

Comparación entre un LFR y un SFR durante un evento de pérdida de refrigerante

*José Antonio Meza-Andrade, Alejandría D. Pérez-Valseca, Alejandro Vázquez-Rodríguez y
Gilberto Espinosa-Paredes*

*Área de Ingeniería en Recursos Energéticos, Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa
San Rafael Atlixco No. 186, Col. Vicentina, Iztapalapa, 09340, México.*

*antoniomezaandrade@outlook.es, alejandria.peval@gmail.com; vara@xanum.uam.mx;
gepe@xanum.uam.mx*

Resumen

En este trabajo se presenta una comparación del comportamiento transitorio de un reactor enfriado con plomo (LFR) y un reactor enfriado con sodio (SFR) durante un evento de pérdida de refrigerante (ULOF). El flujo de refrigerante a la entrada del núcleo se redujo a 90%, 70% y 50% del valor nominal. Los parámetros comparados fueron la potencia, temperaturas de combustible, encamisado y refrigerante, así como la remoción de calor. Para comparar los resultados entre ambos reactores, se normalizaron los valores obtenidos durante el transitorio respecto al valor en estado estacionario, como resultado se analizaron los porcentajes de aumento o disminución de los parámetros seleccionados para el modelo. Con los resultados obtenidos se visualizaron los efectos de reactividad en la dinámica del reactor, así como la capacidad de los refrigerantes para la remoción del calor generado durante el transitorio. En el caso del sodio la capacidad máxima fue de 63% contra 91% del plomo a 50% de flujo.

1. INTRODUCCIÓN

El reactor rápido enfriado con plomo (LFR, por sus siglas en inglés) y el reactor rápido enfriado con sodio (SFR, por sus siglas en inglés), forman parte de la Generación IV de reactores nucleares de fisión. Esta generación fue establecida por el *Foro Internacional de Generación IV* (GIF), siendo el organismo responsable del seguimiento a las actividades de investigación y desarrollo necesarias para determinar la viabilidad y la capacidad de rendimiento de esta generación de sistemas de energía nuclear [1].

El GIF establece para los reactores de generación IV, cuatro áreas prioritarias para el desarrollo de la energía nuclear: sostenibilidad, seguridad y fiabilidad, competitividad económica y protección física [2]. Los reactores LFR y SFR son enfriados con metales líquidos, el LFR puede ser enfriado con plomo o una mezcla eutéctica de plomo-bismuto y el SFR es enfriado con sodio o una mezcla de sodio-potasio. Aunque estos reactores se encuentran clasificados como reactores de cuarta generación, el desarrollo de esta tecnología tiene su origen después de la segunda guerra mundial al igual que los reactores térmicos [3].

El desarrollo de la tecnología SFR tiene una larga historia, con aproximadamente 350 años de experiencia [4]. Su desempeño general ha sido notable, con importantes logros como la demostración de la reproducción y la viabilidad del ciclo de combustible del reactor rápido, eficiencias térmicas que alcanzan valores del 43-45%, el más alto en la práctica nuclear, y la acumulación de experiencia indispensable en el desmantelamiento de varios reactores de este tipo.

En el caso de LFR, se tiene una experiencia menor, no obstante, el plomo (Pb) o la mezcla eutéctica de plomo-bismuto (LBE) se propuso e investigó como refrigerante para reactores rápidos desde la década de 1950 [5]. El primer sistema LFR fue un reactor de prototipo terrestre de 70 MWth, que alcanzó la criticidad e inició su operación a plena potencia en Rusia, en 1959. En total, siete submarinos nucleares de 155 MWth del Proyecto 705 / 705K refrigerados con LBE fueron construidos y operados. Actualmente, un número significativo de países está dedicando grandes programas de investigación y desarrollo a los LFR, considerados una alternativa válida y prometedora al sodio como refrigerante de reactor rápido.

A pesar de su historia, los reactores rápidos requieren grandes esfuerzos internacionales de investigación y desarrollo debido, en gran parte, a la naturaleza de la fisión por neutrones rápidos y a las tecnologías que se proponen o adoptan para tales sistemas. Como resultado, se imponen nuevos criterios de diseño, a menudo más estrictos, para el desarrollo de reactores de neutrones rápidos. La investigación y desarrollo de las tecnologías de reactores rápidos incluye muchas áreas, entre ellas la medición y evaluación de datos nucleares, física de reactores y cálculos termofluidos (térmico y fluido-dinámica del refrigerante), combustible, materiales, refrigerantes y tecnologías de refrigeración, así como el diseño de sistemas de instrumentación y control.

Dentro de los trabajos de desarrollo de las tecnologías SFR y LFR, se realizan análisis de seguridad. Estos análisis incluyen la simulación de eventos transitorios, como el accidente de pérdida de refrigerante sin protección (ULOF), accidente de sobre-potencia sin protección (UTOP) y accidente de pérdida de disipador de calor (ULOHS) [6][7]

En el presente trabajo se analiza un evento ULOF para un reactor LFR de 300MWth y para un SFR de 3600 MWth, se disminuye el flujo de entrada del refrigerante a 90%, 70% y 50 %. Para ello, se realizó una comparación del comportamiento de la potencia, de las temperaturas del combustible, encamisado y refrigerante, y del calor removido. Al efectuar las comparaciones, los valores obtenidos se normalizaron respecto al estado estacionario.

2. MODELO MATEMÁTICO

El modelo utilizado para describir los procesos dentro del reactor nuclear incluyó tres partes principales: (1) los procesos neutrónicos, (2) los procesos de transferencia de calor en la barra de combustible y (3) los procesos termofluidos del refrigerante. Para la simulación de ambos reactores se utilizó el mismo modelo, cambiando los parámetros neutrónicos y características correspondientes a cada núcleo, así como las propiedades de los refrigerantes. En la Tabla I se presentan las características de cada reactor.

En ambos casos se considera que el encamisado es del mismo material (15-15 Ti), reportado para el LFR en Grasso *et al.* [8] y para el SFR en el trabajo de Matuzas *et al.* [9].

Tabla I. Características del reactor LFR [8] y del reactor SFR [9]

Características del núcleo		
Parámetro	LFR	SFR
Potencia térmica	300 MWth	3600 MWth
Máxima temperatura del encamisado (estacionario)	823.15 K (550 °C)	823.15 K (550 °C)
Máxima temperatura del encamisado (transitorio)	1023.15 K (750°C)	1023.15 K (750°C)
Temperatura de entrada del refrigerante	673.15 K (400°C)	668.15 K (395°C)
Temperatura de salida del refrigerante	753.15 K (480°C)	818.15 K (545 °C)

Los procesos neutrónicos se describen con el modelo puntual de la cinética neutrónica, dado por:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho_i(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) , \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

donde β es la fracción total de neutrones retardados, Λ es el tiempo de generación de neutrones, λ es la constante de decaimiento de precursores de neutrones y C_i es la concentración de neutrones. En la Tabla II se presentan los parámetros neutrónicos utilizados para cada reactor, en el caso del LFR se utilizaron 8 grupos de precursores de neutrones y para el SFR se utilizaron 6 grupos.

Tabla II. Parámetros nucleares.

Grupo	LFR [10]		SFR [11]	
	$\lambda_i (s^{-1})$	β_i	$\lambda_i (s^{-1})$	β_i
1	0.0125	6.47×10^{-5}	0.0127023	8.78147×10^{-5}
2	0.0283	5.90×10^{-4}	0.0301099	8.16105×10^{-5}
3	0.0425	2.12×10^{-4}	0.112331	6.51854×10^{-4}
4	0.133	4.47×10^{-3}	0.327449	1.7707×10^{-3}
5	0.292	1.09×10^{-3}	1.22596	7.88203×10^{-4}
6	0.666	4.00×10^{-4}	8.14883	2.05715×10^{-4}

Grupo	LFR [10]		SFR [11]	
	$\lambda_i (s^{-1})$	β_i	$\lambda_i (s^{-1})$	β_i
7	1.63	3.76×10^{-4}	-	-
8	3.55	1.56×10^{-4}	-	-

La reactividad se calculó considerando el efecto Doppler, la expansión del combustible, la expansión del encamisado y la expansión de refrigerante. En la Tabla III se presentan los coeficientes para cada reactor.

$$\rho_t = \rho_0 + \underbrace{K_D \ln \left(\frac{\langle T_f \rangle_{salida}}{\langle T_f \rangle_{entrada}} \right)}_{\text{Doppler}} + \underbrace{\alpha_{comb} \Delta \langle T_{comb} \rangle}_{\text{Expansión del combustible}} + \underbrace{\alpha_{enc} \Delta \langle T_{enc} \rangle}_{\text{Expansión del encamisado}} + \underbrace{\alpha_{ref} \Delta \langle T_{ref} \rangle}_{\text{Expansión del refrigerante}} \quad (3)$$

Tabla II. Coeficientes de reactividad.

Coefficiente	LFR [10]	SFR [11]
K_D [pcm]	-555	-834
α_{comb} [pcm/K]	-0.232	-0.303
α_{enc} [pcm/K]	0.045	0.0405
α_{ref} [pcm/K]	-0.271	0.4505

El modelo para la transferencia de calor en la barra de combustible está dado por:

$$(\rho C_p)_{comb} \frac{\partial T_{comb}}{\partial t} = \frac{k_{comb}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + q'''(t, z), \text{ Sección de combustible} \quad (5)$$

$$(\rho C_p)_{gap} \frac{\partial T_{gap}}{\partial t} = \frac{k_{gap}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{gap}}{\partial r} \right), \text{ Sección del gap} \quad (6)$$

$$(\rho C_p)_{enc} \frac{\partial T_{enc}}{\partial t} = \frac{k_{enc}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{enc}}{\partial r} \right), \text{ Sección del encamisado} \quad (7)$$

La condición inicial correspondiente está dada por $T(r, 0) = f(r)$, y las condiciones de frontera son:

$$\frac{dT_f}{dr} = 0, \text{ Radio interno del combustible} \quad (8)$$

$$-k_{gap} \frac{dT_{gap}}{dr} = h_{gap} (T_{comb} - T_{gap}), \quad \text{Frontera combustible-gap} \quad (9)$$

$$-k_{enc} \frac{dT_{enc}}{dr} = h_{gap} (T_{gap} - T_{enc}), \quad \text{Frontera gap-encamisado} \quad (10)$$

$$-k_{enc} \frac{dT_{enc}}{dr} = h_{ref} (T_{enc} - T_{ref}), \quad \text{Frontera encamisado-refrigerante} \quad (11)$$

donde ρ es la densidad, C_p el calor específico, k es la conductividad térmica, h_{ref} es el coeficiente de transferencia de calor del refrigerante, y $q'''(t, z)$ es el término fuente, expresado por:

$$q'''(t, z) = \frac{P(t, z)}{V_f} \quad (12)$$

Los procesos de termofluido del refrigerante se modelaron con balances de masa, cantidad de movimiento y energía, considerando la expansión del refrigerante. Los balances se presentan a continuación:

$$\alpha_{th} \rho_{ref} \frac{dT_{ref}}{dt} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0, \quad \text{Balance de masa} \quad (14)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = -\frac{\xi_{fr}}{2} \left(\frac{G^2}{\rho_{ref} L} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{\rho_{ref}} \right) - \rho_{ref} g, \quad \text{Balance de cantidad de movimiento} \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_{ref}}{\partial t} = \frac{P_m h_{ref} (T_{enc} - T_{ref})}{A_f \rho_{ref} C_{p_{ref}}} - \frac{G}{\rho_{ref}} \frac{\partial T_{ref}}{\partial z}, \quad \text{Balance de energía} \quad (16)$$

En la Tabla V se presentan las propiedades del plomo y sodio utilizadas en este trabajo.

Tabla V. Propiedades de los refrigerantes [4].

Propiedad	LFR	SFR
Densidad ($kg\ m^{-3}$)	10520	845
Capacidad calorífica ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	147.3	1269
Conductividad térmica ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	17.1	68.8

Propiedad	LFR	SFR
Viscosidad ($Pa \cdot s$)	0.001998	0.00025

3. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de este trabajo fue la comparación del comportamiento de la temperatura de encamisado y temperatura del refrigerante de un LFR y un SFR durante un evento de pérdida de refrigerante.

3.1 Análisis en estado estacionario dinámico

Antes de iniciar la simulación del evento transitorio, se analizó el estado estacionario de cada reactor, comparando las temperaturas obtenidas para el encamisado y el refrigerante con las temperaturas nominales (Tabla I). En la Figura 1, se muestran los perfiles axiales del combustible, gap, encamisado y refrigerante en estado estacionario para el LFR, en este caso, la temperatura máxima del encamisado fue de 760.62 K, 62.53 grados por debajo de la temperatura máxima de 823.15 K, de acuerdo con diseño del LFR [8]. En el caso de la temperatura de salida del refrigerante, la obtenida con el modelo fue de 748.75 K, 4.4 grados por debajo de la nominal de 753.15 K [8].

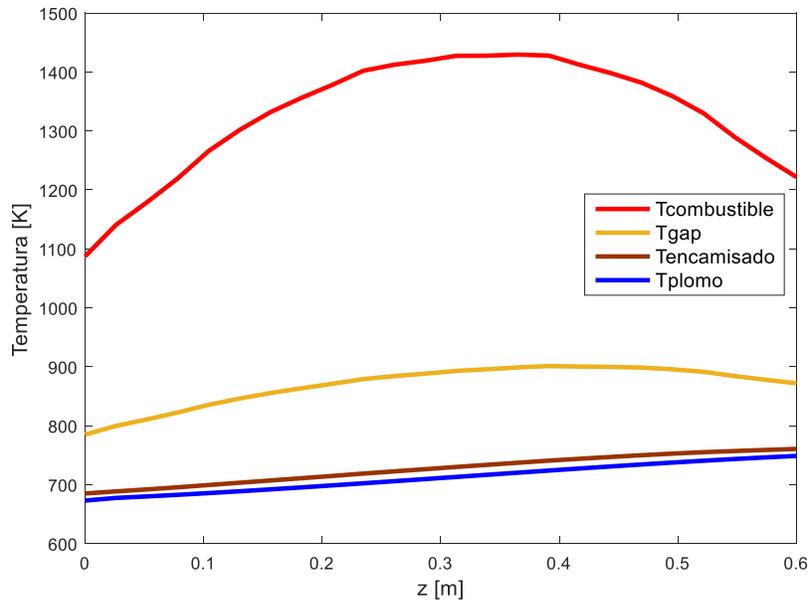


Figura 1. Perfiles axiales de temperatura para el LFR.

Para el caso del SFR, en la Figura 2 se muestran los perfiles axiales de cada sección (combustible, gap, encamisado y refrigerante), en este caso la temperatura máxima del encamisado fue de 841.47 K, mientras que la nominal correspondió a 823.97 K, es decir, una

diferencia de 17.5 grados [9]. La temperatura del refrigerante fue de 825.77 K, que comparada con la nominal de 818.15 K indicó una diferencia de 6.72 K [9]. En ambos reactores la temperatura obtenida osciló dentro del margen de error aceptable para condiciones nominales de estado estacionario dinámico.

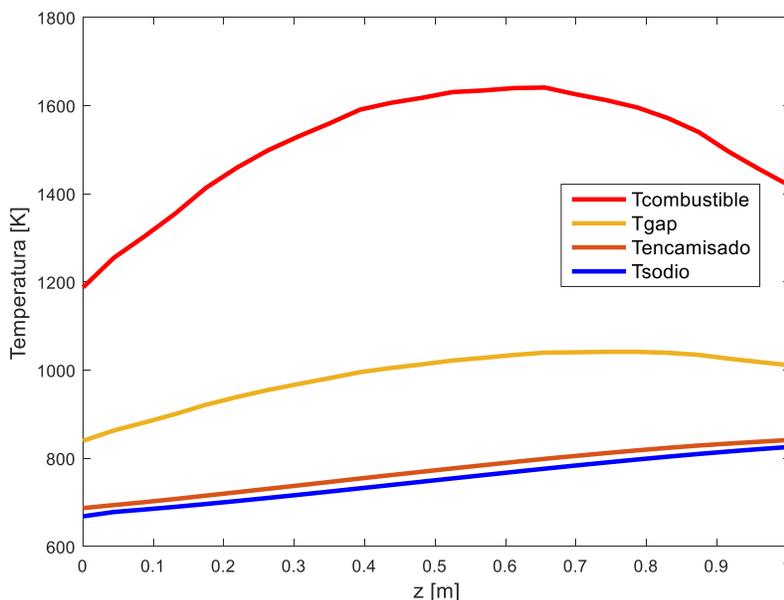


Figura 2. Perfiles axiales de temperatura para el SFR.

3.2 Análisis en estado transitorio

Para el evento transitorio se analizó el comportamiento de la potencia, temperatura máxima del combustible, temperatura máxima en el refrigerante y el calor removido. Para realizar la comparación se normalizaron los valores en estado transitorio respecto a los obtenidos en el estado estacionario, obteniendo, para el estado transitorio, un porcentaje de cambio con el cual fue posible la comparación.

Para simular el ULOF, se realizaron 3 experimentos numéricos de disminución de flujo de refrigerante, quedando con 90%, 70% y 50% de flujo en la entrada del núcleo. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la potencia normalizada del LFR y el SFR durante la disminución de flujo.

En el caso de la reducción al 90% del flujo, la potencia del LFR disminuyó 0.39% respecto a la potencia nominal, mientras que la disminución de potencia del SFR correspondió al 0.16%. Para el experimento de disminución de flujo a un 70%, el LFR sufrió una disminución de potencia aproximadamente del doble respecto a SFR, la cual fue de 0.72%. En el experimento se observó al inicio del evento transitorio que la potencia del SFR aumentó aproximadamente 0.88%. Para el caso de la disminución de flujo al 50%, el SFR presentó un incremento de 1.63% al inicio del transitorio que se redujo rápidamente retornando a una nueva condición de estado estacionario.

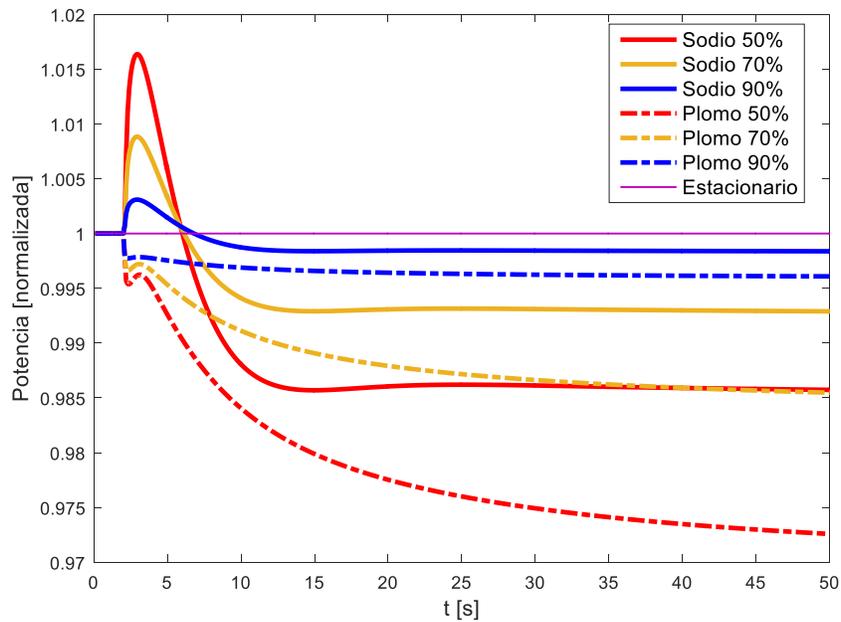


Figura 3. Potencia normalizada de un LFR y un SFR durante un ULOF.

El efecto de aumento de potencia es atribuible al coeficiente de reactividad por expansión del refrigerante, el cual fue positivo para el SFR. Respecto al LFR, cuyo coeficiente fue negativo, este efecto no es tan notorio.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la temperatura en el combustible en ambos reactores, en ella se puede observar que el aumento mayor de temperatura se presentó cuando el flujo se redujó al 50%. El mayor aumento correspondió al SFR, con un 1.13% respecto al 0.85% del LFR, para este último caso, la temperatura disminuyó en relación a la temperatura en estado estacionario a partir de 35s.

En el experimento numérico fue posible visualizar el efecto de los coeficientes de reactividad positiva del refrigerante, tal como ocurrió en el caso de la potencia, debido a que al inicio del transitorio, la temperatura mostró un aumento pronunciado que disminuyó en relación al tiempo.

Los cambios en la temperatura del encamisado se muestran en la Figura 5. De acuerdo al gráfico, en ambos reactores se observó un comportamiento similar, atribuido a las características del material, que fue el mismo en ambos casos. Como se esperaba, la mayor temperatura obtenida presentó una disminución de 50% de flujo en el núcleo, i.e., para el SFR la temperatura aumentó en 6.76% y para el LFR 6.49%.

El comportamiento de la temperatura del refrigerante (Figura 6) presentó, al igual que en el encamisado, la máxima temperatura de salida del refrigerante para el 50% de flujo. La tendencia del cambio de temperatura del refrigerante fue similar al del encamisado. Como se aprecia en las Figuras 1 y 2, los perfiles axiales también mostraron coincidencias.

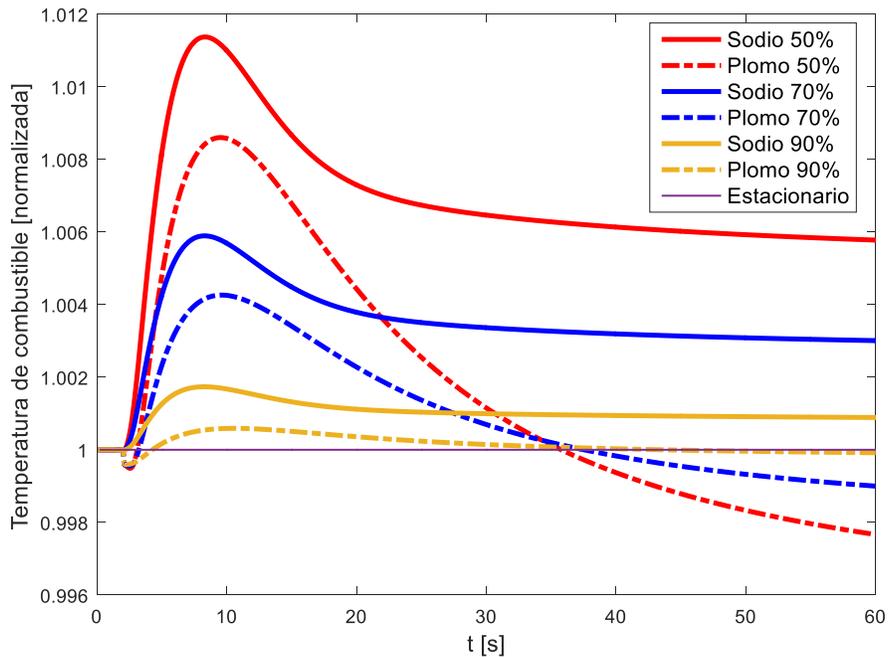


Figura 4. Temperatura del combustible normalizada de un LFR y un SFR durante un ULOF.

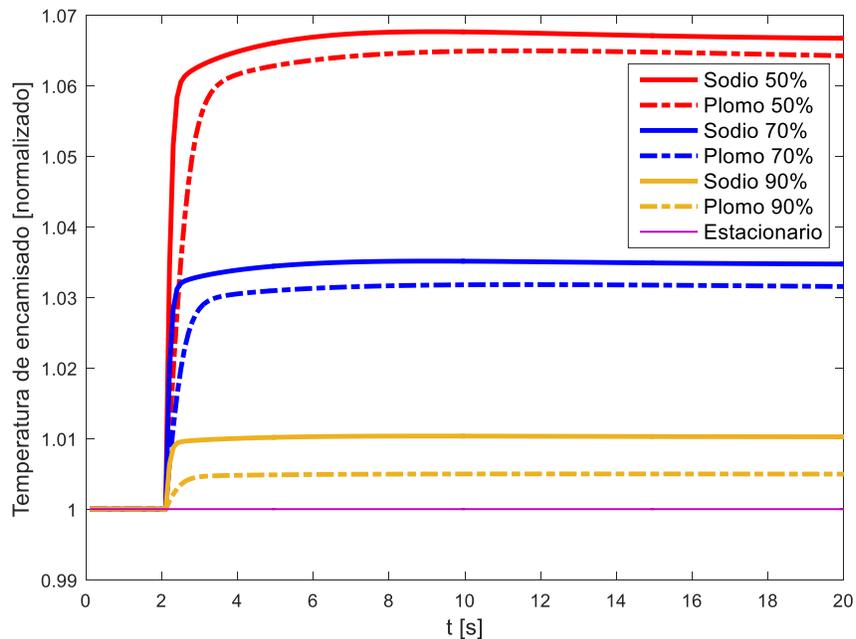


Figura 5. Temperatura del encamisado normalizada de un LFR y un SFR durante un ULOF.

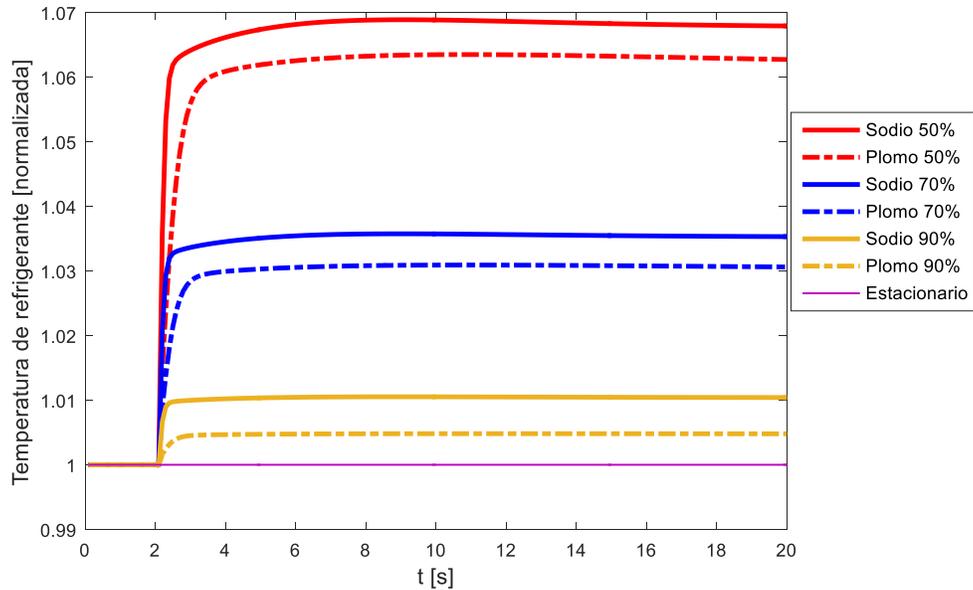


Figura 6. Temperatura del refrigerante normalizada de un LFR y un SFR durante un ULOF.

El cambio en el calor removido por el refrigerante se muestra en la Figura 7. Debido a la reducción de flujo de entrada en los tres experimentos numéricos la capacidad del refrigerante para remover el calor, disminuyó. Como se observa, en el caso del LFR con un flujo del núcleo del 50% se logra, de acuerdo con los cálculos numéricos, obtener una remoción del 91%, 9% menos que en estado estacionario. Para el SFR, la remoción de calor correspondió a un 63% del calor total, lo que indicó que la capacidad de remoción es mayor para el LFR respecto al SFR.

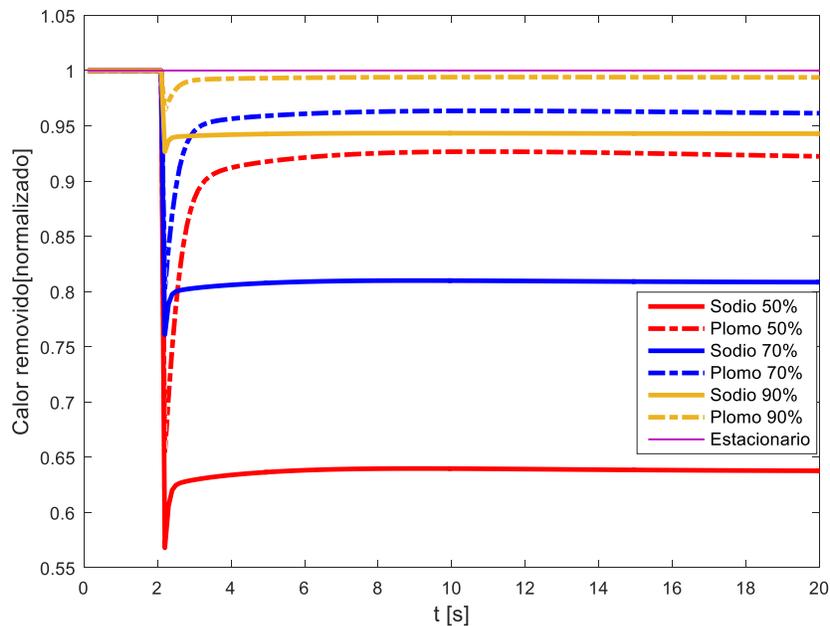


Figura 7. Calor removido normalizada de un LFR y un SFR durante un ULOF.

4. CONCLUSIONES

Al normalizar los valores de potencia, temperatura de combustible, encamisado, refrigerante y calor removido es posible realizar comparaciones entre dos reactores tipo LFR y tipo SFR durante un evento de pérdida del refrigerante (ULOF).

El flujo de entrada al núcleo durante tres experimentos numéricos de pérdida de refrigerante fue de 90%, 70% y 50% del valor nominal. Los coeficientes de reactividad por expansión del refrigerante tienen un efecto de comportamiento de la potencia y de la temperatura del combustible que reflejan el inicio del transitorio (Figuras 3 y 4). En el caso del SFR el coeficiente es positivo suceso que generó un aumento en la potencia durante la disminución del flujo.

Respecto al encamisado la mayor temperatura obtenida, al 50% del flujo en el núcleo, aumentó en 6.76% para el caso del SFR, i.e., alcanzando una temperatura de 828.9 K; mientras que para el LFR fue de 804.8 K que representó un incremento del 6.49%. En ambos casos la temperatura fue menor a la máxima permitida de 1023.15 K. Lo que significa, que bajo estas condiciones, ambos reactores presentarían un margen adecuado de seguridad.

En el caso del refrigerante, los límites térmicos en un evento transitorio son los puntos de ebullición de cada metal. Para el transitorio bajo condiciones al 50% de flujo, el refrigerante alcanzó una temperatura de 794.5 K en el LFR con un límite de 2022 K. Respecto al SFR, el límite máximo fue de 1156 K alcanzando 881.5 K durante el proceso.

Respecto a la remoción de calor, el plomo presentó una mayor capacidad, con una disminución del 9% al 50% de flujo, lo cual significa que remueve el 91% aún bajo estas condiciones. Mientras que el sodio solo mostró la capacidad de remover el 63% del total. Ambos resultados se aprecian en la Figura 7.

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.

REFERENCIAS

1. “Página del Foro Internacional de Generación IV”, https://www.gen4.org/gif/jcms/c_9260/Public (2017).
2. Generation IV International Forum. “Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems”, OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum, (2014).
3. Judd A.M, An introduction to the engineering of fast nuclear reactors, Cambridge University Press, Pág. 8-10. (2014).

4. IAEA “Comparative assessment of thermophysical and thermohydraulic characteristics of lead, lead-bismuth and sodium coolants for fast reactors”, IAEA-TECDOC-1289. IAEA, VIENNA, 2002.
5. Cinotti, L., Smith, G., Artiolo, C., Grasso, G. y Corsini, G. Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) Design, Safety, Neutronics, Thermal Hydraulics, Structural Mechanics, Fuel, Core, and Plant Design. Handbook of Nuclear Engineering. 2749-2840. (2010).
6. Shahzad, M., Qin, L., and Imam S., “Analysis of lead-cooled fast reactor using a core simulator”, Progress in Nuclear Energy, 104, p. 229-241 (2012).
7. Tucek, K., Carlsson, J. y Wider, H., “Comparison of sodium and lead-cooled fast reactors regarding reactor physics aspects, severe safety and economical issues”, Nuclear Engineering and Design, 236, p. 1589-1598 (2006).
8. Grasso, G., Mikityuk, K., Petrovich, C., Mattioli, D., Manni, F., Gugiu, D. “Demonstrating the effectiveness of the European LFR concept: The ALFRED core design”, IAEA-CN-199/312. (2013).
9. Matuzas, V., Ammirabile, L., Cloarec, L., Lemasson, D., Perez-Martin, S. and Ponomarev, “A. Extension of ASTEC-Na capabilities for simulating reactivity effects in Sodium Cooled Fast Reactor” Ann.Nucl. Energy. (2017)
10. Grasso, G., Petrovich, C., Mattioli, D., Artiolo, C., Sciora, P., Gugiu, D., “The core design of ALFRED, a demonstrator for the European lead-cooled reactors”, Nuclear Engineering and Design, 287, p. 287-301. (2014).
11. Waltar, A.E., Todd, D.R., Tsvetkov, P.V., Fast Spectrum Reactors, Springer, New York, 720p. (2012.)