Influencia de la Fracción de Vacíos en la Distribución de Potencia para Dos Diferentes Tipos de Ensambles de Combustible

Sidney Jacinto Castillo[1], Gustavo Alonso Vargas[2], Edmundo del Valle Gallegos[1, 3] y Eduardo Martínez Caballero[2]

1. *Instituto Politécnico Nacional/Escuela Superior de Física y Matemáticas*
Av. Instituto Politécnico Nacional, Edificio 9
Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco
Delegación Gustavo A. Madero, Ciudad de México. C.P. 07738

2. *Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*
Carretera México Toluca-La Marquesa s/n
Ocoyoacac, Estado de México. C.P. 52750

3. *Sabático en Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*
Carretera México Toluca-La Marquesa s/n
Ocoyoacac, Estado de México. C.P. 52750

sid.jc1@gmail.com; gustavo.alonso@inin.gob.mx; evalle@ipn.mx;
eduardo.martinez@inin.gob.mx

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo un análisis de la influencia de la fracción de vacíos en la distribución de potencia, con la finalidad de entender más acerca del proceso de fisión y de la energía producida por el ensamble de combustible tipo BWR. Se analizó el flujo neutrónico rápido considerando neutrones con energías entre 0.625 eV y 10 MeV. Posteriormente se llevó a cabo el análisis del flujo neutrónico térmico en un rango de entre 0.005 eV y 0.625 eV. Así mismo también se analizó sus posibles implicaciones en la distribución de potencia de la celda de combustible. Dichos análisis se llevaron a cabo para diferentes valores de fracción de vacíos: 0.2, 0.4 y 0.8. Así mismo también se estudiaron sus variaciones en distintos pasos de quemado: 20, 40 y 60 MWd/kg. Estos valores fueron estudiados en dos diferentes tipos de celdas de combustible: GE-12 y SVEA-96, con un enriquecimiento inicial promedio de 4.11 %.

1. INTRODUCCIÓN

El principio básico de una central del tipo BWR es la obtención de vapor que es producido por la ebullición del agua. En la parte baja del núcleo el agua entra con ciertas condiciones y va aumentando su temperatura mediante el paso a través de los ensambles combustibles hasta convertirse en vapor. El proceso de fisión que se lleva cabo en los elementos combustibles libera

energía calorífica. Esta energía calorífica calienta el agua generando un flujo en dos fases, agua y vapor, hasta tener a la salida del reactor únicamente vapor, este vapor se emplea para mover una turbina y, finalmente, esta energía mecánica se convierte en energía eléctrica mediante un generador [1].

En el diseño térmico del núcleo, se busca extraer la mayor cantidad posible de calor del combustible, sin exceder los límites térmicos del combustible ni del encamisado, maximizando el área de contacto entre el combustible y el refrigerante [2]. Los ensambles de combustible son fabricados por diferentes proveedores, teniendo cada uno diferentes configuraciones geométricas y dando como resultado diferentes distribuciones de potencia. Actualmente, algunos diseños de ensambles de combustible son construidos en arreglos cuadrados con diez barras por lado, como los ensambles de combustible tipo GE-12 y SVEA-96 [3], mostrados en la Figura 1.

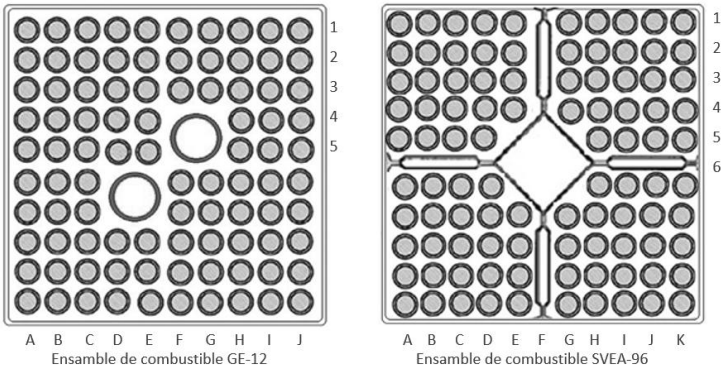

Figura 1. Ensambles de combustible con posiciones de barras de combustible

La fracción de vacíos (VF) se define como la razón de volumen ocupado por el vapor al volumen ocupado por la mezcla de vapor y líquido [4]. La cantidad de vacíos impacta en el factor de multiplicación efectiva, y la cantidad de potencia que generará cada varilla de combustible. Fracciones típicas de vacíos son de aproximadamente 0.38 en promedio para el núcleo, y de 0.75 para canales de combustible en la parte alta de los mismos. El factor pico local se define como la barra de mayor potencia normalizada en una celda de combustible [5].

La tecnología de los combustibles para reactores de agua ligera existe desde hace más de 50 años [6]. Los actuales diseños existentes proveen un alto nivel de utilización económica y desarrollo confiable del combustible. Por otro lado, existe aún la necesidad de entender diversos mecanismos referentes a los efectos de los combustibles respecto al quemado de los mismos. Existe aún el potencial para un mejor desarrollo hacia una mejor economía y mayor confianza.

2. METODOLOGÍA

Para poder llevar a cabo el análisis neutrónico de los ensambles de combustible se empleó el código CASMO-4 [7]. Este código resuelve numéricamente la ecuación de transporte de neutrones en multigrupos en dos dimensiones y es utilizado para calcular el quemado de los

ensambles o de celdas de combustible para reactores de agua ligera (LWR, por sus siglas en inglés). El código maneja una geometría consistente de barras de combustible cilíndricas con diferentes composiciones posibles en un arreglo de pitch cuadrado, el cual permite barras de combustible cargadas con gadolinio, erbio, canales de agua, entre otros. Además, se pueden establecer las características deseadas a calcular por el código con ayuda de las tarjetas correspondientes en el archivo de entrada, tales como la tarjeta VOI para definir el porcentaje promedio de vacíos en el refrigerante, o la tarjeta DEP para indicar los puntos de quemado.

La posición exacta de cada una de las fracciones de vacíos propuestas varía conforme el refrigerante recorre los ensambles de combustible axialmente, iniciando en 0 al entrar y alcanzando una fracción de vacíos de alrededor de 0.8 en la parte superior del ensamble de combustible. Para este estudio se analizaron valores de fracciones de vacíos de 0.2, 0.4 y 0.8, con pasos de quemado de 20, 40 y 60 MWd/kg. Estas condiciones fueron evaluadas en dos tipos de celdas de combustible: GE-12 y SVEA-96, con un enriquecimiento inicial promedio de 4.11 %.

Se utilizó como base una celda de combustible del tipo GE-12 de un ciclo de operación de una central nuclear con reactores tipo BWR. Las celdas tipo SVEA-96 fueron creadas para este trabajo utilizando características similares a las presentadas por las celdas tipo GE-12.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La celda de combustible tipo GE-12 fue tomada de un ciclo de operación de un reactor tipo BWR. En la Tabla I se presentan algunos resultados obtenidos del flujo neutrónico rápido, como es el factor de normalización general del flujo neutrónico, el factor del flujo neutrónico rápido máximo, el factor promedio del mismo, y sus equivalencias obtenidas, para pasos de quemado (BURNUP) de 20, 40 y 60 MWd/kg con fracciones de vacíos de 0.2, 0.4 y 0.8. Debido a la simetría en la celda de combustible tipo GE-12, se presentan los resultados de la fila 1 a la 5 y de la columna A hasta la J, incluyendo uno de los canales de agua.

Las gráficas de los resultados del flujo neutrónico rápido a 20, 40 y 60 MWd/kg con fracciones de vacíos de 0.2, 0.4 y 0.8 son presentados en las Figuras 2, 3 y 4, con un enriquecimiento inicial promedio de 4.11 %. Los factores picos se encontraron principalmente entre la posición 4-D y la posición 5-I, posiciones indicadas previamente en la Figura 1. Igualmente se observa que la tendencia indica una mayor concentración de neutrones rápidos en las zonas donde se encuentran las barras de combustible. Esto concuerda con que los neutrones rápidos son los primeros en nacer de la fisión. Por otro lado, se observa una disminución gráfica del flujo neutrónico rápido en la zona central de las celdas de combustible concordando con el canal de agua, ya que el agua es moderador de los neutrones rápidos. Finalmente, se aprecia que el flujo neutrónico rápido promedio en la celda mostró un aumento al incrementar los pasos de quemado para cada escenario de fracción de vacíos estudiado, sin embargo, el flujo disminuyó conforme la fracción de vacíos se incrementó.

Tabla I. Factor de flujo neutrónico, y flujos neutrónicos rápidos promedio y máximo en la celda de combustible tipo GE-12, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2, 0.4 y 0.8

VF	BURNUP (MWd/kg)	Factor de normalización del flujo neutrónico (n/cm^2s)	Factor de flujo máximo	Flujo neutrónico rápido máximo (n/cm^2s)	Factor promedio rápido	Flujo neutrónico rápido promedio (n/cm^2s)
0.2	20	1.016×10^{15}	1.148	1.167×10^{15}	1.118	1.137×10^{15}
0.2	40	1.050×10^{15}	1.155	1.212×10^{15}	1.121	1.177×10^{15}
0.2	60	1.081×10^{15}	1.149	1.242×10^{15}	1.116	1.207×10^{15}
0.4	20	1.019×10^{15}	1.134	1.155×10^{15}	1.108	1.129×10^{15}
0.4	40	1.051×10^{15}	1.139	1.197×10^{15}	1.109	1.167×10^{15}
0.4	60	1.080×10^{15}	1.135	1.226×10^{15}	1.106	1.195×10^{15}
0.8	20	1.025×10^{15}	1.108	1.135×10^{15}	1.087	1.114×10^{15}
0.8	40	1.055×10^{15}	1.107	1.168×10^{15}	1.086	1.146×10^{15}
0.8	60	1.079×10^{15}	1.105	1.193×10^{15}	1.084	1.171×10^{15}

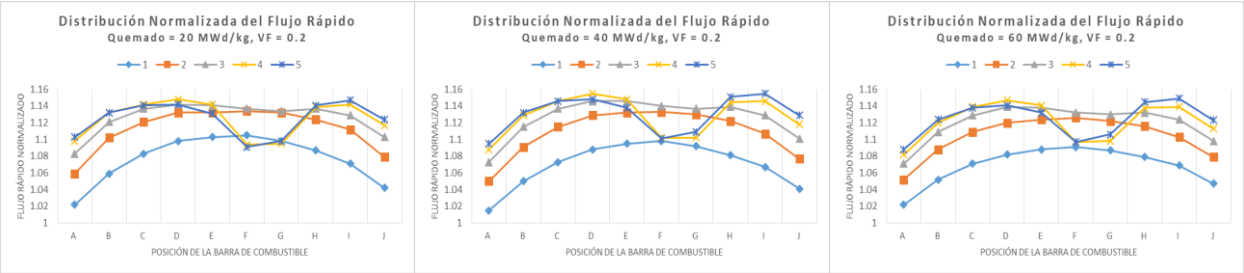

Figura 2. Flujo neutrónico rápido normalizado en una celda de combustible tipo GE-12 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2

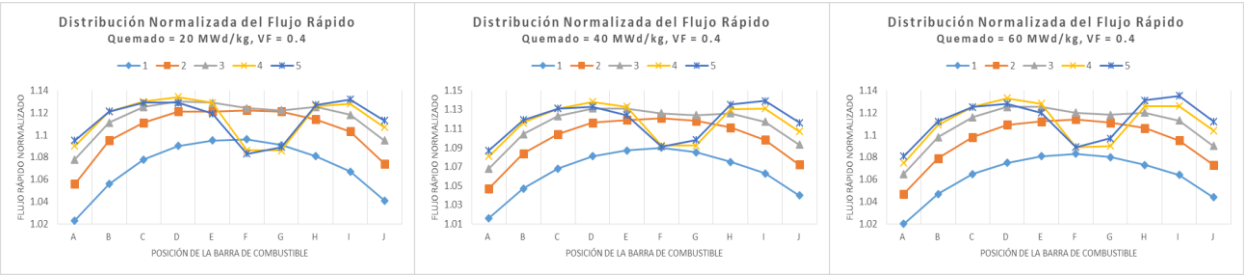

Figura 3. Flujo neutrónico rápido normalizado en una celda de combustible tipo GE-12 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.4

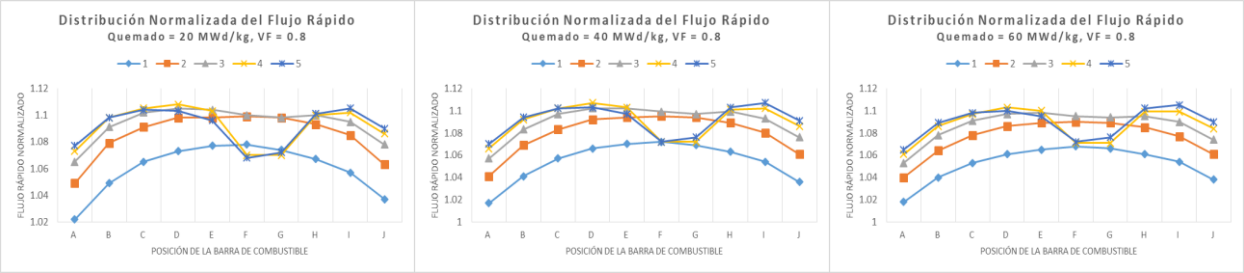

Figura 4. Flujo neutrónico rápido normalizado en una celda de combustible tipo GE-12 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.8

En la Tabla II se presentan el factor de normalización general del flujo neutrónico, el factor del flujo neutrónico térmico máximo, el factor promedio del mismo, y sus equivalencias obtenidas a 20, 40 y 60 MWd/kg con fracciones de vacíos de 0.2, 0.4 y 0.8. En las Figuras 5, 6 y 7 se muestran los gráficos correspondientes al flujo neutrónico térmico a 20, 40 y 60 MWd/kg con fracciones de vacíos de 0.2, 0.4 y 0.8, con un enriquecimiento inicial promedio de 4.11 %.

Tabla II. Factor de flujo neutrónico, y flujos neutrónicos térmicos promedio y máximo en la celda de combustible tipo GE-12, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2, 0.4 y 0.8

VF	BURNUP (MWd/kg)	Factor de normalización del flujo neutrónico (n/cm^2s)	Factor de flujo máximo	Flujo térmico máximo (n/cm^2s)	Factor promedio térmico	Flujo térmico promedio (n/cm^2s)
0.2	20	1.016×10^{15}	0.9	0.915×10^{15}	0.485	0.494×10^{15}
0.2	40	1.050×10^{15}	0.915	0.960×10^{15}	0.521	0.547×10^{15}
0.2	60	1.081×10^{15}	0.916	0.990×10^{15}	0.561	0.607×10^{15}
0.4	20	1.019×10^{15}	0.896	0.913×10^{15}	0.469	0.478×10^{15}
0.4	40	1.051×10^{15}	0.913	0.960×10^{15}	0.498	0.524×10^{15}
0.4	60	1.080×10^{15}	0.915	0.988×10^{15}	0.532	0.575×10^{15}
0.8	20	1.025×10^{15}	0.87	0.891×10^{15}	0.433	0.443×10^{15}
0.8	40	1.055×10^{15}	0.886	0.935×10^{15}	0.448	0.472×10^{15}
0.8	60	1.079×10^{15}	0.893	0.964×10^{15}	0.467	0.504×10^{15}

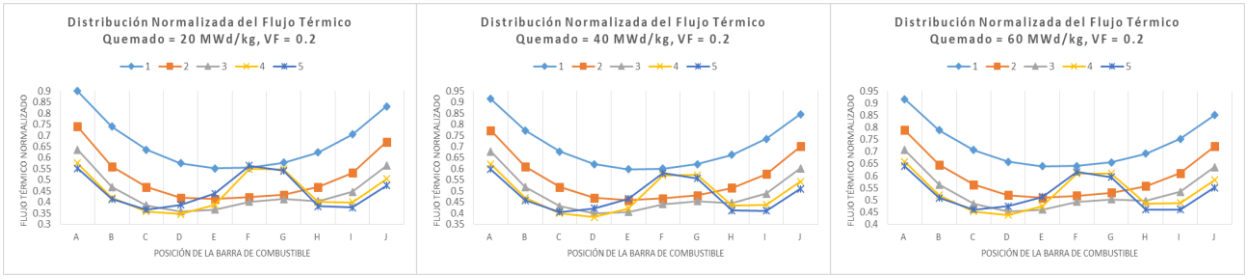

Figura 5. Flujo neutrónico térmico normalizado en una celda de combustible tipo GE-12 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2

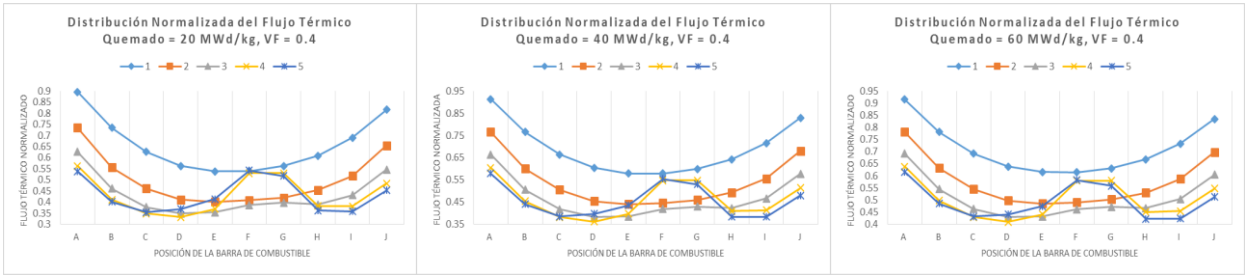

Figura 6. Flujo neutrónico térmico normalizado en una celda de combustible tipo GE-12 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.4

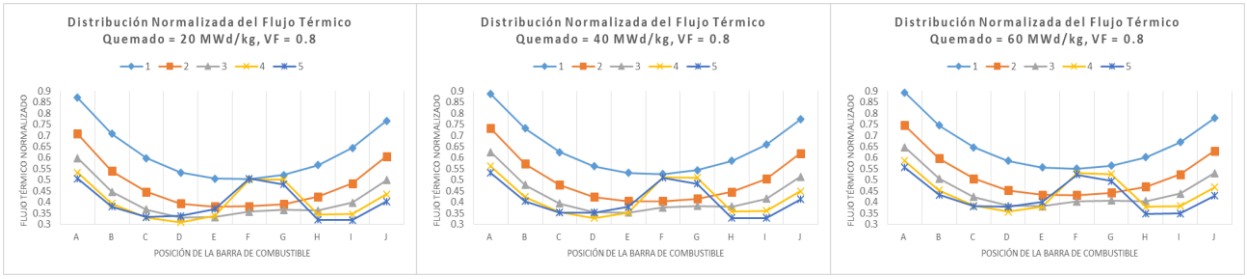

Figura 7. Flujo neutrónico térmico normalizado en una celda de combustible tipo GE-12 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.8

Los neutrones térmicos son neutrones rápidos moderados, por lo que la mayor concentración se observa hacia la periferia del ensamble, siendo toda la línea 1 la que registró los mayores valores para el flujo neutrónico térmico. De manera general, en todas las líneas se observaron mayores valores para el flujo térmico sobre las columnas A y J, exceptuando las líneas donde se encontraban el canal de agua (líneas 4 y 5). En dichas líneas, se observó un aumento del flujo neutrónico sobre las columnas F y G, superando incluso los valores registrados en la periferia. Se observó igualmente que los factores picos se encontraron principalmente en la posición 1-A para cada escenario estudiado. Conforme la fracción de vacíos incrementa, se observó que el flujo

neutrónico térmico promedio en la celda disminuyó ya que, al haber mayor cantidad de vapor, la moderación neutrónica es menor.

En la Tabla III se presentan los valores de los factores pico y promedio en la distribución de potencia para la potencia lineal (LL) y el flujo de calor superficial (HSF) en la celda de combustible tipo GE-12, a 20, 40 y 60 MWd/kg con fracciones de vacíos de 0.2, 0.4 y 0.8. De la Figura 8 a la Figura 10 se muestran los gráficos correspondientes a la distribución de potencia normalizada para cada una de las celdas presentadas anteriormente de la Figura 2 a la 7.

La variación en la potencia lineal y en el flujo de calor superficial en los escenarios estudiados es de aproximadamente $1x10^{-3}$ %. La distribución de potencia normalizada se observó constante para cada uno de los escenarios estudiados.

Tabla III. Factores de normalización de potencia de la celda de combustible tipo GE-12 a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2, 0.4 y 0.8

VF	BURNUP (MWd/kg)	Factor Pico	LL pico (w/cm)	LL promedio (w/cm)	HSF pico (w/cm^2)	HSF promedio (w/cm^2)
0.2	20	1.129	157.7	139.681	49.1	43.489
0.2	40	1.077	150.5	139.740	46.9	43.546
0.2	60	1.068	149.2	139.700	46.5	43.539
0.4	20	1.141	159.4	139.702	49.6	43.470
0.4	40	1.07	149.5	139.719	46.6	43.551
0.4	60	1.084	151.4	139.667	47.1	43.450
0.8	20	1.168	163.2	139.726	50.8	43.493
0.8	40	1.088	151.9	139.613	47.3	43.474
0.8	60	1.148	160.4	139.721	50	43.554

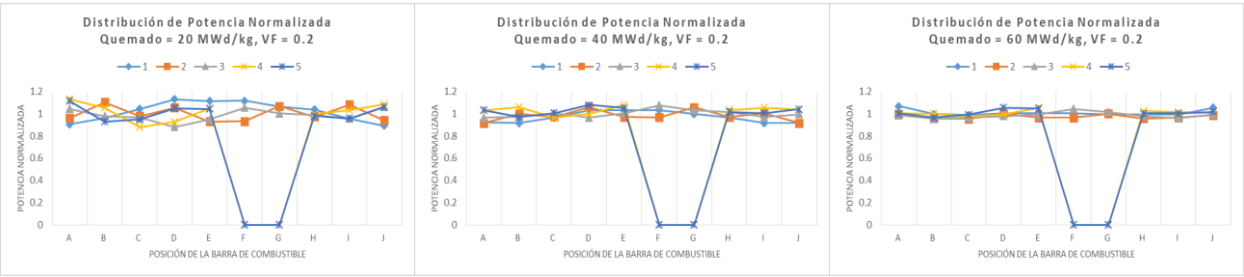

Figura 8. Distribución de potencia normalizada en una celda de combustible tipo GE-12 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2

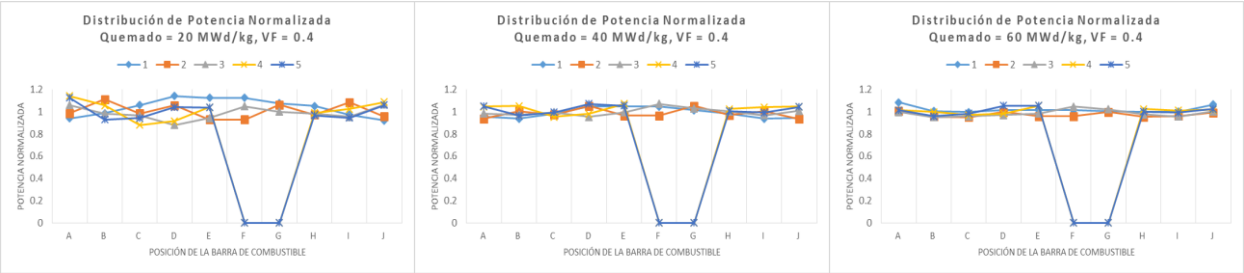

Figura 9. Distribución de potencia normalizada en una celda de combustible tipo GE-12 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.4

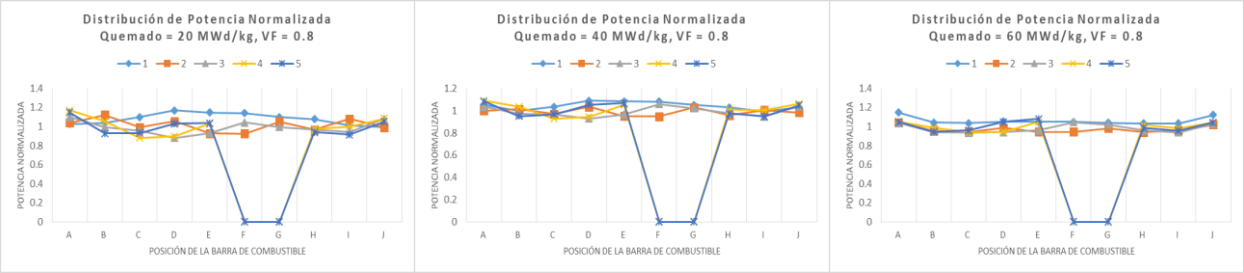

Figura 10. Distribución de potencia normalizada en una celda de combustible tipo GE-12 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.8

Tabla IV. Factor de flujo neutrónico y flujos neutrónicos rápidos promedio y máximo en la celda de combustible tipo SVEA-96, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2, 0.4 y 0.8

VF	BURNUP (MWd/kg)	Factor de normalización del flujo neutrónico (n/cm^2s)	Factor de flujo máximo	Flujo neutrónico rápido máximo (n/cm^2s)	Factor promedio rápido	Flujo neutrónico rápido promedio (n/cm^2s)
0.2	20	9.177×10^{14}	1.139	1.045×10^{15}	1.101	1.011×10^{15}
0.2	40	9.492×10^{14}	1.144	1.085×10^{15}	1.102	1.046×10^{15}
0.2	60	9.819×10^{14}	1.135	1.114×10^{15}	1.096	1.076×10^{15}
0.4	20	9.200×10^{14}	1.126	1.035×10^{15}	1.093	1.005×10^{15}
0.4	40	9.504×10^{14}	1.13	1.074×10^{15}	1.093	1.039×10^{15}
0.4	60	9.805×10^{14}	1.123	1.101×10^{15}	1.089	1.067×10^{15}
0.8	20	9.255×10^{14}	1.101	1.018×10^{15}	1.075	9.957×10^{14}
0.8	40	9.539×10^{14}	1.101	1.050×10^{15}	1.075	1.025×10^{15}
0.8	60	9.786×10^{14}	1.097	1.073×10^{15}	1.072	1.049×10^{15}

Las celdas tipo SVEA-96 fueron creadas para este trabajo utilizando lo más posible las características presentadas en las celdas tipo GE-12, manteniendo la mayoría de las barras de combustible y promediando aproximadamente el mismo enriquecimiento inicial promedio que la celda de combustible tipo GE-12 previamente simulada.

En la Tabla IV se presenta el factor de normalización general del flujo neutrónico, el factor máximo del flujo neutrónico rápido, el factor promedio del mismo, y sus equivalencias obtenidas, para pasos de quemado (BURNUP) de 20, 40 y 60 MWd/kg con fracciones de vacíos (VF) de 0.2, 0.4 y 0.8. Debido a la simetría en la celda de combustible tipo SVEA-96, se presentan los resultados de la fila 1 a la 6 y de la columna A hasta la K, incluyendo la mitad del diamante de agua.

Los resultados del flujo neutrónico rápido a 20, 40 y 60 MWd/kg con fracciones de vacíos de 0.2, 0.4 y 0.8 son presentados de la Figura 11 a la Figura 13. El factor pico se encontró siempre en la posición 4-I para todos los escenarios evaluados.

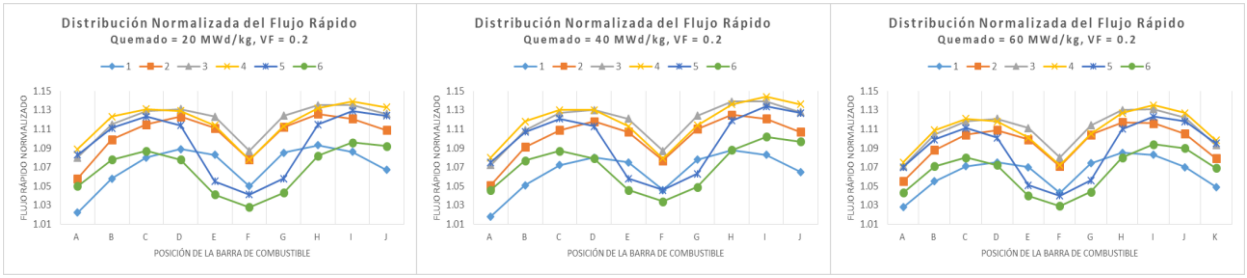

Figura 11. Flujo neutrónico rápido normalizado en una celda de combustible tipo SVEA-96 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2

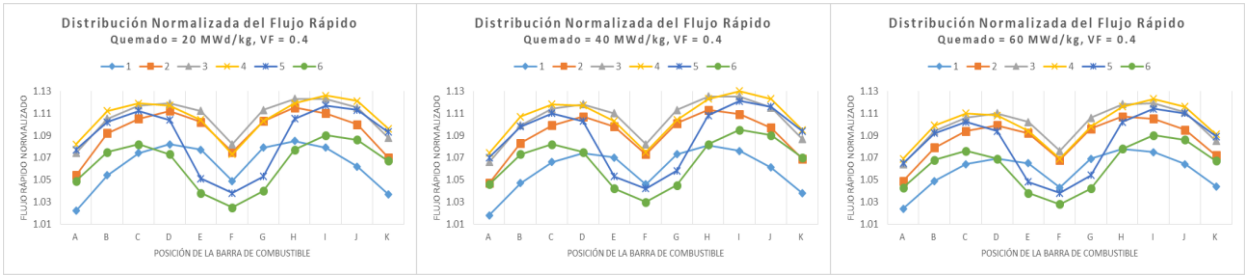

Figura 12. Flujo neutrónico rápido normalizado en una celda de combustible tipo SVEA-96 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.4

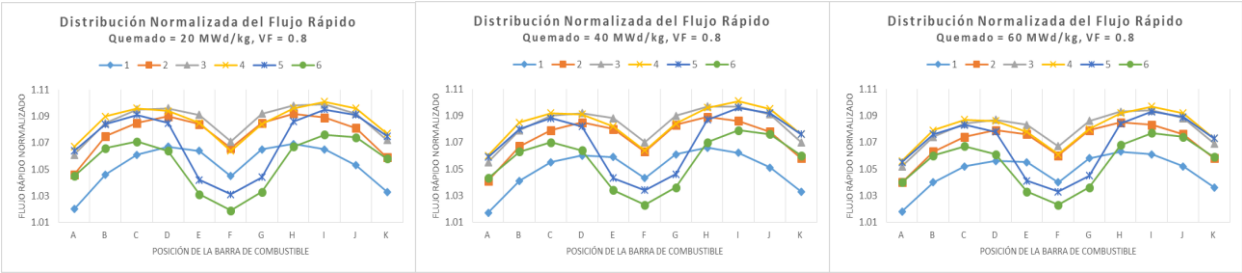

Figura 13. Flujo neutrónico rápido normalizado en una celda de combustible tipo SVEA-96 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.8

En la Tabla V se presentan el factor de normalización general del flujo neutrónico, el factor máximo del flujo neutrónico térmico, el factor promedio del mismo, y sus equivalencias obtenidas a 20, 40 y 60 MWd/kg con fracciones de vacíos de 0.2, 0.4 y 0.8.

Tabla V. Factor de flujo neutrónico, y flujos neutrónicos térmicos promedio y máximo en la celda de combustible tipo SVEA-96, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2, 0.4 y 0.8

VF	BURNUP (MWd/kg)	Factor de normalización del flujo neutrónico (n/cm^2s)	Factor de flujo máximo	Flujo térmico máximo (n/cm^2s)	Factor promedio térmico	Flujo térmico promedio (n/cm^2s)
0.2	20	9.177×10^{14}	0.913	8.378×10^{14}	0.584	5.359×10^{14}
0.2	40	9.492×10^{14}	0.919	8.723×10^{14}	0.628	5.969×10^{14}
0.2	60	9.819×10^{14}	0.939	9.220×10^{14}	0.676	6.647×10^{14}
0.4	20	9.200×10^{14}	0.91	8.372×10^{14}	0.567	5.216×10^{14}
0.4	40	9.504×10^{14}	0.914	8.687×10^{14}	0.605	5.759×10^{14}
0.4	60	9.805×10^{14}	0.931	9.128×10^{14}	0.649	6.368×10^{14}
0.8	20	9.255×10^{14}	0.931	8.616×10^{14}	0.527	4.883×10^{14}
0.8	40	9.539×10^{14}	0.933	8.900×10^{14}	0.552	5.267×10^{14}
0.8	60	9.786×10^{14}	0.942	9.219×10^{14}	0.582	5.699×10^{14}

De la Figura 14 a la 16 se muestran los gráficos correspondientes al flujo neutrónico térmico normalizado. El factor pico para el flujo neutrónico térmico se encontró siempre en la posición 6-F.

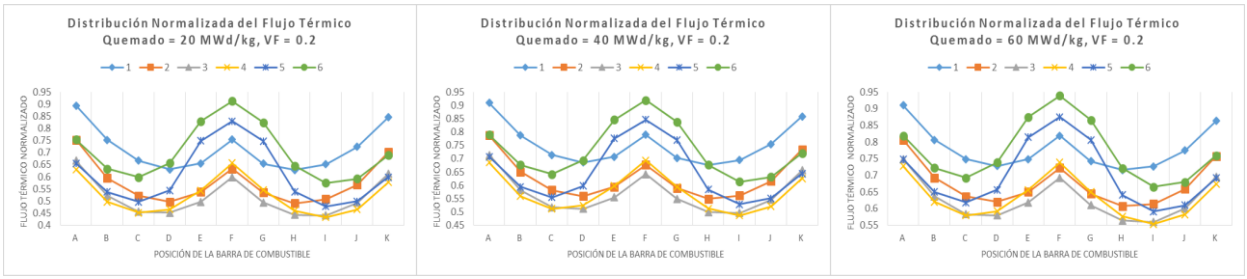

Figura 14. Flujo neutrónico térmico normalizado en una celda de combustible tipo SVEA-96 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2

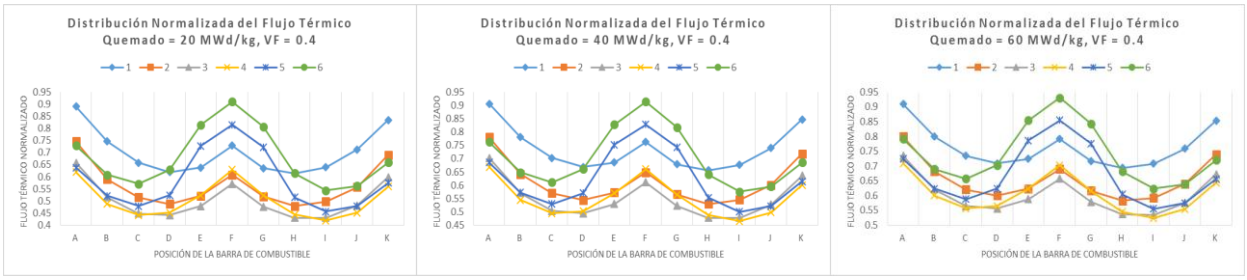

Figura 15. Flujo neutrónico térmico normalizado en una celda de combustible tipo SVEA-96 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.4

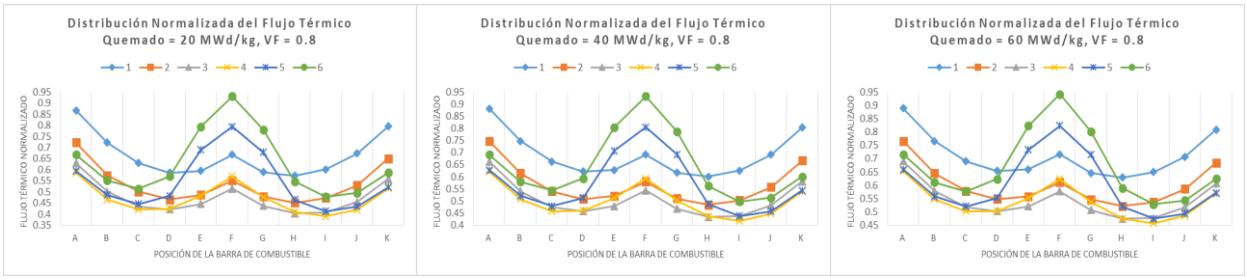

Figura 16. Flujo neutrónico térmico normalizado en una celda de combustible tipo SVEA-96 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.8

En la Tabla VI se presentan de los valores de los factores pico y promedio en la distribución de potencia para la potencia lineal (LL) y el flujo de calor superficial (HSF) en la celda de combustible tipo SVEA-96, a 20, 40 y 60 MWd/kg con fracciones de vacíos de 0.2, 0.4 y 0.8.

Tabla VI. Factores de normalización de potencia de la celda de combustible tipo SVEA-96, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2, 0.4 y 0.8

VF	BURNUP (MWd/kg)	Factor Pico	LL pico (w/cm)	LL promedio (w/cm)	HSF pico (w/cm^2)	HSF promedio (w/cm^2)
0.2	20	1.141	138.4	121.297	45.7	40.052
0.2	40	1.1	133.4	121.272	44.1	40.0909
0.2	60	1.049	127.2	121.258	42	40.038
0.4	20	1.135	137.8	121.409	45.5	40.088
0.4	40	1.103	133.8	121.305	44.2	40.072
0.4	60	1.057	128.2	121.286	42.3	40.018
0.8	20	1.15	139.5	121.304	46.1	40.086
0.8	40	1.11	134.7	121.351	44.5	40.090
0.8	60	1.088	132	121.323	43.6	40.073

De la Figura 17 a la 19 se muestran los gráficos correspondientes a la distribución de potencia normalizada para cada una de las celdas presentadas anteriormente.

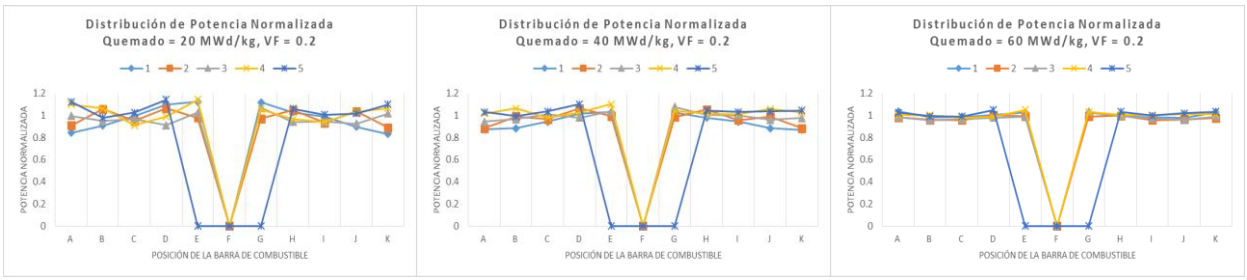

Figura 17. Distribución de potencia normalizada en una celda de combustible tipo SVEA-96 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.2

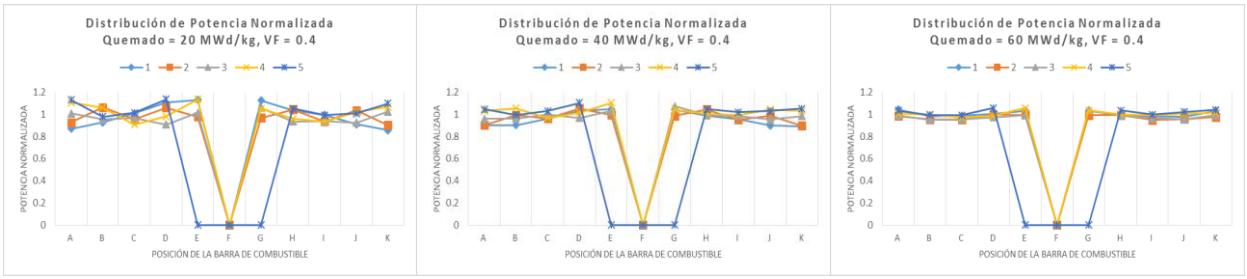

Figura 18. Distribución de potencia normalizada en una celda de combustible tipo SVEA-96 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.4

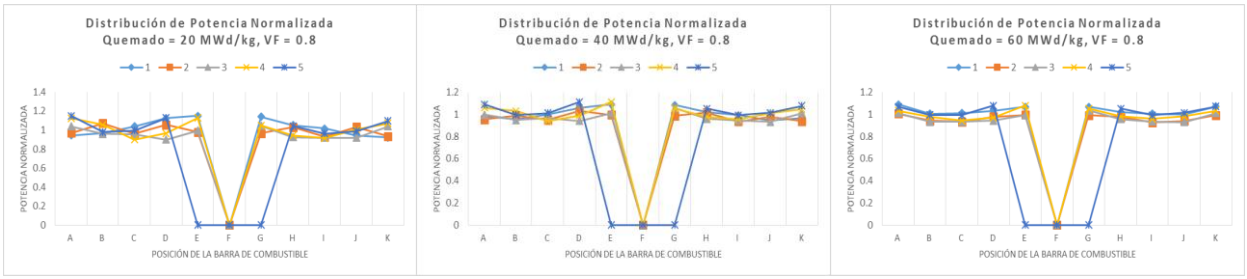

Figura 19. Distribución de potencia normalizada en una celda de combustible tipo SVEA-96 con un enriquecimiento promedio inicial de 4.11 %, a 20, 40 y 60 MWd/kg con VF de 0.8

4. CONCLUSIONES

El comportamiento del flujo neutrónico rápido observado fue mayor en las celdas de combustible tipo GE-12 que en el observado en las celdas tipo SVEA-96 por entre 1 y 2 % respecto a las gráficas normalizadas en cada escenario analizado.

Sin embargo, el comportamiento del flujo neutrónico térmico fue mayor en las celdas de combustible tipo SVEA-96, al tener mayores espacios con agua dentro de la celda en aproximadamente hasta un 1 % respecto a las gráficas normalizadas.

La distribución de potencia en ambas celdas simuladas se observó constante para todos los escenarios estudiados, y con la misma tendencia de comportamiento, ya que al incrementar los pasos de quemado de la celda se va nivelando la potencia que cada barra entrega. Sin embargo, comparando las tablas III y VI, se observa que la celda de combustible tipo GE-12 da los mayores valores tanto para potencia lineal como para flujo de calor superficial, por lo que se podría esperar que dicha celda produzca mayor potencia en un reactor nuclear.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la beca CONACYT otorgada al estudiante Sidney Jacinto para poder realizar sus estudios de maestría.

REFERENCIAS

1. "Página del Servicio Geológico Mexicano", http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/uranio/energianuclear (2014).
2. James H. Rust, *Nuclear Power Plant Engineering*, Haralson Publishing Company, Atlanta, Estados Unidos de América (1979).

3. Dalrymple, "Fuel Review/Design Data", *Nuclear Engineering International*, **57**, p. 42-54 (2012).
4. James J. Duderstadt, Louis J. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, Estados Unidos de América (1976).
5. Neil E. Todreas, Mujid S. Kazimi, *Nuclear Systems Volume 1 Thermal Hydraulic Fundamentals*, Hemisphere Publishing Corporation, Carlsbad, Estados Unidos de América (1990).
6. "Página del Centro Internacional de Física Teórica", http://indico.ictp.it/event/a04215/session/38/contribution/23/material/0/0.pdf (2017).
7. Joel Rhodes, Kord Smith, *CASMO-4*, Studsvik Scandpower, Inc., Newton, Estados Unidos de América (2007).