como es aproximadamente uniforme en las zonas de las placas.

Temperatura en las placas.

Desde muchos puntos de vista el dispositivo de irradiación de Mo es el más exigido dentro de todas las facilidades. Esto, como se mencionó en secciones anteriores, se debe principalmente a que se producirán fisiones en el interior de las placas, generando una gran cantidad de calor que debe ser evacuada. Esto incide directamente en el caudal que se debe hacer circular para refrigerar la misma.

Es de interés entonces determinar las temperaturas que se alcanzarán en las placas de aluminio. Para lograr este cometido se modeló un cuarto de las placas de aluminio utilizando condiciones de simetría adecuadas. Un esquema de la geometría que es empleada y las consideraciones de simetría utilizadas se muestra en la Figura 6. El modelo numérico incluye las placas de aluminio, el agua de refrigeración, pero no incluye el *meat* (uranio esparcido en una matriz metálica). Se utilizó como condición de flujo de calor una distribución uniforme para el mismo.

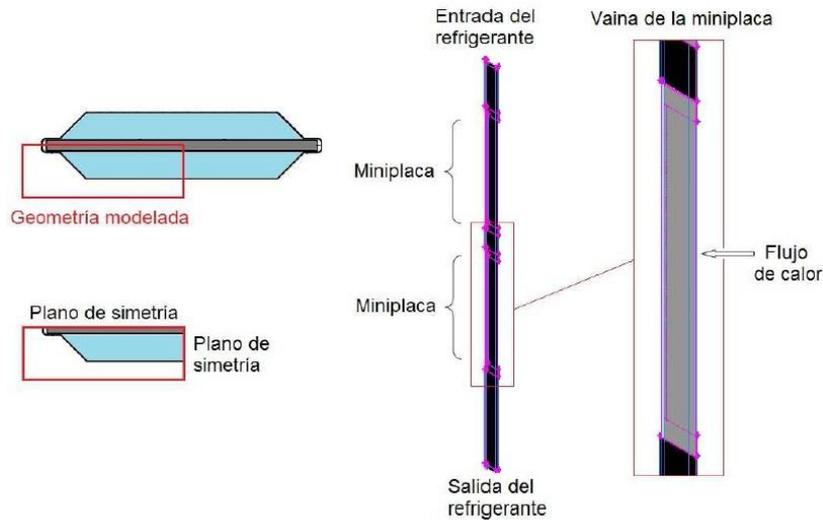


Figura 6: Se muestran las placas del dispositivo de Mo y la forma en que hizo uso de la simetría disponible. Se muestran además las condiciones de borde utilizadas.

Los modelos de turbulencia que se utilizaron corresponden a $k-\varepsilon$ *realizable* y con las funciones de pared utilizadas anteriormente. Los caudales para los que se calcularon los perfiles de temperatura corresponden a los caudales mínimos y máximos más algunos caudales intermedios. Con respecto a la simulaciones, para obtener los perfiles de temperatura se debe habilitar la ecuación de energía dentro de los modelos. Los resultados que se obtuvieron para la mini-placa más exigida se muestran en la [Figura 7](#).

Se puede observar que para el caudal mínimo aparecen en las zonas laterales de las placas temperaturas máximas de alrededor de 104 °C.

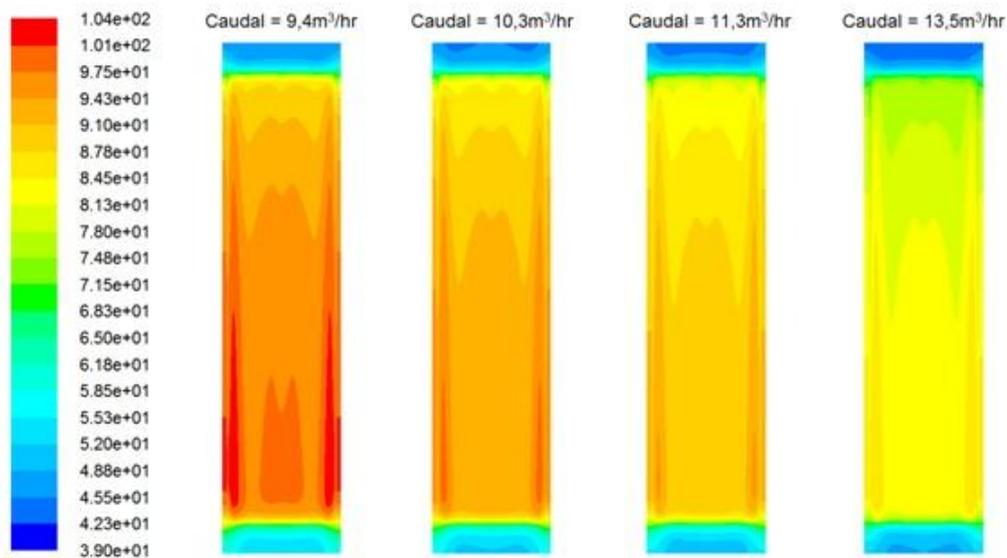


Figura 7: Perfiles de temperatura que se generan en la placa mas exigida.

3.2 Iridio medicinal

En el caso del dispositivo de irradiación de Iridio medicinal los resultados obtenidos para el modelo de turbulencia "k-omega SST, low Reynolds correction" se muestran en la [Figura 8](#). La elección de este modelo se debió al bajo caudal que presenta esta facilidad. La [Figura 9](#) muestra las líneas de corriente en las zonas más relevantes. Se pudo observar que las líneas de corriente debido a la circulación tanto por los canales de los alambres como por el huelgo lateral de la facilidad, pierden homogeneidad mezclándose.

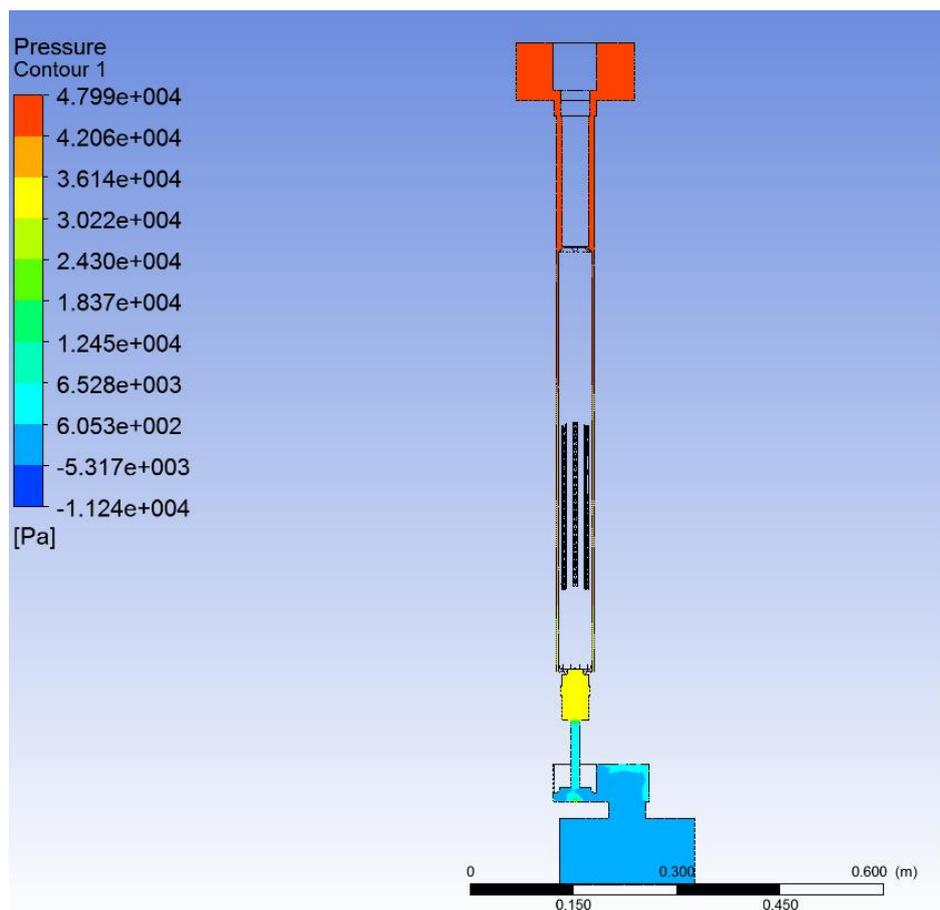


Figura 8: Pérdida de carga en el dispositivo de irradiación de Ir medicinal.

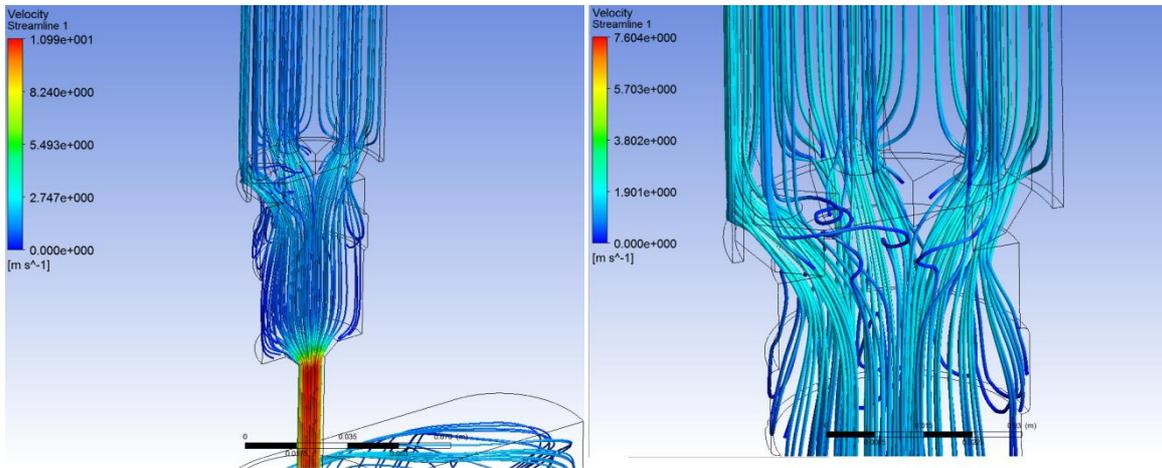


Figura 9: Líneas de corriente para la zona del restrictor del dispositivo. Se observa en color rojo el notable aumento de la velocidad en la zona inferior, dónde se concentra buena parte de la pérdida de carga, que responde a los criterios de diseño propuestos.

Temperatura en los alambres.

El modelado de la distribución de temperatura de los porta alambres se realiza habilitando la ecuación de energía que permite la resolución de los campos de temperatura. Se utilizaron los flujos de calor depositados en los porta alambres así como también el calor que resulta de la exposición de toda la facilidad al flujo neutrónico. Las condiciones de flujo se dispusieron como se muestra en la Figura 10.

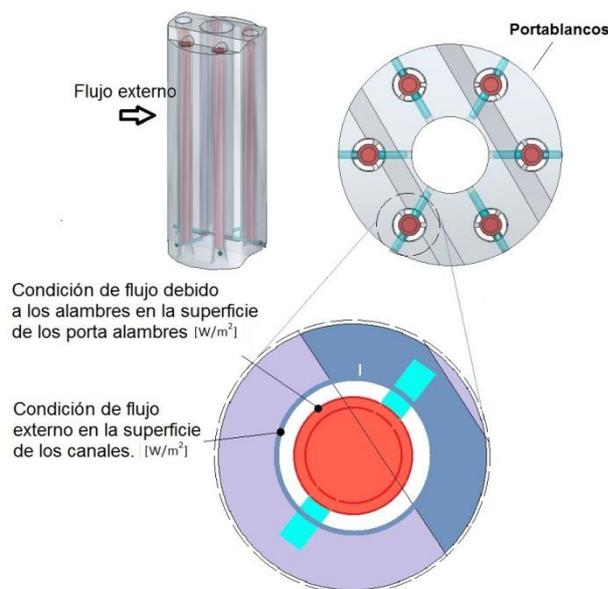


Figura 10: Se observa en al figura la disposición de los flujos de calor utilizados para la simulación.

El modelo numérico incluye los porta blancos, el agua de refrigeración y la geometría completa excepto los alambres propiamente dichos. Los flujos de calor se dispusieron de dos formas, el flujo externo a lo largo de los canales de refrigeración y el flujo debido a los alambres sobre los porta alambres. Todos los flujos se consideraron uniformes. Se considera también que la extracción de todo el calor generado en la facilidad se realiza únicamente mediante los canales de refrigeración. No se considera extracción de calor debido al agua que circula por el exterior. Los resultados que se obtuvieron se muestran en la [Figura 11](#).

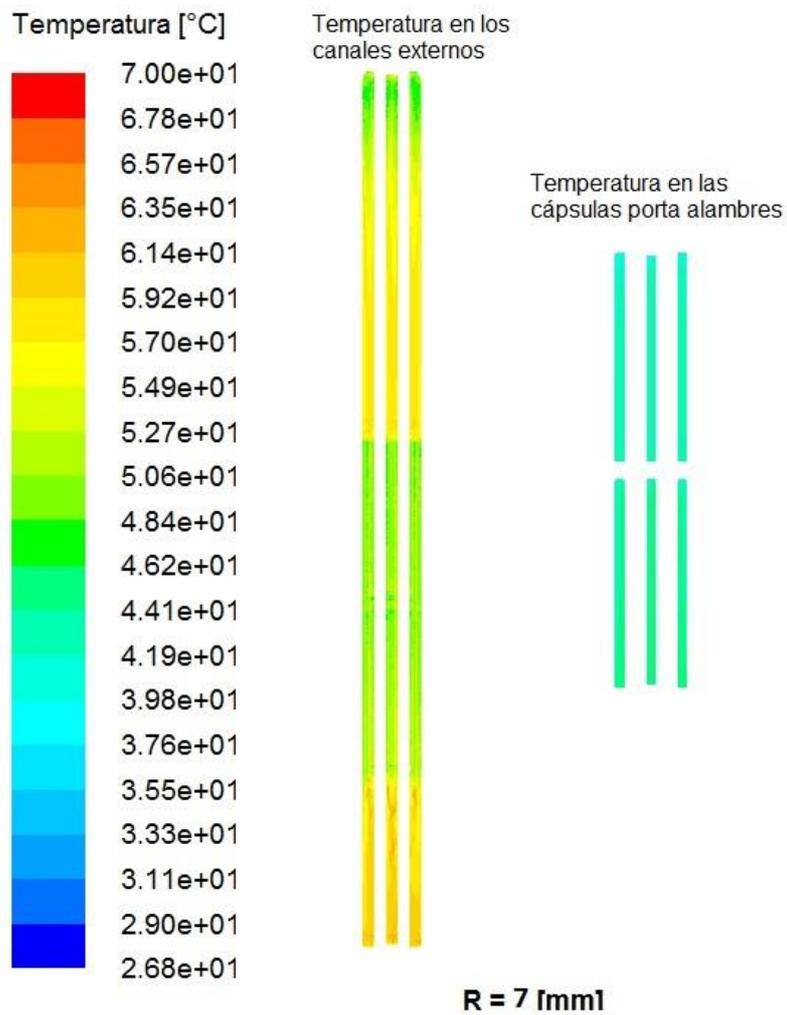


Figura 11: Perfiles de temperatura alcanzados en los canales de refrigeración y en los porta alambres.

4 CONCLUSIONES

Se pudieron modelar satisfactoriamente dos facilidades de irradiación externas al núcleo del reactor RA-10. Se tomaron los modelos geométricos detallados para realizar los mallados correspondientes y utilizando las condiciones de borde y simetría adecuadas. Los dos modelos de turbulencia empleados para el caso del Molibdeno, demostraron producir resultados similares para la malla propuesta. Para todos los casos se alcanzaron los criterios de convergencia propuestos. Los cálculos mostrados corresponden a valores de caudales mínimos y se observa que la caída de presión se encuentra por debajo de los 70 kPa. Desde el punto de vista del diseño, esto indica que para lograr una mayor pérdida sólo es necesario modificar el restrictor de caudal, verificándose entonces que el diseño propuesto es satisfactorio. En el caso del Iridio medicinal se encuentra que los valores de pérdida de carga para los caudales nominales y aún para caudales mayores previstos en el diseño, cumplen los valores de diseño estipulados.

5 REFERENCIAS

Informe Técnico IT-40/RA-10/0000-1-002, Descripción general del reactor RA-10.

Informe Técnico IT-47/RA-10/0430-2-003, Caracterización por cálculo del DEEN: RI Molibdeno por fisión en ciclo de equilibrio.

Informe Técnico IT-47/RA-10/0430-2-002, Caracterización por cálculo del DEEN: RI Iridio medicinal en ciclo de equilibrio.

ANSYS FLUENT User's Guide, Release 14.0, 2011.