
Influencia de la Fracción de Vacíos en el Modelo de Reactividad Lineal

José Alejandro Castillo, José Ramón Ramírez, Gustavo Alonso
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Km 36.5 Autopista México-Toluca, Salazar Estado de México
jacm@nuclear.inin.mx; jrs@nuclear.inin.mx; galonso@nuclear.inin.mx

Resumen

El modelo de reactividad lineal permite el análisis de multiciclos en reactores de agua presurizada de una manera sencilla y rápida. En el caso de los reactores de agua en ebullición la fracción de vacíos varía axialmente desde 0% de vacíos en la parte inferior de los ensambles combustibles hasta aproximadamente 70% de vacíos a la salida de los mismos. Debido a esto resulta muy importante la determinación de la fracción de vacíos promedio durante diferentes etapas de operación del reactor para predecir adecuadamente el quemado de los mismos a través del modelo de reactividad lineal. En este trabajo se hace un seguimiento del perfil de potencia para diferentes pasos de quemado de un ciclo típico de operación de un reactor de agua en ebullición. A partir de estos perfiles se construye un algoritmo que permite determinar el perfil de vacíos y así obtener el valor promedio del mismo. Los resultados se comparan contra los reportados por el código CM-PRESTO que emplea otro método para llevar a cabo este cálculo. Finalmente, se determina el rango en el cual se encuentra el valor promedio de la fracción de vacíos durante un ciclo típico y se hace una estimación del impacto que tendría el uso de este valor en la predicción de la reactividad producida por los ensambles de combustible.

1. INTRODUCCIÓN

La variación de la fracción de vacíos en un ensamble de combustible tipo BWR va de 0% en la parte inferior del ensamble hasta alrededor del 70% en la parte superior del mismo. Si consideramos el valor de reactividad para un mismo enriquecimiento de U-235 considerando estos dos valores extremos de la fracción de vacíos se encuentra que existe una diferencia mayor a 2000 pcm de $\Delta\rho$. En particular, esta diferencia debe ser menor a 500 pcm de $\Delta\rho$ para considerar que el error está dentro de un margen razonable que permitirá efectuar predicciones del comportamiento del núcleo de un reactor nuclear cercano a la realidad.

El modelo de reactividad lineal considera al ensamble de combustible como una celda de combustible. Esto quiere decir que convierte el problema de tres dimensiones en dos dimensiones y que además no utiliza las secciones eficaces del ensamble sino que

emplea la reactividad producida por el mismo únicamente. De aquí que resulte de suma importancia tener un valor promedio preciso de la fracción de vacíos para cada paso de quemado ya que la reactividad del ensamble dependerá de la fracción de vacíos considerada.

En este trabajo se hace el seguimiento del perfil axial de potencia de un reactor como función del quemado del ciclo de combustible para construir un algoritmo que permita determinar el perfil de la fracción de vacíos y de aquí determinar el valor promedio de la fracción de vacíos en cada paso de quemado.

El código CM-PRESTO [1] tiene la capacidad de reportar el valor promedio de la fracción de vacíos para cada paso de quemado. Con el objeto de comparar esta predicción del valor promedio de la fracción de vacíos se construye un algoritmo que genera el perfil axial de la fracción de vacíos a partir del perfil de potencia.

Se determina el rango en el cual se encuentra el valor promedio de la fracción de vacíos durante todo el rango del ciclo de operación y se lleva a cabo el cálculo de la reactividad para determinar el rango de variación de la misma y determinar su validez al emplear el modelo de reactividad lineal.

2. CÁLCULO DE LA FRACCIÓN DE VACÍOS

Existen diversas formas de realizar el cálculo del porcentaje de vacíos promedio para un reactor. En ese sentido, la exactitud de dicho cálculo aumentará en la medida en que se tomen en cuenta la mayor parte de variables involucradas en el proceso. El simulador CM-PRESTO [1] emplea los modelos de Bankoff-Malnes [2] y de Chexal-Lellouche [3] para llevar a cabo este tipo de cálculo. En el primero se considera el modelo de dos fases como una mezcla homogénea viajando a la misma velocidad. Supone además un flujo de “burbujas” con un gradiente radial de las mismas a través del canal. Para obtener la fracción de vacíos correspondiente usa el segundo modelo, en el cual se cubre un rango más amplio de presiones y flujos de masa, adicionando diferentes tipos de fluidos (vapor-agua, aire-agua, etc.) y de ángulos de flujo. Tomando la fracción de vacíos como una función de la velocidad total y de vapor superficial.

Por otra parte, el algoritmo desarrollado en este trabajo tiene como objetivo emplear el menor número posible de variables que simplifiquen los cálculos. Para realizar el cálculo se hicieron algunas suposiciones para disminuir la complejidad del mismo. Entre las suposiciones más importantes están las siguientes: presión constante de 71 bars en los 25 nodos del núcleo y el gasto de 7750 kg/s constante, estos datos se tomaron de las condiciones generales de operación reportadas por la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV); adicionalmente se supuso un modelo homogéneo, esto es, se consideró las dos fases (líquido-vapor) como una mezcla homogénea. Posteriormente algunos de los valores que se tomaron como constantes fueron modificados de acuerdo al paso de quemado, con la idea de comparar los resultados y ver las variaciones que se obtenían con las suposiciones hechas al principio.

Para realizar el cálculo se tomaron en cuenta 10 pasos de quemado (Tabla I) con un tamaño de paso de aproximadamente 1000 MW. Los datos se tomaron de la salida de CM-PRESTO para el ciclo 5 de la unidad 1 de la CNLV.

Tabla I. Pasos de quemado.

Paso	Quemado (MWd/tU)	Quemado (MWd/ts)
1	1.98	1.80
2	1074.69	974.95
3	2152.87	1953.06
4	3299.66	2993.41
5	4433.43	4021.95
6	5463.32	4956.25
7	6434.26	5837.07
8	7657.43	6946.72
9	8819.98	8001.37
10	9921.47	9000.62

Como ya se mencionó anteriormente, los cálculos se realizaron tomando en cuenta un gasto (caudal del refrigerante) constante cuyo valor fue 7750 kg/s, asimismo se consideró una potencia de referencia de 1931 MW y una entalpía de entrada de 1225.3368 KJ/kg.

Por otro lado, para cada paso de quemado señalado en la Tabla I, se obtuvieron los perfiles axiales de potencia promedio, de acuerdo a lo reportado por CM-PRESTO, dichos perfiles toman en cuenta 25 puntos, correspondientes a los nodos en los que se divide la altura del núcleo. En las Figuras 1 y 2 se muestran dos de estos perfiles.

Es importante mencionar que dichos perfiles son valores pesados, esto es, para obtener la potencia promedio en cada nodo fue necesario dividir el valor de la potencia de referencia entre 25 y posteriormente multiplicarlo por el factor de forma correspondiente.

Con lo anterior se obtuvieron los diferentes perfiles de densidad promedio de potencia para cada paso de quemado. Baste mencionar que la forma de los perfiles es similar a la mostrada en las Figuras 1 y 2, con los cambios de escala pertinentes.

2.1. Cálculo de las entalpías

Una vez obtenidos los diferentes perfiles de densidad promedio de potencia para cada paso de quemado, podemos observar que si dividimos, en cada paso de quemado y para cada nodo, la potencia generada en el nodo entre el gasto, nos da como resultado la entalpía del refrigerante en el nodo respectivo.

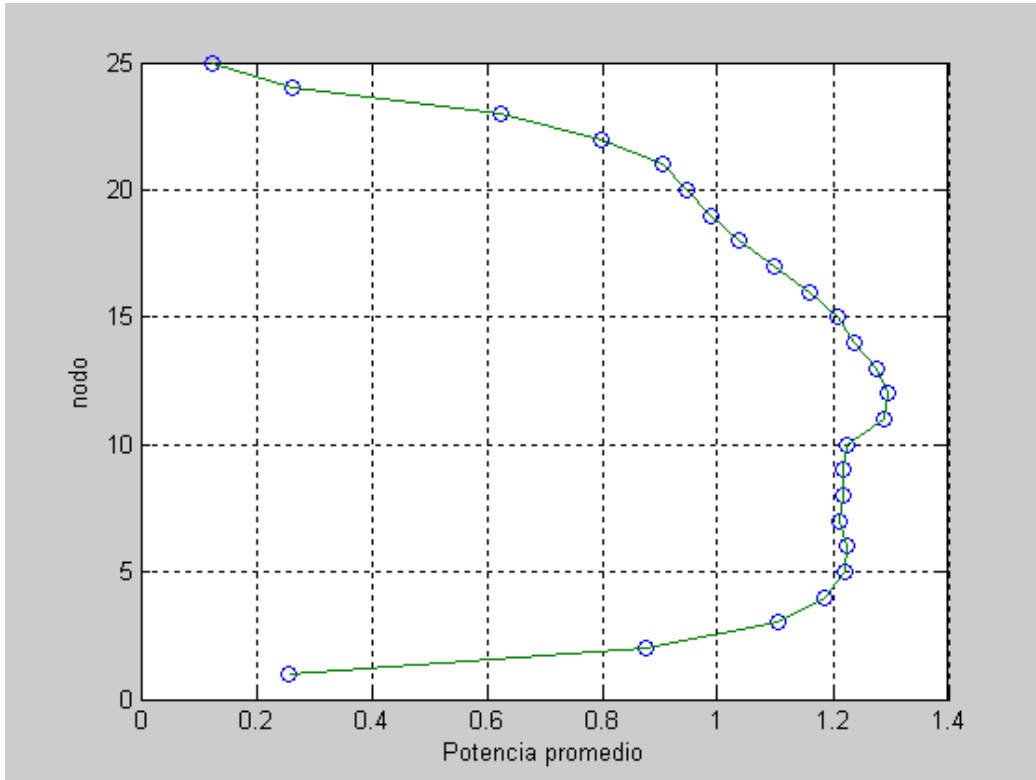


Figura 1. Perfil axial de potencia promedio para el paso de quemado 3.

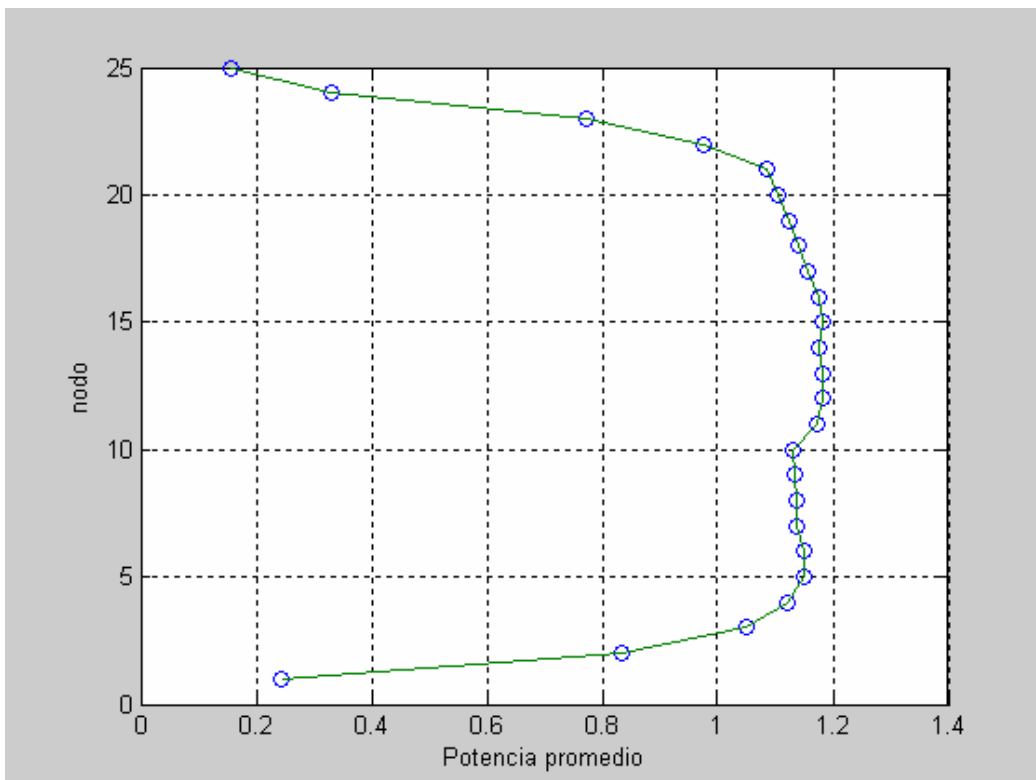


Figura 2. Perfil axial de potencia promedio para el paso de quemado 7.

$$\frac{P_i}{Gasto} = \frac{MJ/s}{kg/s} = MJ/kg \quad (1)$$

Por otro lado, si consideramos que en cada paso de quemado la energía obtenida en el núcleo está directamente relacionada con la entalpía del refrigerante, y que dicha energía es diferente, y además acumulativa, en cada uno de los nodos en los que está dividido el mismo, se puede considerar que en cada paso de quemado la entalpía de cada nodo se puede calcular de la siguiente manera

$$h_i = h_a + h_n \quad (2)$$

donde

h_i : entalpía total hasta el nodo i

h_a : entalpía acumulada en los $i-1$ nodos anteriores

h_n : entalpía del nodo i

2.2. Cálculo de la calidad y la fracción de vacíos

Adicionalmente, y tomando en cuenta las consideraciones anteriores, sabemos que la calidad se obtiene de la siguiente manera

$$x_i = \frac{h_i - h_l}{h_g - h_l} = \frac{h_i - h_l}{\mathbf{I}} \quad (3)$$

donde

x_i : calidad en el nodo i

h_i : entalpía en el nodo i

h_l : entalpía del líquido saturado

h_g : entalpía del vapor saturado

De la ecuación (2) se puede observar que los valores de h_l y λ son constantes durante todo el proceso, por lo tanto, para calcular la calidad en cada nodo simplemente se requiere de la entalpía acumulada hasta dicho nodo, la cual ya se ha dicho cómo se obtiene en la sección anterior. Los valores constantes a los que se hace referencia se obtienen de las tablas de vapor [4], tomando en cuenta dos aspectos. El primero de ellos es la presión a la cual se trabaja, que en nuestro caso es de 71 bars; por otro lado, resulta común que en las tablas referidas se contemple un conjunto discreto de valores, por lo cual se puede considerar una interpolación lineal entre dos puntos para obtener

el dato de interés. En nuestro caso, los valores que se tomaron en cuenta se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Valores empleados para la interpolación a 71 bars.

Presión (bars)	Entalpía(KJ/kg)	λ (KJ/kg)
69.186	1263.2	1511.3
74.461	1290	1477.6

Con los datos anteriores podemos calcular la fracción de vacíos para cada nodo empleando la siguiente ecuación

$$a_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x_i}{x_i} \right) \left(\frac{v_l}{v_g} \right)} \quad (4)$$

donde

v_l : volumen específico del líquido saturado

v_g : volumen del gas saturado

En forma análoga se obtienen los valores para v_l y v_g , los cuales son constantes para todo el proceso, considerando que la presión es constante, que fue una de las consideraciones iniciales. En la Tabla III se muestran los valores empleados en la interpolación, para obtener los valores solicitados a una presión de 71 bars.

Tabla III. Valores empleados para la interpolación a 71 bars.

Presión (bars)	v_l (m ³ /kg)	v_g (m ³ /kg)
69.186	0.0013487	0.025535
74.461	0.0013659	0.027733

3. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA FRACCIÓN DE VACÍOS

Bajo las consideraciones anteriores, el siguiente paso consistió en la programación en MATLAB, para realizar los cálculos para cada paso de quemado y para cada nodo, con lo cual se podría obtener los porcentajes de vacíos, para cada paso de quemado y el total en el núcleo.

3.1. Cálculo con valores de potencia, entalpía y gasto constantes

Una vez construido el programa mencionado en la sección anterior los resultados obtenidos mostraron un porcentaje de vacíos del núcleo como función del quemado del

ciclo de operación. En la Figura 3 se muestran los porcentajes de vacíos obtenidos y los reportados por CM-PRESTO para cada paso de quemado.

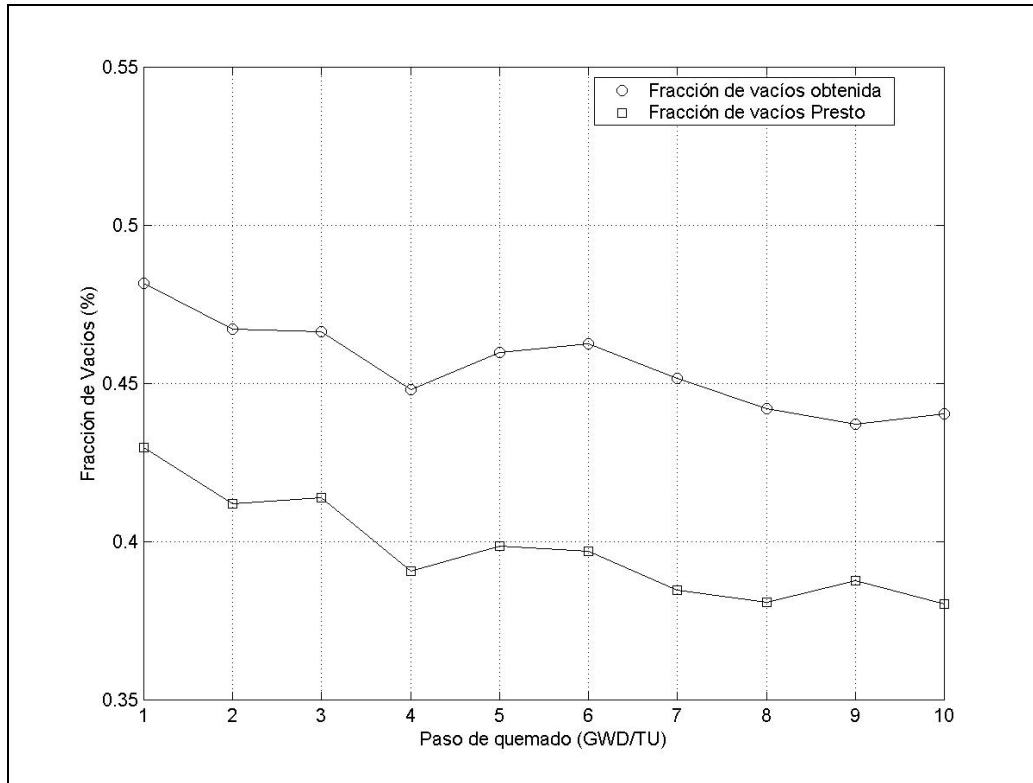


Figura 3. Porcentajes de vacíos obtenidos mediante el algoritmo desarrollado y los reportados por CM-PRESTO.

En dicha figura se puede observar que el comportamiento obtenido con MATLAB es muy similar al que reporta CM-PRESTO. En la Tabla IV se muestran los resultados de los porcentajes de vacíos para cada paso de quemado, incluyendo en ésta, el promedio y la desviación estándar del ciclo de operación en ambos casos.

En la siguiente sección se mostrarán resultados similares tomando en cuenta algunas modificaciones en las variables involucradas, para posteriormente mencionar algunas conclusiones acerca de las diferencias entre ambos resultados.

3.2. Cálculo con valores de potencia, entalpía y gasto variables

Una vez obtenidos los resultados anteriores, se consideró importante realizar los mismos cálculos pero ahora tomando en cuenta las variaciones en la potencia, el gasto y la entalpía en cada paso de quemado, reportados por CM-PRESTO, esto con la idea de comparar estos resultados con los expuestos en la sección anterior. En este sentido, la Tabla V muestra los valores que se tomaron en cuenta para realizar dichos cálculos.

Tabla IV. Porcentajes de vacíos.

Paso de quemado	Fracción de vacíos (%) CM-PRESTO	Fracción de vacíos (%) obtenidos	Diferencias
1	42.99	48.17	5.18
2	41.19	46.73	5.54
3	41.40	46.63	5.23
4	39.08	44.82	5.74
5	39.87	45.98	6.11
6	39.70	46.26	6.56
7	38.48	45.15	6.67
8	38.08	44.20	6.12
9	38.77	43.70	4.93
10	38.04	44.04	6.00
Promedio	39.76	45.57	5.81
Desviación estándar	1.6345	1.4275	

Con los valores de la Tabla V y empleando el mismo programa de MATLAB se obtuvo el comportamiento de la fracción promedio de vacíos para el núcleo considerado. La Figura 4 muestra los nuevos resultados junto con los reportados por CM-PRESTO.

Al observar la Figura 4, nuevamente podemos observar que el comportamiento es similar al reportado por CM-PRESTO. Para tener una idea más cercana y por ende realizar una evaluación más adecuada de estos resultados, la Tabla VI muestra estos nuevos resultados para cada paso de quemado, realizando el mismo ejercicio que el mostrado en la Tabla IV.

Tabla V. Potencia, gasto y entalpía empleados.

Paso de quemado	Potencia (MW)	Gasto (kg/s)	Entalpía (KJ/kg)
1	1625.0	5581.39	1206.77
2	1905.0	7740.56	1224.50
3	1932.0	7336.12	1223.37
4	1931.0	7265.84	1223.33
5	1929.1	7214.45	1221.53
6	1930.1	7441.67	1223.16
7	1930.8	7870.56	1222.35
8	1931.3	7990.56	1223.57
9	1722.8	5911.39	1206.80
10	1326.3	4139.17	1190.21

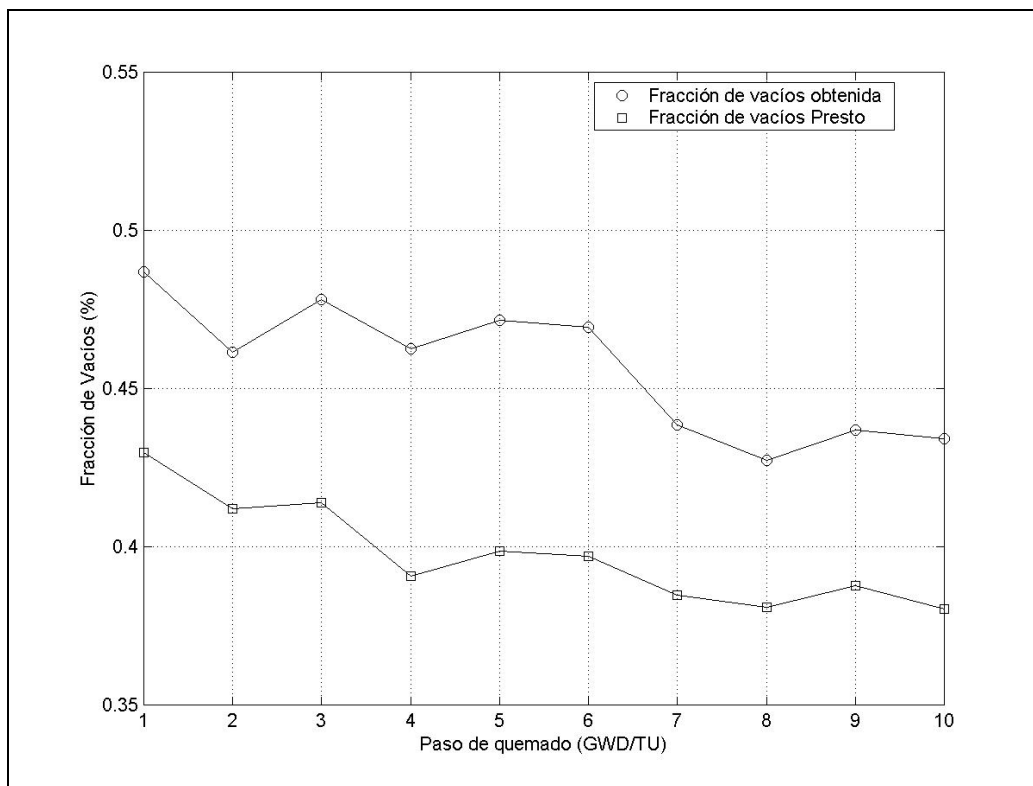


Figura 4. Porcentajes de vacíos obtenidos y reportados por CM-PRESTO.

Tabla VI. Porcentajes de vacíos.

Paso de quemado	Fracción de vacíos CM-PRESTO	Fracción de vacíos obtenidos	Diferencias
1	42.99	48.68	5.6879
2	41.19	46.14	4.9474
3	41.40	47.81	6.4114
4	39.08	46.25	7.1711
5	39.87	47.17	7.2978
6	39.70	46.93	7.2295
7	38.48	43.85	5.3725
8	38.08	42.72	4.6438
9	38.77	43.70	4.9284
10	38.04	43.42	5.3781
Promedio	39.76	45.57	5.91
Desviación estándar	1.6345	2.0806	

4. CÁLCULO DE LA REACTIVIDAD

Como puede observarse de las Tablas IV y VI, el valor promedio de la fracción de vacíos para el ciclo considerado proveniente de CM-PRESTO varía de aproximadamente 43% a 48% y en el caso del programa generado por MATLAB varía aproximadamente de 38% a 43%. De las Figuras 3 y 4 se puede observar que la forma de la curva generada por el comportamiento de la fracción de vacíos es el mismo.

Para determinar la variación de la reactividad debida a esta variación de fracción de vacíos se empleó una celda de combustible típica con un enriquecimiento promedio de 3.75 w/o de U-235 sin gadolinio y mediante el código HELIOS-1.5a [9] se generó el factor de multiplicación infinita correspondiente a las fracciones de vacío de 38%, 40%, 42%, 43%, 44%, 45% y 48%.

La Tabla VII muestra los factores de multiplicación infinita como función del quemado y la Tabla VIII muestra la reactividad correspondiente. Los casos extremos entre estos cálculos de la fracción de vacíos promedio esta entre 38% y 48%, la Tabla IX muestra la diferencia en pcm entre estos cálculos. Como puede apreciarse la diferencia está alrededor de 1000 pcm.

Tabla VII. Factor de multiplicación infinita como función del quemado para diferentes fracciones de vacíos.

Quemado MWd/TU	38%	40%	42%	43%	44%	45%	48%
0	1.32588	1.32195	1.31892	1.31818	1.31744	1.31436	1.31123
2000	1.29461	1.29063	1.28757	1.28683	1.28608	1.28297	1.27981
4000	1.27135	1.26727	1.26413	1.26337	1.26261	1.25942	1.25619
6000	1.24793	1.24379	1.24062	1.23986	1.23909	1.23586	1.23262
8000	1.22536	1.22124	1.21809	1.21734	1.21658	1.21337	1.21016
10000	1.20390	1.19985	1.19676	1.19603	1.19529	1.19213	1.18899
20000	1.10892	1.10582	1.10342	1.10284	1.10225	1.09978	1.09729
30000	1.02589	1.02427	1.02289	1.02252	1.02214	1.02073	1.01916
40000	0.95120	0.95138	0.95125	0.95113	0.95101	0.95087	0.95040
50000	0.88646	0.88841	0.88953	0.88968	0.88982	0.89094	0.89157

Debido a que no se puede determinar cuál método es el más adecuado para el cálculo de la fracción de vacíos se propone usar un valor promedio entre estos dos valores, el cual sería de 43%. La Tabla IX muestra la diferencia en reactividad entre este valor promedio y los valores extremos. Como puede verse esta diferencia es menor a 500 pcm la cual es comparable a la diferencia máxima permitida para el cálculo de reactividad entre dos diferentes códigos de transporte de neutrones.

Tabla VIII. Reactividad como función del quemado para diferentes fracciones de vacíos.

Quemado MWd/TU	38%	40%	42%	43%	44%	45%	48%
0	0.24578	0.24354	0.24180	0.24138	0.24095	0.23917	0.23736
2000	0.22757	0.22518	0.22334	0.22289	0.22244	0.22056	0.21863
4000	0.21343	0.21090	0.20894	0.20847	0.20799	0.20598	0.20394
6000	0.19867	0.19601	0.19395	0.19345	0.19296	0.19085	0.18872
8000	0.18391	0.18116	0.17904	0.17853	0.17802	0.17585	0.17366
10000	0.16937	0.16656	0.16441	0.16390	0.16338	0.16117	0.15895
20000	0.09822	0.09569	0.09373	0.09325	0.09276	0.09073	0.08866
30000	0.02524	0.02369	0.02238	0.02202	0.02166	0.02031	0.01880
40000	-0.05130	-0.05110	-0.05125	-0.05138	-0.05151	-0.05167	-0.05219
50000	-0.12808	-0.12561	-0.12419	-0.12401	-0.12382	-0.12241	-0.12162

Tabla IX. Diferencias de reactividad en pcm's en el rango promedio seleccionado.

Quemado MWd/TU	Abs(38%-48%)	Abs(43%-38%)	Abs(48%-43%)
0	842.664	440.591	402.073
2000	893.259	467.331	425.928
4000	949.246	496.858	452.388
6000	995.304	521.924	473.380
8000	1025.031	538.018	487.013
10000	1041.619	546.947	494.673
20000	955.780	497.591	458.190
30000	643.683	321.752	321.931
40000	88.494	7.739	80.755
50000	-646.556	-407.650	-238.906

5. CONCLUSIONES

Con base en las Figuras 3 y 4 podemos afirmar que el comportamiento de la fracción de vacíos es el mismo al emplear los dos diferentes métodos de cálculo considerados. Sin embargo dado que la diferencia entre ambos resultados es del orden del 5%, se requiere llevar a cabo una investigación más profunda para determinar la causa de esta diferencia.

Al tomar en cuenta esta diferencia para determinar la fracción de vacíos promedio se puede observar en la Tabla IX que si consideramos un valor promedio del 43% tenemos una diferencia en el rango de 38% a 48% de fracción de vacíos menor a 500 pcm's lo cual está dentro del rango del error permitido al llevar a cabo el cálculo de reactividad

en una celda de combustible. Por lo tanto, este valor es aceptable para ser empleado por el modelo de reactividad lineal. Sin embargo, como trabajo futuro se buscará determinar la causa de las diferencias en los resultados obtenidos para la fracción de vacíos entre el algoritmo desarrollado en este trabajo y el empleado por CM-PRESTO.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al CONACYT el apoyo brindado a este trabajo a través del proyecto 33806-U.

REFERENCIAS

1. Scandpower, User Manual CM-PRESTO-91 (1993).
2. C. K. Rice, *"The Effect of Void Fraction Correlation and Heat Flux Assumption on Refrigerant Charge Inventory Predictions"*, ASHRAE Transactions Vol. 93, part 1, New York (1987).
3. P. Coddington, R. Macian, *"A Study of the Performance of Void Fraction Correlations Used in the Context of Drift-Flux Two-Phase Flow Models"*, HSK & BFE, Swiss (1996).
4. Victor H. del Valle, Hilda Chávez Torres, "Curso Nuclear Básico V. 3-A", ININ, Salazar, Estado de México (1986).
5. M. M. El-Wakil, *"Nuclear Heat Transport"*, International Text Book Co., USA (1971).
6. Harvey W. Graves, *"Nuclear Fuel Management"*, John Wiley & Sons, USA (1979).
7. Duane Hanselman, *"Mastering MATLAB 5, A Comprehensive Tutorial and Reference"*, Prentice Hall, USA (1998).
8. Patrick Marchand, O. Thomas Holland, "Graphics and GUIs with MATLAB", Chapman & Hall/CRC, USA (2003).
9. Scandpower, User Manual HELIOS-1.5 (1995).