

Modelo promedio volumétrico de temperaturas para un reactor nuclear de sales fundidas

Zaira I. Jiménez-Balbuena, Gilberto Espinosa-Paredes,
Alejandría D. Pérez-Valseca, Alejandro Vázquez-Rodríguez
Área de Ingeniería en Recursos Energéticos,
Universidad -autónoma Metropolitana-Iztapalapa
zai_ijb579@hotmail.com

RESUMEN

En este trabajo, se utiliza el método de promedio volumétrico con la finalidad de plantear un modelo que describa el comportamiento de la temperatura en un reactor nuclear de sales fundidas de IV generación (MSR). Se plantea inicialmente un modelo de no equilibrio térmico de dos ecuaciones considerando dos fases dentro del reactor. Posteriormente, se reduce a uno de equilibrio térmico de una sola ecuación para fines prácticos. El objetivo de este trabajo es plantear un modelo matemático para entender y predecir el comportamiento de la temperatura dentro del núcleo de los MSRs. Con el modelo de una ecuación se obtuvo un perfil de temperatura dentro del núcleo del reactor, en la cual se observa que la temperatura máxima se presenta en el centro, debido a que se considera que las sales no se encuentran en movimiento. La temperatura máxima obtenida es tres grados más alta que la reportada en la literatura para el reactor de referencia, así mismo, la temperatura promedio de la sal se encuentra dos grados por encima de la temperatura de referencia.

PALABRAS CLAVE

Promedio volumétrico, sales fundidas, reactor, núcleo.

ABSTRACT

In this work, the volumetric average method is used in order to propose a model that describes the temperature behavior in a nuclear reactor of IV generation molten salts (MSR). Initially, a model of thermal equilibrium of two equations is considered considering two phases within the reactor. Subsequently, it is reduced to one of thermal equilibrium of a single equation for practical purposes. The objective of this work is to propose a mathematical model to understand and predict the behavior of temperature within the core of the MSRs. With the model of an equation a temperature profile was obtained inside the reactor core, in which it is observed that the maximum temperature is presented in the center, because it is considered that the salts are not in motion. The maximum temperature obtained is three degrees higher than that reported in the literature for the reference reactor, likewise, the average salt temperature is two degrees above the reference temperature.

KEYWORDS

Volumetric average, molten salts, reactor, core.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, alrededor del 15% de la energía eléctrica producida en el mundo se genera mediante energía nuclear, lo que reduce significativamente el impacto ambiental y ofrece una mayor diversidad de generación de electricidad que mejora la seguridad energética.¹ Como consecuencia a estos beneficios, se busca comprender cada vez más el funcionamiento de todas aquellas tecnologías utilizadas en la generación de energía nuclear, para esto se han desarrollado modelos que describen y predicen el comportamiento.

Una de las tecnologías innovadoras en el área de energía nuclear son los reactores nucleares de sales fundidas (MSR, por sus siglas en inglés). Esta tecnología se caracteriza por utilizar una mezcla de sales fundidas, en la cual, se disuelve el combustible también en forma de sal. Se pueden usar a muy baja presión debido a su alta temperatura de ebullición y a su baja presión de vapor,¹ lo que los convierte en una gran opción debido a la baja tasa de generación de accidentes.

Sin embargo, actualmente no se cuenta con gran información acerca del funcionamiento de esta tecnología, por lo que es importante estudiar el comportamiento de este tipo de reactores. Uno de los principales estudios de interés resulta ser la transferencia de calor, el cual es necesario para estudiar el perfil de temperaturas de los MSR.

Por lo anterior, este trabajo tiene como finalidad plantear un modelo mediante el método de promedio volumétrico,² con el cual sea posible conocer el comportamiento de la temperatura del reactor bajo ciertas consideraciones.

El modelo que se presenta a continuación es un modelo de no equilibrio térmico y su reducción a una ecuación³ para estudiar el comportamiento de la temperatura del núcleo reactor. Debido a las diferentes propiedades de las mezclas de sales, se puede establecer un criterio válido y fundamentado para la elección éstas, basado en la eficiencia de las mismas para la transferencia de calor.

NOMENCLATURA

Fase β Tetrafluoruro de Uranio (UF_4)

Fase σ Mezcla de Fluoruro de Litio con Fluoruro de Berilio ($LiF-BeF_2$)

Φ_b Fuente de calor en fase [βkJ_j]

Q_0 Calor liberado debido al cambio de fase [$kJ/kg/m^3$]

ρ Densidad de la fase [kg/m^3]

C_P Calor específico [$kJ/kg.K$]

T Temperatura de la Fase [K]

k Conductividad térmica [$W/m.K$]

$A_{\beta\sigma}$ Área en la interface β - σ [m^2]

ε Porosidad [-]

V Volumen Total [m^3]

- $n_{\beta\sigma}$ Vector normal unitario en la interface β - σ , apuntando de fase β a fase σ
- $(T_{\beta})^{\beta}$ Promedio intrínseco de la temperatura Fase β [K]
- T_{β} Desviaciones espaciales de la temperatura en la Fase β [K]
- $(T_{\sigma})^{\sigma}$ Promedio intrínseco de la temperatura en la Fase σ [K]
- T_{σ} Desviaciones espaciales de la temperatura Fase σ [K]
- a_v Área por unidad de volumen [1/m]
- h Coeficiente de transferencia de calor [W/m².K]
- $b_{\beta\beta}$ Vector de Cerradura, campo que mapea en $(T_{\beta})^{\beta}$ en T_{β} [m]
- $b_{\beta\sigma}$ Vector de Cerradura, campo que mapea $(T_{\sigma})^{\sigma}$ en T_{β} [m]
- S_{β} Campo escalar que mapea $(T_{\beta})^{\beta}$ - $(T_{\sigma})^{\sigma}$ en (T_{β}) [-]
- $b_{\sigma\beta}$ Vector de Cerradura, campo que mapea $(T_{\beta})^{\beta}$ en T_{σ} [m]
- $b_{\sigma\sigma}$ Vector de Cerradura, campo que mapea $(T_{\sigma})^{\sigma}$ en T_{σ} [m]
- S_{σ} Campo escalar que mapea $(T_{\beta})^{\beta}$ - $(T_{\sigma})^{\sigma}$ en (T_{σ}) [-]
- $K_{\beta\beta}$ Tensor de conductividad térmica efectiva fase β [W/m.K]
- $K_{\sigma\sigma}$ Tensor de conductividad térmica efectiva fase σ [W/m.K]
- $K_{\beta\sigma}$ Tensor de conductividad térmica de coeficiente cruzado [W/m.K]
- $K_{\sigma\beta}$ Tensor de conductividad térmica de coeficiente cruzado [W/m.K]
- K_{eff} Tensor de conductividad térmica efectiva [W/m.K]
- $(\rho Cp)_{eff}$ Capacidad de calor volumétrico efectivo de la mezcla [kJ/m³.K]

REACTOR NUCLEAR DE SALES FUNDIDAS

Los reactores nucleares de sales fundidas son reactores de IV generación que utilizan una mezcla de sales como combustible. Estas sales, son químicamente estables e inertes y pueden disolver la mayoría de los materiales nucleares como el uranio y el torio. En este tipo de reactores, la sal combustible fluye alrededor del núcleo produciendo una reacción de fisión en cadena que permite la transferencia de calor. Hasta el momento existen varios modelos de este tipo de reactores los cuales pueden ser tanto de espectro rápido como de espectro térmico. Dentro de los reactores de espectro rápido se encuentra el reactor rápido de sales fundidas (MSFR, por sus siglas en inglés), el cual es utilizado como referencia en este trabajo.

Para el análisis se toma como referencia el reactor presentado en el trabajo de Igor Pioro.⁴ El cual es un reactor de 3 GWth/1300 MWe, con un volumen total de sal de combustible de 18 m³, operado a una temperatura de entrada de 650 °C, una temperatura media de 700°C y una temperatura máxima de la sal de combustible de 750°C.

En este sistema la sal combustible–refrigerante basada en flúor fluye hacia arriba desde la parte inferior del núcleo hasta la salida en la parte superior del cilindro. La sal líquida retorna a la entrada en un tiempo de entre 3 y 4 segundos distribuyendo el total de la sal combustible entre el núcleo y la parte externa del circuito de combustible equitativamente. Por debajo y por encima de los reflectores axiales centrales se puede encontrar, el núcleo, el cual está rodeado por una manta fértil como se muestra en la figura 1.

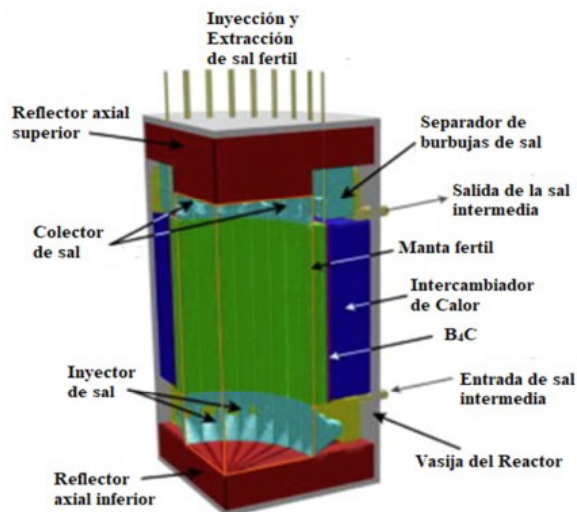


Fig. 1. Diagrama esquemático de un MSFR.⁶

El núcleo del MSFR es un cilindro compacto de 2.25 m de alto y 2.25 m de diámetro, rodeado axialmente por reflectores de acero, y radialmente por una manta fértil, una capa de carburo de boro y un reflector, donde las reacciones nucleares ocurren dentro de la sal de flúor líquido que actúa como combustible y como refrigerante. Una vista esquemática del núcleo puede observarse en la figura 2.

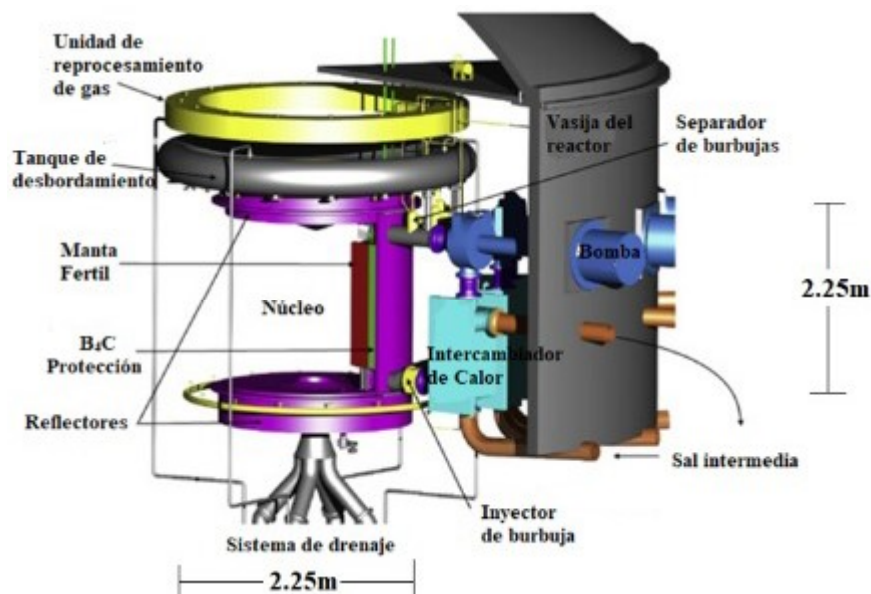


Fig. 2. Núcleo de un MSFR.⁴

METODOLOGÍA

La metodología a seguir en este trabajo se basa en el promedio volumétrico, que comúnmente se aplica a medios porosos.² En forma resumida, primero se realiza el planteamiento del sistema, se definen las simplificaciones y suposiciones,

después se plantean las ecuaciones puntuales para cada fase. Específicamente los pasos principales de la metodología considerados en este trabajo son:

1. Descripción del sistema.
2. Suposiciones del sistema.
3. Método de Promedio Volumétrico:
 - Planteamiento de ecuaciones para cada fase
 - Condiciones de frontera
 - Promedio de ecuaciones puntuales
 - Obtención del Modelo no cerrado mediante la descomposición de Gray
 - Ecuación de las desviaciones (simplificada)
 - Propuesta de solución formal
 - Obtención del modelo cerrado

Descripción del Sistema

Para este trabajo se ha considerado un reactor nuclear de sales fundidas de IV generación, en el cual todas las sales fundidas representan el dominio y la fundición de las sales dentro del núcleo se ha tomado como volumen de promediado. En este reactor se tiene como combustible Tetrafluoruro de Uranio (UF_4) y como mezcla de sales para disolver el combustible Fluoruro de Litio con Fluoruro β de Berilio ($LiF-BeF_2$). Las cuales son consideradas como fases para fines prácticos en el promedio volumétrico. El análisis se realiza durante la fundición de las sales, es decir, la mezcla no se encuentra en movimiento. Las fases del sistema son:

- Fase β Tetrafluoruro de Uranio (UF_4)
- Fase σ : Mezcla de Fluoruro de Litio con Fluoruro de Berilio ($LiF-BeF_2$)

Cabe mencionar que se cuenta con una fuente de calor para que se pueda llevar a cabo la fundición de las sales dentro del sistema y también con liberación de calor debido al cambio de fase que se da dentro del reactor, la cual para fines de este trabajo se considera constante.

- Φ_b : Fuente de calor en fase β
- Q_0 : Calor liberado debido al cambio de fase

Suposiciones del Sistema

Para el sistema estudiado las consideraciones a realizar han sido las siguientes:

- Medio Poroso
 1. Rígido
 2. Homogéneo
- Fuente de calor se localiza en la fase β
- La fuente de calor se ha considerado constante para fines prácticos
- Se desprecia convección ya que en el momento en el que se realiza el estudio las sales apenas comienzan a fundirse y aún no se encuentran en

movimiento.

- Se considera que las sales son un fluido incompresible, lo que implica que la densidad es constante.
- Para el cambio de fase se considera un $(-Q_0)$ para la fase β y un (Q_0) para la fase σ debido a que uno cede calor al otro, sin efectos de acumulación interfacial.

Método de Promediado Volumétrico

Para este caso el método de promedio volumétrico se aplicó para un modelo de no equilibrio térmico de dos ecuaciones, una para la fase β y otra para la fase σ . Posteriormente el modelo de dos ecuaciones se reduce a un modelo de equilibrio térmico de una sola ecuación basado en ciertas consideraciones para fines prácticos de la solución numérica.

Las ecuaciones puntuales consideradas para cada una de las fases parten de la ecuación microscópica para la transferencia de calor. Para ambos casos se ha despreciado la convección debido a que el análisis se lleva a cabo cuando las sales comienzan a fundirse, lo que implica que estas no se encuentran en movimiento.

Ecuación puntual fase β

$$\rho C_p \beta \frac{\partial T_\beta}{\partial t} - \nabla \cdot (k_\beta \nabla T_\beta) = \Phi_\beta - Q_0 \quad (1)$$

Ecuación puntual fase σ

$$\rho C_p \sigma \frac{\partial T_\sigma}{\partial t} - \nabla \cdot (k_\sigma \nabla T_\sigma) = Q_0 \quad (2)$$

donde T es la temperatura, ρ es la densidad, CP es la capacidad calorífica, Φ_β es la fuente calor de origen nuclear, Q_0 es el calor durante el cambio de fase.

Para este sistema se han considerado dos condiciones de frontera:

- No resistencia a la transferencia de calor
- Continuidad de flux

Lo que indica que la transferencia de calor se lleva a cabo sin resistencia en la interface β - σ y que la temperatura y el componente normal del flux de calor son continuos en esta misma.

$$CF1 \quad T_\beta = T_\sigma \quad \text{en} \quad A_{\beta\sigma} \quad (3)$$

$$CF2 \quad -\underline{n}_{\beta\sigma} \cdot k_\beta \nabla T_\beta = -\underline{n}_{\beta\sigma} \cdot k_\sigma \nabla T_\sigma \quad \text{en} \quad A_{\beta\sigma} \quad (4)$$

Aquí $\underline{n}_{\beta\sigma}$ es el vector normal unitario en la interface β - σ , apuntando de la fase β a la fase σ .

Las ecuaciones locales gobernantes en cada fase dadas por las Ecs. (1) y (2), son promediadas superficialmente (promedio de fase). Durante el proceso de promediar se intercambia el operador integral por el operador diferencial aplicando el teorema del promediado espacial, matemáticamente hablando, se basa en la Ley de divergencia de Gauss. Considerando un medio poroso rígido (es decir no existe transferencia de masa interfacial y la porosidad es constante), lo que da como resultado las siguientes ecuaciones promedio para cada fase.

Ecuación promedio para fase β

$$\varepsilon_{\beta} \rho C_p_{\beta} \frac{\partial \langle T_{\beta} \rangle^{\beta}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[k_{\beta} \left(\varepsilon_{\beta} \nabla \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} T_{\beta} dA \right) \right] + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} \cdot k_{\beta} \nabla T_{\beta} dA = \Phi_{\beta} - Q_0 \quad (5)$$

Ecuación promedio para fase σ

$$\varepsilon_{\sigma} \rho C_p_{\sigma} \frac{\partial \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[k_{\sigma} \left(\varepsilon_{\sigma} \nabla \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} T_{\sigma} dA \right) \right] + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} \cdot k_{\sigma} \nabla T_{\sigma} dA = \Phi_{\sigma} - Q_0 \quad (6)$$

Es importante apuntar y tomando como ejemplo la fase β , que el promedio fase o superficial T_{β} se relaciona con el promedio intrínseco $\langle T_{\beta} \rangle^{\beta}$ a través de la siguiente relación:

$$\langle T_{\beta} \rangle = \varepsilon_{\beta} \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} \quad (7)$$

MODELO DE CERRADURAS

Se puede observar que las ecuaciones promediadas ecs. (5) y (6) incluyen temperaturas locales (T_{β} y T_{σ}) en los términos de integrales. Entonces, se lleva a cabo la descomposición de Gray,¹ en la cual se descompone la variable local en un término promedio intrínseco ($\langle T_{\beta} \rangle^{\beta}$) y en un término de desviaciones espaciales (T_{β}) alrededor del promedio. Para la fase β como para la fase σ de la siguiente manera:

$$\text{Fase } \beta: \quad T_{\beta} = \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} + \tilde{T}_{\beta} \quad (8)$$

$$\text{Fase } \sigma: \quad T_{\sigma} = \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} + \tilde{T}_{\sigma} \quad (9)$$

También se considera la siguiente expresión de flujo interfacial obtenida por Quintard y Whitaker:³

$$\frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} \cdot k_{\beta} \nabla T_{\beta} dA = -a_v h \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} \quad (10)$$

donde $a_v h$ es un coeficiente efectivo de la transferencia de calor. Entonces, al sustituir la descomposición de Gray Ecs. (8) y (9) y la de flujo interfacial de Quintard y Whitaker Ec. (10) en las Ecs. (5) y (6) estas pueden reescribirse como:

Fase β

$$\rho C_p_{\beta} \frac{\partial \langle T_{\beta} \rangle^{\beta}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[k_{\beta} \left(\varepsilon_{\beta} \nabla \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} \tilde{T}_{\beta} dA \right) \right] + a_v h \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} = \Phi_{\beta} - Q_0 \quad (11)$$

Fase σ

$$\varepsilon_{\sigma} \rho C_p \frac{\partial \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[k_{\sigma} \left(\varepsilon_{\sigma} \nabla \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} n_{\sigma\beta} \tilde{T}_{\sigma} dA \right) \right] - a_v h \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} = Q_0 \quad (12)$$

Es importante apuntar que $\frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} n_{\beta\sigma} \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} dA$ y $\frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} n_{\sigma\beta} \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} dA$ son nulos debido a que el sistema es rígido.

Ecuación de las desviaciones espaciales

Las ecuaciones de las desviaciones espaciales para los términos que aparecen en las ecuaciones (11) y (12), se construyen restando las ecuaciones locales (1) y (2) de las ecuaciones promedio correspondientes:

Fase β

$$\nabla \cdot \left[k_{\beta} \left(\varepsilon_{\beta} \nabla \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} n_{\beta\sigma} \tilde{T}_{\beta} dA \right) \right] + a_v h \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} = 0 \quad (13)$$

Fase σ

$$\nabla \cdot \left[k_{\sigma} \left(\varepsilon_{\sigma} \nabla \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} n_{\sigma\beta} \tilde{T}_{\sigma} dA \right) \right] - a_v h \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} \quad (14)$$

Por otra parte, se pueden aplicar la descomposición espacial en las condiciones de frontera:

$$\text{CF1: } \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} = \tilde{T}_{\sigma} - \tilde{T}_{\beta} \quad (15)$$

$$\text{CF2: } -n_{\beta\sigma} \cdot k_{\beta} \nabla \tilde{T}_{\beta} = -n_{\beta\sigma} \cdot k_{\sigma} \nabla \tilde{T}_{\sigma} + n_{\beta\sigma} \cdot \nabla (k_{\beta} \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - k_{\sigma} \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma}) \quad (16)$$

Un análisis de las Ecs. (13)-(16) nos indican que los términos fuentes (términos que generan perturbaciones microscópicas dentro del sistema) son:

- $\nabla \langle T_{\beta} \rangle^{\beta}$
- $\nabla \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma}$
- $\langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma}$

Propuesta de solución formal

Considerando las tres fuentes localizadas en la sección anterior se proponen dos soluciones formales, una para cada una de las desviaciones de la temperatura en cada fase. Donde las \underline{b} representan vectores como variables de cerradura y las s escalares, las cuales nos hacen posible cerrar el modelo, pues permiten contar con el mismo número de ecuaciones que de incógnitas.

$$\tilde{T}_\beta = \underline{b}_{\beta\beta} \cdot \underline{\nabla} \langle T_\beta \rangle^\beta + \underline{b}_{\beta\sigma} \cdot \underline{\nabla} \langle T_\sigma \rangle^\sigma + s_\beta \langle T_\beta \rangle^\beta - \langle T_\sigma \rangle^\sigma \quad (17)$$

$$\tilde{T}_\sigma = \underline{b}_{\sigma\beta} \cdot \underline{\nabla} \langle T_\beta \rangle^\beta + \underline{b}_{\sigma\sigma} \cdot \underline{\nabla} \langle T_\sigma \rangle^\sigma + s_\sigma \langle T_\beta \rangle^\beta - \langle T_\sigma \rangle^\sigma \quad (18)$$

Las soluciones formales obtenidas se sustituyen tanto en las ecuaciones de las desviaciones para cada fase como en las condiciones a la frontera, con la finalidad de obtener los órdenes de magnitud de los tensores y los escalares propuestos en las soluciones formales, ya que, posteriormente esto permitirá simplificar el modelo cerrado obtenido.

Modelo cerrado

Para la obtención del modelo cerrado las soluciones formales (17) y (18) se sustituyen en los modelos no cerrados de cada fase respectivamente expresados en las ecuaciones (11) y (12), posteriormente se simplifican por medio de órdenes de magnitud, lo que resulta en un modelo de dos ecuaciones de no equilibrio térmico.

Fase β

$$\varepsilon_\beta \rho C_p \beta \frac{\partial \langle T_\beta \rangle^\beta}{\partial t} - \underline{\nabla} \cdot \left[k_\beta \left(\varepsilon_\beta \underline{\nabla} \langle T_\beta \rangle^\beta + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} \underline{b}_{\beta\beta} \cdot \underline{\nabla} \langle T_\beta \rangle^\beta dA + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} \underline{b}_{\beta\sigma} \cdot \underline{\nabla} \langle T_\sigma \rangle^\sigma dA \right) \right] + a_v h \langle T_\beta \rangle^\beta - \langle T_\sigma \rangle^\sigma = \Phi_\beta - Q_0 \quad (19)$$

Fase σ

$$\varepsilon_\sigma \rho C_p \sigma \frac{\partial \langle T_\sigma \rangle^\sigma}{\partial t} - \underline{\nabla} \cdot \left[k_\sigma \left(\varepsilon_\sigma \underline{\nabla} \langle T_\sigma \rangle^\sigma + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\sigma\beta} \underline{b}_{\sigma\beta} \cdot \underline{\nabla} \langle T_\beta \rangle^\beta dA + \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\sigma\beta} \underline{b}_{\sigma\sigma} \cdot \underline{\nabla} \langle T_\sigma \rangle^\sigma dA \right) \right] \quad (20)$$

Para fines prácticos se definen los siguientes tensores de conductividad térmica:

$$\underline{\underline{K}}_{\beta\beta} = (\varepsilon_\beta k_\beta) \underline{\underline{I}} + \frac{k_\beta}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} \underline{b}_{\beta\beta} dA \quad (21)$$

$$\underline{\underline{K}}_{\sigma\sigma} = (\varepsilon_\sigma k_\sigma) \underline{\underline{I}} + \frac{k_\sigma}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\sigma\beta} \underline{b}_{\sigma\sigma} dA \quad (22)$$

$$\underline{\underline{K}}_{\beta\sigma} = \frac{k_\beta}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\beta\sigma} \underline{b}_{\beta\sigma} dA \quad (23)$$

$$\underline{\underline{K}}_{\sigma\beta} = \frac{k_\sigma}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \underline{n}_{\sigma\beta} \underline{b}_{\sigma\beta} dA \quad (24)$$

MODELO DE DOS ECUACIONES DE NO EQUILIBRIO TÉRMICO

Sustituyendo la definición de los tensores de conductividad térmica dados por las Ecs. (21-24), las ecuaciones promedio para cada fase son las siguientes:

Fase β

$$\varepsilon_{\beta} \rho C_p_{\beta} \frac{\partial \langle T_{\beta} \rangle^{\beta}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\underline{K}_{\beta\beta} \cdot \nabla \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} + \underline{K}_{\beta\sigma} \cdot \nabla \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} \right] + a_{\nu} h \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} = \Phi_{\beta} - Q_0 \quad (25)$$

Fase σ

$$\varepsilon_{\sigma} \rho C_p_{\sigma} \frac{\partial \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\underline{K}_{\sigma\beta} \cdot \nabla \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} + \underline{K}_{\sigma\sigma} \cdot \nabla \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} \right] - a_{\nu} h \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} - \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} = Q_0 \quad (26)$$

Estas dos ecuaciones constituyen el modelo de no equilibrio térmico.

MODELO DE UNA ECUACIONES DE EQUILIBRIO TÉRMICO

Sumando las ecuaciones de cada una de las fases dadas por las Ecs. (25) y (26) y considerando que $\underline{K}_{\beta\sigma} \approx -\underline{K}_{\sigma\beta}$, obtenemos el modelo de una ecuación:

$$\varepsilon_{\beta} \rho C_p_{\beta} \frac{\partial \langle T_{\beta} \rangle^{\beta}}{\partial t} + \varepsilon_{\sigma} \rho C_p_{\sigma} \frac{\partial \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\underline{K}_{\beta\beta} \cdot \nabla \langle T_{\beta} \rangle^{\beta} + \underline{K}_{\sigma\sigma} \cdot \nabla \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} \right] = \Phi_{\beta} \quad (27)$$

Considerando equilibrio térmico $\langle T_{\beta} \rangle^{\beta} = \langle T_{\sigma} \rangle^{\sigma} = \langle T \rangle$, finalmente obtenemos:

$$\rho C_p_{eff} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\underline{K}_{eff} \cdot \nabla \langle T \rangle \right] = \Phi_{\beta} \quad (28)$$

donde

$$\rho C_p_{eff} = \varepsilon_{\beta} \rho C_p_{\beta} + \varepsilon_{\sigma} \rho C_p_{\sigma} \quad (29)$$

$$\underline{K}_{eff} = \underline{K}_{\beta\beta} + \underline{K}_{\sigma\sigma} \quad (30)$$

Haciendo la consideración del equilibrio térmico al sustituir las ecuaciones (21) y (22) la Ec. (30) puede reescribirse como:

$$\underline{K}_{eff} = (\varepsilon_{\beta} k_{\beta}) I_{\underline{K}} + \frac{k_{\beta}}{V} \int_A n_{\beta\sigma} h_{\beta\beta} dA + (\varepsilon_{\sigma} k_{\sigma}) I_{\underline{K}} + \frac{k_{\sigma}}{V} \quad (31)$$

SOLUCIÓN DEL MODELO

En la sección anterior se presenta el desarrollo para obtención del modelo de una ecuación que permita obtener la temperatura en el MSFR. El modelo está dado por las Ecs. (28-39), y por las condiciones de frontera dadas por la Ec. (32), en donde se establecen que la temperatura en los bordes del reactor es igual a la temperatura de entrada de la sal al núcleo. En este caso se considera un geometría rectangular que simula el núcleo del reactor (figura. 2).

$$\text{en } T_{\beta} = T_{\sigma} = T_{entrada} \text{ en } x=0, 2.25, y=0, 2.25 \quad (32)$$

Para fines de este trabajo, la Ec. (28) se resuelve en estado estacionario, considerando un término fuente constante. Las propiedades de cada fase se presentan en la tabla I.

Tabla I. Propiedades desde las fases.¹

Propiedad	Fase β	Fase σ
$k \left[\frac{W}{m^{\circ}C} \right]$	1.96	22.72
$\rho \left[\frac{kg}{cm^3} \right]$	6.7×10^{-3}	2.64×10^{-3}
$Cp \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	290.368	1563.144
T_f, K	1309	1121.15
ε	0.225	0.775

El modelo se resuelve en Matlab, utilizando el PDE Toolbox, esta herramienta resuelve la ecuación utilizando diferencias finitas como método de solución.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos, como se mencionó, la ecuación se resuelve en estado estacionario, obteniendo la temperatura de la mezcla a partir de los coeficientes efectivos de ambas fases.

En la figura 3, se presenta la distribución de temperatura en el núcleo del reactor, considerando que la temperatura en la frontera del reactor es la temperatura a la que entra la sal al núcleo.

Como se puede observar, la temperatura máxima se encuentra en el centro del núcleo, esta es de 1026.9 K, esta temperatura es promedio de las dos sales, no así promedio de todo el reactor. La temperatura de referencia es la temperatura máxima de la sal, reportada en diseño,⁴ la cual es de 1023.15 K (750°C), teniendo una diferencia de tres grados con la obtenida en este trabajo.

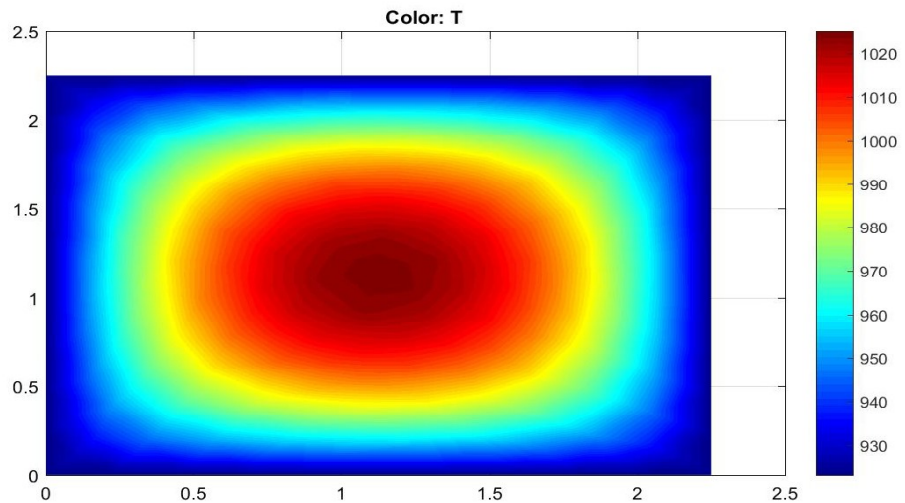


Fig. 3. Distribución de temperatura dentro del núcleo del MSFR.

La temperatura promedio del núcleo es de 975.1 K, y la reportada en diseño es de 973.15K, teniendo una diferencia de dos grados.

En la figura 4, se presentan los vectores de flux de calor, como se observa, parten del centro (zona más caliente) hacia lo extremos (zona menos caliente), como en este trabajo se consideró que la sal no está en movimiento, se nota una distribución uniforme de los vectores. Si se considerara que se encuentra en movimiento, la magnitud y dirección de algunos de estos se verían afectadas, así como la distribución de temperatura.

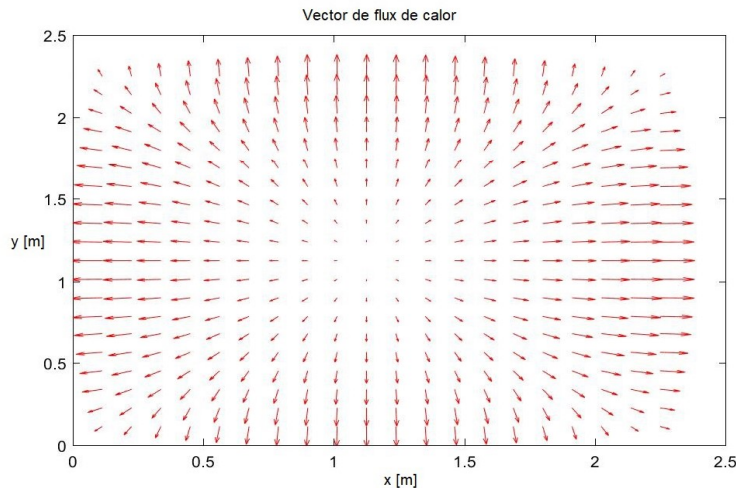


Fig. 4. Vectores de flux de calor dentro del núcleo del MSFR.

CONCLUSIONES

Se derivaron las ecuaciones de temperatura para un reactor de sales fundidas (MSR) partiendo de las ecuaciones locales e instantáneas. El método de promedio volumétrico se aplicó sistemáticamente en la mezcla de sales. Se identificaron y se proponen soluciones matemáticas de las variables de cerradura para proponer un sistema cerrado de ecuaciones promedio. Partiendo del modelo de dos ecuaciones promedio que describe efectos de no equilibrio térmico, se obtuvo una ecuación en equilibrio térmico en términos de propiedades efectivas.

El modelo de una ecuación permite conocer la temperatura promediada de las sales en el reactor, los resultados obtenidos muestran que la temperatura máxima obtenida es muy cercana a la temperatura reportada en la literatura, teniendo una diferencia de tres grados. De la misma manera, la temperatura promedio del núcleo tiene una diferencia de dos grados respecto a la de la literatura.

Este modelo puede predecir el comportamiento del reactor bajo diversas condiciones, entre ellas el utilizar diferentes mezclas de sales, lo cual se propone como trabajo futuro, así como considerar las sales en movimiento, de forma que se obtenga un perfil de temperaturas más preciso en cada sección del núcleo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de una beca en la UAM. Además,

los autores agradecen el apoyo económico recibido del proyecto estratégico No. 212602 del Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética, CONACyT-SENER. En forma especial la Ing. Zaira agradece al Dr. Francisco Valdés Parada por el curso de modelación matemática aplicada a la ingeniería en posgrado de energía y medio ambiente, en el cual se abordó el tema de promedio volumétrico.

REFERENCIAS

1. Dolan, T., *Molten Salt Reactors and Thorium Energy*, Elsevier, Reino Unido (2017).
2. Whitaker, S., *The method of volume averaging*, Springer Science & Business Media, California, USA (2013).
3. Quintard, M., & Whitaker, S., "Transport in ordered and disordered porous media: volume-averaged equations, closure problems, and comparison with experiment". *Chemical Engineering Science*, 48, pp. 2537-2564.(1993)
4. Piroo, I., *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, Elsevier, Cambridge, Inglaterra (2016).
5. Brovchenko, M., Heuer, D., Merle-Lucotte, E., Allibert, M., Capellan, N., Ghetta, V., Laureau, A., 2012. "Preliminary safety calculations to improve the design of Molten Salt Fast Reactor". In: *Proc. Int. Conf. PHYSOR*, Knoxville, Tennessee, USA, April 15–20, (2012).
6. Delpech, S., Merle-Lucotte, E., Heuer, D., Allibert, M., Ghetta, V., Le-Brun, C., & Picard, G. (2009). Reactor physic and reprocessing scheme for innovative molten salt reactor system. *Journal of fluorine chemistry*, 130(1), pp. 11-17 (2009).