XXXII SIMPOSIO PERUANO DE FÍSICA

1.er Congreso Internacional de Física · UNSA, Arequipa, Perú

Análisis termofísico de la difusión de Xe-He en el transporte de calor y distribución radial de temperatura en combustibles nucleares UO_2 y U_3Si_2

Carlos Macedonio Montañez Montenegro

Ingeniero en Energía, CIP N.° 170167.Posgrado en Ciencias Energéticas, mención en Ingeniería Energética- EPG.(UNS). Posgrado en Física Nuclear-UPG - Ciencias Fisicas- (UNMSM).

Formación en el Centro Superior de Estudios Nucleares (CSEN) -Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), Perú.

Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) – Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Físicas, Lima, Perú.

carlos.montanez1@unmsm.edu.pe

Universidad Nacional del Santa-Departamento de Energia, Fisica y Mecanica-Escuela Profesional de Ingenieria-Nuevo Chimbote- Perú

cmontanez@uns.edu.pe

Universidad Tecnológica del Perú- Campus Chimbote- Perú.

c20186@utp.edu.pe

Resumen

Se analizó el acoplamiento entre la difusión de xenón (Xe) y helio (He) y la transferencia de calor en combustibles nucleares UO_2 y U_3Si_2 mediante un modelo numérico axisimétrico R-Z basado en volúmenes finitos. La conducción térmica se resolvió cuasiestacionariamente en el combustible, la holgura y el revestimiento, mientras que el transporte gaseoso se modeló mediante difusión transitoria. Se evaluaron 12 escenarios térmicos durante 12 días, considerando potencias lineales de 15, 20 y 25 kW/m, con y sin retroalimentación gaseosa. A 25 kW/m, la acumulación de Xe en la holgura alcanzó fracciones de 6,70 % para UO_2 y 5,52 % para U_3Si_2, reduciendo sus conductividades térmicas efectivas a 0,17095 y 0,17255 W/(m·K), respectivamente. Como consecuencia, las temperaturas máximas aumentaron 22,51 K en UO_2 y 13,16 K en U_3Si_2, alcanzando 2017,09 y 1221,90 K. Complementariamente, una simulación de sensibilidad difusiva de 24 días, con temperatura fija, mostró fracciones liberadas de Xe de 2,89 % y 2,36 %, y de He de 56,14 % y 42,66 %, respectivamente, para las difusividades de referencia. Los resultados evidencian que la evolución de la composición gaseosa modifica la resistencia térmica de la holgura y la distribución de temperatura, destacando la importancia del transporte gaseoso en el comportamiento termofísico de ambos combustibles.

Palabras clave: UO_2; U_3Si_2; xenon(Xe); helio(He); difusión; transferencia de calor; volúmenes finitos.

I. Introducción

El combustible nuclear transforma la energía de fisión en calor volumétrico, que se conduce desde el centro de la pastilla hacia el revestimiento y el refrigerante. El UO_2, ampliamente utilizado en reactores de agua ligera, posee una conductividad térmica relativamente baja; por ello, el aumento de potencia acentúa los gradientes radiales, las tensiones térmicas y el posible agrietamiento. El U_3Si_2 presenta mayor densidad de uranio y propiedades termofísicas prometedoras, aunque su respuesta durante la irradiación requiere una evaluación específica (White et al., 2015). Durante la fisión se genera xenón (Xe), que puede permanecer retenido en defectos y burbujas, migrar por el sólido y liberarse hacia la holgura. El helio (He) de llenado, en cambio, se introduce en los espacios libres de la barra combustible, holgura y plenum, no necesariamente en la matriz de la pastilla; mejora la transferencia térmica gaseosa y establece una presión interna inicial. También puede producirse He por procesos nucleares durante la irradiación. La acumulación de Xe en la holgura altera la composición gaseosa y puede disminuir su conductividad efectiva, incrementando la resistencia térmica y la temperatura del combustible (Rest et al., 2019). Este estudio compara UO_2 y U_3Si_2 a 15, 20 y 25 kW/m mediante un modelo axisimétrico R-Z de conducción y difusión de Xe-He. Se examinan la liberación gaseosa, la conductividad de la holgura y la distribución radial de temperatura, diferenciando la campaña térmica acoplada de 12 días del análisis de sensibilidad difusiva de 24 días con campo térmico fijo.

II. Fundamento físico y metodología

El modelo resuelve conducción axisimétrica en combustible, holgura y revestimiento, junto con difusión transitoria de cada gas en el combustible. Se emplean las siguientes expresiones: Se complementa el sistema con la ley de Fick, la conductancia gaseosa simplificada y el balance de flujo superficial, siguiendo el marco de conservación empleado en BISON (Hales et al., 2016).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[rk(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[k(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right] + q''' \quad (1)$$

$$q = -k(T)\nabla T \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \nabla \cdot [D_i(T)\nabla C_i] + S_i \quad (3)$$

$$D_i(T) = D_{0,i}\, exp\left[-\frac{E_{a,i}}{R_g T}\right] \quad (4)$$

$$N_{i,0} + N_{i,gen} = N_{i,retenido} + N_{i,liberado} \quad (5)$$

$$\Delta T_{Xe-He} = T_{máx,acoplado} - T_{máx,desacoplado} \quad (6)$$

$$J_i = -D_i(T)\nabla C_i \quad (7)$$

$$h_g = \frac{k_{g(x_{xe},T_g)}}{\delta_g} \quad (8)$$

$$q''_g = h_g\left(T_{f,s} - T_{c,i}\right) \quad (9)$$

$$q''_s = q'/(2\pi R_f) \quad (10)$$

Donde ρ, densidad (kg/m³); C_p, calor específico [J/(kg·K)]; T, temperatura (K); t, tiempo (s); r y z, coordenadas (m); k, conductividad [W/(m·K)]; q''', fuente térmica (W/m³);$\vec{q}$, flujo térmico (W/m²); C_i, concentración (mol/m³); D_i, difusividad (m²/s); S_i, fuente gaseosa [mol/(m³·s)]; $D_{o,i}$, factor preexponencial (m²/s); $E_{a,i}$, energía de activación (J/mol); R_g, constante de los gases [J/(mol·K)]; N_i, inventario molar (mol); ΔT, incremento térmico (K). J_i, flujo molar difusivo [mol/(m²·s)]; h_g, conductancia gaseosa [W/(m²·K)]; k_g, conductividad de la mezcla [W/(m·K)];δ_g , espesor de holgura (m); $T_{f,s}$ y $T_{c,i}$, temperaturas de superficies enfrentadas (K); q''_g, flujo en holgura (W/m²); q′, potencia lineal (W/m);R_f, radio de combustible (m). Las ecuaciones (8) y (9) representan la aproximación gaseosa sin contacto sólido ni radiación. Se aplicaron volúmenes finitos y difusión implícita, con actualización escalonada de la conductividad de holgura. La simulacion acoplada cubre 12 días; la sensibilidad difusiva, 24 días con temperatura fija.

Tabla 1. Condiciones de cálculo

Parámetro	Valor
Combustibles	UO_2; U_3Si_2
Potencia lineal	15; 20; 25 kW/m
Radio de pastilla	4 mm
Holgura radial	40 µm
Longitud	120 mm
Campaña acoplada	12 días; con/sin retroalimentación
Modelo térmico	R-Z cuasiestacionario
Difusión	Xe-He transitoria; D(T) exploratoria

III. Resultados y discusión

Difusión (24 días, temperatura fija). La sensibilidad de liberación gaseosa se evaluó con 0,1D, D y 10D. El He mostró mayor liberación relativa que el Xe bajo los parámetros adoptados.

Tabla 2. Fracción liberada de gas (%) a los 24 días

Combustible	Gas	0,1D	D	10D
UO_2	Xe	0,46	2,89	13,77
UO_2	He	16,62	56,14	91,81
U_3Si_2	Xe	0,36	2,36	9,78
U_3Si_2	He	13,28	42,66	84,07

[*Nota*]:Transporte de calor (12 días). La mayor fracción de Xe en holgura redujo su conductividad efectiva en el modelo, elevando la resistencia térmica. El flujo superficial equivalente medio se calculó como q″ = q′/(2πR), con R = 4 mm: 0,597; 0,796 y 0,995 MW/m² para 15; 20 y 25 kW/m, respectivamente.

Tabla 3. Conductividad de holgura y fracción de Xe al día 12

Combustible	q′ (kW/m)	k_h [W/(m·K)]	Xe (%)
UO_2	15	0,17890	0,82
UO_2	20	0,17621	2,80
UO_2	25	0,17095	6,70
U_3Si_2	15	0,17909	0,68
U_3Si_2	20	0,17681	2,36
U_3Si_2	25	0,17255	5,52

[*Nota*]:Distribución radial de temperatura (12 días). El máximo se localizó en el interior del combustible y la temperatura descendió hacia la periferia. El U_3Si_2 alcanzó menores temperaturas máximas bajo las propiedades adoptadas.

Tabla 4. Respuesta térmica máxima al día 12

Combustible	q′	Sin Xe–He (K)	Con Xe–He (K)	ΔT (K)
UO_2	15	1344,56	1345,92	1,36
UO_2	20	1653,78	1660,57	6,79
UO_2	25	1994,59	2017,09	22,50
U_3Si_2	15	952,21	953,13	0,92
U_3Si_2	20	1079,62	1083,99	4,37
U_3Si_2	25	1208,74	1221,90	13,16

[*Nota*]:A 25 kW/m, los incrementos relativos de temperatura fueron aproximadamente 1,13 % en UO_2 y 1,09 % en U_3Si_2.

IV. Conclusiones

La difusión y liberación de Xe-He modificaron la composición y conductividad de la holgura, incrementando la temperatura máxima entre 1,36 y 22,51 K para UO_2 y entre 0,92 y 13,16 K para-U_3Si_2 en el intervalo de 15-25 kW/m. A 25 kW/m, las temperaturas máximas acopladas fueron 2017,09 K y 1221,90 K, respectivamente. La sensibilidad de la liberación a la difusividad fue elevada, particularmente para He. El flujo superficial medio estuvo determinado por la potencia impuesta; el efecto gaseoso se manifestó principalmente en la resistencia térmica y en las temperaturas. Los mapas 3D son reconstrucciones de campos axisimétricos y los parámetros deben contrastarse con datos experimentales y bibliográficos específicos.

Figuras de temperatura y difusión

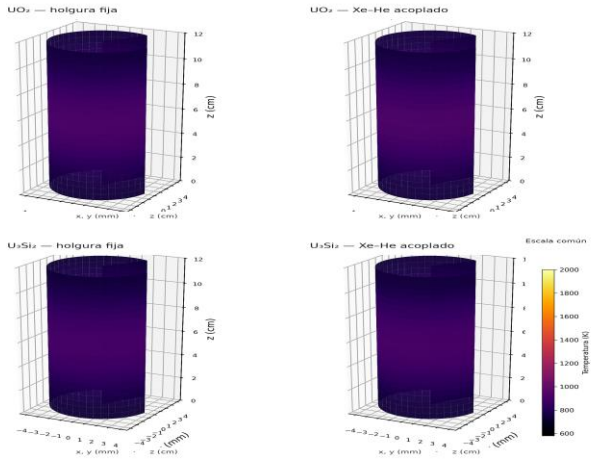


Figura 1. Temperatura reconstruida en 3D desde campos R-Z

Las reconstrucciones tridimensionales de los campos térmicos R-Z muestran que el UO_2 alcanza temperaturas superiores al U_3Si_2 bajo las condiciones simuladas. A 20 kW/m, las temperaturas máximas con retroalimentación gaseosa fueron de 1660,57 K y 1083,99 K, respectivamente. La incorporación del acoplamiento Xe-He incrementó estas temperaturas en 6,79 K para UO_2 y 4,37 K para U_3Si_2, evidenciando la influencia de la resistencia térmica de la holgura sobre la respuesta del combustible.

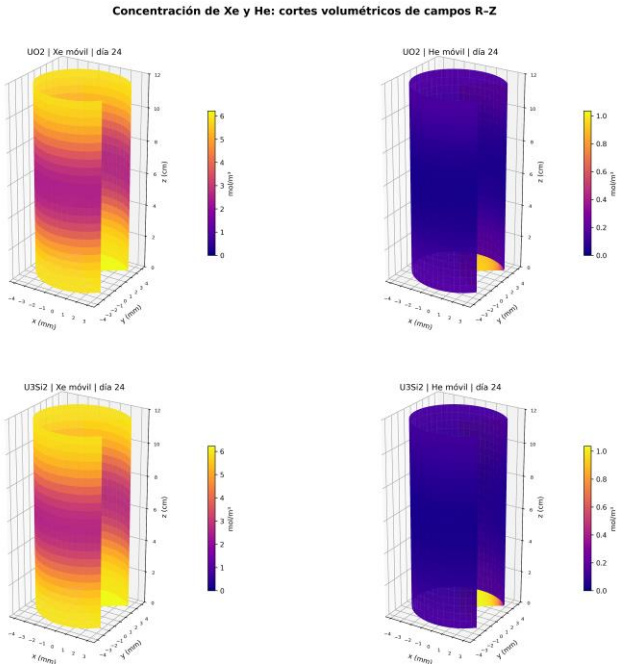


Figura 2. Concentraciones móviles de Xe y He a 24 días; campo térmico fijo.

[$Nota$]:En las imágenes se representan la distribución espacial de las concentraciones móviles de Xe y He en combustibles UO_2 y U_3Si_2 después de 24 días de simulación, bajo un campo térmico fijo. En ambos combustibles, el Xe (cilindros izquierdos) presenta una distribución no uniforme, con concentraciones aproximadas entre 0 y 6 mol/m³, mayores en las regiones próximas a los extremos axiales y menores en la zona central. Por su parte, el He muestra concentraciones predominantemente bajas, con valores próximos a cero en gran parte del dominio y máximos localizados cerca de la región inferior, según una escala de 0 a 1 mol/m³. Las distribuciones son visualmente semejantes entre ambos combustibles, aunque sus fracciones de liberación difieren: en UO_2 alcanzan 2,89 % para Xe y 56,14 % para He, mientras que en U_3Si_2 son de 2,36 % y 42,66 %, respectivamente. Estos resultados evidencian diferencias en el comportamiento difusivo de ambas especies bajo los parámetros numéricos adoptados, con mayor liberación relativa de He y mayores fracciones liberadas en UO_2.

Figuras de transporte y sensibilidad

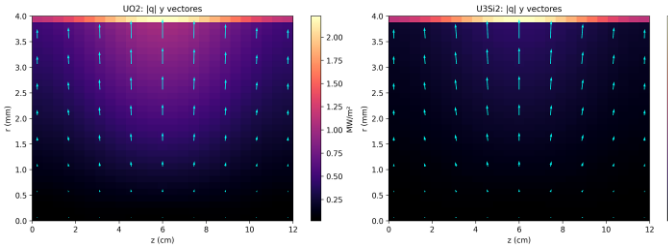


Figura 3. Campo vectorial de flujo de calor obtenido con la ley de Fourier.

[$Nota$]: Los campos vectoriales calculados mediante la ley de Fourier permiten identificar la dirección del transporte térmico desde el interior del combustible hacia su periferia. El flujo superficial equivalente medio aumenta proporcionalmente con la potencia lineal, alcanzando 0,995 MW/m² a 25 kW/m. La retroalimentación gaseosa modifica principalmente la resistencia térmica y la distribución de temperatura, sin alterar la potencia térmica impuesta.

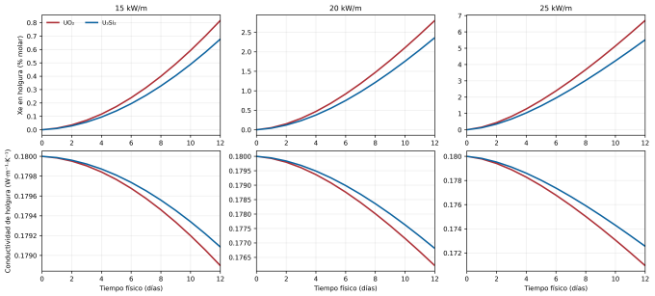


Figura 4. Evolución temporal de Xe en holgura y su conductividad a 15, 20 y 25 kW/m.

[$Nota$]:Los resultados muestran que el incremento de la fracción de Xe en la holgura produce una reducción progresiva de su conductividad térmica efectiva. Este comportamiento se intensifica al aumentar la potencia lineal. A 25 kW/m, las conductividades calculadas disminuyen hasta 0,17095 W/(m·K) para UO_2 y 0,17255 W/(m·K) para U_3Si_2, favoreciendo el incremento de la temperatura del combustible.

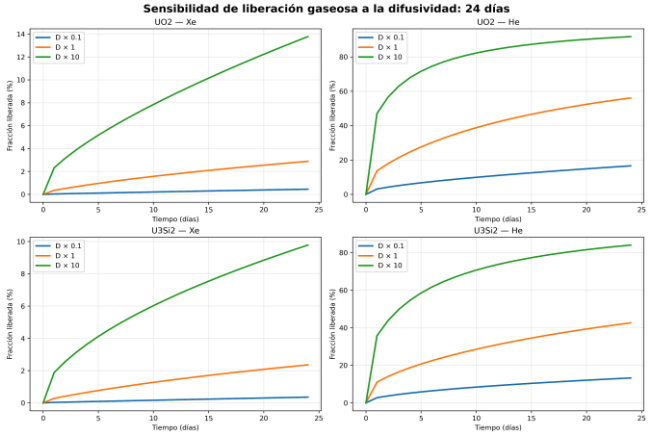


Figura 5. Sensibilidad de liberación de Xe y He a tres multiplicadores de difusividad.

[$Nota$]:El análisis paramétrico evidencia una dependencia no lineal de la fracción liberada respecto de la difusividad. Al aumentar el coeficiente de difusión de 0,1D a 10D, la liberación de Xe en UO_2 pasa de 0,46 % a 13,77 %, mientras que la de He aumenta de 16,62 % a 91,81 %. Estos resultados destacan la importancia de seleccionar y validar adecuadamente los parámetros difusivos para obtener predicciones confiables del comportamiento gaseoso.

Referencias

Hales, J. D., et al. (2014). Verification of the BISON fuel performance code. Annals of Nuclear Energy, 71, 81-90. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.03.027

White, J. T., et al. (2015). Thermophysical properties of U_3Si_2 to 1773 K. Journal of Nuclear Materials, 464, 275-280.

ASME. (2009). Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer (V&V 20-2009). American Society of Mechanical Engineers.

Rest, J., Cooper, M. W. D., Spino, J., Turnbull, J. A., Van Uffelen, P., & Walker, C. T. (2019). Fission gas release from UO_2 nuclear fuel: A review. Journal of Nuclear Materials, 513, 310-345.

Antonio, D. J., et al. (2018). Thermal and transport properties of U_3Si_2. Journal of Nuclear Materials.

Idaho National Laboratory. (2016). Assessment of U_3Si_2 fuel performance in BISON (INL-EXT-16-40059).

OECD Nuclear Energy Agency. (2015). State-of-the-art report on light water reactor accident-tolerant fuels (NEA/NSC/R(2015)5). OECD/NEA.

OECD Nuclear Energy Agency. (2022). State-of-the-art report on reactivity-initiated accidents: Fuel rod behaviour under RIA conditions. OECD/NEA.