

## **CAPÍTULO 4**

### **DISEÑO DE UN MÉTODO ALTERNO PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DEL CÁLCULO DEL QUEMADO DE COMBUSTIBLE DE MCNPX.**

Como se mencionó en el capítulo anterior de este trabajo de tesis, el tiempo que tarda la ejecución del cálculo de un paso de quemado para el modelo del reactor GT-MHR, empleando el programa de cómputo MCNPX, es muy grande, tanto para el modelo heterogéneo, y en menor grado, pero aún bastante grande, para el modelo homogéneo. Lo anterior implicaría una gran cantidad de tiempo para ejecutar la simulación del quemado total de los días a analizar, ya que el análisis se compone de varios pasos de quemado, lo que llevaría a una suma total de tiempos aún más grande.

Por lo que ante esta situación y después de un estudio de las herramientas computacionales con las que se dispone para el análisis del combustible de reactores nucleares, se ha optado por integrar a este trabajo de tesis un nuevo método basado en el manejo relacionado del programa de cómputo MCNPX y el código computacional CPM-3.

En este capítulo se expondrá el nuevo método para el análisis del combustible del reactor GT-MHR, denominado “Método Diseñado”, así como las características y los resultados obtenidos con él.

#### **4.1 MÉTODO DISEÑADO**

##### **4.1.1 Principales instrumentos computacionales del método.**

El método diseñado para la optimización del análisis del combustible, es un procedimiento creado en base a observaciones de los resultados obtenidos, por una parte tras la simulación del quemado de combustible en un modelo completo del reactor (modelo heterogéneo) con MCNPX, y por otra parte tras la simulación del quemado del combustible de una sola partícula TRISO en medio infinito con el código computacional CPM-3. Se observó que los cálculos de quemado con MCNPX consumen una cantidad enorme de CPU (aproximadamente 5 horas de CPU, para el modelo homogéneo, para un paso de quemado), mientras que los de CPM-3 son sumamente eficientes en tiempo de cómputo (cuestión de segundos). Entonces, lo que se busca con este nuevo método es reemplazar los cálculos de quemado de MCNPX por los de CPM-3, mientras que se conservan los cálculos de criticidad de MCNPX, con el fin de conservar la precisión del modelo de MCNPX, en cuanto a la distribución del flujo de neutrones en el núcleo del reactor.

Anteriormente, en el Capítulo 2, se expusieron las características del programa de cómputo MCNPX. El código computacional CPM-3 es un código que permite simular el quemado de combustible de un reactor nuclear, calculando el factor de multiplicación de neutrones y el flujo de neutrones, por lo que es útil para el análisis del combustible de reactores nucleares.

CPM-3 emplea la técnica de multigrupos y dos métodos de solución de la teoría de transporte de neutrones en dos dimensiones: el método de las probabilidades de colisión y el método de las características. Además, CPM-3 incluye la capacidad para determinar el agotamiento isotópico para cálculos de quemado del combustible dependiente del tiempo. El código CPM-3 incluye una biblioteca de datos nucleares, que contiene datos de secciones transversales eficaces y parámetros nucleares en 97 grupos de energía para 300 nucleidos. [1]

El código CPM-3 ofrece la posibilidad de simular el comportamiento del combustible en 2 dimensiones a manera de celda, con las regiones de combustible, moderador y material de encamisado deseadas. Cada una de las regiones definida por el *input* (archivos “.I”) de geometría se considera una región de flujo plano.

CPM-3 devuelve los resultados de la simulación del quemado del combustible en los archivos de salida “.S” y “.L”, los cuales contienen un resumen y la historia detallada de la simulación respectivamente. Para una mayor descripción, en el “ANEXO 1” de este trabajo de tesis se muestran los archivos de entrada “.I”) y de salida “.S” y “.L”) de CPM-3, donde son señalados los principales elementos que los integran.

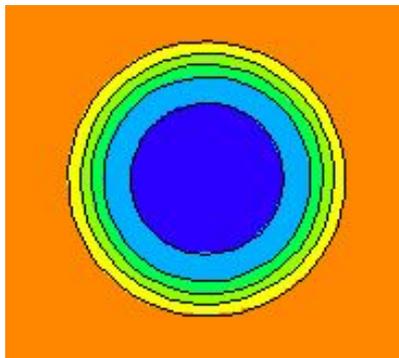
A diferencia de MCNPX, CPM-3 ejecuta la simulación del quemado de combustible en tiempos del orden de segundos (mucho menor a MCNPX), pero no es posible diseñar configuraciones geométricas de modelos de tres dimensiones, ni más detallados que los que se pueden diseñar en MCNPX, como lo es el modelo completo del núcleo de un reactor nuclear.

#### **4.1.2 Descripción del Método Diseñado**

En el modelo homogéneo, sin quemado del combustible del reactor GT-MHR, desarrollado en MCNPX, se ingresa, para cada uno de los tres anillos que lo integran, la composición de cada uno de los materiales que conforman el combustible del núcleo. Seguidamente se ejecuta dicho archivo en MCNPX, obteniendo como resultado de la simulación, sin quemado del combustible, un valor del factor de multiplicación de neutrones (K-ef).

Posteriormente, en el código CMP-3 se crean tres archivos de entrada “.I”) (uno para cada anillo), con la misma composición de material empleado anteriormente en el archivo de MCNPX. A diferencia del modelo completo del núcleo del reactor definido en el código MCNPX, en el código CPM-3 se define únicamente un modelo de una partícula de combustible TRISO propagada en medio infinito. En la Figura 4.1 se

muestra el modelo de una partícula TRISO. Al aplicarle condiciones de frontera de reflexión en cada lado se simula como si se repitiera infinitamente.



**Figura 4.1. Modelo de una partícula de combustible TRISO utilizada en CPM-3.**

Los tres archivos de entrada del código CMP-3 son ajustados variando el valor de su RPP, es decir, la dimensión del lado del cuadrado (con lo cual estamos variando la razón de moderador a combustible), hasta que la ejecución de este archivo entregue como resultado el mismo factor de multiplicación de neutrones obtenido en MCNPX. De esta manera estamos asegurando que CPM-3 conserva la reactividad del modelo de MCNPX.

Una vez que se han ajustado los tres modelos de CMP-3, se implementan los pasos a los cuales se desea simular el quemado del combustible (para cada uno de los tres anillos). Cada paso de quemado es realizado en cuestión de segundos por CMP-3, entregando los valores de  $K\text{-ef}^*$  para cada paso dado.

El archivo de salida “.L” de CMP-3 entrega un listado de los isótopos y sus respectivos porcentajes en peso y densidades atómicas; estos isótopos son los elementos resultantes de la simulación del quemado de combustible.

La lista de isótopos que entregan los archivos de salida “.L”, para cada anillo del reactor, consta de 235 isótopos, los cuales filtramos a través de un programa de cómputo diseñado para seleccionar sólo los isótopos que también se manejan en las bibliotecas de MCNPX, obteniendo una nueva lista de isótopos, la cual contiene los isótopos comunes manejados entre los códigos CPM-3 y MCNPX.

La suma total del porcentaje en peso de la primera lista de isótopos obtenida de los archivos “.L” (235 elementos) es del 100%. Naturalmente la suma del porcentaje en peso de la nueva lista de isótopos, que consta de los isótopos comunes entre CPM3 y MCNPX (80 elementos), resulta ser menor al 100%. La diferencia de ambas sumas de porcentajes en peso, es dividida entre el número de isótopos de la nueva lista que poseen masa menor a 90, exceptuando al oxígeno, es decir, es dividida entre 59. A este nuevo valor se le asignó la literal “V”. Posteriormente en una hoja de cálculo sumamos una parte de este valor “V” a los isótopos de masa menor a 90 (excepto el oxígeno). Esta suma se realiza de tal manera que al valuar la  $k\text{-ef}$  con esas cantidades de

---

\* Si bien el factor de multiplicación de neutrones obtenido con CPM-3 es infinito, para facilitar el lenguaje y la explicación del método, se le denominará  $K\text{-ef}$ .

porcentajes en peso, se obtenga un valor K-ef igual al que se obtuvo después del paso de quemado y que entregó a la salida de CPM-3 (archivos “.L”) los 235 isótopos. De esta manera se asegura que la reactividad debida a los productos de fisión es equivalente entre los dos modelos.

Consecuentemente se tiene una nueva lista modificada, en la que el porcentaje en peso de sus isótopos con masa menor a 90 (excepto el oxígeno) fue modificado, y el valor del porcentaje en peso del resto de los isótopos no es cambiado en lo absoluto.

En la siguiente figura se muestran un ejemplo de las listas de los isótopos resultantes de una simulación del quemado del combustible para un anillo, donde la primera lista (COLUMNA 1)” es la lista de los isótopos comunes entre CPM-3 y MCNPX.

La siguiente lista (COLUMNA 2) contiene a los isótopos con masa menor a 90 de la lista anterior, a los cuales se les modifica el valor de su porcentaje en peso. Y la lista nueva generada (COLUMNA 4) es la conformada en primera parte (4A) por los isótopos con masa menor a 90, teniendo éstos como porcentaje en peso el resultado de la suma de parte del valor “V” (COLUMNA 3), más su porcentaje de peso original; la segunda parte de la lista (4B) son los isótopos con masa mayor a 90 cuyo porcentaje en peso no fue modificado.

Isótopos comunes		Isótopos con masa <90		Nueva lista generada			
COLUMNA 1		COLUMNA 2		COLUMNA 3		COLUMNA 4	
Isótopo	% en peso	Isótopo	% en peso	Parte de "V" a sumar	Isótopo	% en peso	
92234	7.980780E-06	33075	2.560528E-06	+	5.976886E-06	33075	8.537414E-06
92235	2.778797E+00	35081	5.002972E-04			35081	5.062741E-04
92236	1.349089E-01	36082	2.137941E-06			36082	8.114827E-06
92237	7.064608E-04	36083	1.239177E-03			36083	1.245154E-03
92238	8.534387E+01	36084	2.468631E-03			36084	2.474608E-03
92239	2.988285E-04	36086	4.775802E-03			36086	4.781779E-03
93237	1.636032E-03	37085	2.447665E-03			37085	2.453642E-03
93238	1.069868E-05	37087	6.284486E-03			37087	6.290463E-03
93239	4.293591E-02	39089	3.378903E-03			39089	3.384880E-03
94238	5.126898E-05	40090	2.185597E-05			40090	2.783286E-05
94239	4.167638E-01	40091	3.735458E-03			40091	3.741435E-03
94240	4.600823E-02	40092	1.582602E-02			40092	1.583200E-02
94241	1.156468E-02	40093	1.701852E-02			40093	1.702450E-02
94242	5.224549E-04	40094	1.795624E-02			40094	1.796222E-02
94243	3.413932E-07	40096	1.829083E-02			40096	1.829681E-02
95241	1.819806E-05	42095	1.158672E-03			42095	1.164649E-03
95242	1.301024E-07	43099	1.699417E-02			43099	1.700015E-02
95243	1.147850E-05	44101	1.656879E-02			44101	1.657477E-02
96242	1.110116E-06	44103	7.871298E-03			44103	7.872725E-03
96244	3.641808E-07	45103	3.566018E-03			45103	3.571995E-03
33075	2.560528E-06	45105	2.633932E-04			45105	2.693701E-04
35081	5.002972E-04	46104	1.778655E-04			46104	1.838424E-04
36082	2.137941E-06	46105	4.394202E-03			46105	4.400179E-03
36083	1.239177E-03	46106	8.972788E-04			46106	9.032557E-04
36084	2.468631E-03	46108	1.229341E-03			46108	1.235318E-03
36086	4.775802E-03	46110	4.005196E-04			46110	4.064965E-04
37085	2.447665E-03	53127	5.921153E-04			53127	5.980922E-04
37087	6.284486E-03	53129	2.407505E-03			53129	2.413482E-03
39089	3.378903E-03	53135	2.102685E-04			53135	2.162454E-04
40090	2.185597E-05	54128	4.900237E-06			54128	1.087712E-05
40091	3.735458E-03	54130	5.753467E-05			54130	6.351156E-05
40092	1.582602E-02	54131	9.194237E-03			54131	9.200214E-03
40093	1.701852E-02	54132	1.710194E-02			54132	1.710792E-02
40094	1.795624E-02	54134	3.296571E-02			54134	3.297169E-02
40096	1.829083E-02	54135	2.934431E-05			54135	3.532120E-05
42095	1.158672E-03	54136	5.342518E-02			54136	5.343116E-02
43099	1.699417E-02	55133	2.229255E-02			55133	2.229853E-02
44101	1.656879E-02	55134	3.984163E-04			55134	4.043932E-04
44103	7.871298E-03	55135	2.498124E-03			55135	2.504101E-03
45103	3.566018E-03	55136	3.995487E-05			55136	4.593176E-05
45105	2.633932E-04	55137	2.659019E-02			55137	2.659617E-02
46104	1.778655E-04	56138	2.859541E-02			56138	2.860139E-02
46105	4.394202E-03	59141	9.659944E-03			59141	9.665921E-03
46106	8.972788E-04	60143	1.475781E-02			60143	1.476379E-02
46108	1.229341E-03	60145	1.672869E-02			60145	1.673467E-02
46110	4.005196E-04	60147	2.910546E-03			60147	2.916523E-03
53127	5.921153E-04	60148	8.113739E-03			60148	8.119716E-03
53129	2.407505E-03	61147	6.141449E-03			61147	6.147426E-03
53135	2.102685E-04	61148	6.094814E-05			61148	6.692503E-05
54128	4.900237E-06	61149	3.757783E-04			61149	3.817552E-04
54130	5.753467E-05	62147	9.063054E-05			62147	9.660743E-05
54131	9.194237E-03	62149	1.957546E-04			62149	2.017315E-04
54132	1.710194E-02	62150	4.921017E-03			62150	4.926994E-03
54134	3.296571E-02	62151	7.459373E-04			62151	7.519142E-04
54135	2.934431E-05	62152	2.663592E-03			62152	2.669569E-03
54136	5.342518E-02	63151	3.845550E-07			63151	6.361441E-06
55133	2.229255E-02	63153	1.052906E-03			63153	1.058883E-03
55134	3.984163E-04	63154	7.360602E-05			63154	7.958291E-05
55135	2.498124E-03	63155	8.209047E-05			63155	8.806736E-05
55136	3.995487E-05						
55137	2.659019E-02					92234	7.980780E-06
56138	2.859541E-02					92235	2.778797E+00
59141	9.659944E-03					92236	1.349089E-01
60143	1.475781E-02					92237	7.064608E-04
60145	1.672869E-02					92238	8.534387E+01
60147	2.910546E-03					92239	2.988285E-04
60148	8.113739E-03					93237	1.636032E-03
61147	6.141449E-03					93238	1.069868E-05
61148	6.094814E-05					93239	4.293591E-02
61149	3.757783E-04					94238	5.126898E-05
62147	9.063054E-05					94239	4.167638E-01
62149	1.957546E-04					94240	4.600823E-02
62150	4.921017E-03					94241	1.156468E-02
62151	7.459373E-04					94242	5.224549E-04
62152	2.663592E-03					94243	3.413932E-07
63151	3.845550E-07					95241	1.819806E-05
63153	1.052906E-03					95242	1.301024E-07
63154	7.360602E-05					95243	1.147850E-05
63155	8.209047E-05					96242	1.110116E-06
8016	1.048900E+01					96244	3.641808E-07
						8016	1.048900E+01
Suma=	9.967956E+01					Suma=	9.967991E+01
Dif=	3.173726E-01						
V=(Dif/59)=		5.379197E-03					

COLUMNA 4A

Isótopos modificados en su % en peso (isótopos con masa menor a 90)

COLUMNA 4B

Isótopos con masa mayor a 90. y oxígeno.

Figura 4.2. Listas de isótopos generadas.

Posteriormente, los isótopos de la nueva lista generada son introducidos como un solo material en el archivo de materiales del programa CPM-3 llamado LV\_COMP2.DAT. Este archivo de materiales contiene los materiales utilizados en los archivos de entrada “.I”. A los materiales se les asigna un nombre y se les declara su densidad atómica y los elementos que componen a ese material seguidos del porcentaje en peso de dichos elementos.

Por ejemplo, para el material declarado en los archivos de entrada “.I” creados al inicio de este método, el material utilizado es el mismo que se utilizó en MCNPX, el cual se compone de tres isótopos: U-238, U-235 y O-16. Por lo tanto, la declaración del material en el archivo LV\_COMP2.DAT para el anillo IR es:

36\_URTH:

92 10.2 8.9D-6 92235 3.263 92238 86.248 8016 10.489/

Donde:

36\_URTH: Nombre del material

92: Tipo de material (Uranio, combustible quemable)

8.9D-6: Coeficiente de expansión térmico lineal.

10.2: Densidad (gramos/cm<sup>3</sup>)

92235 3.263 : Zaid de U235 con 3.263% de porcentaje en peso

92238 86.248: Zaid de U238 con 86.248% de porcentaje en peso

8016 10.489 : Zaid de O16 con 10.489 de porcentaje en peso

Zaid está compuesto del número atómico y de la masa atómica del isótopo.

De forma similar se declara en el archivo de materiales LV\_COMP2.DAT de CPM-3, el material integrado por los 80 isótopos con su porcentaje en peso de la lista nueva generada (columna 4 de la figura 4.2). De esta manera se declara el material que al calcular la k-ef con esas cantidades de porcentajes en peso, se intenta obtener un valor K-ef igual al que se obtuvo después del paso de quemado, el cual entregó a la salida (archivos “.L”) los 235 isótopos.

De esta manera se logra el quemado en CPM-3 de forma casi inmediata, entregando como resultado de la simulación del quemado del combustible, isótopos que pueden ser empleados en MCNPX (80 isótopos) y que poseen una reactividad equivalente al conjunto de isótopos resultantes originalmente (235 isótopos).

Finalmente, los 80 isótopos resultantes de cada uno de los tres anillos son introducidos en el modelo homogéneo, sin quemado del núcleo del GT-MHR, en MCNPX, obteniendo nuevamente un valor de K-ef, y repitiendo una vez más los pasos descritos de este método para obtener un paso más de quemado del combustible.

A continuación se enlistan brevemente los pasos del método.

**1.-** Ejecución del modelo homogéneo del reactor sin quemado en MCNPX, obteniendo un valor “K-ef inicial” para un elemento combustible dado.

2.- Ajuste de los tres archivos CPM-3 (modelos de una partícula TRISO en medio infinito para cada anillo) al valor “K-ef inicial” obtenido del paso anterior.

3.- Simulación de un paso de quemado del combustible en CPM-3, obteniendo los isótopos correspondientes a los productos de fisión (235 isótopos), y un valor “K-ef de quemado”, para dicho paso de quemado.

4.-Selección de los isótopos empleados, tanto en CPM-3 como en MCNPX (80 isótopos), y manipulación de los mismos para obtener un valor de K-ef con esos isótopos igual al valor de “K-ef de quemado” del paso anterior.

5.-Ejecución del modelo homogéneo del reactor sin quemado en MCNPX, ingresando como materiales del combustible los 80 isótopos manipulados del paso anterior. Obteniendo un valor “K-ef inicial” nuevamente.

Estos cinco pasos del método se realizan para cada paso de quemado del combustible del GT-MHR a analizar.

Es importante mencionar que para la deducción de este método se experimentaron varias maneras de acoplar los códigos CPM-3 y MCNPX, por ejemplo se probaron varias formas de manipular los isótopos resultantes de la simulación del quemado (paso 4), para obtener la misma “K-ef de quemado”. Por lo que este método es la mejor manera encontrada de emplear las capacidades de los códigos computacionales CPM-3 y MCNPX, obteniendo resultados bastante similares a los que se obtendrían únicamente con el programa de cómputo MCNPX en un tiempo mucho mayor.

A continuación se listan tres formas en las que inicialmente se manipularon los 80 isótopos comunes entre CPM 3 y MCNPX, para obtener el mismo valor de criticidad que el resultante en CPM-3, tras el quemado de combustible con 235 isótopos.

A.- Una fracción de la diferencia de ambas sumas de porcentajes en peso, fue dividida entre el número de isótopos de la nueva lista que poseen masa menor a 90, exceptuando al oxígeno, es decir, fue dividida entre 59 isótopos y posteriormente sumada a cada uno de estos isótopos; mientras que la parte complementaria de la fracción de la diferencia de las sumas de los porcentajes en peso, fue sumada al oxígeno. Es decir una parte de la diferencia era adicionada al oxígeno y otra parte de la diferencia era adicionada en partes iguales al resto de los isótopos con masa menor a 90. Este listado de isótopos era simulado en CPM-3, obteniendo un valor “K-ef de quemado”.

B.- Una fracción de la diferencia de ambas sumas de porcentajes en peso fue dividida entre el número de isótopos de la nueva lista que poseen masa menor a 90, exceptuando al Oxígeno, Xenón y Samario; es decir, fue dividida entre 57 isótopos y posteriormente sumada a cada uno de estos isótopos; mientras que la parte complementaria de la fracción de la diferencia de las sumas de los porcentajes en peso fue sumada al oxígeno. Es decir una parte de la diferencia era adicionada al oxígeno y otra parte de la diferencia era adicionada en partes iguales al resto de los isótopos con masa menor a 90, exceptuando al Xenón y al Samario. Este listado de isótopos fue simulado en CPM-3, obteniendo un valor “K-ef de quemado”.

C.- Una fracción de la diferencia de ambas sumas de porcentajes en peso, fue dividida entre el número de isótopos de la nueva lista que poseen masa menor a 90, exceptuando al Oxígeno y al Xenón, es decir, fue dividida entre 58 isótopos y posteriormente sumada a cada uno de estos isótopos; mientras que la parte complementaria de la fracción de la diferencia de las sumas de los porcentajes en peso, fue sumada al oxígeno. Es decir una parte de la diferencia fue adicionada al oxígeno y otra parte de la diferencia fue adicionada, en partes iguales, al resto de los isótopos con masa menor a 90, exceptuando al Xenón. Este listado de isótopos fue simulado en CPM-3, obteniendo un valor “K-ef de quemado”.

La tabla 4.1 muestra los valores obtenidos de “K-ef de quemado”, para un caso de 10 días de quemado de combustible, empleando las tres maneras anteriores de manipular los porcentajes en peso de los isótopos resultantes, para ajustar a un valor patrón. Además también se muestra el valor obtenido de “K-ef de quemado” empleando la manera de manipulación de isótopos del método diseñado (paso 4).

VALOR PATRÓN	A. Modo Exceptuando al Oxígeno.	B. Modo Exceptuando al O, Xe y Sm.	C. Modo Exceptuando al O y Xe.	Modo empleado en el método.
<b>1.120352</b>	0.976062	1.118941	1.114369	<b>1.12108</b>

**Tabla 4.1. Valores de “K-ef de quemado” obtenidos con distintas formas de manipulación de isótopos.**

## 4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO Y RESULTADOS OBTENIDOS.

El método diseñado se aplicó para el caso del modelo homogéneo del núcleo del reactor GT-MHR descrito en el capítulo anterior de este trabajo de tesis.

Se simularon un total de 65 días de quemado de combustible (10.2979 GWd/TM) en 8 pasos de quemado, obteniendo valores de K-ef para cada paso de quemado realizado. La configuración inicial del combustible empleado para el análisis al paso cero de quemado fue de uranio con enriquecimientos en U-235 de 3.6% para el anillo interior, 4.4% para anillo central y 3.9% para anillo exterior.

En la Tabla 4.2 se presentan los valores de K-efectiva que se obtuvieron para cada uno de los pasos de quemado en los cuales se aplicó el Método Diseñado.

Para obtener valores de K-ef de quemado en intervalos de días de quemado más detallados se interpolaron linealmente los valores de la tabla 4.2, obteniendo como resultado la tabla 4.3 con valores de K-ef para cada cinco días de quemado de combustible.

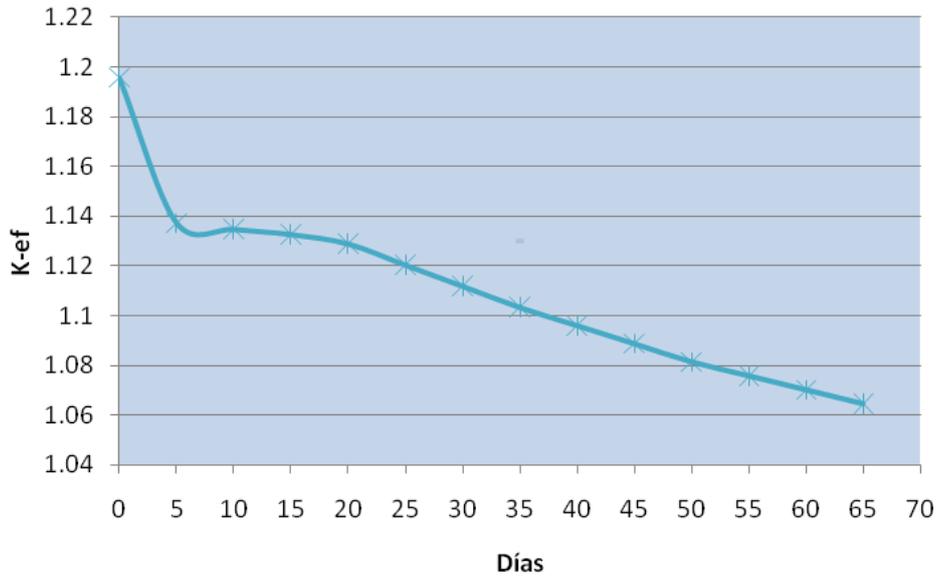
GWd/MT	Días de quemado	
		K-ef
0	0	1.1957
0.7921	5	1.13732
1.5842	10	1.13476
2.3763	15	1.13269
3.1684	20	1.1289
5.5447	35	1.1033
7.921	50	1.08145
10.2973	65	1.06453

**Tabla 4.2. Valores de K-ef obtenidos con la implementación del método.**

GWd/MT	Días de quemado	
		K-ef
0	0	1.1957
0.7921	5	1.13732
1.5842	10	1.13476
2.3763	15	1.13269
3.1684	20	1.1289
<b>3.9605</b>	<b>25</b>	<b>1.12036</b>
<b>4.7526</b>	<b>30</b>	<b>1.11183</b>
5.5447	35	1.1033
<b>6.3368</b>	<b>40</b>	<b>1.09601</b>
<b>7.1289</b>	<b>45</b>	<b>1.08873</b>
7.921	50	1.08145
<b>8.7131</b>	<b>55</b>	<b>1.07581</b>
<b>9.5052</b>	<b>60</b>	<b>1.07017</b>
10.2973	65	1.06453

**Tabla 4.3. Valores de K eff obtenidos con la implementación del método e interpolación.**

La siguiente gráfica ilustra los valores de la tabla anterior, en la cual se observa la manera en la que decae la criticidad del combustible conforme se incrementan los días de quemado, es decir, conforme se va consumiendo el combustible. Al inicio del quemado del combustible se observa un decremento importante de la K-ef, debido a la producción de los productos de fisión considerados como venenos, principalmente el Xenón y el Samario.



**Figura 4.3. Evolución de la K-ef.**

A continuación, en la tabla 4.3 se muestra la comparación entre los valores obtenidos utilizando el Método Diseñado y los valores obtenidos utilizando únicamente el código MCNPX, como convencionalmente se realiza para el análisis del combustible.

Días de quemado	GWd/MT	MCNPX K-ef	Método diseñado K-ef
0	0	1.1957	<b>1.1957</b>
5	0.7921	1.13954	<b>1.13732</b>
10	1.5842	1.13341	<b>1.13476</b>
15	2.3763	1.12643	<b>1.13269</b>
20	3.1684	1.12202	<b>1.1289</b>
25	3.9605	1.1176	<b>1.12036</b>
30	4.7526	1.11155	<b>1.11183</b>
35	5.5447	1.10549	<b>1.1033</b>
40	6.3368	1.09904	<b>1.09601</b>
45	7.1289	1.09259	<b>1.08873</b>
50	7.921	1.08614	<b>1.08145</b>
55	8.7131	1.07882	<b>1.07581</b>
60	9.5052	1.07151	<b>1.07017</b>
65	10.2973	1.0642	<b>1.06453</b>

**Tabla 4.4. Valores obtenidos con el método diseñado y con MCNPX.**

La gráfica 4.2 ilustra los valores mostrados en la tabla anterior, en la cual se observan ambas trayectorias en las que decae la criticidad del combustible en función de los días de quemado simulados.

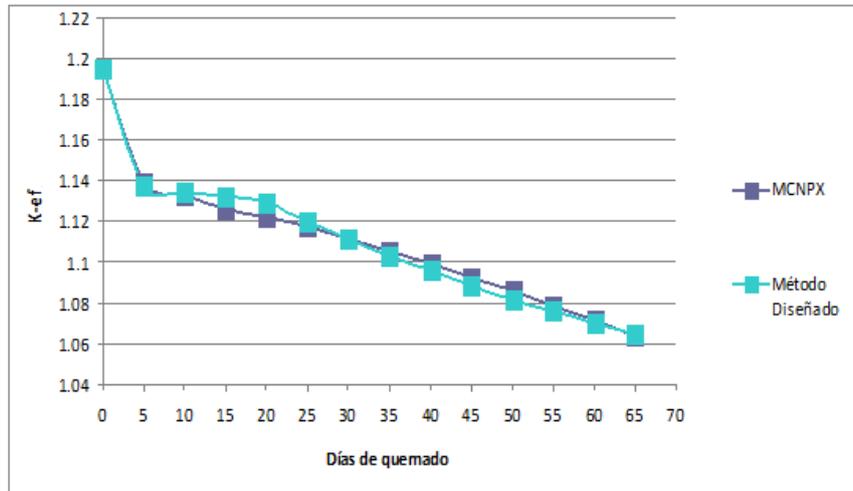


Figura 4.4. Comparación de K-ef para MCNPX y el Método Diseñado.

Como se observa en la gráfica anterior y de la tabla 4.3, los valores de K-ef obtenidos con el método diseñado están en muy buen acuerdo con los resultados de MCNPX.

Con el fin de obtener más patrones de comparación, se simuló cada anillo de manera individual en el programa de cómputo CPM-3. A continuación, se incorporan a la tabla 4.3, los resultados obtenidos de esta simulación, obteniendo la tabla 4.4 mostrada a continuación.

Días de Quemado	GWD/MT	MCNPX	Método diseñado		CPM-3	
		K ef	K ef	Kef-IR	Kef-CR	Kef-OR
0	0	1.1957	<b>1.1957</b>	1.196463	1.196048	1.19472
5	0.7921	1.13954	<b>1.13732</b>	1.129964	1.130685	1.128687
10	1.5842	1.13341	<b>1.13476</b>	1.120867	1.121251	1.119437
15	2.3763	1.12643	<b>1.13269</b>	1.113164	1.113495	1.111688
20	3.1684	1.12202	<b>1.1289</b>	1.105176	1.105614	1.103713
25	3.9605	1.1176	<b>1.12036</b>	1.096779	1.097393	1.095357
30	4.7526	1.11155	<b>1.11183</b>	1.08809	1.088909	1.086724
35	5.5447	1.10549	<b>1.1033</b>	1.079243	1.080276	1.077939
40	6.3368	1.09904	<b>1.09601</b>	1.070351	1.071593	1.069113
45	7.1289	1.09259	<b>1.08873</b>	1.061504	1.062942	1.060329
50	7.921	1.08614	<b>1.08145</b>	1.052768	1.054384	1.051653
55	8.7131	1.07882	<b>1.07581</b>	1.044193	1.045967	1.043134
60	9.5052	1.07151	<b>1.07017</b>	1.035816	1.037724	1.034805
65	10.2973	1.0642	<b>1.06453</b>	1.027661	1.02968	1.026693

Tabla 4.5. Valores obtenidos con el método diseñado, con MCNPX y con CPM-3.

Así mismo, se presenta la gráfica con las series adicionales correspondientes para cada anillo simulado en CPM-3.

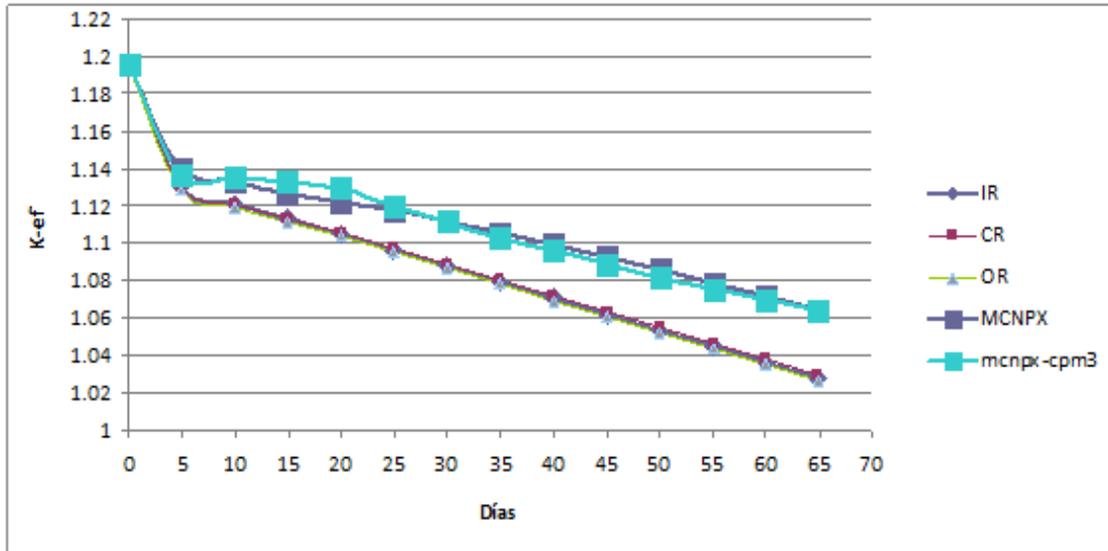


Figura 4.5. Comparación de los códigos.

Como era de esperarse, ya que el modelo de CPM-3 es uno muy simplificado y simulado en medio infinito, en la gráfica anterior y en la tabla 4.4 se observa que los resultados de CPM-3 presentan una desviación importante conforme los días de quemado aumentan.

#### 4.2.1 Evaluación del método.

Para la evaluación del método, los valores de K-ef de quemado de MCNPX son tomados como valores de referencia, debido al grado de detalle y a la precisión que este código presenta. Se evaluaron únicamente los valores obtenidos de manera directa (sin interpolar) con el Método Diseñado. La tabla 4.5 muestra los valores absolutos del porcentaje del error relativo obtenidos.

Días de quemado	GWd/MT	MCNPX K-ef	Método diseñado K-ef	%Error relativo* Valor absoluto (dK/K)
0	0	1.1957	1.1957	0
5	0.7921	1.13954	1.13732	0.19482
10	1.5842	1.13341	1.13476	0.11911
15	2.3763	1.12643	1.13269	0.55529
20	3.1684	1.12202	1.1289	0.61363
35	5.5447	1.10549	1.1033	0.19810
50	7.921	1.08614	1.08145	0.43180
65	10.2973	1.0642	1.06453	0.03101
<b>Promedio</b>				<b>0.30625</b>

\* Error relativo = (MCNPX – MD)/MCNPX

Tabla 4.6. Diferencias %dK/K entre MCNPX y el método diseñado.

Otra manera de evaluar el método es mostrada en la siguiente tabla, en la cual se presentan las diferencias expresadas en pcm de ambos conjuntos de resultados.

Días de quemado	MCNPX GWd/MT	MCNPX K-ef	Método diseñado K-ef	Diferencia dK/K (pcm)
0	0	1.1957	1.1957	0
5	0.7921	1.13954	1.13732	222
10	1.5842	1.13341	1.13476	135
15	2.3763	1.12643	1.13269	625.5
20	3.1684	1.12202	1.1289	688.5
35	5.5447	1.10549	1.1033	219
50	7.921	1.08614	1.08145	469
65	10.2973	1.0642	1.06453	33

**Tabla 4.7. Diferencias en pcm entre MCNPX y el método diseñado.**

Finalmente, la siguiente tabla muestra los tiempos registrados que tarda la simulación del quemado del combustible para un solo paso de quemado para ambos casos. De la tabla se puede observar que el método diseñado en esta tesis reduce un 66% el tiempo requerido para la obtención de buenos resultados.

	MCNPX	MÉTODO DISEÑADO
<b>TIEMPO DE UN PASO DE QUEMADO</b>	<b>5.15 hrs</b>	<b>1.75 hrs</b>

**Tabla 4.8. Tiempos de quemado.**