

Transferencia simultánea de calor y cantidad de movimiento en el núcleo de un reactor rápido enfriado con sodio

Luis Ángel Larios-Ramírez, Alejandría D. Pérez-Valseca,
Alejandro Vázquez-Rodríguez y Gilberto Espinosa-Paredes

Universidad Autónoma Metropolitana

luis_1281094@hotmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de la transferencia de calor y cantidad de movimiento en el núcleo de un SFR. Se analizan dos casos, el Caso I es una aproximación utilizando la metodología de canal promedio, para obtener un canal representativo del núcleo, y el Caso II es tomar un arreglo de barras respetando la geometría del núcleo (hexagonal). Los modelos se acoplan en la herramienta computacional Comsol Multiphysics, y se resuelven en estado estacionario en 3D. Se presentan los perfiles de temperatura para las secciones del combustible, gap, encamisado y refrigerante, así como los campos de velocidad para el gap y el refrigerante y los perfiles de coeficiente de transferencia de calor dentro del gap, así como las temperaturas y velocidades promedio en las interfaces de cada sección. El valor promedio de temperatura del refrigerante para el Caso I es de 817.87 K y para el Caso II es de 816 K, ambos valores son muy cercanos al valor de diseño, el cual es de 818 K.

PALABRAS CLAVE

Reactor nuclear, transferencia de calor, cantidad de movimiento.

ABSTRACT

The objective of this work is to perform an analysis of the heat transfer and momentum in the core of an SFR. Two cases are analyzed, Case I is an approximation using the average channel methodology, to obtain a representative channel of the core, and Case II is to take a bar arrangement respecting the geometry of the core (hexagonal). Models are coupled into the Comsol Multiphysics computational tool, and solved in a 3D stationary state. Temperature profiles are presented for the fuel, gap, casing and coolant sections, as well as the velocity fields for the gap and coolant and the heat transfer coefficient profiles within the gap, as well as temperatures and average speeds at the interfaces of each section. The average coolant temperature value for Case I is 817.87 K and for Case II it is 816 K, both values are very close to the design value, which is 818 K.

KEYWORDS

Nuclear reactor, heat transfer, movement.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las actividades de investigación y desarrollo de los reactores nucleares incluyen muchos temas prioritarios, los cuales requieren ser estudiados para asegurar el buen funcionamiento y seguridad, así como mejoras de las tecnologías existentes y futuras. Dentro de estos temas se encuentra la termo hidráulica del reactor, la cual es de gran importancia en el diseño del reactor. Como consecuencia de la investigación en esta área, se han desarrollado diversos códigos que permiten simular los procesos termo hidráulicos del reactor, cada uno con sus propias características y limitaciones, algunos ejemplos son¹: el código TRIO-U, el cual es un código CFD en 3D desarrollado en Francia, cuya desventaja es el tiempo de computación, el código COBRA IV se usa ampliamente para PWR, su precisión computacional y convergencia han sido reconocidos por muchos investigadores, algunos investigadores han realizado cambios a este código para realizar cálculos en reactores rápidos enfriados con metales líquidos, SUPERENERGY II es un código de análisis de subcanal, utilizado en Estados Unidos y desarrollado por Pacific Northwest Laboratory², sin embargo, este código no modela los fenómenos físicos dentro de las barras de combustible y tiene limitaciones respecto a las configuraciones del mismo. La mayoría de los códigos han sido desarrollados para reactores térmicos, pero también han sido modificados para ser utilizados en reactores rápidos enfriados con metales líquidos.

Dentro del análisis termo hidráulico en los reactores enfriados con metales líquidos (LMFR, por sus siglas en inglés), se han presentado diversos análisis, el más utilizado es el que se basa en la metodología de canal promedio. En este análisis, la temperatura, presión y velocidad en un canal se promedian. Las distribuciones de flujo y temperatura en el núcleo se obtienen modelando y resolviendo los balances de masa, cantidad de movimiento y energía del canal promedio.³ De acuerdo con la literatura especializada, las aproximaciones de los modelos para describir los procesos de transferencia de calor en el combustible y refrigerante en el núcleo del reactor incluyen modelos reducidos, unidimensionales y análisis de dinámica de fluidos computacionales (CFD).

Actualmente, existen diversos códigos que simulan los procesos termo hidráulicos, basados en el análisis de canal promedio. Uno de los códigos termo hidráulicos más completos es el CATHARE 2⁴ utilizado por la Comisión de Energía Atómica de Francia, fue desarrollado originalmente para estudios de seguridad de reactores de agua a presión, pero ha sido recientemente ampliado a reactores enfriados por sodio.

SIM-SFR es un código utilizado por el Instituto Tecnológico de Karlsruhe (KIT), con el cual se realiza un análisis de transferencia de calor para una barra de combustible pico y para la barra promedio del núcleo resolviendo los modelos en forma paralela. Ha sido utilizado para modelar sistemas SFR como el Superphoenix⁵ y sistemas LFR como el ELSY⁶ y el LEADER⁷.

El código TRACE es el último de una serie de códigos de sistema de mejor estimación desarrollados por la Comisión Regulatoria Nuclear de los Estados Unidos. Este código permite analizar el comportamiento termo hidráulico-neutrónico de estado estacionario y transitorio en reactores de agua ligera, sin embargo, se ha modificado para aplicaciones en sistemas enfriados con metales

líquidos.⁸

El código MATRA-LMR, se desarrolló específicamente para el análisis LMFR, por el Instituto de Investigación en energía Atómica de Corea. MATRA es un código de análisis termo hidráulico, basado en el enfoque de subcanales para calcular la entalpía y la distribución de flujo en los elementos del ensamble de varillas de combustible nuclear, para el estado estacionario, así como estados transitorios.⁹

El objetivo de este trabajo es analizar la transferencia de calor y cantidad de movimiento en el núcleo de un reactor nuclear enfriado con sodio (SFR, por sus siglas en inglés) utilizado dos aproximaciones. En la primera aproximación se aplica la metodología de canal promedio, con la cual, se obtiene un canal que representa todo el núcleo, en este caso se estima la cantidad de fluido que se tiene por barra. La segunda aproximación es un arreglo representativo de la geometría del núcleo, en el cual se integran un arreglo de 4 barras de combustible y en el centro del arreglo fluye el fluido refrigerante. Dichos modelos se implementan dentro del software Comsol Multiphysics.

Al utilizar Comsol Multiphysics se puede tener un modelo matemático más preciso para los modelos de transferencia de calor y cantidad de movimiento dentro de cada sección de la barra de combustible, es decir, se tomaron en cuenta los fenómenos físicos que ocurren dentro de la barra de combustible que otros modelos no presentan, por ejemplo la convección natural dentro del gap y el flujo turbulento que se presenta en el fluido refrigerante o el cambio de la potencia de la barra en función de la longitud de la misma.

Se decidió utilizar este software ya que permite resolver ecuaciones diferenciales en una o tres dimensiones espaciales y en una dimensión temporal si así lo requiere la simulación numérica. Para la simulación de la barra se utilizaron diferentes módulos de transferencia de calor, los cuales acoplan la transferencia de calor no isotérmica para simular la convección natural en el gap y flujo turbulento en el fluido refrigerante, modelando también la transferencia de cantidad de movimiento.

CASOS MODELADOS

En esta sección, se presentan las dos aproximaciones utilizadas para el análisis (caos modelados). Como se mencionó, la primera es aplicando la metodología de canal promedio, estimando la cantidad de fluido que se tiene por barra. La segunda aproximación es un arreglo representativo de la geometría del núcleo, en el cual se integran un arreglo de 4 barras de combustible y en el centro del arreglo fluye el fluido refrigerante. Para la simulación se considera como referencia un SFR, cuyas características principales se presentan en la en la tabla I.

En ambos casos se toma en cuenta cada una de las secciones de la barra de combustible (combustible, gap y encamisado), así como el refrigerante. Las propiedades del helio y del sodio fueron tomadas de las funciones dadas en la librería de Comsol Multiphysics, y para el caso del combustible (MOX) se agregaron las propiedades en funciones de la temperatura de acuerdo al trabajo de Carbajo *et al.*¹¹

Tabla I. Características principales del SFR.¹⁰

Nombre	Valor	Unidad	Descripción
r_a	0.1257	cm	radio de anulo
r_f	0.4742	cm	radio de la barra de combustible
r_g	0.4893	cm	radio del gap
r_c	0.5419	cm	radio del encamisado
r_h	0.63095	cm	radio hidráulico
L_{pin}	1.00566	m	Longitud de pin activo
P	3600000000	W	Potencia del reactor
m_0	0.15477	kg/s	Flujo másico a la entrada del canal promedio
T_f	1500	K	Temperatura de diseño del combustible
T_c	743	K	Temperatura de diseño del encamisado
T_{ref}	818	K	Temperatura de diseño del refrigerante

Caso I. Canal Promedio

Partiendo de la metodología de canal promedio [3], se modela una barra de combustible considerando la sección de combustible, gas y encamisado, así como la estimación del refrigerante correspondiente a dicha barra, el cual se modela alrededor de la barra.

Para estimar el refrigerante correspondiente a la barra de combustible, se considera el refrigerante que pasa entre tres barras adyacentes, considerando el área rayada de la figura la como el área de flujo. Este flujo estimado es distribuido alrededor de la barra, teniendo una capa equivalente de la misma geometría que la barra. En la figura 1b, se muestra un corte transversal del canal promedio, en donde se observan cada una de las secciones, es importante señalar que la zona I (ánulo de la barra) no ha sido considerada en los modelos de este trabajo, debido a la complejidad de ejecución del modelo completo. la zona II corresponde al combustible y es donde se encuentra el término fuente, la zona III es la zona del gap, la cual contiene helio, esta zona se modela con convección libre. La zona IV corresponde al encamisado, en donde se modela conducción y por ultimo tenemos la zona V, donde se encuentra el refrigerante, la cual se modela con transferencia de calor y momento.

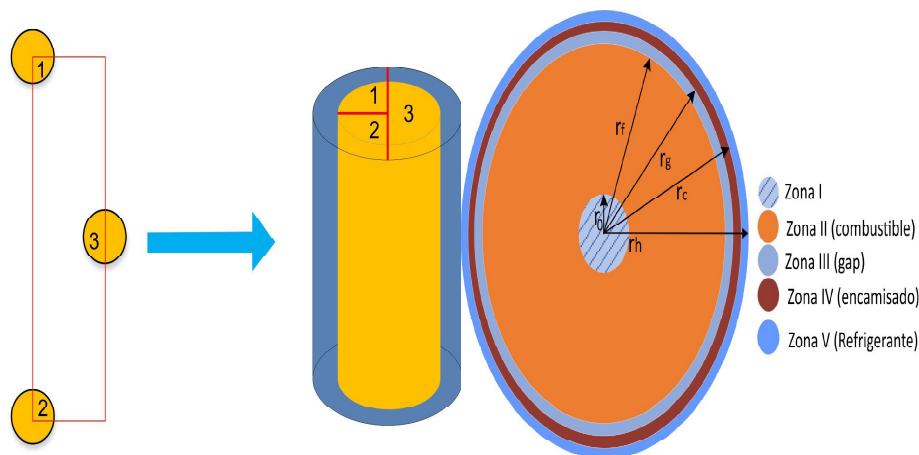


Fig. 1. a) Estimación del área de flujo; b) Corte transversal del canal promedio.

Caso II. Arreglo de Barras

En este caso, se considera un arreglo basado en la geometría del núcleo, en la cual se toma secciones equivalentes a cuatro barras, de forma que sumadas den una barra, y el flujo contenido entre ellas es el refrigerante equivalente a la barra. De esta forma se será posible comparar ambos casos, ya que se modela una barra y su refrigerante equivalente.

En la figura 2 se presenta el arreglo de barras de combustible modelado en Comsol Multiphysics. En este caso, de manera similar al Caso I, se modelan las secciones del combustible, gap y encamisado en la barra, pero el refrigerante mantiene la geometría real del sistema.

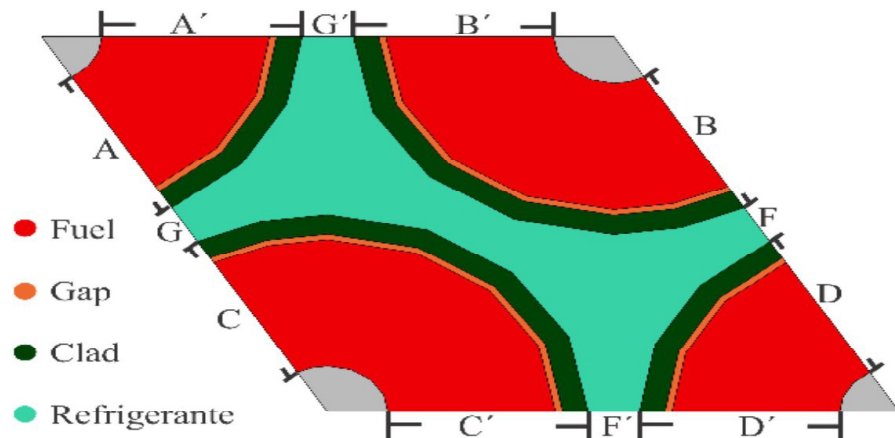


Fig. 2. Arreglo de 4 barras de combustible.

MODELACIÓN MATEMÁTICA

A continuación, se presentan los modelos matemáticos considerados para cada una de las secciones, indicando las ecuaciones que gobiernan de acuerdo al fenómeno predominante, así como las condiciones a la frontera correspondientes. Estos modelos se programaron en Comsol Multiphysics, recordando que el transporte de energía se lleva a cabo mediante diversos mecanismos: convección, conducción y radiación térmica¹² y que la transferencia de calor por convección natural sobre una superficie depende de la configuración geométrica, así como de su orientación.¹³

Para ambos casos, los modelos aplicados para cada sección son los mismos, incluyendo la sección del refrigerante. Las condiciones a la frontera entre el combustible y gap, el gap y encamisado, y encamisado y refrigerante también son las mismas, la principal diferencia radica en la geometría y en las condiciones a la frontera aplicadas en el arreglo de cuatro barras.

Modelo matemático para el combustible.

Para la mayoría de los problemas ingenieriles la ecuación de energía calorífica resulta conveniente para operar en transmisión de calor.² En la sección del combustible (sección II), la conducción es el principal fenómeno, el cual se describe a partir de la Ec. (1).

$$-k_f \nabla^2 T = \phi(z) \tag{1}$$

donde k_f [$W/m \cdot K$] es la conductividad térmica del combustible, T [K] es la temperatura del combustible y $P(z)$ [MW/m^3] es el término fuente de la barra de combustible, en este caso, el término fuente es una relación entre la potencia de la barra y el volumen del combustible, es decir, la potencia por unidad de volumen. En este caso, la potencia tiene una distribución axial, la cual está en función de la longitud de la barra, para este trabajo se utiliza la distribución promedio obtenida del trabajo de Aufiero.¹⁴ La función de distribución de potencia (figura 3) se implementó en Comsol mediante una función de interpolación. La principal condición a la frontera es continuidad del flux de calor entre el combustible y el gap:

$$n \cdot q_f'' = n \cdot q_g'' \tag{2}$$

En donde q'' [W/m^2] es el flux de calor, el subíndice corresponde al combustible y g corresponde al gap.

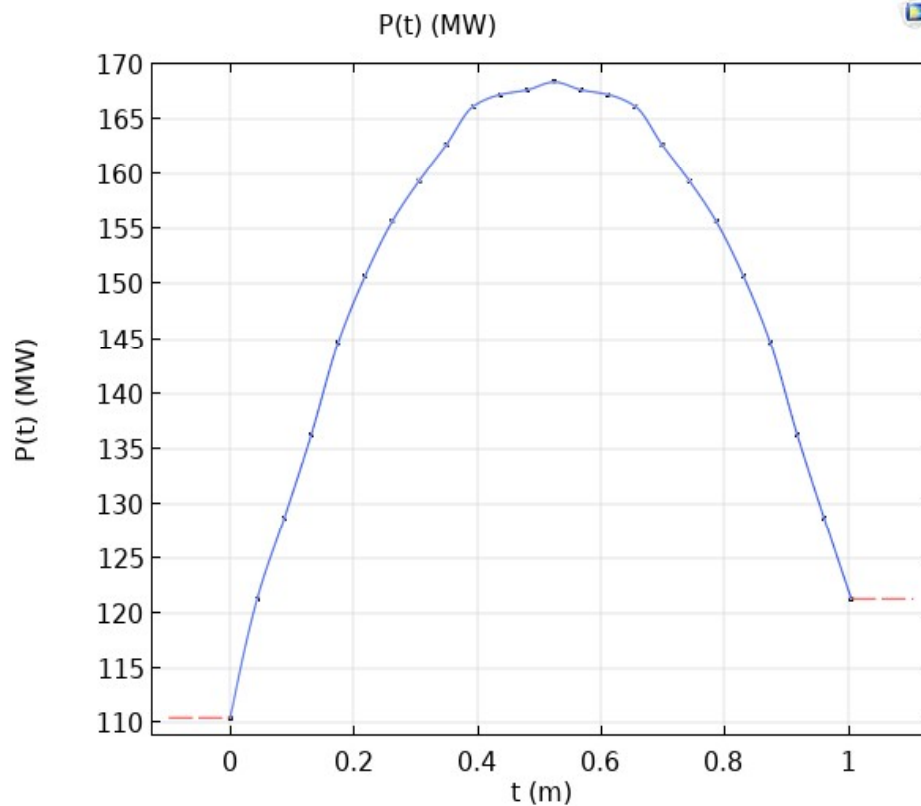


Fig. 3. Función de distribución de potencia axial.

Modelo matemático para el gap

El siguiente modelo presentado es el de la sección III (gap), la cual corresponde a la zona del helio. En esta sección se considera convección libre para flujo no isotérmico. La ecuación de transferencia de calor en estado estacionario con mecanismos de transporte de calor por conducción y convección está dada por:

$$\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T - k_H \nabla^2 T = 0 \tag{3}$$

En donde \mathbf{v} es el vector velocidad del helio, T [K] es la temperatura del helio, k_H [$W/m \cdot K$] es la conductividad térmica, ρ [kg/m^3] es la densidad y C_p es el calor específico [$J/kg \cdot K$] del helio.

La ecuación de balance de cantidad de movimiento, Ec. (4) considera estado estacionario y se desprecian los efectos convectivos, ya que se considera flujo laminar debido a que es un fenómeno de convección natural.

$$-\Delta P - \rho g + \mu \nabla^2 \mathbf{v} = 0 \quad (4)$$

donde ΔP [Pa/m] es la diferencia de presiones, g es la gravedad [m/s^2], μ [$Pa \cdot s$] es la viscosidad del helio.

Para este modelo, se aplica la aproximación de Boussinesq, la cual está dada por:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{v} = \Delta P - \rho g \beta (T - T_\infty) \quad (5)$$

donde β [$1/K$] es el coeficiente de expansión volumétrico, T es la temperatura de pared, y T_∞ es la temperatura del fluido.

Las condiciones a la frontera para cantidad de movimiento consideran que la velocidad es igual a cero en las paredes del gap y de encamisado (Ecs. 6-7).

$$\mathbf{v} = 0 \quad \text{en} \quad r = r_c \quad (6)$$

$$\mathbf{v} = 0 \quad \text{en} \quad r = r_g \quad (7)$$

Las condiciones a la frontera para transferencia de calor consideran la ley de enfriamiento de Newton en ambas paredes del gap:

$$q''_f = h(T_f - T_\infty) \quad (8)$$

$$q''_g = h(T_c - T_\infty) \quad (9)$$

donde h [$W/m^2 \cdot K$] es el coeficiente de transferencia de calor, el cual es calculado directamente por Comsol a partir del número de Grashoff.

Modelo matemático para el encamisado

El encamisado es el revestimiento de la barra de combustible, el cual es un metal, por esta razón se considera la conducción como principal mecanismo de transferencia de calor, entonces, para esta región se aplica la Ec. (1), y la condición a la frontera es la continuidad de flux entre el gap y el encamisado, la cual tiene una forma similar a la Ec. (2).

Modelo matemático para el refrigerante

Dentro del refrigerante, ocurren dos fenómenos físicos principales: la transferencia de calor y la transferencia de cantidad de movimiento. La Ec. (10) representa el balance de cantidad de movimiento para el metal líquido, y en el caso de la transferencia de calor se considera la Ec. (3), ya que se están considerando los efectos convectivos y conductivos.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla \cdot (P \mathbf{I}) + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (10)$$

Para el modelo de cantidad de movimiento, las condiciones a la frontera están dadas por

$$m = m_0 \quad \text{en } z = 0 \quad (11)$$

$$P = P_{atm} \quad \text{en } z = L_{pin} \quad (12)$$

La Ec. (11) indica que se conoce el flujo másico de refrigerante a la entrada en $[\text{kg/s}]$, y la Ec. (12) indica que la presión a la salida de la barra es igual a la presión atmosférica.

Las condiciones de frontera para la transferencia de calor son:

$$q''_{ref} = h(T - T_\infty) \quad (13)$$

$$T_{in} = 668.15\text{K} \quad \text{en } z = 0 \quad (14)$$

$$q''_{ref} = 0 \quad \text{en } z = L_{pin} \quad (15)$$

La Ec. (13) es ley de enfriamiento de Newton, que relaciona la temperatura del refrigerante con la temperatura de pared (encamisado), la Ec. (14) es el valor de la temperatura del refrigerante a la entrada del canal y la Ec. (15) indica que el flux de calor a la salida del canal es nulo.

Las condiciones a la frontera para transferencia de calor y cantidad de movimiento en el refrigerante del Caso I aplican también para el Caso II, además, para éste último se considera el flujo periódico, lo cual fue posible debido a la geometría.

Condiciones a la frontera adicionales del Caso II

Como se mencionó, en los ambos casos existen similitudes en los modelos aplicados, es decir ambos comparten una barra de combustible con los diferentes elementos que la componen, por esta razón los modelos para las secciones del combustible, gap y encamisado son las mismas.

La diferencia entre ambos casos radica en la geometría, por lo que el arreglo de cuatro barras (Caso II) requiere que se añadan las siguientes condiciones a la frontera para la transferencia de calor.

Se considera simetría axial, radial y azimutal en la frontera geométrica externa del combustible, gap y encamisado, la Ec. (16) describe dicha condición a la frontera, donde \mathbf{n} es el vector normal a la superficie y las superficies $A, B, C, D, A', B', C', D'$ son las fronteras geométricas (figura 2), en este caso A es simétrico con A', B con B', C con C' y D con D' .

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_f'' = 0 \quad (16)$$

Dentro del modelo de cantidad de movimiento, se añade la condición a la frontera llamada condición de flujo periódico, aplicada a las superficies F, G, F', G' (ver figura 2), donde F es periódica con F' y G con G' .

$$\mathbf{v}_0 = \mathbf{v}_i, P_0 = P_i, K_0 = K_i, \varepsilon_0 = \varepsilon_i \quad (17)$$

donde V [m/s] es la velocidad, P [Pa] es la presión, K [J] es la energía cinética y ε [J] es la cantidad de energía cinética disipada.

EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

En esta sección se presentan los experimentos numéricos realizados en donde se resuelven los modelos para cada caso. Las geometrías se modelaron en Comsol Multiphysics, implementando los modelos y condiciones a la frontera descritos en la sección anterior. De esta forma es posible resolver las ecuaciones en tres dimensiones, obteniendo los perfiles de temperatura, perfiles de velocidad, perfiles de coeficiente de transferencia de calor en el gap y temperaturas promedio en cada sección de la barra de combustible.

Caso I

En la figura 4, se presenta el perfil axial de temperatura del combustible, como se observa en la gráfica, la temperatura mantiene una forma similar al perfil axial de potencia (figura 3) obteniendo una temperatura máxima de 1520 K aproximadamente en la longitud central de la barra. La temperatura promedio del combustible es de 1457.3 K.

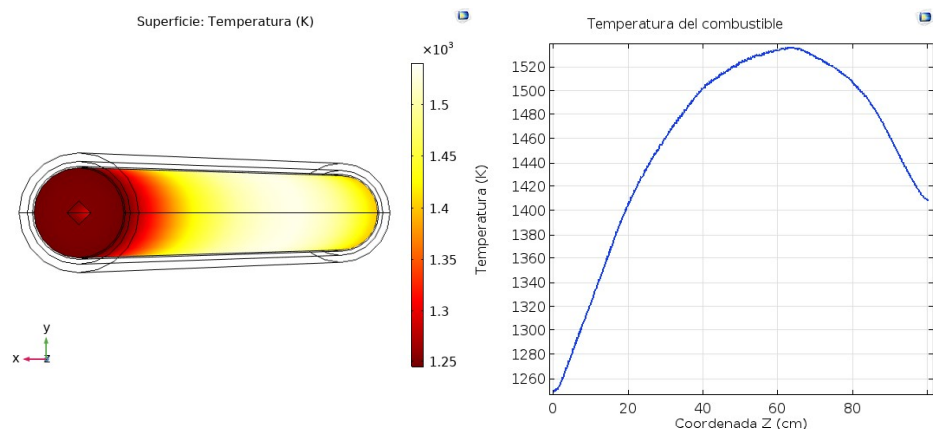


Fig. 4. Perfil axial de temperatura en el combustible.

El perfil de temperatura del gap se muestra en la figura 5, como se mencionó se consideró convección libre, además, la transferencia de calor depende principalmente de la velocidad del fluido y esta a su vez depende de la flotabilidad o fuerza de empuje. La mayor temperatura es de 1200 K, de la misma forma que en el combustible, se obtiene en el centro de la longitud de la barra. La temperatura promedio de esta sección es de 1130.8 K. Comparando la temperatura del combustible y del gap, se tiene una diferencia de 300 K. El valor máximo del coeficiente de transferencia de calor para esta sección es de 31 W/m²*K.

Para la sección del encamisado, en la figura 6 se presenta el perfil de temperatura, valor máximo de temperatura es de 840 K y se presenta en la parte más alta de la barra de combustible, en esta sección aún se percibe la influencia de la distribución de potencia axial en la temperatura. El valor promedio de la temperatura en esta sección es de 756.71 K.

Para el caso del refrigerante, se presentan los perfiles de velocidad y de temperatura. En la figura 7 se observa el perfil axial de velocidad, así como cortes transversales de la velocidad en diferentes longitudes de la barra, el fluido que está en contacto con el encamisado tiene la menor velocidad, y conforme se aleja del contacto la velocidad aumenta, teniendo un valor máximo de 14 m/s.

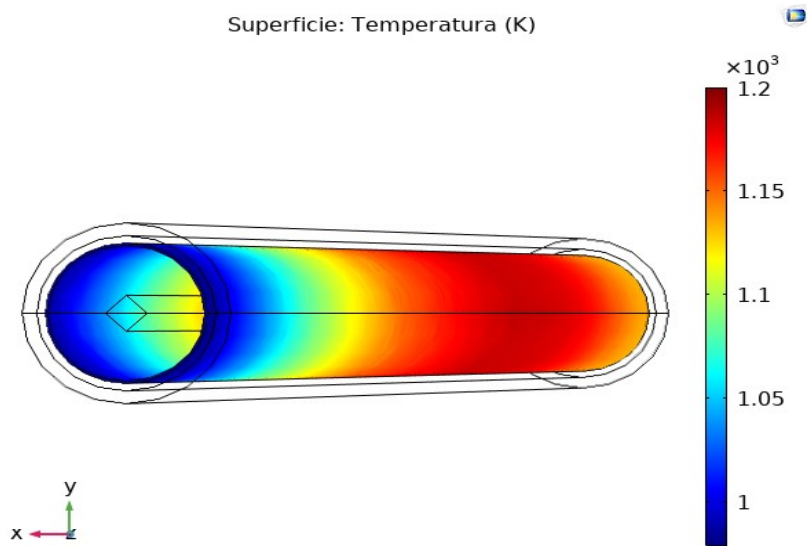


Fig. 5. Perfil axial de temperatura en el gap.

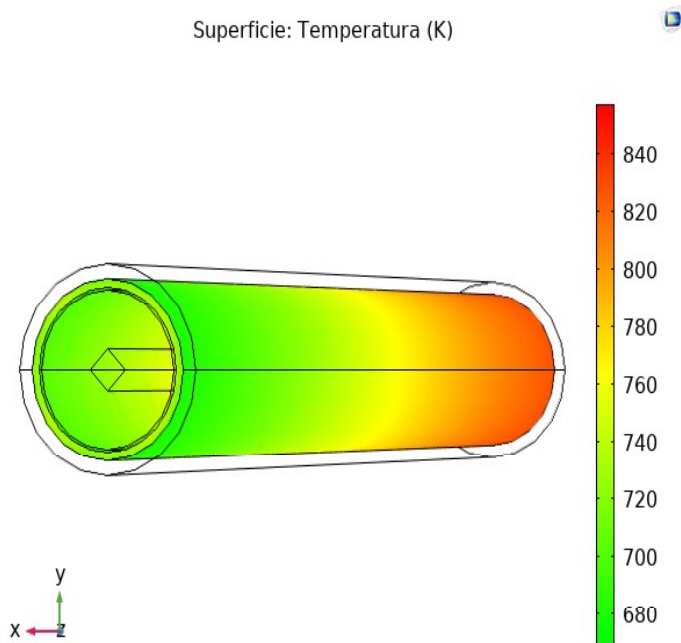


Fig. 6. Perfil de Temperatura en el encamisado.

Para calcular el número de Reynolds se utiliza la velocidad promedio, la cual es de 10.14 m/s.

Para resolver el modelo de transferencia de calor, se considera que el coeficiente convectivo tiene un valor de $149,800 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, el cual fue calculado a partir del número de Reynolds, Nusselt y Prandtl. Como se observa en la figura 7, el perfil de temperatura es ascendente en toda la barra, es decir, la temperatura a la salida de la barra es la más alta, con un valor de 817.8 K, en esta sección ya no se observa la influencia del perfil axial de potencia. Entre el encamisado y el refrigerante se observa una diferencia aproximada de 20 K.

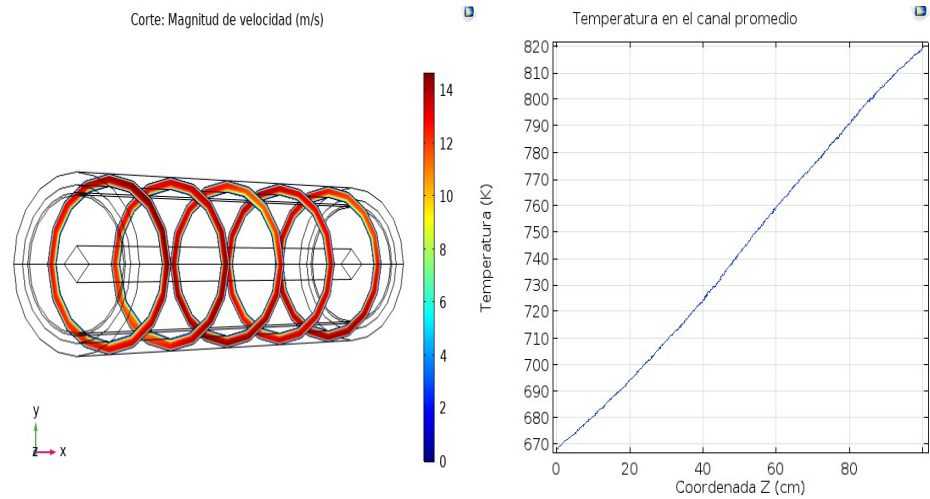


Fig. 7. Perfil de velocidad y temperatura de sodio.

Caso II

En el arreglo de cuatro barras, se tomó una sección de un ensamble del combustible, respetando la distribución de las barras y la geometría del núcleo. Como se observa en la figura 2, se tienen dos fracciones de la barra, equivalentes cada una a $2/6$ de una barra y dos más a $1/6$, las cuales, sumadas dan el equivalente a tener una barra.

En la figura 8, se presentan los perfiles la temperatura del combustible en función de la longitud, la gráfica de la izquierda corresponde a $2/6$ de la barra y la de la derecha a $1/6$. En ambos casos es posible observar que el perfil de temperatura tiene la misma forma que el perfil axial de potencia (figura 3). El valor máximo de temperatura para $2/6$ de barra es 1320 K y para $1/6$ de barra es de 1070 K, en promedio se obtiene un valor de 1195 K.

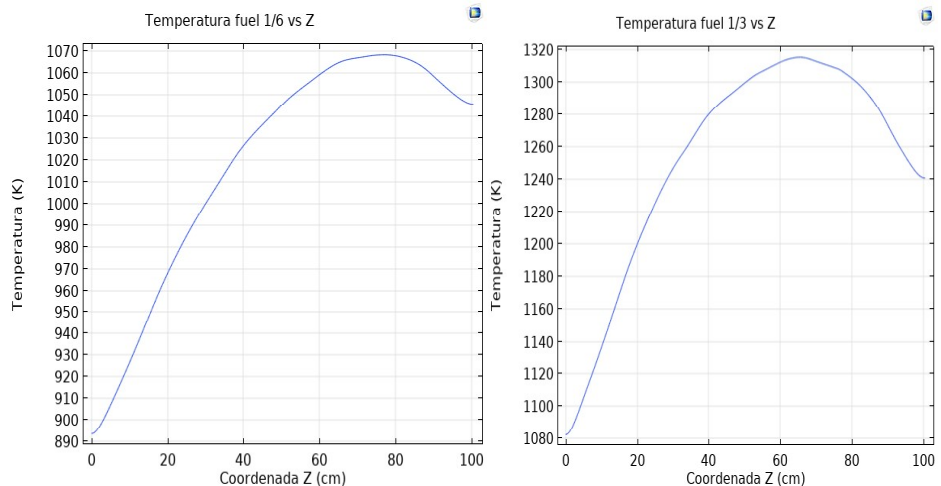


Fig. 8. Perfil axial de temperatura del combustible.

En el caso del gap, se obtuvieron los perfiles de temperatura, cantidad de movimiento y del coeficiente de transferencia de calor. En la figura 9 se presentan los perfiles de temperatura, el valor promedio de la barra de $2/6$ es de 1018.6 K y 890.17 K para $1/6$ de barra.

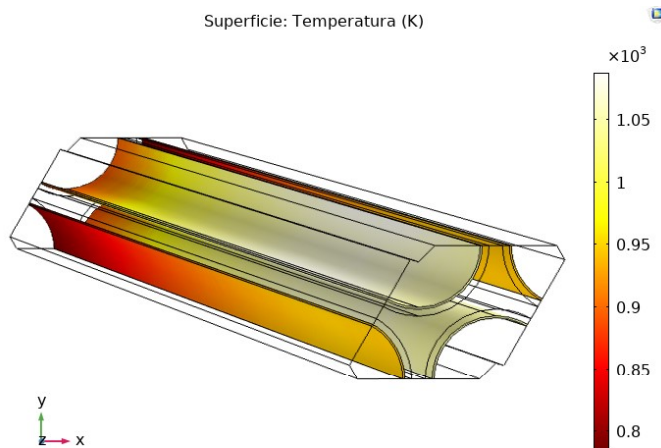


Fig. 9. Perfil de temperatura en el gap.

En la figura 10 (lado izquierdo) se presenta el perfil radial de la velocidad del helio, cuyo valor promedio es 9.75×10^{-7} m/s, al tener la velocidad es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor, el cual se presenta en el lado derecho de la figura 10. El valor máximo obtenido es de $28.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, el cual es un valor cercano al obtenido al valor calculado en el Caso I.

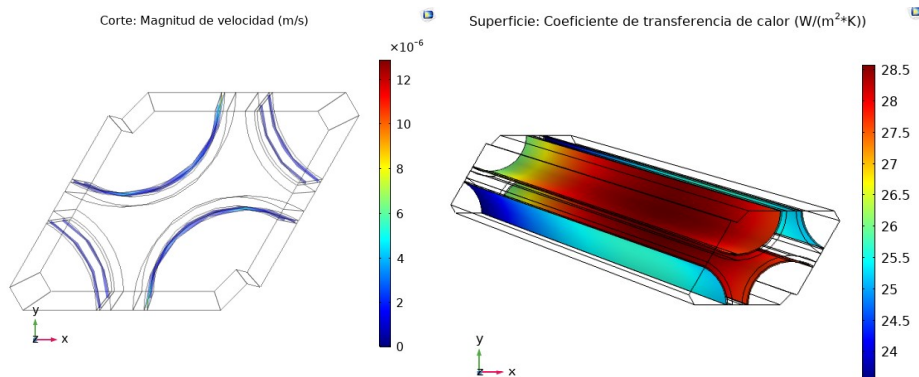


Fig. 10. Perfil radial de velocidad en el gap y de coeficiente de transferencia de calor.

Para el caso del encamisado, en la figura 11 se muestran los perfiles de temperatura para ambos segmentos de la barra, como se observa la mayor temperatura (840 K) se obtiene para $2/6$ de la barra y para $1/6$ es de 830 K, en promedio la temperatura máxima es de 835 K.

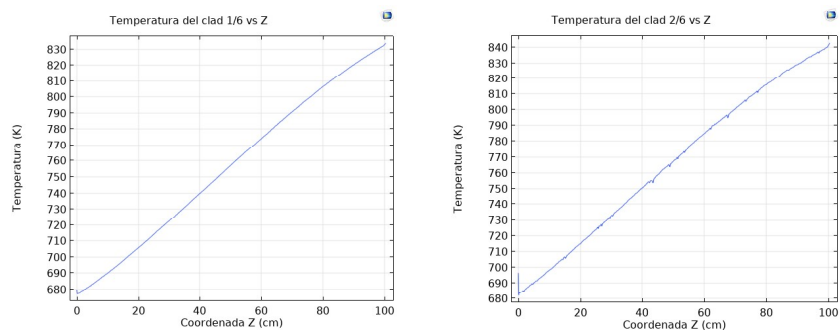


Fig. 11. Perfil de temperatura en el encamisado.

Para el análisis del refrigerante se presentan perfiles de velocidad y de temperatura. El perfil de velocidad se presenta en la figura 12 (izquierda), como se mencionó, este se obtuvo a partir de un modelo en flujo turbulento $\kappa\epsilon$. En el perfil radial se puede observar que los valores menores de velocidad se encuentran cerca de la pared y conforme nos acercamos al centro el perfil crece alcanzado la velocidad máxima, la cual es de 5.5 m/s. El valor promedio es de 5.155 m/s.

A partir de la velocidad promedio se obtuvo el número de Reynolds, y con el número de Prandtl y Nusselt se obtuvo el coeficiente de transferencia de calor, el cual tiene un valor de 179780 W/m²*K.

El perfil de temperatura del refrigerante se presenta en la figura 12 (derecha), la temperatura más alta se obtiene a la salida del canal, la cual es de 820 K, este valor es cercano a la temperatura de diseño del reactor ya que el valor reportado es de 818.15 K.

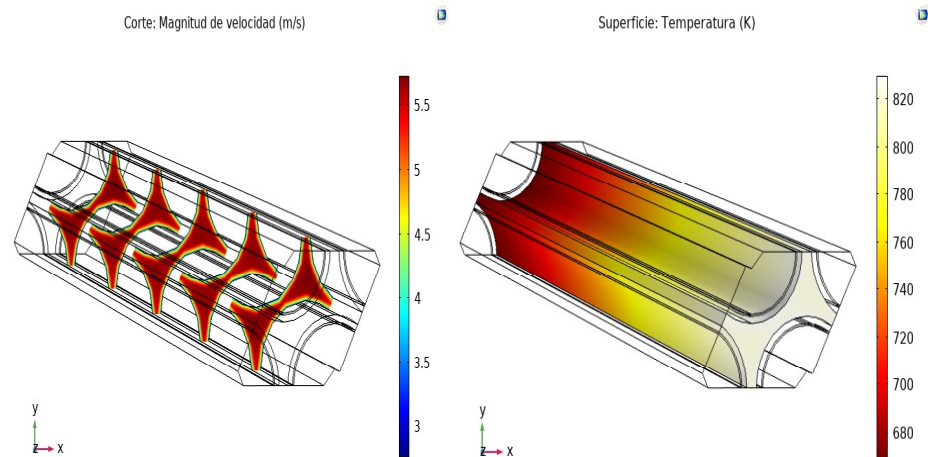


Fig. 12. Perfil radial de velocidad y temperatura de sodio.

CONCLUSIONES

El propósito de este trabajo fue incursionar en el modelado matemático del termo fluido y combustible para reactores de IV generación. Se utilizaron dos aproximaciones (Casos) para obtener los perfiles de temperatura en casa sección de la barra de combustible y en el refrigerante, la primera es basada en la metodología de canal promedio (Caso I) y la segunda es considerando un arreglo basado en la geometría original del núcleo.

A partir de estos casos de estudio y de los modelos de balance de masa, energía y cantidad de movimiento, los cuales fueron programados en Comsol Multiphysics, se obtuvieron los siguientes resultados principales:

- Para el refrigerante, en el Caso I se obtuvo una temperatura promedio a la salida de 817.87 K y para el Caso II de 816 K, los cuales son valores muy cercanos al valor de diseño, el cual es de 818 K.
- La temperatura promedio obtenida en la sección del encamisado para el Caso I es 756.71 K y para el Caso II es de 757.26 K, la temperatura de diseño es de 743 K.

- La temperatura promedio obtenida en la sección del gap para el caso I es de 1130.8 K y para el caso II es de 975.91 K.
- La temperatura promedio obtenida en la sección del combustible para el caso I es de 1457.3 K y para el caso II es de 1195 K, la temperatura de diseño es de 1500 K.

En ambos casos, los valores obtenidos son cercanos a los valores de diseño, la estimación de canal promedio nos permitió obtener resultados que representan todo el núcleo de manera homogénea, sin embargo, si se modela la geometría como en el caso 2 sería posible identificar las distintas zonas en el núcleo.

REFERENCIAS

1. Wu, Y.W., Li, X., Yu, X., Qiu, S.Z., Su, G.H., Tian, W.X., 2013. Subchannel thermal-hydraulic analysis of the fuel assembly for liquid sodium cooled fast reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 68, p. 65–78 (2013).
2. Basehore, K.L., Todreas, N.E., SUPERENERGY-2: A Multiassembly Steady-State Computer Code for LMFBR Core Thermal-hydraulic Analysis, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, USA (1980).
3. Todreas, N. E., Kazimi, M. Nuclear Systems, Thermal Hydraulic Fundamentals. CRC Press.USA, (2012).
4. Tenchine, D., Baviere, R., Bazin, P., Ducros, F., Geffraye, G., Kadri G., Perdu, F., Pialla, D., Rameau, B. y Tauveron, N. (2012) Status of CATHARE code for sodium cooled fast reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 245, p.140-152.
5. Mikityuk, K., Schikorr, M. (2013). New transient analysis of the Superphénix start-up tests. En: *Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)*. 4–7 de marzo de 2013, Paris, Francia.
6. Malambu, E., Sobolev, V., Messaoudi, N., Aït Abderrahim, H., Struwe, D., Schikorr, M. y Bubelis, E. (2008). Preliminary core design of the European lead-cooled system. *Proceedings of the 2008 International Conference on the Physics of Reactors “Nuclear Power: A Sustainable Resource”*. PHYSOR-2008, 14–19 de septiembre de 2008. Casino-Kursaal Conference Center, Suiza. pp. 1–11.
7. Grasso, G., Petrovich, C., Mattioli, D., Artioli, C., Sciora, P., Gugiu, D. (2014). The core design of ALFRED, a demonstrator for the European lead-cooled reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 278, p. 287-301.
8. Bubelis, E., Tosello, A., Pfrang, W., Schikorr, M., Mikityuk, K., Panadero, A., Martorell, S., Ordóñez, J., Seubert, A., Lerchl, G., Stempniewicz, M., Alcaro, F., De Geus, E., Delmaere, T., Pומרouly, S. y Wallenius, J. (2012). Systems codes benchmarking on a low sodium void effect SFR heterogeneous core under ULOF conditions. *Nuclear Engineering and Design*. 320, p. 325-345.
9. Won-Seok, K., Young-Gyun, K. y Young-Jin, K. (2002) A subchannel analysis code MATRA-LMR for fire wrapped LMR subassembly. *Annals of Nuclear Energy*. 29, p. 303-321.

10. Matuzas, V., Ammirabile, L., Cloarec, L., Lemasson, D., Perez-Martin, S. and Ponomarev. (2017) A. Extension of ASTEC-Na capabilities for simulating reactivity effects in Sodium Cooled Fast Reactor, *Annals of Nuclear Energy*, 119, p. 440-453.
11. Carbajo, J., Yoder, G., Popov, S., Ivanov, V. (2001) A review of the thermophysical properties of MOX and UO₂ fuels. *Journal of Nuclear Materials*, 299(3), p. 181-198.
12. Bird, R., Stewart, W., Lightfoot, E. *Fenómenos de transporte*, Wiley, México, (2007).
13. Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill, México, (2007).
14. Aufiero, M. C. (2013). A Multi-physics time-dependent model for the Lead Fast Reactor single-channel analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 256, p. 14-27.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el CONACyT en el Posgrado de Energía y Medio Ambiente de la UAM-Iztapalapa. Además, los autores agradecen el apoyo económico recibido del proyecto estratégico No. 212602 del Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética, CONACyT-SENER.