



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

33
ZEJ

OPTIMIZACION DEL DISEÑO DEL PATRON DE
RECARGA DE COMBUSTIBLE NUCLEAR DEL
REACTOR DE AGUA EN EBULLICION DE LA
CENTRAL NUCLEAR DE LAGUNA VERDE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

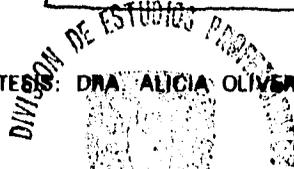
F I S I C O

P R E S E N T A :

MARIO RAUL PERUSQUIA DEL CUETO



DIRECTOR DE TESIS: DRA. ALICIA OLIVER GUTIERREZ



MEXICO, D. F.

1995

FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

M. EN C. VIRGINIA ABRIN BATULE

Jefe de la División de Estudios Profesionales

Facultad de Ciencias

Presente

Los abajo firmantes, comunicamos a Usted, que habiendo revisado el trabajo de Tesis que realiz(ó)ron pasante(s) MAPIO RAUL PERUSQUIA DEL CUETO

con número de cuenta 603577 con el Título:

OPTIMIZACION DEL DISEÑO DEL PATRON DE RECARGA DE COMBUSTIBLE

NUCLEAR DEL REACTOR DE AGUA EN EBULLICION DE LA CENTRAL

NUCLEAR DE LAGUNA VERDE

Otorgamos nuestro **Voto Aprobatorio** y consideramos que a la brevedad deberá presentar su Examen Profesional para obtener el título de FISICO

GRADO	NOMBRE(S)	APELLIDOS COMPLETOS	FIRMA
DRA. Director de Tesis	ALICIA OLIVER	GUTIERREZ	<i>[Firma]</i>
DR.	ANGEL DACAL	ALONSO	<i>[Firma]</i>
DR.	JEAN PIERRE HENNART	BOUDET	<i>[Firma]</i>
DR. Suplente	ALIPIO GUSTAVO CALLES	MARTINEZ	<i>[Firma]</i>
M. EN C. Suplente	CARLOS FILIO	LOPEZ	<i>[Firma]</i>

A mi esposa Rosa María

a mis hijos

Raúl Alejandro
Rodrigo y
Eloísa

A mis hermanos

Manuel, Beatriz, Renato y Clara Elena

A mi madre María Emma

Y en recuerdo de mi padre Luis Manuel Perusquia Camacho

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Dr. Alicia Oliver Gutiérrez por su apoyo e infatigable impulso para hacer realidad esta tesis.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Nuclear por la oportunidad, el apoyo económico y las facilidades de equipo de cómputo e instalaciones brindado para la desarrollo de la tesis.

A los compañeros del personal de la Gerencia de Energéticos y Tecnología Nuclear y en particular al M.en C. Guillermo Duque y Mojica, Gustavo Alonso Vargas, José Luis Montes Tadeo, Juan José Ortiz Servin y Mario Castro Berinstain por sus paciencia y valiosa ayuda.

Al Sindicato Unico de Trabajadores de la Industria Nuclear en especial al Ing. Héctor Cuapio Ortiz por la oportunidad de poder realizar esta tesis.

Finalmente reconocimiento al personal del Departamento de Gestión de Combustible en especial al M. en C. Luciano Sánchez Herrera, Fis. Carlos Alvarez Torres e Ing. Luis Fuentes Marqués por el aporte de conocimiento y selección del tema de este trabajo.

CONTENIDO

-	Lista de Figuras	vii
-	Lista de Tablas	x
	INTRODUCCION	xi
	CAPÍTULO 1, CONCEPTOS BÁSICOS DE REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN	1
	1.1 Reactores de agua ligera (LWR)	1
	1.1.1 Central Nuclear de Laguna Verde (CNLV)	1
	1.1.2 Reactor BWR	1
	1.1.3 Reactor PWR	3
	1.2 Conceptos Básicos	4
	1.2.1 Fisión Nuclear en Cadena	4
	1.2.2 Condición de Operación en Estado Estable	4
	1.2.3 Factor de Multiplicación y Reactividad	5
	1.3 Tipos de Reactores	5
	1.3.1 Isótopos del Uranio Natural	5
	1.3.2 Moderación de Neutrones	6
	1.3.3 Isótopos Fisiles	6
	1.3.4 Tipos de Materiales Moderadores de Neutrones y Reactores Térmicos	6
	1.3.5 Reactores de Agua Pesada y Ligera	7
	1.3.6 Reactores Rápidos	
	1.4 Descripción del Núcleo del Reactor BWR de la CNLV	8
	1.4.1 Núcleo	8
	1.4.2 Combustibles	10
	1.4.3 Sistema de Barras de Control	12
	CAPÍTULO 2, CICLO DE COMBUSTIBLE, ADMINISTRACIÓN DE COMBUSTIBLE	14
	2.1 Etapas de Conversión de Energía	14
	2.1.1 Conversión de Energía Nuclear a Energía Térmica	14
	2.1.2 Conversión de Energía Térmica a Energía Mecánica	14
	2.1.3 Conversión de Energía Mecánica a Energía Eléctrica	14
	2.2 Características Especiales del Combustible Nuclear	15
	2.2.1 Energía Específica del Combustible Nuclear	15
	2.2.2 Seguridad y Salvaguardias Nuclear	15

2.3	Ciclo de Combustible Nuclear	16
2.3.1	Comparación del Ciclo de Combustible de una Planta Convencional y una Planta Nuclear	16
2.3.2	Ciclo de Combustible Nuclear, Ciclo de Combustible del Reactor	17
2.3.3	Descripción del Ciclo de Combustible del Reactor en la CNLV8	19
2.3.4	Ventaja Económica del Ciclo de Combustible Nuclear	19
2.4	Administración de Combustible	19
2.4.1	Categorías de la Administración de Combustible	19
2.4.2	Administración del Combustible Pre-Irradiación	20
2.4.2.1	Mina	20
2.4.2.2	Concentración	20
2.4.2.3	Conversión	21
2.4.2.4	Enriquecimiento	21
2.4.2.5	Fabricación	21
2.4.3	Administración del combustible post-irradiación (almacenamiento de combustible gastado, reprocesamiento y disposición final)	22
CAPITULO 3, ADMINISTRACIÓN DEL COMBUSTIBLE DENTRO DEL NÚCLEO		23
3.1	Licenciamiento de Recargas	23
3.1.1	Diseño del combustible de recarga	24
3.1.2	Diseño del patrón de recarga de referencia (RLP)	24
3.1.3	Análisis de licenciamiento de la recarga	25
3.1.4	Diseño del patrón de recarga final (CMR)	25
3.2	Diseño del núcleo de Recarga	26
3.2.1	Requerimientos para realizar el diseño de la recarga	26
3.2.2	Guías y recomendaciones para el diseño de la recarga	29
3.2.3	Estrategia de Baja Fuga Radial (Recarga tipo LLL)	30
3.2.4	Estrategia de Núcleo de Celda de Control (Recarga CCC)	31
3.2.5	Estrategia de aplanamiento de la distribución radial de potencia (Esquema de Carga Zonal)	34
3.2.6	Estrategia de máxima dispersión de combustible (Esquema de Recarga de Tablero de ajedrez)	36
3.2.7	Estrategia de optimización HALING, técnicas de corrimiento espectral y tendencias futuras de la optimización de recargas	37
3.2.8	Filosofías de Operación y Administración de Combustible	39
3.2.9	Metodología del diseño de Recargas para la CNLV	41
CAPITULO 4, EL METODO DE GENERACION DE DISTRIBUCIONES RADIALES DE MALLA FINA PARA EL ANALISIS DE RECARGAS		44
4.1	Definición del método	45
4.2	Aplicación del método al núcleo del reactor BWR de la CNLV	46
4.3	Formación de tablas de distribuciones radiales de malla fina con el código MAPATES	47

CAPITULO 5, LA TEORIA DE DIFUSION INVERSA. LA OBTENCION DE DISTRIBUCIONES RADIALES DE REACTIVIDAD OBJETO Y SU APLICACION EN EL DISEÑO DE RECARGAS. 54

5.1	Deducción de la ecuación de difusión de dos grupos (rápido y térmico) de estado estacionario para reactores	57
5.2	Obtención de la ecuación de difusión rápida efectiva	63
5.3	Cálculo de difusión inversa en 1 dimensión (radial) y el potencial de combustible total	66
5.4	Estudio de la curva de distribución de Kinf radial objeto para la CNLV optimizando el potencial de combustible	78
5.4.1	Método de generación de perfiles de potencia	79
5.4.2	Método de cálculos del Potencial de Combustible y de las distribuciones de reactividad	97
5.4.3	Estudio para la obtención de la distribuciones radiales de potencia OPTIMA y de reactividad OBJETO para las recargas de la CNLV	98
5.4.3.1	Resultados, análisis y conclusiones del ESTUDIO-1	100
5.4.3.2	Resultados, análisis y conclusiones del ESTUDIO 2	104
5.5	Metodología de la generación de recargas para el ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV en base a la distribución de Kinf radial objeto y su evaluación con PRESTO	108
5.5.1	Estudio DB, recarga con ajuste libre a la distribución de reactividad OBJETO, resultados, análisis y conclusiones.	108
5.5.2	Estudio EB, recarga con ajuste a la distribución de reactividad OBJETO condivisión del núcleo BLANCO-NEGRO-GRIS. Resultados, análisis y conclusiones.	109

CAPITULO 6, METODO BIPARAMETRICO DE BURTE SU ADAPTACION. MODIFICACION Y APLICACION EN LA OPTIMIZACION DEL DISEÑO DE LA RECARGA DEL CICLO 4 DE LA UNIDAD 1 DE LA CNLV 118

6.1	Método Biparamétrico de Burte	120
6.2	Método Biapramétrico Adaptado (MBA) a la CNLV.	128
6.2.1	Aplicación del Método Biparamétrico Adaptado al Ciclo 4 de la Unidad 1	133
6.2.2	Estudio A1	137
6.2.3	Resultados del estudio A1	138
6.2.4	Análisis de los resultados del estudio A1 y conclusiones	143
6.2.5	Estudio BA	144
6.2.6	Resultados del estudio BA	145
6.2.7	Análisis de los resultados del estudio BA y conclusiones	150
6.2.8	Estudio A2	150
6.2.9	Resultados del estudio A2	152
6.2.10	Análisis de los resultados del estudio A2 y conclusiones	157

6.3	Método Biparamétrico Modificado (MBM) a la CNLV, aplicación al Ciclo 4 de la Unidad 1	158
6.3.1	Optimización del patrón de recarga con colocación de los combustibles frescos en posición oficial, método de búsqueda por escalamiento de malla	161
6.3.2	Estudio FM	161
6.3.3	Resultados del estudio FM	162
6.3.4	Análisis de los resultados del estudio FM y conclusiones	171
6.3.5	Estudio FL	172
6.3.6	Resultados del estudio FL	173
6.3.7	Análisis de los resultados del estudio FL y conclusiones	180
6.3.8	Optimización del patrón de recarga con colocación de los combustibles frescos en posiciones de mayor reactividad que la oficial	181
6.3.9	Estudio GB	181
6.3.10	Resultados del estudio GB	182
6.3.11	Análisis de los resultados del estudio GB y conclusiones	191
6.3.12	Estudio GC	191
6.3.13	Resultados del estudio GC	192
6.3.14	Análisis de los resultados del estudio GC y conclusiones	199
CAPITULO 7, CONCLUSIONES		200
BIBLIOGRAFIA		202
APENDICES		
APENDICE A	CATEGORIAS DE LAS LOCALIDADES DEL NUCLEO Y REGLAS DE COLOCACION PARA LOS REACTORES DE LA CNLV	204
APENDICE B	CALCULO DE LOS PESOS DE MALLA FINA PARA EL NUCLEO DE LOS REACTORES DE LA CNLV	208
APENDICE C	PROGRAMA MAPATES	213
APENDICE	PROGRAMA UUPRI.M	215

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2	Arreglo del núcleo (vista de planta) del reactor BWR de la CNLV.	3
Figura 1.3	Configuración de una celda del núcleo BWR de la CNLV (Ref. 20)	11
Figura 1.4	Canal y ensamble de combustible GE5/6	13
Figura 3.1	Grupos de control del núcleo del reactor BWR de la CNLV	32
Fig. 4.1.a	Distribución de K-infinita radial por regiones	48
Fig. 4.1.b	Distribución de K-infinita radial por malla fina	49
Fig. 4.2.a	Distribución de Potencia Promedio radial por regiones	50
Fig. 4.2.b	Distribución de Potencia Promedio radial por malla fina	51
Fig. 4.3.a	Distribución del MLHGR radial por regiones	52
Fig. 4.3.b	Distribución del MLHGR radial por malla fina	53
Figura 5.2	ESTUDIO-1: Familia de curvas de Potencial de Combustible contra posición del pico máximo de potencia variando la potencia relativa en el centro del núcleo para $P_{max}=1.30$	102
Figura 5.3	ESTUDIO-1: Distribución de potencia relativa radial y su correspondiente distribución radial de reactividad contra la posición del pico máximo de potencia, donde la reactividad máxima permitida es rebasada.	103
Figura 5.4	ESTUDIO-2: Distribución de potencia relativa radial y su correspondiente distribución radial de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$, $P_{max}=1.20$ $r_m=0.60$ donde se muestra la formación de un segundo pico de potencia no deseable cerca de la periferia.	106
Figura 5.5	ESTUDIO-2: Familia de curvas de Potencial de Combustible contra posición del pico máximo de potencia variando la magnitud del pico de potencia relativa, caso $P_{ori}=0.78$	107
Figura 5.6	Mapas de la recarga del ESTUDIO DB ajuste a distribución de Reactividad OBJETO	110
Figura 5.7	Distribución de reactividad radial OBJETO y Distribución de reactividad radial de la recarga del ESTUDIO DB condición BOC. Ajuste libre a la curva de reactividad. Vector de recarga combustibles del ciclo 4 de la Unidad 1 de la CNLV. La curva de reactividad consiste de dos reactas que semejan la reactividad OBJETO encontradas en el apartado 5.4.	111
Figura 5.8	Mapas de la recarga del ESTUDIO EB, ajuste a distribución de Reactividad OBJETO, núcleo dividido en Categorías BLANCO, NEGRO Y GRIS	112
Figura 5.9	Distribución de reactividad radial OBJETO y Distribución de reactividad radial de la recarga del ESTUDIO EB condición BOC. Ajuste a la curva de reactividad reapeando la división del núcleo en categorías BLANCA-NEGRA-GRIS. Vector de recarga combustibles del ciclo 4 de la Unidad 1 de la CNLV. La curva de reactividad consiste de dos reactas que semejan la reactividad OBJETO encontradas en el apartado 5.4.	113

Figura 5.10	Distribución de potencia promedio radial BOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).	114
Figura 5.11	Distribución de reactividad promedio radial BOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).	114
Figura 5.12	Distribución del CPR promedio radial BOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).	115
Figura 5.13	Distribución del LHGR promedio radial BOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).	115
Figura 5.14	Distribución de potencia promedio radial EOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).	116
Figura 5.15	Distribución de reactividad promedio radial EOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).	116
Figura 5.16	Distribución del CPR promedio radial EOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).	117
Figura 5.17	Distribución del LHGR promedio radial EOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).	117
Figura 6.1	Arreglo del núcleo del reactor BWR de la CNLV, núcleo con simetría sectorial 1/4 (SSC).	127
Figura 6.2	Mapa de las potencias relativas y número de importancia núcleo homogéneo	132
Figura 6.3	Mapas de un cuarto de núcleo de la Carga de Combustible OFICIAL136	
Figura 6.4.a	Mapas de la recarga básica del ESTUDIO A1	140
Figura 6.4.b	MCPR de las recargas del estudio A1 contra la longitud del ciclo en días a plena potencia	141
Figura 6.4.c	MLHGR de las recargas del estudio A1 contra la longitud del ciclo en días a plena potencia	142
Figura 6.5.a	Mapas de la recarga básica del ESTUDIO BA	147
Figura 6.5.b	MCPR de las recargas del estudio BA contra la longitud del ciclo en días a plena potencia	148
Figura 6.5.c	MLHGR de las recargas del estudio BA contra la longitud del ciclo en días a plena potencia	149
Figura 6.6.a	Mapas de la recarga básica del ESTUDIO A2	154
Figura 6.6.b	MCPR de las recargas del estudio A2 contra la longitud del ciclo en días a plena potencia	155
Figura 6.6.c	MLHGR de las recargas del estudio A2 contra la longitud del ciclo en días a plena potencia	156
Figura 6.7.c	Mapas de la recarga básica de los ESTUDIOS FM y FL	166
Figura 6.7.b	MCPR de las recargas del estudio FM contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo.	167

Figura 6.7.c	MCPR de las recargas del estudio FM contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo. . . .	168
Figura 6.7.d	MLHGR de las recargas del estudio FM contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo. . . .	169
Figura 6.7.e	MLHGR de las recargas del estudio FM contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo. . . .	170
Figura 6.8.a	MCPR de las recargas del estudio FL contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo. . . .	176
Figura 6.8.b	MCPR de las recargas del estudio FL contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo. . . .	177
Figura 6.8.c	MLHGR de las recargas del estudio FL contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo. . . .	178
Figura 6.8.d	MLHGR de las recargas del estudio FL contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo. . . .	179
Figura 6.9.a	Mapas de las recarga básica de los estudios GB y BC . .	186
Figura 6.9.b	MCPR de las recargas del estudio GB contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo. . . .	187
Figura 6.9.c	MCPR de las recargas del estudio GB contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo. . . .	188
Figura 6.9.d	MLHGR de las recargas del estudio GB contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo. . . .	189
Figura 6.9.e	MLHGR de las recargas del estudio GB contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo. . . .	190
Figura 6.10.a	MCPR de las recargas del estudio GC contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo. . . .	195
Figura 6.10.b	MCPR de las recargas del estudio GC contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo. . . .	196
Figura 6.10.c	MLHGR de las recargas del estudio GC contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo. . . .	197
Figura 6.10.d	MLHGR de las recargas del estudio GC contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo. . . .	198

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1 Principales características del reactor BWR de la CNLV	29
TABLA 5.1 ESTUDIO DB Y EE DATOS BOC Y EOC	109
TABLA 6.1 VECTOR DE CARGA DE COMBUSTIBLE CICLO 4	134
TABLA 6.2 ESTUDIO A1 DATOS BOC Y EOC	139
TABLA 6.3 ESTUDIO BA DATOS BOC Y EOC	146
TABLA 6.4 ESTUDIO A2 DATOS BOC Y EOC	153
TABLA 6.5.a ESTUDIO FM, DATOS BOC (MALLA AMPLIA)	164
TABLA 6.5.b ESTUDIO FM, DATOS EOC (MALLA AMPLIA)	165
TABLA 6.6.a ESTUDIO FL, DATOS BOC (MALLA FINA)	174
TABLA 6.6.b ESTUDIO FL, DATOS EOC (MALLA FINA)	175
TABLA 6.7.a ESTUDIO GB, DATOS BOC (MALLA AMPLIA)	184
TABLA 6.7.b ESTUDIO GB, DATOS EOC (MALLA AMPLIA)	185
TABLA 6.8.a ESTUDIO GC, DATOS BOC (MALLA FINA)	193
TABLA 6.8.b ESTUDIO GC, DATOS EOC (MALLA FINA)	194
ESQUEMA A.1 MAPA CON LAS CATEGORIAS DE LOS CANALES DEL CUARTO DE NUCLEO BWR DE LA CNLV	2XX

INTRODUCCION

El diseño del patrón de recarga del núcleo de un reactor nuclear de agua en ebullición (BWR, Boling Water Reactor) como los encontrados en la Central Nuclear de Laguna Verde (CNLV), involucra la decisión de dónde colocar adecuadamente 444 ensambles combustibles dentro del núcleo del reactor. De éstos, una fracción, de 88 a 148, son combustibles frescos y el resto son combustibles parcialmente gastados en ciclos de operación previos. De acuerdo a un análisis combinatorio, en un núcleo con n combustibles en total, de los cuales r son combustibles nuevos idénticos, el número de patrones de recarga posibles vendría dado por $n!/r!$. En el mejor de los casos, el número de recargas posibles para la CNLV será de $444!/148!$, número realmente gigantesco. Esto obviamente evita el poder realizar el examen de todos los esquemas de recarga para encontrar el más adecuado, es decir el óptimo.

Un patrón de recarga adecuado es aquél que cumple con ciertos requisitos que aseguren la integridad del combustible en todo momento. Esto se traduce usualmente en la exigencia de no sobrepasar ciertos límites térmicos en la operación del reactor a plena potencia. Por otro lado, el mayor beneficio económico se logra con esquemas de recarga a los que se les pueda extraer la mayor cantidad de energía, a plena potencia, durante el ciclo completo de operación. La experiencia (y de cierto modo la teoría) demuestran que los ciclos con mayor extensión, es decir los de mayor beneficio económico, son aquellos con menores márgenes de seguridad. Se presenta entonces un problema de optimización de recargas, donde se restringen los márgenes térmicos y se trata de maximizar la longitud del ciclo de operación (o un parámetro equivalente). En nuestro caso, la variable de decisión es la colocación de los n ensambles combustibles en el núcleo del reactor (444 en los reactores de la CNLV).

El método tradicional para obtener el patrón de recarga es esencialmente de prueba y error. Se recurre a prácticas tales como tratar de seguir esquemas que anteriormente han tenido éxito y usar ciertas reglas derivadas de la experiencia. Las recargas así obtenidas si bien son seguras distan mucho de ser óptimas.

* Traducción directa de Fuel Assembly y término usual en el lenguaje técnico para referirse a un conjunto combustible, combinación de combustible y materiales estructurales.

Diversos investigadores desde hace años han intentado abordar el problema usando desde la metodología de optimización lineal y no lineal (complicada por el hecho de que las variables de decisión no son variables continuas sino discretas), hasta por medio de redes neuronales pasando por el método heurístico de base de conocimientos. Los artículos hechos al respecto indican que se han obtenido ciertos resultados alentadores; sin embargo, como lo expresa Downar en la Ref. 2, hasta el momento aún no existe una metodología aceptada por la comunidad de diseñadores de recargas.

El objetivo principal de esta tesis, además de presentar y revisar los conceptos básicos de la Administración de Combustible, es realizar estudios que permitan avanzar en el establecimiento de una metodología práctica de optimización de recargas de ensambles combustibles para reactores BWR, particularmente para la CNLV.

En los primeros tres capítulos se presentan y revisan los conceptos básicos relacionados con la Administración de Combustible y las estrategias, métodos y técnicas desarrolladas para la generación de recargas de combustible de los reactores nucleares de potencia.

La teoría de difusión inversa de neutrones, como se verá en la tesis, da los fundamentos para desarrollar una metodología de generación de patrones de recarga de combustibles óptimos, al minimizar el llamado potencial de combustible.

También se estudia y adapta el método biparamétrico de Burte, con el cual es posible buscar patrones de recarga biparamétricos óptimos. Ambos métodos se aplicaron a la recarga del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV. El método biparamétrico en particular tuvo que ser adaptado y modificado sustancialmente. Los resultados, análisis y conclusiones de estos estudios se presentan en los últimos capítulos.

A continuación se describe el contenido de los capítulos que integran esta tesis.

En el capítulo 1, se proporcionan los conceptos y procesos básicos de los reactores de fisión, se describen los principales tipos de reactores en particular el BWR de la CNLV.

En el capítulo 2 se define qué se entiende por ciclo de combustible nuclear y las etapas de la administración del combustible. En particular se examinan los procesos de preirradiación y postirradiación.

En el capítulo 3, se examina la administración del combustible dentro del reactor y el diseño de núcleos de recarga. Se revisan las diferentes estrategias, técnicas y métodos de optimización relacionadas con la generación del patrón de recarga de un núcleo de reactor nuclear.

En el capítulo 4 se presenta un método original para obtener distribuciones radiales detallados de los parámetros nucleares. Con éste método (además de visualizar en forma clara las distribuciones radiales de los parámetros nucleares) es posible formular un algoritmo que ajusta la colocación de los combustibles en el núcleo de un reactor a una curva de reactividad radial OBJETO y con esto optimizar la recarga del combustible.

En el capítulo 5 se presenta una serie de desarrollos relacionados con la optimización de recargas con base en la teoría de difusión inversa. Se parte de la ecuación de transporte de neutrones y paso por paso se deriva la ecuación de la distribución de reactividad en función de la distribución de potencia radial. Con base en esta ecuación se estudia qué tipo de distribución de potencia radial es óptima al minimizar el parámetro de potencial de combustible y determinar la distribución de reactividad OBJETO correspondiente.

Se realizaron estudios para determinar qué tipo de distribuciones de potencia radial son óptimas. Para esto se varió la posición y magnitud del pico de potencia así como la potencia en el centro del núcleo. Las características de las distribuciones de potencia se controlaron mediante un par de polinomios de cuarto grado. El análisis de los resultados obtenidos aportan una visión teórica de cómo se correlacionan las distribuciones de potencia y reactividad.

Se desarrolló un algoritmo de generación de candidatos de recarga de combustible (con base en el método del capítulo cuatro) donde la reactividad del núcleo del reactor se ajusta a que empate con la distribución de la reactividad OBJETO. Este algoritmo se aplica a los ensamble combustibles de la recarga del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV. Los candidatos de recarga se evaluaron con el código de cómputo simulador de núcleos PRESTO.

En el capítulo 6 se presenta el método biparamétrico de búsqueda de patrones de recarga óptimos desarrollado por Burte. Se describe cómo se adaptó y modificó para su uso en los reactores de la CNLV. Para esto se efectuaron una serie de estudios usando el simulador de núcleos PRESTO con el fin de poder determinar la eficacia del método. Finalmente se logró el llamado Método Biparamétrico Modificado complementado con la técnica rápida y confiable de búsqueda de patrones óptimos por escalamiento de mallas bidimensionales. El Método se aplicó en el ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV obteniéndose recargas biparamétricas óptimas que al compararse con la recarga de combustible OFICIAL resultaron con márgenes de seguridad mejores y a la vez con longitudes de ciclo de operación a plena potencia mayores en más de 13 días que la calculada para la recarga OFICIAL.

En el Capítulo 7 se dan las conclusiones y recomendaciones surgidas de los estudios efectuados.

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS BÁSICOS DE REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN.

1.1 Reactores de agua ligera (LWR)

En este capítulo se exponen los conceptos y procesos básicos de los reactores de fisión. Se describen los diferentes tipos de reactores, en particular al modelo GE BWR-6 empleado en México para la producción de electricidad.

1.1.1 Central Nuclear de Laguna Verde (CNLV)

Actualmente en la Central Nuclear de Laguna Verde (CNLV) en el Estado de Veracruz la Comisión Federal de Electricidad tiene dos unidades idénticas de reactores nucleares de potencia de agua ligera LWR (Ligh Water Reactor), cada uno con una potencia nominal de 1931 Megawatts térmicos (MWT). El propósito de estos reactores es la conversión de energía nuclear en energía térmica y de ahí a energía eléctrica vía un turbo-generador. La potencia eléctrica nominal es de 654 Megawatts eléctricos (MWe), por lo que la eficiencia es de 33%. Su sistema de generación de vapor es de ciclo abierto lo que implica que el agua empleada en la remoción del calor del núcleo del reactor es la misma que impulsa el turbo-generador de electricidad.

1.1.2 Reactor BWR

En reactores como los de Laguna Verde, el vapor es producido en el mismo núcleo del reactor por lo que son llamados reactores de agua en ebullición o reactores BWR (Boling Water Reactor). El fluido que se usa para remover el calor generado en el núcleo es a su vez el fluido de trabajo que mueve la turbina de vapor saturado, por lo que se trata de un sistema de vapor de ciclo abierto de un sólo circuito. Por todo esto el reactor BWR es un reactor de agua en ebullición de ciclo directo.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema del Sistema de Suministro de Vapor Nuclear (NSSS por sus siglas en inglés). Como se muestra en el diagrama el núcleo está dentro de una vasija de presión que permite producir vapor saturado a una presión nominal de 7 MeagaPascal (MP). Una característica de los sistemas abiertos es que la temperatura y presión a la salida del reactor y a la entrada de la turbina es esencialmente la misma.

El Reactor de Agua en Ebullición

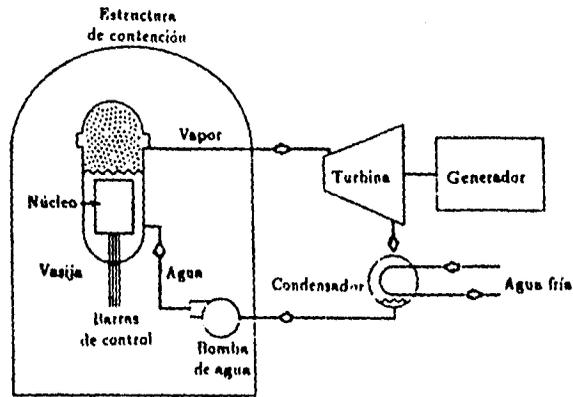


Figura 1.1.a Esquema de suministro de vapor de un BWR (Ref. 13)

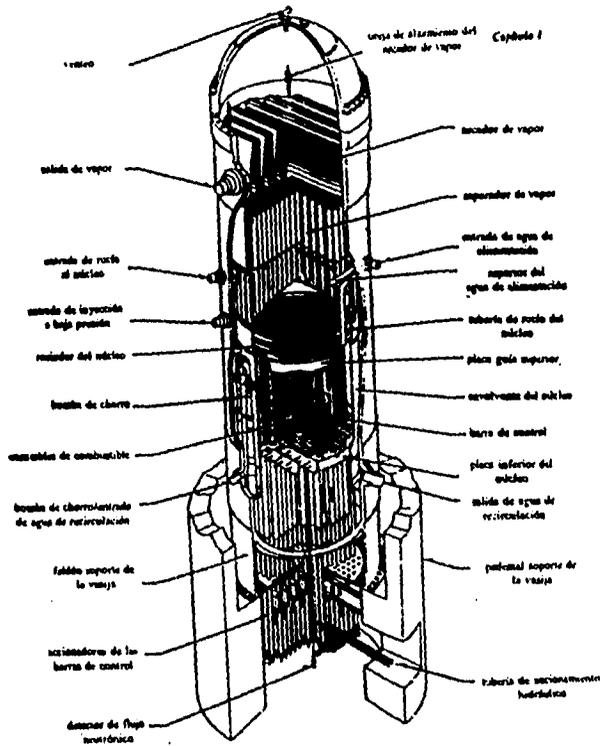


Figura 1.1.b Corte transversal el reactor BWR (Ref. 20)

A la salida del núcleo el vapor saturado va mezclado con agua. Es indispensable que las turbinas trabajen con vapor seco para evitar daños a los álabes por el impacto de pequeñas gotas de agua. En los BWR esto se logra haciendo pasar al vapor húmedo por unos separadores y secadores de vapor localizados en la parte superior de la vasija de presión. El separador consiste en un arreglo de tubos verticales conteniendo aspas fijas que imprimen un movimiento de torbellino a la mezcla de vapor y agua, el cual fuerza al agua líquida a depositarse en la superficie de los tubos escurriendo por gravedad y retornando al núcleo del reactor. El vapor pasa a los secadores de vapor y de ahí a la entrada a la turbina. Una vez extraída la energía del vapor por la turbina fluye al condensador donde, por medio de un sistema de intercambiadores, se le extrae más energía calorífica y pasa a estado líquido. El circuito secundario del condensador, en el caso de los reactores de Laguna Verde, utiliza agua de mar. A la salida del condensador, el fluido es bombeado de vuelta al reactor. El agua entra al núcleo del reactor donde remueve el calor generado por las fisiones nucleares y se genera nuevamente vapor saturado en la parte superior y de ahí a los sistemas de separación cerrándose el circuito.

En principio los reactores BWR pueden trabajar únicamente por el fluir del refrigerante en el núcleo del reactor por convección natural. Incluso algunos diseños avanzados de BWR así funcionan. En el caso de los reactores BWR de Laguna Verde, poseen dos circuitos, cada uno de los circuitos tiene una bomba de recirculación tipo JET que le imprimen una circulación forzada al refrigerante dentro del núcleo. Con esto se logran dos resultados importantes:

- 1- obtener respecto a un reactor de convección natural, una mayor producción volumétrica de energía y por lo tanto un menor tamaño de núcleo y vasija de presión para una potencia nominal dada, y
- 2- al aumentar (o disminuir) el caudal de las bombas JET se disminuye (o aumenta) el por ciento de los vacíos (vapor) dentro del núcleo y con esto aumentar (o disminuir) la potencia del reactor. Así se logra un control fino de la potencia del reactor.

1.1.3 Reactor PWR

El otro tipo de reactor de agua ligera (LWR), y el más popular de los reactores de potencia en el mundo occidental, es el llamado reactor de agua presurizada (PWR, Pressurized Water Reactor). En él, el NSSS está constituido por dos circuitos de fluidos en serie. El circuito primario remueve el calor del núcleo, siempre en fase líquida, y por medio de un intercambiador de calor en un segundo circuito se genera el vapor que mueve al sistema de turbina-generador de electricidad. El uso de dos circuitos en los reactores

PWR le proporciona ciertas ventajas respecto a los reactores BWR; una de ellas es el aislamiento del sistema de turbina-generador del circuito primario del núcleo del reactor. Otra ventaja es que el reactor funciona en una sola fase (fase líquida), lo que facilita los cálculos de diseño y análisis.

La desventaja es una mayor presión de operación sobre la vasija, en el caso de los reactores PWR alcanzan presiones del orden de 15 MegaPascales. Por otro lado, las bombas de recirculación son sustancialmente de mayor potencia que las encontradas en los reactores BWR. Esto se debe a los grandes caudales que se necesita mover en los reactores PWR puesto que el calor adquirido por el refrigerante en el núcleo del reactor es calor sensible, mientras que en los reactores BWR se trata además con calor latente.

1.2 Conceptos Básicos

A continuación se presentan los conceptos básicos de teoría de reactores.

1.2.1 Fisión Nuclear en Cadena

La parte central de un reactor nuclear es sin duda su núcleo. En él se desarrollan los principales procesos que permiten convertir la energía nuclear en energía térmica. En el núcleo de un reactor se llevan a cabo, en forma controlada, las reacciones en cadena de la fisión nuclear. En este proceso ciertos núcleos pesados como los isótopos de uranio, al absorber un neutrón se dividen en dos núcleos y emiten dos o tres neutrones. Además, se liberan del orden de 200 Mega-electrón-volts (Mev) de energía. Los neutrones producto de la fisión y que poseen energías cinéticas de 1 a 2 Mev son llamados neutrones rápidos. Estos neutrones a su vez pueden inducir nuevas fisiones y así en cadena producir más y más fisiones. En el caso de controlarse adecuadamente las reacciones de fisión, se puede sustentar una producción continua de energía susceptible de aprovecharse lo que constituye un reactor nuclear de potencia.

1.2.2 Condición de Operación en Estado Estable

Para poder sostener un nivel de potencia constante en un reactor nuclear (condición de criticidad) es necesario que, en promedio, de los dos o tres neutrones producidos por fisión, uno de ellos llegue a producir una nueva fisión y no sea ya capturado por un material no fisionable ni escape por las fronteras físicas del reactor o, aún cuando sea absorbido por un núcleo fisionable, éste no quede como simple captura radiactiva. En síntesis, para operar un reactor en **estado estable**, es necesario que por cada fisión los neutrones produzcan en promedio otra fisión.

1.2.3 Factor de Multiplicación y Reactividad

En teoría de reactores, para poder expresar si un reactor está en estado estable (o no), se usa el concepto de **factor de multiplicación**. El factor de multiplicación se define como la razón del número de fisiones en una generación dada entre el número de fisiones de la generación inmediatamente anterior.

$$K = \frac{\text{número de fisiones de la generación N}}{\text{número de fisiones de la generación (N-1)}}$$

K= factor de multiplicación

Cuando en un reactor la potencia está en estado estable, el factor de multiplicación del reactor es exactamente igual a 1.0 y se dice que el reactor está **crítico**. Si el reactor está aumentando potencia a través del tiempo, el factor de multiplicación será mayor a uno y se dice que el reactor está **supercrítico**. Por último, si el valor es menor que 1.0 el reactor está en condición **subcrítica** y la potencia disminuirá paulatinamente.

Un concepto también muy usado en teoría de reactores y relacionado con el factor de multiplicación es el de **reactividad**. La reactividad mide qué tanto se desvía un reactor de la criticidad y se puede definir como:

$$\text{RHO} = \frac{K - 1}{K}, \text{ RHO} = \text{reactividad}$$

La reactividad de un reactor será igual a cero si es crítico, negativa si es subcrítico y positiva si el reactor es supercrítico.

En todo reactor nuclear es indispensable contar con una serie de dispositivos que permitan controlar de manera segura la operación del reactor.

1.3 Tipos de Reactores

Brevemente se comentan los principales tipos de reactores de potencia existentes.

1.3.1 Isótopos del Uranio Natural

El uranio natural posee dos isótopos: el uranio 238 que constituye el 99.29 % y el uranio 235, el .71% restante. Ambos isótopos al absorber neutrones de más de 1 Mev de energía pueden llegar a fisionarse, por este motivo se les llama fisionables.

1.3.2 Moderación de Neutrones

Se dice que los neutrones producto de la fisión se han termalizado, cuando por medio de colisiones con los núcleos del reactor, moderan su energía cinética y llegan a estar en equilibrio térmico con los materiales del núcleo. En estas circunstancias el neutrón puede alcanzar energías del orden de .025 ev. Al proceso de frenado de la velocidad de los neutrones se le llama *moderación de neutrones*.

1.3.3 Isótopos Fisiles

Experimentalmente se encuentra que los isótopos pesados llamados fisiles, como el Uranio 235 y el Plutonio 239, son altamente susceptibles de fisionarse con neutrones de baja energía como es el caso de los neutrones en equilibrio térmico.

1.3.4 Tipos de Materiales Moderadores de Neutrones y Reactores Térmicos

El mejor material moderador de neutrones es aquél que posea elementos cuya masa sea igual o semejante a la masa del neutrón y que a su vez no absorba neutrones.

A los reactores de agua ligera, así como a los reactores de agua pesada y de grafito, se les llama reactores térmicos porque la mayor cantidad de las fisiones son producidas por neutrones termalizados absorbidos por isótopos fisiles.

Estos reactores aprovechan el hecho de que los isótopos fisiles como el uranio 235, único físil que se encuentra en estado natural, tienen una alta probabilidad de absorber un neutrón térmico y fisionarse. En contraste, al isótopo 238 del uranio se le denomina fisionable porque sólo se fisiona, a veces, al absorber neutrones rápidos de más de 1 Mev de energía. Al absorber neutrones de menor energía, y a veces mayor, el isótopo no se fisiona y eventualmente decae, por diferentes cadenas, en isótopos fisiles del plutonio (Pu-239 y Pu-241). Por este motivo al uranio 238 se le llama fértil.

El hidrógeno prácticamente tiene la misma masa del neutrón y sin duda es el mejor moderador en el sentido de que, con relativamente pocas colisiones, del orden de 15, logra termalizar a los neutrones de fisión. Sin embargo es un absorbedor de neutrones que, aunque relativamente moderado, es suficiente para que sea imposible construir un reactor crítico con base en uranio natural y agua ligera.

El segundo candidato moderador es el isótopo del hidrógeno llamado deuterio; el agua pesada D2O es el compuesto idóneo del deuterio

para usarse en los reactores nucleares. El deuterio, aunque requiere del orden de 28 colisiones para termalizar la energía de los neutrones de fisión es un excelente moderador debido a que prácticamente no absorbe neutrones.

El tercer candidato e incluso el primero en utilizarse históricamente es el grafito muy puro (91 colisiones para termalizar los neutrones de fisión), que al igual que el deuterio, prácticamente no absorbe neutrones.

Tanto el grafito como el D20 permiten la construcción de reactores térmicos de potencia con combustibles de uranio natural. Los reactores de grafito y uranio natural fueron usados ampliamente para la producción militar de plutonio, aunque actualmente su uso es muy restringido. La razón principal es que el uranio de los combustibles debe estar en forma metálica, lo que origina serios problemas de seguridad.

1.3.5 Reactores de Agua Pesada y Ligera

En los reactores térmicos de agua pesada o ligera los combustibles pueden fabricarse con pastillas cerámicas de dióxido de uranio enacamisadas en zircaloy. Este tipo de ensamble combustible ha demostrado ser, hasta ahora, la mejor opción debido a las propiedades neutrónicas, térmicas y mecánicas que se logran en dichos combustibles.

Otro gran beneficio en estos reactores es que el material moderador es el mismo medio que remueve el calor generado en el núcleo del reactor. Esta ventaja no es sólo de orden práctico sino que tiene importantes implicaciones en la seguridad inherente del reactor, en la eventualidad de que el reactor saliera de control y aumentara la generación de energía y calor en el núcleo. Esto originaría un aumento de vapor con la consiguiente disminución de neutrones moderados, lo cual traería como consecuencia la reducción de las fisiones y por ende de la generación de energía nuclear y con lo que se autocontrola el transitorio de potencia. El efecto de retroalimentación negativa es un elemento de seguridad de gran importancia y que promueve ampliamente el uso de reactores térmicos moderados con agua, principalmente los tipo BWR donde el efecto de retroalimentación negativa es mayor, lo que amplía el margen de seguridad inherente del reactor.

Los reactores de potencia de agua pesada y uranio natural son principalmente promovidos por Canadá con los modelos CANDU. Si bien estos reactores tienen la gran ventaja de usar uranio natural, tienen el inconveniente de que en la naturaleza sólo el 0.015 % del hidrógeno es deuterio. Los procesos de producción de agua pesada son costosos, así como los sistemas relacionados cuya función es evitar en todo momento el deterioro de la calidad del agua pesada dentro del reactor y el escape o merma de la misma.

Por el otro lado, obviamente en los reactores de agua ligera la obtención del moderador (H_2O) no tiene mayor problema. Sin embargo los procesos para lograr que el uranio natural alcance enriquecimientos de uranio 235 del orden del 2 al 3 %, enriquecimientos promedio que necesitan estos reactores, son llevados a cabo en costosas instalaciones con elevado consumo de energía eléctrica. La tecnología involucrada en estos procesos de enriquecimiento es altamente restringida por cuestiones de orden político-militar.

1.3.6 Reactores Rápidos

Es posible construir reactores en los que la gran mayoría de las fisiones sea producida por neutrones rápidos. A estos reactores por ende se les llama reactores rápidos. Desde el punto de vista del mejor aprovechamiento de los recursos energéticos no renovables, los reactores rápidos poseen una gran ventaja derivada del hecho de que la captura de neutrones de materiales fisionables fértiles, como el Uranio 238 y el Torio 232, eventualmente produce isótopos físiiles. Por este medio es posible, que por cada fisión inducida, se produzca un nuevo núcleo físiil y aún más de uno. Los reactores rápidos que producen más de un núcleo físiil por fisión son conocidos como reactores de cría (en caso contrario se les llama reactores rápidos convertidores). En los reactores rápidos es necesario que el núcleo no tenga materiales moderadores de neutrones, el tamaño de los núcleos suele ser de grandes proporciones y el enriquecimiento de uranio-235 superior al 26%. A pesar de su gran ventaja de aumentar la disponibilidad de material físiil, la construcción de reactores rápidos tiene serios problemas de orden político-militar, aunados a problemas técnicos de seguridad.

1.4 Descripción del Núcleo del Reactor BWR de la CNLV

Para terminar con éste capítulo se verá con mayor detalle las diferentes partes del núcleo del reactor BWR de la CNLV.

1.4.1 Núcleo

En los reactores de Laguna Verde el núcleo del reactor está constituido por 444 ensamblajes de combustible. En la Figura 1.2 se muestra un corte transversal del núcleo en el medio plano. En él se puede apreciar que el centro del reactor lo ocupa una de las 109 barras de control de forma cruciforme. El contorno formado por los combustibles trata de seguir un círculo y en primera instancia, se puede suponer que el núcleo es cilíndrico.

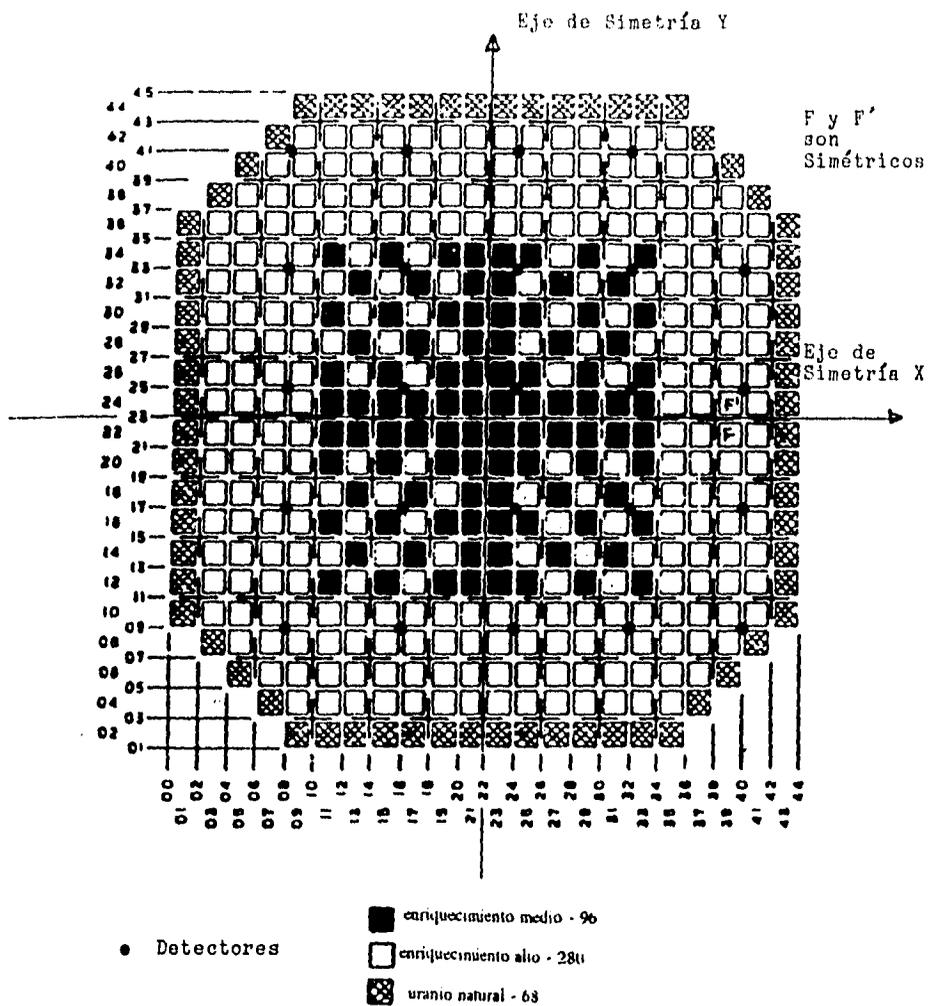


Figura 1.2 Arreglo del núcleo del reactor BWR de la CNLV, núcleo con simetría de espejo 1/4 (QSC)

La distribución de combustibles en el núcleo es tal que en toda la vida del reactor se trata de mantener una simetría espejo de 1/4 de núcleo. La Figura 1.2 muestra como el núcleo se divide en cuatro cuadrantes por los ejes X-Y; cada eje actúa como un espejo tal que el combustible F es simétrico a F'. Esto permite realizar el análisis de sólo 111 combustibles de uno de los cuadrantes. La longitud de los combustibles es de 144 pulgadas (365 cm).

Cada barra de control está rodeada de 4 ensambles combustibles constituyendo lo que se llama una celda de control. En la Figura 1.3 se muestra una sección transversal media de una celda de control constituida por cuatro combustibles junto con la barra de control asociada.

1.4.2 Combustibles

Los ensambles combustibles originales de los reactores de Laguna Verde son del tipo GE5/6 (ver figuras 1.3 y 1.4). Este tipo de combustible son arreglos regulares 8x8 de barras o elementos combustibles. Por medio de siete placas espaciadoras regularmente espaciadas a lo largo del ensamble, se mantienen estructuralmente unidos los elementos del ensamble.

Las barras de combustible son tubos de zircaloy conteniendo pastillas de dióxido de uranio (UO₂). Los enriquecimientos de uranio 235 pueden fluctuar entre 0.71 % (enriquecimiento natural) y 3.9 %. Eventualmente y con el fin de controlar en el largo plazo el exceso de reactividad de los combustibles nuevos y lograr un quemado más uniforme, ciertos elementos combustibles contienen óxido de gadolinio que actúa como veneno quemable, el cual absorbe neutrones y se va quemando gradualmente con mayor rapidez que el uranio 235 lográndose con esto que la reactividad a lo largo de la vida del ensamble combustible se "aplane". Los tubos de los elementos se sellan en sus extremos con tapones de zircaloy. El tapón superior posee un resorte cuya función es mantener juntas las pastillas de UO₂ y permitir la expansión térmica longitudinal de las mismas durante operación a potencia. Así mismo, permite la formación de la región del plenum dentro del elemento, que permite la acumulación de gases de fisión y evita el aumento de la presión dentro del elemento combustible.

El ensamble GE5/6 además de 62 elementos combustibles, posee dos tubos de sección circular cuyo objeto es contener agua en estado líquido que contribuya al proceso de moderación de los neutrones. Esta contribución es importante sobre todo en la parte superior del núcleo del reactor donde el refrigerante, durante la operación del reactor a potencia, está en mayor medida en forma de vapor. Esto produce un estado local de submoderación de neutrones que mitiga los dos tubos centrales con agua. Es tal la importancia de estos canales de agua que en combustibles más avanzados existen grandes canales de agua de moderación.

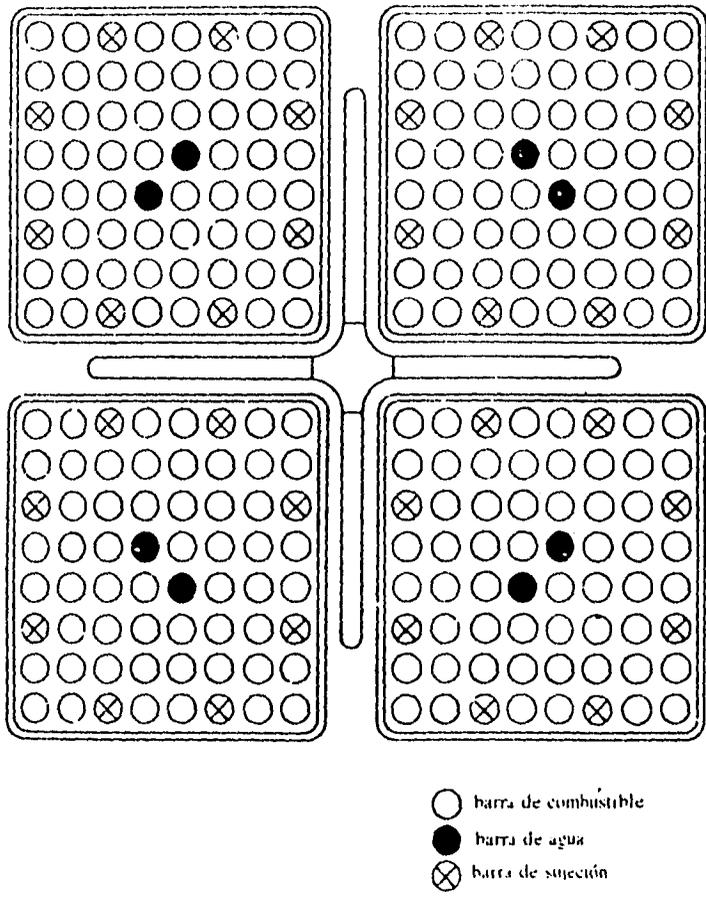


Figura 1.3 Configuración de una celda del núcleo del reactor (Ref. 20)

Cada uno de los ensambles combustibles se introduce dentro de un canal de Zircaloy de sección cuadrática. La función principal de este canal es la de encauzar el flujo del refrigerante a lo largo de todo el ensamble.

En condiciones de operación nominales el caudal de refrigeración entra en la parte inferior de la vasija en estado líquido. El refrigerante es introducido en el extremo inferior de los canales de los ensambles combustibles en donde, debido a la generación de calor nuclear, es calentado. El agua alcanza temperaturas de saturación y al salir el fluido en la parte superior del núcleo, 70% del agua es vapor.

1.4.3 Sistema de Barras de Control

En la parte inferior de la vasija de los reactores BWR de Laguna Verde entran 109 barras de control de forma cruciforme. Estas barras tienen cierto contenido de boro 10, un isótopo que absorbe eficazmente los neutrones térmicos. El uso de las barras de control tiene dos funciones fundamentales:

- 1- CONTROL DE PARADA. Todo reactor debe contar con un sistema que permita parar rápidamente la operación del reactor bajo cualquier circunstancia creíble. El sistema de barras de control de los reactores BWR cuenta con un dispositivo que introduce hidráulicamente las 109 barras de control dentro del núcleo, insertando a una velocidad suficientemente rápida una reactividad negativa suficientemente alta para hacer subcrítico el reactor sin que sufra daño apreciable bajo cualquier condición previsible.
- 2- REGULACION DE LA POTENCIA. Las barras de control de los reactores BWR se pueden introducir en el núcleo en 48 posiciones (o muescas) de altura axial diferentes (48 muescas -barra completamente extraída-, 48 muescas -barra totalmente insertada cubriendo la altura total del núcleo-). Con esto es posible colocar ciertas barras en ciertas posiciones y obtener el nivel de potencia deseado. Estos movimientos de barras también permiten compensar pequeños cambios de reactividad debidos a modificaciones en la demanda de electricidad, o cambios de temperatura y controlar el nivel de potencia de operación del reactor.

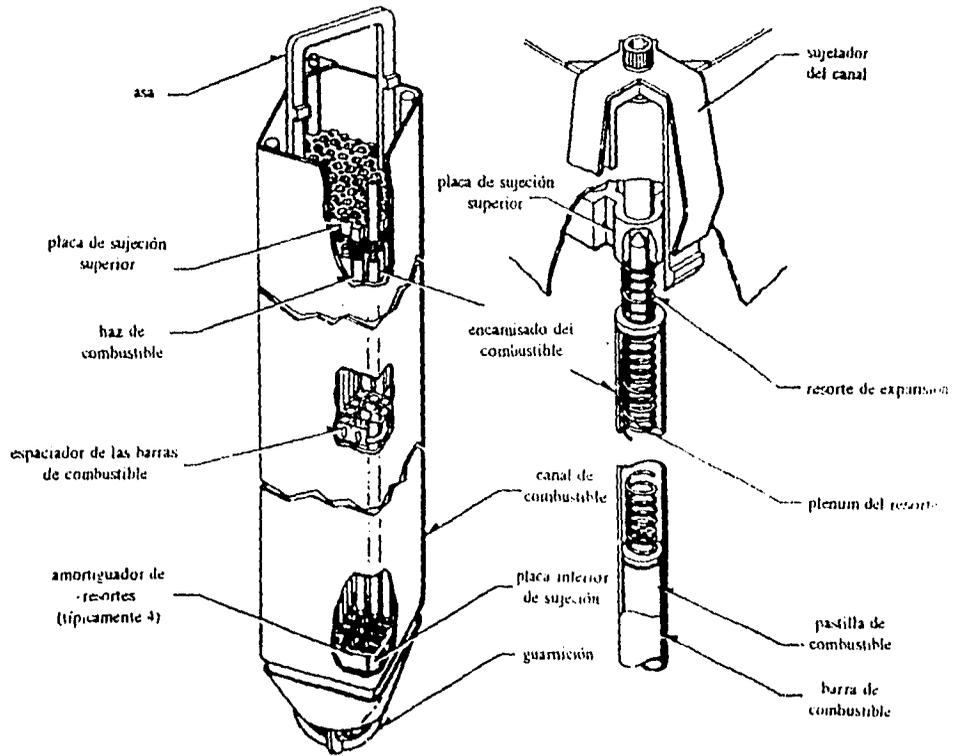


Figura 1.4 Canal y ensamble de combustible tipo GE5/6

CAPÍTULO 2

CICLO DE COMBUSTIBLE, ADMINISTRACIÓN DE COMBUSTIBLE

El ciclo de combustible nuclear está fuertemente relacionado con la administración del mismo. En éste capítulo se revisaran los procesos involucrados desde la extracción del mineral hasta la disposición final del combustible. Se tratan con mayor amplitud los procesos de pre-irradiación y post-irradiación ya que la irradiación del combustible (importante proceso para la tesis) se le dedica íntegro el capítulo tres.

2.1 Etapas de Conversión de Energía

Antes de tratar el tema del ciclo de combustible se examinará el proceso de conversión de energía en una planta nucleoelectrónica.

2.1.1 Conversión de Energía Nuclear a Energía Térmica

La conversión de energía nuclear en energía eléctrica en una planta nuclear de ebullición de agua ligera se lleva a cabo en tres etapas. En la primera etapa la energía nuclear se convierte en energía térmica. Esta energía térmica se origina principalmente en el proceso de frenamiento que sufren los núcleos producto de la fisión. El proceso se desarrolla prácticamente dentro del mismo material del elemento combustible. El calor de los combustibles es transferido por conducción a través del encamisado del elemento combustible hacia el fluido refrigerante. En el caso de los reactores BWR, gran parte de la energía térmica removida por el refrigerante es en forma de calor latente, por lo que se genera en el mismo núcleo del reactor vapor saturado.

2.1.2 Conversión de Energía Térmica a Energía Mecánica

En una segunda etapa, el vapor saturado y ya seco es conducido a la entrada de una turbina donde la energía térmica se transforma en energía mecánica. La eficiencia de esta etapa es la más baja del proceso de conversión, siendo para las plantas BWR del orden del 34%.

2.1.3 Conversión de Energía Mecánica a Energía Eléctrica

En la tercera y última etapa de conversión, la energía mecánica se convierte en energía eléctrica. Para esto se une mediante una flecha común la turbina con un generador eléctrico. La eficiencia de esta etapa es muy cercana al 100%.

Las plantas nucleoelectricas BWR y las plantas termoelectricas convencionales comparten las dos ultimas etapas con una pequena diferencia: las plantas de combustible fosil pueden alcanzar eficiencias globales mayores debido principalmente a que en lugar de vapor saturado se emplea vapor sobrecalentado.

2.2 Caracteristicas Especiales del Combustible Nuclear

La gran cantidad de energia del combustible nuclear, aunado a su intensa actividad y potencial uso militar, tienen consecuencia muy particulares que a continuacion se examinan.

2.2.1 Energia Especifica del Combustible Nuclear

El combustible nuclear tiene caracteristicas especiales que lo hacen muy diferente de los combustibles fosiles. La energia especifica de los combustibles nucleares es miles de veces mayor a la de los combustibles fosiles. A modo de ejemplo un combustible tipo GE9B suele alcanzar quemados de 40,000 MWD/T, que equivalen a 3.45×10^{12} Julio/Kg mientras que la energia especifica del carbon (antracita) es 8200 caloría/g, lo que equivale a 3.43×10^7 julio/Kg. Resulta pues que el combustible nuclear proporciona más de cien mil veces más energia que el carbon.

2.2.2 Seguridad y Salvaguardias Nuclear

Otras dos caracteristicas notables del combustible nuclear es que en él existe material radioactivo y, se puede, en principio, elaborar una bomba nuclear primitiva con los subproductos del combustible gastado. Esto tiene como consecuencia que en todos los procesos involucrados en la obtencion, fabricacion, utilizacion y disposicion final del combustible nuclear es necesario evitar:

- a) la liberacion de radiactividad al ambiente (controles de seguridad nuclear) y,
- b) la sustraccion indebida de los materiales susceptibles de usarse en dispositivos militares (controles de salvaguardias).

2.3 Ciclo de Combustible Nuclear

Se examinó el ciclo de combustible nuclear, en particular aquél de la CNLV, contrastándolo con el ciclo de combustible que se lleva a cabo en una planta convencional de generación de electricidad.

2.3.1 Comparación del Ciclo de Combustible de una Planta Convencional y una Planta Nuclear

La gran diferencia de energías específicas entre las plantas convencionales y nucleares tiene repercusiones operacionales importantes.

El ciclo de combustible de una planta termoeléctrica convencional consiste en la extracción del carbón (o de petróleo y su posterior refinación en combustóleo), su transporte, almacenamiento, alimentación, quemado y remoción de desechos. Esta tarea comprende primordialmente el movimiento de grandes cantidades de material combustible y de desechos en el caso del carbón.

Las etapas del ciclo de combustible que se desarrolla propiamente en una planta convencional son las de **alimentación de combustible-quemado-salida de desechos**. Este es usualmente un proceso continuo en el que la duración desde que entra el combustible se quema y salen los gases de combustión, es prácticamente instantánea.

El tiempo total del ciclo de combustible de una planta carboeléctrica varía y depende de la distancia entre la mina y la planta. Es usual que, para evitar el movimiento de grandes masas de carbón, las carboeléctricas usualmente se ponen prácticamente en la boca de la mina. En estos casos el tiempo de todo el ciclo de combustible es de unos cuantos días.

La vida total de una planta nuclear es de 30 a 40 años. Operacionalmente la vida del reactor se divide en **ciclos de administración del reactor** (o simplemente ciclos). La estrategia general se llama de recargas de combustibles por lotes lo que simplificado consiste en lo siguiente. El primer ciclo, que es especial por el hecho de que todos los combustibles son nuevos, opera en continuo por un lapso de aproximadamente dos años. Al término del primer ciclo el reactor se para y se inician las actividades de recarga de combustible, en donde se reemplazan de 1/3 a 1/6 de los combustibles del núcleo por un lote de combustibles nuevos y se vuelve a arrancar el reactor. El nuevo ciclo dura un año, iniciándose una serie de ciclos consecutivos en

donde vuelven a reemplazarse lotes de combustibles anualmente. Un simple análisis nos indica que los combustibles deben permanecer dentro del reactor de uno a cuatro ciclos. En el caso usual de ciclos anuales, un combustible deberá permanecer de uno a cuatro años dentro del núcleo para poder extraer toda la energía aprovechable de él.

Resumiendo, mientras que en las plantas convencionales de combustible fósil la carga-quemado-descarga es un proceso casi-instantáneo, en los reactores nucleares es un proceso de años. Todo esto debido a la enorme energía específica de los combustibles nucleares. Con el fin de hacer aún más palpable el hecho anterior se proporciona el siguiente ejemplo comparativo.

En una planta carboeléctrica de capacidad semejante a una de las unidades de la Planta Nucleoeléctrica de Laguna Verde, de 1931 MWt, su alimentación de carbón promedio es de 56.6 Kg/s lo que equivale a 4,890 T/hora; es decir, en un año de operación es necesario mover del orden de ¡un millón y medio de toneladas de carbón!. En comparación, la unidad de Laguna Verde después de un año normal de operación recarga del orden de 96 nuevos combustibles, lo que aproximadamente implica ¡17.3 T/anuales de combustible fresco!.

A continuación se expondrá cómo el quemado de un combustible nuclear dentro de un reactor es un proceso que dura al menos un año. Cuando la administración del combustible se hace por lotes, que es lo usual, los combustibles suelen estar dos y tres ciclos más dentro del núcleo.

2.3.2 Ciclo de Combustible Nuclear, Ciclo de Combustible del Reactor

El ciclo del combustible nuclear es sustancialmente diferente y mucho más complejo que el ciclo de combustible de una planta fósil.

En el mejor de los casos, el tiempo que toma el ciclo de un lote de combustible es por lo menos de dos años.

En particular, la etapa del proceso de (alimentación de combustible)-quemado se le llama ciclo de combustible del reactor, y como se verá más adelante, es la etapa de actividades del ciclo de combustible denominada administración del combustible dentro del reactor.

Usualmente el ciclo de combustible del reactor de las recargas de reactores similares al de Laguna Verde, se programa en períodos anuales, aunque la tendencia actual es alargar estos períodos a 18 e inclusive a 24 meses, aprovechando las características avanzadas de nuevos tipos de combustible.

2.3.3 Descripción del Ciclo de Combustible del Reactor en la CNLV

A continuación se describe brevemente el desarrollo de las principales actividades que comprenden una recarga hasta llegar a la operación comercial en Laguna Verde. La descripción genérica se puede considerar representativa de las actividades de un ciclo de combustible del reactor de cualquier reactor tipo BWR.

Las actividades de recarga se inician al introducir totalmente todas las barras de control en el núcleo del reactor. Esto lo apaga y termina formalmente la operación comercial del ciclo anterior. Así comienzan las tareas de recarga física de combustible del nuevo ciclo.

La vasija del reactor se despresuriza y se deja enfriar gradualmente para evitar daños sobre la misma y los ensambles combustibles debido a los fuertes cambios de temperatura (ciclo térmico).

Posteriormente se procede a la apertura de la tapa de la vasija y se descarga parte del combustible gastado, todo de acuerdo a los patrones de carga de combustible estipulados en el Reporte de Administración del Ciclo elaborado previamente ex-profeso para el nuevo ciclo del reactor. Este reporte se le conoce como CMR por sus siglas en inglés (Cycle Management Report). Usualmente se descargan de 72 a 120 ensambles combustibles gastados de los 444 que comprenden el núcleo completo (obviamente se carga el mismo número de combustibles nuevos), es decir, la fracción de recarga (o descarga) es entre 1/3 y 1/6 aproximadamente respecto al total del núcleo. Los combustibles extraídos se depositan en las albercas dispuestas para almacenar los combustibles gastados.

Se procede a intercambiar las posiciones dentro del núcleo de los combustibles gastados restantes, de acuerdo al patrón de recarga establecido en el CMR y a introducir los ensambles combustibles nuevos (frescos) en las posiciones predeterminadas, otra vez de acuerdo al CMR. Se debe encontrar experimentalmente en qué momento se llega a la condición de criticidad en frío y vasija abierta y verificar si cumple lo predicho a este respecto en el CMR. Se continúa introduciendo los combustibles nuevos hasta terminar de colocar todos los combustibles frescos, se coloca la tapa de la vasija de presión y se cierra.

Mientras tanto, una vez apagado el reactor y en paralelo, se realizan las tareas programadas de mantenimiento e inspección de los sistemas del reactor. A continuación del cierre de la vasija se procede a realizar las llamadas pruebas de puesta en marcha. Una vez concluidas las pruebas satisfactoriamente, se aumenta la potencia del reactor a su nivel nominal y se conecta el generador de electricidad a la red de distribución de energía eléctrica, con lo que terminan las tareas de recarga e inicia la operación

comercial del nuevo ciclo de la planta.

La secuencia de extracción de las barras de control para alcanzar criticidad, así como los patrones de barras de control y cambios de secuencias de estos patrones a lo largo del ciclo del reactor en operación a plena potencia (operación comercial) se establecen también en el Reporte de Administración del Ciclo (CMR).

Las tareas de recarga programadas duran usualmente del orden de 8 semanas (2 meses) y la operación comercial 10 meses, en el caso de **ciclos de combustible del reactor anuales.**

2.3.4 Ventaja Económica del Ciclo de Combustible Nuclear

Tradicionalmente se considera que la gran ventaja de las plantas nucleoelectricas sobre las plantas termoelectricas, es el hecho de que el costo del ciclo del combustible de las nucleares aventaja economicamente a las convencionales.

Tomando como base nuevamente una planta carboelctrica equivalente a uno de los reactores de Laguna Verde y considerando que el precio por tonelada del carbón es de \$100 US y que el costo promedio de un combustible nuclear es del orden de \$250,000 US, encontramos que el costo del combustible de la carboelctrica es del orden de 150 millones de dólares americanos, mientras que el de la planta nuclear es del orden de 25 millones de dólares americanos. Es decir, el costo del ciclo de combustible nuclear es seis veces menor al convencional. Desde luego este no es el único costo a considerar; por ejemplo el costo capital de inversión de una nucleoelectrica es sustancialmente mayor al de una planta convencional equivalente y el tiempo de construcción de una nucleoelectrica es también mayor.

Otro aspecto importante en la comparación, que no es de índole económico, al menos en forma directa, es el impacto ambiental de ambas tecnologías el cual, sin entrar en detalles, suele ser ante la opinión pública más adverso, en general, para la tecnología nuclear.

2.4 Administración de Combustible

Se definen las divisiones de la administración de combustible y se describen las diferentes etapas que comprenden la pre y pos-irradiación del combustible.

2.4.1 Categorías de la Administración de Combustible

La administración de combustible nuclear incluye todas las actividades relacionadas con el ciclo de combustible nuclear y se

divide en tres categorías:

- a) **Administración del Combustible Pre-Irradiación** (en inglés Front-End o Head-End), comprende las actividades desde la extracción del mineral hasta la fabricación del ensamble combustible, pasando por los procesos de concentración, conversión y enriquecimiento.
- b) **Administración de Combustible Dentro Del Núcleo** (en inglés In-Core), son las actividades relacionadas con la irradiación o quemado del combustible dentro del núcleo del reactor y las más importantes para el presente trabajo. La finalidad de esta actividad es diseñar en forma óptima el núcleo del reactor en sus ciclos de combustible. Para esto deben observarse las restricciones nucleares, térmicas, hidráulicas, operacionales y económicas impuestas y además garantizar en todo momento que no se comprometa la seguridad del reactor. Finalmente, se deben minimizar los costos de generación de energía.
- c) **Administración del Combustible Post-Irradiación** (en inglés Back-End o Tail-End), son aquellas actividades posteriores a la irradiación del ensamble combustible y su remoción del núcleo. Incluyen, el almacenamiento de combustibles agotados, su transporte a la planta de reprocesamiento, reprocesamiento del combustible separando el uranio y transuránicos para su utilización posterior, concentración de desechos de alta y baja actividad, y disposición final de los desechos.

2.4.2 Administración del Combustible Pre-Irradiación

Vamos ahora a revisar brevemente las etapas de pre-irradiación.

2.4.2.1 Mina

El mineral que contiene mayores concentraciones de uranio es la pechblenda, que alcanza concentraciones de hasta 25%. Sin embargo lo usual, es que las concentraciones de uranio de los minerales extraídos esté por debajo del 1%. En México no se han localizado grandes yacimientos de mineral de uranio y actualmente el mayor depósito de mineral uranífero recuperable económicamente se localiza en la localidad de la Nopalera, en el Estado de Chihuahua.

2.4.2.2 Concentración

Debido a las bajas concentraciones del mineral de uranio, debe molerse y disolverse en ácido para extraer las sales de uranio concentrado. Posteriormente se purifica y se obtiene la llamada torta amarilla que es un concentrado de U_3O_8 al 70%.

2.4.2.3 Conversión

Por hidrogenación, se obtiene a partir de la torta amarilla UO_2 puro y de ahí, usando fluoruro de hidrógeno, se obtiene hexafluoruro de uranio (UF_6). El hexafluoruro de uranio, si bien es altamente corrosivo, es el compuesto de uranio que tiene la más baja temperatura en estado gaseoso.

2.4.2.4 Enriquecimiento

Debido a que los reactores BWR requieren de uranio enriquecido (del 1.7 al 4%), es necesario someter al gas de hexafluoruro de uranio a uno de los costosos procesos de separación isotópica. En Estados Unidos, el proceso usado en escala industrial es el de difusión gaseosa, que se ha usado por más de 40 años. En este método se hace pasar el UF_6 a través de membranas porosas y debido a la pequeña diferencia de los coeficientes de difusión entre el hexafluoruro de Uranio-235 y el Uranio-238 se logra su separación. En una multitud de etapas de dispositivos unitarios de separación isotópica por difusión gaseosa dispuestos en cascada, paso a paso se va realizando el proceso de separación. Este proceso consume grandes cantidades de energía eléctrica, necesaria para mover los compresores de todo el sistema de unidades separativas.

En Europa actualmente se realiza la separación isotópica a escala industrial por medio de ultracentrifugas. Esta técnica se basa en centrifugar el hexafluoruro de uranio a altísimas velocidades con lo que, debido a las pequeñas diferencias de masas de los dos isótopos de uranio, se va logrando la separación. Al igual que en la difusión gaseosa, la separación se logra a través de un sistema múltiple de unidades de ultracentrifugación dispuestas en cascada. Este método consume menos energía eléctrica que el proceso de difusión gaseosa.

2.4.2.5 Fabricación

El UF_6 enriquecido en el isótopo Uranio-235 es nuevamente convertido en UO_2 en forma de polvos, se troquela y prensa en pastillas cilíndricas de UO_2 y se sinterizan en un horno. Posteriormente las pastillas se esmerilan dándoles el tamaño y forma adecuados. Se redondean las esquinas y se forman pequeñas concavidades (dishes) para reducir los problemas de expansión térmica. Las pastillas se envainan en los tubos de zircaloy, se cierran los extremos con tapones sellados y finalmente se arman los ensambles combustibles. Actualmente el Instituto de Nacional de Investigaciones Nucleares está instalando una fábrica de combustibles nucleares con el fin de abastecer parcialmente a las recargas de los reactores de Laguna Verde.

2.4.3 Administración del combustible post-irradiación (almacenamiento de combustible gastado, reprocesamiento y disposición final)

Antes de abordar el tema de la administración del combustible dentro-del-reactor, etapa que sigue formalmente al de pre-irradiación, se expondrá brevemente la última etapa de la administración de combustible, es decir la post-irradiación para posteriormente dedicar íntegramente un capítulo a la Administración del Combustible Dentro del Reactor, tema central de esta tesis.

Los combustibles agotados son almacenados dentro del reactor en piscinas de agua diseñados para este tipo de combustible. Estos combustibles son altamente radiactivos y es necesario enfriarlos por meses hasta que el calor de decaimiento baje y no sea necesario un sistema de enfriamiento exterior. Se suponía que, de acuerdo a antiguos planes, actualmente debería contar el mundo con la capacidad para reprocesar los combustibles nucleares agotados de las actuales plantas comerciales y la de disponer de sitios adecuados para la deposición final de desechos de alta actividad. Técnicamente el problema está en principio resuelto, sin embargo económicamente y políticamente se ha complicado. Actualmente los combustibles gastados se acumulan en las mismas centrales donde fueron utilizados, lo que, junto con el desmantelamiento de las plantas que han terminado su ciclo útil, representa un gran reto a la industria nuclear mundial.

CAPITULO 3

ADMINISTRACIÓN DEL COMBUSTIBLE DENTRO DEL NÚCLEO.

El objetivo de la Administración del Combustible dentro del Núcleo, como ya se mencionó anteriormente es:

Diseñar en forma óptima los ciclos de combustible del reactor sujetándose a las restricciones nucleares, térmicas e hidráulicas y a las consideraciones operacionales y económicas impuestas, garantizando en todo momento que no se comprometa la seguridad del reactor y minimizando los costos de generación de energía.

En México, todo diseño de un patrón de recarga, para poder ser utilizado en una planta, deberá seguir un riguroso proceso de licenciamiento ante la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). A continuación se describen las principales etapas del proceso de licenciamiento de recargas llevado a cabo por la Central de Laguna Verde. Posteriormente se revisan las estrategias y metodologías involucradas en el proceso de diseño del núcleo de recarga.

De aquí en adelante se particularizará la exposición a los casos relacionados con los reactores BWR de Laguna Verde específicamente al Ciclo 4 de la Unidad 1, ya que éste será el ciclo que se usará como referencia para los estudios presentados en esta tesis.

3.1 Licenciamiento de Recargas

Este inciso y sus sub-incisos están basados principalmente en el capítulo 19 de la Referencia 6.

Para fines ilustrativos llamemos Ciclo N+1 al ciclo que se pretende desarrollar, Ciclo N al ciclo vigente y Ciclo N-1 al ciclo previo. El proceso de licenciamientos del patrón de recarga del Ciclo N se divide en cuatro etapas:

- Diseño del combustible de recarga.
- Diseño del patrón de recarga de referencia (RLP, por la siglas en inglés de Reference Load Pattern).
- Análisis de licenciamiento de la recarga.
- Diseño del patrón de recarga final (CMR).

3.1.1 Diseño del combustible de recarga

El Departamento de Gestión de Combustible (DGC) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), con base en el Plan General de Producción de Energía del Sistema Eléctrico Nacional, emite el Programa Nacional de Utilización de Energía (PUE) para la CNLV en donde se especifican los principales parámetros de producción del Ciclo N+1 y fechas de las diferentes etapas del ciclo (Ref. 12). Con base en la información del PUE, el grupo de diseño desarrolla el ciclo de referencia del Ciclo N+1 determinando el tipo y el número de ensambles combustibles a ser usados. De aquí el personal del DGC, apoyado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) (los cuales constituyen el grupo institucional de administración de combustible dentro del núcleo) formula una propuesta de diseño del ensamble combustible. DGC junto con el proveedor de combustibles, en el caso de la CNLV General Electric (GE), realiza el diseño neutrónico final del combustible de recarga y se inicia el proceso de fabricación de los ensambles combustibles. Esta etapa de actividades se termina aproximadamente al finalizar el Ciclo N-1.

3.1.2 Diseño del patrón de recarga de referencia (RLP)

Una vez diseñado el combustible de recarga se inician las actividades del diseño de la recarga del Ciclo N+1. Nuevamente el grupo interinstitucional de Administración de Combustible formula un patrón de carga de combustible del Ciclo N+1 y posteriormente CFE junto con GE, realizan el diseño final de la recarga de combustible del ciclo N+1. Estas actividades se realizan cuando aún no ha terminado el ciclo N, por lo que los quemados de los combustibles a reutilizarse en el ciclo N+1 son solo estimaciones.

Al final de esta etapa se elaboran las primeras secciones del Informe Suplementario de Recarga (SRS, por sus siglas en inglés) el cual, una vez terminado, se pondrá a consideración de la CNSNS. En esta etapa de la formación del informe del ciclo N+1 se especifican, entre otras cosas:

- Keff BOC no controlada (todas las barras de control extraídas) en condición caliente (HOT).
- Keff BOC controlada (HOT).
- Keff BOC con la barra de control de mayor peso extraída, condición fría (COLD)
- Velocidad de inserción de reactividad durante el parado rápido
- Coeficiente de reactividad por vacíos.
- Coeficiente de reactividad por efecto Doppler (temperatura).

3.1.3 Análisis de licenciamiento de la recarga

Una vez establecido el Patrón de Recarga de Referencia y utilizando los datos de la primera parte del Informe Suplementario de Recarga, se inicia el análisis de los siguientes eventos:

- Error de carga del ensamble combustible.
- Respuesta del núcleo ante la caída accidental de barra de control. Se debe demostrar que el pico de entalpia del combustible no excede los 280 cal/gr.
- Respuesta del núcleo ante la extracción errónea de la barra de control. Se debe demostrar que la plasticidad del encamisado de las barras de combustible no excede el 1%.
- Ante oscilaciones de potencia, se analiza si el reactor es lo suficientemente estable para que no ocurran oscilaciones de potencia divergentes ni oscilaciones que sobrepasen los límites térmicos impuestos.

Para transitorios de moderada frecuencia tales como;

- Disparo de turbina o rechazo de carga del generador,
- Pérdida de precalentamiento del agua de alimentación y
- Falla del controlador de agua de alimentación a máxima demanda,

se debe demostrar que no se excede en ningún momento el límite de seguridad impuesto que preserva la integridad del encamisado de las barras de combustible.

Una vez concluido el análisis de licenciamiento de la recarga del Ciclo N+1, se termina el Informe Suplementario de la Recarga y se emite a la CNSNS para su eventual aprobación. En caso de aprobarlo la CNSNS otorga el licenciamiento de operación de la recarga.

3.1.4 Diseño del patrón de recarga final (CMR)

Una vez finalizado el ciclo N y teniendo los datos reales del fin de ciclo se procede a realizar el diseño final de la recarga. En esta etapa es posible realizar sólo ajustes y no grandes cambios con respecto al patrón de recargas de referencia (RLP) y a la estrategia de operación para el ciclo N+1. Para todo cambio deberá demostrarse ante CNSNS que no invalida los términos de la licencia otorgados con base en el patrón de recarga de referencia. Como ejemplo, si en la elaboración del RLP se postuló que el ciclo N terminaría con una exposición promedio del ciclo de 5,000 MWD/MT y en la realidad el ciclo N terminó 400 MWD/MT antes ó 600 MWD/MT después, muy probablemente la CNSNS exigiría que se realizaran nuevos estudios para el licenciamiento de la recarga N+1.

Al terminar este ajuste final de la recarga se elabora el informe final de administración del ciclo CMR que el grupo de operación del reactor deberá seguir. En él se especifica el patrón de recarga de combustible y el programa de patrones de barras de control para el ciclo, entre otras cosas.

3.2 Diseño del núcleo de Recarga

Este inciso sigue los pasos delineados en el capítulo 21 de la Referencia 6.

3.2.1 Requerimientos para realizar el diseño de la recarga

Para poder realizar el diseño de una recarga de combustible del ciclo N+1, debemos contar con ciertas herramientas e información indispensable como son:

- 1- Un sistema de programas de cómputo que nos permita simular adecuadamente el núcleo del reactor y realizar el seguimiento de la operación de la planta y el análisis de las propuesta de recarga de combustible del ciclo N+1.

Para esto se cuenta en el ININ con el Sistema de programas de cómputo de Administración de Combustible FMS, de la compañía Scandpower Inc. Los principales programas involucrados en el estudio que se realiza en la tesis y que pertenecen al sistema FMS son;

- los programas para la formación de los bancos de datos nucleares llamados RECORD/THERMOS/GADPOL y
- el programa PRESTO simulador nodal en tres dimensiones de núcleos de reactores BWR y PWR.

Una vez que se proporciona los datos geométricos del núcleo el nivel de detalle que maneja el código PRESTO es el siguiente: La sección transversal del núcleo la divide en canales de combustible y cada canal, en la opción de tres dimensiones, en el eje axial divide el núcleo en 24 nodos axiales. En el caso de la simulación del núcleo de alguno de los reactores de la CNLV PRESTO maneja un total de $444 \times 24 = 10,656$ nodos.

El código PRESTO (Ref. 7 y 8) posee modelos neutrónico y termohidráulico acoplados y es posible simular estados de quemado de un núcleo. El código proporciona en su salida información sobre potencias, reactividad, flujo neutrónico térmico, exposición (o quemado), razón de generación de calor lineal (LHGR), razón de potencia crítica (CPR), generación de calor lineal planar promedio (MAPLHGR), entre otros parámetros. Todo esto a nivel nodal, de canal de combustible,

axial promedio del núcleo, promedio por región y global del núcleo. Las opciones de PRESTO incluyen cálculos de criticidad en condición caliente, tibios y fríos. Se pueden ejecutar pasos de quemado o exposición, transitorios de xenón, cálculos referentes a encontrar la barra de control más pesada, cálculos de margen de apagado y cálculos de quemado HALING (dado un paso de quemado o de búsqueda de criticidad). El código PRESTO tiene flexibilidad para simular diferentes configuraciones del núcleo y diferentes condiciones de operación, tanto nominal como fueran de lo nominal.

Los principales parámetros de operación que se deben proporcionar al código PRESTO son la potencia nominal, la tasa de flujo del refrigerante, el subenfriamiento del refrigerante a la entrada del núcleo, la presión nominal y el patrón de barras de control. El código, a través de los llamados archivos de reinicio (Restart File) permite ligar ciclos consecutivos del reactor, admitiendo la inserción de nuevos combustibles, la relocalización de combustibles, la reinserción de combustible y la descarga de combustibles gastados.

- 2- Las condiciones finales del ciclo N (ciclo previo). Esta información deberá provenir del seguimiento operacional de la planta y en caso de no contar con ella, de la mejor proyección disponible de fin del ciclo N.

En el estudio de la tesis se usó para este propósito el archivo de reinicio FINAL del seguimiento con el código PRESTO del Ciclo 3 de la Unidad 1 llamado L1PR027.RST (Ref. 9).

- 3- Especificar tipos de combustible nuevos (frescos) de la recarga.

En el Ciclo 4 de la Unidad 1 se cargaron 104 nuevos combustibles, 96 de ellos GE9B con 3.22% de enriquecimiento promedio de U-235 y 4 combustibles LTA de Siemens (Ref. 10). Los parámetros nucleares de las celdas de estos combustibles, junto con los de los recargados del Ciclo 4, están en el Banco de Datos L1F206_M (Ref. 11)

- 4- La energía planeada a producirse en el ciclo.

Para el Ciclo 4 de la Unidad 1, de acuerdo al PUE emitido por CFE (Ref. 12), es de 8046 MWD/MT, equivalentes a 334 días de operación a plena potencia o EFPD (Energy Full Power Days).

- 5- Los principales Parámetros de operación nominal del reactor tales como la potencia térmica nominal del núcleo, el caudal nominal del núcleo, la fracción de desvío del caudal (bypass), la entalpía de entrada al núcleo y la presión nominal. En la Tabla 3.1 (Ref. 13) se consignan los principales valores

de operación nominal de la Unidad 1 de la CNLV.

6- Los límites térmicos y mecánicos a satisfacer en la recarga así como los valores de los parámetros base de diseño tales como (en paréntesis se proporciona los valores impuestos al Ciclo 4 de la Unidad 1):

- MCPR, razón mínima de potencia crítica (1.39)
- MLHGR, razón máximo razón de generación de calor lineal (430 w/cm ó 13.4 Kw/pie)
- MAPLHGR, la generación máxima de calor lineal planar promedio.
- Margen de Apagado en frío con la barra más pesada extraída (al menos de 1 % de $\Delta K/K$).
- Exceso de reactividad en caliente con venenos en equilibrio al inicio del ciclo (1% $\Delta K/K$).

Este valor se impone para compensar la incertidumbre de los cálculos y para tener un exceso a compensar con las barras de control y así poder conformar los perfiles de potencia objeto.

- El pico de exposición de cualquier combustible no deberá ser mayor a 40,000 MWD/T. Esto se suele traducir en que el quemado promedio de un lote de combustible esté dentro del rango de 25,000 a 30,000 MWD/T.

7- Establecer el tipo de simetría del núcleo a usarse

Para el Ciclo 4 de la Unidad 1 se establece para la recarga de combustible la simetría de espejo de un cuarto de núcleo, propiciando en lo posible la simetría de un octavo al menos en las localidades del núcleo relacionadas con el monitoreo del núcleo.

TABLA 1.1
Principales características del reactor BWR de la CNLV

Tipo	BWR/5
Potencia eléctrica (MWe)	654
Potencia térmica (Mwt)	1931
Número de Ensamble	444
Número de barras de control	109
Altura activa del núcleo (cm)	381
Diámetro del núcleo (cm)	362
Generación de potencia lineal (kW/ft):	
promedio	5.4
máxima	13.4
Densidad de potencia promedio (kW/l)	49.15
Enriquecimiento promedio:	
núcleo inicial	1.86
recargas	2 a 4
Presión en el sistema en el núcleo (psia)	1035
Temperatura del moderador (°F)	549
Temperatura del combustible (°F):	
promedio	2143
máxima	3435
Fracción de vacíos:	
promedio	0.40
máxima	0.70

3.2.2 Guías y recomendaciones para el diseño de la recarga

Para la formulación de un patrón de recarga de combustible se proporcionan las siguientes guías y recomendaciones:

- 1- Procurar que en la vida útil de un combustible, éste resida una sola vez en la periferia del núcleo.
- 2- En el caso de que un combustible resida más de una vez en la periferia, la cara que da al reflector radial deberá ser diferente.
- 3- Ningún combustible con tres ciclos en la periferia podrá introducirse en una localidad interna del núcleo.
- 4- Procurar mayores márgenes en la mínima razón de potencia crítica (MCPR) procurando aplanar radialmente la distribución de potencia radial.

- 5- El aplanamiento de la distribución de potencia radial se logra aumentando la Kinf del núcleo hacia la periferia respecto al centro del núcleo.
- 6- Procurar mayores márgenes en el MCPR minimizando las desigualdades entre combustibles adjuntos.
- 7- Procurar dispersar lo más posible en la región interna del núcleo los ensambles combustibles frescos y con esto mejorar el MAPLHGR y el LHGR de la recarga al evitar picos axiales de potencia debidos a no tener combustibles frescos adjuntos.
- 8- Deberá procurarse que los combustibles que van a ser descargados al término del ciclo ocupen localidades tales que el quemado de estos combustibles tienda a igualarse al final del ciclo.

Las recargas de combustible de un reactor se diseñan bajo ciertas estrategias operacionales establecidas, incluyendo la importante estrategia que determina la posición de las barras de control a plena potencia. En el diseño de las recargas también intervienen una serie de principios, criterios y reglas de diseño de recargas que se han ido formando con la experiencia y el estudio teórico de las mismas. Todo esto constituye la metodología de diseño de recarga implementada para satisfacer los objetivos fijados para la recarga, tanto por motivos de seguridad y de facilidad de operación como de ahorro económico.

A continuación se exponen las estrategias más importantes en la formación de recargas, principalmente las relacionadas con el Ciclo 4 de la Unidad 1 de la CNLV.

3.2.3 Estrategia de Baja Fuga Radial (Recarga tipo LLL)

La estrategia de baja fuga radial o recarga tipo LLL (de las siglas en inglés Low Leakage Loading), tiene como motivación la de tratar de prolongar la vida de la vasija de presión del reactor, disminuyendo la fluencia de neutrones sobre la misma.

Una de las estrategias, la más usada, es definir una zona en la periferia del núcleo y colocar en esta zona los combustibles menos reactivos disponibles para la recarga.

La recarga del ciclo 4 de la Unidad 1 de la CNLV fue realizada de acuerdo a la estrategia de baja fuga radial.

3.2.4 Estrategia de Núcleo de Celda de Control (Recarga CCC)

A continuación se presenta la operación del reactor a plena potencia bajo la estrategia de Núcleo de Celdas de Control o

recarga tipo CCC (de las siglas en inglés de Control Cell Core).

Para esto es necesario antes examinar las diferentes funciones que se le asignan a las barras de control y la estrategia convencional de control por barras del reactor.

Las funciones de las barras de control en un BWR son múltiples, las principales son:

- Apagar el reactor en cualquier momento al insertar rápidamente todas las barras de control (SCRAM).
- Llevar a criticidad al reactor al irse extrayendo paulatinamente las barras de control hasta alcanzar primero la criticidad a baja potencia y después la potencia nominal de operación.
- El patrón de barra a plena potencia permite configurar la distribución de potencia e ir compensando los cambios de reactividad debidos a la formación de venenos provenientes de los productos de la fisión (principalmente xenón y samario), a los cambios de potencia, al cambio de presión, de temperatura, al irse quemando los venenos consumibles (gadolinio), para ir compensando el consumo del uranio fisil, para los cambios de reactividad debidos a la formación de plutonio, etc.

Para emplear la estrategia de operación CCC es necesario disponer de combustibles de baja reactividad. Esto no es lo usual en las primeras recargas de un reactor. Para la carga inicial en un reactor BWR, y en el pasado para los siguientes ciclos (antes de establecerse las recargas CCC), la estrategia del manejo de las barras de control del reactor a plena potencia denominada convencional, se basa en lo siguiente:

- Se dividen las barras de control en cuatro grupos designados A-1, A-2, B-1, B-2, tal como se muestra en la Figura 3.1.
- Si una barra de control está completamente insertada en el núcleo, se dice que está en la posición de 00 muescas. Si la barra de control está totalmente extraídas la posición es de 48 muescas. Las barras de control sólo pueden estacionarse en posiciones con un número par de muescas.
- Se definen tres tipos de inserción de barra de control, la llamada inserción somera o poco profunda, cuando la barra de control está en el intervalo de 48 a 32 muescas, inserción intermedia, ente 34 y 18 muescas e inserción profunda, entre 16 a 00 muescas
- En la operación a plena potencia más del 80% de las barras de control están extraídas totalmente; el resto se encuentra en

inserción profunda y/o somera y sirven como una reserva de reactividad ante eventuales cambios de reactividad.

- Si el reactor está operando a plena potencia bajo la secuencia de patrón de barras A1, las barras de control del grupo A1 deberán estar preferentemente insertadas profundamente y las del grupo A2 someramente. En la secuencia A2 se invierten los papeles de los grupos A. En las secuencias B1, las barras de control del grupo B1 están preferentemente insertadas profundamente y las del grupo B2 someramente e inversamente en la secuencia de control B2.
- Para el control del reactor a plena potencia, la secuencia de las barras de control se va intercambiando periódicamente (usualmente cada 1000 MWD/T) hasta terminar el ciclo. El orden en que se van cambiando cíclicamente las secuencias es A1, B1, A2, B2.

ESQUEMA DE LOS GRUPOS DE CONTROL NUCLEO COMPLETO

		A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1		
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	
A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1
B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1
B2	A2	B2								
A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1
B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	
		A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1		

Figura 3.1 Grupos de control del núcleo del reactor BWR de la CNLV

La filosofía detrás de la estrategia convencional de control, es la de alcanzar un quemado uniforme de los ensambles combustibles y de las barras de control al finalizar el ciclo, mitigando en lo más posible las distorsiones de quemado de los combustibles debido a la presencia de las barras de control.

Hace más de una década se probó en la Unidad 1 de la Planta Nuclear de Millstone (USA) un nuevo concepto de control de los reactores BWR a plena potencia. Este nuevo concepto se denominó CCC o de Núcleo de Celdas de Control y consiste en lo siguiente:

- En el concepto CCC los movimientos de barras de control para compensar cambios de reactividad en el reactor a potencia se restringen a un solo grupo de barras de control durante todo el ciclo. Este grupo de barras de control se escoge que sea, por cuestiones de simetría, las barras de la secuencia A2.
- Cada celda de control CCC está formada por la barra de control (perteneciente al grupo de la secuencia A2) y los cuatro combustibles que la rodean.
- Sólo se permite que ensambles combustibles de baja reactividad sean colocados en las celdas CCC. Con esto se logra que el movimiento de las barras de control a plena potencia sólo se realice en celdas con ensambles combustibles de baja potencia. Esto trae como consecuencia una serie de efectos benéficos.
- Aún cuando ya no es necesario realizar cambios de secuencia como en el control convencional, es recomendable una o dos veces por ciclo, intercambiar el papel de las barras someras a profundas y viceversa, para lograr un quemado axial más uniforme al final del ciclo.

Las principales diferencias entre los núcleos CCC y convencionales son:

- En un núcleo convencional siempre habrá movimientos de barras con ensambles combustibles adjuntos de alta reactividad y potencia. Esto suele producir altos picos de potencia nodal reduciéndose los márgenes en los límites térmicos. Se estima que el pico de potencia nodal en las celdas CCC es 16% más bajo que el correspondiente a un núcleo convencional y como consecuencia se produce una sustancial mejora de los márgenes de los parámetros MLHGR y MCPR.
- La operación con núcleos CCC se facilita puesto que se prescinde de los molestos cambios de secuencia de los núcleos convencionales y además los factores de capacidad de la planta se ven aumentados.

- Los efectos acumulativos de la presencia de barra de control sobre los ensambles combustibles son menores en los núcleos CCC. Esto evita deformaciones locales mayores en el quemado del gadolinio y del Uranio-235 así como de la conversión de plutonio debido a la presencia de la barra de control.
- En general el movimiento de la barra de control perturba menos las distribuciones de potencia en los núcleos CCC, facilitando la operación del reactor.

Obviamente el elegir núcleos CCC tiene fuertes repercusiones en la formación del patrón de recarga. Todos los núcleos de recarga de la Unidad 1 de la CNLV, incluyendo el ciclo 4, han sido núcleos CCC.

3.2.5 Estrategia de aplanamiento de la distribución radial de potencia (Esquema de Carga Zonal)

Las técnicas de aplanamiento de la potencia radial se basan en el siguiente principio:

Colocar los ensambles combustibles de una recarga de forma tal que se obtenga la densidad de potencia radial lo más uniforme posible con el fin de aumentar la potencia promedio del núcleo, obtener bajos factores de pico de potencia radial y lograr un quemado uniforme en todo el ciclo.

A continuación se ilustra con un ejemplo cómo la distribución uniforme de combustibles idénticos produce distribuciones de potencia muy alejadas de la uniformidad. Posteriormente se presenta la estrategia de carga ZONAL CICLADO IN-OUT, tendiente a aplanar la distribución de potencia radial.

Los primeros reactores nucleares fueron realizados con cargas uniformes de enriquecimiento y de las propiedades nucleares. Esto tenía la ventaja de la simplicidad tanto en el cálculo teórico como de la realización misma del reactor. Sin embargo las cargas uniformes de combustible tienen una desventaja intrínseca, la distribución de potencia "cae" del centro a la periferia cosenoidalmente, en el caso de reactores de geometría rectangular, o como la función de Bessel de primera clase grado cero en el caso de reactores cilíndricos. En ambos casos distan mucho de que la potencia sea uniforme como es de desearse para los reactores de potencia.

Como ejemplo calculemos qué potencia térmica nominal podría alcanzar un núcleo de las dimensiones del que poseen los reactores de la CNLV si se cargara uniformemente con combustible, es decir con combustibles de idénticas propiedades, imponiendo además, la restricción de que el nodo de mayor potencia tenga una razón de generación de calor lineal (MLHGR) de 430 watt/cm. En este ejemplo consideremos que el núcleo es cilíndrico desnudo (sin reflector);

se puede demostrar que el factor de canal caliente F_R^N es de 3.638 (ver página 503 de la Referencia 14). Sea $LHGR_{prom}$ la razón de generación promedio del núcleo desnudo, el cual se puede calcular como;

$$LHGR_{prom} = MLHGR / F_R^N = 430 / 3.638 = 118.2 \text{ watt/cm}$$

considerando que la longitud de los combustibles (H) es de 144 pulgadas (361.44 cm), el número de barras de combustible por ensamble de 62 (n) y que el núcleo esta constituido por 444 ensambles combustibles (N) podremos calcular la potencia total (P_{tot})

$$P_{tot} = LHGR_{prom} * H * n * N = 118.2 * 62 * 361.44 * 444 =$$

$$P_{tot} = 1,176 \text{ MWth}$$

La potencia térmica nominal de los reactores de Laguna Verde es de 1,931 MWth (P_{CNLV}). Obviamente es necesario que la potencia sea aplanada. Procediendo inversamente y bajo los mismos supuestos del ejemplo anterior se podría estimar el factor de canal caliente máximo para la CNLV ($F_{RmaxCNLV}^N$)

$$F_{RmaxCNLV}^N = (P_{tot} / P_{CNLV}) * F_R^N = (1,176 / 1,931) * 3.638$$

$$F_{RmaxCNLV}^N = 2.21$$

Las primeras técnicas para aplanar el flujo radial en un reactor consistieron en dividir en zonas el núcleo. En la zona central se ponían los combustibles más quemados, en la zona más periférica los más reactivos o frescos y en las zonas intermedias los de quemado intermedio.

Esta estrategia, que se denominó ZONAL CICLADO IN-OUT consiste en lo siguiente;

- Se divide el núcleo en M zonas radiales concentricas cada una conteniendo n canales,
- En cada ciclo se introducen un lote de n combustibles frescos en la zona más periférica,
- La carga anterior de combustibles que ocupaba la zona periférica (ahora con un ciclo de quemado) pasa a la siguiente zona contigua a la más periférica,
- el lote desplazado de los combustibles que en el ciclo anterior ocupaba la zona contigua a la periférica (ahora con dos ciclos de quemado) pasa a la zona próxima que esta más al centro del núcleo,

- el proceso continúa sucesivamente hasta llegar a la zona central donde el lote desplazado con M ciclos de quemado es extraído del núcleo.

Desafortunadamente, el esquema ZONAL CICLADO IN-OUT tropezó con grandes problemas de picos de potencia en las fronteras de las zonas sobre todo en los grandes núcleos con grandes quemados como es el caso de los reactores de potencia. En el ámbito de los reactores de potencia se desechó ésta primera versión de la estrategia ZONAL CICLADO IN-OUT. La realidad, como veremos después, es que los métodos actuales de recargas de reactores de potencia han adaptado tanto rasgos del esquema ZONAL CICLADO IN-OUT como de la estrategia de CARGA DISPERSA que a continuación examinamos.

3.2.6 Estrategia de máxima dispersión de combustible (Esquema de Recarga de Tablero de ajedrez)

El principio de los esquemas de máxima dispersión de ensamblajes combustibles se puede enunciar de la forma siguiente:

Dividir el lote de ensamblajes combustibles en categorías formando grupos de combustibles con propiedades nucleares afines y dispersar su colocación en el núcleo de forma tal que la distancia entre los combustibles de la misma categoría sean lo más equidistante posible entre sí. Con esto se logra minimizar al máximo los picos de potencia locales en los combustibles de alta reactividad.

Bajo este principio se han generado algoritmos que tratan de alcanzar la mayor dispersión generando recargas al azar con cierta preferencia a colocar combustibles de forma tal que se aplane radialmente la potencia. Por prueba y error se obtiene la recarga que cumpla con las restricciones y objetivos impuestos.

En base a la experiencia se encontró que resulta inconveniente el colocar en un núcleo combustibles frescos (o muy reactivos) en localizaciones adyacentes puesto que tienden a formarse picos de potencia local difíciles de mitigar. Este hecho es más pronunciado en el centro del reactor donde las potencias suelen ser mayores. De la experiencia anterior y siguiendo el principio de máxima dispersión se ha formulado el llamado ESQUEMA DE RECARGA DE TABLERO DE AJEDREZ el cual establece:

Dividir la carga de combustibles en dos categorías: frescos y parcialmente quemados. Colocar combustibles frescos en las posiciones "blancas" y los parcialmente quemados en las posiciones "negras" de un tablero de ajedrez en que supuestamente se divide el núcleo del reactor.

Como se verá después, el método biparamétrico de BURTE se basa fuertemente en el esquema de tablero de ajedrez imponiendo dicho esquema (de tablero de ajedrez) a la región central del núcleo.

3.2.7 Estrategia de optimización HALING, técnicas de corrimiento espectral y tendencias futuras de la optimización de recargas

En los tiempos pioneros de la generación de potencia eléctrica por medio de reactores de ebullición R.K. Haling desarrolló la estrategia de optimización de recargas que lleva su nombre. En la planta Big Rock Point aplicó y demostró su metodología la cual hasta la fecha es la piedra angular en la optimización del diseño de cargas de combustible BWR en GE. El método Haling además proporciona las distribuciones de potencia objeto con las cuales los operadores se guían para llevar a cabo la operación adecuada del reactor en cualquier momento del ciclo y así poder garantizar terminar el ciclo en las condiciones previstas.

Respecto al diseño de recargas, la opción Haling permite estimar el estado de fin de ciclo sin necesidad de desarrollar los patrones de barras de control correspondientes. Esto proporciona la posibilidad de realizar análisis rápidos y confiables de propuestas de recarga ya que el método proporciona un medio de cálculo para poder comparar recargas y determina cuál de ellas es mejor.

El principio Haling al poseer la importante cualidad de poder desacoplar el control del ciclo del estado final del ciclo, permite que el estado final de la recarga sea independiente de los patrones de barras de control y de las distribuciones de los venenos quemables. Esto siempre y cuando al final del ciclo los combustibles estén libres del veneno quemable y la distribución de potencia a través del ciclo se haya apegado a la distribución Haling. Como consecuencia del desacoplamiento, es posible estudiar en detalle ciclos consecutivos (análisis de multiciclos) sin necesidad de desarrollar los patrones de barras de control de cada uno de los ciclos ni preocuparse por la distribución de los venenos quemables en los combustibles.

Otra ventaja de seguir el método Haling es que en principio se puede inferir la distribución de los venenos quemables. Esto se logra comparando directamente la distribución de Kinf con combustibles sin venenos con aquella requerida por el perfil de potencia deseada.

El principio Haling establece: (Apéndice D de la Referencia 6)

Para cualquier conjunto dado de condiciones de fin de ciclo, el factor de pico de potencia se mantiene en un valor mínimo cuando el perfil de potencia no cambia durante el ciclo.

Una condición para que funcione este principio es que al final del

ciclo la reactividad del combustible sea una función decreciente de la exposición (o quemado). Este hecho se cumple en la generalidad de las recargas bien formadas y sólo al inicio del ciclo la reactividad de ciertos combustibles es una función creciente de la reactividad (debido a los venenos quemables y a fuertes conversiones iniciales locales de la producción de plutonio).

Haling también proporcionó el método para encontrar el perfil de potencia que cumpliera con su principio y demostró que dada una recarga, la solución es única. Enfatizamos que el perfil de potencia Haling se conserva igual a través de todo el ciclo; es a su vez el óptimo para la recarga en el sentido de que es el perfil que mantiene el factor de pico de potencia mínimo a través de todo el ciclo.

Una consecuencia importante de usar el método HALING es que también se obtiene la distribución de exposición de cada uno de los combustibles al final del ciclo así como la longitud del ciclo, suponiendo que se conoce el valor de la $K_{eff,BOC}$ al final del ciclo del simulador de núcleos utilizado. En principio el valor de $K_{eff,BOC}$ debe ser 1.0000 con todas las barras de control extraídas, sin embargo la incertidumbres de los códigos de simulación es tal que es necesario deducir estadísticamente qué valor deberá ser usado para obtener realmente la longitud del ciclo.

El código PRESTO, como ya ha sido mencionado anteriormente, tiene la opción de realizar cálculos Haling y de hecho el desarrollo de los estudios de optimización de recargas realizados en esta tesis se basa fuertemente en el uso del método HALING. Todas las cargas de los reactores de la CNLV hasta la fecha han sido hechas utilizando el método de optimización Haling. Sin embargo la técnica de desplazamiento espectral (Spectral Shift) se ha comenzado a usar en los últimos diseños de recargas para la Unidad 1 de Laguna Verde. Esta técnica consiste en usar perfiles de potencia (no Haling) que sobrequeimen la parte media inferior del núcleo en la primera mitad del ciclo. Esto con el fin de aumentar la conversión de plutonio y disminuir al final del ciclo la densidad de vacíos global del núcleo y así extender la operación a plena potencia del ciclo. Esto es así puesto que habrá una mayor producción de plutonio y la menor densidad de vacíos, a su vez, proporcionará un mayor margen positivo de reactividad. Esto último en razón de que los vacíos tienen un coeficiente negativo de reactividad.

El fundamento de la técnica de corrimiento espectral consiste en que a mayores flujos de neutrones rápidos, mayor es la conversión del uranio-238 en plutonio-239 y plutonio-241 (ambos fisiles). Entonces, si al inicio del ciclo, cuando se cuenta con un exceso de reactividad importante, se colocan las barras de control de tal forma que globalmente el núcleo tenga una mayor densidad de vacíos (vapor), el aumento global de los vacíos conduce a una disminución de la moderación de neutrones corriéndose el espectro de neutrones

(la relación de neutrones rápidos a térmicos crecerá), trayendo como consecuencia un aumento en la conversión de isótopos fíisiles y extendiéndose la longitud del ciclo a plena potencia.

Aún cuando la anterior técnica aleja la realización del ciclo del concepto Haling, la magnitud de su uso es tal que resulta en una extrapolación del método Haling.

A pesar de todas las ventajas y virtudes del método Haling parece que el método tiene contados sus días, esto debido principalmente:

- al surgimiento de nuevos tipos de combustibles avanzados, con mayor cantidad de barras de combustible por ensamble, con mejor diseño termohidráulico y por ende con mejores límites térmicos y de seguridad. Estos combustibles son aptos para admitir mayores enriquecimientos de Uranio-235,
- a los sistemas de cómputo más rápidos y a la mejora de los códigos de cómputo simuladores de núcleos conteniendo modelos de cálculo más confiables y exactos (best estimate code),
- a la tendencia de usar intensivamente las técnicas que aumenten la conversión de plutonio tales como el corrimiento espectral, y
- a la demanda de ciclos mayores a 18 meses que tienen como objeto disminuir los costos derivados en el período de recarga.

El objetivo ya no es optimizar las distribuciones de potencia y asegurar mayores márgenes de los límites térmicos, como es el caso del método Haling, sino al contrario, tratar de realizar recargas más agresivas en donde a costa de reducir los márgenes, se extienden la longitudes del ciclo operando bajo estrategias que producen mayores conversiones de plutonio (técnicas de Shift Spectral). Lo anterior exige dejar el método Haling y en su lugar desarrollar sistemas de códigos de cómputo que realicen en forma automatizada e integral el diseño axial neutrónico de los combustibles (distribución del enriquecimiento de Uranio-235 y distribución de venenos quemables), el diseño de las recargas y el diseño de los patrones de barras de control de varios ciclos consecutivos (multiciclos), buscando la optimización al maximizar la extracción global de energía y minimizar los costos totales (ver Referencias 5 y 6).

3.2.8 Filosofías de Operación y Administración de Combustible

Antes de finalizar esta revisión de técnicas relacionadas con la Administración de Combustible, tratemos de examinar, bajo una perspectiva más amplia, las filosofías subyacentes en la administración integral de una planta nuclear.

Un hecho fundamental de la administración de combustible nuclear, que lo diferencia de la convencional, es que la extracción total de energía de un combustible depende fuertemente de la trayectoria histórica que tuvo en su vida útil el ensamble combustible. El quemado máximo de un ensamble combustible, quemado de descarga, depende de cómo se desarrollaron los diferentes ciclos en donde el combustible residió dentro del núcleo. El inventario isotópico físil del ensamble combustible no sólo depende del quemado alcanzado sino también de las condiciones operacionales en que se quemó dicho ensamble. La cantidad de U-235 y de plutonios físis que tenga un ensamble de combustible en su descarga final depende de la historia de presencia de barra y la distribución de vacíos a la que fue expuesto el ensamble.

Como consecuencia del hecho anterior, los responsables de la planta nuclear tienen que adoptar una línea de estrategia de operación, es decir, elegir bajo qué filosofía de Administración de Combustible se va operar la planta.

A continuación, tratando de clarificar, se esbozan tres filosofías de operación posibles:

- Filosofía de operación de corto plazo (optimización individual de la recarga de diseño)

Establecida la longitud del ciclo, diseñar la recarga de combustibles optimizando el número de combustibles y sus enriquecimientos promedio, que resulte más económica y cumpla con los márgenes de seguridad implantados.

En caso de estar fijo de antemano el número y tipo de combustibles de la recarga, diseñar la recarga maximizando la longitud del ciclo conservando los márgenes de seguridad implantados.

- Filosofía de operación de mediano plazo (optimización de la utilización del combustible -Análisis de Multiciclos-)

Obtener la recarga del ciclo por diseñar, estudiando los siguientes ciclos del reactor (análisis de multiciclos) con el fin de optimizar el diseño de la recarga en función de maximizar el aprovechamiento de los combustibles al lograr que los lotes alcancen el quemado de descarga máximo permisible, en particular el lote de combustibles frescos del ciclo de diseño. Un objetivo propio del análisis de multiciclos es proponer y procurar alcanzar los llamados ciclos de equilibrio en donde las recargas y la operación del ciclo son iguales ciclo tras ciclo.

- Filosofía de operación de largo plazo (optimización del inventario de isótopos físis)

El objetivo es obtener la mayor extracción de energía por kg de uranio natural utilizado. Esto se logra al reprocesar los ensambles de combustible gastados, extrayendo, separando y concentrando tanto el plutonio como el uranio remanente. Estos son reutilizados en la fabricación de nuevos ensambles combustibles de óxidos mixtos (uranio-plutonio) llamados por su siglas en inglés MOX (Mixture Oxid). Es conveniente operar los ciclos del reactor bajo técnicas que aumente la conversión de plutonio como son; la de desplazamiento espectral y la llamadas ICF (Increased Core Flux) de aumento del caudal de flujo de refrigerante.

Estas filosofías no se contraponen y pueden, en algunos aspectos, ser complementarias. Además en cualquier momento se puede redefinir la línea de acción a seguir en la planta nuclear. Sin embargo, una decisión clara, completa y oportuna de la filosofía, objetivos y metas a llevar a cabo, daría como consecuencia mejores desempeños globales de la planta. Lo anterior es fácil de proponer pero, la realidad, es que los responsables de la planta se tienen que enfrentar con problemas de toda índole todos los días cuya resolución tiene que ser tomada de inmediato. Ante este panorama es difícil realizar planes a futuro y la filosofía implícita que prevalece es la de corto plazo. Además, los adelantos en combustibles más avanzados, el surgimiento de nuevas técnicas de operación, y los imprevistos que modifican la ejecución de los ciclos hacen difícil el intentar lograr objetivos de mediano plazo como son, por ejemplo, el de alcanzar operación del reactor con ciclos en equilibrio. Lo anterior no invalida la conveniencia de realizar estos estudios de multiciclos a las recargas pues aún en el supuesto de no intentar llegar a ciclos de equilibrio, los resultados de estos estudios guían la formación de recargas.

Actualmente en el ININ por contrato con CFE, se estudia la posibilidad y conveniencia de usar combustibles de óxidos mixtos (uranio-plutonio) en la CNLV. Este estudio puede servir a CFE para examinar la conveniencia de reprocesar los combustibles gastados de la CNLV.

3.2.9 Metodología del diseño de Recargas para la CNLV

Hasta ahora se han revizado diferentes estrategias y metodologías, recomendaciones, técnicas y reglas empleadas para obtener recargas de combustible que cumplan con las restricciones de seguridad, mitiguen la exposición de neutrones sobre la vasija de presión y propicien el óptimo aprovechamiento de los combustibles.

La tarea que a continuación se emprende es la de tratar de sintetizar las bases lógicas de diseño de las recargas de la CNLV. Definir bajo qué filosofía se opera, las estrategias, metodologías, recomendaciones, técnicas etc. que son empleadas en los diseño de

recargas de la CNLV. Estas bases de diseño serán usadas al desarrollar los estudios de optimización de recargas de los siguientes capítulos.

Bases Lógicas de Diseño de recargas de la CNLV:

- 1- La filosofía de operación es la optimización individual de la recarga de diseño procurando guiarse por estudios de multiciclos. Establecer el número de combustibles frescos y su tipo optimizando la longitud de ciclo. El número de combustibles de recarga del ciclo 4 de la Unidad 1 es de 104, 96 tipo GE9B y 4 LTA.
- 2- Usar la estrategia de baja fuga radial (LLL) utilizando la técnica de colocar en la región periférica del núcleo combustibles de menor reactividad (localidades P en la Figura A.1).
- 3- Emplear la estrategia de operación del reactor de Núcleo de Celda de Control (CCC), colocando combustibles de la menor reactividad en los combustibles que rodean a las barras de control del grupo A2 de la región no periférica del núcleo (localidades CCC en la Figura A.1).
- 4- Utilizar las estrategias de aplanamiento de la potencia radial y de máxima dispersión de los combustibles de características semejantes al usar el esquema de tablero de ajedrez en la región no-periférica del reactor.

La técnica consiste en colocar combustibles frescos y gastados de alta reactividad en las localidades blancas (localidades Blanca en la Figura A.1) y, en las localidades negras los combustibles de menor (o a lo más de mediana) reactividad (localidades Negra en la Figura A.1). Las reglas de colocación de los combustibles, dentro de cada una de las categorías blanca y negra, deberán seguir una técnica de colocación OUT-IN es decir los más reactivos hacia la periferia para lograra el aplanado radial de la potencia.

- 5- Minimizar los picos de potencia a través del ciclo de operación al seguir el principio Haling tanto en los cálculos de diseño de la recarga como en la obtención del programa de patrón de barras para el ciclo.
- 6- El tipo de simetría que se emplea es la de espejo de 1/4 de núcleo con ejes corriendo paralelos a las caras de los combustibles.

El núcleo deberá cargarse con simetría espejo de 1/4 de núcleo, tratándose de respetar la simetría de 1/8 particularmente en las localidades con monitores asociados (ver Fig. 1.2).

- 7- Establecer los combustibles del ciclo anterior que van a ser reutilizados y en su caso los de reinserción. Con esto al juntarlos con los combustibles frescos construir el vector de combustible de recarga del núcleo en diseño. En este vector se deberán proporcionar las principales variables que describen el estado de cada uno de los combustibles. Entre estas variables deberá darse como mínimo el quemado promedio, la reactividad infinita.

En el diagrama de la Figura A.1 (Apéndice A), se proporcionan las categorías definidas anteriormente para cada una de las localidades de un cuarto de núcleo. La base de diseño aquí descrita se usará en los estudios que se presentan en los siguientes capítulos.

En el Apéndice A se proporcionan con mayor detalle las categorías y subcategorías de las localidades del núcleo y las reglas de colocación que permiten una formación tradicional de las recargas de la CNLV.

CAPITULO 4

EL METODO DE GENERACION DE DISTRIBUCIONES RADIALES DE MALLA FINA PARA EL ANALISIS DE RECARGAS.

En este capítulo se presenta el desarrollo de una metodología para obtener distribuciones radiales de malla fina del núcleo de un reactor de agua en ebullición (BWR) como los que se encuentran en la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde. Estas distribuciones se forman a partir de los mapas de parámetros nucleares dados para cada canal de combustible, generados por el código de cómputo PRESTO.

Como se mencionó en el capítulo anterior, PRESTO es un código neutrónico-termohidráulico que permite simular en tres dimensiones núcleos de reactores BWR, con el que se pueden efectuar estudios relacionados con el diseño de recargas.

Las distribuciones radiales de malla fina de parámetros tales como;

- constante de Multiplicación Infinita (K_{inf}),
- potencia promedio relativa (POT),
- Razón Mínima de Potencia Crítica (MCPR por sus siglas en inglés), y
- Razón Máxima de Generación Lineal de Calor (MLHGR por sus siglas en inglés),

permiten el examen detallado del comportamiento y evolución del núcleo de los reactores. El estudio de estos resultados son de gran interés en el diseño de recargas y el análisis de propuestas de recargas de reactores tipo BWR, como los de la Central Nuclear de Laguna Verde (CNLV).

Usualmente las distribuciones radiales calculadas con el código PRESTO, son obtenidas a partir de la división del núcleo en regiones radiales, cada una de las cuales constituida por canales adjuntos completos. Típicamente el número de regiones utilizadas oscila entre 6 y 8, dependiendo de si se emplean las definidas por la computadora de proceso de la CNLV (6) o las que aceptan los códigos de multiciclos 1D del FMS (8). El máximo de regiones que permite PRESTO son 9.

PRESTO suministra valores promedio de los parámetros nucleares por región, con los que se puede obtener distribuciones radiales de estos parámetros. Esta técnica de aproximación radial plantea dos problemas básicos:

- La malla presenta dimensiones superiores, o a lo más iguales,

a las correspondientes a un lado de los canales de combustible.

- Al considerar secciones transversales de canales completos, es necesario aproximar contornos de regiones poligonales cuadráticas para que representen contornos circulares.

Con el fin de superar estos problemas se planteó el siguiente procedimiento para generar distribuciones radiales de malla fina.

4.1 Definición del método

En primer término se debe suponer que:

- 1º El núcleo del reactor está formado por canales de combustible de sección cuadrada de lado 1.
- 2º El punto en el que se tocan los cuatro canales centrales coincide con el centro del núcleo.

En base a lo anterior se procede como sigue:

- 1- Se divide el núcleo por medio de círculos concéntricos centrados en el núcleo.
- 2- La REGION 1 (región más interna) se forma por las fracciones de área de los cuatro canales centrales delimitados por el círculo concéntrico de radio igual al lado del canal ($R_1=1$).
- 3- La REGION 2, queda formada por las fracciones de área de los canales comprendidos entre los círculos de radio R_1 y R_2 , en donde R_2 es el radio mayor de la circunferencia en cuyo interior sólo hay fracciones de canales ya incluidos en REGIONES más internas y de canales tocados puntualmente o tangencialmente por la circunferencia de radio R_1 .
- 4- La REGION i-ésima, se forma con las fracciones de área de los canales comprendidas entre los círculos de radio R_{i-1} y R_i , donde R_i es el radio mayor de la circunferencia en cuyo interior sólo se encuentran fracciones de canales incluidos en REGIONES más internas y de canales tocados puntualmente o tangencialmente por la circunferencia de radio R_{i-1} .
- 5- El proceso de división continúa hasta que $R_i = R_{i_{max}}$, donde $R_{i_{max}}$ es el radio de la circunferencia que inscribe al núcleo completo.
- 6- Se calculan las funciones de peso de cada REGION por canal. Si P_{ij} es la función de peso de la región, en donde i es el número de región y j el número de canal, entonces:

$$P_{i,j} = \frac{\text{área del canal } i \text{ en la región } j}{\text{área de la región } i}$$

- 7- Si V_j es el valor de algún parámetro nuclear asociado a un canal de combustible j , entonces el valor medio (\bar{V}_i) de este parámetro, asociado a la región i estará dado por:

$$\bar{V}_i = \sum_{j=1}^{j_{max}} (P_{i,j} * V_j)$$

en donde j_{max} es el número de canales de combustible. Con esto se obtiene una aproximación de la distribución radial de malla fina del parámetro nuclear.

4.2 Aplicación del método al núcleo del reactor BWR de la CNLV

Siguiendo el procedimiento escrito en el apartado anterior se elaboró un programa de cómputo en lenguaje QuikBasic que calculara los pesos de cada uno de las regiones radiales del núcleo de los reactores de BWR de Laguna Verde. En el apéndice B se proporciona información del proceso de cálculo de los pesos de malla fina radial que se efectuó para los núcleo de los reactores de la CNLV.

4.3 Formación de tablas de distribuciones radiales de malla fina con el código MAPATES

Una vez calculados los pesos de malla fina radial asociado a los núcleos de los reactores de Laguna Verde se llevó a cabo la elaboración de subrutinas para el programa de cómputo MAPATES. Estas permiten la opción de formar tablas de datos de las distribuciones radiales detalladas de los parámetros nucleares. Para esto MAPATES lee archivos de salida del código PRESTO y con base en la información de los mapas genera archivos con los datos de las distribuciones radiales de malla fina correspondientes a los mapas seleccionados. Estos archivos pueden ser importados por cualquier hoja de cálculo y generara gráficas de las distribuciones radiales detalladas. El programa MAPATES proporciona títulos de los gráficos que facilita la formación de los mismos.

En los apéndices C se da más información sobre el programa MAPATES.

En los próximos capítulos se usa ampliamente el programa MAPATES para el análisis de propuestas de recargas de combustible. Las gráficas de distribuciones radiales del capítulo 6 fueron realizadas con base en la opción de mallas radiales detalladas de MAPATES.

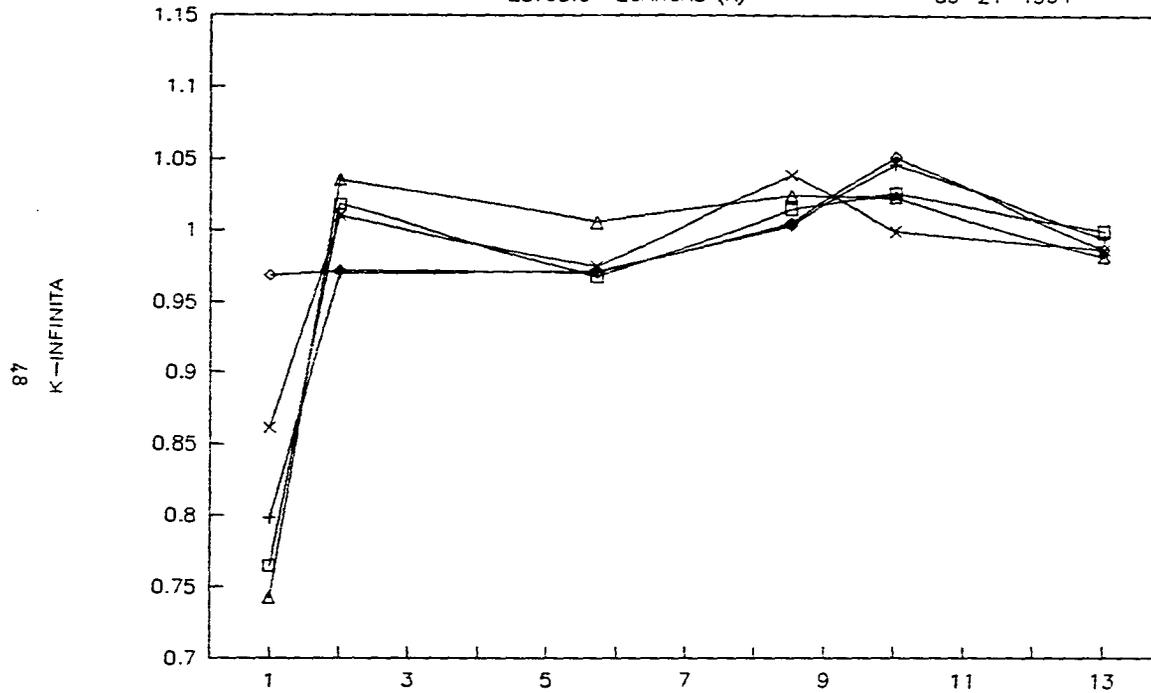
En las Gráficas de la Figura 4.1.a, 4.2.a y 4.3.a se muestra distribuciones radiales generadas con la información por regiones extraídas de las mismas salidas PRESTO con las que se realizaron las Figuras 4.1.b, 4.2.b y 4.3.b de malla fina o detallada. Es clara la mayor calidad de las distribuciones detalladas, por lo que se puede asegurar, que el examen de distribuciones radiales de malla fina constituyen una buena herramienta de análisis.

En el capítulo 5 se usa el método de malla fina para desarrollar un algoritmo de generación de recargas de combustible. En éste la reactividad radial de la recarga se empata lo más posible a una distribución de reactividad radial OBJETO suministrada.

K-INFINITA DISTRIBUCION RADIAL, C4 200 MWD/ST

ESTUDIO RECARGAS (A)

09-21-1994



UNIDADES LONGITUD DEL CANAL (15.24 cm)

[1P2HH4A1.0UT, H4A1KINF.PIC]

□ OFICIAL + BASICO A1 ◇ BASICO BA △ BASICO A2 × HALING

Figura 4.1.a Distribución de K-infinita radial por regiones

K-INFINITA DISTRIBUCION RADIAL, C4 200 MWD/ST

ESTUDIO RECARGAS (A)

09-21-1994

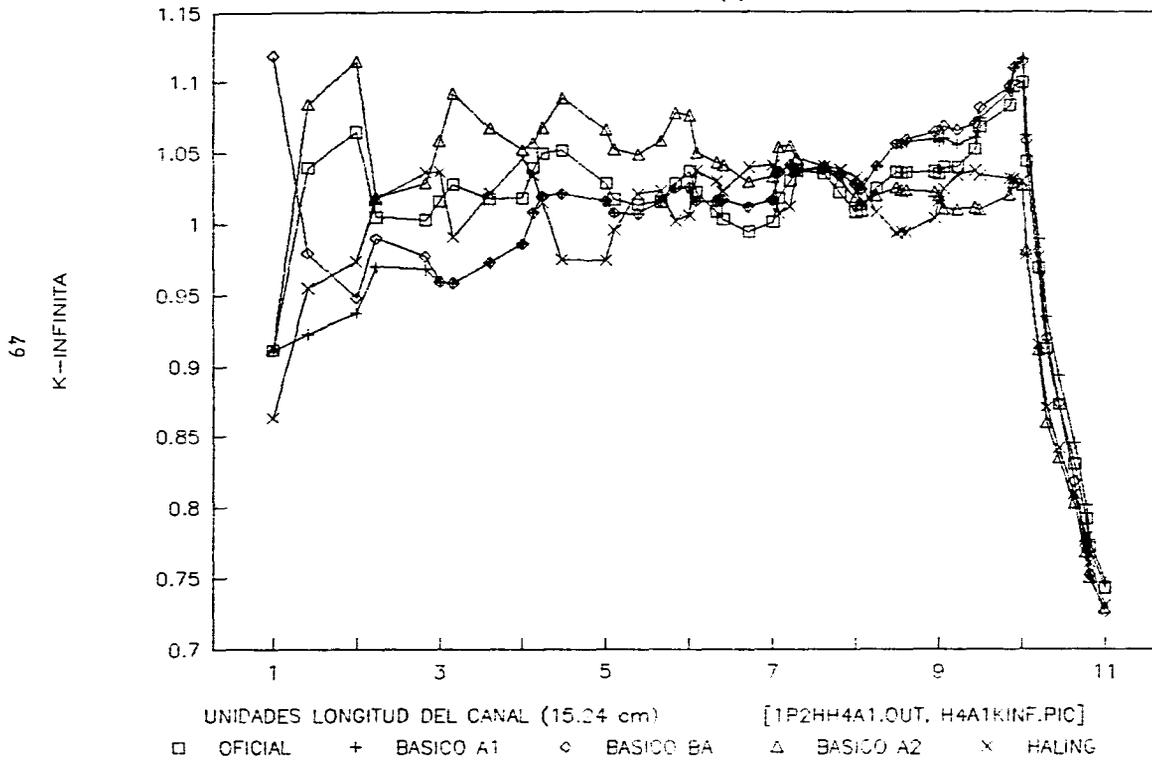


Figura 4.1.b Distribución radial por malla fina de K-infinita

POTENCIA PROMEDIO, DISTRIBUC. RADIAL, C4 200 MWD/ST

ESTUDIO RECARGAS (A)

09-21-1994

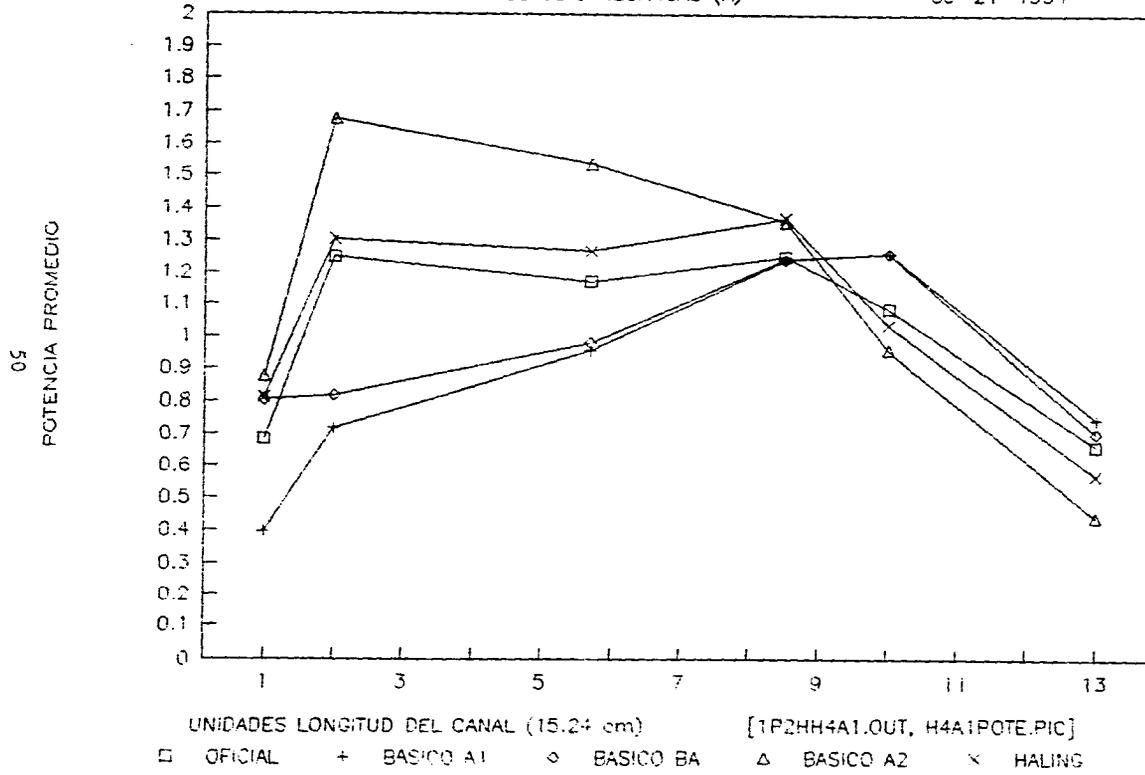


Figura 4.2.6 Distribución de potencia promedio radial por períodos

POTENCIA PROMEDIO, DISTRIBUC. RADIAL, C4 200 MWD/ST

ESTUDIO RECARGAS (A)

09-21-1994

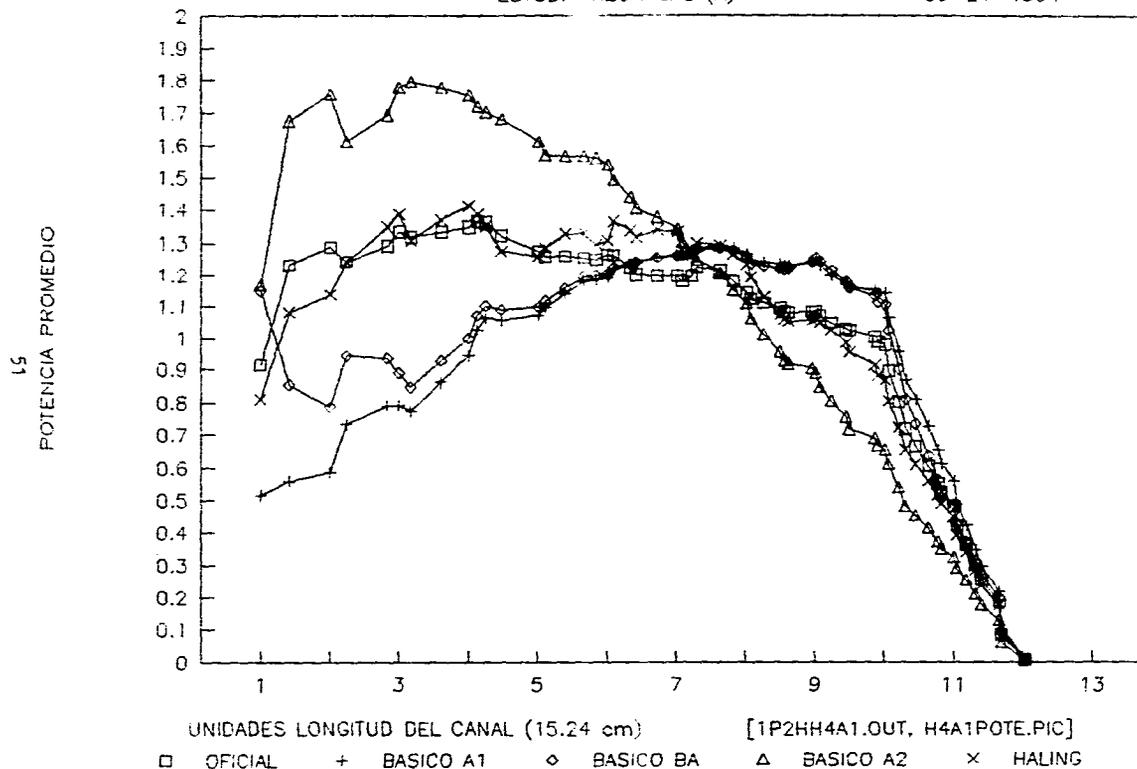
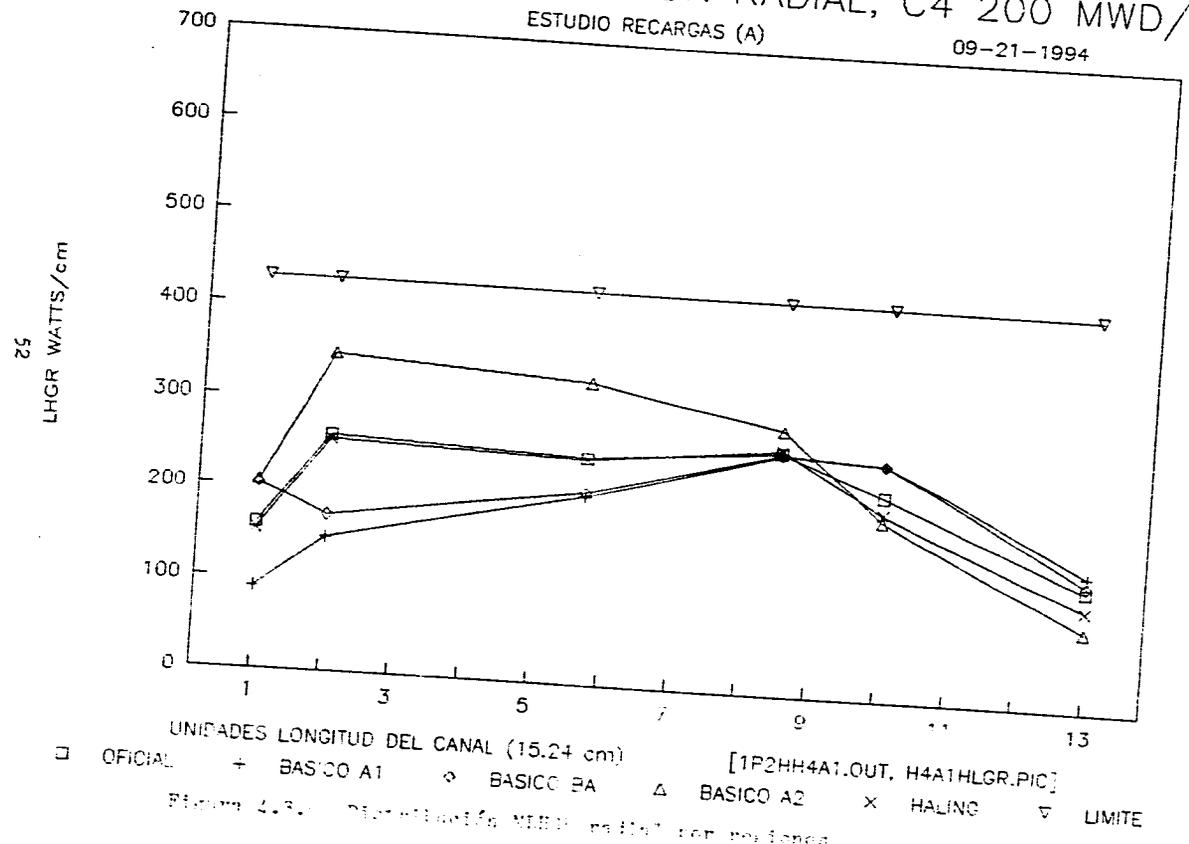


Figura 4.2.b Distribución de potencia promedio por malla fina

MLHGR (W/CM), DISTRIBUCION RADIAL, C4 200 MWD/ST
 ESTUDIO RECARGAS (A) 09-21-1994



UNIDADES LONGITUD DEL CANAL (15.24 cm) [1P2HH4A1.OUT, H4A1HLGR.PIC]
 □ OFICIAL + BASICO A1 ◇ BASICO BA △ BASICO A2 x HALING ▽ LIMITE
 Figura 4.3. Distribución MLHGR radial por posiciones

MLHGR (W/CM), DISTRIBUCION RADIAL, C4 200 MWL/11

ESTUDIO RECARGAS (A)

09-21-1994

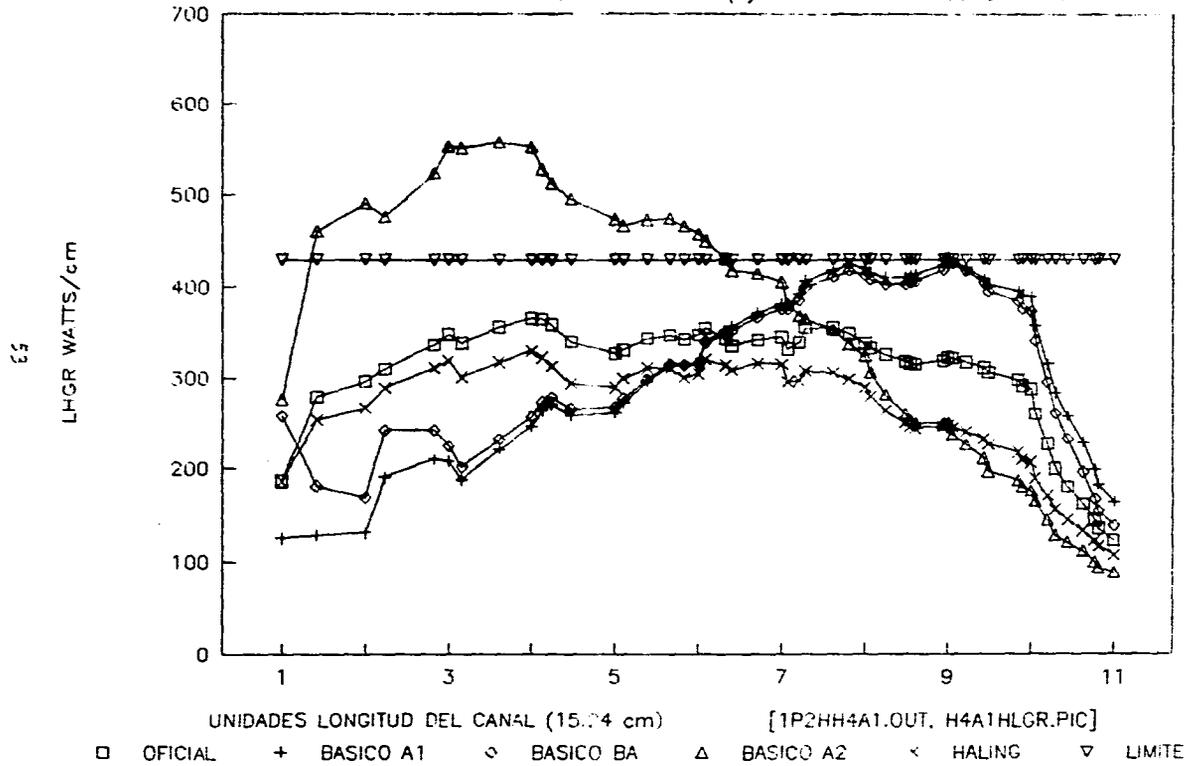


Figura 4.3.b Distribución MLHGR radial por malla fina

CAPITULO 5

LA TEORIA DE DIFUSION INVERSA. LA OBTENCION DE DISTRIBUCIONES RADIALES DE REACTIVIDAD OBJETO Y SU APLICACION EN EL DISEÑO DE RECARGAS.

La ecuación de difusión de neutrones directa o usual está formulada para que:

Dada la distribución de combustible en el núcleo de un reactor (es decir la geometría y composición del núcleo) obtener (mediante la ecuación de difusión directa) las distribuciones de potencia y/o de flujo neutrónico correspondiente.

En contraste la ecuación de difusión inversa de neutrones (backward diffusion) se establece para que:

Dada la distribución de potencia (o de flujo neutrónico) y la geometría del núcleo de un reactor, encontrar la distribución de reactividad (o de K_{eff}) correspondiente.

Yung-An Chao y colaboradores han elaborado la teoría de difusión inversa que en este capítulo será presentada. El desarrollo de esta teoría está tomado principalmente de las Referencias 1 y 14 y consta de las etapas siguientes:

- Partiendo de la ecuación general de transporte de neutrones mediante una serie de aproximaciones se obtiene la ecuación de difusión de dos grupos (rápido y térmico) de estado estacionario para reactores.
- Con la finalidad de desacoplar la ecuación de difusión de dos grupos se realizan transformaciones y aproximaciones que permiten alcanzar una ecuación autoconsistente denominada de difusión rápida efectiva.
- La ecuación de difusión rápida es aplicada sobre un núcleo cilíndrico y haciendo uso del método de la función de Green se obtiene la distribución de reactividad radial en función de la distribución de potencia radial. Con esto se alcanza el objetivo de la teoría de difusión inversa.
- Como complemento se formula la función del parámetro llamado de potencial de combustible. Este parámetro al minimizarse (sujetando a cierto valor el pico de potencia radial) permite optimizar la distribución de potencia radial. Esta distribución mediante los cálculos de difusión inversa se logra obtener la función de reactividad OBJETO con la cual es

posible formar candidatos "optimizados" de partones de recarga de combustible.

En el apartado 5.4 se presenta el estudio realizado para determinar la distribución de potencia radial con el mínimo Potencial de Combustible. Para esto se desarrollaron una serie de pequeños programas en lenguaje de el paquete MATLAB. El estudio consistió en lo siguiente;

- generar perfiles de potencia radiales en base a dos polinomios de tercer grado los cuales permiten controlar;
 - la potencia reactiva en el centro del núcleo,
 - la magnitud del pico potencia relativa radial,
 - la localización radial del pico de potencia
- determinar el Potencial de Combustible total (de acuerdo a la teoría de difusión inversa de Chao) de las distribuciones de potencia radial antes generadas.
- generar las distribuciones de reactividad radial OBJETO correspondiente a la distribución de potencia radial.
- selecciona la distribución de reactividad OBJETO a usarse para generar recargas para la recarga del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV.

Como se verá después, se trató de reproducir el resultado presentado por Chao en la Referencia 1, el cual se puede resumir;

"el mínimo de Potencia de Combustible para un perfil con pico de potencia relativo de 1.3 se da en la fracción radial de 0.6",

En el estudio realizado para esta tesis no se llegó a este resultado. Al contrario se encontró que invariablemente:

"el mínimo de potencia de combustible para un perfil con pico de potencia relativa de 1.3 invariablemente corresponde al del pico de potencia en el centro del núcleo."

El contar con la distribución de Keff OBJETO si bien constituye un gran paso hacia la obtención de una recarga todavía falta el método de como formar la recarga. La función de ésta metodología es:

Una vez asignados los combustibles de la recarga, se debe establecerse cómo colocar en el núcleo los ensambles combustibles para lograr que la distribución de las Keff de estos se ajusten lo más posible a la distribución de Keff OBJETO y que cumpla con las restricciones nucleares y los objetivos de longitud de ciclo requeridos.

Con base en el método de malla fina presentado en el capítulo 4 se desarrolló un algoritmo de colocación de los combustibles de una recarga a empatar lo mejor posible a un perfil de reactividad OBJETO dado. Se probaron dos variantes de este algoritmo;

- MODELO 1, se impuso en el algoritmo seleccionar, con todos los grados de libertad, la colocación de los ensambles de combustibles a empatar con el perfil de reactividad radial dado.

- MODELO 2, con base a los esquemas de formación de recargas mostrados en el apartado 3.5.9, se dividió en dos grupos los combustibles de recarga. Un grupo formado por los combustibles destinados a ser colocados en localidades BLANCAS (combustibles frescos y más reactivos de los parcialmente gastados) y el otro por los combustibles destinados a ocupar localidades NEGRAS (combustibles menos reactivos).

Se usaron los dos modelos para formar candidatos de recargas para el ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV. El código PRESTO fue empleado para realizar las evaluaciones de los candidatos de recarga.

La recarga del primer MODELO 1 dió como resultado una distribución radial de Keff empatada casi perfectamente con la distribución de reactividad radial OBJETO. Sin embargo, como era de esperarse, esto fue en detrimento de la distribución angular azimutal de los combustibles. Esto produjo grandes problemas de picos de potencia locales.

En la propuesta de recarga del MODELO 2 se mejoraron sustancialmente los resultados pero los márgenes de seguridad no fueron satisfactorios. Es conveniente profundizar aún más en estos estudios, sin embargo, los indicios de estos primeros resultados son en el sentido de que el método basado en la distribución de reactividad OBJETO en una sola dimensión radial es insuficiente. Es necesario emplear la ecuación de difusión inversa en dos dimensiones (radial y angular azimutal) que permitan generar perfiles de reactividad OBJETO completos y obtener recargas sin problemas con los picos de potencia no sólo radialmente sino también en la angular azimutal.

En lo que sigue de este capítulo se presenta en detalle lo expuesto anteriormente.

5.1 Deducción de la ecuación de difusión de dos grupos (rápido y térmico) de estado estacionario para reactores

La obtención de la ecuación de difusión de neutrones de dos grupos de energía a partir de la ecuación de transporte presentada a continuación fue tomada esencialmente de la referencia 14.

Mediante el balance de la pérdida y ganancia de neutrones se obtiene la ecuación exacta de transporte de neutrones:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \hat{\Omega} \cdot \nabla \varphi + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \varphi(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t) = \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \varphi(\mathbf{r}, E', \hat{\Omega}', t) + s(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t), \quad [\text{Ec. 5.1.1}]$$

donde:

$\varphi = \varphi(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t)$ = flujo angular de neutrones
(neutrones/cm²/seg) / Mev/esterradián
en el punto \mathbf{r} de Energía E moviéndose en la dirección $\hat{\Omega}$

$\Sigma_t(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega})$ =
sección transversal macroscópica de colisión
(1/cm) / Mev/esterradián
en el punto \mathbf{r} de Energía E moviéndose en la dirección $\hat{\Omega}$

$s(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t)$ = razón de fuente volumétrica
(neutrones/cm³/seg) / Mev/esterradián

Tratar de resolver la ecuación de transporte directamente no resulta práctico. Es necesario simplificar mediante una serie de aproximaciones y reducciones para llevar a la ecuación de transporte a una expresión donde la obtención de soluciones sea más accesible.

La ecuación de transporte tiene siete variables independientes: tres espaciales, la energía de los neutrones, dos para definir el sentido y dirección del movimiento de los neutrones y el tiempo.

Para simplificar la ecuación de transporte se supone lo siguiente:

- Sólo se tratará con casos de estado estacionario. Con esto se elimina la variable tiempo (t) reduciéndose la ecuación de transporte.
- Suponemos que el flujo angular de neutrones depende débilmente del ángulo y que la dispersión de neutrones por los núcleos del material del reactor es anisotrópicamente lineal. En el análisis de reactores esto es cierto si no se manejan regiones muy absorbentes de neutrones.

Con base en lo anterior es conveniente representar el flujo angular con la siguiente relación lineal:

$$\phi(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t) = \left(\frac{1}{4}\right)\phi(\mathbf{r}, E) + \frac{3}{4\pi}\mathcal{J}(\mathbf{r}, E) \cdot \hat{\Omega} \quad [\text{Ec. 5.1.2}]$$

donde:

$\phi(\mathbf{r}, E)$ = flujo de neutrones (neutrones/cm²/seg)/Mev

$\mathcal{J}(\mathbf{r}, E)$ = densidad de corriente de neutrones
(neutrones/cm²/seg)/Mev

y de esta manera optar por la aproximación a la ley de Fick generalizada la cual establece que:

$$\mathcal{J}(\mathbf{r}, E) = -D(\mathbf{r}, E) \nabla \phi(\mathbf{r}, E) \quad [\text{Ec. 5.1.3}] (a)$$

donde:

$D(\mathbf{r}, E)$ = Coeficiente de difusión generalizado (cm)

$$D(\mathbf{r}, E) = \frac{1}{3[\Sigma_t(\mathbf{r}, E) - \bar{\mu}_0 \Sigma_s(\mathbf{r}, E)]} \quad [\text{Ec. 5.1.3}] (b)$$

$\bar{\mu}_0$ = coseno del ángulo de dispersión promedio

$\Sigma_s(\mathbf{r}, E)$ = secc. transv. macro. de dispersión (1/cm)/Mev

Sustituyendo lo anterior en la ecuación de transporte y efectuando una serie de operaciones (ver capítulo 4 apartado D de la Ref. 14) es posible llegar a la ecuación de difusión dependiente de la energía de estado estacionario:

$$-\nabla \cdot D(\mathbf{r}, E) \nabla \phi + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \phi(\mathbf{r}, E) = \int_0^\infty dE' \Sigma_s(E' \rightarrow E) \phi(\mathbf{r}, E') + s(\mathbf{r}, E), \quad [\text{Ec. 5.1.4}]$$

donde:

$\Sigma_t(E' \rightarrow E)$ = secc. trans. macro. de dispersión (1/cm)/Mev

$s(\mathbf{r}, E)$ = fuente volumétrica de neutrones
(neutrones/cm³)/Mev

A continuación se suman las consideraciones siguientes:

- La "constante" de difusión de los neutrones (tomando el promedio de regiones volumétricas relativamente grandes llamadas nodos) no varía en forma apreciable en los grandes núcleos de los reactores de potencia. Lo anterior permite efectuar la siguiente operación; extraer, del primer término de la Ecuación 5.1.4, al coeficiente de difusión (D) fuera del operador de divergencia y con esto, lograr sustituir la divergencia del gradiente por el operador laplaciano.
- La generación de neutrones en un reactor es producto de la fisión de tal forma que la fuente neutrónica se puede expresar como:

$$s(\mathbf{r}, E) = \chi(E) \int_0^{\infty} dE' v(E') \Sigma_f(E') \phi(\mathbf{r}, E') \quad \text{[Ec. 5.1.5]}$$

donde:

$\chi(E)$ = espectro de fisión o distribución de energía de los neutrones de fisión (neutr./Mev)

$v(E)$ = número de neutrones por fisión (neutr./fis.)/Mev

$\Sigma_f(E)$ = secc. trans. macro. de fisión (1/cm)/Mev

Introduciendo la ecuación 5.1.4 en la ecuación de difusión dependiente de la energía (Ec.5.1.5) y extrayendo la D, se obtendrá la que podemos denominar como la ecuación de difusión dependiente de la energía de estado estacionario para un reactor cuasi-homogéneo:

$$-D(\mathbf{r}, E) \nabla^2 \phi + \Sigma_r(\mathbf{r}, E) \phi(\mathbf{r}, E) = \int_0^{\infty} dE' \Sigma_s(E' \rightarrow E) \phi(\mathbf{r}, E') + \chi(E) \int_0^{\infty} dE' v(E') \Sigma_f(E') \phi(\mathbf{r}, E'), \quad \text{[Ec. 5.1.6]}$$

Ahora se procede a usar el método de multigrupos el cual consiste en:

- dividir la energía del neutrón en grupos y promediar las constantes y parámetros nucleares adecuadamente respecto a el flujo. Con esto se obtienen las denominadas constantes del grupo.

Tomando la ecuación de difusión dependiente de la energía (Ec.5.1.6) y aplicando el método de multiciclos se obtendrá un sistema de ecuaciones las cuales son sólo dependientes de las variables espaciales, es decir, obtenemos la ecuación de difusión de multigrupos de estado estacionario para reactores cuasi-homogéneos:

$$-D_g(\mathbf{r}) \nabla^2 \phi(\mathbf{r}) + \Sigma_{t_g}(\mathbf{r}) \phi_g(\mathbf{r}) = \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg'g}(\mathbf{r}) \phi_{g'}(\mathbf{r}) + \chi_g \sum_{g'=1}^G \nu_{g'}(\mathbf{r}) \Sigma_{fg'}(\mathbf{r}) \phi_{g'}(\mathbf{r}), \quad [Ec.5.1.7]$$

donde:

$$\phi_g(\mathbf{r}) = \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \phi(\mathbf{r}, E)$$

y donde las constantes de grupo son:

$$D_g(\mathbf{r}) = \frac{1}{\phi_g} \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE D(\mathbf{r}, E) \phi(\mathbf{r}, E) \quad [Ec.5.1.8] (a)$$

$$\Sigma_{t_g}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\phi_g} \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \phi(\mathbf{r}, E) \quad [Ec.5.1.8] (b)$$

$$\Sigma_{sg'g}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\phi_g} \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \int_{E'_g}^{E_{g'-1}} dE' \Sigma_s(E' \rightarrow E) \phi(\mathbf{r}, E') \quad [Ec.5.1.8] (c)$$

$$\nu_{g'} \Sigma_{fg'} = \frac{1}{\phi_g} \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \nu(E') \Sigma_f \phi(\mathbf{r}, E') \quad [Ec.5.1.8] (d)$$

$$\chi_g = \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \chi(E) \quad [Ec.5.1.8] (e)$$

Para: $g = 1, 2, \dots, G$.

En la gran mayoría de los programas de cómputo utilizados en el análisis neutrónico de reactores emplean soluciones de "pocos grupos de energía". Como ejemplo, el código PRESTO usa un modelo de ecuación de difusión de 1+1/2 de grupos de energía. El uno y medio se debe a que el modelo parte de la ecuación de difusión de dos grupos de energía y se modifica de tal forma que se obtiene un sólo grupo de "energía efectivo". El cálculo de las constantes de grupo para PRESTO se realiza con los códigos de cálculo de celdas de muchos grupos de energía llamados RECORD, THERMOS y GADPLO.

Para la obtención de la ecuación de difusión inversa se partirá de la ecuación de difusión de dos grupos de energía, así que, tomando la ecuación de multigrupos anterior (Ec.5.1.7) para dos grupos se obtiene el sistema de ecuaciones general de difusión de dos grupos de energía de estado estacionario para reactores cuasi-homogéneos:

$$-D_1(\mathbf{r})\nabla^2\phi_1(\mathbf{r}) + \Sigma_{t1}(\mathbf{r})\phi_1(\mathbf{r}) = (\Sigma_{s11}(\mathbf{r})\phi_1(\mathbf{r}) + \Sigma_{21}\phi_2(\mathbf{r})) + \chi_1(v_1(\mathbf{r})\Sigma_{f1}(\mathbf{r})\phi_1(\mathbf{r}) + v_2(\mathbf{r})\Sigma_{f2}(\mathbf{r})\phi_2(\mathbf{r})) \quad [\text{Ec.5.1.9}] (a)$$

$$-D_2(\mathbf{r})\nabla^2\phi_2(\mathbf{r}) + \Sigma_{t2}(\mathbf{r})\phi_2(\mathbf{r}) = (\Sigma_{s12}(\mathbf{r})\phi_1(\mathbf{r}) + \Sigma_{22}\phi_2(\mathbf{r})) + \chi_2(v_1(\mathbf{r})\Sigma_{f1}(\mathbf{r})\phi_1(\mathbf{r}) + v_2(\mathbf{r})\Sigma_{f2}(\mathbf{r})\phi_2(\mathbf{r})) \quad [\text{Ec.5.1.9}] (b)$$

Tradicionalmente el corte de energía entre los dos grupos se selecciona de forma tal que el grupo de menor energía represente los neutrones que están en equilibrio térmico con el material del núcleo. Estos neutrones, en primera aproximación tienen una distribución de energías de tipo maxwelliano. El grupo de alta energía, en este caso estará constituido por los neutrones productos de la fisión que nacen muy energéticos y entran en el proceso de moderación, es decir aquéllos que por medio de una serie de colisiones elásticas e inelásticas llegan eventualmente a formar parte de los neutrones del grupo térmico.

A continuación se presentan las consideraciones para obtener la ecuación de difusión de dos grupos rápido/térmico:

- El corte de energía (E_c) se seleccionó de forma tal que la probabilidad de que los neutrones del grupo de energía baja o grupo 2 (llamado también grupo térmico) regresen por dispersión al grupo de alta energía o grupo 1 (llamado también grupo rápido) sea despreciable. En el caso de los reactores térmicos de agua ligera $E_c = 1$ ev es un valor adoptado comúnmente.
- Puesto que prácticamente todos los neutrones de la fisión son de alta energía entonces los coeficientes del espectro de fisión rápida vendrá a ser igual a 1 y el térmico igual a cero.
- Para simplificar aún más la ecuación de dos grupos se usa la sección transversal de remoción macroscópica de un grupo, la que se define como:

"la diferencia entre la sección transversal total macroscópica del grupo menos la sección transversal de auto dispersión en el grupo", o equivalentemente como,

"la suma de la sección transversal macroscópica de absorción del grupo más la secciones transversal macroscópica de transferencia que van desde el grupo hacia los otros grupos de energía".

Usando lo anteriormente mencionado se tendrá que:
en base a consideraciones:

$$\chi_1 = 1, \chi_2 = 0, \Sigma_{12} = 0 \quad [\text{Ec. 5.1.10}] (a)$$

sea:

Σ_{S2} = Secc. trans. macro. total de dispersión grupo térmico

Σ_{R2} = Secc. trans. macro. de remoción grupo térmico

Σ_{a2} = secc. trans. macro. de absorción grupo térmico

y sus correspondientes Σ_{S1} , Σ_{R1} , Σ_{a1} para el grupo rápido

por Definición:

$$\Sigma_{R2} = \Sigma_{t2} - \Sigma_{22}$$

$$\Sigma_{R1} = \Sigma_{t1} - \Sigma_{11}$$

$$\Sigma_{a2} = \Sigma_{t1} - \Sigma_{S2}$$

tomando en cuenta las consideraciones:

$$\Sigma_{R2} = \Sigma_{t2} - \Sigma_{S2} = \Sigma_{a2} \quad [\text{Ec. 5.1.10}] (b)$$

Finalmente, introduciendo lo expresado en 5.1.10 en la Ecuación 5.1.9 se obtiene el sistema de ecuación de difusión de dos grupos, rápido y térmico, de estado estacionario para reactores nucleares cuasi-homogéneos:

$$-D_1(\mathbf{r})\nabla^2\phi_1(\mathbf{r}) + \Sigma_{R1}(\mathbf{r})\phi_1(\mathbf{r}) = v_1(\mathbf{r})\Sigma_{f1}(\mathbf{r})\phi_1(\mathbf{r}) + v_2(\mathbf{r})\Sigma_{f2}(\mathbf{r})\phi_2(\mathbf{r}) \quad [\text{Ec. 5.1.11}] (a)$$

$$-D_2(\mathbf{r})\nabla^2\phi_2(\mathbf{r}) + \Sigma_{a2}(\mathbf{r})\phi_2(\mathbf{r}) = \Sigma_{s12}(\mathbf{r})\phi_1(\mathbf{r}) \quad [\text{Ec. 5.1.11}] (b)$$

Es común simplificar aún más la notación prescindiendo de la referencia a la dependencia espacial tal que las ecuaciones 5.1.11 se transforman en:

$$-D_1\nabla^2\phi_1 + \Sigma_1\phi_1 = v_1\Sigma_{f1}\phi_1 + v_2\Sigma_{f2}\phi_2 \quad [\text{Ec. 5.1.12}] (a)$$

$$-D_2\nabla^2\phi_2 + \Sigma_2\phi_2 = \Sigma_{12}\phi_1 \quad [\text{Ec. 5.1.12}] (b)$$

donde:

$$\Sigma_1 = \Sigma_{R1}$$

$$\Sigma_2 = \Sigma_{a2}$$

Esta es la presentación tradicional de la ecuación de difusión de dos grupos para el análisis de reactores térmicos.

5.2 Obtención de la ecuación de difusión rápida efectiva

En este apartado se conseguirá la ecuación de difusión de un grupo de neutrones rápidos efectiva, la forma de la ecuación de difusión directa que es la base para alcanzar (de acuerdo a la teoría de difusión inversa de Chao) la expresión explícita de la distribución de la reactividad radial en función de la potencia.

Multiplicando la ecuación 5.1.12(a) por $1/\Sigma_1$ y la ecuación 5.1.12(b) por $1/\Sigma_2$, y tomando en cuenta que por definición;

$$L_1^2 = \text{Area de difusión rápida} = D_1/L_1$$

$$L_2^2 = \text{Area de difusión térmica} = D_2/L_2$$

se tendrá que:

$$-L_1^2 \nabla^2 \phi_1 + \phi_1 = \frac{v_1 \Sigma_{f1} \phi_1}{\Sigma_1} + \frac{v_2 \Sigma_{f2} \phi_2}{\Sigma_1} \quad [\text{Ec. 5.2.1}] (a)$$

$$-L_2^2 \nabla^2 \phi_2 + \phi_2 = \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_2} \phi_1 \quad [\text{Ec. 5.2.1}] (b)$$

Despejando de Ec. 5.2.1 (b) ϕ_2 de la forma siguiente:

$$\frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_2} \phi_1 = \phi_2 - L_2^2 \nabla^2 \phi_2 = \phi_2 \left(1 - \frac{L_2^2 \nabla^2 \phi_2}{\phi_2} \right)$$

$$\phi_2 = \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_2} \left(\frac{1}{1 - \frac{L_2^2 \nabla^2 \phi_2}{\phi_2}} \right) \phi_1 \quad [\text{Ec. 5.2.2.}]$$

Sustituyendo la ecuación 5.2.2 en Ec. 5.2.1(a) se obtiene;

$$-L_1^2 \nabla^2 \phi_1 + \phi_1 = v_1 \frac{\Sigma_{f1} \phi_1}{\Sigma_1} + \frac{v_2 \Sigma_{f2}}{\Sigma_1} \left\{ \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_2} \left(\frac{1}{1 - \frac{L_2^2 \nabla^2 \phi_2}{\phi_2}} \right) \phi_1 \right\} \quad [\text{Ec. 5.2.3}]$$

Ahora en un medio infinito tenemos que:

$\Sigma_{f1}/\Sigma_1 = \text{prob. de fisión rápida por reacción rápida}$

$\Sigma_{12}/\Sigma_1 = \text{prob. de que un neutrón rápido llegue a térmico}$

$\Sigma_{f2}/\Sigma_2 = \text{prob. de fisión térmica por reacción térmica}$

Por definición:

$K_{\infty} = \text{No. de neutr. de fisión por reacción rápida o térmica}$

$e = \text{factor de fisión rápida}$

$e = \frac{\text{(número de neutrones de fisión rápida y térmica)}}{\text{(número de neutrones de fisión térmica)}}$

Por lo tanto:

$$K_{\infty} = v_1 \frac{\Sigma_{f1}}{\Sigma_1} + v_2 \frac{\Sigma_{f2}}{\Sigma_2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_1} \quad [\text{Ec. 5.2.3}] (a)$$

$$e = \frac{v_1 \frac{\Sigma_{f1}}{\Sigma_1} + v_2 \frac{\Sigma_{f2}}{\Sigma_2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_1}}{v_2 \frac{\Sigma_{f2}}{\Sigma_2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_1}} \quad [\text{Ec. 5.2.3}] (b)$$

$$K_{\infty}/e = v_2 \frac{\Sigma_{f2}}{\Sigma_2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_1} \quad [\text{Ec. 5.2.3}] (c)$$

de la expresión de K_{∞} (Ec. 5.2.3. (a)) se obtiene;

$$\frac{v_1 \Sigma_{f1}}{\Sigma_1} = K_{\infty} - v_2 \frac{\Sigma_{f2}}{\Sigma_2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_1}$$

reemplazando el último término por K_{∞}/e (5.2.3(c))

$$\frac{v_1 \Sigma_{f1}}{\Sigma_1} = K_{\infty} - \frac{K_{\infty}}{e} = (1 - 1/e) K_{\infty} \quad [\text{Ec. 5.2.3}] (d)$$

por último definimos:

$$\delta_2 = \text{probabilidad de escape térmico} = -L_2^2 \nabla^2 \phi_2 / \phi_2 \quad [\text{Ec. 5.2.3}] (e)$$

Sustituyendo las diferentes expresiones de Ec.5.2.3 en la Ecuación 5.2.3;

$$\begin{aligned}
 -L_1^2 \nabla^2 \phi_1 + \phi_1 &= \left[(1 - 1/e) K_\infty \phi_1 + \frac{k_\infty}{e} \frac{\phi_1}{(1 + \delta^2)} \right] = \\
 \left[1 - \frac{1}{e} + \frac{1}{e} \frac{1}{(1 + \delta^2)} \right] K_\infty \phi_1 &= \left[1 + \frac{1}{e} \left(\frac{1}{(1 + \delta^2)} - 1 \right) \right] K_\infty \phi_1 = \\
 \left[1 + \frac{(-\delta^2)}{e(1 + \delta^2)} \right] K_\infty \phi_1 &= \left[1 - (\delta_2/e) / (1 + \delta_2) \right] K_\infty \phi_1 \\
 -L_1^2 \nabla^2 \phi_1 + \phi_1 &= \left[1 - (\delta_2/e) / (1 + \delta_2) \right] K_\infty \phi_1 \quad [Ec.5.2.4]
 \end{aligned}$$

Puesto que el valor de la probabilidad de escape térmico δ_2 es completamente despreciable (Ref. 1, Pag. 80) entonces la ecuación 5.2.4 será:

$$-L_1^2 \nabla^2 \phi_1 + \phi_1 = K_\infty \phi_1 \quad [Ec.5.2.5]$$

Esta última ecuación (Ec.5.2.5) junto con la ecuación 5.2.1(b) constituyen el sistema de ecuaciones que se necesitan para desarrollar la teoría de difusión inversa. Chao todavía efectúa una serie de transformaciones para refinar más la ecuación del grupo rápido 5.2.5 (ver página 80 de la referencia 1), sustituye el factor de multiplicación infinita por uno que denomina factor de multiplicación efectiva del grupo rápido con lo que finalmente obtiene: la ecuación de difusión de neutrones rápidos efectivo de estado estacionario para reactores cuasi-homogéneos:

$$-L_1^2 \nabla^2 \phi_1 + \phi_1 = K^* \phi_1 \quad [Ec.5.2.6] (a)$$

$$-L_2^2 \nabla^2 \phi_2 + \phi_2 = \left(\frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_2} \phi_2 \right) \quad [Ec.5.2.6] (b)$$

donde:

$$K^* = \left[\frac{1 + (L_2^2/L_1^2)e}{1 + (L_2^2/L_1^2)e} \right] K_\infty \quad [Ec.5.2.6] (c)$$

Lo importante del anterior desarrollo es que se logró que la ecuación 5.2.6(a) sea auto-consistente, es decir sólo depende del flujo rápido y por lo tanto se encuentra desacoplada de la ecuación del grupo térmico (ec.5.17 (b)). Con esto, se está en condiciones de realizar el objetivo de la teoría de difusión inversa:

- obtener una expresión explícita de la reactividad radial en función del perfil de potencia radial.

En el siguiente apartado finalmente se alcanzará éste objetivo.

5.3 Cálculo de difusión inversa en 1 dimensión (radial) y el potencial de combustible total

En este apartado se obtiene la solución analítica de la ecuación de difusión en una dimensión (radial) de neutrones rápidos efectivo para un reactor cilíndrico de altura infinita y constantes nucleares homogéneas en el ángulo azimutal. Posteriormente se proporciona el concepto de Potencial de Combustible y su fórmula para calcularla.

Se empieza por transformar y reducir la Ecuación 5.2.6(a). Con el objeto de poder analizar reactores de núcleo cilíndrico cuyas propiedades varíen sólo en la dirección radial. Para lograr lo anterior, se realizan los pasos siguientes:

- i) El operador laplaciano es puesto en coordenadas cilíndricas (Pag. 612 de Ref. 14),
- ii) Las unidades radiales se escogen de forma tal que la longitud de difusión rápida sea igual a 1.
- iii) El subíndice referente al grupo de energía rápido se elimina,
- iv) Se aplica el método de separación de variables,
- v) El núcleo de reactor se supone de dimensiones infinitas en el eje azimutal (θ), y
- vi) Las propiedades nucleares del núcleo del reactor se asumen homogéneas respecto al ángulo azimutal (θ).

Procediendo:

se aplican las modificaciones i, ii e iii

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} \phi(r, \theta, z) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi(r, \theta, z)}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi(r, \theta, z)}{\partial z^2} + (K^* - 1) \phi(r, \theta, z) = 0$$

sustituyendo:

$$\phi(r, \theta, z) = \phi_r(r) \phi_\theta(\theta) \phi_z(z) = \phi_r \phi_\theta \phi_z$$

obtenemos:

$$\frac{\phi_\theta \phi_z}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d\phi_r}{dr} + \frac{\phi_r \phi_z}{r^2} \frac{d^2 \phi_\theta}{d\theta^2} + \phi_r \phi_\theta \frac{d^2 \phi_z}{dz^2} + (K^* - 1) \phi_r \phi_\theta \phi_z = 0$$

multiplicando por $1/\phi_r \phi_\theta \phi_z$, tendremos:

$$\frac{1}{\phi_r r} \frac{d}{dr} r \frac{d\phi_r}{dr} + \frac{1}{\phi_\theta r^2} \frac{d^2 \phi_\theta}{d\theta^2} + \frac{1}{\phi_z} \frac{d^2 \phi_z}{dz^2} + (K^* - 1) = 0$$

de acuerdo a las condiciones v y v_i $\phi_\theta = \text{constante}$ y $\phi_z = \text{constante}$, por lo que, sus derivadas serán cero, tal que:

$$\frac{1}{\phi_r r} \frac{d}{dr} r \frac{d\phi_r}{dr} + (K^* - 1) = 0$$

finalmente, haciendo $\phi_r = \phi(r)$ obtenemos:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} \phi(r) - \phi(r) = -K^*(r) \phi(r), \quad [\text{Ec.5.3.1}]$$

La Ec.5.3.1 es una ecuación diferencial inhomogénea, ordinaria lineal, de segundo orden. Esta clase de ecuación es posible resolverla mediante el llamado método de la función de Green. Vamos a usar esta técnica para resolver la Ec. 5.3.1. Primero se mostrará como funciona dicho método. Para esto se define un operador M tal que:

sea el operador M :

$$M = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} - 1$$

la Ec. 5.3.1 se expresará como:

$$M\phi(r) = -K^*(r)\phi(r)$$

Sea $G(r, r')$ la función de Green para M tal que:

$$M G(r, r') = \delta(r, r') \quad [\text{Ec.5.3.2}] (a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} G(r, r') - G(r, r') = \delta(r, r') \quad [\text{Ec.5.3.2}] (b)$$

entonces la solución estará dada por:

$$\phi(r) = \int dV' G(r, r') (-K^*(r')\phi(r')) + Cte$$

donde dV es la diferencial de volumen, Cte es una constante determinada por condiciones a la frontera y $\delta(r, r')$ es la función de Dirac tal que:

$$funcion(r) = \int dV' \delta(r, r') funcion(r')$$

la prueba es casi directa, aplicando el operador M (sobre r) a la solución

$$M\phi(r) = \int dV' M G(r, r') (-K'(r')\phi(r')) + M \text{Cte}$$

sustituyendo $M G(r, r')$ por $\delta(r, r')$

$$M\phi(r) = \int dV' \delta(r, r') (-K'(r')\phi(r'))$$

$$M\phi(r) = -K'(r)\phi(r)$$

completándose la prueba

El problema ahora radica en construir la función de Green solución de la ecuación [Ec.5.3.2] y que cumpla con las condiciones a la frontera impuestas. Para esto, partiremos del teorema de Green en su forma de segunda identidad (Ref. 16 pag.14 y Ref. 14 pag. 612):

$$\int dV (\phi \nabla^2 \psi - \psi \nabla^2 \phi) = \int dS \hat{e}_s \cdot (\phi \nabla \psi - \psi \nabla \phi)$$

donde dS es la diferencial de superficie, \hat{e}_s es el vector unitario perpendicular a dS .

sea $\phi = \phi(r)$ = el flujo y $\psi = G(r, r')$ = función de Green del operador M para un reactor cilíndrico de radio r_0 , altura infinita, homogéneo en t considerando una sección cilíndrica de altura unitaria, entonces las diferenciales dV , dS en coordenadas cilíndricas serán:

$$\int [] dV = \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \int_0^1 [] r dr d\theta dz = 2\pi \int_0^{r_0} [] r dr$$

$$\int [] dS = \int_0^{2\pi} [] r_0 d\theta = 2\pi r_0 []$$

sustituyendo en el teorema de Green se tendrá:

$$2\pi \int_0^{r_0} dr' r' [\phi(r') \nabla^2 G(r, r') - G(r, r') \nabla^2 \phi(r')] =$$

$$2\pi r_0 [\phi(r') \nabla G(r, r') - G(r, r') \nabla \phi(r')]_{r'=r_0}$$

ya que de las ecuaciones 5.2.6 y 5.3.1 tenemos que:

$$\nabla^2 \phi(r) = (-K'(r)\phi(r) + \phi(r))$$

$$\nabla^2 G(r, r') = \delta(r, r') + G(r, r')$$

y por condición a la frontera:

$$G(r, r')|_{r'=r_0} = 0$$

entonces:

$$2\pi \int_0^{r_0} dr' r' \phi(r') \delta(r, r') + 2\pi \int_0^{r_0} dr' r' \phi(r') G(r, r') -$$

$$2\pi \int_0^{r_0} dr' r' G(r, r') (-k^*(r') \phi(r')) - 2\pi \int_0^{r_0} dr' r' \phi(r') G(r, r') =$$

$$2\pi r_0 \phi(r_0) \left. \frac{dG(r, r')}{dr'} \right|_{r'=r_0}$$

en el primer miembro; el 1er término es $\phi(r)$ y los términos segundo y cuarto se eliminan. Despejando $\phi(r)$:

$$\phi(r) =$$

$$-2\pi \int_0^{r_0} dr' r' G(r, r') k^*(r') \phi(r') + 2\pi r_0 \phi(r_0) \left. \frac{dG(r, r')}{dr'} \right|_{r'=r_0} \quad [\text{Ec. 5.3.3}]$$

En este punto analicemos qué falta y qué pasos habrá que efectuar para obtener una relación explícita de la constante de multiplicación rápida efectiva. Es necesario determinar la función de Green, los valores del flujo neutrónico y de la derivada de la función de Green en la superficie del núcleo del reactor. Por lo tanto en esta etapa los pasos a seguir son:

- vii) Identificar qué tipo de ecuación es Ec.5.3.1 y sus soluciones,
- viii) Construir en base a las soluciones anteriores la función de Green tal que;
 - sea solución de la ecuación Ec.5.3.2
 - cumpla con la condición a la frontera $G(r_0, r')=0$, (donde r_0 es el radio del núcleo del reactor)
 - cumpla con la condición de simetría tal que $G(r, r')=G(r', r)$ (ésta importante propiedad de las funciones de Green se puede consultar en el apartado 5-12 de la Ref. 17 y página 327 de la Ref. 18).
- ix) Un vez determinada la función de Green se deriva respecto a r' (para $r' > r$) y obtener su valor para $r'=r_0$,
- x) obtener el valor de la derivada del flujo en la superficie del núcleo ($r=r_0$) utilizando para tal el tratamiento de las condiciones a la frontera de una superficie reflejada por un medio reflector infinito

(vease paginas 165 y 166 de la Ref. 14):

Aplicando los pasos anteriores:

siguiendo el paso (vii)

multiplicando Ec.5.3.2(a) por r^2 y derivando:

$$\frac{d^2 G(r, r')}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dG(r, r')}{dr} - r^2 G(r, r') = \delta(r, r')$$

comparando con la ecuación de la función de Bessel modificada (ec. [11.108]), Pag. 396 de Ref. 18)

$$x^2 \frac{d^2 I_\nu(x)}{dx^2} + x \frac{dI_\nu(x)}{dx} - (x^2 + \nu^2) I_\nu(x) = 0$$

cuyas soluciones estan dadas por:

$$y(x) \begin{cases} I_\nu(x) = \text{.Bessel Mod. primera clase} \\ K_\nu(x) = \text{.Bessel Mod. segunda clase} \end{cases}$$

Excepto en el punto $r=r'$, I_0 ó K_0 ó combinaciones lineales de ellas son soluciones de la Ec.5.3.1.

De acuerdo al paso (viii) se propone la función de Green solución de la Ec.5.3.2 a la ecuación (20) proporcionada en la Referencia 1, y se muestra que cumple con las consideraciones ya mencionadas:

la función de Green para el operador M es:

$$G(r, r') = \left(\frac{1}{2\pi}\right) I_0(r) [K_0(r_0) I_0(r') / I_0(r_0) - K_0(r')] \\ \text{para } r < r' \quad [\text{Ec. 5.3.4}] (a)$$

$$G(r, r') = \left(\frac{1}{2\pi}\right) I_0(r') [K_0(r_0) I_0(r) / I_0(r_0) - K_0(r')] \\ \text{para } r > r' \quad [\text{Ec. 5.3.4}] (b)$$

Se va a mostrar que la Ec.5.3.5(a) cumple con la Ec.5.3.2.(b).
Se usará notación reducida, sea G la función de Green tal que:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{dG}{dr} - G = \frac{1}{r} \frac{d(rG')}{dr} - G = G'' + \frac{1}{r} G' - G = 0$$

$$G = aI_0 - bK_0, G' = aI_0' - bK_0', G'' = aI_0'' - bK_0''$$

sustituyendo:

$$aI_0'' - bK_0'' + aI_0'/r - bK_0'/r - aI_0 + bK_0 = 0$$

$$a(I_0'' + I_0'/r - I_0) + b(-K_0'' - K_0'/r + K_0) = 0$$

las fórmulas que relacionan a las funciones de Bessel que se van ausar son (Pag. 470, Ref.17):

$$(1) I_0' = I_1 \quad (2) I_0'' = \frac{1}{2}I_0 + \frac{1}{2}I_2 \quad (3) \frac{I_1}{r} = \frac{1}{2}I_0 - \frac{1}{2}I_2$$

[Ec.5.3.4]

$$(4) K_0' = -K_1 \quad (5) K_0'' = \frac{1}{2}K_0 + \frac{1}{2}K_2 \quad (6) \frac{K_1}{r} = -\frac{1}{2}K_0 - \frac{1}{2}K_2$$

sustituyendo

$$a\left(\frac{1}{2}I_0 + \frac{1}{2}I_2 + \frac{1}{2}I_0 - \frac{1}{2}I_2 - I_0\right) +$$

$$b\left(-\frac{1}{2}K_0 - \frac{1}{2}K_2 - \frac{1}{2}K_0 + \frac{1}{2}K_2 + K_0\right) = 0$$

$$a(0) + b(0) = 0$$

por lo que queda demostrado

Ahora se examina si cumple la condición que establece que la función de Green en $r=r_0$ es cero para toda r.

(partiendo de la ecuación Ec.5.3.4(b) y haciendo $r=r_0$)

$$G(r_0, r') = \left(-\frac{1}{2\pi}\right) I_0(r') [K_0(r_0) I_0(r_0) / I_0(r_0) - K_0(r_0)]$$

la cual es obviamente cero para toda r' .

Por último, respecto al punto viii, se examinará si la función propuesta de Green cumple con el teorema de reciprocidad.

debemos comprobar que $G(r_1, r_2) = G(r_2, r_1)$, suponiendo, que $r_1 < r_2$, usemos la ecuación 5.3.4(a) para el miembro izquierdo y 5.3.4(b) para el derecho, tal que:

$$G(r_1, r_2) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) I_0(r_1) [K_0(r_0) I_0(r_2) / I_0(r_0) - K_0(r_2)]$$

$$G(r_2, r_1) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) I_0(r_1) [k_0(r_0) I_0(r_2) / I_0(r_0) - K_0(r_2)]$$

cumpliénodse la condición de simetría.

Pasando al punto ix, obtener la derivada de la función de Green respecto a r' y determinar el valor de ésta en $r=r_0$.

tomando la ecuación Ec.5.3.4(a) derivándola respecto a r' y tomando, posteriormente el valor de $r'=r_0$, tal que:

$$\begin{aligned} \frac{dG(r, r')}{dr'} \Big|_{r'=r_0} &= \\ \left(\frac{1}{2\pi}\right) \frac{d}{dr'} (I_0(r) [K_0(r_0) I_0(r') / I_0(r_0) - K_0(r')]) \Big|_{r'=r_0} &= \\ \left(\frac{1}{2\pi}\right) I_0(r) \left[K_0(r_0) \frac{dI_0(r')}{dr'} / I_0(r_0) - \frac{dK_0(r')}{dr'} \right] \Big|_{r'=r_0} & \end{aligned}$$

usando las relaciones de Bessel (1) y (4) de la Ec.5.3.5;

$$\begin{aligned} \frac{dG(r, r')}{dr'} \Big|_{r'=r_0} &= \\ \left(\frac{1}{2\pi}\right) I_0(r) [K_0(r_0) I_1(r') / I_0(r_0) + K_1(r')] \Big|_{r'=r_0} &= \\ \left(\frac{1}{2\pi}\right) I_1(r) \left[\frac{I_1(r_0) K_0(r_0) + I_0(r_0) K_1(r_0)}{I_0(r_0)} \right] & \end{aligned}$$

de la relación de Bessel (II-67) Pag.570, Ref. 17:

$$I_1(z) K_0(z) + I_0(z) k_1(z) = \frac{1}{z}$$

por lo que:

$$\frac{dG(r, r')}{dr'} \Big|_{r'=r_0} = \left(\frac{1}{2\pi r_0}\right) \left(\frac{I_0(r)}{I_0(r_0)}\right) \quad [\text{Ec.5.3.6}]$$

El último punto de esta etapa es determinar el valor del flujo neutrónico en la superficie del núcleo $\phi_1(r_0)$. En base a las

condiciones a la frontera impuestas al suponer que el núcleo del reactor está rodeado de un reflector de neutrones (agua) de espesor infinito. (ver, páginas 165 y 166 de la Ref. 14):

para el caso de que el radio r esté en unidades de L se tendrá:

$$-\frac{1}{\phi} (D/L) \frac{d\phi}{dr} \Big|_{r=r_0} = \alpha = \frac{1}{2} (1 - \beta) / (1 + \beta) \quad [\text{Ec.5.3.7}] (a)$$

$$-(D/L) \frac{\phi'(r_0)}{\phi(r_0)} = \alpha \quad [\text{Ec.5.3.7}] (b)$$

donde:

$$\beta = \frac{1 - \frac{2D}{L}}{1 + \frac{2D}{L}} \quad [\text{Ec.5.3.7}] (c)$$

β = albedo para un reflector de espesor infinito

despejando en Ec.5.3.7 (b) a $\phi'(r_0)$;

$$\phi'(r_0) = -\left(\frac{L}{D}\right)\phi(r_0) \quad [\text{Ec.5.3.7.}] (d)$$

En esta última etapa se obtienen la función de reactividad rápida efectiva y el potencial de combustible total. Ambas en forma explícita y en función de parámetros conocidos, entre estos la distribución de potencia radial. Para lograr lo anterior se procede de la forma siguiente:

- xi) Reemplazar en la ecuación de $\phi(r)$ (Ec.5.3.3) la derivada de la función de Green (Ec.5.3.6) y obtener una nueva relación de $\phi(r)$ (Ec.5.3.10).
- xii) Se deriva la nueva relación de $\phi(r)$ respecto a la variable r y obtener su valor en la superficie del núcleo, es decir en $r=r_0$. Esta derivada ($\phi'(r_0)$) se sustituye por la expresión de la ecuación 5.3.7(d) y se despeja $\phi(r_0)$. La expresión resultante de $\phi(r_0)$ etiquetar como Ec.5.3.11.
- xiii) Se sustituye en la relación de $\phi(r)$ (Ec.5.3.10) el valor de $\phi(r_0)$ encontrada en la ecuación 5.3.11. Etiquetar como Ec.5.3.12.
- xiv) Puesto que las fuentes de fisión y la potencia en un punto r del núcleo son proporcionales al producto de la reactividad por el flujo de neutrones en ese punto r . se puede establecer la siguiente relación:

$$P(r) = P_m K^*(r) \phi(r) \quad [Ec. 5.3.8]$$

donde:

P_m = constante de proporcionalidad

Multiplicar por $K^*(r)$ la ecuación 5.3.11 y convertir a potencia ($P(r)$) de acuerdo a la relación Ec.5.3.8 y derivar una expresión de $K^*(r)$. Con esto se obtiene una expresión de $K^*(r)$ en función de parámetros conocidos y de la distribución de potencia radial ($P(r)$). Etiquetar el resultado como ecuación 5.3.13.

xv) De acuerdo a la Referencia 1 página 85, la ecuación 27 se define como la potencia del combustible total (F) como:

$$F = 2\pi \int_0^{r_0} r dr K^*(r) \quad [Ec. 5.3.9]$$

reemplazando en la expresión anterior (Ec.5.3.9) la $K^*(r)$ por lo encontrado en Ec.5.3.11. Con esto se obtiene F en función de parámetros conocidos. Etiquetar Ec.5.3.14.

Empezando con el punto xi, en Ec.5.3.3 sustituimos $G'(r_0, r')$ por la expresión de Ec.5.3.6:

$$\phi(r) = -2\pi \int_0^{r_0} dr' r' G(r, r') K^*(r') \phi(r') + \phi(r_0) (I_0(r) / I_0(r_0)) \quad [Ec. 5.3.10]$$

Ahora se deriva $\phi(r)$ respecto a r y realizando sustituciones y transformaciones obtener el valor de $\phi(r_0)$, tal como se especifica en el punto xii.

derivando respecto a r la ec.5.3.9 y tomando $r=r_0$:

$$\frac{d\phi(r)}{dr} \Big|_{r=r_0} = -2\pi \left[\int_0^{r_0} dr' r' \frac{dG(r, r')}{dr} K^*(r') \phi(r') + \phi(r_0) (I_0'(r) / I_0(r_0)) \right] \Big|_{r=r_0}$$

como r se tomará como r_0 , se necesita que $r > r'$, para $G(r, r')$ entonces, tomando la Ec.5.3.4(b) y derivándola:

$$\frac{dG(r, r')}{dr} \Big|_{r=r_0} = \left(\frac{-1}{2\pi} \right) \frac{d}{dr} (I_0(r') [K_0(r_0) I_0(r) / I_0(r_0) - K_0(r)]) \Big|_{r=r_0}$$

examinando la deducción de Ec.5.3.6, fácilmente se concluye:

$$\frac{dG(r, r')}{dr'} \Big|_{r=r_0} = \left(\frac{-1}{2\pi} \right) \left(\frac{I_0(r')}{I_0(r_0)} \right)$$

usando lo anterior y la relación de Bessel (1) de la Ec.5.3.5 ($I_0' = I_1$)

$$\frac{d\phi(r_0)}{dr} = -2\pi \int_0^{r_0} dr' r' \left(\left(\frac{1}{2\pi} \right) \left(\frac{I_0(r')}{r_0 I_0(r_0)} \right) \right) K^*(r') \phi(r') + \phi(r_0) I_1(r_0) / I_0(r_0)$$

$$\phi(r_0)' - \phi(r_0) I_1(r_0) / I_0(r_0) = \left(\frac{-1}{r_0 I_0(r_0)} \right) \int_0^{r_0} dr' r' K^*(r') \phi(r') I_0(r')$$

sustituyendo $\phi'(r_0)$ de la Ec.5.3.7(d), y despejando $\phi(r_0)$

$$\left(\frac{-L}{D} \right) \alpha \phi(r_0) - \phi(r_0) I_1(r_0) / I_0(r_0) = \left(\frac{-1}{r_0 I_0(r_0)} \right) \int_0^{r_0} dr' r' K^*(r') \phi(r') I_0(r')$$

$$\phi(r_0) \left[\frac{I_1(r_0) + \alpha \left(\frac{L}{D} \right) I_0(r_0)}{I_0(r_0)} \right] = \left(\frac{1}{r_0 I_0(r_0)} \right) \int_0^{r_0} dr' r' K^*(r') \phi(r') I_0(r')$$

$$\phi(r_0) = \frac{\int_0^{r_0} K^*(r') \phi(r') I_0(r') r' dr'}{r_0 [I_1(r_0) + \alpha (L/D) I_0(r_0)]}, \quad [Ec.5.3.11]$$

Se sustituye en la ecuación 5.3.10 el valor de $\phi(r_0)$ encontrada en la ecuación 5.3.11.

Sustituyendo $\phi(r_0)$ de la Ec.5.3.11 en la Ec.5.3.10

$$\phi(r) = -2\pi \int_0^{r_0} dr' r' G(r, r') [K^*(r') \phi(r')] + \frac{\int_0^{r_0} [K^*(r') \phi(r')] I_0(r') r' dr'}{r_0 [I_1(r_0) + \alpha(L/D) I_0(r_0)]} \cdot \frac{I_0(r)}{I_0(r_0)} \quad [Ec.5.3.12]$$

De acuerdo al punto xiv, multiplicar la ecuación anterior por $K^*(r)$ y reemplazar por la potencia el producto de la constante de multiplicación por flujo. Despejar la $K^*(r)$ y con esto obtener finalmente una expresión explícita de la reactividad efectiva radial. Objetivo principal de la teoría de difusión inversa.

Multiplicando por $K^*(r)$ la ec.5.3.12:

$$[K^*(r) \phi(r)] = K^*(r) \left[-2\pi K^*(r) \int_0^{r_0} dr' r' G(r, r') [K^*(r') \phi(r')] + \frac{\int_0^{r_0} [K^*(r') \phi(r')] I_0(r') r' dr'}{r_0 [I_1(r_0) + \alpha(L/D) I_0(r_0)]} \cdot \frac{I_0(r)}{I_0(r_0)} \right]$$

Reemplazando por $P(r)/P_m$ a los productos $[K^*(r) \phi(r)]$ de acuerdo a la ecuación 5.3.8:

$$[P(r)/P_m] = K^*(r) \left[-2\pi K^*(r) \int_0^{r_0} dr' r' G(r, r') [P(r')/P_m] + \frac{\int_0^{r_0} [P(r')/P_m] I_0(r') r' dr'}{r_0 [I_1(r_0) + \alpha(L/D) I_0(r_0)]} \cdot \frac{I_0(r)}{I_0(r_0)} \right]$$

Eliminando P_m , y despejando $K^*(r)$:

$$K^*(r) = \frac{P(r)}{-2\pi \int_0^{r_0} dr' r' G(r, r') P(r') + \frac{\int_0^{r_0} P(r') I_0(r') r' dr'}{r_0 [I_1(r_0) + \alpha(L/D) I_0(r_0)]} \cdot \frac{I_0(r)}{I_0(r_0)}}$$

Sea la constante A igual a:

$$A = \frac{1}{r_0 I_0(r_0) [I_1(r_0) + \alpha (L/D) I_0(r_0)]}$$

introduciendo A en la ecuación anterior:

$$K^*(r) = \frac{P(r)}{A I_0(r) \int_0^{r_0} dr' r' P(r') I_0(r') - 2\pi \int_0^{r_0} dr' r' G(r, r') P(r')} \quad [Ec. 5.3.13].$$

Por último derivemos la ecuación para el potencial de combustible total, de acuerdo a la ecuación 5.3.9 del paso xv.

Sustituyendo $K^*(r)$ en la relación 5.3.9 con el valor encontrado en la ecuación 5.3.12, setendrá:

$$F = 2\pi \int_0^{r_0} dr r K^*(r) = 2\pi \int_0^{r_0} dr \frac{P(r)}{A I_0(r) \int_0^{r_0} dr' r' P(r') I_0(r') - 2\pi \int_0^{r_0} dr' r' G(r, r') P(r')} \quad [Ec. 5.3.14]$$

Esta última relación permite determinar, bajo ciertas restricciones impuestas al pico de potencia radial, qué distribución de reactividad radial es óptima al minimizar el valor de la potencia del combustible (F).

5.4 Estudio de la curva de distribución de Kinf radial objeto para la CNLV optimizando el potencial de combustible

El objetivo de este apartado es lograr generar recargas con distribuciones de potencia lo más planas posibles y con la máxima economía del ciclo. Por máxima economía del ciclo se pueden establecer dos variantes:

- Si los combustibles de recarga se fijan con anticipación entonces obtener la máxima extensión del ciclo.
- Si la longitud de ciclo está fijada entonces procurar el costo de recarga de combustible fresco mínimos.

Chao establece una tercera posibilidad y es la siguiente:

- La carga con máxima economía de ciclo es la que tiene la Potencia de Combustible Total mínima.

Esta opción tiene la ventaja de que se puede cuantificar directamente a través de las ecuaciones presentadas en el apartado anterior.

Ahora se revisa el concepto de distribución de potencia radial "plana". La pregunta básica es: ¿ cómo medir lo plano de un perfil de potencia?.

Lo ideal es tener la potencia absolutamente plana en todo el núcleo. Esto es imposible y siempre se presentará un pico de potencia máximo (!o varios!, por simplicidad sólo se intentará tratar con un pico). Ahora se consideran distribuciones de potencia radiales suaves, exentas de cambios bruscos de potencia al variar el radio, entonces el pico de potencia relativa máxima será una medida de lo plano de un perfil tal que:

Una distribución de potencia relativa radial será más plana entre menor sea la magnitud del pico máximo de potencia.

Con base en lo anteriormente se establece como meta para este apartado:

Determinar (estableciendo la magnitud del pico de potencia relativa máxima) la distribución de potencia radial OPTIMA minimizando el Potencial de Combustible de un núcleo representativo de los reactores de la CNLV y así obtener la correspondiente distribución de la K' radial que será la distribución de reactividad OBJETO.

Las ecuaciones involucradas en la realización del objetivo son:

- Obtención de la reactividad radial (K'): Ec.5.3.13
- Obtención del Potencial de Combustible (F): Ec.5.3.14
- Ecuación de Green del operador M ($G(r,r')$): Ec.5.3.4
- Condición a la frontera (alfa) Ec.5.3.7

Los parámetros representativos de los reactores de la CNLV:

- Radio del núcleo (r_0) 1.02 m
- Coeficiente de difusión de neutrones (D) 0.4392 cm
- Longitud de difusión de neutrones (L) 7.525 cm
- alfa (albedo radial) 0.44

Las funciones de Bessel involucradas son:

- Bessel modificado de primera clase orden cero $I_0(x)$
- Bessel modificado de primera clase orden uno $I_1(x)$
- Bessel modificado de segunda clase orden cero $K_0(x)$

El desarrollo de las actividades de este apartado se llevaron a cabo en tres partes :

- Establecimiento del método de generación de perfiles de potencia $P(r)$ con características controladas.
- Establecimiento del método de cálculo de la Potencia de Combustible y de la distribución de reactividad radial correspondiente a la distribución de las potencias generadas.
- Estudio para determinar la distribuciones de potencia OPTIMA y de la distribución OBJETO recomendable para las recargas de la CNLV.

5.4.1 Método de generación de perfiles de potencia

En el estudio realizado por Chao (Ref.1) se utilizó un polinomio de tercer grado para simular las distribuciones radiales de potencia $P(r)$ de un núcleo de un reactor PWR. La magnitud y la ubicación del pico de potencia radial era controlado al variar las condiciones impuestas al polinomio. Con este tipo de polinomio se realizó el estudio para determinar el perfil de potencia con menor Potencial de Combustible. Chao reporta el resultado siguiente:

El mínimo de Potencial de Combustible para un perfil de pico

de potencia relativo de 1.3 se da en la fracción de radio de 0.6

La meta para este apartado en un principio fue tratar de reproducir el resultado anteriormente mencionado. Para esto se utilizó, al igual que en el estudio de Chao, para describir la potencia un polinomio de tercer grado aplicado a un núcleo representativo de un reactor BWR. Pronto se presentaron problemas en la obtención de perfiles adecuados. Por ejemplo si se establecían las siguientes condiciones:

- $P(r_m)=P_{max}$, $P(r_0)=0$, y la integral $P(r)$ en todo el núcleo igual a 1

Donde r_m es el radio donde se ubica el pico de potencia, r_0 es el radio del núcleo, y P_{max} la magnitud del pico de la potencia relativa radial.

Al no haber control de la potencia en el centro del reactor esto puede producir valores inadecuados e inclusive negativos cerca del centro del reactor.

Otro ejemplo, si se utiliza las condiciones siguientes:

- $P(r_m)=P_{max}$, $P(r_0)=0$ y $P(0)=P_{ori}$

y no tener control sobre la integral de la potencia en general ésta no será igual a uno perdiéndose la relatividad necesaria para que el pico P_{max} se conserve tal como se establece en las condiciones.

Después de varios intentos de realizar el estudio con un polinomio de tercer grado se optó por aumentar la complejidad de la generación del perfil de potencia. Se consideraron polinomios de mayor grado pero se desechó esta alternativa ya que al aumentar el grado crece la posibilidad de producir perfiles de potencia oscilantes. Se decidió finalmente utilizar dos polinomios de tercer grado para generar los perfiles de potencia.

Las características impuestas al sistema de dos polinomios para la generación de perfiles de potencia relativa radial son:

- Polinomio PA(r) de tercer grado. Se usa para describir la potencia del centro del núcleo hasta el punto de máxima potencia $[0, P_{max}(r_m)]$.
- Polinomio PB(r) de tercer grado. Se usa para describir la potencia del punto de máxima potencia a la frontera radial del núcleo $[P_{max}(r_m), r_0]$.

Estos polinomios se determinan bajo las siguientes condiciones:

- a) La magnitud y ubicación del pico de potencia relativa radial se controla al imponer $P(r_m) = P_{max}$.
- b) La magnitud de la potencia relativa radial en el centro del reactor se controla al imponer $P(0) = P_{ori}$
- c) Por condiciones a la frontera se impone que la derivada de la potencia sea cero en el centro del núcleo $P'(r_0) = 0$.
- d) Por condiciones a la frontera se impone que la potencia sea cero en la periferia del núcleo $P(r_0) = 0$.
- e) Para lograr que el polinomio represente un perfil de potencia radial relativo se impone que la integral de la potencia en el núcleo sea igual a 1.

$$\int_0^{r_0} dr P(r) = 1$$

- f) Para evitar singularidades en el punto de unión de los dos polinomios ($r = r_m$) la derivada de ambos polinomios debe ser cero, $PA'(r_m) = 0$ y $PB'(r_m) = 0$.

donde P_{max} es el pico de potencia y r_m es el radio donde P_{max} ocurre y r_0 es el radio del núcleo.

A continuación se dan los sistema de ecuaciones obtenidos bajo las consideraciones anteriormente expresadas:

Sea: $PA(r) = a_1 r^3 + a_2 r^2 + a_3 r + a_4$

Bajo las condiciones:

$$PA(0) = P_{ori}, \quad PA'(0) = 0$$

$$PA(r_m) = P_{max}, \quad PA'(r_m) = 0$$

$$Area_A + Area_B = 1$$

Puesto que:

$$PA'(r) = 3a_1 r^2 + 2a_2 r + a_3$$

$$\int_0^{r_0} dr PB(r) = \left[\frac{a_4}{4} r^4 + \frac{a_3}{3} r^3 + \frac{a_2}{2} r^2 + a_1 r \right] \Big|_0^{r_0}$$

se tendrá el siguiente sistemas de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 a_4 &= P_{ori} \dots\dots\dots Ec.5.4.1(a) \\
 a_3 &= 0 \dots\dots\dots Ec.5.4.1(b) \\
 a_1 r_m^3 + a_2 r_m^2 + a_3 r_m + a_4 &= P_{max} \dots\dots\dots Ec.5.4.1(c) \\
 3a_1 r_m^2 + 2a_2 r_m + a_3 &= 0 \dots\dots\dots Ec.5.4.1(d) \\
 Area_A &= \frac{1}{4} a_1 r_m^4 + \frac{1}{3} a_2 r_m^3 + \frac{1}{2} a_3 r_m^2 + a_4 r_m \quad Ec.5.4.1(e) \\
 Area_B &= Area_A - 1 \dots\dots\dots Ec.5.4.1(f)
 \end{aligned}$$

se tendrá el siguiente sistemas de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 b_1 r_0^3 + b_2 r_0^2 + b_3 r_0 + 1 &= 0 \dots\dots\dots Ec.5.4.2(a) \\
 b_1 r_m^3 + b_2 r_m^2 + b_3 r_m + 1 &= P_{max} \dots\dots\dots Ec.5.4.2(b) \\
 3b_1 r_m^2 + 2b_2 r_m + b_3 &= 0 \dots\dots\dots Ec.5.4.2(c) \\
 \frac{1}{4} b_1 (r_0^4 - r_m^4) + \frac{1}{3} b_2 (r_0^3 - r_m^3) + \frac{1}{2} b_3 (r_0^2 - r_m^2) + b_4 (r_0 - r_m) &= Area_B \quad Ec.5.4.2(d) \\
 Area_A + Area_B &= 1 \dots\dots\dots Ec.5.4.2(e)
 \end{aligned}$$

Se elaboró el programa uupoll.m para la generación controlada de los perfiles de potencia de acuerdo al sistema de ecuaciones establecido arriba. Este se realizó en el lenguaje de programación del paquete MATLAB (véase el Apéndice D).

En la serie de Figuras 5.1 se presentan gráficas de potencia relativa radial generadas con el programa uupoll.m. Estas constituyen una muestra representativa de las distribuciones de potencia generadas en el estudio. Estos perfiles de potencia, se puede asegurar, resultaron mucho más apropiadas que el usar un simple polinomio de tercer grado. Sin embargo, como se verá más adelante, el rango de uso de estos polinomios es también limitado.

Al tratar de producir perfiles de potencia con valores de Pmax debajo a 1.3 estos producen picos secundarios pegados a la periferia del núcleo y cuando el pico de potencia esta arriba de 1.45 y la ubicación del pico está cerca de la periferia del núcleo se presentan potencias negativas.

A pesar de lo anterior se dispuso de la flexibilidad suficiente para generar más de 200 perfiles bien formados y dentro de los intervalos de los valores de la potencia máxima y de localización radial del pico que fueron requisito para realizar un estudio adecuado de la distribución de potencia óptimo.

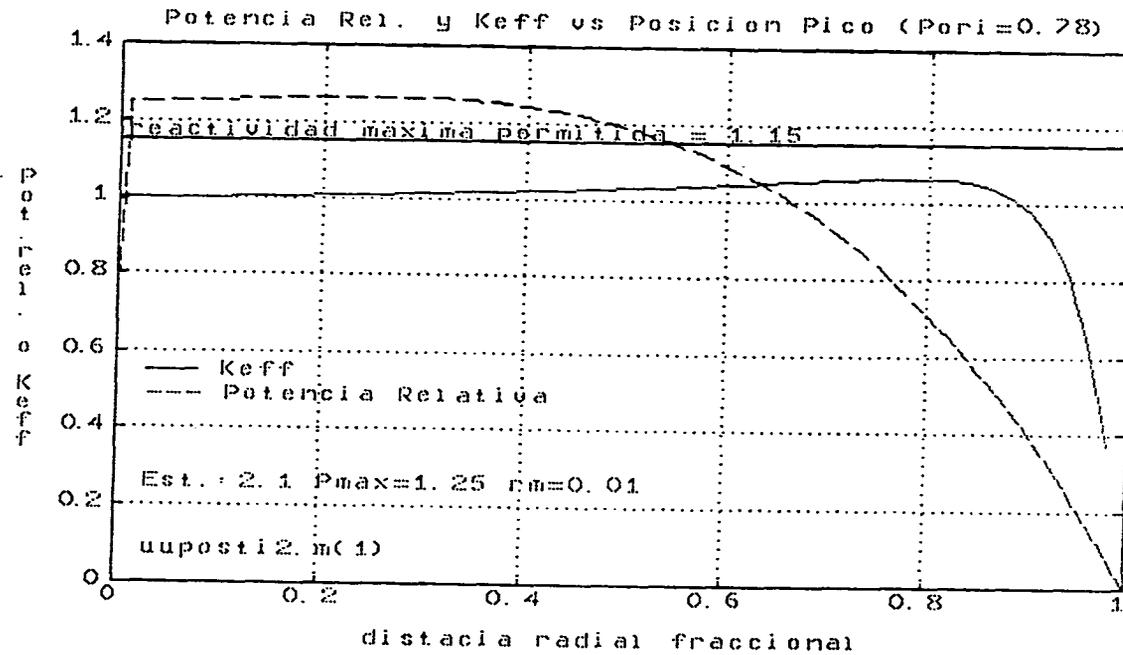


Figura 5.1.a Distributions de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.01$.

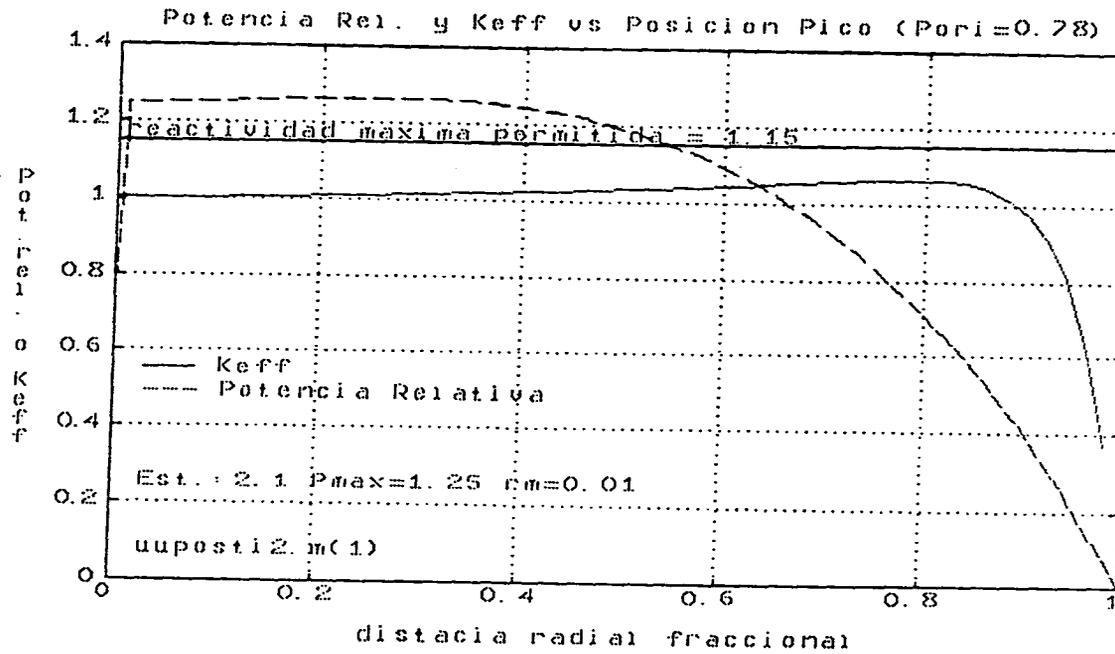


Figura 5.1.a Distributions de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.01$.

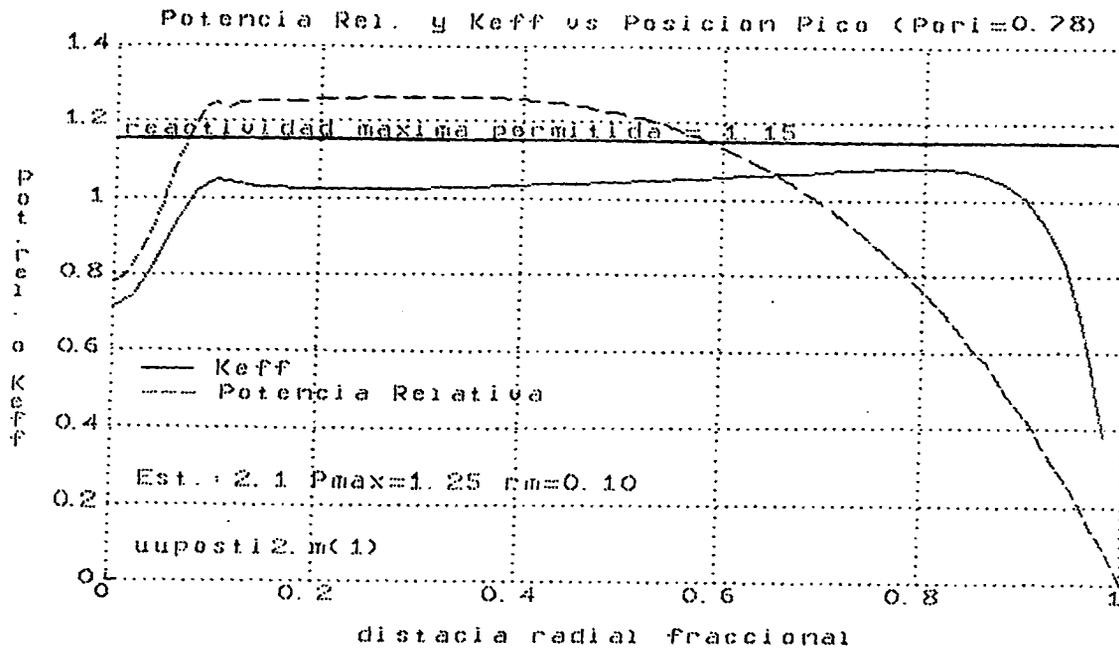


Figura 5.1.b Distribuciones de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=10$.

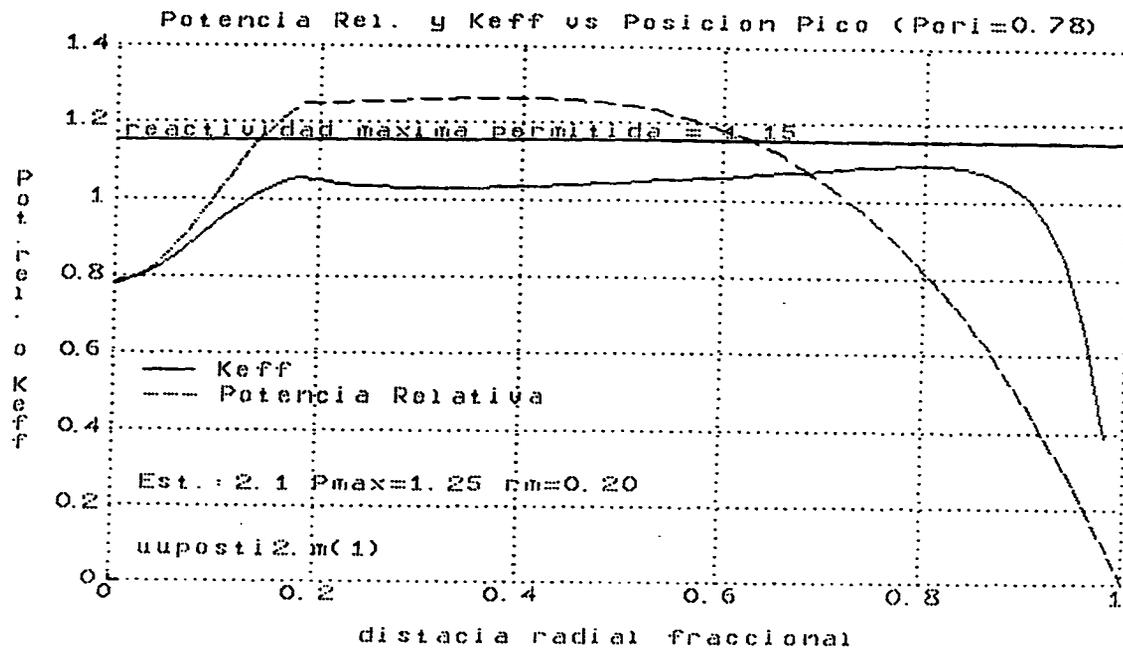


Figura 5.1.c Distributions de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con Peri=0.78 y Pmax=1.30 para el caso donde la posición del pico máximo de potencia rm=0.20.

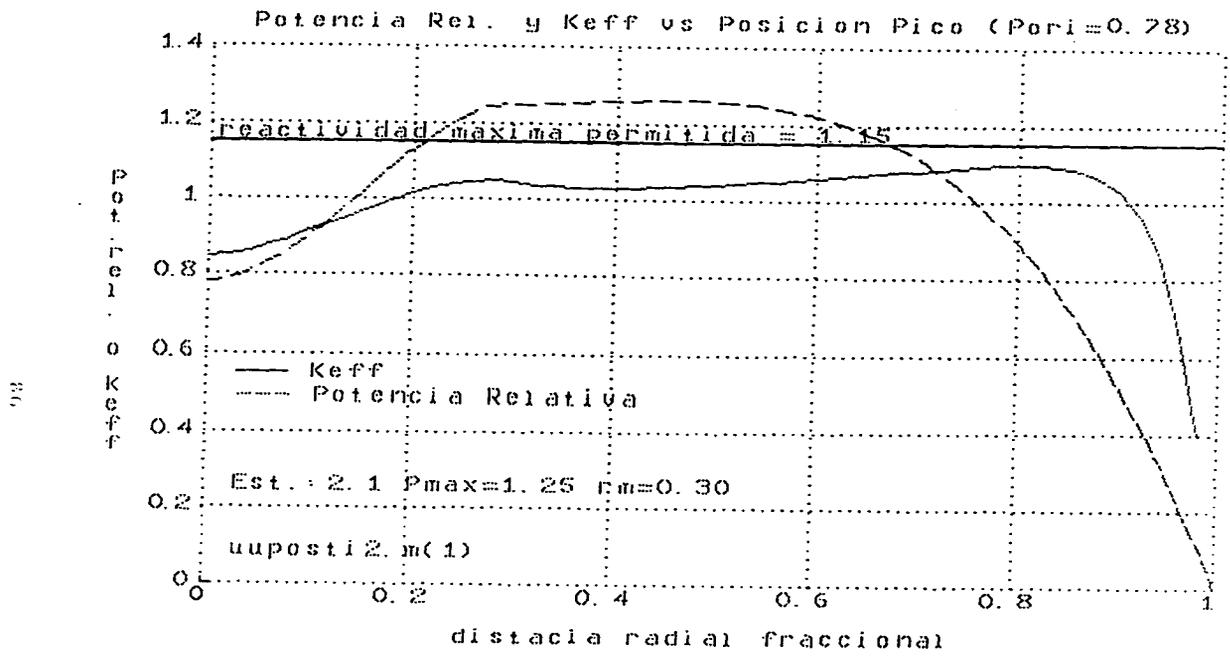


Figura 5.1.d Distributions de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con Pori=0.78 y Pmax=1.30 para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.30$.

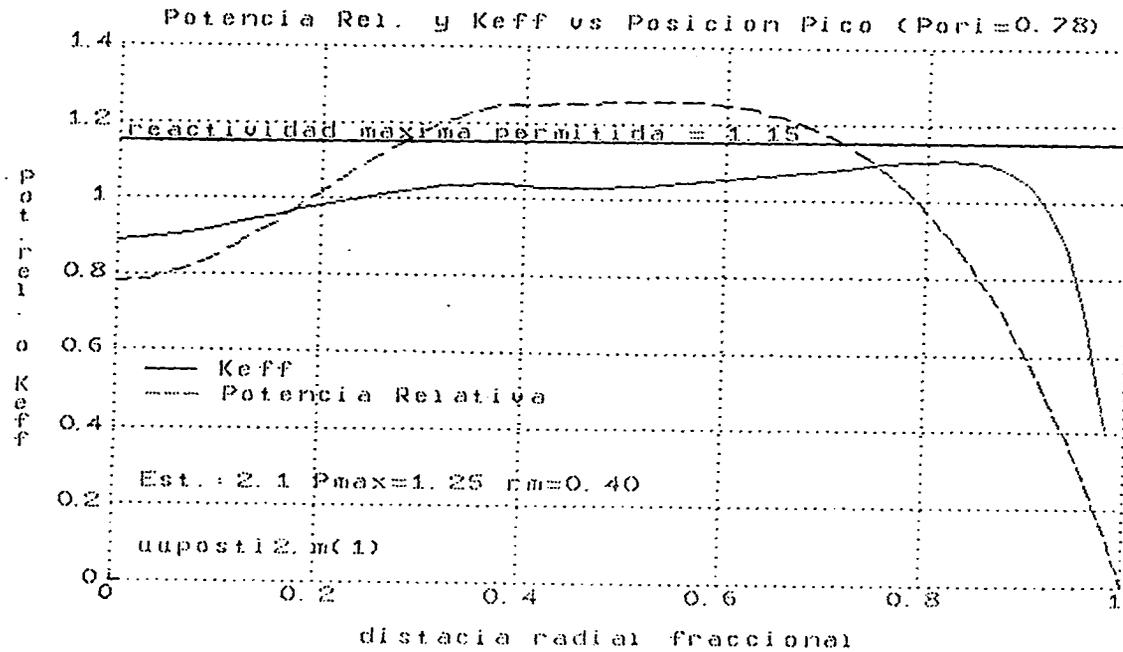


Figura 5.1.e Distribuciones de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.40$.

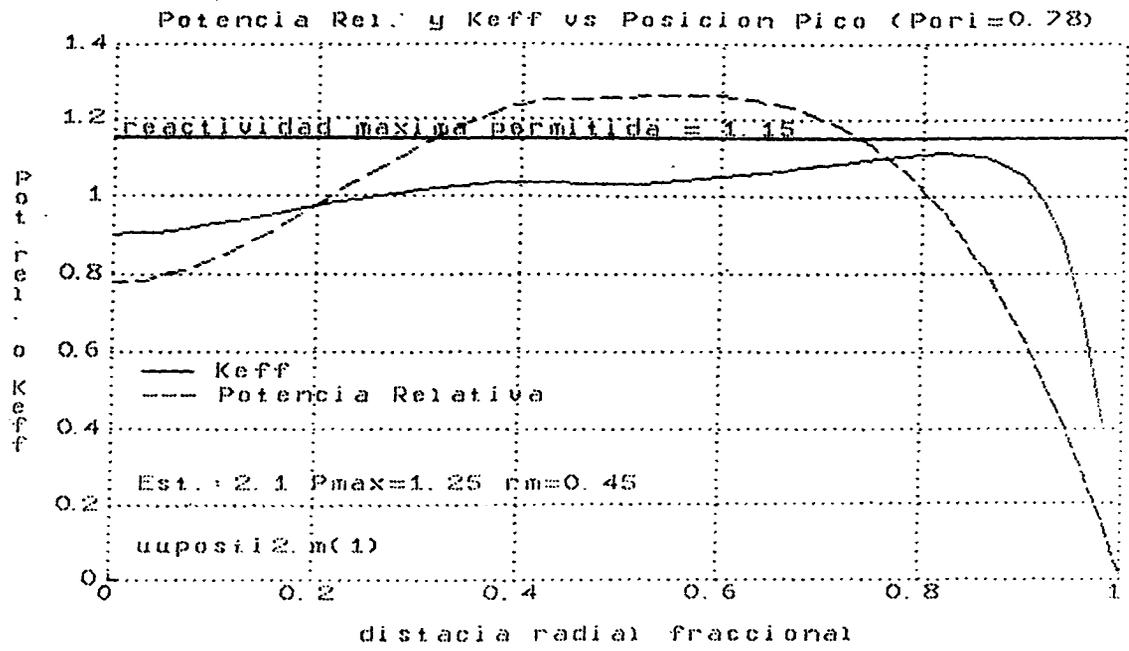


Figura 5.1.f Distribuciones de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.45$

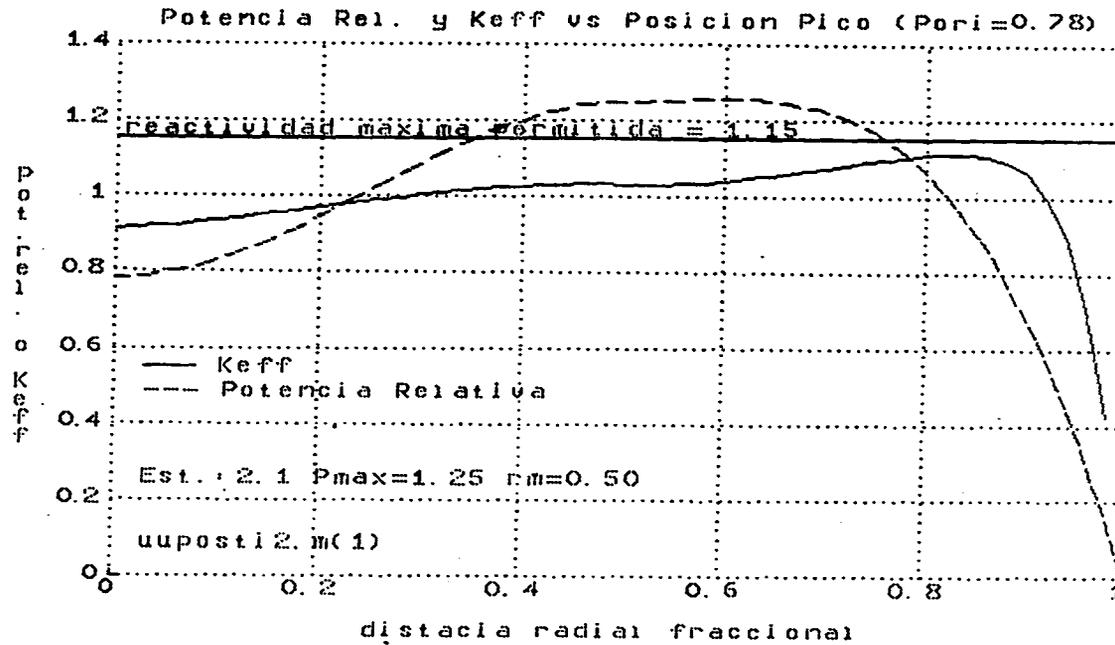


Figura 5.1.9 Distribuciones de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.50$.

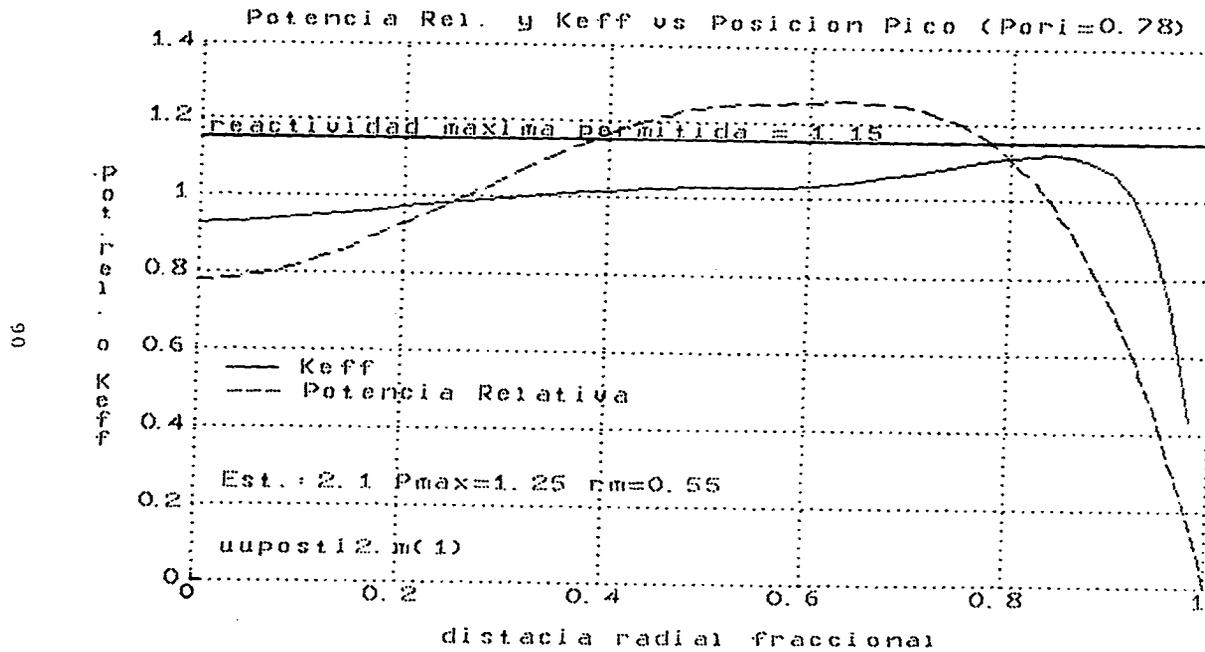


Figura 5.1.h Distributions de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.55$.

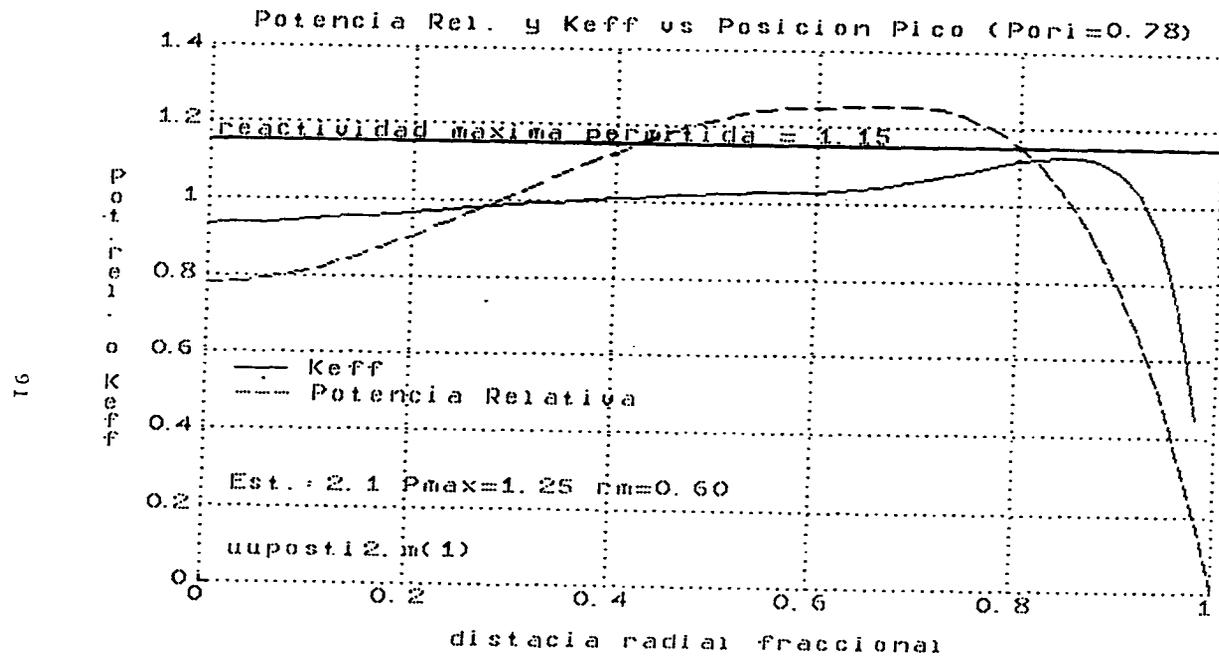


Figura 5.1.i Distribuciones de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con Pori=0.78 y Pmax=1.30 para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.60$.

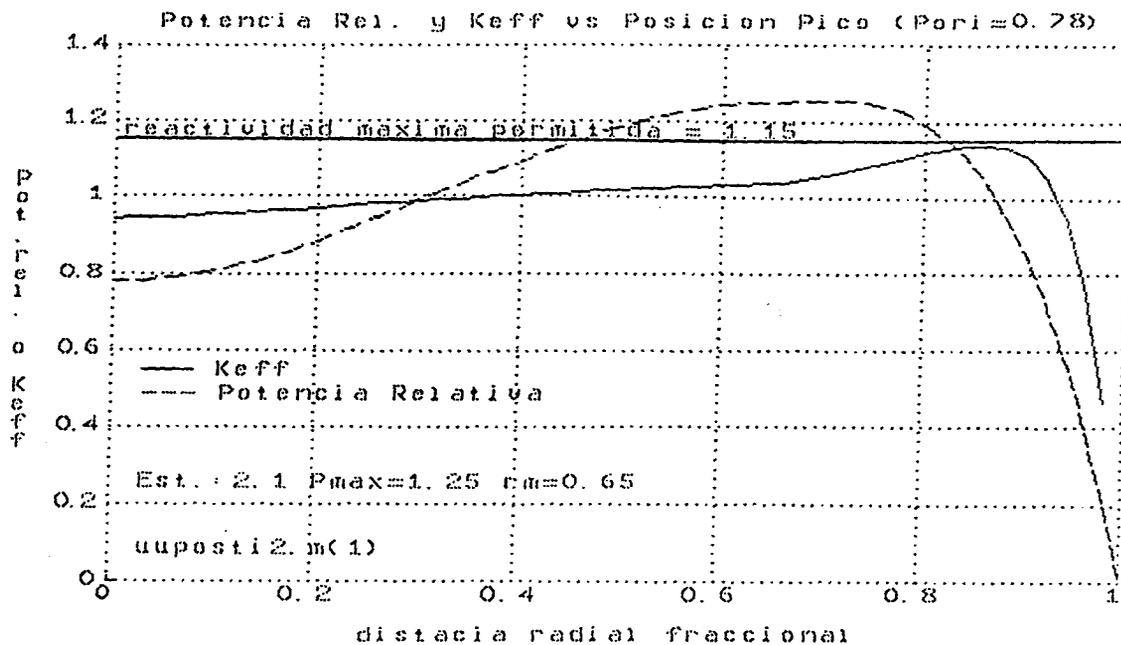


Figura 5.1.j Distribuciones de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.65$.

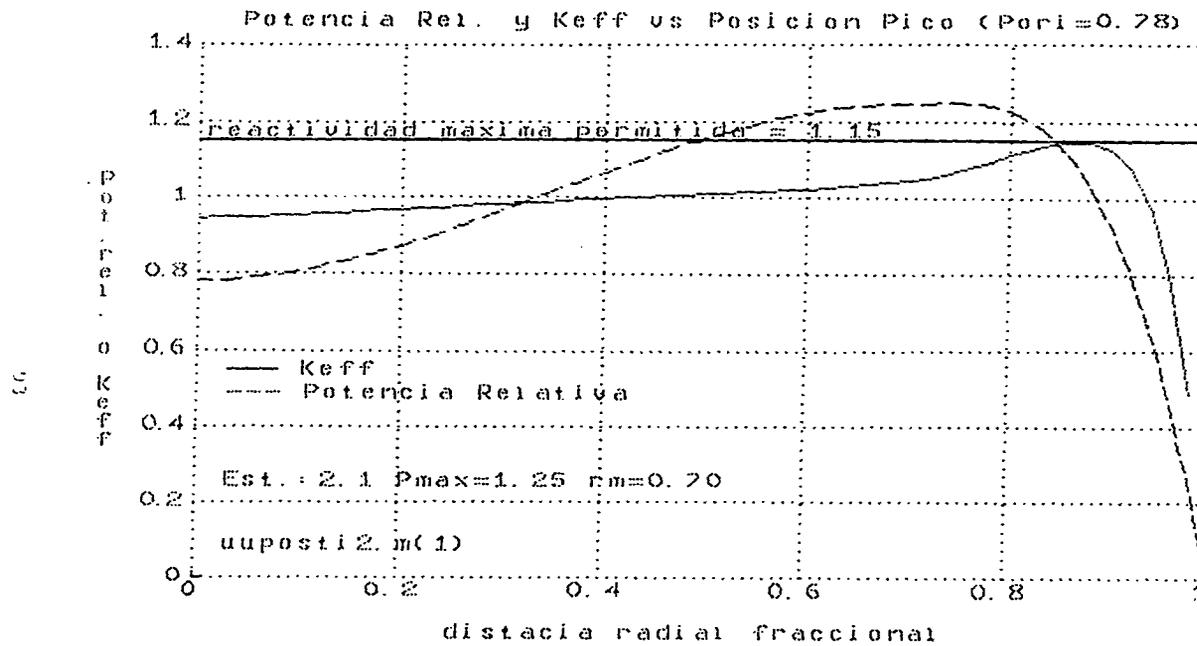


Figura 5.1.k Distribuciones de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.70$.

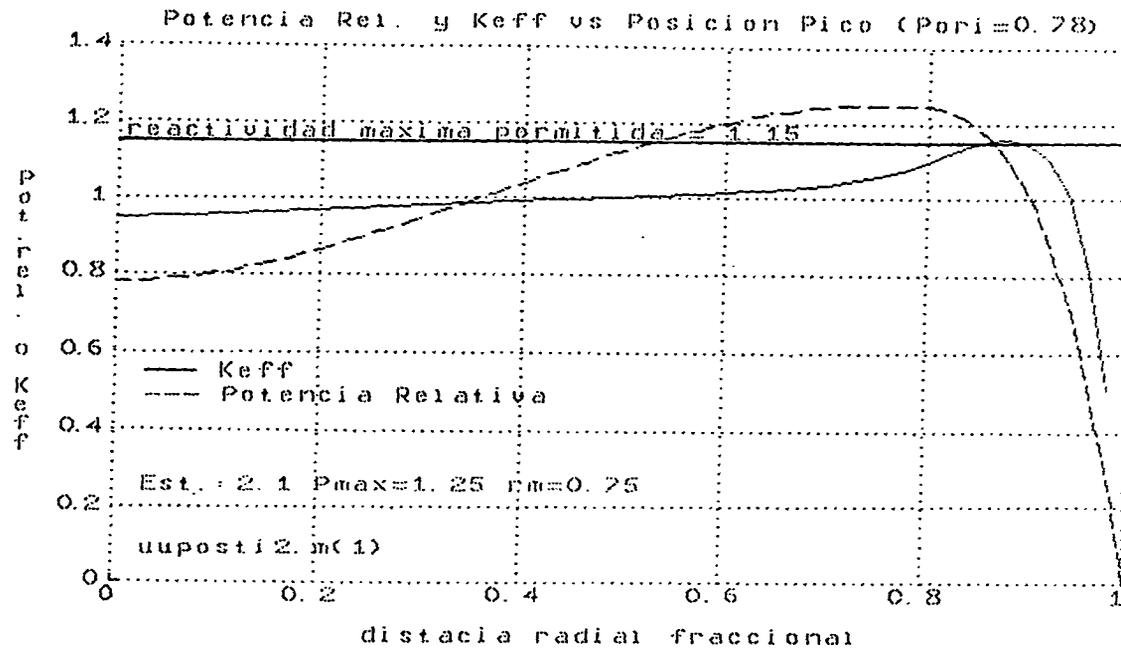


Figura 5.1.1 Distribuciones de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.75$.

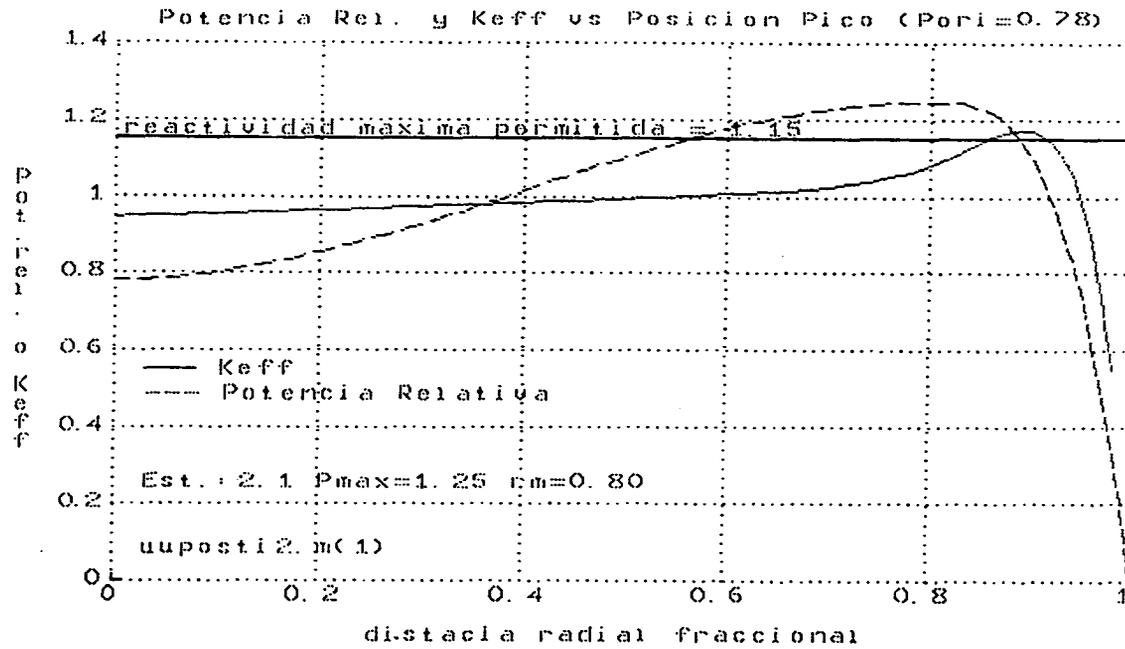


Figura 5.1.m Distribuciones de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con Pori=0.78 y Pmax=1.30 para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.80$.

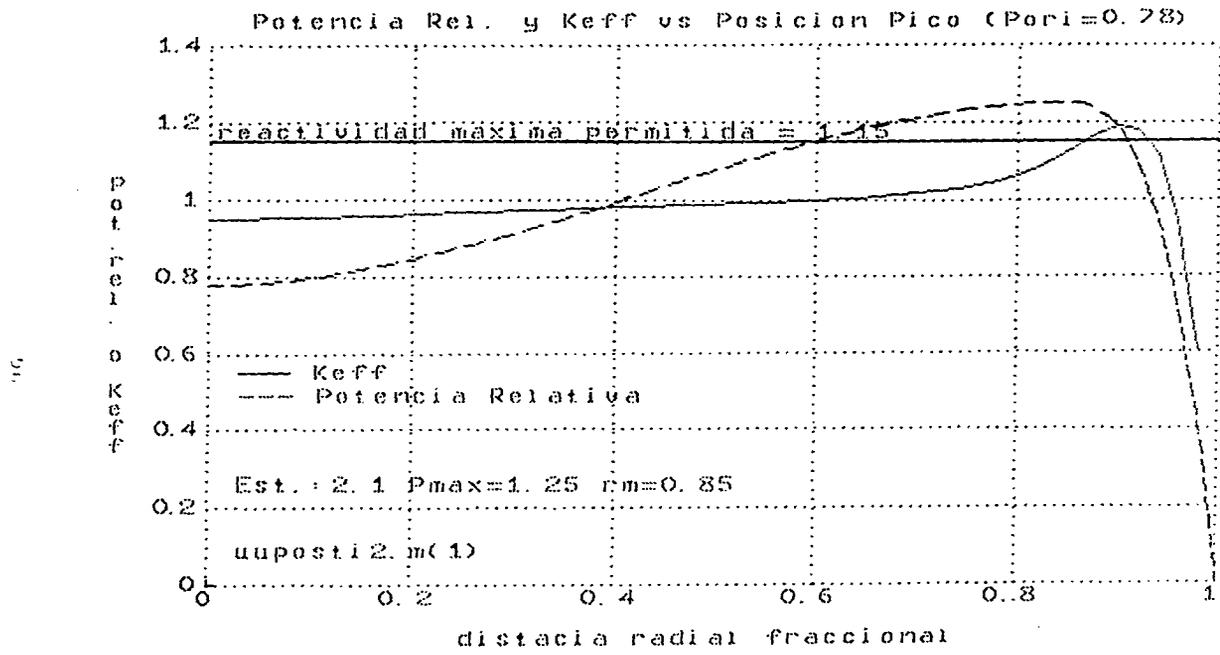


Figura 5.1.n Distributions de potencia relativa radial y su correspondiente distribución de reactividad contra la fracción radial con $P_{ori}=0.78$ y $P_{max}=1.30$ para el caso donde la posición del pico máximo de potencia $r_m=0.85$.

5.4.2 Método de cálculos del Potencial de Combustible y de las distribuciones de reactividad.

En esta segunda etapa se desarrollaron una serie de programas de cómputo UUPRIX.M y UUPOSTX.M (para mayor información consultar el Apéndice D). Estos programas permitieron calcular tanto la distribución de reactividad como el valor del Potencial de Combustible asociada a cada una de las distribuciones de potencia generadas en la etapa anterior.

Como se observa en las ecuaciones 5.3.13 y 5.3.14, tanto el cálculo de la distribución de reactividad radial como el del Potencial de Combustible están involucradas integrales. Para calcular estas se usó el método numérico tradicional de integración de Simpson (tomado de la Referencia 19 página 108) el cual se puede expresar como:

$$\int_{x_0}^{x_n} y(x) dx \sim (h/3) [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + Y_n]$$

Donde:

$$h = \frac{x_n - x_0}{n}$$

n = número de intervalos

$$y_0 = y(x_0), y_1 = y(x_0 + h), y_2 = y(x_0 + 2h), \dots$$

$$y_{n-1} = y(x_0 + (n-1)h), y_n = y(x_n)$$

el Error de truncamiento está dado por:

$$\text{Error} = -(x_n - x_0) h^4 y^{(4)}(\xi)$$

donde:

$y^{(4)}$ es la cuarta derivada de y respecto a x

En el estudio se utilizaron 100 intervalos radiales para el cálculo de las integrales lo que da un error de truncamiento muy pequeño.

El paquete MATLAB tiene entre sus módulos de programación las funciones de Bessel siguientes:

Función de Bessel de primera clase orden n $J_n(x)$

Función de Henkel $H_n(x)$

Se usaron las relaciones:

$$I_n(x) = i^n J_n(ix) \quad (\text{Ref. 17, ec II-38 pag. 568})$$

$$K_n(x) = \pi/2 i^{n+1} H_n(ix) \quad (\text{Ref. 18 pag. 399})$$

donde i es el número imaginario unitario ($i = (-1)^{1/2}$)

En base a estas relaciones se construyeron las funciones en lenguaje MATLAB para poder calcular $I_0(x)$, $I_1(x)$ y $K_0(x)$ (ver Apéndice D). Estas funciones son las necesarias para llevar a cabo el cálculo de la distribución de reactividad radial de acuerdo a la ecuación Ec.5.3.13.

En las gráficas de la Figura 5.1 se muestran juntas las distribuciones de potencia y sus correspondientes distribuciones de reactividad para los casos en que el pico máximo de potencia se conservó constante a 1.30. Los perfiles de reactividad fueron calculadas con los programas antes descritos.

5.4.3 Estudio para la obtención de la distribuciones radiales de potencia OPTIMA y de reactividad OBJETO para las recargas de la CNLV.

Una vez probados los programas de cómputo comentados en los dos apartados anteriores se inició el proceso de estudio relacionado con la meta fijada en el apartado 5.3.

El estudio se dividió en dos de la forma siguiente:

- 1.- ESTUDIO-1, POTENCIA MAXIMA FIJA, Calcular el Potencial de Combustible Total y las distribuciones de reactividad radial correspondientes a las distribuciones de potencia relativa radial teniendo las siguientes características;
 - Pico de potencia radial máxima fija, $P_{max}=1.3$.
 - variar la potencia en el centro del núcleo Pori, tomando los siguientes valores de potencia relativa;
[.70 .71 .72 .73 .74 .75 .76 .77 .78 .79 .80 .81 .82 .83]
 - variar también la localización radial del pico de potencia, r_m toma los valores (en unidades fracción de radio del núcleo);
[.01 .10 .20 .30 .40 .45 .50 .55 .60 .65 .70 .75 .80 .85]
- 2.- ESTUDIO-2 POTENCIA CENTRAL FIJA, Calcular la Potencia de Combustible Total y las distribuciones de reactividad radial correspondientes a las distribuciones de potencia relativa radial con las siguientes características;

- Potencia en el centro del núcleo fija, $P_{ori}=0.76$
- variar la magnitud del pico de potencia radial máxima, tomando los siguientes valores (potencia relativa);
[1.05 1.10 1.15 1.20 1.30 1.35 1.40 1.45 1.5]
- variando también la localización radial del pico de potencia, r_m toma los valores (en unidades fracción de radio del núcleo);
[.01 .10 .20 .30 .40 .45 .50 .55 .60 .65 .70 .75 .80 .85]

Se tienen problemas en el método de cálculo del perfil de reactividad si se introduce el pico de potencia en el centro ($r_m=0$) por lo que en lugar de poner $r_m=0$ se tuvo que poner $r_m=.01$ pero para cuestiones prácticas este punto representa, sin problemas al caso de la potencia máxima en el centro.

El primer estudio trata de forma exhaustiva los diferentes posibles perfiles de potencia manteniendo el pico de potencia en 1.30 al variar la posición del pico de potencia y la potencia en el centro del reactor. Este estudio proporcionará información que probablemente permita mejorar las técnicas de recarga actuales de ciclos anuales. Es por esto que se eligió la potencia máxima fija igual a 1.3 ya que éste es un valor representativo de las recargas de combustible reales en los ciclos anuales. Sin embargo, actualmente las propuestas para ciclos avanzados más agresivos y de longitudes bianuales es en el sentido de formar recargas con picos de potencia mayores (ver, Referencia 4 y 5). El segundo estudio está pensado en investigar que pasa al variar el pico de potencia tanto arriba como abajo del valor usual de las recargas. La meta es determinar si efectivamente:

Al aumentar el pico de potencia se obtienen mejores recargas, es decir con menor Potencial de Combustible.

Recordemos que el aumento del pico de potencia trae como consecuencia la disminución de los márgenes a los límites térmicos. Esta disminución es compensada con nuevos diseños de combustible capaces de funcionar bajo condiciones más restrictivas, alcanzar mayores quemados de descarga del combustible y con probabilidades de fallo muy bajas (casi cero). Estos combustibles avanzados también permiten mayores enriquecimientos lo que permite tener recargas con menor número de combustibles frescos. En el futuro gracias a los nuevos combustibles las recargas serán más largas y esto exige recargas con mayores picos de potencia máxima. El segundo estudio está, por lo tanto, más relacionado con las posibilidades de ciclos avanzados.

El objetivo al hacer estos dos estudios complementarios es tener un panorama teórico amplio respecto a la formación de recargas.

5.4.3.1 Resultados, análisis y conclusiones del ESTUDIO-1:

Se generaron los 196 perfiles de potencia del Estudio 1 y se obtuvieron para cada uno su correspondiente valor del Potencial de Combustible Total y de distribución de reactividad radial.

Los resultados obtenidos en el Estudio 1 se resumen al reunir los datos obtenidos en una sola gráfica mostrada en la Figura 5.2. Esta gráfica representa los casos en donde el pico de potencia se fijó en 1.3, en ella se trazan curvas conservando el valor del potencia en el centro del núcleo fijo, cada curva representa un valor dado de potencia en el centro del reactor y permite observar cómo varía el Potencial de Combustible al irse moviendo la posición del pico de potencia. En la gráfica también se trazó la curva con los valores reportados por Chao. Del examen de la gráfica se encuentra que las curvas crecen o presentan un máximo a diferencia de la curva de Chao la cual presenta un mínimo. Es evidente que no se logró confirmar lo concluido por Chao referente a:

El mínimo de Potencia de Combustible para un perfil de pico de potencia relativo de 1.3 se da en la fracción de radio de .6

y en lugar de esto se observa lo siguientes:

- 1- Para el pico de potencia relativa de 1.30 el Potencial de Combustible Total es mínimo para la distribución de potencia con el pico localizado en el centro del núcleo.
- 2- El Potencial de Combustible crece al aumentar la posición radial del pico de potencia para potencia en el centro del núcleo menores a .80
- 3- El potencial de Combustible presenta un máximo para potencias en el centro del núcleo mayores a 0.80. estos máximos ocurren para posiciones del pico de potencia muy cercanas a la periferia.

De la gráfica y analizando la conclusión 3 se detecta la posibilidad de que:

"al aumentar P_{ori} a más de .83 y manteniendo la posiciones del pico de potencia máxima lo más cercano de la periferia se logre obtener Potenciales de Combustible menores a los de las recargas con pico de potencia en el centro del núcleo.

La realidad es que esta aproximación requiere tener distribuciones de reactividad con picos en la periferia como en los mostrados en la Figura 5.3. en esta gráfica de la distribución de reactividad radial contra la posición radial de pico de potencia corresponde al caso de la potencia en el origen $P_{ori}=.83$ y con pico de potencia máxima de $P_{max}=1.3$.

En un reactor nuclear la reactividad no puede ni debe ser mayor a cierto límite el cual vamos ahora a establecer, (conservadoramente grande) que sea de:

$$K_{eff,lim} = \text{constante de multiplicación efectiva limite} = 1.15$$

Volviendo a examinar la gráfica 5.3 se puede apreciar que el pico de reactividad sobre pasa el valor limite de reactividad máxima radial lo cual lo inhabilita para usarse como distribución objeto de las recargas.

En el estudio 2 se vuelve a presentar una situación parecida y ahí se examinarán con mayor amplitud los posibles mínimos del Potencial de Combustible surgidos en los casos de picos de potencia cerca de la periferia.

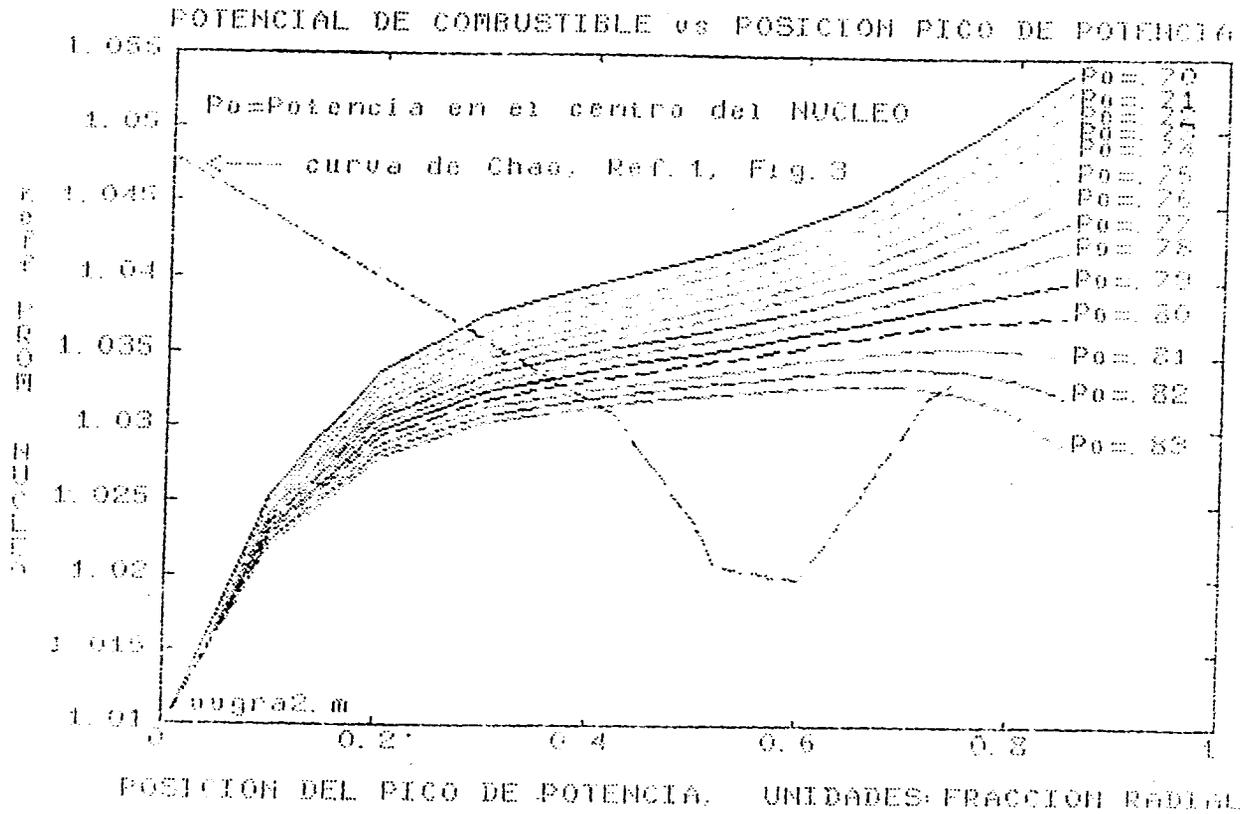


Figura 5.2

ESTUDIO-1: Familia de curvas de Potencial de Combustible contra posición del pico máximo de potencia variando la potencia relativa en el centro del núcleo para $P_{max}=1.30$.

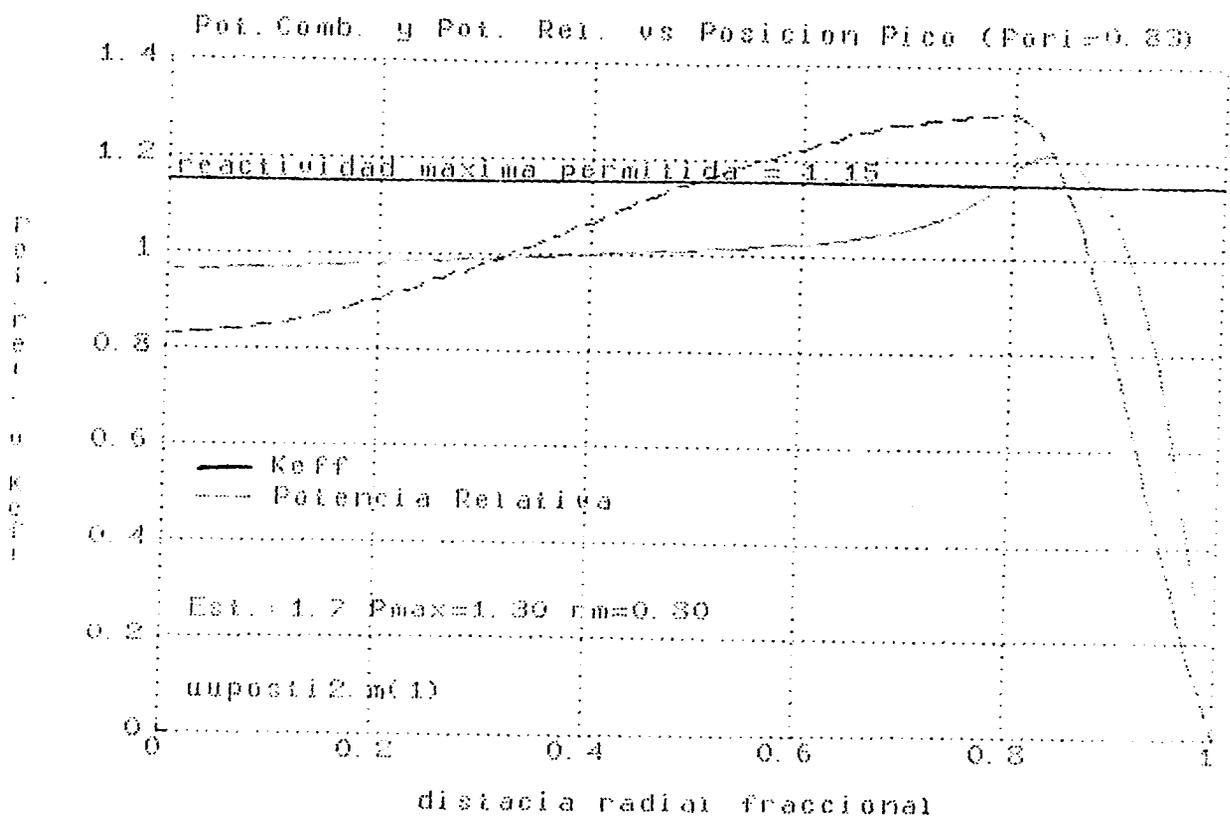


Figura 5.3 ESTUDIO-1: Distribución de potencia relativa radial y su correspondiente distribución radial de reactividad contra la posición del pico máximo de potencia, donde la reactividad máxima permitida es rebasada.

5.4.3.2 Resultados, análisis y conclusiones del ESTUDIO 2:

Al intentar realizar el estudio 2 se encontró que el sistema de generación de la potencia relativa, mediante el sistema de dos polinomios fallaba cuando el valor del pico de potencia es menor a 1.25. El problema consiste en la formación de un segundo pico de potencia cerca de la periferia del núcleo cuya magnitud es mayor a P_{max} (ver Fig. 5.4). Esto obviamente impide el uso de los dos polinomios cuando se pretende perfiles de potencia con pico máximo por debajo a 1.25.

En la Figura 5.5 se muestra el resumen gráfico del estudio-2. La gráfica consistente en una familia de curvas de Potencia de Combustible Total contra la posición del pico de potencia radial para diferentes valores del pico de potencia relativa máxima para P_{max} 1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45 y 1.50. El valor de la potencia en el centro del núcleo no se varió dejándola fija ($P_{ori}=0.78$). En esta gráfica se vuelve a trazar los datos correspondientes al estudio de Chao y se reafirma la no concordancia con los datos obtenidos en este estudio. También se incluye una curva correspondiente al pico de reactividad máxima permitida ($K_{eff,lim}=1.15$) la cual divide el plano de la gráfica en dos regiones;

- a la izquierda la región de perfiles de reactividad, en teoría, posibles de llevar a la práctica, y
- a la derecha la región de distribuciones de reactividad con picos demasiado grandes para generar recargas.

El examen de las curvas relacionadas con el potencial de combustible generadas en el estudio 2 se puede observar que:

- 4- El potencial de combustible es mínimo cuando el pico de potencia máximo está en el centro del núcleo cuando el pico de potencia relativa máxima se encuentra entre los valores de 1.25 a 1.45.
- 5- Al aumentar el pico de potencia el potencial de combustible disminuye cuando el pico de potencia relativa máxima se encuentra entre los valores de 1.25 a 1.45.

remarcando, a menor potencial de combustible mayor economía de ciclo.

Haciendo un examen de las curvas de reactividad correspondiente a los casos estudiados se puede observar que:

- 6- Para los casos donde la potencia pico máxima se encuentra en el centro del reactor la distribución de reactividad radial crece linealmente del centro del núcleo hacia la periferia

hasta una fracción radial de alrededor de 0.88 para caer rápidamente a cero en la superficie radial del núcleo. Al aumentar la pendiente de la reactividad radial disminuye el pico de potencia hasta un límite, en donde comienza a surgir un segundo pico de potencia en la misma posición radial del pico de reactividad.

- 7- Para los casos donde el pico de potencia no está en el centro del núcleo se encuentra un pico de reactividad en la misma posición radial del pico de potencia. Los valles de reactividad provocan mayores picos de potencia.

Recordando que la economía del ciclo es máxima cuando el potencial del combustible es mínima y tratando de resumir las observaciones de los estudios 1 y 2 se puede concluir:

- 1- La economía del ciclo aumenta cuando;
 - el pico máximo de potencia relativa crece y,
 - la posición radial del pico de potencia está en el centro del reactor.

- 2- Los núcleos con el pico máximo de potencia en el centro del reactor tiene una distribución de reactividad radial con las características siguientes;
 - la reactividad crece linealmente del centro hacia la periferia del núcleo hasta una fracción de radio de alrededor de 0.88, para caer rápidamente a cero en la superficie del núcleo.
 - Cuando la pendiente de reactividad lineal radial crece el pico máximo de potencia relativa disminuye, hasta un límite, en el cual surge un segundo pico de potencia en el mismo radio donde se da el pico de reactividad, es decir, alrededor de 0.88 de la fracción radial.

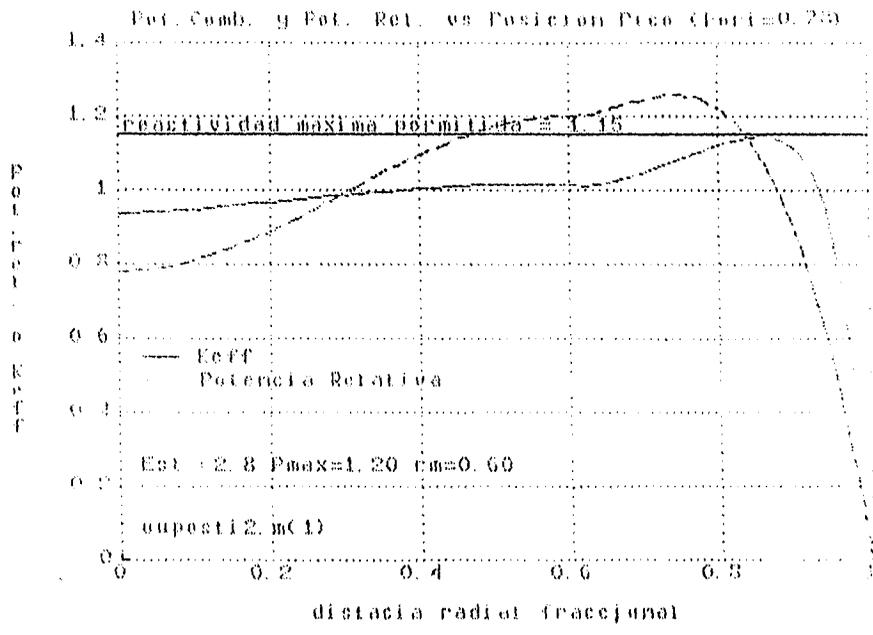


Figura 5.4 ESTUDIO-2: Distribución de potencia relativa radial y su correspondiente distribución radial de reactividad contra la fracción radial con Pori=0.78, Pmax=1.20 rm=0.60 donde se muestra la formación de un segundo pico de potencia no deseable cerca de la periferia.

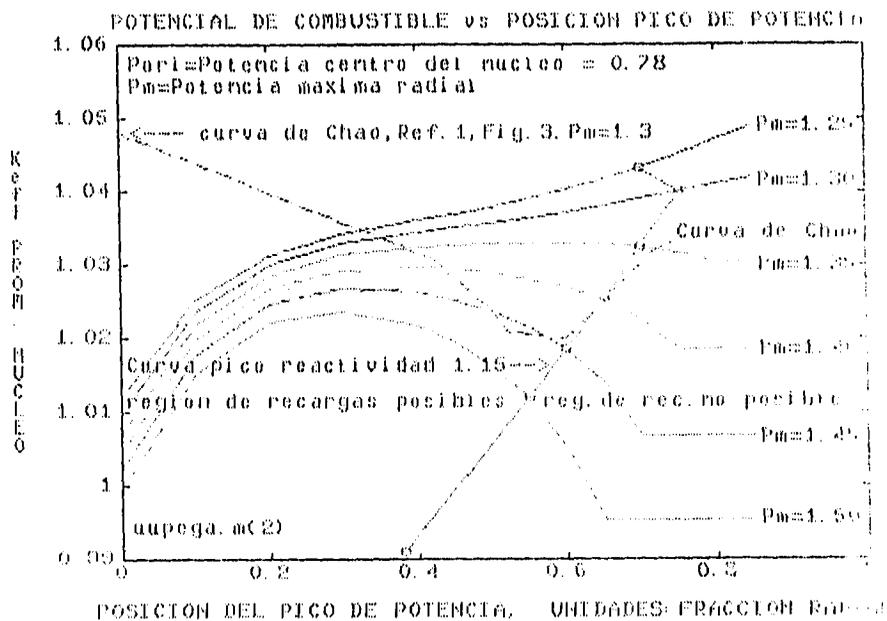


Figura 5.5. ESTUDIO-2: Familia de curvas de Potencial de Combustible contra posición del pico máximo de potencia variando la magnitud del pico de potencia relativa, caso $P_{ori}=0.78$.

5.5 Metodología de la generación de recargas para el ciclo 4 de la unidad 1 de la CVLV en base a la distribución de Kinf radial objeto y su evaluación con PRESTO

Para aplicar lo establecido en el capítulo anterior respecto al uso de perfiles de reactividad radial OBJETO para conformar recargas se elaboró, un algoritmo de cómputo el cual se incluyó en el programa MAPATES (Ver Apéndice C). Para lograr esto se utilizó el método de malla fina, desarrollado en el capítulo 4. Se tomó ventaja de que cada región está constituida por un conjunto de combustibles simétricos de los cuales uno de los conjuntos no está en la región radial adjunta más cercana al centro del núcleo. Esto permite el procedimiento de formación de patrón de recarga siguiente:

- 1- Ordene los combustibles de recarga de más a menos reactividad (o de menos a más quemado) formando el vector de ensambles combustibles de RECARGA.
- 2- Seleccione la distribución de reactividad radial OBJETO y calcule la reactividad de cada uno de las 64 regiones de malla fina en que se dividió el núcleo de los reactores de la CNLV obteniendo el vector de reactividad por región radial OBJETO(ver capítulo 4).
- 3- Comenzando en la región más central (Región 1) de la malla fina, coloque el combustible cuya reactividad este más cercana a la reactividad OBJETO de la región más central.
- 4- Calcule en la región 2 (de acuerdo a los pesos asociados a la malla fina y la reactividad asignada a la región 2 en el vector de reactividad OBJETO) la reactividad del combustible considerado en la región 2 pero no en la región 1. Seleccione el ensamble combustible, de los que resten en el vector de RECARGA, con reactividad más cercana al valor calculado y colóquelo en la región 2.
- 5- Calcule en la región R_i (de acuerdo a los pesos asociados a la malla fina y a la reactividad asignada a la región R_i en el vector de reactividad OBJETO) la reactividad del combustible considerado en la región R_i pero no en la región R_{i-1} y seleccione el ensamble combustible, de los que resten en el vector de RECARGA, con reactividad más cercana al valor calculado y colóquelo en la región R_i .
- 6- Prosiga hasta llenar todas las localidades del núcleo y obtener el patrón de recarga de combustible.

Se realizó una subrutina de cómputo para el programa MAPATES bajo el procedimiento antes mencionado y se aplicó a la recarga del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV. Para la evaluación de la recarga formada se utilizó el simulador de núcleos PRESTO, los resultados fueron comparados con aquellos alcanzados con la carga OFICIAL. En

el apartado 5.5.1 se presentan los resultados de este estudio que se denominó DB. En el apartado 5.5.2 se modifica el procedimiento con la intención de mejorar la distribución de los combustibles en el ángulo azimutal y con éste se realiza un nuevo estudio etiquetado EB.

La curva de reactividad radial OBJETO seleccionada para los dos estudios consistió de dos rectas que tratan de semejar las reactividades radiales obtenidas en el capítulo anterior.

5.5.1 Estudio DB, recarga con ajuste libre a la distribución de reactividad OBJETO, resultados, análisis y conclusiones.

El procedimiento establecido en el apartado anterior se aplicó a la recarga del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV conformándose el estudio DB. En la Tabla 5.1 se muestran los principales resultados. En la Figura 5.6 se presentan los mapas de 1/4 de núcleo con los identificadores PRESTO, la Kinf y el quemado (BOC) en MWd/MT de cada uno los ensambles combustibles.

En la figura 5.7 se presentan las distribuciones de reactividad de la recarga OFICIAL, la curva de reactividad OBJETO seleccionada y de la carga DB. El ajuste logrado con la recarga resulta casi exacto sobre todo en el centro del núcleo, lo cual avala el método de ajuste propuesto.

Examinando la Tabla de resultados 5.1 y de acuerdo a los criterios de comparación para lograr una carga mejor que la oficial mencionadas al final del apartado 6.2, se encuentra que la recarga DB es peor a la carga OFICIAL en todos los parámetros (Keff, MCPR, MLHGR) tanto en el BOC como en el EOC. El análisis de las figuras 5.9 al 5.17 nos indican que el problema radica en un exceso de reactividad en el centro del núcleo en la recarga DB. El exceso de reactividad lo producen dos combustibles frescos colocados adjuntos cara a cara como se puede ver en el tercer mapa de la Figura 5.6 y esto es debido a que;

en el método de generación de recargas por ajuste libre a una distribución de reactividad OBJETO, la colocación de combustible sobre estima la optimización radial de los combustibles en perjuicio de la distribución en el ángulo azimutal.

Con base en esta conclusión se trató de mejorar la distribución no radial de los combustibles modificando el procedimiento establecido en el apartado 5.5 poniendo la siguiente regla adicional:

dividir el núcleo de la CNLV en categorías BLANCA-NEGRA-GRIS de acuerdo a lo establecido en el Apéndice A y a su vez el vector de RECARGA dividirlo en tres partes, los 46 ensambles más reactivos asignarlos a las localidades BLANCAS, los siguientes 44 a las localidades NEGRAS y el resto a las GRISES (21).

Con esta categorización complementaria introducida en el programa MAPATES se generó una nueva recarga que se le llamó EB. en el siguiente apartado se comentan los resultados alcanzados con esta nueva recarga.

5.5.2 Estudio EB, recarga con ajuste libre a la distribución de reactividad OBJETO con división del núcleo BLANCO-NEGRO-GRIS. Resultados, análisis y conclusiones.

El procedimiento modificado y comentado en el apartado anterior e introducido en el programa MAPATES (ver Apéndice C) se aplicó a la recarga del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV conformándose el estudio EB. En la Figura 5.8 se muestran los mapas de 1/4 de núcleo con los identificadores PRESTO, la Kinf y el quemado (BOC) en MWD/MT de cada uno de los ensambles combustibles.

Aún cuando los resultados de la recarga EB mejoró respecto a los resultados de la recarga DB al ser comparados con la recarga OFICIAL no la superó en ninguno de los parámetros tanto en el BOC como en el EOC. Es posible que mediante un proceso de ajuste del procedimiento se puedan lograr mejoras en las recargas obtenidas pero el problema de fondo de no atacar la distribución de los combustibles no sólo radialmente sino también en el ángulo azimutal persistiría por lo que se concluye:

La evaluación del método de generación de una recarga óptima con base a una distribución de reactividad OBJETO no podrá ser evaluada adecuadamente hasta que se tenga una distribución de reactividad OBJETO radial bi-dimensional (radial y en el ángulo azimutal).

TABLA 5.1 ESTUDIO DB Y EB DATOS BOC Y EOC

RECARGA	ESTADO	Keff	MCPR	MLHGR w/cm
OFICIAL	BOC	1.0078	1.6217	453.44
ESTUDIO DB	BOC	1.0116	1.1240	545.09
ESTUDIO EB	BOC	1.0135	1.1417	524.61
OFICIAL	EOC	0.99400	1.5269	375.58
ESTUDIO DB	EOC	0.96635	1.2096	366.74
ESTUDIO EB	EOC	0.99132	1.4661	379.29

**MAPAS CUARTO DE NUCLEO
RECARGA ESTUDIO DB**

***** CAMBIOS: Sin intercambios EVA1(Diseño/Oficial)= 1.001974

Carga BASICA DB IV CUADRANTE Identificadores de Combustibles PRESTO

	[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
[22]	83003	51183	41251	51203	51191	73288	41231	30556	20360	62350	73236
[20]	93749	41243	41227	51199	51195	51175	42326	42314	30404	62378	73244
[18]	41223	41235	20332	41215	42330	41219	30401	20347	62386	20281	30422
[16]	51179	51187	41259	30382	73292	30632	62366	62342	30503	73208	30585
[14]	51207	51211	42322	41247	62334	62358	20288	73280	42294	73216	30512
[12]	41239	42318	41255	20305	62390	42302	62354	62374	73200	20365	73252
[10]	73284	51171	30447	62338	20368	62394	20333	30461	73232	73276	73272
[08]	30473	42310	42298	62346	20286	62406	30427	73220	30634	73264	
[06]	62402	20338	62370	20294	62362	62382	73228	20350	73256		
[04]	42306	62398	30394	73204	73212	30641	30629	73240			
[02]	73224	73240	20364	20277	20322	73248	73268				

Carga BASICA DB IV CUADRANTE Constante de Multiplicacion Infinita(Kinf)(=-Nuevo)

	[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
[22]	1.0253	1.0358	1.0458	1.0691	1.0432	.98788	1.0556	.91277	.97735	1.1196	.98788
[20]	1.0307	1.0078	1.0370	1.0394	1.0695	1.0698	1.0878	1.1071	.91726	1.1190	.98788
[18]	1.0507	1.0076	.97555	1.0379	1.0907	1.0549	.93157	.97702	1.1184	.91405	.91646
[16]	1.0587	1.0396	1.0034	.90595	.98788	.93601	1.1273	1.1272	.91055	.98788	.92044
[14]	1.0432	1.0585	1.0908	1.0033	1.1507	1.1370	.90911	.98788	1.1198	.98788	.92408
[12]	1.0425	1.0870	1.0431	.97636	1.1503	1.1011	1.1231	1.1208	.98788	.91861	.98788
[10]	.98788	1.0696	.93159	1.1369	.90885	1.1270	.90997	.91093	.98788	.98788	.98788
[08]	.91212	1.0880	1.1073	1.1272	.97844	1.1229	.91078	.98788	.92068	.98788	
[06]	1.1184	.97823	1.1184	.91017	1.1208	1.1195	.98788	.92056	.98788		
[04]	1.1197	1.1189	.91076	.98788	.98788	.91782	.93059	.98788			
[02]	.98788	.98788	.91452	.91921	.92094	.98788	.98788				

Carga BASICA DB IV CUADRANTE Quemado por combustible en MWD/MT(=-Nuevo)

	[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
[22]		20353	16984	16729	19525		15949	23867	13100	13982	
[20]		21168	17868	19953	16686	16653	13364	11348	23117	14106	
[18]	16447	21193	13359	17766	13127	16019	21008	13134	14146	18951	23953
[16]	17855	19929	21717	24406		21413	13177	13167	23808		23428
[14]	19522	17879	13116	21718	10473	12099	19606		9987		22965
[12]	17295	13472	17238	13261	10515	11961	13632	13879		18406	
[10]		16682	21003	12108	19621	13187	19455	23685			
[08]	23939	13354	11327	13189	13055	13652	23707		23411		
[06]	14172	13021	14152	19430	13884	13987		18155			
[04]	9993	14108	23783			23080	22151				
[02]			18882	18291	18161						

Figura 5.6 Mapas de la recarga del ESTUDIO DB ajuste a distribución de Reactividad OBJETO

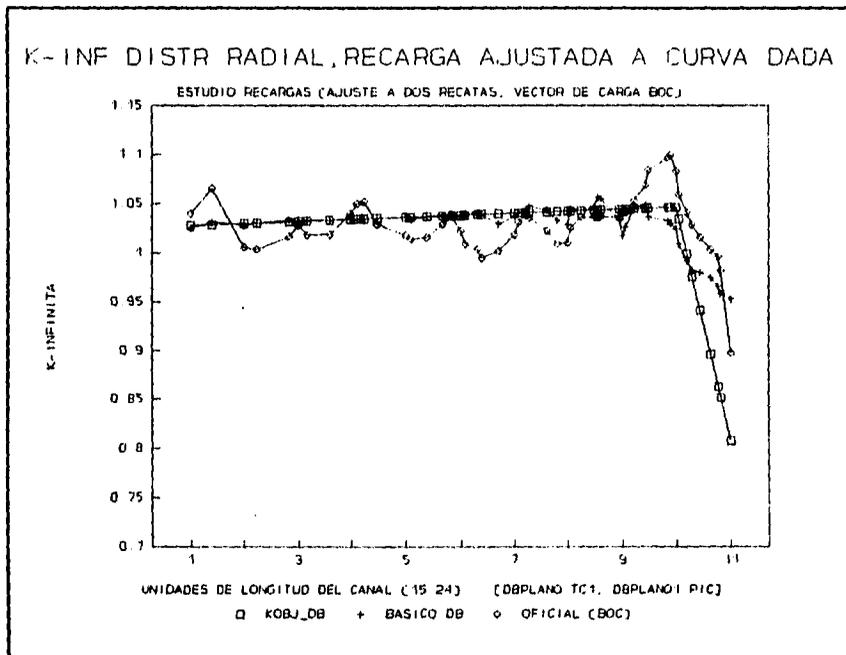


Figura 5.7

Distribución de reactividad radial OBJETO y Distribución de reactividad radial de la recarga del ESTUDIO DB condición BOC. Ajuste libre a la curva de reactividad. Vector de recarga combustibles del ciclo 4 de la Unidad 1 de la CNLV. La curva de reactividad consiste de dos rectas que semejan la reactividad OBJETO encontradas en el apartado 5.4.

**MAPAS CUARTO DE NUCLEO
RECARGA ESTUDIO EB**

***** CAMBIOS: Sin intercambios EVA1(Diseño/Oficial)= 1.004383

Carga	BASICA	EB	IV	CUADRANTE	Identificadores de Combustibles	PRESTO					
(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)	
(22)	41215	93749	41239	41259	62358	30632	41219	73212	51171	73236	20350
(20)	83003	51199	41235	51191	41247	62346	20305	62362	73272	42318	20368
(18)	51187	41243	62334	30512	41251	73288	51211	73220	62382	73256	20333
(16)	51183	41255	20322	62338	30447	62354	73204	51203	73228	42314	30503
(14)	62390	41227	51207	30401	62342	20360	42306	73276	62402	73244	30473
(12)	30629	62366	73292	62394	20347	62374	20286	62386	73248	42310	20277
(10)	41223	20332	41231	73200	42294	20338	62378	73260	42330	20281	20364
(08)	73208	62406	73216	51179	73280	62398	73264	42302	30427	30404	
(06)	51195	73284	62350	73224	62370	73252	42322	30394	20365		
(04)	73232	51175	73268	42298	73240	42326	30556	30641			
(02)	30634	30382	20288	20294	30461	30585	30422				

Carga	BASICA	EB	IV	CUADRANTE	Constante	de Multiplicacion	Infinita(Kinf)(--Nuevo)				
(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)	
(22)	1.0379	1.0307	1.0425	1.0034	1.1370	.93601	1.0549	.98788	1.0696	.98788	.92056
(20)	1.0253	1.0394	1.0076	1.0432	1.0033	1.1272	.97636	1.1208	.98788	1.0870	.90885
(18)	1.0396	1.0078	1.1507	.92408	1.0458	.98788	1.0585	.98788	1.1195	.98788	.90997
(16)	1.0358	1.0431	.92094	1.1369	.93159	1.1231	.98788	1.0691	.98788	1.1071	.91055
(14)	1.1503	1.0370	1.0432	.93157	1.1272	.97735	1.1197	.98788	1.1184	.98788	.91212
(12)	.93059	1.1275	.98788	1.1270	.97702	1.1208	.97844	1.1184	.98788	1.0880	.91921
(10)	1.0507	.97555	1.0556	.98788	1.1198	.97823	1.1190	.98788	1.0907	.91405	.91452
(08)	.98788	1.1229	.98788	1.0587	.98788	1.1189	.98788	1.1011	.91078	.91726	
(06)	1.0695	.98788	1.1196	.98788	1.1184	.98788	1.0908	.91076	.91861		
(04)	.98788	1.0698	.98788	1.1073	.98788	1.0878	.91277	.91782			
(02)	.92068	.90595	.90911	.91017	.91093	.92044	.91646				

Carga	BASICA	EB	IV	CUADRANTE	Quemado por combustible en MWD/MT(--Nuevo)						
(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)	
(22)	17766		17295	21717	12099	21413	16019		16682		18155
(20)		19953	21193	19525	21718	13189	13261	13884		13472	19621
(18)	19929	21168	10473	22965	16984		17879		13987		19455
(16)	20353	17238	18161	12108	21003	13632		16729		11348	23808
(14)	10515	17868	19522	21008	13167	13100	9993		14172		23939
(12)	22151	13177		13187	13134	13879	13055	14146		13354	18291
(10)	16447	13359	15949		9987	13021	14104		13127	18951	18882
(08)		13652		17855		14108		11961	23707	23117	
(06)	16686		13982		14152		13116	23783	18406		
(04)		16653		11327		13364	23867	23080			
(02)	23411	24406	19606	19430	23685	23428	23953				

Figura 5.8 Mapas de la recarga del ESTUDIO EB, ajuste a distribución de Reactividad OBJETO, núcleo dividido en Categorías BLANCO, NEGRO Y GRIS

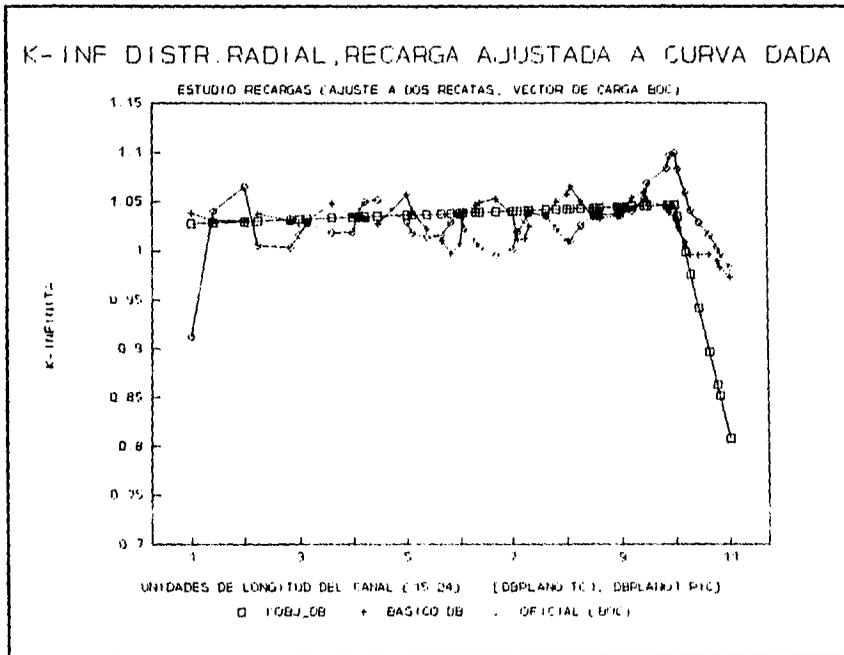


Figura 5.9

Distribución de reactividad radial OBJETO y Distribución de reactividad radial de la recarga del ESTUDIO EB condición BOC. Ajuste a la curva de reactividad respetando la división del núcleo en categorías BLANCA-NEGRA-GRIS. Vector de recarga combustibles del ciclo 4 de la Unidad 1 de la CNLV. La curva de reactividad consiste de dos reactas que semejan la reactividad OBJETO encontradas en el apartado 5.4.

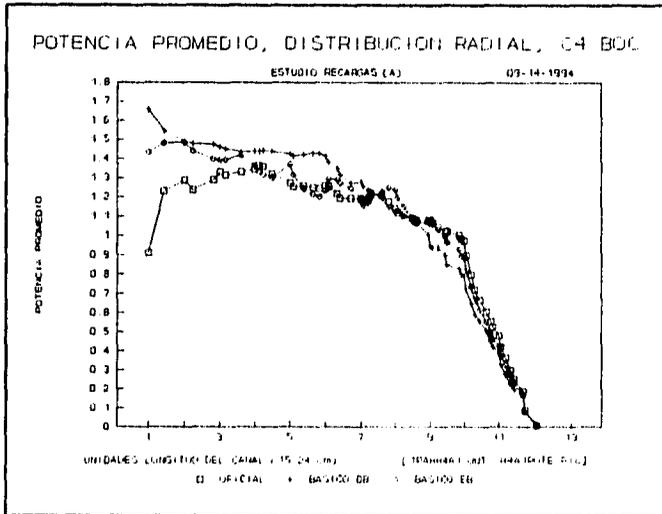


Figura 5.10 Distribución de potencia promedio radial BOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).

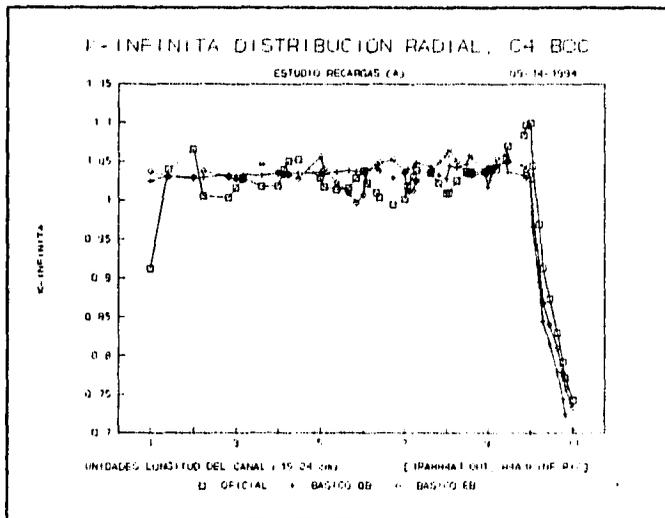


Figura 5.11 Distribución de reactividad promedio radial BOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).

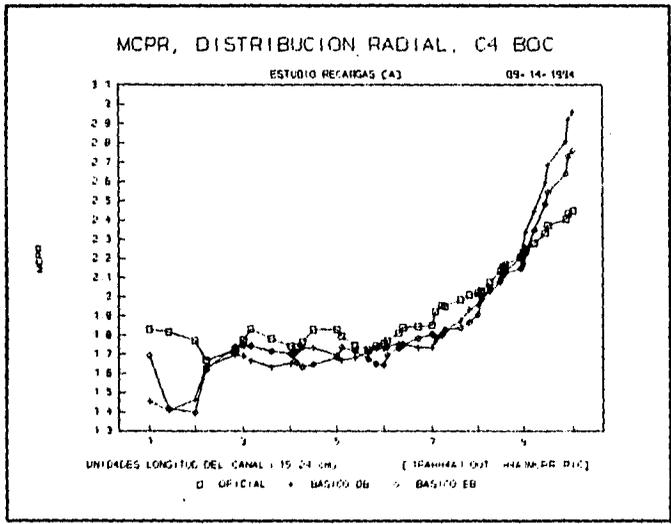


Figura 5.12 Distribución del CPR promedio radial BOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).

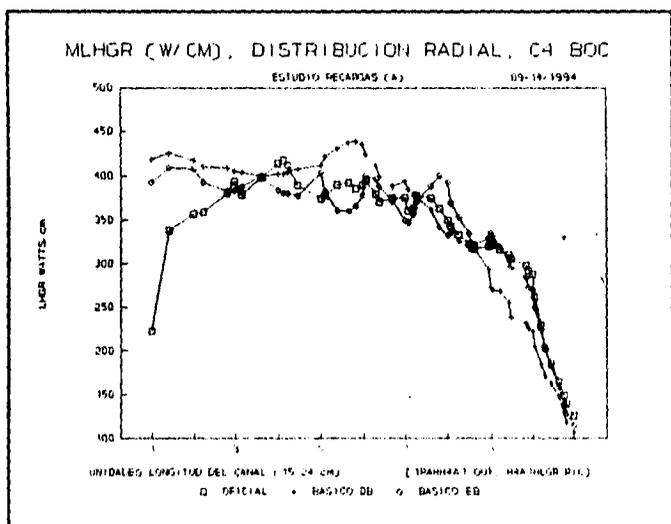


Figura 5.13 Distribución del LHGR promedio radial BOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).

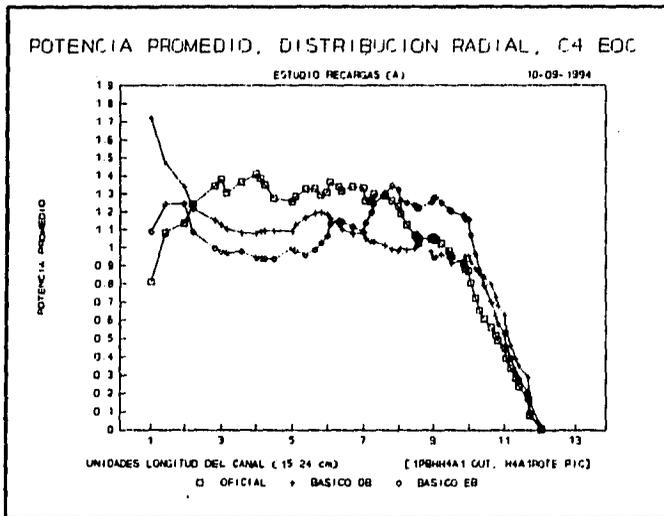


Figura 5.14 Distribución de potencia promedio radial EOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).

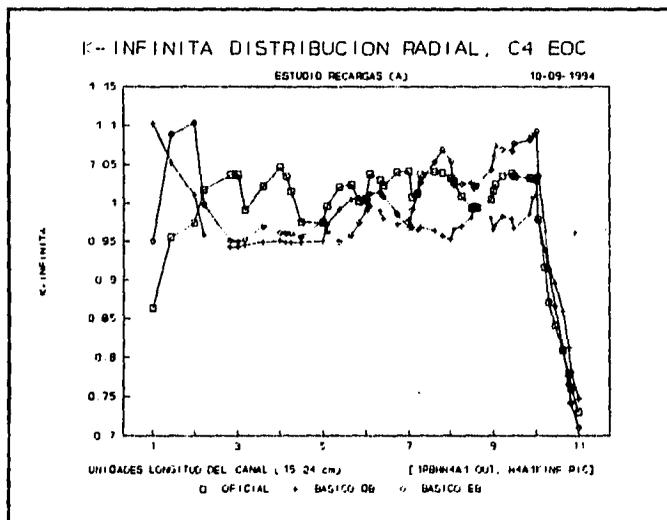


Figura 5.15 Distribución de reactividad promedio radial EOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO):

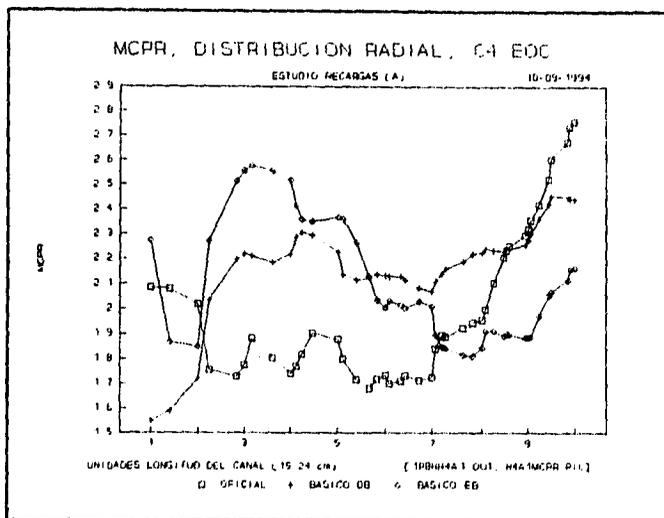


Figura 5.16 Distribución del CPR promedio radial EOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).

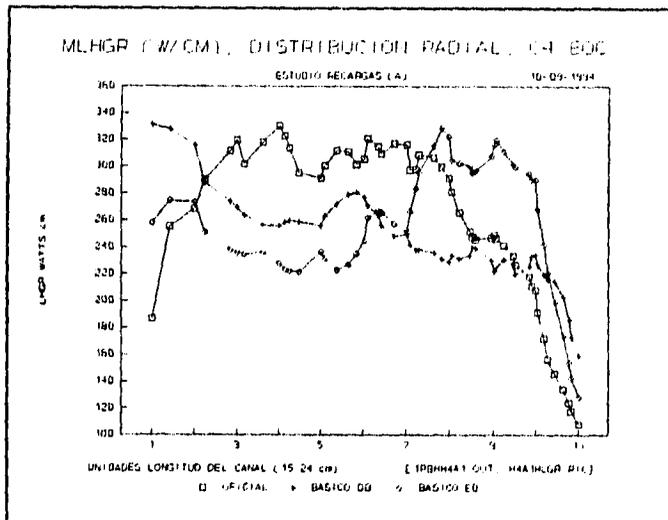


Figura 5.17 Distribución del LHGR promedio radial EOC de los caso OFICIAL, estudio DB y estudio EB (Salida PRESTO).

CAPITULO 6

METODO BIPARAMETRICO DE BURTE. SU ADAPTACION, MODIFICACION Y APLICACION EN LA OPTIMIZACION DEL DISEÑO DE LA RECARGA DEL CICLO 4 DE LA UNIDAD 1 DE LA CNLV

En este capítulo se presenta el método biparamétrico desarrollado por D.P. Burte y S.G. Vaidya de la división de física teórica del centro de investigaciones atómicas de la India. (Ref. 2). Este método fue desarrollado con el objeto de optimizar las recargas del reactor BWR de la estación de potencia de Tarapur. El núcleo de este reactor está constituido por 284 ensambles combustibles.

El Método Biparamétrico original de Burte consiste, como se verá en detalle en el apartado 6.1, en:

- Dividir el núcleo en una región no-periférica y otra periférica (catalogada como región gris).
- A cada localidad del núcleo se le asocia un número de importancia obtenido al simular un núcleo homogéneo. El canal con mayor potencia relativa se le asigna el número 1, al siguiente con mayor potencia el 2 y así sucesivamente.
- En la región no-periférica se catalogan las localidades de los combustibles en posiciones blancas y negras como en un tablero de ajedrez. En las posiciones blancas se colocan los combustibles frescos y en las posiciones negras, bajo el esquema OUT-IN, los combustibles gastados más reactivos (o menos expuestos) guiándose para esto por el número de importancia de cada canal.
- En la región periférica o gris, bajo el esquema IN-OUT, se colocan los combustibles menos reactivos (o más gastados) guiándose para esto por el número de importancia de cada canal.
- Al seguir el procedimiento anterior se forma el Patrón de Recarga Básico (PRB).
- A partir del PRB, se definen dos parámetros (N y M) que permiten alterar el orden del vector de recarga de modo tal que es posible, al manipular éstos, buscar en forma controlada el patrón de recarga que cumpla la restricción impuesta al pico de potencia radial y maximice la longitud del ciclo.

La estrategia de operación del reactor de Tarapur es de bajo escape radial al igual que en los reactores de la CNLV pero difiere, entre otras, en que no sigue el concepto de control CCC (ver apartado 3.2.4). Además la dimensión de los núcleos y el número de combustibles difiere significativamente entre uno y otro reactor. Debido a lo anterior fue necesario adaptar el método original de Burte a la estrategia de operación de la CNLV. A esta adaptación la denominamos Método Biparamétrico Adaptado (MBA) y se presenta en el apartado 6.2.

El Método Biparamétrico Adaptado se aplicó a la búsqueda de patrones de recargas del Ciclo 4 de la Unidad 1 del Centro Nuclear de Laguna Verde. Los resultados son reportados en el apartado 6.2.1. El análisis de éstos indicaron que no se obtuvo un patrón básico lo suficientemente reactivo por lo que al variar los parámetros N y M y formarse nuevos patrones éstos resultaron aún menos reactivos y con márgenes de seguridad menores que aquéllos del patrón básico. Ante esto fue necesario modificar el Método Biparamétrico Adaptado desarrollándose lo que se denominó Método Biparamétrico Modificado (MBM). El MBM respetó el fundamento del método original que establece:

"Iniciar con un patrón básico de arranque más reactivo que el óptimo a alcanzar."

Para lograr lo anterior, el esquema para llenar las posiciones negras con combustibles gastados más reactivos se cambió del esquema original OUT_IN al IN-OUT. Esto trajo como consecuencia la necesidad de modificar la definición de los dos parámetros de variación del vector de recarga.

En el apartado tres de este capítulo se reportan los resultados obtenidos al aplicar el Método Biparamétrico Modificado a la formación de recargas del Ciclo 4 de la Unidad 1 de la CNLV.

Al realizar el estudio con el método MBM se usó la técnica de formar la recarga básica y fijar la colocación de las regiones blanca y gris, y sólo cambiar la colocación de los combustibles de la categoría negra al variar los parámetros N y M en el proceso de búsqueda del patrón de recarga óptimo. Esto fue posible debido a la nueva forma de definir los parámetros. Esta técnica permite encontrar recargas óptimas sin perturbar la colocación de los combustibles periféricos. Con ésto se evita aumentar directamente la fluencia en la vasija al tratar de conseguir ciclos más extensos, técnica implícita en el método original de Burte.

Se examinaron dos técnicas complementarias para buscar el patrón de recarga óptimo. La primera llamada de Técnica de Exploración Lineal (TEL) consiste en:

- fijar uno de los parámetros (ejemplo N) y generar varios patrones de recarga variando el otro (M) consecutivamente.

- Evaluar los patrones de recarga con PRESTO y seleccionar el mejor de ellos.
- fijar en base al mejor patrón el otro parámetro (M) y ahora variar el otro (N) consecutivamente.
- Y así consecutivamente hasta alcanzar el patrón de recarga deseado.

La otra técnica de búsqueda se denominó Técnica de Búsqueda por Escalamiento de Malla la que consiste en:

- Fijar los valores máximos de N y M a utilizar y construir una malla amplia bidimensional de N y M con pasos mayores a uno y así formar una malla amplia que cubra todo el espacio de solución que se elija. Generar todos los patrones de recargas de las permutaciones N x M correspondientes.
- Evaluar con el código PRESTO los candidatos de patrones de recarga generados y seleccionar el cuadrante con mejores perspectivas de acuerdo a las metas establecidas de márgenes de seguridad y longitud de ciclo.
- Formar una malla fina de mayor detalle dentro del cuadrante seleccionado y repetir el procedimiento hasta alcanzar el mejor patrón de recarga.

En esta tesis solo se presentan los resultados usando la técnica de búsqueda por escalamiento de malla.

Las mejores recargas alcanzadas con el Método Biparamétrico Modificado cuando se compararon los márgenes de seguridad y extensiones de ciclo con las correspondientes de la recarga oficial indican que se había logrado obtener una excelente recarga. El método, aún cuando es del tipo de búsqueda, resulta lo suficientemente rápido y práctico para ser usado en la generación de candidatos de patrones de recarga.

6.1 Método Biparamétrico de Burte

En este apartado se proporciona un resumen del desarrollo del Método Biparamétrico de Búsqueda de Patrones de Recarga que presentó D.P. Burte en la Referencia 2.

La optimización del patrón de barras involucra decidir qué función objeto se va a extremizar y qué constricciones se van a considerar. La finalidad es: la utilización eficiente del combustible y la reducción de la fluencia en la vasija del reactor.

Los candidatos tradicionales para función objeto son;

- la minimización del enriquecimiento,
- la minimización del escape de neutrones (LLL),
- la maximización de la energía del ciclo,
- la maximización de la Keff en el EOC,
- la maximización del quemado de descarga,
- la minimización del pico de potencia Haling.

Diferentes autores han demostrado que la extremización de estas funciones objeto son mutuamente consistentes, es decir, al cumplirse una se cumplen las demás, excepto la minimización del pico de potencia. Se tiene, por lo tanto, un problema de optimización. Es posible establecer varios esquemas de optimización pero el más práctico para el presente estudio es el siguiente:

- Constreñir el pico de potencia Haling,
- Maximizar la Keff EOC Haling (función objeto),
- Las variables de decisión son los n ensambles combustibles del núcleo.

Como ejemplo, suponiendo que en la recarga de un núcleo consista de r combustibles frescos, el número de valores de las variables de decisión sería de $n!/r!$, por lo que es indispensable reducir el número de las variables de decisión.

El reto es reducir el número de las variables de decisión sin comprometer la complejidad del problema de optimización de las recargas de combustible.

Las guías tradicionales para la optimización de las recargas tomadas en cuenta en el Método Biparamétrico de Burte (MBB) son:

- baja fuga radial (LLL),
- máxima dispersión de combustibles y aplanamiento radial de la potencia.

Estas se traducen en las reglas siguientes:

- Los combustibles frescos deben de alejarse de la periferia del núcleo.
- La zona periférica del núcleo deberá ser ocupada preferentemente por combustibles de alto quemado.
- Dividir la carga de combustibles en dos categorías: frescos y parcialmente quemados,

- colocar combustibles frescos en las posiciones "blancas" y los parcialmente quemados en las posiciones "negras" de un tablero de ajedrez en que supuestamente se divide el núcleo del reactor (ESQUEMA DE TABLERO DE AJEDREZ).

Existen dos formas extremas de colocar el vector de combustibles de recarga ordenados de menos a más quemados (o de más a menos reactividad):

ESQUEMA OUT-IN: el vector de combustibles se coloca secuencialmente de la periferia hacia el centro del núcleo. Esto tiene las siguientes implicaciones:

- La potencia radial tiende a aplanarse
 - Baja energía del ciclo, la mínima de todas las posibles cargas dado un vector de combustible.
 - Alta fluencia sobre la vasija del reactor.
- **ESQUEMA IN-OUT:** el vector de combustibles se coloca secuencialmente partiendo del centro hacia la periferia del núcleo. Esto tiene las siguientes implicaciones:
 - Gran pico de potencia en el centro del núcleo, el máximo pico de todas las cargas posibles dado un vector de combustibles.
 - Alta energía del ciclo, la máxima energía de todas las posibles cargas dado un vector de combustibles.
 - Mínima fluencia sobre la vasija del reactor.

El método de Burte propone un esquema intermedio:

- **ESQUEMA OUT-IN/IN-OUT:** dividir el núcleo en una región central y otra periférica, colocar los combustibles secuencialmente comenzando en la parte más periférica de la región central y llenar hacia el centro. De ahí brincar a la región periférica iniciando en las posiciones más cercanas al centro y terminar la colocación en los canales más periféricos del núcleo. Esto produce las consecuencias siguientes:
 - La potencia radial tiende a aplanarse en el centro y a decaer rápidamente en la periferia, el pico de potencia radial tiende a estar en la frontera entre la región central OUT-IN y la región periférica IN-OUT.
 - Media energía del ciclo, en comparación con los dos esquemas anteriores.

- Media fluencia sobre la vasija del reactor, en comparación con los dos esquemas anteriores.

Ahora se examinarán las coordenadas y simetrías del núcleo involucradas en la optimización de recargas.

- COORDENADA RADIAL Es la coordenada más relevante para la distribución de la exposición de las recargas. Puesto que los núcleos de los reactores sólo son aproximadamente cilíndricos la importancia de una posición no depende únicamente de la distancia al centro del núcleo sino también de la distancia a la periferia. Con el fin de determinar la importancia de las posiciones en el núcleo BURTE propone:
 - La importancia de las posiciones de los combustibles en el núcleo se determina calculando la distribución de potencia de un núcleo cargado con combustibles idénticos por medio de un simulador de núcleos.
- COORDENADA Z (AXIAL) Puesto que axialmente los combustibles no pueden ser intercambiados axialmente esta coordenada puede ser ignorada en los cálculos de optimización de recargas.
- COORDENADA ANGULO AZIMUTAL Se recomienda que las propiedades de los combustibles en los núcleos sean lo más simétricos posible respecto al ángulo azimutal. Esto para evitar picos de potencia indeseables y para simplificar los cálculos.

Tradicionalmente para asegurar la simetría azimutal se recurre a núcleos simétricos de un cuarto de núcleo. Esta estrategia además reduce el número de variables de decisión a una cuarta parte siempre. La técnica de simetría exige que sistemáticamente los sublotos de cuatro combustibles simétricos siempre se coloquen en posiciones simétricas durante los ciclos de exposición del sublote y que los patrones de operación de las barras de control sean a su vez simétricos.

Los reactores de Laguna Verde, que tienen en el centro del núcleo una barra de control, se operan bajo la estrategia de simetría de espejo o reflectiva de un cuarto de núcleo o simetría de cuadrante (QSC, Quadrant Symmetric Cores), ver Fig 1.2 Esto tiene dos consecuencias:

- La simetría de espejo obliga que combustibles adjuntos sean semejantes, reduciendo la posibilidad de dispersión y de lograr una mayor uniformidad en la simetría angular azimutal. En el centro del núcleo los combustibles frescos están demasiado cerrados esto produce un pico en la distribución radial Haling. Lo que evita el poder colocar combustibles frescos cerca del centro del núcleo y ya que el concepto LLL evita que combustibles frescos se coloquen en la periferia esto obligaría dividir el núcleo en tres regiones (central,

anular, periférica) aumentando las variables de decisión respecto al Esquema OUT-IN/IN-OUT (central, periférico).

- Lo anterior viola las reglas del arreglo de tablero de ajedrez.

Burte propone el uso de simetría SSC (Sector Symmetric Core) o de simetría sectorial del núcleo (ver, Fig. 6.1) el cual tiene las siguientes ventajas sobre la simetría QSC:

- Una mayor uniformidad en la simetría angular azimutal ya que, por ejemplo, permite que los cuatro combustibles del centro del núcleo sean dos frescos y dos parcialmente quemados.
- Es posible dividir el núcleo en dos regiones central y periférica de acuerdo al Esquema OUT-IN/IN-OUT reduciendo sustancialmente las variables de decisión.
- Permite en forma natural el uso de arreglos de núcleo del tipo de tablero de ajedrez.

El procedimiento de búsqueda de recargas biparamétrica de recarga de BURTE consiste en lo siguiente:

Reglas de asignación de categorías a las localidades del núcleo.

- 1- Se sectoriza el núcleo de acuerdo a la simetría sectorial del núcleo SSC y se trabaja sólo con el cuarto de núcleo seleccionado.
- 2- Se divide el núcleo en dos regiones: la periférica y la no-periférica.
- 3- La región no-periférica de L localidades se arregla en forma de tablero de ajedrez donde $L/2$ localidades se categorizan como Blancas y $L/2$ como Negras.
- 4- A la región periférica, por completés, se le da la categoría de localidades Grises.

El total de los $L/2$ combustibles frescos que forman la recarga son puestos en las casillas Blancas, el resto es llenado con combustibles de la categoría parcialmente quemada.

- 5- A cada localidad del núcleo se le asigna un número consecutivo de importancia obtenido al simular un núcleo con idénticos combustibles. Al canal con mayor potencia se le asigna el número 1, al siguiente de mayor potencia el número 2 y así sucesivamente hasta completar todo el núcleo.

Reglas de colocación de los combustibles de recarga:

- 6- El vector de los combustibles de recarga son ordenados de menos a más quemados.
- 7- Los n combustibles de la recarga se dividen en dos categorías; $L/2$ son combustibles frescos y el resto $n - L/2$ son parcialmente quemado.
- 8- Se forma el Patrón Básico de Recarga:
 - 8.1- los combustible frescos se colocan en las localidades Blancas,
 - 8.2- las localidades Grises (en esquema IN-OUT en el Patrón Básico) son llenados con los combustibles parcialmente gastados. El ensamble combustible parcialmente quemado con número de orden mayor colocarlo en la localidad Gris de menor importancia, el segundo ensamble combustible de mayor número de orden se coloca en la localidad Gris siguiente de menor importancia y así sucesivamente hasta agotar las localidades Grises.
 - 8.3- las localidades Negras (en esquema OUT-IN en el patrón básico) son llenadas con los combustibles parcialmente gastados. El ensamble combustible parcialmente quemado con número de orden menor colocarlo en la localidad Negra de menor importancia, el segundo ensamble combustible de menor número de orden se coloca en la localidad Negra siguiente de menor importancia y así sucesivamente hasta agotar las localidades Negras.
- 9- Para formar candidatos de patrones de recarga a partir del Patrón Básico se definen dos parámetros N y M que modifique el orden en el vector de recarga de la forma siguiente:
 - 9.1- tomar un sector (S_1) de N ensambles combustibles empezando en el ensamble de número secuencial $L-M+1$ hasta el $L-M+N+1$, extraerlo, empujar hacia arriba los siguientes M ensambles combustibles y en el espacio que se produce introducir los N ensambles del sector S_1 .
 - 9.2- Mapear el combustible con el vector de recarga modificado de la forma descrita en los pasos 8.1, 8.2 y 8.3.
- 10- Generar candidatos de patrones de recarga variando M y N (exhaustiva o por búsqueda sistemática) hasta alcanzar el patrón de recargas que cumpla con las exigencias y expectativas deseadas.

Ahora las variables de decisión son N y M . Considerando n combustibles en el sector SSC seleccionado de los cuales r son combustibles frescos, entonces el número de patrones de recarga del método biparamétrico de Burte vendría dado por las permutaciones de

los valores que pueden tomar N y M , no considerando los valores triviales de 0 para N y M que conducen a la recarga básica. Al analizar se encuentra que M puede tomar valores de 1 a r mientras que N de 1 a $(n-2r)$ por lo que el número de patrones de recarga generados por el Método Biparamétrico de Burte será de $r(n-r)$, número significativamente menor a $n!/r!$

En general $r(n-r)$ es lo suficientemente bajo como para efectuar una búsqueda exhaustiva para encontrar el patrón de recarga óptimo (biparamétrico).

El procedimiento para la obtención del patrón de recarga óptimo biparamétrico de Burte (exhaustivo) es el siguiente:

- Generar todos los patrones de recarga empleando el Método Biparamétrico de Burte.
- Simular con un sistema de programas de cómputo apropiado, cada uno de los patrones de recargas y determinar el pico de potencia radial Haling y la longitud de ciclo al EOC correspondientes.
- Seleccionar el mejor patrón de recarga que satisfaga las restricciones al pico de potencia radial y tenga la longitud de ciclo máximo.

Existe una forma alternativa para encontrar un candidato de recarga de combustible "óptimo". Este consiste en determinar el comportamiento de las recargas al variar los parámetros N y M . Burte desarrolló algoritmos de búsqueda de patrón de recarga "óptimo" fundados en las siguientes observaciones obtenidas de los estudios exhaustivos:

- Cuando M se incrementa, el factor de pico de potencia radial Haling pasa a través de su valor mínimo para grandes valores de M .
- La energía del ciclo se reduce monotónicamente con M así como también con N .

Burte extendió su método a sistemas de búsqueda multiparamétrica el cual utilizó para generar algoritmos de búsqueda multiparamétrica y con estos evaluar el método biparamétrico. Encontró que los patrones óptimos biparamétricos están muy cercanos a los óptimos multiparamétricos. Para fines prácticos es suficiente el uso de algoritmos biparamétricos para la obtención de recargas cercanas al óptimo total.

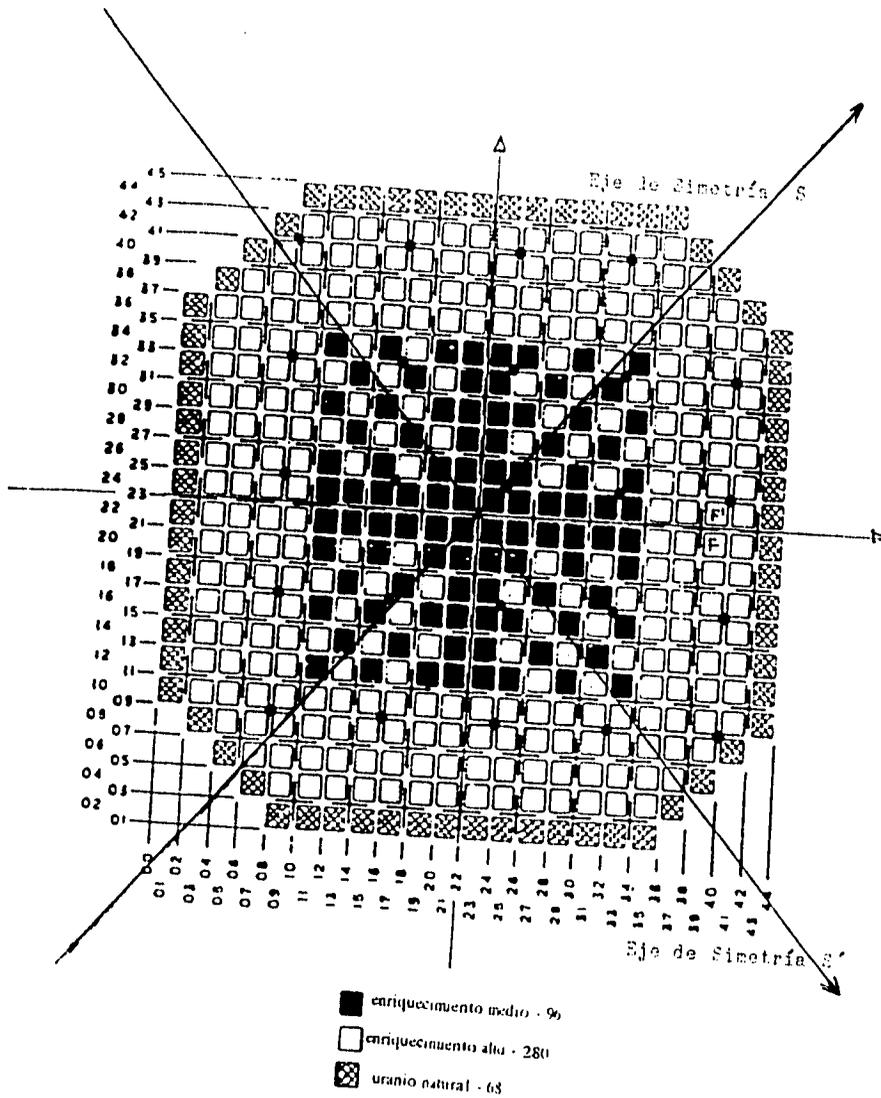


Figura 6.1 Arreglo del núcleo del reactor BWR de la CNLV, núcleo con simetría sectorial 1/4 (SSC).

6.2 Método Biparamétrico Adaptado (MBA) a la CNLV.

La aplicación directa del Método Biparamétrico de Burte a la búsqueda de patrones de recarga para la CNLV no es viable principalmente por las razones siguientes:

- Los núcleos de los reactores de la CNLV funcionan bajo el sistema de simetría de cuadrante QSC. El cambio a la simetría sectorial implicaría realizar una serie de estudios para ver la factibilidad y conveniencia de poder llevar a cabo el cambio de simetría. Por lo pronto se impone que los núcleos de los reactores de la CNLV operen bajo simetría de cuadrante.
- Los reactores de la CNLV están operando bajo el concepto de control CCC que exige combustibles poco reactivos y prohíbe la colocación de combustibles fresco o de alta reactividad parcialmente quemados en los canales adjuntos a una barra de control del grupo A2 (ver apartado 3.2.4).

El número de combustibles del núcleo de los reactores de la CNLV es mayor que los del reactor de Tarapur (444 contra 284)

Las dos primeras consideraciones rompen con el concepto de tablero de ajedrez impuesto en la región no periférica en el procedimiento de Burte.

El tercer punto, como se concluye en el siguiente apartado, no permite contar con un Patrón Básico adecuado para el Ciclo 4 de la Unidad 1 de la CNLV. El patrón básico resulta menos reactivo que el patrón de recarga óptimo y es necesario lo inverso para el funcionamiento del Método Biparamétrico de Burte.

Con el fin de adaptar el método a la CNLV en general y en particular al Ciclo 4 de la Unidad 1 se desarrolló el Método Biparamétrico Adaptado el cual establece:

Reglas de asignación de categorías a las localidades del núcleo.

- 1- Se parte el núcleo en cuatro cuadrantes de acuerdo a la simetría QSC y se trabaja sólo con el cuarto de núcleo seleccionado. (111 localidades)
- 2- Se divide el núcleo en dos regiones: la periférica y la no-periférica tal como se propuso en el apartado 3.2.9 y se muestra en la Figura A.1 del Apéndice A.
- 3- La región no-periférica de L de (90) localidades se arregla en forma que recuerdan un tablero de ajedrez donde (46), más o menos la mitad, se catalogan como localidades Blancas y el resto (44) como localidades Negras tal como se muestra en la Figura A.1 del Apéndice A. Las localidades Blancas se

subdividen en dos: las pertenecientes a celdas CCC centrales o no pertenecientes a celdas CCC centrales.

- 4- A la región periférica, por completés, se le da la categoría de localidades Grises (21 localidades).
- 5- A cada localidad del núcleo se le asigna un número consecutivo de importancia obtenido al simular un núcleo con idénticos combustibles. Al canal con mayor potencia se le asigna el número 1, al siguiente de mayor potencia el número 2 y así sucesivamente hasta completar todo el núcleo.

Reglas de colocación de los combustibles de recarga

- 6- El vector de los combustibles de recarga son ordenados de menos a más quemados.
- 7- Los n (111) combustibles de la recarga se dividen en dos categorías: (26) son combustibles frescos y el resto (85) son parcialmente quemados.
- 8- Se forma el Patrón Básico de Recarga:

8.1- las localidades Blancas se llenan como sigue;

- los ensambles combustibles frescos (26) son colocados en las localidades no CCC centrales procurando conservar una simetría de 1/8.
- los ensambles de los menos reactivos en las localidades CCC centrales,
- el resto de las localidades Blancas se llenan con los ensambles combustibles más reactivos de los parcialmente quemados.
- formar un patrón de recarga de las localidades blancas el cual quedará fija durante la búsqueda.

8.2- las localidades Grises (en esquema IN-OUT en el Patrón Básico) son llenados con los combustibles parcialmente gastados restantes. El ensamble combustible parcialmente quemado con número de orden mayor se colocará en la localidad Gris de menor importancia, el segundo ensamble combustible de mayor número de orden se coloca en la localidad Gris siguiente de menor importancia y así sucesivamente hasta agotar las localidades Grises.

8.3- las localidades Negras (en esquema OUT-IN en el patrón básico) son llenadas con los combustibles parcialmente gastados que restan en el vector de recarga. El ensamble combustible parcialmente quemado con número de orden

menor se coloca en la localidad Negra de menor importancia, el segundo ensamble combustible de menor número de orden se coloca en la localidad Negra siguiente de menor importancia y así sucesivamente hasta agotar las localidades Negras.

- 9- Para formar candidatos de patrones de recarga a partir del Patrón Básico se definen dos parámetros N y M que modifiquen el orden en el vector de recarga de la forma siguiente:
 - 9.1- tomar un sector (S1) de N ensambles combustibles empezando en el ensamble de número secuencial L-M+1 hasta el L-M+N+1 extraerlo, empujar hacia arriba los siguientes M ensambles combustibles y en el espacio que dejan introducir los N ensambles del sector S1.
 - 9.2- Mapear el combustible con el vector de recarga modificado de la forma descrita en los pasos 8.1, 8.2 y 8.3.
- 10- Generar candidatos de patrones de recarga variando M y N (exhaustiva o por búsqueda sistemática) hasta alcanzar el patrón de recargas que cumpla con las exigencias y expectativas deseadas.

A diferencia del método original donde el patrón de combustibles de las localidades Blancas es único en el Método Biparamétrico Adaptado esto ya no se cumple. Existen por lo menos $P!/r!$ patrones blancos diferentes donde P es el número de localidades blancas no CCC centrales, menos el número r de combustibles frescos. Esto obviamente rompe la filosofía fundamental del Método de Burte y abre todo un capítulo de investigación para intentar abordar correctamente el problema. En la tesis se evita el problema al sólo considerar dos patrones de la localidades Blancas para el Ciclo 4:

- La primera consiste en tomar la colocación de ensambles combustibles de la recarga oficial correspondientes a las localidades Blancas del MBA.
- La segunda es una modificación de la anterior que resulta en un patrón de localidades Blancas MBA un poco más reactiva.

La diversidad en los patrones de combustible debida a la forma de llenar las localidades blancas si bien complica, por un lado, la posibilidad de encontrar el patrón de recarga "óptimo", por otro lado, amplía la posibilidad de poder alcanzar patrones de recarga con longitudes de ciclo significativamente más extensos que aquéllos logrados por los métodos tradicionales.

Con el fin de obtener el número de importancia de cada uno de los canales en un cuarto de núcleo y como se estipula en el paso 5 del procedimiento MBA se llevó a cabo una ejecución del código PRESTO con un un núcleo cargado con un sólo tipo de combustible (GE9B)

bajo las condiciones siguientes:

- El banco de datos usado en la ejecución de PRESTO conteniendo el tipos de combustibles GE9B fue el L1F106_M (Ref. 11).
- El archivo básico de PRESTO con la información sobre las condiciones de operación del reactor de la Unidad 1 fue el PBHCHH01.C4 (Ref. 15).
- Se corrió un caso de 1/4 de núcleo, el nombre de la ejecución PRESTO fue 1PAHH03.

Los resultados obtenidos de la potencia relativa por canal son mostrados en el MAPA de la Fig. 6.2 junto con los números de importancia asignados a cada canal. Puesto que no se admitió asignar número de importancias iguales a dos o más canales fue necesario, para los casos en que se obtuvieron igual potencia en dos canales diferentes, romper artificialmente estos empates. Se procuró distribuir los números de importancia desempataados de forma tal de evitar producir concentraciones locales. Los empates fueron frecuentes debido a la simetría de 1/8 implícita de la recarga.

Para terminar, tomando en consideración las prácticas vigentes en el ININ y las facilidades de cálculo con los que se cuenta el procedimiento de búsqueda del patrón de recarga óptima biparamétrica que establecemos para el Método Biparamétrico Adaptado es el siguiente:

- Generar patrones de recarga en una malla bidimensional amplia de valores de N y M que emplean el Método Biparamétrico Adaptado.
- Simular con el programa PRESTO cada uno de los patrones de recargas bajo la opción Haling EOC con longitud de ciclo fijo de 8046 MWD/T (longitud del ciclo oficial) y determinar el valor MCPR y MLHGR (ver apartado 3.2.1) y Keff Haling EOC.
- Seleccionar el mejor patrón de recarga que tenga los mayores márgenes de seguridad respecto a los límites de los parámetros MCPR y MLHGR y se obtenga el valor de Keff Haling EOC máxima.
- Para que un candidato patrón de carga sea mejor que el patrón de carga oficial se establece que:
 - en el BOC la Keff sea igual o menor que 1.0078
 - en el BOC el MCPR mayor o igual que 1.6217 y
 - en el BOC el MLHGR menor igual a 453.44 w/cm,
 - en el EOC la keff sea mayor o igual a 0.9940
 - en el EOC el MCPR mayor o igual, y 1.5269
 - en el EOC el MLHGR sea menor o igual 375.58 w/cm.

HAPA POTENCIAS RELATIVAS y NUMERO DE IMPORTANCIA
 CUARTO DE NUCLEO REACTOR HOMOGENEO

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.439 1	1.433 2	1.416 6	1.391 11	1.358 16	1.307 25	1.237 34	1.137 47	1.000 60	0.805 76	0.520 96
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1.431 3	1.424 4	1.410 7	1.386 12	1.348 19	1.298 28	1.227 37	1.130 50	0.994 63	0.799 79	0.511 97
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
1.418 5	1.408 8	1.394 9	1.369 15	1.335 21	1.284 29	1.211 41	1.113 51	0.978 67	0.783 80	0.508 100
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
1.393 10	1.384 13	1.371 14	1.345 20	1.308 33	1.256 42	1.186 55	1.086 68	0.950 84	0.759 94	0.480 101
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
1.356 17	1.350 18	1.333 22	1.310 23	1.271 31	1.220 38	1.145 46	1.047 58	0.911 71	0.728 88	0.451 104
56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
1.306 26	1.300 27	1.282 30	1.258 32	1.218 39	1.164 44	1.090 54	0.986 64	0.848 75	0.656 89	0.398 109
67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
1.235 35	1.229 36	1.213 40	1.184 43	1.147 45	1.088 53	1.018 59	0.908 72	0.752 85	0.559 93	0.339 110
78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	
1.138 48	1.129 49	1.115 52	1.088 54	1.045 57	0.988 65	0.902 73	0.779 82	0.613 92	0.425 106	
88	89	90	91	92	93	94	95	96		
1.001 61	0.992 62	0.974 66	0.952 69	0.909 70	0.846 74	0.754 86	0.611 91	0.448 105		
97	98	99	100	101	102	103	104			
0.806 77	0.798 78	0.784 81	0.758 83	0.719 87	0.558 90	0.560 94	0.426 107			
105	106	107	108	109	110	111				
0.519 95	0.512 98	0.499 99	0.481 102	0.450 103	0.396 108	0.340 111	<- POTENCIA RELATIVA <- NUMERO DE IMPORTANCIA			

Figura 6.2

Hapa de las potencias relativas y número de importancia núcleo homogéneo

6.2.1 Aplicación del Método Biparamétrico Adaptado al Ciclo 4 de la Unidad 1

Todas las corridas de este estudio fueron realizadas en el sistema de cómputo de la Gerencia de Sistemas Nucleares del ININ, en particular las ejecuciones del programa PRESTO se llevaron a cabo en el sistema VAX-3100 de la Gerencia.

Para realizar el estudio de aplicar el Método Biparamétrico de Burte se creó un programa en lenguaje Quick-basic que se llamó MAPATES. Este programa permite generar patrones de recarga bajo el procedimiento biparamétrico para diferentes valores de los parámetros N y M. El programa forma archivos de salida con los datos de las recargas con el formato de las tarjetas 330000 (véase Ref. 7) adecuadas para ser leídas por el programa PRESTO. En el programa MAPATES se introdujeron los datos del mapa de la Figura 6.2 comentada en el apartado anterior. Con estos datos se desarrolló en MAPATES un evaluador rápido de la Keff global de una recarga dada al inicio del ciclo (BOC). Esta evaluación de Keff se calcula integrando los valores de Keff asociados a cada uno de los combustibles de recarga pesado por la potencia relativa normalizada asociada al canal donde fue colocado cada uno de los combustibles, dividido por el número de canales considerados tal que:

Sea $Keff_E$ la constante de multiplicación efectiva al inicio del ciclo de evaluación rápido:

$$Keff_E = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot Keff_i}{n} \quad [Ec. 6.1]$$

Donde:

n = número de canales en 1/4 de núcleo = 111

P_i = potencia relativa en el canal i del núcleo

$Keff_i$ = Const. de Mult. Effect. del combustible colocado en el canal i del núcleo.

Las potencias normalizadas de los canales simplemente son aquéllas que se obtuvieron al simular un núcleo con sólo combustibles idénticos. Para mayor información sobre el programa MAPATES consultar el Apéndice C.

En la Tabla 6.1 se proporcionan para un cuarto de núcleo el estado de quemado y la Keff de cada uno de los ensambles combustibles que constituyen el vector de carga del combustible del Ciclo 4. En los mapas de la Figura 6.3 se proporcionan los principales datos relacionados con el patrón de recargas OFICIAL del Ciclo 4. Los resultados de los cálculos de simulación del ciclo con el código PRESTO de la recarga OFICIAL se usaran como referencia para la evaluación de las recargas generadas con los diferentes, métodos biparamétricos que en los próximos apartados se estudiarán.

TABLA 6.1
VECTOR DE CARGA DE COMBUSTIBLE CICLO 4

No.	Ment. PRESTO	Keff	Espec. (Mwd/T)	No.	Ment. PRESTO	Keff	Espec. (Mwd/T)	No.	Ment. PRESTO	Keff	Espec. (Mwd/T)
1	30382	0.90593	24405.79	41	73264	0.98788	0	81	51171	1.00965	16681.62
2	20368	0.90883	19621.30	42	73260	0.98788	0	82	51173	1.00989	16652.81
3	20288	0.90911	19606.54	43	73256	0.98788	0	83	42318	1.08709	13472.33
4	20333	0.90997	19455.13	44	73252	0.98788	0	84	42326	1.08789	13363.73
5	20294	0.91017	19429.82	45	73248	0.98788	0	83	42310	1.08803	13354.25
6	20303	0.91055	23807.73	46	73244	0.98788	0	86	42330	1.0907	13126.99
7	20394	0.91076	23782.56	47	73240	0.98788	0	87	42322	1.09085	13115.63
8	20427	0.91078	23707.28	48	73236	0.98788	0	88	42302	1.10116	11961.28
9	20461	0.91093	23685.17	49	73232	0.98788	0	89	42314	1.10712	11348.4
10	20473	0.91212	23938.51	50	73228	0.98788	0	90	42298	1.10731	11327.46
11	20556	0.91277	23866.57	51	73224	0.98788	0	91	62402	1.11841	14172.19
12	20281	0.91405	18930.63	52	73220	0.98788	0	92	62370	1.11842	14151.62
13	20364	0.91452	18881.92	53	73216	0.98788	0	93	62386	1.11844	14146.22
14	20422	0.91646	23953.05	54	73212	0.98788	0	94	62398	1.11893	14107.88
15	20494	0.91726	23117.22	55	73208	0.98788	0	95	62378	1.11901	14104.24
16	20641	0.91782	23080.24	56	73204	0.98788	0	96	62382	1.11958	13987.02
17	20365	0.91861	18405.89	57	73200	0.98788	0	97	62350	1.11964	13981.66
18	20277	0.91921	18290.58	58	41247	1.00339	21718.07	98	42306	1.11973	9992.818
19	20385	0.92044	23428.11	59	41259	1.00342	21718.91	99	42294	1.11989	9987.039
20	20350	0.92056	18155.37	60	41233	1.00763	21193.36	100	62362	1.1208	13884.14

TABLA 6.1
(continuación)

No.	Ident. PRESTO	Keff	Expans. (Mwd/T)	No.	Ident. PRESTO	Keff	Expans. (Mwd/T)	No.	Ident. PRESTO	Keff	Expans. (Mwd/T)
21	30634	0.92968	23410.71	61	41243	1.00783	21168.35	101	62374	1.12083	13879.32
22	20322	0.92094	18161.45	62	83003	1.02535	0	102	62406	1.12294	13652.5
23	30512	0.92408	22864.88	63	91749	1.03076	0	103	62354	1.12314	13631.53
24	30629	0.92059	22181.57	64	51183	1.03587	20313.29	104	62394	1.12206	13187.12
25	30401	0.93157	21007.74	65	41227	1.03784	17868.11	105	62342	1.12223	13166.71
26	30447	0.93159	21003.37	66	41215	1.03798	17716.07	106	62346	1.12254	13189.24
27	30632	0.93601	21413.45	67	31199	1.0394	19953.17	107	62366	1.12234	13176.58
28	20312	0.92555	13158.65	68	51187	1.0396	19929.4	108	62338	1.12699	12107.86
29	20303	0.92636	13261.08	69	41239	1.04257	17294.92	109	62338	1.12704	12099.3
30	20347	0.92702	13133.59	70	41255	1.0431	17237.72	110	62380	1.13038	10514.53
31	20360	0.92755	13100.07	71	51191	1.04327	19524.67	111	62334	1.13078	10473.27
32	20338	0.92823	13031.72	72	51207	1.04329	19521.87				
33	20286	0.92844	13054.38	73	41251	1.04584	16984.11				
34	71292	0.98788	0	74	41223	1.0307	16446.82				
35	73268	0.98788	0	75	41219	1.0349	16018.72				
36	73264	0.98788	0	76	41231	1.03566	15949.22				
37	73280	0.98788	0	77	51211	1.03852	17878.79				
38	73276	0.98788	0	78	51179	1.03875	17854.52				
39	73272	0.98788	0	79	51207	1.06919	16728.91				
40	73268	0.98788	0	80	51195	1.06953	16685.96				

MAPAS CUARTO DE NUCLEO
CARGA OFICIAL

***** CAMBIOS: Sin Intercambios EVA(Diseño/Oficial)= .9975064

Carga OFICIAL	IV	CUADRANTE	Identificadores de	Combustibles	PRESTO						
{23}	{25}	{27}	{29}	{31}	{33}	{35}	{37}	{39}	{41}	{43}	
{22}	30473	42326	73292	41227	51203	42306	73288	41235	51211	62366	30422
{20}	42310	20305	51207	73284	41259	73280	30641	73276	42314	62378	20288
{18}	73272	51191	73268	42330	73264	62398	73260	41239	73256	62394	20281
{16}	41215	73252	42322	20332	30447	73248	62386	20338	51195	62358	20333
{14}	51171	41247	73244	30401	51183	42318	73240	51199	41223	62406	20365
{12}	42294	73236	62350	73232	42302	73228	41219	73224	20286	62374	30585
{10}	73220	30427	73216	62402	73212	41231	30382	62390	83003	30556	20322
{08}	41243	73208	41255	20347	51187	73204	62334	62370	30461	30632	
{06}	51179	42298	73200	51175	41251	20360	93749	30394	30404		
{04}	62366	62382	62342	62338	62354	62362	30503	30629			
{02}	30634	20368	20364	20294	20277	30512	20350				

Carga OFICIAL	IV	CUADRANTE	Constante de	Multiplicacion	Infinita(Kinf)						
{23}	{25}	{27}	{29}	{31}	{33}	{35}	{37}	{39}	{41}	{43}	
{22}	91226	1.0880	1.19	1.0371	1.0693	1.1198	1.19	1.0077	1.0586	1.1274	.9166
{20}	1.0881	.99084	1.0434	1.19	1.0035	1.19	.91796	1.19	1.1072	1.1191	.90923
{18}	1.19	1.0434	1.19	1.0908	1.19	1.1190	1.19	1.0427	1.19	1.1272	.91418
{16}	1.0381	1.19	1.0909	.99265	.93171	1.19	1.1185	.99083	1.0696	1.1371	.91009
{14}	1.0697	1.0035	1.19	.93171	1.0360	1.0872	1.19	1.0395	1.0508	1.1230	.91873
{12}	1.1200	1.19	1.1197	1.19	1.1012	1.19	1.0550	1.19	.99378	1.1209	.92058
{10}	1.19	.91092	1.19	1.1185	1.19	1.0557	.90609	1.1505	1.19	.91291	.92106
{08}	1.0079	1.19	1.0432	.99459	1.0397	1.19	1.1509	1.1185	.91107	.93615	
{06}	1.0588	1.1074	1.19	1.0700	1.0459	.99378	1.19	.9109	.9174		
{04}	1.1273	1.1197	1.1273	1.1371	1.1232	1.1209	.91069	.93073			
{02}	.92082	.90879	.91465	.9103	.91933	.92422	.92068				

Carga OFICIAL	IV	CUADRANTE	Quemado por	combustible en	MUD/MT						
{23}	{25}	{27}	{29}	{31}	{33}	{35}	{37}	{39}	{41}	{43}	
{22}	23938	13364		17868	16729	9993	21193	17879	13177	23953	
{20}	13354	11889	19522		21717		23080		11348	14104	19606
{18}		19525		13127		14108		17295		13187	18951
{16}	17766		13116	11686	21003		14146	11890	16686	12099	19455
{14}	16682	21718		21008	20353	13472		19953	16447	13652	18406
{12}	9987		13982		11961		16019		11516	13879	23428
{10}		23707		14172		15949	24406	10515		23867	18161
{08}	21168		17238	11419	19929		10473	14152	23685	21413	
{06}	17855	11327		16653	16984	11516		23783	32117		
{04}	13189	13987	13167	12108	13632	13884	23808	22151			
{02}	23411	19621	18882	19430	18291	22965	18155				

Figura 6.3 Mapas de un cuarto de núcleo de la Carga de Combustible OFICIAL

6.2.2 Estudio A1

El programa MAPTES se ejecutó bajo las siguientes condiciones:

- 1- Se suministró el vector con los datos de los combustibles de recarga de un cuarto de núcleo correspondientes al ciclo 4 de la unidad 1 de acuerdo a las referencias 9, 10 y 11 (ver Tabla 6.1).
- 2- La formación de recargas realizadas por MAPATES fueron hechas de acuerdo al procedimiento para el MBA dado en el apartado 6.2
- 3- La carga en las posiciones de las localidades Blancas fue idéntica a la carga oficial del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV.
- 4- Se generaron, además de la recarga oficial, 25 patrones de recarga para una malla amplia de valores de los parámetros M y N. Los valores de la variable M fueron [1, 6, 11, 16 y 21] y para N [1, 6, 11, 16, 21]. La intención era formar una malla que cubriera el espacio de solución del movimiento de combustibles de la región gris del patrón básico hacia la región de localidades negras, el patrón de carga M=1, N=1 representa el patrón de recarga básico.
- 5- El archivo de salida del programa MAPATES conteniendo los datos esenciales de las 26 recargas en formato de tarjeta 330000 de PRESTO se denominó A1BOC.DDD para los casos BOC y A1EOC.DDD para los casos EOC.

El programa PRESTO fue ejecutado bajo las siguientes condiciones:

- 6- El banco de datos usado en la ejecución de PRESTO y conteniendo la información de todos los tipos de combustibles involucrados en el ciclo 4 de la unidad 1 fue el L1F106_M. (Ref. 11)
- 7- El archivo de reinicio PRESTO (conteniendo toda la información del estado de quemado de cada uno de los combustibles de la recarga) y que corresponde al seguimiento que se realiza con PRESTO de la operación de la unidad 1 de la CNLV hasta el ciclo 3 fue el L1PRE027.RST (Ref. 9).
- 8- El archivo básico de PRESTO con la información sobre las condiciones de operación del reactor de la Unidad 1 durante el ciclo 4 fue el PBHCHH01.C4 (Ref. 15).
- 9- Primero se ejecutó PRESTO bajo las condiciones BOC para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo

A1BOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PAHH4A1.

- 10- Segundo, se ejecutó PRESTO bajo la opción de simulación HALING EOC con una longitud de ciclo de 8046 MWD/MT para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo A1EOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PBHH4A1.

6.2.3 Resultados del estudio A1

En la Tabla 6.2 se consignan los valores de MCPR, MLHGR y Keff en el inicio de ciclo (BOC) y al final de ciclo (EOC) de cada uno de las 25 recargas generadas bajo el MBA junto con los datos del patrón de carga oficial del ciclo 4 que se usará como patrón de recarga de referencia. En la tabla con datos BOC también se consignan los valores del evaluador rápido Keff BOC integrado en el programa MAPATES (ver Ec.6.1).

En los mapas de la Figura 6.4.a se proporcionan los principales datos relacionados con el patrón básico del estudio A1.

En la Figura 6.4.b se muestra la gráfica de los MCPR contra los días a plena potencia del ciclo de las 25 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial.

En la Figura 6.4.c se muestra la gráfica de los MLHGR contra los días a plena potencia del ciclo de las 25 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial.

TABLA 6.2 ESTUDIO A1 DATOS BOC Y EOC

RESULTADOS DE IPAHHA1 Y IPBHHA1								
BOC IPAHHA1						EOC IPBHHA1		
M	N	Keff	Keff	MCPR	MLHGR	Keff	MCPR	MLHGR
		MAPANC	PRESTO			PRESTO		
OFICIAL			1.0078	1.6217	453	0.994	1.5269	375
1	1	0.997462	1.0075	1.7071	476	0.99361	1.5236	375
1	6	0.997427	1.0075	1.7066	476	0.99361	1.5284	375
1	11	0.997391	1.0074	1.7067	475	0.99361	1.5236	375
1	16	0.99736	1.0074	1.7067	475	0.99361	1.5236	375
1	21	0.997341	1.0074	1.7065	475	0.99361	1.5236	375
6	1	0.99705	1.0072	1.7037	477	0.99361	1.5236	375
6	6	0.996222	1.0068	1.7019	479	0.99361	1.5236	375
6	11	0.996054	1.0068	1.701	480	0.99361	1.5236	375
6	16	0.995813	1.0066	1.7018	482	0.99361	1.5236	375
6	21	0.995689	1.0065	1.7012	482	0.99361	1.5236	375
11	1	0.99679	1.0068	1.6983	480	0.9933	1.4817	376
11	6	0.993978	1.0046	1.6856	494	0.99336	1.4737	378
11	11	0.993008	1.004	1.6752	503	0.99336	1.4737	378
11	16	0.992638	1.0039	1.6734	503	0.99336	1.4737	378
11	21	0.9923	1.0037	1.6714	505	0.99336	1.4737	378
16	1	0.996756	1.0067	1.6993	479	0.9935	1.4817	376
16	6	0.992819	1.0032	1.6855	500	0.99344	1.4749	378
16	11	0.987854	1.001	1.6791	530	0.99326	1.3882	380
16	16	0.988722	1.0004	1.6653	535	0.99326	1.3882	380
16	21	0.989251	1.0001	1.6536	536	0.99326	1.3882	380
21	1	0.996625	1.0065	1.7032	478	0.9935	1.4817	376
21	6	0.992438	1.0027	1.6883	499	0.99344	1.4749	378
21	11	0.988447	0.99916	1.4408	542	0.99335	1.3888	381
21	16	0.985382	0.9966	1.6078	554	0.99336	1.3947	382
21	21	0.984135	0.99599	1.4615	558	0.99336	1.3947	382

FIGURA 6.4.a
MAPAS CUARTO DE NUCLEO
CARGA A1

***** CAMBIOS:Sin Intercambios EVA(Diseño/Oficial)= .9975064

Carga BASICA IV CUADRANTE Identificadores de Combustibles PRESTO

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
[22]	30473	30629	73292	20360	51203	51199	73288	42318	51211	62394	20277
[20]	30401	20305	30447	73284	41243	73280	51207	73276	62386	62378	20365
[18]	73272	30632	73268	41259	73264	41239	73260	42310	73256	62346	30422
[16]	20286	73252	41247	20332	41215	73248	51195	20338	62398	62358	20364
[14]	51171	41235	73244	41227	51183	41219	73240	42298	41223	62334	30461
[12]	51187	73236	41255	73232	41231	73228	42302	73224	62354	62374	20333
[10]	73220	51191	73216	51175	73212	42322	30382	42306	83003	30634	20288
[08]	42326	73208	42330	20347	42314	73204	42294	62370	20322	30394	
[06]	51179	62402	73200	62350	41251	62406	93749	30512	30427		
[04]	62342	62382	62366	62338	62390	62362	20350	30503			
[02]	30585	30641	30404	20281	30556	20294	20368				

Carga BASICA IV CUADRANTE Constante de Multiplicacion (nfnita(Kinf)(-Nuevo)

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
[22]	.91226	.93073	1.19	.99378	1.0693	1.0395	1.19	1.0872	1.0586	1.1272	.91933
[20]	.93171	.99084	.93171	1.19	1.0079	1.19	1.0434	1.19	1.1185	1.1191	.91873
[18]	1.19	.93615	1.19	1.0035	1.19	1.0427	1.19	1.0881	1.19	1.1273	.9166
[16]	.99378	1.19	1.0035	.99265	1.0381	1.19	1.0696	.99083	1.1190	1.1371	.91465
[14]	1.0697	1.0077	1.19	1.0371	1.0360	1.0550	1.19	1.1074	1.0508	1.1509	.91107
[12]	1.0397	1.19	1.0432	1.19	1.0557	1.19	1.1012	1.19	1.1232	1.1209	.91009
[10]	1.19	1.0434	1.19	1.0700	1.19	1.0909	.90609	1.1198	1.19	.92082	.90923
[08]	1.0880	1.19	1.0908	.99459	1.1072	1.19	1.1200	1.1185	.92106	.9109	
[06]	1.0588	1.1185	1.19	1.1197	1.0459	1.1230	1.19	.92422	.91092		
[04]	1.1273	1.1197	1.1274	1.1371	1.1505	1.1209	.92068	.91069			
[02]	.92058	.91796	.9174	.91418	.91291	.9103	.90879				

Carga BASICA IV CUADRANTE Quemado por combustible en MWD/MT(-Nuevo)

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
[22]	23938	22151		11516	16729	19953		13472	17879	13187	18291
[20]	21008	11889	21003		21168		19522		14146	14104	18406
[18]		21413		21717		17295		13354		13189	23953
[16]	11516		21718	11686	17766		16686	11890	14108	12099	18882
[14]	16682	21193		17868	20353	16019		11327	16447	10473	23685
[12]	19929		17238		15949		11961		13632	13879	19455
[10]		19525		16653		13116	24406	9993		23411	19606
[08]	13364		13127	11419	11348		9987	14152	18161	23783	
[06]	17855	14172		13982	16984	13652		22965	23707		
[04]	13167	13987	13177	12108	10515	13884	18155	23808			
[02]	23428	23080	32117	18951	23867	19430	19621				

Figura 6.4.a Mapas de la recarga básica del ESTDIO A1

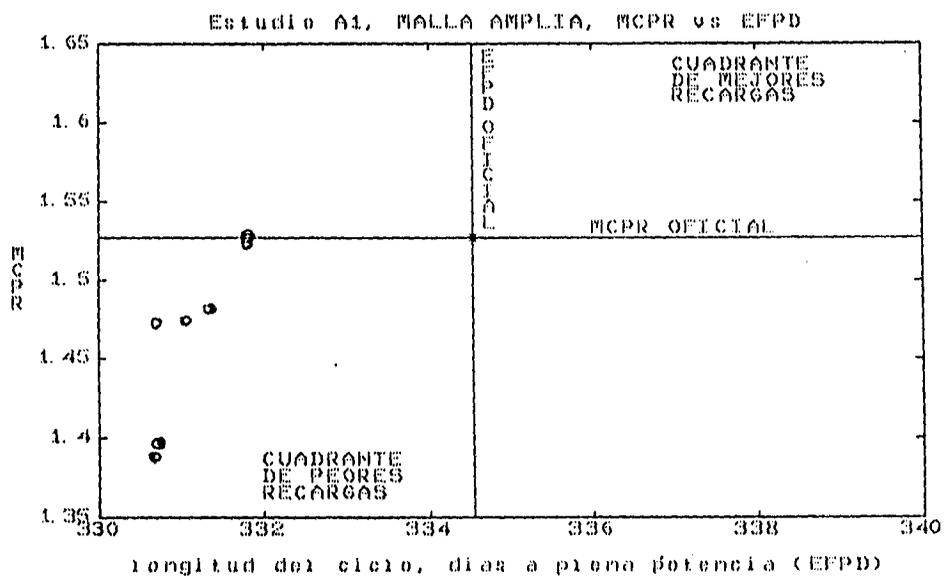


Figura 6.4.b MCPR de las recargas del estudio A1 contra la longitud del ciclo en días a plena potencia

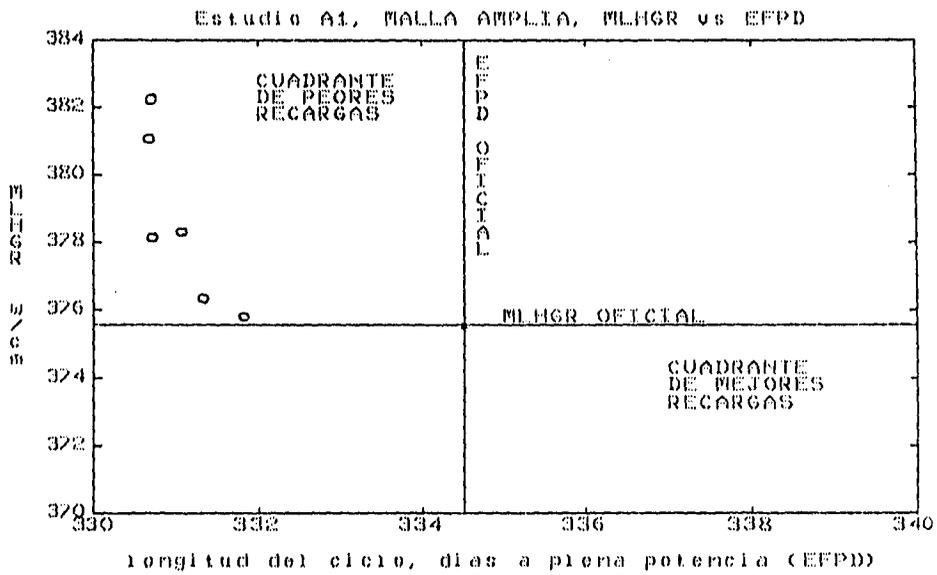


Figura 6.4.c MLHGR de las recargas del estudio A1 contra la longitud del ciclo en días a plena potencia

6.2.4 Análisis de los resultados del estudio A1 y conclusiones.

El examen de los resultados en el BOC, muestra que en todos las 25 recargas candidato se tiene:

- la Keff BOC es menor que el de la recarga oficial.
- el MCPR en el BOC es menor que aquél de la carga oficial por lo que el MCPR empeoró.
- el MLHGR BOC es mayor que aquél de la carga oficial por lo que el MLHGR empeoró.
- Al crecer M y N los datos en el BOC el MCPR y MLHGR empeora.

El examen de los resultados en el EOC, muestra que en todas las 25 recargas candidato se tiene:

- la Keff Haling EOC es menor que la de la recarga oficial por lo que la longitud de ciclo es baja.
- el MCPR en el Haling EOC es menor que aquel de la carga oficial por lo que el MCPR empeoró.
- el MLHGR en el Haling EOC es mayor que aquél de la carga oficial por lo que el MLHGR empeoró.
- Al crecer M y N los datos Haling de Keff, MCPR y MLHGR empeoran.

Aún cuando es posible que al detallar más la malla de los puntos N y M pudiesen surgir candidatos de patrones de carga que pudieran superar al patrón oficial esto se consideró muy improbable. Por lo que habría que realizar modificaciones al proceso con el fin de lograr mejoras en los resultados y ante esto se concluyó:

Es necesario modificar la asignación de los combustibles de las canales de categoría Blanca tendiendo a aumentar la reactividad global del núcleo.

Esto , se pensó, conduciría a obtener mejores resultados. El estudio siguiente nombrado BA se realizó en base a la conclusión anterior.

6.2.5 Estudio BA

Con el fin de aumentar la reactividad del núcleo se realizaron los siguientes intercambios de combustibles en el patrón básico:

- Se intercambiaron los combustibles de los canales: el 1 por el 85, el 73 por el 75 y el 13 por el 19.

El programa MAPATES se ejecutó bajo las siguientes condiciones:

- 1- Se suministró el vector con los datos de los combustibles de recarga de un cuarto de núcleo correspondientes al ciclo 4 de la unidad 1.
- 2- La formación de recargas realizadas por MAPATES fueron hechas de acuerdo al procedimiento para el MBA dado en el apartado 6.2 .
- 3- La carga en las posiciones de las localidades Blancas fue idéntica a la carga oficial del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV EXCEPTO QUE SE REALIZO SOBRE EL PATRON BASICO CON LOS SIGUIENTES INTERCAMBIOS; EL 1 POR EL 85, EL 73 POR EL 75 Y EL 13 POR EL 19.
- 4- Se generaron, además de la recarga oficial, 9 patrones de recarga para una malla amplia de valores de los parámetros M y N. Los valores de la variable M fueron [1, 11, y 21] y para N [1, 11, 21]. La intención era formar una malla que cubriera el espacio de solución del movimiento de combustibles de la región gris del patrón básico hacia la región de localidades negras, el patrón de carga M=1, N=1 representa el patrón de recarga básico.
- 5- El archivo de salida del programa MAPATES ,conteniendo los datos esenciales de las 10 recargas en formato de tarjeta 330000 de PRESTO se denominó BABOC.DDD para los casos BOC y BAEOC.DDD para los casos EOC.

El programa PRESTO fue ejecutado bajo las siguientes condiciones:

- 6- El banco de datos usado en la ejecución de PRESTO y conteniendo la información de todos los tipos de combustibles involucrados en el ciclo 4 de la unidad 1 fue el L1F106_M.
- 7- El archivo de reinicio PRESTO (conteniendo toda la información del estado de quemado de cada uno de los combustibles de la recarga) y que corresponde al seguimiento que se realiza con PRESTO de la operación de la unidad 1 de la CNLV hasta el ciclo 3 fue el L1PRE027.RST.

- 8- El archivo básico de PRESTO con la información sobre las condiciones de operación del reactor de la Unidad 1 durante el ciclo 4 fue el PBHCHH01.C4.
- 9- Primero se ejecutó PRESTO bajo las condiciones BOC para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo BABOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PAHH4BA.
- 10- Segundo, se ejecutó PRESTO bajo la opción de simulación HALING EOC con una longitud de ciclo de 8046 MWD/MT para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo BAEOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PBHH4BA.

6.2.6 Resultados estudio BA

En la tabla 6.3 se consignan los valores de MCPR, MLHGR y Keff en el inicio de ciclo BOC y al final de ciclo EOC respectivamente de cada uno de las 9 recargas generadas bajo el MBA junto con los datos del patrón de carga oficial del ciclo 4 que se usará como recarga de referencia. En la tabla con datos BOC también se consignan los valores del evaluador rápido Keff BOC integrado en el programa MAPATES.

En los mapas de la Figura 6.5.a se proporcionan los principales datos relacionados con el patrón básico del estudio BA.

En la Figura 6.5.b se muestra la gráfica de los MCPR contra los días a plena potencia del ciclo de las 9 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial.

En la Figura 6.5.c se muestra la gráfica de los MLHGR contra los días a plena potencia del ciclo de las 9 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial.

TABLA 6.3
ESTUDIO BA DATOS BOC Y EOC

RESULTADOS DE IPANHBA Y IPBHABA								
BOC IPANHBA					EOC IPBHABA			
M	N	KeP	KeT	MCPR	MLHGR	KeT	MCPR	MLHGR
		MAPANC	PRESTO			PRESTO		
OFICIAL			1.0078	1.6217	453	0.994	1.5269	375
1	1	1.00323	1.0086	1.7171	468	0.99316	1.5199	376
1	11	1.001251	1.0086	1.7169	468	0.99316	1.5199	376
1	21	1.000302	1.0085	1.7163	468	0.99316	1.5199	376
11	1	0.999651	1.0077	1.7069	473	0.99303	1.4787	377
11	11	0.995869	1.0044	1.6802	497	0.99292	1.4706	379
11	21	0.993161	1.0039	1.6775	499	0.99292	1.4706	379
21	1	0.999486	1.0074	1.7133	472	0.99303	1.4787	377
21	11	0.991308	0.99922	1.7047	530	0.9929	1.3856	382
21	21	0.986996	0.99568	1.6838	531	0.99291	1.3942	383

FIGURA 6.2.a
MAPAS CUARTO DE NUCLEO
CARGA ESTUDIO BA

100000 1PAHH4BA Est.Bipa.BA[M1 21 10 N1 21 10]BAHINI EIR=1.000323 09-08-1994

Carga de DISEÑO IV CUADRANTE Identificadores de Combustibles PRESTO

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	62370	30512	73292	20360	51203	51199	73288	42318	51211	62394	20277
(20)	30401	93749	30447	73284	41243	73280	51207	73276	62386	62378	20365
(18)	73272	30632	73268	41259	73264	41239	73260	42310	73256	62346	30422
(16)	20286	73252	41247	20332	41215	73248	51195	20338	62398	62358	20364
(14)	51171	41235	73244	41227	51183	41219	73240	42298	41223	62334	30461
(12)	51187	73236	41255	73232	41231	73228	42302	73224	62354	62374	20333
(10)	73220	51191	73216	51175	73212	42322	83003	42306	30382	30634	20288
(08)	42326	73208	42330	20347	42314	73204	42294	30473	20322	30394	
(06)	51179	62402	73200	62350	41251	62406	20305	30629	30427		
(04)	62342	62382	62366	62338	62390	62362	20350	30503			
(02)	30585	30641	30404	20281	30556	20294	20368				

Carga de DISEÑO IV CUADRANTE Constante de Multiplicacion Infinita(K_{inf})

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	1.1185	.92422	1.19	.99378	1.0693	1.0395	1.19	1.0872	1.0586	1.1272	.91933
(20)	.93171	1.19	.93171	1.19	1.0079	1.19	1.0434	1.19	1.1185	1.1191	.91873
(18)	1.19	.93615	1.19	1.0035	1.19	1.0427	1.19	1.0881	1.19	1.1273	.9166
(16)	.99378	1.19	1.0035	.99265	1.0381	1.19	1.0696	.99083	1.1190	1.1371	.91665
(14)	1.0697	1.0077	1.19	1.0371	1.0360	1.0550	1.19	1.1074	1.0508	1.1509	.91107
(12)	1.0397	1.19	1.0432	1.19	1.0557	1.19	1.1012	1.19	1.1232	1.1209	.91009
(10)	1.19	1.0434	1.19	1.0700	1.19	1.0909	1.19	1.1198	.90609	.92082	.90923
(08)	1.0880	1.19	1.0908	.99459	1.1072	1.19	1.1200	.91226	.92106	.9109	
(06)	1.0588	1.1185	1.19	1.1197	1.0459	1.1230	.99084	.93073	.91092		
(04)	1.1273	1.1197	1.1274	1.1371	1.1505	1.1209	.92068	.91069			
(02)	.92058	.91796	.9174	.91418	.91291	.9103	.90879				

Carga de DISEÑO IV CUADRANTE Quemado por combustible en MWD/MT

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	14152	22965		11516	16729	19953		13472	17879	13187	18291
(20)	21008		21003		21168		19522		14146	14104	18406
(18)		21413		21717		17295		13354		13189	23953
(16)	11516		21718	11686	17766		16686	11890	14108	12099	18882
(14)	16682	21193		17868	20353	16019		11327	16447	10473	23685
(12)	19929		17238		15949		11961		13632	13879	19455
(10)		19525		16653		13116		9993	24406	23411	19606
(08)	13364		13127	11419	11348		9987	23938	18161	23783	
(06)	17855	14172		13982	16984	13652	11889	22151	23707		
(04)	13167	13987	13177	12108	10515	13884	18155	23808			
(02)	23428	23080	32117	18951	23867	19430	19621				

Figura 6.5.a Mapas de la recarga básica del ESTUDIO BA

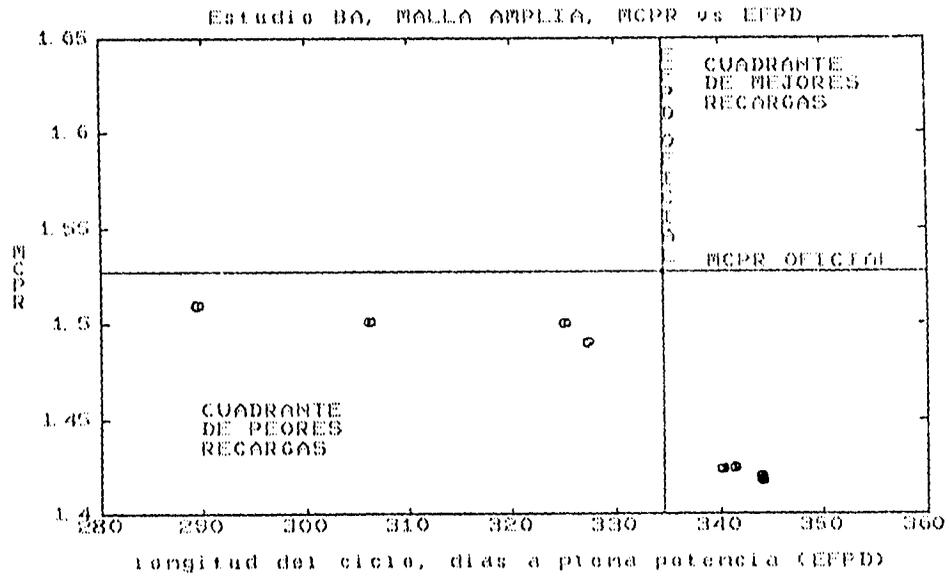


Figura 6.5.b MCPR de las recargas del estudio BA contra la longitud del ciclo en días a plena potencia

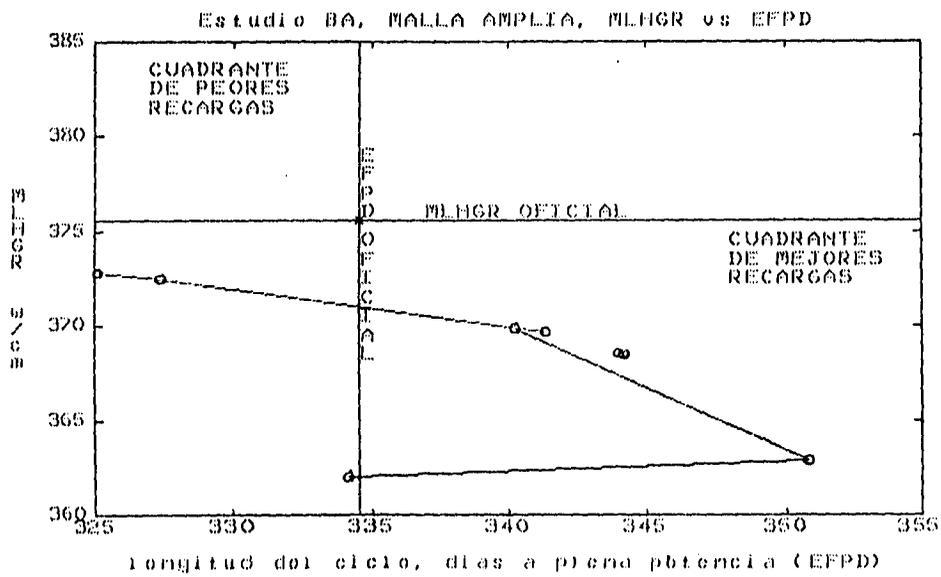


Figura 6.5.c MLHGR de las recargas del estudio BA contra la longitud del ciclo en días a plena potencia

6.2.7 Análisis de los resultados del estudio BA y conclusiones.

El examen de los resultados en el BOC muestra que: en todos las 9 recargas candidato se tiene:

- la Keff BOC es menor que el de la recarga oficial para M=11 y 21
- el MCPR en el BOC , para todos los casos, es mayor que aquél de la carga oficial por lo que el MCPR mejoró.
- el MLHGR BOC, para todos los casos, es mayor que aquél de la carga oficial por lo que el MLHGR empeoró.

El examen de los resultados en el EOC muestra que:

- la Keff Haling EOC es mayor al de la recarga oficial en todos los casos con M=1 y/o N=1. Es decir, solo en los casos relativamente cercanos al básico el resultado mejoraba.
- el MCPR en el Haling EOC, para todos los casos, es menor que aquel de la carga oficial por lo que el MCPR mejoró.
- el MLHGR en el Haling EOC, para todos los casos, es mayor que aquél de la carga oficial por lo que el MLHGR empeoró.

El análisis de éste y de otros estudios similares no reportados aquí nos llevaron a la siguiente conclusión:

aún cuando al modificar el patrón de recarga básico pudiese conducir a alcanzar mejores resultados esto no dejaba de ser un proceso de búsqueda tradicional de prueba y error.

Era necesario realizar una modificación más drástica así que se decidió:

cambiar el procedimiento de cómo colocar los combustibles en las localidades Negras de un esquema de colocación OUT-IN a uno IN-OUT.

En el siguiente estudio etiquetado A2 se presenta el desarrollo de esta idea.

6.2.8 Estudio A2

Se modificó el paso 8.3 del procedimiento MBA (de las reglas de colocación) quedando como sigue:

8.3- las localidades Negras (en esquema IN-OUT en el patrón básico) se llenan con los combustibles parcialmente

gastados que restan en el vector de recarga. El ensamble combustible parcialmente quemado con número de orden menor se coloca en la localidad Negra de MAYOR importancia, el segundo ensamble combustible de menor número de orden se coloca en la localidad Negra siguiente de MAYOR importancia y así sucesivamente hasta agotar las localidades Negras.

Esta modificación fue introducida en el programa MAPATES y se procedió a realizar el estudio A2. En el estudio A2, al igual que el estudio A1 y a diferencia del BA, la colocación de los combustibles en las localidades BLANCAS fue idéntica a la del patrón oficial.

El programa MAPATES se ejecutó bajo las siguientes condiciones:

- 1- Se suministró el vector con los datos de los combustibles de recarga de un cuarto de núcleo correspondientes al ciclo 4, ver Fig. 6.3.
- 2- La formación de recargas realizadas por MAPATES fueron hechas de acuerdo al procedimiento para el MBA dado en el apartado 6.2 CON EL PASO 8.3 MODIFICADO COMO SE EXPUSO AL INICIO DEL PRESENTE APARTADO.
- 3- La carga en las posiciones de las localidades Blancas fue idéntica a la carga oficial del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV.
- 4- Se generaron, además de la recarga oficial, 25 patrones de recarga para una malla amplia de valores de los parámetros M y N. Los valores de la variable M fueron [1, 6, 11, 16 y 21] y para N [1, 6, 11, 16, 21]. La intención era formar una malla que cubriera el espacio de solución del movimiento de combustibles de la región gris del patrón básico hacia la región de localidades negras, el patrón de carga M=1, N=1 representa el patrón de recarga básico.
- 5- El archivo de salida del programa MAPATES conteniendo los datos esenciales de las 26 recargas en formato de tarjeta J30000 de PRESTO se denominó A2BOC.DDD para los casos BOC y A2EOC.DDD para los casos EOC.

El programa PRESTO fue ejecutado bajo las siguientes condiciones:

- 6- El banco de datos usado en la ejecución de PRESTO y conteniendo la información de todos los tipos de combustibles involucrados en el ciclo 4 de la unidad 1 fue el L1F106_M.
- 7- El archivo de reinicio PRESTO (conteniendo toda la información del estado de quemado de cada uno de los combustibles de la recarga) y que corresponde al seguimiento que se realiza con

PRESTO de la operación de la unidad 1 de la CNLV hasta el ciclo 3 fue el L1PRE027.RST.

- 8- El archivo básico de PRESTO con la información sobre las condiciones de operación del reactor de la unidad 1 durante el ciclo 4 fue el PBHCHH01.C4.
- 9- Primero se ejecutó PRESTO bajo las condiciones BOC para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo A2BOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PAHH4A2.
- 10- Segundo se ejecutó PRESTO bajo la opción de simulación HALING EOC con una longitud de ciclo de 8046 MWD/MT para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo A2EOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PBHH4A2.

6.2.9 Resultados del estudio A2

En la tabla 6.4 se consignan los valores de MCPR, MLHGR y Keff en el inicio de ciclo BOC y al final de ciclo EOC respectivamente de cada uno de las 25 recargas generadas bajo el MBA junto con los datos del patrón de carga oficial del ciclo 4 que se usará como recarga de referencia. En la tabla con datos BOC también se consignan los valores del evaluador rápido Keff BOC integrado en el programa MAPATES.

En los mapas de la Figura 6.6.a se proporcionan los principales datos relacionados con el patrón básico del estudio BA.

En la Figura 6.6.b se muestra la gráfica de los MCPR contra los días a plena potencia del ciclo de las 9 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial.

En la Figura 6.6.c se muestra la gráfica de los MLHGR contra los días a plena potencia del ciclo de las 9 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial.

TABLA 6.4 ESTUDIO A2 DATOS BOC Y EOC

RESULTADOS DE (PAINIA2 Y (PAINIA2								
UOC (PAINIA2						EOC (PAINIA2		
M	S	Keff	Keff	MCTR	MEDR	Keff	MCTR	MEDR
		MAPAN	PRESTO			PRESTO		
DEFUAL			1.0078	1.6217	451	0.994	1.4269	475
1	1	1.00705	1.0075	1.2251	698	1.0009	1.3541	423
1	6	1.00705	1.0075	1.2251	698	1.0009	1.3540	423
1	11	1.00705	1.0075	1.2252	698	1.0009	1.3540	423
1	16	1.00705	1.0075	1.2251	698	1.0009	1.3539	423
1	21		1.0075	1.2250	698	1.0009	1.3539	421
6	1		1.0204	1.2241	699	1.0009	1.3540	423
6	6		1.0202	1.2214	701	1.0009	1.3531	424
6	11		1.0202	1.2207	702	1.0007	1.3527	424
6	16		1.0201	1.2198	702	1.0006	1.3524	424
6	21		1.0201	1.2191	703	1.0006	1.3519	424
11	1	0.99679	1.0202	1.2204	702	1.0006	1.3524	423
11	6	0.993876	1.0188	1.2023	719	0.99829	1.3444	426
11	11	0.993876	1.0184	1.1968	724	0.99877	1.3407	427
11	16	0.992636	1.0183	1.1933	725	0.99865	1.3397	426
11	21	0.9923	1.0182	1.1912	727	0.99847	1.3384	426
16	1	0.996756	1.0201	1.2301	707	1.0007	1.3521	424
16	6	0.992619	1.0178	1.1802	731	0.99829	1.3402	426
16	11	0.990934	1.0161	1.1738	740	0.99608	1.3374	433
16	16	0.990722	1.0154	1.1659	767	0.99368	1.3327	434
16	21	0.990251	1.0132	1.1628	771	0.99379	1.3307	435
21	1	0.996623	1.0199	1.2179	703	1.0005	1.3518	424
21	6	0.992436	1.0173	1.1844	735	0.99765	1.3376	429
21	11	0.990447	1.0143	1.1674	780	0.99454	1.3291	436
21	16	0.985302	1.0121	1.1589	817	0.99206	1.3252	442
21	21	0.984133	1.0110	1.1286	830	0.99114	1.3178	443

FIGURA 6.6.a
MAPAS CUARTO DE NUCLEO
CARGA ESTUDIO A2

***** CAMBIOS:Sin Intercambios EVA1(Diseño/Oficial)= 1.006677

Carga BASICA IV CUADRANTE Identificadores de Combustibles PRESTO

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	30473	62334	73292	62394	51203	62386	73288	51175	51211	20360	20277
(20)	62390	20305	62366	73284	42306	73280	42322	73276	51199	62378	20365
(18)	73272	62346	73268	62406	73264	42298	73260	41231	73256	30632	30422
(16)	62342	73252	62354	20332	62398	73248	42326	20338	41215	62358	20364
(14)	51171	42294	73244	62350	51183	42330	73240	41239	41223	30629	30461
(12)	62402	73236	42314	73232	42310	73228	51191	73224	41247	62374	20333
(10)	73220	42302	73216	42318	73212	51207	30382	41243	83003	30634	20288
(08)	51195	73208	41219	20347	41255	73204	41235	62370	20322	30394	
(06)	51179	51187	73200	41227	41251	41259	93749	30512	30427		
(04)	20286	62382	30447	62338	30401	62362	20350	30503			
(02)	30585	30641	30404	20281	30556	20294	20368				

Carga BASICA IV CUADRANTE Constante de Multiplicacion Infinita(Kinf)(=Nuevo)

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	.91226	1.1509	1.19	1.1272	1.0693	1.1185	1.19	1.0700	1.0586	.99378	.91933
(20)	1.1505	.99084	1.1274	1.19	1.1198	1.19	1.0909	1.19	1.0395	1.1191	.91873
(18)	1.19	1.1273	1.19	1.1230	1.19	1.1074	1.19	1.0557	1.19	.93615	.9166
(16)	1.1273	1.19	1.1232	.99265	1.1190	1.19	1.0880	.99083	1.0381	1.1371	.91465
(14)	1.0697	1.1200	1.19	1.1197	1.0360	1.0908	1.19	1.0427	1.0508	.93073	.91107
(12)	1.1185	1.19	1.1072	1.19	1.0881	1.19	1.0434	1.19	1.0035	1.1209	.91009
(10)	1.19	1.1012	1.19	1.0872	1.19	1.0434	.90609	1.0079	1.19	.92082	.90923
(08)	1.0696	1.19	1.0550	.99459	1.0432	1.19	1.0077	1.1185	.92106	.9109	
(06)	1.0588	1.0397	1.19	1.0371	1.0459	1.0035	1.19	.92422	.91092		
(04)	.99378	1.1197	.93171	1.1371	.93171	1.1209	.92068	.91069			
(02)	.92058	.91796	.9174	.91418	.91291	.9103	.90879				

Carga BASICA IV CUADRANTE Quemado por combustible en MW/MT(=Nuevo)

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	23938	10473		13187	16729	14146		16653	17879	11516	18291
(20)	10515	11889	13177		9993		13116		19953	14104	18406
(18)		13189		13652		11327		15949		21413	23953
(16)	13167		13632	11686	14108		13364	11890	17766	12099	18882
(14)	16682	9987		13982	20353	13127		17295	16447	22151	23685
(12)	14172		11348		13354		19525		21718	13879	19455
(10)		11961		13472		19522	24406	21168		23411	19606
(08)	16686		16019	11419	17238		21193	14152	18161	23783	
(06)	17855	19929		17868	16984	21717		22965	23707		
(04)	11516	13987	21003	12108	21008	13884	18155	23808			
(02)	23428	23080	32117	18951	23867	19430	19621				

Figura 6.6.a Mapas de la recarga básica del ESTUDIO A2

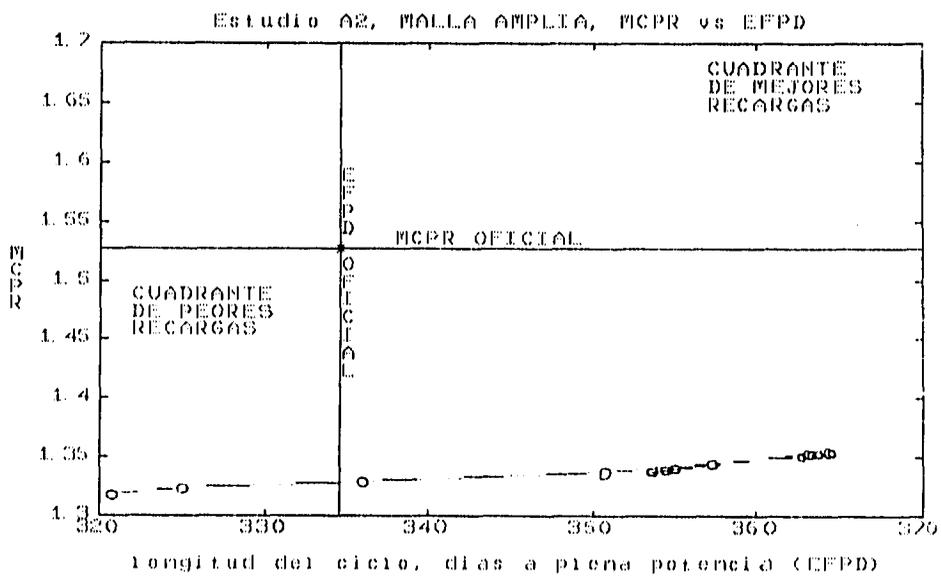


Figura 6.6.b MCPR de las recargas del estudio A2 contra la longitud del ciclo en días a plena potencia

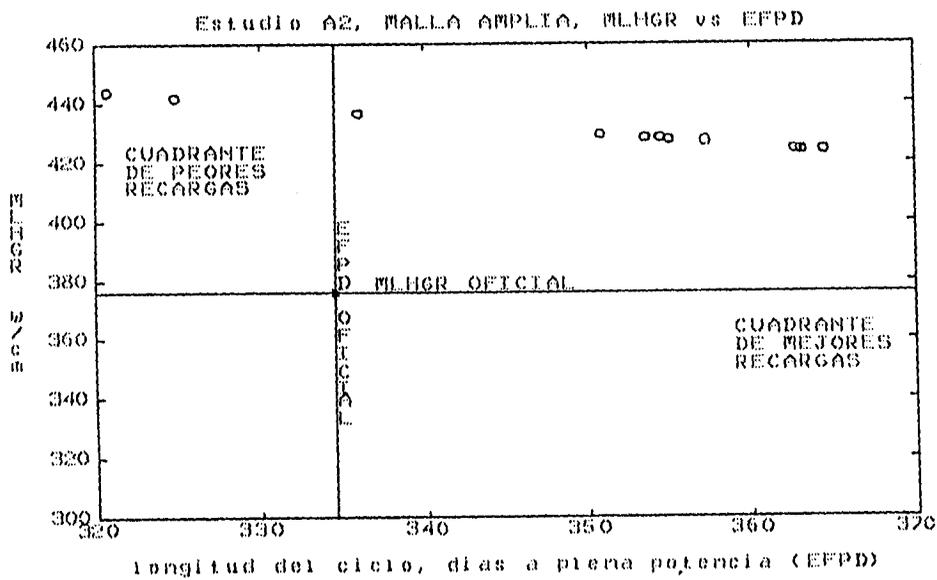


Figura 6.6.c MLHGR de las recargas del estudio A2 contra la longitud del ciclo en días a plena potencia

6.2.10 Análisis de los resultados del estudio A2 y conclusiones.

El examen de los resultados en el BOC muestra que en todas las 25 recargas candidato se tiene:

- la Keff BOC es mayor que la de la recarga oficial, por lo que ninguna recarga cumple con la condición para ser mejor que la oficial.
- el MCPR en el BOC es menor que aquél de la carga oficial por lo que el MCPR empeoró absolutamente.
- el MLHGR BOC es mayor que aquél de la carga oficial por lo que el MLHGR empeoró totalmente.
- Al crecer M y N los datos en el BOC el MCPR y MLHGR empeora.

El examen de los resultados en el EOC muestra que en todos las 25 recargas candidato se tiene:

- la Keff Haling EOC es MAYOR que el de la recarga oficial por lo que la longitud de ciclo MEJORO sustancialmente.
- el MCPR en el Haling EOC es menor que aquél de la carga oficial por lo que el MCPR empeoró totalmente.
- el MLHGR en el Haling EOC es mayor que aquél de la carga oficial por lo que el MLHGR empeoró.
- Al crecer M y N los datos Haling de Keff, MCPR y MLHGR empeoran.

Un análisis detallado de estos resultados (a primera vista pésimos) indicaron que el patrón básico reunía las condiciones deseadas para tener una reactividad mayor y como se muestra en la Fig. 9.a la distribución radial de Keff es siempre mayor, en todos los puntos radiales, que la de la carga oficial. Este mismo comportamiento se presenta en las distribuciones radiales del MCPR (Fig. 9.b) y del MLHGR (Fig. 9.c). Además, aún cuando las recargas formadas al variar los parámetros M y N en general empeoran radicalmente los valores del MCPR y MLHGR tanto en el BOC como en el EOC. Estos comportamientos son los deseados que posea el método biparamétrico pero exactamente al revés. Como resultado del análisis anterior se revisaron las definiciones de los parámetros M y N y se concluyó:

Manteniendo el procedimiento de colocación IN-OUT de los combustibles en las localidades Negras, como se impuso en el estudio A2, y redefiniendo adecuadamente los parámetros N y M se tendría un procedimiento efectivo para la búsqueda de patrones de recarga para la CNLV.

El desarrollo de la idea anterior se desarrolla en el próximo apartado.

6.3 Método Biparamétrico Modificado (MBM) a la CNLV, aplicación al Ciclo 4 de la Unidad 1

Los resultados de aplicar el Método Biparamétrico Adaptado al Ciclo 4 de la Unidad 1 de la CNLV como se analizó en el apartado anterior, son que al generar patrones de recargas con diferentes parámetros N y M estos tenían Keff Haling EOC menores que el patrón básico (y el patrón de recarga oficial) y/o menores márgenes de seguridad de los parámetros MCPR y MLHGR. En general estos patrones de recarga resultaron de mala calidad. Se intentó solucionar el problema aumentando la reactividad general del núcleo al modificar la colocación de los combustibles en las localidades Blancas pero el problema persistió.

Para solucionar esta falla fundamental del Método Biparamétrico Adaptado fue necesario re-analizar el método original. Se encontró que un principio básico del método de Burte es:

"El patrón básico debe ser más reactivo que el patrón de recarga óptimo a buscar."

Este principio no se cumplió al utilizar el método adaptado en el Ciclo 4. El motivo tal vez deba atribuirse al mayor número de combustibles del núcleo de los reactores de Laguna Verde con respecto al reactor de Tarapur en el que trabajó Burte.

Independientemente de la causa se analizó el Método Biparamétrico Adaptado para determinar qué cambios realizar con el fin de cumplir con el principio antes enunciado. Una forma de lograrlo era invertir el orden de colocación de los combustibles en las localidades negras. En lugar del esquema OUT-IN utilizado originalmente, se usa el esquema IN-OUT, tal como se hizo en el estudio A2 presentado en el apartado anterior.

Esto en principio pudiera traer problemas con el aplanado de la potencia radial. Afortunadamente esto no fue importante como se verá después. Además la definición original de los parámetros N y M ya no aplicaba, como se concluyó en el estudio A2, por lo que fue necesario redefinir estos parámetros.

A continuación se proporciona el procedimiento del que ahora llamamos Método Biparamétrico Modificado donde se incorporan los cambios anteriormente expresados:

Reglas de asignación de categorías a las localidades del núcleo.

- 1- Se parte el núcleo en cuatro cuadrantes de acuerdo a la simetría QSC y se trabaja sólo con el cuarto de núcleo

seleccionado. (111 localidades)

- 2- Se divide el núcleo en dos regiones: la periférica y la no-periférica tal como se propuso en el apartado 3.2.9. Esto se muestra en la Figura A.1 (Apéndice A).
- 3- La región no-periférica de L de (90) localidades se arregla en forma que recuerdan un tablero de ajedrez donde (46) (más o menos la mitad), se catalogan como localidades Blancas y el resto (44) como localidades Negras tal como se muestra en la Figura A.1 (Apéndice A). Las localidades Blancas se subdividen en dos: las pertenecientes a celdas CCC centrales o no pertenecientes a Celdas CCC centrales.
- 4- A la región periférica, por completés, se le da la categoría de localidades Grises (21 localidades).
- 5- A cada localidad del núcleo se le asigna un número consecutivo de importancia obtenido al simular un núcleo con idénticos combustibles. Al canal con mayor potencia se le asigna el número 1, al siguiente de mayor potencia el número 2 y así sucesivamente hasta completar todo el núcleo.

Reglas de colocación de los combustibles de recarga

- 6- El vector de los combustibles de recarga son ordenados de menos a más quemados.
- 7- Los n (111) combustibles de la recarga se dividen en dos categorías: (26) son combustibles frescos y el resto (85) son parcialmente quemados.
- 8- Se forma el Patrón Básico de Recarga:
 - 8.1- las localidades Blancas se llenan como sigue:
 - los ensambles combustibles frescos (26) son colocados en las localidades no CCC centrales procurando conservar una simetría de 1/8.
 - los ensambles menos reactivos en las localidades CCC centrales,
 - el resto de las localidades Blancas se llenan con los ensambles combustibles más reactivos de los parcialmente quemados.
 - se forma un patrón de recarga de las localidades blancas el cual quedará fijo durante la búsqueda.
 - 8.2- las localidades Grises (en esquema IN-OUT en el Patrón Básico) son llenadas con los combustibles parcialmente

gastados restantes. El ensamble combustible parcialmente quemado con número de orden mayor colocarlo en la localidad Gris de menor importancia. El segundo ensamble combustible de mayor número de orden se coloca en la localidad Gris siguiente de menor importancia y así sucesivamente hasta agotar las localidades Grises.

- 8.3- las localidades Negras (en esquema IN-OUT en el patrón básico) son llenan con los combustibles parcialmente gastados que restan en el vector de recarga. El ensamble combustible parcialmente quemado con número de orden mayor se coploca en la localidad Negra de menor importancia, el segundo ensamble combustible de mayor número de orden se coloca en la localidad Negra siguiente de menor importancia y así sucesivamente hasta agotar las localidades Negras.
- 9- Para formar candidatos de patrones de recarga a partir del Patrón Básico se definen dos parámetros N y M que modifique el orden en el vector de recarga de la forma siguiente:
 - 9.1- TOMAR UN SECTOR (S1) DE N ENSAMBLES COMBUSTIBLES EMPEZANDO EN EL ENSAMBLE DE NÚMERO SECUENCIAL L+1 HASTA EL L+N+1 Y EXTRAERLO, EMPUJAR HACIA ARRIBA LOS SIGUIENTES M ENSAMBLES COMBUSTIBLES Y EN EL ESPACIO QUE DEJAN INTRODUCIR LOS N ENSAMBLES DEL SECTOR S1.
 - 9.2- Mapear el combustible con el vector de recarga modificado de la forma descrita en los pasos 8.1, 8.2 y 8.3.
- 10- Generar candidatos de patrones de recarga variando M y N (exhaustiva o por búsqueda sistemática) hasta alcanzar el patrón de recargas que cumpla con las exigencias y expectativas deseadas.

Se modificó el programa MAPATES conforme a lo indicado en el procedimiento anterior.

Para terminar es valioso hacer las siguientes observaciones:

- El parámetro M al igual que en el método original de Burte representa la extensión de la zona central que se va afectar.
- Si M es menor o igual a 44 la única zona afectada por los cambios son las localidades Negras.
- Si M es mayor a 44 se efectúan cambios que afectan tanto a las localidades Negras como a las Grises.
- Con el objeto de mantener la menor fuga neutrónica radial es preferible no afectar la zona periférica y esto implica que el parámetro M no sea mayor a 44. En este punto es conveniente

indicar que en este aspecto el MBM es superior al método original de Burte pues en éste todos los patrones con M mayor modificaban la región periférica.

- Al igual que en el método original de Burte N representa con qué intensidad se desea realizar el cambio.
- El valor de N debe ser menor a M, (el caso N=M conduce al patrón básico por lo que hay que evitarlo). Esto reduce a la mitad los casos a investigar respecto al método original.

6.3.1 Optimización del patrón de recarga con colocación de los combustibles frescos en posición oficial. Método de búsqueda por escalamiento de malla.

Con el patrón de recarga idéntico al de la recarga oficial en las localidades Blancas y siguiendo el nuevo procedimiento Método Biparamétrico Modificado para la CNLV, descrito en el apartado anterior, se realizaron una serie de estudios sobre el ciclo 4 de la unidad 1. La finalidad era determinar la eficacia del nuevo método.

En esta tesis reportamos dos de los estudios secuenciales realizados con el MBM, sin embargo, esto es más que suficiente para mostrar la eficiencia del MBM para localizar patrones de recarga "óptimos" bajo la técnica que llamamos Método de Búsqueda por Escalamiento de Mallas.

El primero de estos estudios, el etiquetado FM, consiste en el uso de una malla amplia 8x8 (36 casos) de los parámetros M y N que abarca todo el espacio de solución inclusive en puntos más allá de M=44. Recordamos que para valores igual o menor de M=44 sólo se involucran intercambios de combustible correspondientes localidades Negras y para valores mayores a 44 también se involucran combustibles de las localidades Grises.

Una vez analizados los resultados del estudio FM se escogió el patrón de recarga con mejores características y se llevó a cabo el estudio FL que consistió en aplicar una malla detallada de 5x5 (con pasos de uno en uno tanto para M como para N) alrededor del patrón de recarga seleccionado. De esta forma se encontraron un conjunto de candidatos de patrones de recarga con características superiores al patrón de recarga oficial.

6.3.2 Estudio FM

El programa MAPATES se ejecutó bajo las siguientes condiciones:

- 1- Se suministró el vector con los datos de los combustibles de recarga de un cuarto de núcleo correspondiente al ciclo 4 de

la unidad 1 (ver Fig. 6.3)

- 2- La formación de recargas realizadas por MAPATES fueron hechas de acuerdo al procedimiento para el MBM dado en el apartado 6.3.
- 3- La carga en las localidades Blancas fue idéntica a la carga oficial del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV.
- 4- Se generaron, además de la recarga oficial, 36 patrones de recarga para una malla amplia de valores de los parámetros M y N. Los valores de la variable M fueron {8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64} y para N {4, 12, 20, 28, 36, 44, 52, 60}. Se recuerda que N debe ser menor que M así que los casos con $N > M$ no se crean.
- 5- El archivo de salida del programa MAPATES conteniendo los datos esenciales de las 37 recargas en formato de tarjeta 330000 de PRESTO se denominó FMBOC.DDD para los casos BOC y FMEOC.DDD para los casos EOC.

El programa PRESTO fue ejecutado bajo las siguientes condiciones:

- 6- El banco de datos usado en la ejecución de PRESTO y conteniendo la información de todos los tipos de combustibles involucrados en el ciclo 4 de la unidad 1 fue el L1F106_M.
- 7- El archivo de reinicio PRESTO (conteniendo toda la información del estado de quemado de cada uno de los combustibles de la recarga) y que corresponde al seguimiento que se realiza con PRESTO de la operación de la unidad 1 de la CNLV hasta el ciclo 3 fue el L1PRE027.RST.
- 8- El archivo básico de PRESTO con la información sobre las condiciones de operación del reactor de la Unidad 1 durante el ciclo 4 fue el PBHCHH01.C4.
- 9- Primero se ejecutó PRESTO bajo las condiciones BOC para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo FMBOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PAHH4FM.
- 10- Segundo, se ejecutó PRESTO bajo la opción de simulación HALING EOC con una longitud de ciclo de 8046 MWD/MT para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo FMEOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PBHH4FM.

6.3.3 Resultados del estudio FM

En las tablas 6.5.a y 6.5.b se consignan los valores de MCPR, MLHGR y Keff en el inicio de ciclo (BOC) y al final de ciclo (EOC) respectivamente de cada uno de los 36 recargas generadas bajo el

MBM junto con los datos del patrón de carga oficial del ciclo 4 que se usará como recarga de referencia. En la tabla con datos BOC también se consignan los valores del evaluador rápido Keff BOC integrado en el programa MAPATES.

En los mapas de la Figura 6.7.a se proporcionan los principales datos relacionados con el patrón básico del estudio FM.

En las Figuras 6.7.b y 6.7.c se muestran gráficas del MCPR contra los días a plena potencia del ciclo de las 36 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial. En la Fig 6.7.b se fija el parámetro M y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro N. En la Fig 6.7.c se fija el parámetro N y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro M.

En las Figuras 6.7.d y 6.7.e se muestran gráficas del MLHGR contra los días a plena potencia del ciclo de las 36 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial. En la Fig 6.7.d se fija el parámetro M y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro N. En la Fig 6.7.e se fija el parámetro N y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro M.

TABLA 6.5.a
ESTUDIO FM, DATOS BOC (MALLA AMPLIA)

ESTUDIO FM DATOS BOC, MLJGR en w/cm.									
OFICIAL	Keff MCPR MLJGR	1.0078 1.6217 453.49							
		N = 4	N = 12	N = 20	N = 28	N = 36	N = 44	N = 52	N = 60
M = 8	Keff MCPR MLJGR	1.0205 1.3075 720.44							
M = 16	Keff MCPR MLJGR	1.0202 1.2805 661.19	1.0205 1.2210 710.44						
M = 24	Keff MCPR MLJGR	1.0188 1.2908 650.54	1.0187 1.3480 629.16	1.0198 1.2700 673.13					
M = 32	Keff MCPR MLJGR	1.0175 1.2861 640.00	1.0156 1.4184 552.68	1.0165 1.4046 582.67	1.0195 1.3300 634.34				
M = 40	Keff MCPR MLJGR	1.0153 1.2589 667.62	1.0106 1.3763 508.90	1.0096 1.6506 448.68	1.0127 1.4300 566.44	1.0170 1.3983 601.84			
M = 48	Keff MCPR MLJGR	1.0129 1.2261 689.18	1.0045 1.2832 612.52	1.0007 1.5661 440.91	1.0024 1.7204 468.08	1.0075 1.5524 559.48	1.0161 1.4511 586.83		
M = 56	Keff MCPR MLJGR	1.0128 1.2280 701.45	1.0002 1.2261 691.88	.99180 1.4452 495.83	.99324 1.7145 457.87	.99815 1.6660 539.42	1.0069 1.5501 563.05	1.0159 1.4514 585.44	
M = 64	Keff MCPR MLJGR	1.0120 1.2190 710.83	.99086 1.2062 696.11	.98780 1.3419 554.02	.98848 1.6721 437.93	.98845 1.5055 543.16	.99771 1.6510 549.07	1.0066 1.5551 563.78	1.0158 1.4521 586.51

TABLA 6.5.b
ESTUDIO EM DATOS EOC (MALLA ANCHA)

ESTUDIO EM DATOS EOC, MUJER en w/cm									
OFICIAL	Keff MCPR MLHGR	9900 1.5269 375.58							
		N = 4	N = 12	N = 20	N = 28	N = 36	N = 44	N = 52	N = 60
M = 8	Keff MCPR MLHGR	1.0000 1.3493 425.38 365							
M = 16	Keff MCPR MLHGR	1.0007 1.3635 420.45 365	1.0008 1.3577 423.00 365						
M = 24	Keff MCPR MLHGR	.99987 1.3728 417.32 365	1.0003 1.4033 418.11 365	1.0008 1.3839 418.09 365					
M = 32	Keff MCPR MLHGR	.99994 1.3752 416.81 357	.99888 1.4470 390.37 356	1.0002 1.4316 414.57 363	1.0013 1.4035 417.57 367				
M = 40	Keff MCPR MLHGR	.99982 1.3633 420.08 347	.99480 1.4322 394.39 337	.99308 1.5477 375.50 341	.98639 1.4488 355.45 354	1.0003 1.4070 417.68 365			
M = 48	Keff MCPR MLHGR	.99490 1.3490 424.06 338	.98924 1.3904 405.12 317	.98024 1.5202 366.39 307	.98083 1.6147 364.57 319	.99436 1.4506 417.10 338	.99938 1.4107 417.21 361		
M = 56	Keff MCPR MLHGR	.99348 1.1484 428.10 331	.98387 1.3693 417.82 295	.98033 1.4733 361.75 271	.98188 1.6510 353.83 277	.98613 1.6297 378.14 297	.99384 1.4496 418.37 333	.99902 1.4105 417.10 305	
M = 64	Keff MCPR MLHGR	.99279 1.3429 429.58 328	.98173 1.3223 437.25 286	.97446 1.4433 398.53 244	.97353 1.5616 369.39 239	.97671 1.7269 342.72 254	.98479 1.6342 371.72 291	.99348 1.4981 418.73 331	.99973 1.4107 417.37 360

FIGURA 6.7.a
MAPAS CUARTO DE NUCLEO
CARGA ESTUDIOS FM y FL

***** CAMBIOS: Sin Intercambios EVA1(Diseño/Oficial)= 1.007059

Carga BASICA IV CUADRANTE Identificadores de Combustibles PRESTO

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	30473	62334	73292	62394	51203	62386	73288	51175	51211	20286	20277
(20)	62390	20305	62366	73284	42306	73280	42322	73276	51199	62378	20365
(18)	73272	62346	73268	62406	73264	42298	73260	41231	73256	30632	30422
(16)	62342	73252	62354	20332	62398	73248	42326	20338	41215	62358	20364
(14)	51171	42294	73244	62350	51183	42330	73240	41239	41223	30629	30461
(12)	62402	73236	42314	73232	42310	73228	51191	73224	41247	62374	20333
(10)	73220	42302	73216	42318	73212	51207	30382	41243	83003	30634	20288
(08)	51195	73208	41219	20347	41255	73204	41235	62370	20322	30396	
(06)	51179	51187	73200	41227	41251	41259	93749	30512	30427		
(04)	20360	62382	30447	62338	30401	62362	20350	30503			
(02)	30585	30641	30404	20281	30556	20294	20368				

Carga BASICA IV CUADRANTE Constante de Multiplicacion Infinita(Kinf)(=Nuevo)

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	.91212	1.1507	.98788	1.1270	1.0691	1.1184	.98788	1.0698	1.0585	.97844	.91921
(20)	1.1503	.97636	1.1273	.98788	1.1197	.98788	1.0908	.98788	1.0394	1.1190	.91861
(18)	.98788	1.1272	.98788	1.1229	.98788	1.1073	.98788	1.0556	.98788	.93601	.91646
(16)	1.1272	.98788	1.1231	.97555	1.1189	.98788	1.0878	.97823	1.0379	1.1370	.91452
(14)	1.0696	1.1198	.98788	1.1196	1.0358	1.0907	.98788	1.0425	1.0507	.93059	.91093
(12)	1.1184	.98788	1.1071	.98788	1.0880	.98788	1.0432	.98788	1.0033	1.1208	.90997
(10)	.98788	1.1011	.98788	1.0870	.98788	1.0432	.90595	1.0078	1.0253	.92068	.90911
(08)	1.0695	.98788	1.0549	.97702	1.0431	.98788	1.0076	1.1184	.92094	.91076	
(06)	1.0587	1.0396	.98788	1.0370	1.0458	1.0034	1.0307	.92408	.91078		
(04)	.97735	1.1195	.93159	1.1369	.93157	1.1208	.92056	.91055			
(02)	.92044	.91782	.91726	.91405	.91277	.91017	.90885				

Carga BASICA IV CUADRANTE Quemado por combustible en MWD/MT (=Nuevo)

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	23939	10473		13187	16729	14146		16653	17879	13055	18291
(20)	10515	13261	13177		9993		13116		19953	14104	18406
(18)		13189		13652		11327		15949		21413	23953
(16)	13167		13632	13359	14108		13364	13021	17766	12099	18882
(14)	16682	9987		13982	20353	13127		17295	16447	22151	23685
(12)	14172		11348		13354		19525		21718	13879	19455
(10)		11961		13472		19522	24406	21168		23411	19606
(08)	16686		16019	13134	17238		21193	14152	18161	23783	
(06)	17855	19929		17868	16984	21717		22965	23707		
(04)	13100	13987	21003	12108	21008	13884	18155	23808			
(02)	23428	23080	23117	18951	23867	19430	19621				

Figura 6.7.c Mapas de la recarga básica de los ESTUDIOS FM y FL

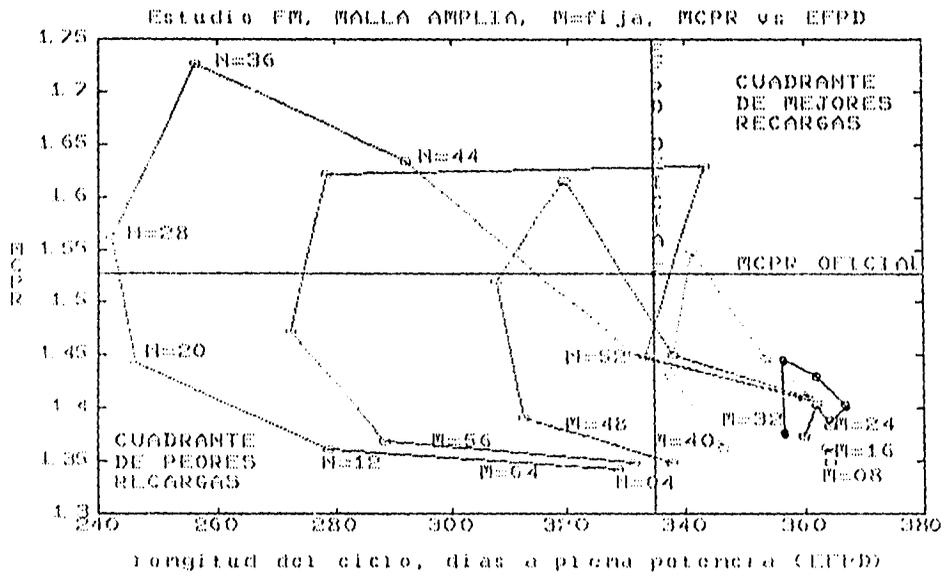


Figura 6.7.b MCPR de las recargas del estudio FM contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo.

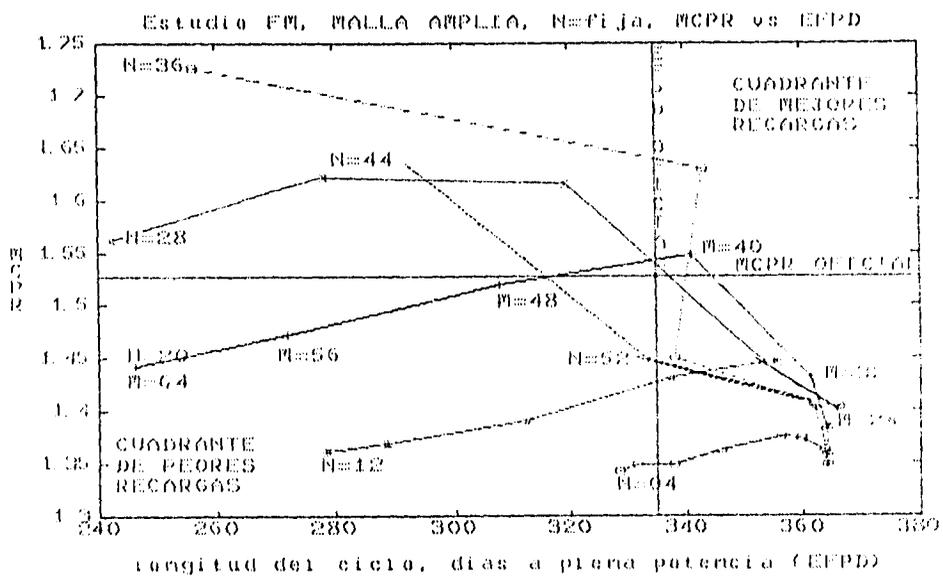


Figura 6.7.c MCPR de las recargas del estudio FM contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo.

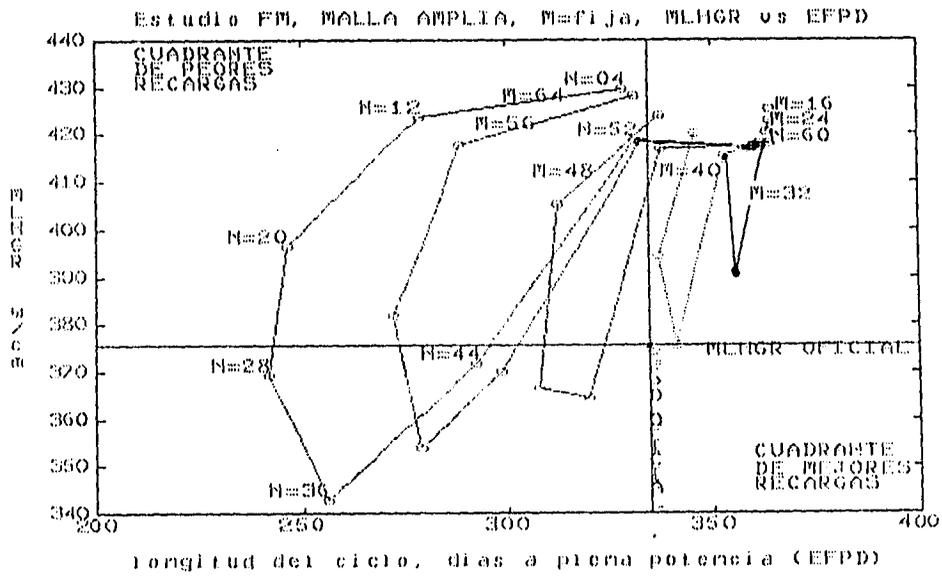


Figura 6.7.d MLHGR de las recargas del estudio FM contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo.

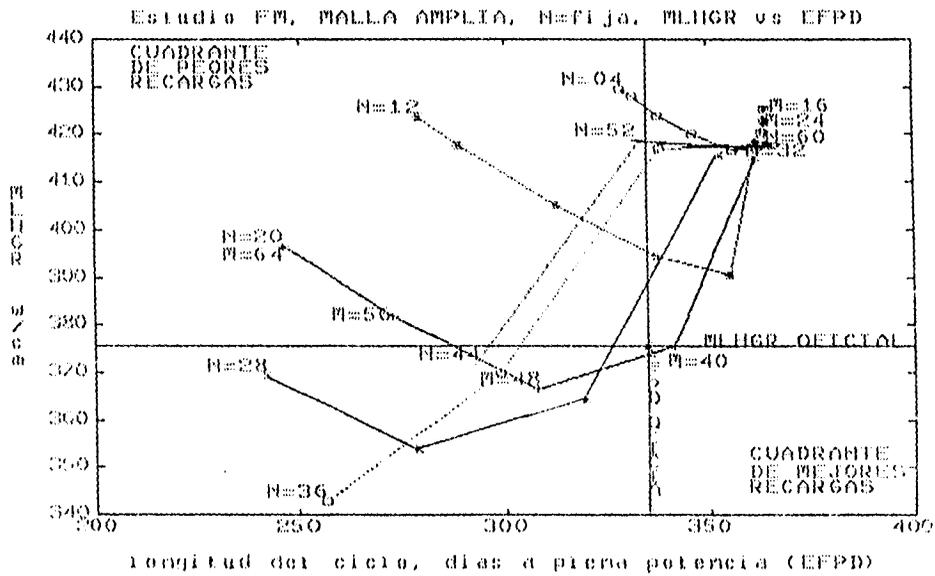


Figura 6.7.e MLHGR de las recargas del estudio FM contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo.

6.3.4 Análisis de los resultados del estudio FM y conclusiones.

El examen de los resultados en el BOC muestra que:

- la Keff BOC decrece monotónicamente al crecer M, al crecer N decrece Keff y pasa por un mínimo y vuelve a crecer.
- el MCPR en el BOC muestra un comportamiento ligeramente oscilatorio en lo global. Al crecer N y M crece el valor del MCPR pasando por un máximo y decreciendo posteriormente.
- el MLHGR BOC al crecer N y M decrece, pasando por un mínimo, volviendo a crecer después.

El examen de los resultados en el EOC, muestran que el comportamiento es completamente equivalente al caso BOC tal que;

- la Keff EOC decrece monotónicamente al crecer M, al crecer N decrece Keff pasa por un mínimo y después, vuelve a crecer.
- el MCPR en el EOC muestra un comportamiento ligeramente oscilatorio en lo global. Al crecer N y M crece el valor del MCPR pasando por un máximo y decreciendo posteriormente.
- el MLHGR EOC al crecer N y M decrece pasando por un mínimo volviendo a crecer después.

El comportamiento es casi ideal para este tipo de procesos de búsqueda ya que se presta a la creación de algoritmos que aceleren eficientemente la búsqueda. Para casos de análisis de una recarga donde la posición de los combustibles nuevos y de los combustibles más reactivos esté previamente determinado, como hasta ahora ha sido el caso, el procedimiento aquí usado es práctico y lo suficientemente rápido. Para el caso de estudios de multiciclos o de búsqueda variando también el patrón de recarga de las localidades blancas, sería de gran utilidad desarrollar algoritmos eficientes de búsqueda.

Examinando los resultados rápidamente se encuentra que varias recargas poseen mayores o casi iguales márgenes de seguridad que la recarga oficial pero sólo uno de ellos posee mejor Keff Haling EOC (mayor al oficial); este caso es la recarga [M=40 N=20]. La mejora respecto a la carga oficial es de $0.00168 \Delta k/k$ o lo que es equivalente a 168 pcm (pcm es una unidad de reactividad y son milésimas de por ciento o $10^{-5} \Delta k/k$) o traduciendo a EFPD (días de plena potencia) se ganan 7 días de operación a plena potencia, lo que representa una mejora significativa.

Con la finalidad de buscar la posibilidad de detectar candidatos de patrones de recargas aún mejores y a su vez examinar el

comportamiento del método se realizó un segundo estudio donde la recarga [M=40 N=20] se tomo como centro de una malla detallada 5x5 tal como se desarrolla en el estudio siguiente.

6.3.5 Estudio FL

El programa MAPATES se ejecutó bajo las siguientes condiciones:

- 1- Se suministró el vector con los datos de los combustibles de recarga de un cuarto de núcleo correspondientes al ciclo 4 de la unidad 1.
- 2- La formación de recargas realizadas por MAPATES fueron hechas de acuerdo al procedimiento para el MBM dado en el apartado 6.3.
- 3- La carga en las localidades Blancas fue idéntica a la carga oficial del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV.
- 4- Se generaron, además de la recarga oficial, 25 patrones de recarga para una malla detallada de valores de los parámetros M y N. Los valores de la variable M fueron [38, 39, 40, 41, 42] y para N [18, 19, 20, 21, 22]. Se recuerda que N debe ser menor que M, así que los casos con $N \geq M$ no se generan.
- 5- El archivo de salida del programa MAPATES conteniendo los datos esenciales de las 26 recargas en formato de tarjeta 330000 de PRESTO se denominó FLBOC.DDD para los casos BOC y FLEOC.DDD para los casos EOC.

El programa PRESTO fue ejecutado bajo las siguientes condiciones:

- 6- El banco de datos usado en la ejecución de PRESTO y conteniendo la información de todos los tipos de combustibles involucrados en el ciclo 4 de la unidad 1 fue el L1F106_M.
- 7- El archivo de reinicio PRESTO (conteniendo toda la información del estado de quemado de cada uno de los combustibles de la recarga) y que corresponde al seguimiento que se realiza con PRESTO de la operación de la unidad 1 de la CNLV hasta el ciclo 3 fue el L1PRE027.RST.
- 8- El archivo básico de PRESTO con la información sobre las condiciones de operación del reactor de la Unidad 1 durante el ciclo 4 fue el PBHCHH01.C4.
- 9- Primero se ejecutó PRESTO bajo las condiciones BOC para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo FLBOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PAHH4FL.
- 10- Segundo, se ejecutó PRESTO bajo la opción de simulación HALING

EOC con una longitud de ciclo de 8046 MWD/MT para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo FLEOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PBHH4FL.

6.3.6 Resultados del estudio FL

De los resultados obtenidos en el estudio FL se presenta en las Tablas 6.6.a y 6.6.b los valores de MCPR, MLHGR y Keff en el inicio de ciclo (BOC) y al final de ciclo (EOC) respectivamente, de cada uno de los 25 recargas generadas bajo el MBM junto con los datos del patrón de carga oficial del ciclo 4 que se usará como recarga de referencia. En la tabla con datos BOC también se consigna los valores del evaluador rápido Keff BOC integrado en el programa MAPATES.

En los mapas de la Figura 6.7.a se proporcionan los principales datos relacionados con el patrón básico del estudio FL que es el mismo del estudio FM.

En las Figuras 6.8.a y 6.8.b se muestran gráficas del MCPR contra los días a plena potencia del ciclo de las 25 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial. En la Fig 6.8.a se fija el parámetro M y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro N. En la Fig 6.8.b se fija el parámetro N y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro M.

En las Figuras 6.8.c y 6.8.d se muestran gráficas del MLHGR contra los días a plena potencia del ciclo de las 25 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial. En la Fig 6.8.c se fija el parámetro M y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro N. En la Fig 6.8.d se fija el parámetro N y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro M.

TABLA 6.6.a
ESTUDIO FL, DATOS BOC (MALLA FINA)

ESTUDIO FL DATOS BOC, MLHGR en w/cm.						
OFICIAL	Keff MCPR MLHGR	1 0078 1.6217 453.49				
	N	N=18	N=19	N=20	N=21	N=22
M=38	Keff MCPR MLHGR	1.0116 1.3819 453.42	1.0117 1.6172 460.04	1.0119 1.5446 481.41	1.0121 1.5924 491.40	1.0124 1.6248 477.09
M=39	Keff MCPR MLHGR	1.0108 1.3768 480.12	1.0108 1.6126 454.04	1.0109 1.6394 461.62	1.0112 1.5917 493.59	1.0116 1.5672 505.42
M=40	Keff MCPR MLHGR	1.0097 1.3663 491.23	1.0097 1.6020 474.19	1.0096 1.6596 446.58	1.0097 1.6477 463.07	1.0102 1.4058 493.51
M=41	Keff MCPR MLHGR	1.0086 1.3586 492.27	1.0081 1.5830 507.92	1.0086 1.6319 490.93	1.0086 1.6154 467.07	1.0083 1.5869 463.88
M=42	Keff MCPR MLHGR	1.0075 1.3510 462.17	1.0077 1.5663 520.11	1.0077 1.6071 501.57	1.0077 1.6315 484.13	1.0078 1.5142 461.63

TABLA 6.6 b
ESTUDIO FL. DATOS EOC (MALLA FINA)

ESTUDIO FL. DATOS EOC, MLHGR en w/cm, EFPD en días						
OFICIAL	Keff MCPR MLHGR EFPD	.99400 1.5269 375.58 334				
	N	N = 18	N = 19	N = 20	N = 21	N = 22
M = 38	Keff MCPR MLHGR EFPD	.99710 1.5347 373.35 347	.99727 1.5408 372.28 348	.99749 1.5377 383.79 349	.99773 1.5037 392.61 350	.99814 1.5185 389.35 351
M = 39	Keff MCPR MLHGR EFPD	.99644 1.5323 377.42 344	.99657 1.4553 375.41 345	.99678 1.5485 373.91 346	.99702 1.5389 384.63 347	.99741 1.4980 395.16 348
M = 40	Keff MCPR MLHGR EFPD	.99537 1.5285 379.91 340	.99553 1.5373 377.96 340	.99568 1.5477 375.50 341	.99590 1.5325 371.58 342	.99628 1.5412 364.81 344
M = 41	Keff MCPR MLHGR EFPD	.99464 1.5240 381.59 334	.99470 1.5278 380.80 334	.99488 1.5429 378.20 334	.99505 1.5552 373.32 339	.99541 1.5591 371.73 340
M = 42	Keff MCPR MLHGR EFPD	.99391 1.5223 367.69 367	.99397 1.5192 383.73 334	.99407 1.5339 389.26 334	.99428 1.4856 374.13 334	.99458 1.5591 373.09 334

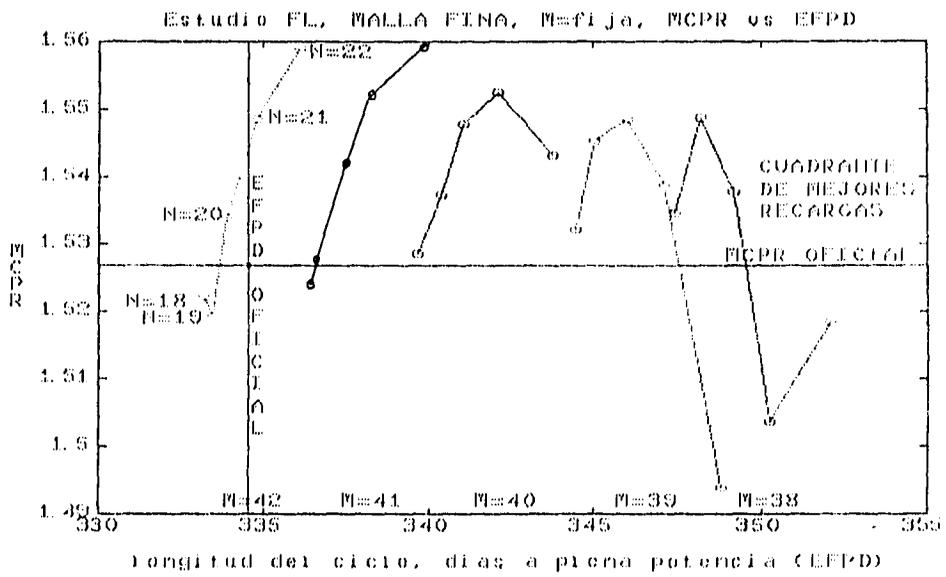


Figura 6.8.a MCPR de las recargas del estudio FL contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo.

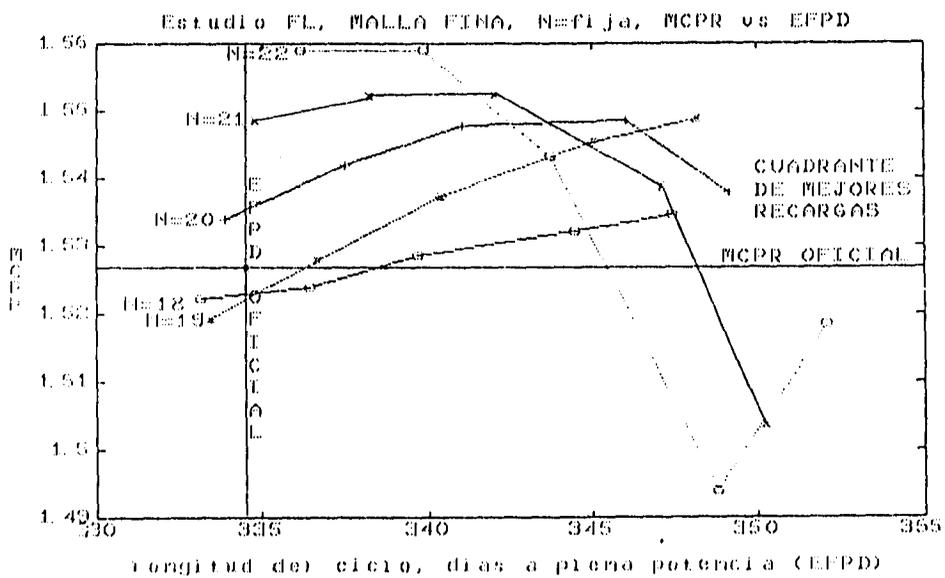


Figura 6.8.b MCPR de las recargas del estudio FL contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo.

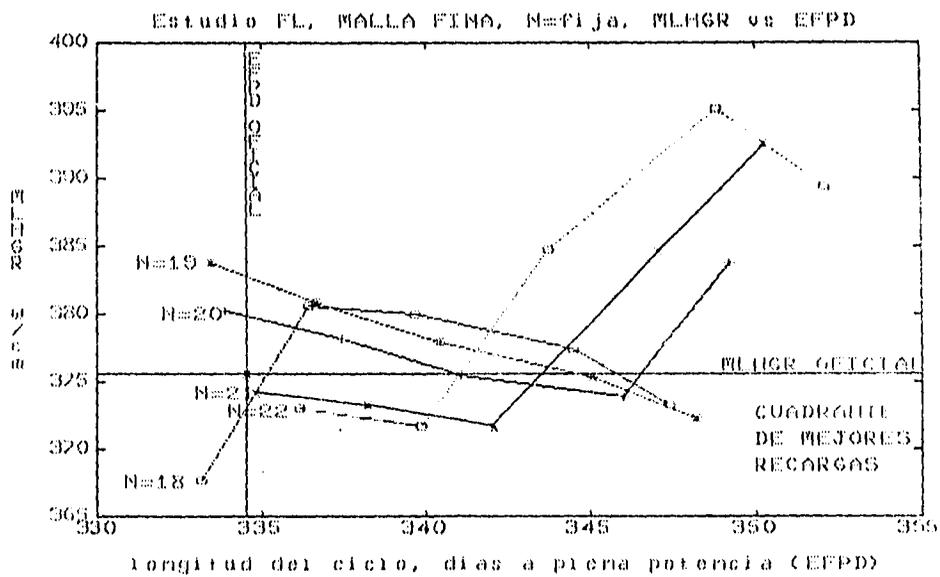


Figura 6.8.d MLHGR de las recargas del estudio FL contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo.

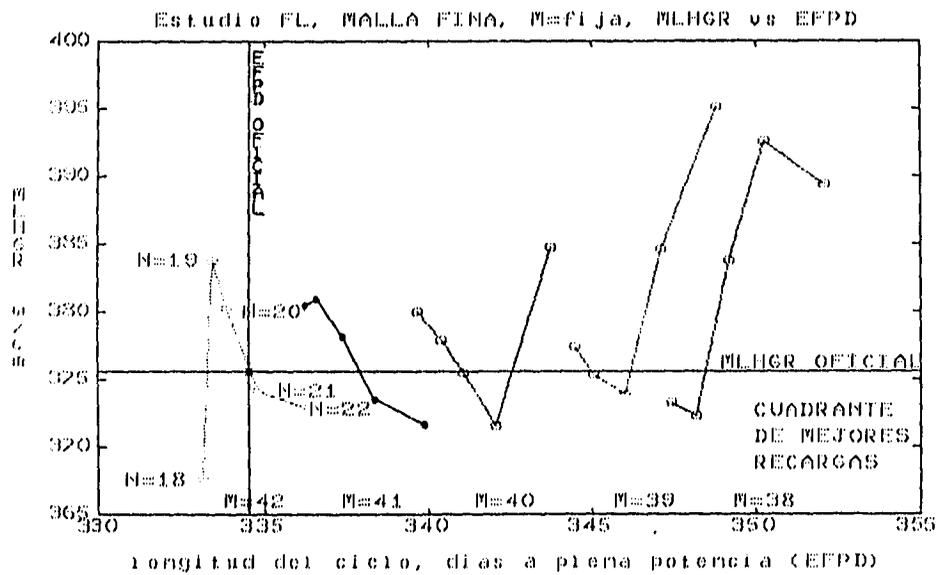


Figura 6.8.c MLHGR de las recargas del estudio FL contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo.

6.3.7 Análisis de los resultados del estudio FL y conclusiones.

El examen de los resultados en el BOC y en el EOC muestra que el único caso que estrictamente cumple con las condiciones muy conservadores del apartado 6.2.2 es la recarga [M=40 N=20]. Si reconsideramos las condiciones impuestas y las suavizamos ligeramente tal que:

- Para que un candidato patrón de carga sea mejor que el patrón de carga oficial se establece que:
 - en el EOC la keff sea mayor, el MCPR mayor o igual, y el MLHGR sea menor o igual.

es decir, no exigimos que se cumplan las restricciones en el BOC y sólo exigimos que los datos en el EOC sean mejores que los oficiales. Es valioso señalar que las condiciones BOC se pueden mejorar si se permite un ligero ajuste en el diseño de los combustibles frescos. Tomando las condiciones únicamente en el EOC es fácil detectar que el patrón de recarga generado con los parámetros [M=38, N=18] resulta ser el mejor de los casos del estudio FL. Esta mejora, respecto a la carga oficial, es de 0.00310 $\Delta k/k$ o lo que es equivalente a 310 pcm o traduciendo a EFPD (días de plena potencia) se ganan 13 días de operación a plena potencia, doblando prácticamente la mejora con respecto al patrón de recarga [M=40, N=20].

Esta nueva condición es aún conservadora ya que los límites de diseño con cálculos Haling del MCPR suelen ser de 1.45 y de 390 w/cm para el MLHGR, lo que nos llevaría a candidatos de recargas con longitudes de ciclo realmente mayores. Sin embargo, debemos ser cautelosos, como se vió en el capítulo 3, para que una recarga sea licenciable debe de pasar todavía una serie de pruebas que no se han considerado en estos estudios. De cualquier manera el MBM se presenta como una prometedora técnica para optimizar la obtención de patrones de recarga.

Queda por tratar el problema central de cómo generar el patrón de recarga de las localidades Blancas. El método original de Burte no tiene semejante problema pues el uso de la simetría sectorial SSC le permite colocar todos los combustibles fresco de una forma única. En los estudios realizados con el MBM (que sí tiene el problema de como colocar los combustibles frescos) hemos copiado la colocación del recarga de combustible oficial del ciclo 4.

Si realmente deseamos tener un método completo de búsqueda de patrón de recarga óptimo se deberá inventar un procedimiento de colocación de combustibles en las localidades Blancas. Sin embargo el tratar de cumplir con esta meta, la de tener un método completo de obtención de recargas, sobrepasa los alcances del presente

trabajo puesto que la colocación óptima de los combustibles frescos realmente está íntimamente ligado al diseño neutrónico óptimo de los combustibles frescos de recarga, optimizar uno es optimizar el otro.

Ahora si bajamos la mira y sólo usamos el MBM como una herramienta de búsqueda de mejores recarga (no la óptima) por la tradicional técnica de prueba y error se pueden ir proponiendo patrones de carga de combustibles en las localidades blancas y así una vez fijada la posición de los combustibles frescos, emplear el MBM para encontrar la recarga "óptima" del método y de la colocación de los combustibles de las localidades Blancas. Es conveniente señalar que el uso de la técnica de prueba y error en el procedimiento esbozado no nos lleva otra vez a la misma situación inicial tradicional de prueba y error. Usando el MBM se puede asegurar de una forma razonablemente precisa cuál de dos patrones de combustibles de las localidades Blancas es mejor uno respecto del otro, respuesta que no puede suministrar un método que utilice sólo la técnica de prueba y error.

En el siguiente apartado se va usar una recarga de los combustibles frescos que produce una mayor reactividad en el patrón básico del Método Biparamétrico Modificado. Se usará, al igual que en los estudios FM/FL el Método de Búsqueda por Escalamiento de Malla.

6.3.8 Optimización del patrón de recarga con colocación de los combustibles frescos en posiciones de mayor reactividad que la oficial.

Con el patrón de recarga idéntico al de la recarga oficial en las localidades Blancas, con ciertos intercambios de combustibles para obtener un patrón básico más reactivo [1 por 85 y 73 por 75] y, siguiendo el procedimiento Método Biparamétrico Modificado junto con el Método de Búsqueda por Escalamiento de Mallas, se pretende explorar si es posible mejorar la recarga de combustible de los estudios anteriores.

6.3.9 Estudio GB

El programa MAPATES se ejecutó bajo las siguientes condiciones:

- 1- Se suministró el vector con los datos de los combustibles de recarga de un cuarto de núcleo correspondiente al ciclo 4 de la unidad 1.
- 2- La formación de recargas realizadas por MAPATES fueron hechas de acuerdo al procedimiento para el MBM dado en el apartado 6.3.
- 3- La carga en las localidades Blancas fue idéntica a la carga

oficial del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV excepto que en la carga básica se intercambiaron los combustibles de los canales [1 por 85 y 73 por 75].

- 4- Se generaron, además de la recarga oficial, 36 patrones de recarga para una malla amplia de valores de los parámetros M y N. Los valores de la variable M fueron [8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64] y para N [4, 12, 20, 28, 36, 44, 52, 60]. Se recuerda que N debe ser menor que M así que los casos con N>M no se crean.
- 5- El archivo de salida del programa MAPATES conteniendo los datos esenciales de las 37 recargas en formato de tarjeta 330000 de PRESTO se denominó GBBOC.DDD para los casos BOC y GBEOC.DDD para los casos EOC.

El programa PRESTO fue ejecutado bajo las siguientes condiciones:

- 6- El banco de datos usado en la ejecución de PRESTO y conteniendo la información de todos los tipos de combustibles involucrados en el ciclo 4 de la unidad 1 fue el L1F106_M.
- 7- El archivo de reinicio PRESTO (conteniendo toda la información del estado de quemado de cada uno de los combustibles de la recarga) y que corresponde al seguimiento que se realiza con PRESTO de la operación de la unidad 1 de la CNLV hasta el ciclo 3 fue el L1PRE027.RST.
- 8- El archivo básico de PRESTO con la información sobre las condiciones de operación del reactor de la Unidad 1 durante el ciclo 4 fue el PBHCHH01.C4.
- 9- Primero se ejecutó PRESTO bajo las condiciones BOC para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo GBBOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PAHH4GB.
- 10- Segundo, se ejecutó PRESTO bajo la opción de simulación HALING EOC con una longitud de ciclo de 8046 MWD/MT para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo GBEOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PBHH4GB.

6.3.10 Resultados del estudio GB

En las tablas 6.7.a y 6.7.b se consignan los valores de MCPDR, MLHGR y Keff en el inicio de ciclo (BOC) y al final de ciclo (EOC) respectivamente de cada uno de los 36 recargas generadas bajo el MBM junto con los datos del patrón de carga oficial del ciclo 4 que se usará como recarga de referencia. En la tabla con datos BOC también se consigna los valores del evaluador rápido Keff BOC integrado en el programa MAPATES.

En los mapas de la Figura 6.9.a se proporcionan los principales datos relacionados con el patrón básico del estudio GB.

En las Figuras 6.9.b y 6.9.c se muestran gráficas del MCPR contra los días a plena potencia del ciclo de las 36 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial. En la Fig 6.9.b se fija el parámetro M y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro N. En la Fig 6.9.c se fija el parámetro N y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro M.

En las Figuras 6.9.d y 6.9.e se muestran gráficas del MLHGR contra los días a plena potencia del ciclo de las 36 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial. En la Fig 6.9.d se fija el parámetro M y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro N. En la Fig 6.9.e se fija el parámetro N y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro M.

TABLA 6.7.a
ESTUDIO GB, DATOS BOC (MALLA AMPLIA)

ESTUDIO GB DATOS BOC, MLHGR en w/cm.									
OFICIAL	Keff MCPR MLHGR	1.0076 1.6217 453.49							
		N=4	N=12	N=20	N=28	N=36	N=44	N=52	N=60
M=8	Keff MCPR MLHGR	1.0241 1.0628 877.43							
M=16	Keff MCPR MLHGR	1.0236 1.0765 859.45	1.0239 1.0907 835.59						
M=24	Keff MCPR MLHGR	1.0222 1.0793 857.12	1.0230 1.1423 782.24	1.0290 1.2903 726.75					
M=32	Keff MCPR MLHGR	1.0209 1.0709 863.09	1.0189 1.1497 765.99	1.0195 1.3256 613.35	1.0225 1.2752 660.43				
M=40	Keff MCPR MLHGR	1.0188 1.0489 877.37	1.0137 1.1011 806.43	1.0123 1.3101 610.95	1.0151 1.4382 563.94	1.0194 1.3512 621.18			
M=48	Keff MCPR MLHGR	1.0158 1.0158 922.52	1.0072 1.3113 874.72	1.0028 1.2143 676.94	1.0040 1.3031 486.69	1.0007 1.5115 556.68	1.0179 1.4246 594.93		
M=56	Keff MCPR MLHGR	1.0165 1.0260 932.26	1.0032 1.9056 936.67	.9959 1.1233 768.65	99478 1.3939 593.67	99809 1.6846 524.56	1.0075 1.5432 62.17	1.0176 1.4905 589.52	
M=64	Keff MCPR MLHGR	1.01156 1.0156 944.36	1.0022 1.90326 989.27	.98969 1.0510 871.91	98648 1.2633 645.91	98859 1.6150 520.03	99774 1.6637 539.05	1.0072 1.5435 563.28	1.0017 1.4358 581.04

TABLA 6.7b
ESTUDIO GB DATOS EOC (MALLA AMPLIA)

ESTUDIO GB DATOS EOC, MLHGR en w/cm.									
OFICIAL	Keff MCPR MLHGR								
		N=4	N=12	N=20	N=28	N=36	N=44	N=52	N=60
M=8	Keff MCPR MLHGR	1.0033 1.3309 429.82 376							
M=16	Keff MCPR MLHGR	1.0031 1.3485 423.81 376	1.0032 1.3459 423.87 376						
M=24	Keff MCPR MLHGR	1.0023 1.3511 422.49 372	1.0027 1.3997 414.93 374	1.0032 1.3790 415.20 376					
M=32	Keff MCPR MLHGR	1.0014 1.3480 423.16 368	1.0013 1.4186 399.88 367	1.0025 1.4417 410.72 373	1.0025 1.4940 414.59 372				
M=40	Keff MCPR MLHGR	.9998 1.3341 427.48 356	.9980 1.3932 407.29 347	.9972 1.5202 372.00 355	1.0005 1.4583 412.09 364	1.0024 1.4160 414.41 372			
M=48	Keff MCPR MLHGR	.9966 1.3154 432.41 364	.9935 1.3445 419.56 317	.9892 1.4616 379.52 313	.99241 1.4990 365.38 326	.9959 1.4576 414.78 346	1.0019 1.4184 414.89 370		
M=56	Keff MCPR MLHGR	.99595 1.3214 434.77 343	.98551 1.3255 432.24 295	.98151 1.4133 398.83 258	.98284 1.5486 366.55 282	.98354 1.6302 372.42 304	.99531 1.4548 416.46 340	1.0017 1.4187 414.69 369	
M=64	Keff MCPR MLHGR	.99513 1.3152 436.60 339	.98167 1.3225 437.25 286	.97556 1.3842 413.81 248	.97427 1.4695 384.53 243	.98333 1.7501 348.40 304	.98601 1.6183 376.96 277	.99492 1.4554 416.89 338	1.0016 1.4183 415.99 369

FIGURA 6.9.a
MAPAS CUARTO DE NUCLEO
CARGA ESTUDIOS GB y GC

***** CAMBIOS: 1 85 73 75 13 94 EVA(Diseño/Oficial)= 1.00885

Carga BASICA IV CUADRANTE Identificadores de Combustiles PRESTO

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	62370	62334	73292	62394	51203	62386	73288	51175	51211	20286	20277
(20)	62390	93749	62366	73284	42306	73280	42322	73276	51199	62378	20365
(18)	73272	62346	73268	62406	73264	42298	73260	41231	73256	30632	30422
(16)	62342	73252	62354	20332	62398	73248	42326	20338	41215	62358	20364
(14)	51171	42294	73244	62350	51183	42330	73240	41239	41223	30629	30461
(12)	62402	73236	42314	73232	42310	73228	51191	73224	41247	62374	20333
(10)	73220	42302	73216	42318	73212	51207	83003	41243	30382	30634	20288
(08)	51195	73208	41219	20347	41255	73204	41235	30473	20322	30394	
(06)	51179	51187	73200	41227	41251	41259	20305	30512	30427		
(04)	20360	62382	30447	62338	30401	62362	20350	30503			
(02)	30585	30641	30404	20281	30556	20294	20368				

Carga BASICA IV CUADRANTE Constante de Multiplicacion Infinita(Kinf)(=-Nuevo)

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	1.1184	1.1507	.98788	1.1270	1.0691	1.1184	.98788	1.0698	1.0585	.97844	.91921
(20)	1.1503	1.0307	1.1273	.98788	1.1197	.98788	1.0908	.98788	1.0394	1.1190	.91861
(18)	.98788	1.1272	.98788	1.1229	.98788	1.1073	.98788	1.0556	.98788	.93601	.91646
(16)	1.1272	.98788	1.1231	.97555	1.1189	.98788	1.0878	.97823	1.0379	1.1370	.91452
(14)	1.0696	1.1198	.98788	1.1196	1.0358	1.0907	.98788	1.0425	1.0507	.93059	.91093
(12)	1.1184	.98788	1.1071	.98788	1.0880	.98788	1.0432	.98788	1.0033	1.1208	.90997
(10)	.98788	1.1011	.98788	1.0870	.98788	1.0432	1.0253	1.0078	.90595	.92068	.90911
(08)	1.0695	.98788	1.0549	.97702	1.0431	.98788	1.0076	.91212	.92094	.91076	
(06)	1.0587	1.0396	.98788	1.0370	1.0458	1.0034	.97636	.92408	.91078		
(04)	.97735	1.1195	.93159	1.1369	.93157	1.1208	.92056	.91055			
(02)	.92044	.91782	.91726	.91405	.91277	.91017	.90885				

Carga BASICA IV CUADRANTE Quemado por combustible en MWD/MT(=-Nuevo)

	(23)	(25)	(27)	(29)	(31)	(33)	(35)	(37)	(39)	(41)	(43)
(22)	14152	10473		13187	16729	14146		16653	17879	13055	18291
(20)	10515		13177		9993		13116		19953	14104	18406
(18)		13189		13652		11327		15949		21413	23953
(16)	13167		13632		14108		13364	13021	17766	12099	18882
(14)	16682	9987		13982	20353	13127		17295	16447	22151	23685
(12)	14172		11348		13354		19525		21718	13879	19455
(10)		11961		13472		19522		21168	24406	23411	19606
(08)	16686		16019		13134	17238		21193	23939	18161	23783
(06)	17855	19929		17868	16984	21717		13261	22965	23707	
(04)	13100	13987	21003		12108	21008	13884	18155	23808		
(02)	23428	23080	23117	18951	23867	19430	19621				

Figura 6.9.a mapas de las recarga básica de los estudios GB y BC

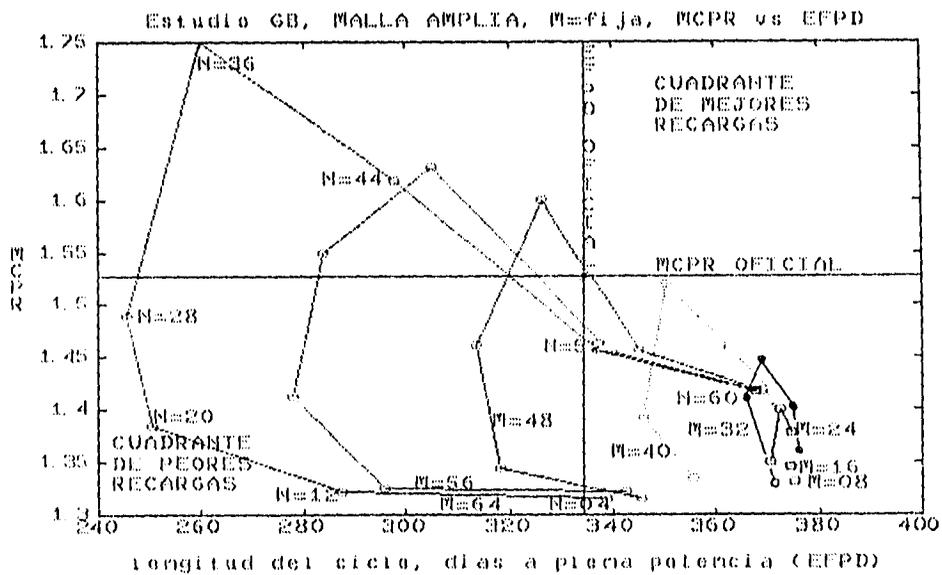


Figura 6.9.b MCPR de las recargas del estudio GB contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo.

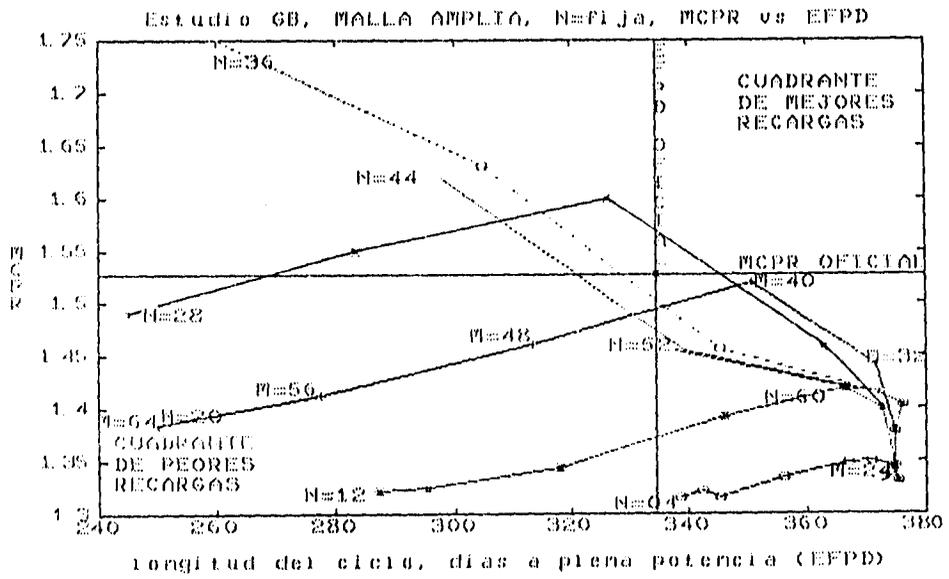


Figura 6.9.c MCPR de las recargas del estudio GB contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo.

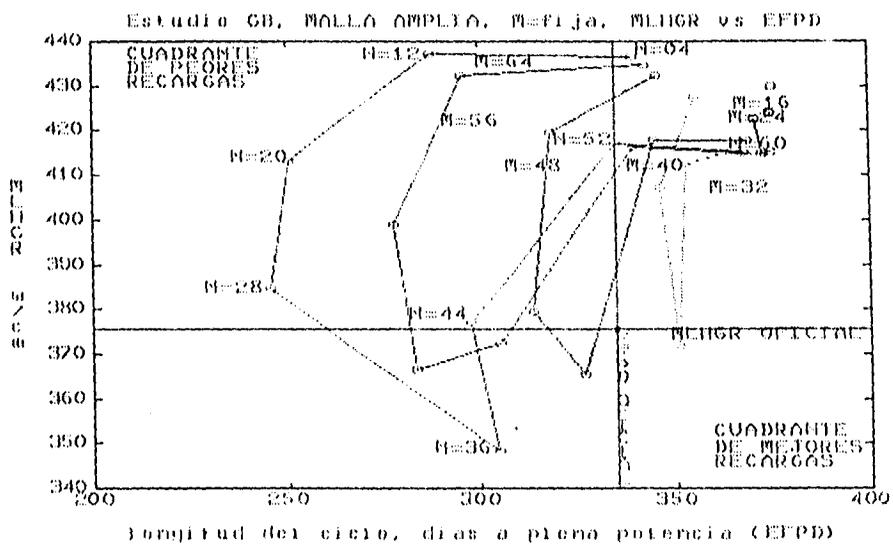


Figura 6.9.d MLHGR de las recargas del estudio GB contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo.

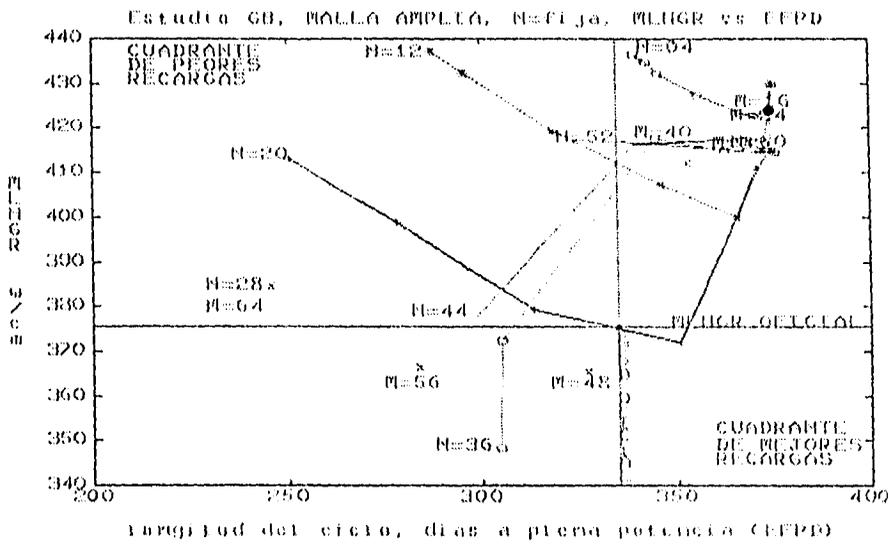


Figura 6.9.e MLHGR de las recargas del estudio GB contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo.

6.3.11 Análisis de los resultados del estudio GB y conclusiones.

El examen de los resultados en el BOC muestra que se confirma lo encontrado en el Estudio FM.

El examen de los resultados en el EOC muestra que también se confirma lo encontrado en el Estudio FM: que la mejor la recarga [M=40 N=20] ; idéntico al caso FM !. La mejora respecto a la carga oficial es de 0.00382 $\Delta k/k$ o lo que es equivalente a 382 pcm o traduciendo a EFPD (días de plena potencia) se ganan 16 días de operación a plena potencia, lo que representa una mejora significativa y más del doble de la obtenida en el Estudio FM.

Siguiendo el método de búsqueda por escalamiento de malla se realizó un segundo estudio, el GC, donde la recarga [M=40 N=20] se tomó como centro de una malla detallada 5x5.

6.3.12 Estudio GC

El programa MAPATES se ejecutó bajo las siguientes condiciones:

- 1- Se suministró el vector con los datos de los combustibles de recarga de un cuarto de núcleo correspondientes al ciclo 4 de la unidad 1 (ver Fig. 6.3).
- 2- La formación de recargas realizadas por MAPATES fueron hechas de acuerdo al procedimiento para el MBM dado en el apartado 6.3.
- 3- La carga en las localidades Blancas fue idéntica a la carga oficial del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV, excepto que en la carga básica se intercambiaron los combustibles de los canales [1 por 85 y 73 por 75].
- 4- Se generaron, además de la recarga oficial, 25 patrones de recarga para una malla detallada de valores de los parámetros M y N. Los valores de la variable M fueron [38, 39, 40, 41, 42] y para N [18, 19, 20, 21, 22]. Se recuerda que N debe ser menor que M así que los casos con $N \geq M$ no se crean.
- 5- El archivo de salida del programa MAPATES conteniendo los datos esenciales de las 26 recargas en formato de tarjeta 330000 de PRESTO se denominó GCBOC.DDD para los casos BOC y GCEOC.DDD para los casos EOC.

El programa PRESTO fue ejecutado bajo las siguientes condiciones:

- 6- El banco de datos usado en la ejecución de PRESTO y conteniendo la información de todos los tipos de combustibles involucrados en el ciclo 4 de la unidad 1 fue el L1F106_M.

- 7- El archivo de reinicio PRESTO (conteniendo toda la información del estado de quemado de cada uno de los combustibles de la recarga) y que corresponde al seguimiento que se realiza con PRESTO de la operación de la unidad 1 de la CNLV hasta el ciclo 3 fue el L1PRE027.RST.
- 8- El archivo básico de PRESTO con la información sobre las condiciones de operación del reactor de la Unidad 1 durante el ciclo 4 fue el PBHCHH01.C4.
- 9- Primero se ejecutó PRESTO bajo las condiciones BOC para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo GCB0C.DDD. El nombre de la corrida fue 1PAHH4GC.
- 10- Segundo, se ejecutó PRESTO bajo la opción de simulación HALING EOC con una longitud de ciclo de 8046 MWD/MT para cada uno de los patrones de recarga contenidos en el archivo GCEOC.DDD. El nombre de la corrida fue 1PBHH4GC.

6.3.13 Resultados del estudio GC

En este estudio de malla fina en las tablas 6.8.a y 6.8.b se consignan los valores de MCPR, MLHGR y Keff en el inicio de ciclo (BOC) y al final de ciclo (EOC) respectivamente de cada uno de las 25 recargas generadas bajo el MBM junto con los datos del patrón de carga oficial del ciclo 4 que se usará como recarga de referencia. En la tabla con datos BOC también se consigna los valores del evaluador rápido Keff BOC integrado en el programa MAPATES.

En los mapas de la Figura 6.9.a se proporcionan los principales datos relacionados con el patrón básico del estudio GC que es el mismo del estudio GB).

En las Figuras 6.10.a y 6.10.b se muestran gráficas del MCPR contra los días a plena potencia del ciclo de las 25 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial. En la Fig 6.10.a se fija el parámetro M y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro N. En la Fig 6.10.b se fija el parámetro N y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro M.

En las Figuras 6.10.c y 6.10.d se muestran gráficas del MLHGR contra los días a plena potencia del ciclo de las 25 recargas generadas de malla amplia junto con los correspondientes al patrón de recarga oficial. En la Fig 6.10.c se fija el parámetro M y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro N. En la Fig 6.10.d se fija el parámetro N y se muestra cómo evolucionan los resultados de las recargas al variar el parámetro M.

TABLA 6.8.a
ESTUDIO GC, DATOS BOC (MALLA FINA)

ESTUDIO GC DATOS BOC, MLHGR en w/cm.						
OFICIAL	Keff MCPR MLHGR	1.0078 1.6217 453.49				
	N	N=18	N=19	N=20	N=21	N=22
M=38	Keff MCPR MLHGR	1.0145 1.2908 652.36	1.0146 1.2832 635.84	1.0147 1.3315 597.96	1.0148 1.3740 569.93	1.0149 1.4035 543.75
M=39	Keff MCPR MLHGR	1.0137 1.2545 657.03	1.0137 1.2764 640.76	1.0137 1.3226 602.88	1.0138 1.3706 562.40	1.0142 1.4019 544.34
M=40	Keff MCPR MLHGR	1.0125 1.2437 665.29	1.0125 1.2655 648.77	1.0123 1.3101 610.95	1.0123 1.3553 570.31	1.0127 1.3927 548.60
M=41	Keff MCPR MLHGR	1.0115 1.2353 671.55	1.0116 1.2586 654.96	1.0113 1.3031 616.77	1.0112 1.3476 575.76	1.0114 1.3823 554.77
M=42	Keff MCPR MLHGR	1.0104 1.2270 677.62	1.0105 1.2501 660.72	1.0104 1.2967 622.04	1.0103 1.3411 580.35	1.0104 1.3747 559.67

TABLA 6.8.b
ESTUDIO GC, DATOS EOC (MALLA FINA)

ESTUDIO GC DATOS EOC, MLIGR en w/cm, EFPD en días						
OFICIAL						
	Keff	.99400				
	MCPR	1.5269				
	MLIGR	375.58				
	EFPD	334				
	N	N=18	N=19	N=20	N=21	N=22
M=38	Keff	.99928	.99945	.99966	.99988	1.00013
	MCPR	1.4972	1.5128	1.5316	1.5185	1.5333
	MLIGR	374.96	376.43	393.32	389.95	385.67
	EFPD	358	359	359	360	362
M=39	Keff	.99859	.99873	.99892	.99915	.99954
	MCPR	1.4931	1.5087	1.5272	1.5337	1.5087
	MLIGR	375.70	371.48	377.75	394.22	391.35
	EFPD	353	353	356	357	359
M=40	Keff	.99750	.99767	.99782	.99802	.99840
	MCPR	1.4833	1.5036	1.5202	1.5438	1.5327
	MLIGR	377.63	374.61	372.00	375.85	394.46
	EFPD	350	351	352	352	354
M=41	Keff	.99676	.99687	.99699	.99713	.99750
	MCPR	1.4807	1.4967	1.5167	1.5396	1.5535
	MLIGR	577.97	376.91	374.50	369.87	376.59
	EFPD	346	347	347	348	350
M=42	Keff	.99601	.99608	.99616	.99635	.99666
	MCPR	1.4781	1.4908	1.5111	1.5340	1.5492
	MLIGR	379.34	380.93	376.40	371.65	371.02
	EFPD	345	345	345	344	345

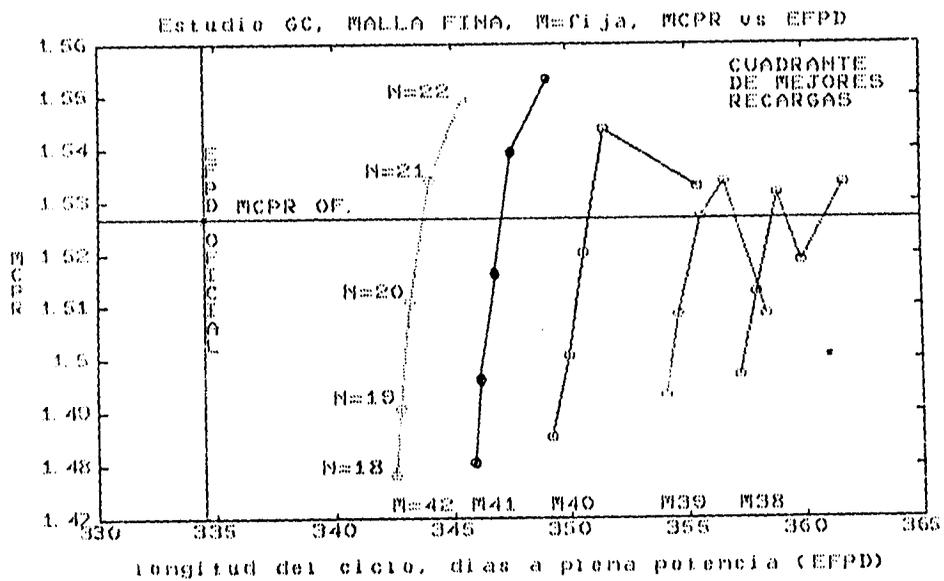


Figura 6.10.a MCPR de las recargas del estudio GC contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo.

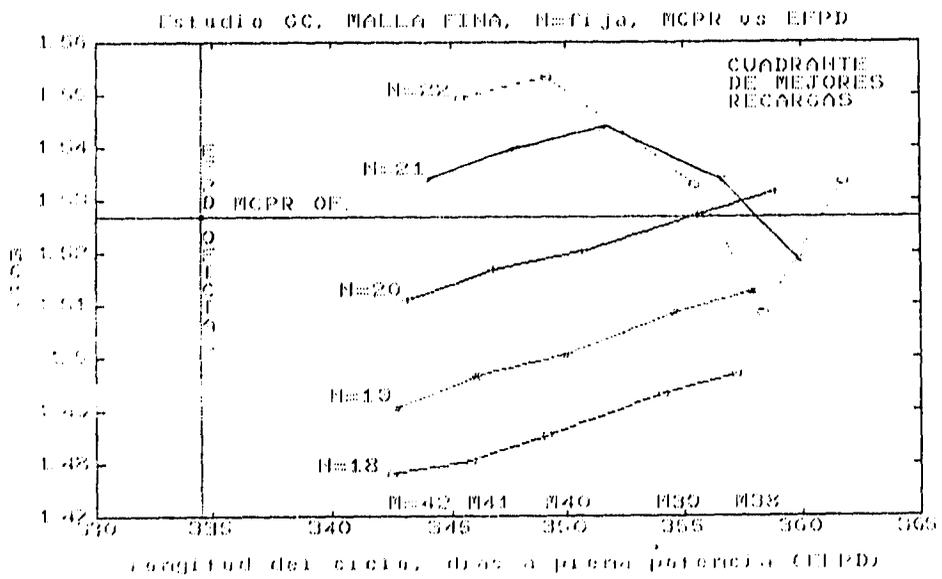


Figura 6.10.b MCPR de las recargas del estudio GC contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo.

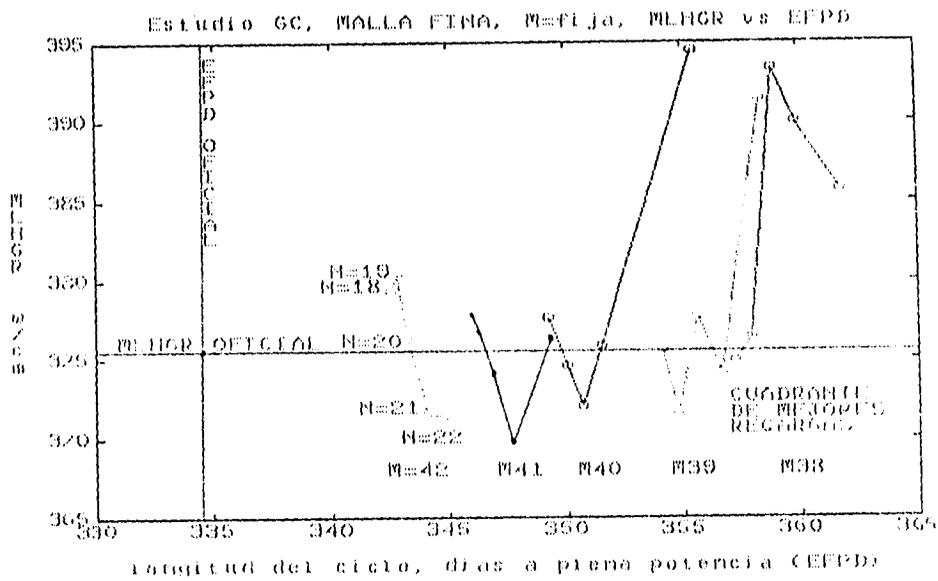


Figura 6.10.c MLHGR de las recargas del estudio GC contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro M fijo.

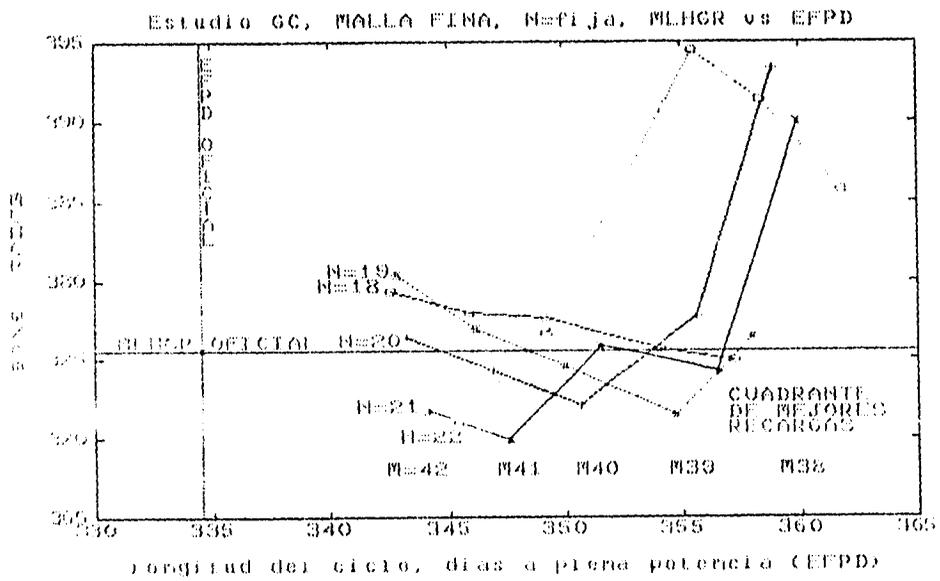


Figura 6.10.d MLHGR de las recargas del estudio GC contra la longitud del ciclo en días a plena potencia, parámetro N fijo.

6.3.14 Análisis de los resultados del estudio GC y conclusiones

El examen de los resultados en el BOC y EOC muestra que el único caso que cumple con las condiciones más suaves consistente en sólo considerando el caso EOC, es la recarga [M=40 N=20]. Si imponemos que los márgenes de seguridad sean un 1% menos restrictivos, encontramos que el patrón de recarga [M=39, N=19] fácilmente cumple con las nuevas restricciones, aunque hay que hacer notar que los datos en el BOC son muy alejados de lo que se puede considerado como razonable. Sin embargo, como ya se ha expresado anteriormente mediante modificaciones en el diseño de los combustibles de recarga es posible resolver problemas con los límites encontrados en el BOC. Tomando en cuenta las consideraciones anteriores y con mucha reserva la viabilidad de esta recarga cuantifiquemos la mejora. La mejora, respecto a la carga oficial, es de 0.00545 $\Delta k/k$ o lo que es equivalente a 545 pcm o traduciendo a EFPD (días de plena potencia) se ganan 23 días de operación a plena potencia ; casi un mes de operación !, este dato repetimos debemos tomarlo con muchas reservas.

6.3.14 Análisis de los resultados del estudio GC y conclusiones

El examen de los resultados en el BOC y EOC muestra que el único caso que cumple con las condiciones en el EOC es la recarga [M=40 N=20]. Con el fin de intentar de obtener un patrón de recarga con una longitud de ciclo mayor un candidato sería el patrón de recaraga [M=39, N=19]. Este patrón en el EOC los márgenes de seguridad disminuyen del orden del 1% respecto a la carga OFICIAL, esto se puede tolerar. Sin embargo esta recarga en el inicio del ciclo presenta valores difíciles de aceptar, sería necesario realizar un ajuste en el diseño del combustible de recarga con el objeto de mejorar las condiciones en el BOC y demostrar la viabilidad de la recarga. La experiencia es de que el ajuste del diseño tiene probabilidades de resultar exitoso y aún cuando esta técnica de búsqueda complica la obtención de recargas y sobre pasa los alcances de la presente trabajo, creemos que es valioso intentarlo puesto que la mejora, respecto a la carga oficial, es de $0.00545 \Delta k/k$ o lo que es equivalente a 545 pcm o traduciendo a EFPD (días de plena potencia) se ganan 23 días de operación a plena potencia ; casi un mes de operación !, este dato debemos tomarlo con muchas reservas y solo como una guía para tratar de mejorar el diseño de los ensambles de combustibles frescos de recarga.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

TEORIA DE DIFUSION INVERSA

Con base en la teoría de difusión inversa y usando las distribuciones de potencia con parámetros controlados se logró establecer guías generales para obtener recargas seguras y a la vez con utilización óptima del combustible. Las distribuciones de potencia radiales se produjeron mediante el uso de dos polinomios de cuarto grado. Las guías obtenidas se pueden enunciar de la forma siguiente:

La economía del ciclo aumenta cuando: el pico máximo de potencia relativa crece y la posición radial del pico de potencia está en el centro del reactor.

Los núcleos con el pico máximo de potencia en el centro del reactor tienen una distribución de reactividad radial con las características siguientes;

- la reactividad crece linealmente del centro hacia la periferia del núcleo hasta una fracción de radio de alrededor de 0.88, para caer rápidamente a cero en la superficie del núcleo.
- Cuando la pendiente de reactividad lineal radial crece el pico máximo de potencia relativa disminuye, hasta un límite, en el cual surge un segundo pico de potencia en el mismo radio donde se da el pico de reactividad, es decir, alrededor de 0.88 de la fracción radial.

Estas guías nos indican que no se debe evitar en lo posible "valles" y picos de reactividad ya que estos producen picos de potencia no deseables.

APLICACION DE LA DISTRIBUCION DE REACTIVIDAD OBJETO

Se aplicó al ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV el algoritmo de ajuste de la reactividad radial de la recarga a una distribución de reactividad radial OBJETO. La distribución OBJETO se obtuvo de los estudios teóricos realizados con la ecuación de difusión inversa. El ajuste de la reactividad radial de la recarga fue satisfactoria. Sin embargo los resultados de la simulación del ciclo con estas recargas no cumplieron con los márgenes de seguridad. El motivo de esto se atribuye a que el método "descuida" la colocación de los combustibles en el núcleo en el ángulo azimutal. Se intentó mejorar

la generación de la recarga, al incluir en el algoritmo de generación de recargas la estrategia de núcleo dividido en categorías BLANCA-NEGRAS-GRISES. Esto con el objeto de mejorar la distribución azimutal del combustible pero no se logró mayor mejoría. La recarga resultante siguió no satisfaciendo los márgenes de seguridad.

La recomendación es obtener una distribución de reactividad OBJETO no sólo radial sino también azimutal. Con esto, se cree, es posible obtener recargas óptimas y que cumplan con los márgenes de seguridad. Para lograr ésto es necesario desarrollar las ecuaciones de difusión inversa en dos dimensiones usando para su solución métodos numéricos.

METODO BIPARAMETRICO MODIFICADO

Se logró desarrollar un Método Biparamétrico de búsqueda controlada de recargas de combustible optimizado práctico y eficiente.

El Método Biparamétrico Modificado junto con el Método de Búsqueda por escalamiento de Malla dió excelentes resultados al aplicarse a la recarga del ciclo 4 de la unidad 1.

La mejora de las recargas obtenidas respecto a la recarga oficial del ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV fue la extensión del ciclo en casi dos semanas y con mejores márgenes de seguridad. Esto implica, en teoría, un ahorro de varios millones de dólares americanos. Sin embargo el estudio no es concluyente y deben realizarse más pruebas para comprobar que las recargas generadas bajo el método biparamétrico son técnicamente licenciables. Por otra parte, el método resulta práctico y de fácil aplicación y suficientemente rápido. Además las características del mismo permite afirmar que se presta para intentar elaborar algoritmos de búsqueda rápidas y corriendo relativamente muy pocos casos de simulación del núcleo.

La idea de volver más eficiente el proceso de búsqueda de un patrón de recarga "óptimo" es con el fin de que forme parte de un sistema automatizado de programas de cómputo que permita realizar diseños de recargas con análisis de multiciclos y donde se integre el diseño neutrónico de los combustibles frescos. Estos sistemas de diseño integrales, los cuales contemplan todas las fases de diseño (combustible, recarga, patrones de barras, todo bajo un análisis de multiciclos) están siendo desarrollados actualmente por diferentes grupos internacionales (Ref. 4 y 5). El objetivo es lograr mejores normas de diseño del ciclo de combustible y mayor eficiencia de producción de energía para los reactores nucleares de potencia.

Para terminar se espera que lo realizado en este estudio contribuya en el establecimiento de un método de generación práctico de recargas de combustible, en particular para la CNLV.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1- Yung-An Chao, Chauan-Wen Hu, Chang-An Suo, "A theory of Fuel Management via Backward Diffusion Calculation", Nuclear Science and Engineering: 93, 78-87, (1986)
- 2- D.P. Burte, S.G. Vaidya "Parametrization for optimization of reload patterns for boiling water reactors", Ann. Nucl. Energy, Vol. 20, No.4, pp. 237-249, (1993).
- 3- R. Houland, "The CORFU Program for BWR Reload Design", IAEA Technical Committee Meeting on In-Core Fuel Management - Reloading Techniques, Vienna, (1992).
- 4- Kazuki Hida, "Burnup Shape Optimization for BWR Cores by Enrichment and Gadolinia Zoning", Topical Meeting on Advances in Reactor Physics, Knoxville, Tn april 11-15, 1994, Vol II.
- 5- Kenneth D. Hartley "BWR 24-Month Cycle Analysis Using Multi-Cycle Techniques", Siemens Power Corporation - Nuclear Division Richland, WA, USA (1994).
- 6- "Nuclear Station Engineering", General Electric Co., (1988).
- 7- S. Borresen, L. Moberg, T.O. Sauer, "User Manual for PRESTO FMS VOLUMEN II", Scandpower A/S sk/akn/es (1983).
- 8- S. Borresen, L. Moberg, J. Rasmussen, "Methods of PRESTO-B a three-dimensional, BWR core simulation code", Scandpower A/S sk/akn/es (1983).
- 9- Reporte interno ININ, "Seguimiento de operación Ciclo 3 de la Unidad 1 de la CNLV", (1994) .
- 10- CMR C4 U1, Cycle Management Report C-4 CNLV", General Electric Co. (1993).
- 11- IIE, "Banco de Datos Nucleares del Combustible GE98-P8CWB322-9GZ-8DM-150-T Para el Ciclo 4 de la CNLV-1 en condiciones en caliente, a 100% de potencia, en Frío, a 0% de potencia y colapsado, a 100% de potencia", IIE/13/5051/109/P6F3/1/CNOD/93/R2 (1993)
- 12- Luciano Sánchez Herrera, "Program de Utilización de la Energía para la CNLV", DGC de la CFE, (1994).
- 13- Carlos Cortés Campos, "Aplicación del Modelo de Reactividad Lineal en La administración de Combustible para un reactor tipo BWR", Tesis Profesional para obtener el Título de Licenciado en Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, (1991).
- 14- James J. Duderstadt, Louis J. Hamilton "Nuclear Reactor Analysis", Jhon Wiley & Sons, Inc., (1976).
- 15- Reporte interno del ININ "formación del archivo básico para el ciclo 4 de la unidad 1 de la CNLV" (1994)
- 16- John David Jackson, "Classical Electrodynamica", John Wiley & Sons, Inc., (1962).
- 17- John R. Lamarsh "Introduction to Nuclear Reactor Theory", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., (1966).

- 18- George Arfken "Mathematical Methods for Physicists", Academic Press, (1968).
- 19- Melville Clark, Jr., Kent F. Hansen "Numerical Methods of Reactor Analysis", Academic Press, (1964).
- 20- José Luis Montes Tadeo, "Obtención de los Patrones de Barras de Control a Potencia para un Ciclo de Operación de un BWR", Tesis Profesional para obtener el Título de Licenciado en Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, (1994).
- 21- Hearvey W. Graves, Jr. "Nuclear Fuel Management", John Wiley & Sons, Inc., (1979).
- 22- M. J. Driscoll, T.J. Downar "The Linear Reactivity Model for Nuclear Fuel Management", American Nuclear Society., (1990).
- 23- Samuel Glasstone y A. Sesonske "Ingeniería de Reactores Nucleares", Editorial Reverté, S.A., (1978).
- 24- Samuel Glasstone, Milton C. Edlund "The Elements of Nuclear Theory", D. Van Nostrand Company, Inc., (1954).
- 25- James J. Duderstadt, William R. Martin "Teoría de Transporte" Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., (1983).
- 26- Irving Kaplan "Nuclear Physics", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., (1958).
- 27- Philip M. Morese, Herman Feshbach "Methods of Theoretical Physics", McGraw-Hill Book Company, Inc., (1953).
- 28- Francisco Marcellan, Luis Casaus, Alejandro Zarzo "Ecuaciones Diferenciales, Problemas Lineales y Aplicaciones", McGraw-Hill/Interamericana de España, (1990).
- 29- Francis Scheid, "Análisis Numérico", Serie de Compendios SCHAUM, McGraw-Hill, (1972)
- 30- Javier L. Collazo, "Diccionario Enciclopédico de Términos Técnicos Inglés-Español", McGraw-Hill Book Company, (1981).
- 31- Jhon Littel, Cleve Moler, "PC-MATLAB User's Guide", The MathWorks, Inc., (1985)

APENDICE A

CATEGORIAS DE LAS LOCALIDADES DEL NUCLEO Y REGLAS DE COLOCACION PARA LOS REACTORES DE LA CNLV

A continuación se proporciona una descripción de las diferentes categorías y regiones que pueden ser usadas en el diseño de las recargas en la CNLV. También se dan las reglas de colocación de los combustibles. El diagrama de la Figura A.1 se muestra las categorías y regiones relacionadas con la presente descripción.

División del núcleo en zona no-periférica (Tablero de Ajedrez) y no-periférica.

- 1- CATEGORIA BLANCO: Posiciones del núcleo no-periférica donde se colocan los combustibles más reactivos incluyendo los combustibles frescos [En 1/4 de núcleo 46, núcleo completo 184].
- 2- CATEGORIA NEGRA: Posiciones del núcleo no-periféricas donde se colocan los combustibles de reactividad intermedia [44, 176].
- 3- CATEGORIA GRIS: Posiciones del núcleo periféricas donde se colocan los ensambles combustibles menos reactivos [21, 84].

División del núcleo en celdas de combustibles asociadas a los grupos de barras de control.

- 4- CATEGORIA CELDAS A2: Posiciones del núcleo de los canales juntas a las barras de control A2 ,ver Fig. 3.1 [25, 100].
- 5- CATEGORIA CELDAS A1: Posiciones del núcleo de los canales juntas a las barras de control A1 ,ver Fig. 3.1 [32, 128].
- 6- CATEGORIA CELDAS B2: Posiciones del núcleo de los canales juntas a las barras de control B2 ,ver Fig. 3.1 [27, 108].
- 7- CATEGORIA CELDAS B1: Posiciones del núcleo de los canales juntas a las barras de control B1 ,ver Fig. 3.1 [27, 108].

División del Núcleo en Celda CCC (Celdas del Grupo A2) Celdas Juntas a la Celdas CCC (Celdas B1 y B2) y Celdas Diagonales a la Celda CCC (Celdas A1).

- 8- CATEGORIA CELDAS CCC: Celdas A2 donde se colocan los ensambles combustibles menos reactivos y cuyas barras asociadas controlaran a potencia el reactor [25,100].

9- CATEGORIA CELDAS Cadj: Celdas B1 y B2 donde se colocan de preferencia ensambles combustibles no-frescos o no muy reactivos [54, 216].

10- CATEGORIA CELDAS Cdia: Celdas A1 donde se colocan de preferencia los ensambles combustibles más reactivos y frescos [32, 128].

División del núcleo en Diagonales

11- CATEGORIA DIAGONAL PRINCIPAL (D0): Posiciones del núcleo donde puede ponerse ensambles combustibles los más reactivos incluyendo frescos. Estas Posiciones están en el eje de simetría de un octavo y sólo tienen 4 simétricos en el núcleo [9, 36].

12- CATEGORIA DIAGONAL PARES (D0, D2, D4, D6, D8, D10): Posiciones del núcleo donde puede ponerse ensambles combustibles los más reactivos incluyendo frescos [57, 228].

13- CATEGORIA DIAGONAL IMPARES (D1, D3, D5, D7, D9): Posiciones del núcleo donde deben ponerse ensambles combustibles menor o intermedia reactividad (no-reativos ni frescos) [54, 216].

Diferentes regiones del núcleo que tienen relación con el diseño de recargas.

14- REGION EJE DE SIMETRIA X: Posiciones del núcleo adjuntas al eje de simetría X, en simetría espejo (como en la CNLV) el combustible colocado en estas posiciones tendrán un combustible semejante (de otro cuarto de núcleo) adjunto a el por lo que no se recomienda poner combustibles muy reactivos o frescos en estas posiciones [10, 40].

15- REGION EJE DE SIMETRIA Y: Posiciones del núcleo adjuntas al eje de simetría Y, en simetría espejo (como en la CNLV) el combustible colocado en estas posiciones tendrán un combustible semejante (de otro cuarto de núcleo) adjunto a el por lo que no se recomienda poner combustibles muy reactivos o frescos en estas posiciones [10, 40].

16- REGION ANILLO DE FUEGO: Estas posiciones adjuntas a las posiciones más periféricas del núcleo (localidades GRICES) conforman el llamado anillo de fuego. En estas localidades tradicionalmente se colocan combustibles de lo más reactivos incluyendo frescos con el objeto de aplanar la distribución de potencia. En esta región se permite poner en cierta estrategias combustibles frescos cara a cara (FFA Fuel Face Adjunt) [15 60].

Las Reglas generales de colocación de combustibles para el patrón de recarga:

- 1- De acuerdo al principio de control de celdas CCC no debe colocarse combustibles frescos ni de **un quemado**, preferentemente deben colocarse combustibles de lo más quemados.
- 2- De acuerdo al principio de baja fuga radial los combustibles de lo más quemados preferentemente deben de estar en la periferia es decir en las posiciones GRISES.
- 3- Los combustibles nuevos deberán ser colocados preferentemente en las posiciones de categoría BLANCA no CCC y en caso de que el lote de combustibles frescos excediera a las posiciones de estos canales usar las posiciones de la categoría NEGRA Cadj y en caso extremo en las posiciones del ANILLO de FUEGO.
- 4- Los combustibles con **un quemado** (o parcialmente quemado más reactivo) deberán ser colocados en las posiciones no llenadas con combustibles frescos de las posiciones de categoría BLANCA

ESQUEMA A.1
MAPA CON LAS CATEGORIAS DE LOS CANALES DEL CUARTO DE NUCLEO BWR DE LA CNLV

11	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Blanco A2CCCP D0Sc	Negro B2Cadj D1Sx	Blanco B2Cadj D2Sx	Negro A2CCCs D3Sx	Blanco A2CCCs D4Sx	Negro B2Cadj D5Sx	Blanco B2Cadj D6Sx	Negro A2CCCP D7Sx	Blanco A2CCCP D8Sx	Negro B2Cadj D9Sx	Gris B2Cadj D0 SxP1
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Negro B1Cadj D1Sy	Blanco A1Cdia D0S8	Negro A1Cdia D1	Blanco B1Cadj D2	Negro B1Cadj D3	Blanco A1Cdia D4	Negro A1Cdia D5	Blanco B1Cadj D6	Negro B1Cadj D7	Blanco A1Cdia D8	Gris A1Cdia D9 P1
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Blanco B1Cadj D2Sy	Negro A1Cdia D1	Blanco A1Cdia D0S8	Negro B1Cadj D1	Blanco B1Cadj D2	Negro A1Cdia D3	Blanco A1Cdia D4	Negro B1Cadj D5	Blanco B1Cadj D6	Negro A1Cdia D7	Gris A1Cdia D8 P1
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Negro A2CCCs D3Sy1	Blanco B2Cadj D2	Negro B2Cadj D1	Blanco A2CCCP D0S8	Negro A2CCCP D1	Blanco B2Cadj D2	Negro B2Cadj D3	Blanco A2CCCs D4	Negro A2CCCs D5	Blanco B2Cadj D6	Gris B2Cadj D7 P1
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
Blanco A2CCCs D4Sy1	Negro B2Cadj D3	Blanco B2Cadj D2	Negro A2CCCP D1	Blanco A2CCCP D0S8	Negro B2Cadj D1	Blanco B2Cadj D2	Negro A2CCCs D3	Blanco A2CCCs D4	Negro B2Cadj D5	Gris B2Cadj D6 P1
56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
Negro B1Cadj D5Sy	Blanco A1Cdia D4	Negro A1Cdia D3	Blanco B1Cadj D2	Negro B1Cadj D1	Blanco A1Cdia D0S8	Negro A1Cdia D1	Blanco B1Cadj D2	Negro B1Cadj D3	Blanco A1Cdia D4	Gris A1Cdia D5 P1
67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
Blanco B1Cadj D6Sy	Negro A1Cdia D5	Blanco A1Cdia D4	Negro B1Cadj D3	Blanco B1Cadj D2	Negro A1Cdia D1	Blanco A1Cdia D0S8	Negro B1Cadj D1	Blanco B1Cadj D2	Gris A1Cdia D3 P0	Gris A1Cdia D4 P2
78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	
Negro A2CCCP D7Sy1	Blanco B2Cadj D6	Negro B2Cadj D5	Blanco A2CCCs D4	Negro A2CCCs D3	Blanco B2Cadj D2	Negro B2Cadj D1	Blanco A2CCC D0S8	Gris A2CCC D1 P0	Gris B2Cadj D2 P2	
88	89	90	91	92	93	94	95	96		
Blanco A2CCCP D8Sy1	Negro B2Cadj D7	Blanco B2Cadj D6	Negro A2CCCs D5	Blanco A2CCCs D4	Negro B2Cadj D3	Blanco B2Cadj D2	Gris A2CCC D1 P0	Gris A2CCC D0S8P2		
97	98	99	100	101	102	103	104			
Negro B1Cadj D9Sy	Blanco A1Cdia D8	Negro A1Cdia D7	Blanco B1Cadj D6	Negro B1Cadj D5	Blanco A1Cdia D4	Gris A1Cdia D3 P0	Gris B1Cadj D2 P2			
105	106	107	108	109	110	111				
Gris B1Cadj D0 SyP1	Gris A1Cdia D9 P1	Gris A1Cdia D8 P1	Gris B1Cadj D7 P1	Gris B1Cadj D6 P1	Gris A1Cdia D5 P1	Gris A1Cdia D4 P2				

- Blancas = 46
- Negras = 44
- Gris = 21
- Total = 111

- Celdas A2 = 25
- Celdas A1 = 32
- Celdas B2 = 27
- Celdas B1 = 27
- Total = 111

- CCCP Profundas = 9
- CCCs Someras = 12
- CCC Perif. = 4
- Total CCC's = 25
- No CCC's = 86
- Total = 111

- CCC's = 25
- Cadj adjunta = 54
- Cdia diagonal = 32
- Total = 111

- P0 Esquina agua = 4
- P1 1 lado agua = 12
- P2 2 lados agua = 5
- Total Periferia = 21
- No periferias = 90
- Total = 111

- Sc Sim. Central = 1
- Sx Sim. eje X = 10
- Sy Sim. eje Y = 10
- S8 Sim. eje 1/8 = 8
- Total Simetricas = 29
- No Simetricas = 82
- Total = 111

- D0 Diagonal Principal = 9
- D1 Primera Diagonal = 16
- D2 Segunda Diagonal = 16
- D3 Tercera Diagonal = 14
- D4 Cuarta Diagonal = 14
- D5 Quinta Diagonal = 12
- D6 Sexta Diagonal = 10
- D7 Septima Diagonal = 8
- D8 Octava Diagonal = 6
- D9 Novena Diagonal = 4
- D Decima Diagonal = 2
- Total = 111

En Negitas Región
 Anillo de Fuego = 15

APENDICE B

CALCULO DE LOS PESOS DE MALLA FINA PARA EL NUCLEO DE LOS REACTORES DE LA CNLV

El program AREAS.BAS fue elaborado para genera los pesos de la malla fina de cada una de las 64 anillos en que se dividió el núcleo de los reactores de la CNLV. Para la realización de este se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 4. El programa escribe un archivo llamado AREAS.DAT con los pesos de la malla fina calculados y listos para se leído por el program MAPATES.BAS (Ver Apéndice C). A continuación se da el listado del programa en lenguaje Quick-Basic versión 4.5 del programa AREAS.BAS.

***** INICIA LISTADO PROGRAMA AREAS.BAS

```

DECLARE SUB FRAC ( )
DECLARE SUB FILE (R11, RFI)
DECLARE FUNCTION SUMAI (JI, I11, I21)
DECLARE FUNCTION AREA1 (OPS, R1, I1)
DECLARE FUNCTION PITA1 (OPS, A1, B1)
DECLARE FUNCTION AREASI ( )
DIM SHARED FF(70, 16), AA(64, 16), AAT(64), UUNO1J(16, 11)
DIM SHARED KK(70), YY(70), RR(0 TO 70), OOP$(70), II(70), JJ(70), AAR(10)
DIM SHARED NNEW(2, 64)
COMMON SHARED P1, R1, I1, X1, Y1, R2, I2, X2, Y2
COMMON SHARED I1N, AAREAS$
P1 = 3.141593
CLS
IX = 58
FOR I = 1 TO IX
  READ XX(I), YY(I): X = XX(I): Y = YY(I)
  IF Y = 0 THEN RR(I) = X ELSE RR(I) = SQR(X * X + Y * Y)
NEXT I
DATA 1,0, 1,1, 2,0, 2,1, 2,2, 3,0, 3,1, 3,2, 4,0, 4,1
DATA 3,3, 4,2, 5,0, 5,1, 5,2, 4,4, 5,3, 6,0, 6,1, 6,2
DATA 5,4, 6,3, 7,0, 5,5, 6,4, 7,2, 7,3, 6,5, 8,0, 7,4
DATA 8,2, 6,6, 8,3, 7,5, 8,4, 9,0, 9,1, 7,6, 8,5, 9,3
DATA 9,4, 7,7, 8,6, 10,1, 10,2, 9,5, 10,3, 8,7, 10,4, 9,6
DATA 11,0, 11,1, 10,5, 8,8, 9,7, 10,6, 9,8, 11,7
REM DATA 11,0, 11,1, 10,5, 8,8, 9,7, 10,6, 11,4, 9,8, 11,5, 10,7
REM DATA 11,6, 9,9, 10,8, 11,7, 10,9, 11,8, 10,10,11,9, 11,10,11,11

FOR I = 1 TO IX: READ OOP$(I), NNEW(1, I), NNEW(2, I): NEXT I
DATA "010112",1,0
DATA "020113010157",1,0
DATA "020135020212",2,0
DATA "030113020157020245",1,0
DATA "030134030213020257",2,0
DATA "030145030234030322",3,0
DATA "040113030157030245030322",1,0
DATA "040134040213030257030345",2,0
DATA "040145040234040312030356",3,0
DATA "050113040157040245040322030366",1,0
REM FUE 10
DATA "050134050212040256040323030367",2,0
DATA "050144050223040267040335040412",5,0
DATA "050145050234050313040357040445",3,0
DATA "060113050157050245050334050412040456",1,5
DATA "060134060213050257050345050422040466",2,0
DATA "060144060234060312050356050423040467",3,0
DATA "060144060244060323050367050435050512",6,0
DATA "060145060244060334060412050456050544",4,0
DATA "070113060157060245060344060422050466050522",1,0
DATA "070134070213060267060345060422050466050544",2,0
REM FUE 20
DATA "070144070234070312060356060423050467050545",3,0

```

```

DATA "070144070244070323060367060435060512050556", 6, 0
DATA "070145070244070334070412060456060522050566", 4, 0
DATA "080113070157070245070344070422060466060523050567", 1, 0
DATA "080134080212070266070344070423060467060535060612", 2, 8
DATA "080144080223070267070345070444070512060556060622", 6, 0
DATA "080144080234080313070367070445070522060556060622", 3, 0
DATA "080144080244080334080412070466070523060567060645", 4, 0
DATA "080145080244080344080422070466070534070612060656", 7, 0
DATA "090113080157080245080344080423070467070545070622060666", 1, 0
REM FUE 30
DATA "090134090213080257080345080434080512070556070622060666", 2, 6
DATA "090144090234090312080356080444080522070566070623060667", 3, 0
DATA "090144090244090323080367080445080522070566070634070712", 9, 0
DATA "090144090244090334090412080456080523070567070645070723", 4, 0
DATA "090144090244090344090423080467080535080612070656070722", 7, 0
DATA "090145090244090344090434090512080556080622070666070722", 5, 0
DATA "100113090157090245090344090444090522080566080622070666070722", 1, 0
DATA "100134100213090257090345090444090522080566080623070667070745", 2, 0
DATA "100144100234100312090356090444090523080567080635080712070756", 3, 9
DATA "100144100244100323090367090445090534090612080656080722070766", 7, 0
REM FUE 40
DATA "100144100244100334100413090457090545090622080666080722070766", 4, 0
DATA "100144100244100344100434100512090556090622080666080723070767", 5, 0
DATA "100145100244100344100444100522090566090623080667080735080812", 10, 0
DATA "110113100157100245100344100444100522090566090634090712080756080822", 1, 9
DATA "11013410213100257100345100444100522090566090644090722080766080822", 2, 0
DATA "110144110234110312100356100444100523090567090645090722080766080822", 3, 0
DATA "110144110244110323100367100445100534100612090656090722080766080822", 7, 0
DATA "110144110244110334110412100456100544100622090666090723080767080845", 4, 0
DATA "110144110244110344110423100467100545100622090666090734090812080856", 10, 0
DATA "110144110244110344110434110512100556100623090667090745090822080866", 5, 0
REM FUE 50
DATA "110145110244110344110444110512100566100634100712090756090822080866", 8, 0
DATA "120113110157110245110344110444110522100566100644100722090766090822080866", -1, 0
DATA "120134120213110257110345110444110523100567100645100722090766090822080866", -2, 0
DATA "120144120234120312110356110444110534110612100656100722090766090823080867", 7, 0
DATA "120144120244120323110367110445110544110622100666100723090767090845090912", 12, 0
DATA "120144120244120334120412110456110566110623100667100735100812090856090912", 10, 0
DATA "1104A11105A21106A31107A41007A51008A60908A70909A8", 4, 0
DATA "1104B11105B21106B31107B41007B51008B60908B70909B8", -4, 0
REM DATA "120144120244120344120423110467110545110634110712100756100822090866090922"

```

```

CLS : INPUT "1= FORMA AREAS.DAT"; AAREAS%
IF AAREAS% = "1" THEN
  PRINT "GENERA ARCHIVOS AREAS.DAT"
  OPEN "AREAS.DAT" FOR OUTPUT AS #3
END IF

```

```

FOR IIN = 1 TO IX: CALL FRAC: NEXT IIN: CLOSE #3
INPUT DUB

```

```

PRINT
FOR J = 1 TO 11: A$ = STR$(J) + " "; AC = 0
FOR I = J TO 16
  A = UBOUND(J, I): IF (ABS(1 - A) > .1) AND (I <> J) THEN GOTO PPNEXT10
  A$ = A$ + " " + STR$(A): AC = AC + A
NEXT I
PPNEXT10:
PRINT A$: " AC="; AC
NEXT J

```

```

R2 = 1: T2 = P1 / 4
AA(1, 1) = AREA("S", R2, T2)
END

```

```

FUNCTION AREA (OP$, R, T)
IF OP$ = "S" THEN AREA = R * R * T / 2
IF OP$ = "T" THEN AREA = R * T / 2
IF OP$ = "C" THEN AREA = R * T
END FUNCTION

```

```

FUNCTION AREAS

```

```

AREAS1 = AREA("S", R2, T2)
AREAS2 = AREAS1 + AREA("T", X2, Y2)
AREAS3 = AREAS2 - AREA("S", R1, T1)
AREAS = AREAS3 - AREA("T", X1, Y1)
END FUNCTION

SUB FILE (R1, RF)
FOR R = R1 TO RF
  AT = 0
  FOR S = 1 TO 16
    IF AA(R, S) = 0 THEN GOTO F110
    AT = AT + AA(R, S)
  NEXT S
F110:
  AAT(R) = AT + AT
NEXT R
OPEN "C:\TES\MAPA\AREA.OUT" FOR OUTPUT AS #1
FOR R = 1 TO 64
  AT = AAT(R)
  IF AT = 0 THEN CLOSE #1: EXIT SUB
  AS = ""
  FOR S = 1 TO 16:
    IF AA(R, S) = 0 THEN GOTO F120
    FA = AA(R, S) / AT: IF AA(R, (S + 1)) = 0 THEN FA = FA + FA
    AS = AS + ", " + STR$(FA)
  NEXT S
F120:
  AS = STR$(R) + ", " + STR$(S - 1) + AS: PRINT #1, AS
NEXT R: CLOSE #1
END SUB

SUB FRAC
NX = LEN(OOP$(IIN)) \ 6: AT = 0
FOR N = 1 TO NX: GOSUB FRASACA
  IF (OPOS = "A") OR (OPOS = "B") THEN GOSUB FRAPERI: GOTO FRASALTA
  IF N = NX THEN GOSUB FRADIAGONAL: GOTO FRASALTA
  IF OPOS = "12" THEN GOSUB FRA12
  IF OPOS = "13" THEN GOSUB FRA13
  IF OPOS = "22" THEN GOSUB FRA22
  IF OPOS = "23" THEN GOSUB FRA23
  IF OPOS = "34" THEN GOSUB FRA34
  IF OPOS = "35" THEN GOSUB FRA35
  IF OPOS = "44" THEN GOSUB FRA44
  IF OPOS = "45" THEN GOSUB FRA45
  IF OPOS = "56" THEN GOSUB FRA56
  IF OPOS = "57" THEN GOSUB FRA57
  IF OPOS = "66" THEN GOSUB FRA66
  IF OPOS = "67" THEN GOSUB FRA67
FRASALTA:
  AT = AT + AA(IIN, N) * 2
  UUNOIJ(ISA, JSA) = UUNOIJ(ISA, JSA) + AA(IIN, N)
NEXT N
  IF (OPOS = "A") OR (OPOS = "B") THEN
    AT = 2 * PI * (RR(IIN) ^ 2 - RR(IIN - 1) ^ 2) / 8: AT = 1
  END IF
GOSUB FRAMUESTRA
EXIT SUB

FRASACA:
  I1 = (N - 1) * 6 + 1: OP$ = OOP$(IIN)
  ISA = VAL(MID$(OP$, 11, 2)): II(N) = ISA: I1 = I1 + 2
  JSA = VAL(MID$(OP$, 11, 2)): JJ(N) = JSA: I1 = I1 + 2
  OP$ = MID$(OP$, 11, 2)
  OPOS = MID$(OP$, 1, 1)
RETURN

FRADIAGONAL:
  R2 = RR(IIN): T2 = PI / 4
  R1 = RR(IIN - 1): T1 = T2
  AA(IIN, N) = AREA("S", R2, T2) - AREA("S", R1, T1) - SUMA(IIN, 1, (N - 1))
RETURN

FRA12:

```

```

R2 = RR(IIN): X2 = ISA - 1: Y2 = PITA("Y", R2, X2): T2 = ATN(Y2 / X2)
R1 = R2: Y1 = JSA - 1: X1 = PITA("X", R1, Y1): T1 = ATN(Y1 / X1)
AA(IIN, N) = AREAS - X2 * (Y2 - Y1)
RETURN

FRA13:
R2 = RR(IIN): Y2 = JSA: X2 = PITA("X", R2, Y2): T2 = ATN(Y2 / X2)
R1 = R2: Y1 = Y2 - 1: X1 = PITA("X", R1, Y1): T1 = ATN(Y1 / X1)
AA(IIN, N) = AREAS - X2
RETURN

FRA22:
R2 = RR(IIN): X2 = ISA - 1: Y2 = PITA("Y", R2, X2): T2 = ATN(Y2 / X2)
R1 = RR(IIN - 1): X1 = X2: Y1 = PITA("Y", R1, X1): T1 = ATN(Y1 / X1)
AA(IIN, N) = AREAS - (Y2 - Y1) * X1 - SUMA(IIN, 1, (N - 1))
RETURN

FRA23:
GOSUB FRA22
RETURN

FRA34:
GOSUB FRA44
RETURN

FRA35:
GOSUB FRA44
RETURN

FRA44:
R2 = RR(IIN): Y2 = JSA: X2 = PITA("X", R2, Y2): T2 = ATN(Y2 / X2)
R1 = RR(IIN - 1): Y1 = Y2: X1 = PITA("X", R1, Y1): T1 = ATN(Y1 / X1)
AA(IIN, N) = AREAS - SUMA(IIN, 1, (N - 1))
RETURN

FRA45:
GOSUB FRA44
RETURN

FRA56:
GOSUB FRA66
RETURN

FRA57:
R2 = RR(IIN - 1): Y2 = JSA - 1: X2 = PITA("X", R2, Y2): T2 = ATN(Y2 / X2)
R1 = R2: Y1 = JSA: X1 = PITA("X", R1, Y1): T1 = ATN(Y1 / X1)
AA(IIN, N) = X2 + AREAS
RETURN

FRA66:
R2 = RR(IIN): Y2 = JSA: X2 = PITA("X", R2, Y2): T2 = ATN(Y2 / X2)
R1 = RR(IIN - 1): Y1 = JSA: X1 = PITA("X", R1, Y1): T1 = ATN(Y1 / X1)
AA(IIN, N) = AREAS - SUMA(IIN, 1, (N - 1))
RETURN

FRA67:
GOSUB FRA66
RETURN

FRAMUESTRA:
AC = 0
AS = STR$(RR(IIN)) + ", " + STR$(2 * NX - 1)
FOR N = 1 TO NX
  A = AA(IIN, N) / AT: IF N = NX THEN A = A + A
  FF(IIN, N) = A: AC = AC + A
  AS = AS + ", " + STR$(II(N)) + ", " + STR$(JJ(N)) + ", " + STR$(A)
NEXT N
FOR N = (NX - 1) TO 1 STEP -1
  A = AA(IIN, N) / AT
  FF(IIN, N) = A: AC = AC + A
  AS = AS + ", " + STR$(II(N)) + ", " + STR$(JJ(N)) + ", " + STR$(A)
NEXT N
AS = AS + ", " + STR$(NNEW(1, IIN)) + ", " + STR$(NNEW(2, IIN))

```

```

' PRINT AS; " IIN"; IIN; " AC="; AC; : 'INPUT DUS
IF AAREAS$ = "1" THEN PRINT #3, AS
RETURN

FRAPER1:
IF DPOS = "B" THEN AA(IIN, N) = AAR(N): RETURN
IF (OP$ = "A1") THEN
R1 = RR(IIN - 1): X1 = ISA: Y1 = PITA("Y", R1, X1)
R2 = R1: Y2 = JSA: X2 = PITA("X", R2, Y2)
AR = ABS(X2 - X1) * ABS(Y2 - Y1) / 2!
AA(IIN, N) = AR
AAR(N) = 0
END IF
IF (OP$ = "A2") OR (OP$ = "A5") THEN
R1 = RR(IIN): X1 = ISA: Y1 = PITA("Y", R1, X1)
R2 = R1: Y2 = JSA: X2 = PITA("X", R2, Y2)
AR = ABS(X2 - X1) * ABS(Y2 - Y1) / 2!
AA(IIN, N) = 1 - UUNOIJ(ISA, JSA) - AR
AAR(N) = AR
END IF
IF OP$ = "A3" THEN
R1 = RR(IIN): Y1 = JSA - 1: X1 = PITA("X", R1, Y1)
R2 = R1: Y2 = JSA: X2 = PITA("X", R2, Y2)
AR = (ISA - X1) + ABS(X2 - X1) * ABS(Y2 - Y1) / 2!
AA(IIN, N) = 1 - UUNOIJ(ISA, JSA) - AR
AAR(N) = AR
END IF
IF OP$ = "A4" THEN
R1 = RR(IIN): Y1 = JSA - 1: X1 = PITA("X", R1, Y1)
R2 = R1: X2 = ISA - 1: Y2 = PITA("X", R2, X2)
AR = ABS(X2 - X1) * ABS(Y2 - Y1) / 2!
AA(IIN, N) = AR
AAR(N) = 1! - AR
END IF
IF OP$ = "A6" THEN
R1 = RR(IIN): Y1 = JSA - 1: X1 = PITA("X", R1, Y1)
X2 = ISA - 1: Y2 = JSA
AR = ABS(X2 - X1) * ABS(Y2 - Y1) / 2!
AA(IIN, N) = AR - UUNOIJ(ISA, JSA)
AAR(N) = 1! - AR
END IF
IF OP$ = "A7" THEN
AA(IIN, N) = 1 - UUNOIJ(ISA, JSA)
AAR(N) = 0
END IF
IF OP$ = "A8" THEN
AR = .25
AA(IIN, N) = .5 - UUNOIJ(ISA, JSA) - AR
AAR(N) = AR
END IF
RETURN

END SUB

FUNCTION PITA (OP$, A, B)
IF (OP$ = "X") OR (OP$ = "Y") THEN PITA = SQR((A * A) - (B * B))
END FUNCTION

FUNCTION SUMA (J, I1, I2)
S = 0
FOR I = I1 TO I2: S = S + AA(J, I): NEXT I
SUMA = S
END FUNCTION

***** FIN LISTADO PROGRAMA AREAS.BAS

```

APENDICE C

PROGRAMA MAPATES

El programa MAPATES produce al ejecutarse un archivo de salida con la información más importante relacionada con los datos de entrada y salida. A continuación se reproduce el archivo de salida FEMEUS.DOC generado al desarrollarse el estudio FE

CAMBIOS: Sin Intercambios

FE = LMS DES. .AMOC\6BDC\HECERAS ID-COP, NUNTA MODIFICADO

TABLA DE DESCARGA PUESTO: (PROYECTO)C:\FES\MAPA\C4\BA\AMOC.SU2 C:\FES\MAPA\C4\

NO.	PRICIDAD	IDENTIFICADOR	CANAL	KINTIVITA	QUERIDO	CUADRANTE
1	63	93749	94	1.104402	0.	0
2	62	83003	75	1.104658	0.	0
3	111	62334	84	1.100578	10473.2	0
4	110	62390	74	1.099780	10514.5	0
5	100	62338	100	1.093736	12107.8	0
6	109	62358	63	1.093696	12699.3	0
7	100	62362	102	1.085112	13004.1	0
8	101	62374	65	1.084446	13479.3	0
9	103	62354	101	1.083394	13631.5	0
10	56	73204	83	1.043196	0.	0
11	102	62406	54	1.083154	13652.5	0
12	51	73224	63	1.043124	0.	0
13	57	73200	90	1.042956	0.	0
14	43	73256	31	1.042944	0.	0
15	107	62366	10	1.082868	13176.5	0
16	106	62346	97	1.082834	13189.2	0
17	105	62342	99	1.082254	13166.7	0
18	104	62394	13	1.082034	13187.1	0
19	30	73276	19	1.07854	0.	0
20	55	73208	79	1.078538	0.	0
21	47	73240	51	1.077306	0.	0
22	54	73212	72	1.077196	0.	0
23	50	73228	61	1.078374	0.	0
24	92	62370	85	1.076	14151.6	0
25	96	62382	98	1.075168	13947.0	0
26	42	73260	29	1.074586	0.	0
27	53	73216	69	1.07455	0.	0
28	95	62378	21	1.074478	14104.2	0
29	35	73288	7	1.074274	0.	0
30	52	73220	67	1.074262	0.	0
31	45	73248	39	1.073944	0.	0
32	34	73292	3	1.07389	0.	0
33	39	73272	23	1.073866	0.	0
34	49	73232	59	1.073842	0.	0
35	41	73264	27	1.073092	0.	0
36	46	73244	47	1.073062	0.	0
37	36	73284	15	1.073014	0.	0
38	44	73252	35	1.072984	0.	0
39	40	73268	25	1.072708	0.	0

40	37	73280	17	1.072588	0.	0
41	48	73236	57	1.072558	0.	0
42	93	62386	40	1.056982	14186.2	0
43	91	62402	70	1.056856	14172.1	0
44	97	62350	58	1.05639	13981.6	0
45	94	62398	28	1.05371	14107.8	0
46	99	62294	56	1.052582	9987.0	0
47	98	62306	6	1.052526	9992.8	0
48	90	62298	89	1.05196	11327.4	0
49	89	62314	20	1.051758	11348.4	0
50	88	62382	60	1.038052	11961.2	8
51	85	62310	12	1.02935	11354.2	0
52	84	62326	2	1.02924	11363.7	0
53	87	62322	36	1.026948	13115.6	0
54	86	62330	26	1.026442	13126.9	8
55	83	62318	50	1.026478	13172.1	0
56	82	61175	91	1.822004	26652.8	0
57	80	61195	42	1.021404	16685.9	0
58	78	61179	88	1.010042	17854.5	8
59	81	61171	45	1.009884	36681.6	0
60	77	61211	9	1.009812	17878.7	0
61	79	61201	5	1.009508	16728.9	0
62	74	61223	53	1.006042	26446.8	0
63	73	61251	92	1.001844	16984.1	0
64	74	61231	72	1.001744	25949.2	0
65	75	61219	62	1.00108	16018.7	0
66	68	61187	82	.991054	19929.4	0
67	67	61199	52	.990794	19953.1	8
68	70	61255	80	.98982	17237.7	8
69	69	61218	30	.989344	13294.9	0
70	72	61207	14	.986620	19521.8	0
71	71	61191	24	.986588	19524.6	8
72	64	61183	49	.882612	20353.2	0
73	66	61215	34	.980902	17766.0	0
74	65	61227	4	.980124	17868.1	0
75	61	61243	78	.959278	21168.3	0
76	60	61235	8	.959096	21193.3	0
77	59	61259	16	.95081	21716.9	0
78	58	61247	46	.950844	21718.0	0
79	33	20286	64	.947078	13054.5	0
80	31	20360	93	.94642	13100.0	0
81	32	20338	41	.94112	13020.7	0
82	30	20347	81	.940084	13233.5	0
83	29	20305	13	.936494	13261.0	8
84	28	20332	37	.935784	33358.6	0
85	27	30632	87	.918846	21411.4	0
86	24	30629	104	.913034	22150.5	0
87	23	30512	110	.908402	22964.8	0
88	22	20322	77	.907608	18161.4	0
89	20	20350	121	.907426	18155.3	0
90	19	30585	66	.90463	23428.1	0
91	18	20177	109	.901108	18290.5	0
92	17	20345	55	.90049	18405.8	0
93	21	30634	305	.900286	23410.7	0
94	15	19404	96	.899734	23117.2	0
95	26	30447	38	.896652	21003.3	0
96	25	30401	48	.896626	21007.7	0
97	14	30422	31	.896132	23952.8	0

98	11	10556	76	.895358	23866.5	0
99	13	20264	107	.894278	18881.9	0
100	12	20281	33	.893698	18950.6	0
101	6	10503	103	.893394	23807.7	0
102	7	10394	95	.892148	23782.5	0
103	9	10461	86	.891964	23685.1	0
104	5	20294	108	.890892	19429.8	0
105	4	20333	44	.89085	19455.2	0
106	3	20288	22	.888866	19606.0	0
107	2	20360	206	.888618	19621.4	0
108	16	10641	18	.888992	23080.2	0
109	18	10473	1	.883158	23938.5	0
110	1	10382	73	.878764	24405.7	0
111	8	10427	68	.878448	23787.2	0

ESTRANGULAMIENTOS PARTIDAS PRESTO 130000, ARCHIVO:C:\TES\MAPA\C4\GEN\OPN4.T33

Identificador PRESTO Tipo de Combustible Quinta Dígito	Asignación PRESTO Estrangulamiento	
	Interno	Externo
1	0	0
2	1	2
3	1	2
4	3	0
5	3	0
6	3	0
7	3	8
8	4	0
9	1	0
10	0	8
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	8	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0

POT.NUCLEO NOMBRADO. Secuencia: blancas(OUT-IN),Negras(IN-OUT),Grises(IN-OUT)

| NO. CANAL POTx POT |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Sec. Nuc. 1000 Ord. |
1N 102 658 90	31B 59 1258 32	61N 28 1284 29	91G 95 611 91
2B 65 656 89	32B 49 1271 31	62N 58 1282 30	92G 84 611 82
3B 94 754 86	33B 17 1298 28	63N 68 1229 36	93G 76 559 93
4B 75 752 85	34B 57 1300 27	64N 18 1227 37	94G 103 560 94
5B 43 759 84	35B 47 1333 22	65N 50 1220 38	95G 105 519 95
6B 100 758 83	36B 27 1335 21	66N 60 1218 39	96G 11 520 96
7B 85 779 82	37B 37 1345 20	67N 40 1146 42	97G 22 511 97
8B 21 799 79	38B 45 1356 17	68N 70 1184 43	98G 106 512 98
9B 98 798 78	39B 5 1358 16	69N 8 1137 47	99G 107 499 99

300	53	911	73	400	25	1304	13	700	78	1110	68	1000	33	500	100
110	92	909	78	410	15	1306	12	710	30	1113	51	1010	64	400	101
120	31	978	67	420	25	1304	9	720	80	1115	52	1020	108	401	102
130	90	976	66	430	1	1416	6	730	72	1088	53	1030	109	450	103
140	81	963	63	440	21	1410	5	740	62	1090	54	1040	55	451	104
150	61	946	64	450	13	1424	4	750	82	1045	57	1050	96	448	105
160	06	1001	41	460	1	1410	1	760	52	1047	58	1060	87	425	106
170	9	1000	60	470	2	1433	2	770	89	992	62	1070	104	424	107
180	73	1010	59	480	12	1431	3	780	20	994	63	1080	110	396	108
190	01	1040	56	490	14	1410	7	790	42	950	68	1090	66	390	109
200	41	1046	55	500	24	1408	8	800	91	952	69	1100	77	339	110
210	19	1130	50	510	34	1393	10	810	74	900	72	1110	111	340	111
220	79	1129	49	520	4	1391	11	820	84	902	73				
230	51	1145	48	530	36	1371	14	830	93	846	74				
240	71	1147	45	540	26	1369	15	840	64	848	75				
250	63	1164	44	550	46	1350	18	850	10	805	76				
260	29	1211	41	560	16	1340	19	860	97	806	77				
270	69	1213	40	570	48	1310	23	870	32	783	80				
280	67	1235	35	580	38	1300	21	880	99	784	81				
290	7	1237	34	590	6	1307	25	890	101	719	87				
300	39	1256	33	600	56	1306	26	900	54	720	88				

CAMBIO: Sin Intercambio FVA1(Diario/Oficial)= 1.007346
 POT. MEC. HANDE./SEC.: 01(OVT-IB)Mj(DI-OVT)Gr(DI-OVT)/Kin: Carpa Oficial y Basica

NO.	TIPO	CAMB.	POTs	POT	Kin	Kin-orden	Kin	Kin-orden
Sec.	Secund.	Wc.	1900	Ord.	Oficial	Oficial	Basica	Basica
1	Bianco	102	650	90	1.005112	7	1.005112	7
2	Bianco	65	656	89	1.004406	8	1.004406	8
3	Bianco	94	754	86	1.106402	1	1.106402	1
4	Bianco	75	752	85	1.104650	2	1.104650	2
5	Bianco	43	759	84	1.093696	6	1.093696	6
6	Bianco	100	754	83	1.093736	5	1.093736	5
7	Bianco	85	779	82	1.076	24	1.076	24
8	Bianco	21	799	79	1.074470	28	1.074470	28
9	Bianco	98	790	78	1.075160	25	1.075160	25
10	Bianco	53	911	71	1.006042	62	1.006042	62
11	Bianco	92	909	70	1.001004	61	1.001004	61
12	Bianco	31	970	67	1.002944	14	1.002944	14
13	Bianco	90	976	66	1.002956	13	1.002956	13
14	Bianco	83	960	65	1.003196	10	1.003196	10
15	Bianco	63	964	64	1.003120	12	1.003120	12
16	Bianco	80	1001	61	1.010042	50	1.010042	50
17	Bianco	9	1000	60	1.009012	60	1.009012	60
18	Bianco	73	1010	59	.070704	110	.070704	110
19	Bianco	01	1040	56	.040004	82	.040004	82
20	Bianco	41	1046	55	.04112	81	.04112	81
21	Bianco	10	1130	50	1.07054	19	1.07054	19
22	Bianco	79	1129	49	1.070520	20	1.070520	20
23	Bianco	51	1145	48	1.077206	21	1.077206	21
24	Bianco	71	1147	45	1.077196	22	1.077196	22
25	Bianco	61	1164	44	1.076376	23	1.076376	23
26	Bianco	29	1211	41	1.074506	26	1.074506	26
27	Bianco	69	1213	40	1.07455	27	1.07455	27
28	Bianco	67	1235	35	1.074262	30	1.074262	30
29	Bianco	7	1237	34	1.074274	29	1.074274	29
30	Bianco	39	1256	33	1.073946	31	1.073946	31

31	Blanco	59	1258	32	1.073842	34	1.073842	34
32	Blanco	49	1271	31	.982632	72	.982632	72
33	Blanco	17	1298	28	1.072588	40	1.072588	40
34	Blanco	57	1300	27	1.072558	41	1.072558	41
35	Blanco	47	1333	22	1.073062	36	1.073062	36
36	Blanco	27	1335	21	1.873092	35	1.873092	35
37	Blanco	37	1345	20	.935704	84	.935704	84
38	Blanco	45	1356	17	1.009884	59	1.009884	59
39	Blanco	5	1358	14	1.009508	61	1.009508	61
40	Blanco	35	1384	13	1.072984	38	1.072984	38
41	Blanco	15	1386	12	1.073014	37	1.073014	37
42	Blanco	25	1394	9	1.072708	39	1.072708	39
43	Blanco	3	1414	6	1.07389	32	1.07389	32
44	Blanco	23	1418	5	1.873866	33	1.873866	33
45	Blanco	13	1424	4	.936694	83	.936694	83
46	Blanco	1	1439	1	.883158	109	.883158	109
47	Negro	2	1433	2	1.02924	52	1.00578	3
48	Negro	12	1431	3	1.02935	51	1.899788	4
49	Negro	14	1410	7	.946620	70	1.04354	9
50	Negro	24	1408	8	.946588	71	1.041154	11
51	Negro	34	1393	10	.980902	73	1.042868	15
52	Negro	4	1391	11	.980124	74	1.042834	14
53	Negro	34	1371	14	1.026944	53	1.042254	17
54	Negro	26	1369	15	1.026842	54	1.042024	18
55	Negro	46	1350	18	.950884	78	1.056982	42
56	Negro	16	1348	19	.95092	77	1.056854	43
57	Negro	44	1310	23	.894626	96	1.05439	44
58	Negro	38	1308	24	.894652	95	1.05371	45
59	Negro	6	1307	25	1.852526	47	1.052582	46
60	Negro	56	1306	26	1.852582	46	1.052526	47
61	Negro	28	1284	29	1.05371	65	1.05196	48
62	Negro	58	1282	30	1.05419	44	1.051758	49
63	Negro	68	1289	36	.878444	111	1.848052	50
64	Negro	18	1227	37	.884982	108	1.02935	51
65	Negro	50	1220	38	1.025878	55	1.02824	52
66	Negro	60	1318	39	1.838052	50	1.028944	53
67	Negro	40	1186	42	1.056982	42	1.026842	54
68	Negro	70	1184	43	1.056854	43	1.025878	55
69	Negro	8	1137	47	.959896	76	1.022804	56
70	Negro	78	1134	48	.959278	75	1.021804	57
71	Negro	30	1113	51	.949344	69	1.001744	64
72	Negro	80	1115	52	.94942	68	1.001508	65
73	Negro	72	1088	53	1.001744	64	.991054	66
74	Negro	62	1090	54	1.001508	65	.990794	67
75	Negro	82	1045	57	.991854	66	.98982	68
76	Negro	52	1047	58	.990794	67	.989344	69
77	Negro	89	992	62	1.05196	48	.986420	70
78	Negro	20	994	63	1.051758	49	.986588	71
79	Negro	42	950	68	1.021604	57	.980902	73
80	Negro	91	952	69	1.022084	56	.980124	74
81	Negro	74	900	72	1.099788	4	.959278	75
82	Negro	84	902	73	1.100578	3	.959096	76
83	Negro	93	844	74	.94642	80	.95092	77
84	Negro	64	848	75	.947878	79	.950884	78
85	Negro	10	805	76	1.042868	15	.947878	79
86	Negro	97	806	77	1.042814	16	.94642	80
87	Negro	32	783	80	1.042024	18	.918046	85
88	Negro	99	784	81	1.042254	17	.918034	86

89 Negro	101	719	87	1.00354	9	.908402	87
90 Negro	54	720	80	1.00354	11	.907600	88
91 Gris	95	611	91	.892148	102	.907426	89
92 Gris	86	613	92	.891964	103	.90443	90
93 Gris	76	559	93	.895358	98	.901108	91
94 Gris	103	560	94	.893396	101	.90049	92
95 Gris	105	519	95	.900286	93	.900286	93
96 Gris	11	520	96	.896132	97	.899734	94
97 Gris	22	511	97	.888866	106	.896652	95
98 Gris	106	512	98	.888610	107	.896626	96
99 Gris	107	499	99	.894228	99	.896132	97
100 Gris	33	500	100	.893698	100	.895358	98
101 Gris	44	680	101	.89065	105	.894228	99
102 Gris	108	481	102	.896892	104	.893698	100
103 Gris	109	450	103	.901100	91	.893396	101
104 Gris	55	651	104	.90049	92	.892148	102
105 Gris	86	648	105	.899734	94	.891964	103
106 Gris	87	825	106	.918046	85	.890892	104
107 Gris	104	426	107	.913034	86	.89065	105
108 Gris	110	396	108	.908402	87	.888866	106
109 Gris	66	398	109	.90463	90	.888610	107
110 Gris	77	338	110	.907600	88	.884902	108
111 Gris	111	340	111	.907626	88	.878446	111

EVALUACION Kinf OML NUCLEO: 1.014138 1.021508
(Kinf basica)/Kinf oficial)= 1.007346

***** CAMBIO: Sin Intercambios EVAL(Dinero/Oficial)= 2.007346

Carga OFICIAL IV CUADRANTE Identificadores de Combustibles PRESTO

[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
[22] 30473	42326	73292	41227	51203	42106	73288	41235	51211	62366	30422
[20] 42310	20305	51207	73284	41259	73280	30661	73276	42314	62378	20288
[18] 73272	51191	73268	42330	73264	62390	73260	41239	73256	62394	20281
[16] 41235	73252	42322	20332	30447	73248	62386	20330	51195	62358	20333
[14] 51171	41247	73248	30401	51182	42318	73240	51199	41223	62406	20365
[12] 42294	73236	82350	73232	42302	73228	41219	73224	20288	62374	30545
[10] 73220	30427	73218	42402	73212	41231	10382	62390	83003	30556	20322
[08] 43283	73200	41255	20347	51187	73204	62334	62370	30461	30432	
[06] 51179	42290	73200	51175	41251	20360	93749	30394	20404		
[04] 62346	42282	62342	62338	62354	62342	30503	30629			
[02] 30634	20348	20314	20294	20277	30512	20350				

Carga OFICIAL IV CUADRANTE Constante de Multiplicacion Infinita(Kinf)

[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
[22] 80319	1.0292	3.0738	.98012	1.0095	1.0923	1.0742	.99909	3.0098	1.0428	.89613
[20] 1.0293	.93669	.98662	1.0730	.95092	1.0725	.88498	1.0785	1.0517	1.0744	.88886
[18] 1.0730	.90650	1.0727	1.0268	1.0730	3.0537	1.0745	.98934	1.0829	1.0820	.89369
[16] .90090	1.0729	1.0269	.93570	.89665	1.0739	1.0569	.94112	1.0216	1.0936	.89065
[14] 1.0098	.95080	1.0730	.89662	.98263	1.0258	1.0772	.99079	1.0060	1.0831	.90049
[12] 1.0525	1.0725	1.0543	1.0730	1.0380	1.0763	1.0010	1.0831	.94707	1.0848	.90463
[10] 1.0742	.87844	1.0745	1.0568	1.0771	1.0917	.87876	1.0907	1.1046	.89535	.90760
[08] .95927	1.0785	.90942	.94080	.99105	1.0831	1.1005	1.076	.89196	.91804	
[06] 1.0180	1.0519	1.0829	1.0220	1.0018	.94442	1.1064	.89214	.89973		
[04] 1.0828	1.0751	1.0822	1.0937	1.0825	1.0851	.89339	.91303			
[02] .90038	.88861	.89422	.89089	.90110	.90840	.90742				

Carga OFICIAL IV CUADRANTE Quemedo por combustible en MMD/WT

[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

[22]	23939	13366		17868	16729	9993		21193	17879	13177	23953
[20]	13356	13261	19522		21717		23080		11348	14104	19606
[18]		19525		13127		14108		17295		13187	18951
[16]	17764		13116	13359	21003		14144	13021	16486	12099	19455
[14]	16682	21718		21008	20353	13472		19953	16447	13652	18406
[12]	9967		13082		11861		16019		13055	13879	23428
[10]		21707		14172		15949	24406	10515		23867	18161
[08]	21168		17218	13134	19929		10473	14152	23685	21432	
[06]	17855	11327		16651	16984	13100		23783	23117		
[04]	13189	13587	13167	12108	13612	13884	23808	22152			
[02]	23411	19621	18882	19430	18291	22965	18155				

Carga OFICIAL IV CUMMAYTE Orden de Mayor a Menor Kinf Mec. C.

[22]	[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
102	20	78	47	33	14	77	52	25	5	98	
27	83	40	76	53	75	96	74	21	17	109	
73	41	72	26	71	18	70	83	69	8	100	
46	68	25	84	86	67	29	80	32	3	108	
21	34	64	87	48	29	63	45	38	10	95	
13	64	15	83	24	62	37	81	79	11	92	
60	104	58	22	58	36	111	2	50	101	90	
51	57	42	82	44	56	3	20	103	85		
34	22	55	30	39	81	49	105	97			
4	16	7	4	9	12	106	88				
93	110	99	107	94	89	92					

***** CAMBIOS: Sin Intercambios NVA(Diseño/Oficial)= 1.607346

Carga BASICA IV CUMMAYTE Identificadores de Combustible PNESTO

[22]	[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
30473	62334	73292	62366	51203	62294	73288	51175	51211	20284	30406	
62398	20309	62354	71284	62402	73280	62310	73276	51191	62378	30647	
73272	62426	73268	62394	73264	62298	73260	62311	71256	30632	30556	
62366	73252	62342	20332	62398	73244	62330	20338	62125	62358	20364	
51171	62386	71244	62398	51183	62326	73260	61239	61223	20323	30394	
62386	73236	62314	71232	62322	73228	51199	73224	61247	62374	20368	
73238	62362	73216	62318	73212	51187	30382	61243	81083	20377	30641	
51195	73288	61239	20347	61255	73284	61235	62378	30585	20294		
51179	51287	73288	61237	61251	61259	93748	20350	30461			
20360	62382	30629	62338	30513	62362	20345	20333				
30634	30481	30422	20281	30503	20288	30477					

Carga BASICA IV CUMMAYTE Constante de Multiplicacion Infinita(Kinf)--(Nuevo)

[22]	[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
1.02115	1.1045	1.0730	1.0828	1.0695	1.0525	1.0742	1.0220	1.0496	1.0707	0.9973	
1.0997	1.1649	1.0815	1.0738	1.0568	1.0725	1.0291	1.0785	1.0458	1.0744	0.9665	
1.0738	1.0831	1.0727	1.0628	1.0730	1.0519	1.0743	1.0617	1.0829	1.0804	0.9515	
1.0828	1.0729	1.0822	1.0578	1.0537	1.0719	1.0268	1.0412	1.0690	1.0936	0.9422	
1.0698	1.0569	1.0738	1.0543	1.0263	1.0292	1.0772	1.0634	1.0660	1.0760	0.9216	
1.0525	1.0725	1.0517	1.0738	1.0249	1.0763	1.0679	1.0831	1.0508	1.0848	0.8861	
1.0742	1.0386	1.0745	1.0258	1.0771	1.0195	0.8776	0.9927	1.1046	1.0110	0.8498	
1.0216	1.0785	1.0610	1.0688	1.0982	1.0831	1.0505	1.076	1.0643	1.0889		
1.0386	1.0662	1.0829	1.0812	1.0818	1.0592	1.1064	1.0782	0.9196			
1.0662	1.0791	1.1302	1.0927	1.0848	1.0852	1.0849	0.9065				
1.0828	1.0662	1.1112	0.9363	0.9329	1.0888	0.7844					

Carga BASICA IV CUMMAYTE Quemas por combustible en BQ/WT--(Nuevo)

[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
[22] 21939	10473		13189	16729	9987		16653	17079	13055	23117
[20] 10315	13261	13612		14172		13354		19325	14104	23003
[18]	13652		13187		11127		15949		21413	23867
[16] 13177		13187	13359	14108		13127	13021	17766	12099	18883
[14] 16482	14146		13982	20353	13364		17295	16447	18161	23781
[12] 9993		11348		13116		19953		21718	13879	19621
[10]	11961		13472		19929	24406	21168		18291	23080
[08] 16486		16019	13176	17234		21193	14152	23428	19430	
[06] 17855	19522		17868	16984	21717		18155	23685		
[04] 13100	13987	22391	12168	22965	13084	18466	19455			
[02] 23411	21988	23953	18951	23808	19606	23787				

Carga BASICA TV CIUDADAJE Orden de Mayor a Menor Inf. Nuc. C. (-=Nuevo)

[23]	[25]	[27]	[29]	[31]	[33]	[35]	[37]	[39]	[41]	[43]
[22] 102	1	78	6	33	11	77	30	15	79	97
[20] 2	83	9	76	21	75	27	74	41	17	86
[18] 73	10	72	8	71	22	70	36	89	85	301
[16] 5	68	7	84	18	67	26	80	46	3	89
[14] 31	19	66	15	48	28	65	43	38	90	105
[12] 14	64	23	63	25	62	45	61	56	11	110
[10] 60	26	59	29	58	44	111	51	50	94	96
[08] 32	57	17	82	42	56	52	28	83	107	
[06] 34	40	55	47	39	53	69	92	103		
[04] 81	36	88	8	89	12	95	108			
[02] 91	87	98	100	106	109	104				

APENDICE D

PROGRAMA UUPRI.M

El programa UUPRI.M y sus subrutinas se escribieron en el lenguaje del paquete MATLAB. Este programa genera las distribuciones de potencia radial controlando sus características en base a dos polinomios bajo las condiciones discutidas en el capítulo 5. Una vez calculada la distribución de potencia, el sistema de programas calcula la distribución de reactividad radial correspondiente así como el Potencial de Combustible. A continuación se lista el programa UUPRI.M y las subrutinas que permiten los cálculos de difusión inversa relatados en el Capítulo 5.

```

***** INICIA LISTADO PROGRAMA PRINCIPAL, UUPRI.M

potori=.78, potmax=1.50 % est. (17/nov/94),
pausa=0
ro=0;rf=1;
radiocm=102;
l1=7.525;d1=1.46612;beta1=.44
radf=radiocm/l1;alfal=(1/2)*(1-beta1)*(1+beta1);
i0radf=besseli0(radf);ilradf=besseli1(radf);
a0=radf*i0radf*(ilradf+(alfal*l1/d1)*i0radf);
n=100;h=(rf/n);R=0:h:rf;indrmax=max(size(R));
RAD=R.*radf
IO=besseli0(RAD);KO=besselk0(RAD);

RMV=[.01 .10 .20 .30 .40 .45 .50];
%RMV=[.55 .60 .65 .70 .75 .80 .85];
grid
for caso = 1:7
  rm=RMV(caso)
  [AC,BC,araa]=uupolil(pausa,rm,potori,potmax);
  AREAA(caso)=araa
  indrm=min(find((R>=rm) & (R<=(rm+h))),R(indrm));
  if pausa==1, pause, end
  POLA=polyval(AC,R(1:indrm));POLB=polyval(BC,R((indrmax+1):indrmax));
  POL={POLA,POLB};areatest=uusim(POL,h)
  PM={PM,POL'}
  if pausa==1, pause, end
  S1=POL.*(IO.*RAD);
  if pausa==1, pause, end
  isl=uusim(S1,h);axs1=isl/a0;
  for indrk=2:(n-1);
    KFAST(indrk)=uukfast(pausa,POL,IO,KO,RAD,h,axs1,indrck);
  end
  KFAST(1)=KFAST(2);KFAST(n)=0;KFAST(n+1)=0;kmean1=mean(KFAST(2:(n-1)));
  % KFAST=KFAST./kmean1
  KMEAN(caso)=kmean1;
  plot(RAD,KFAST,'o');
  if pausa==1, disp('kfast pri'), pause, end
  KM={KM,KFAST'};
  KR=(KFAST.*R);FUELP(caso)=(2*pi)*uusim(KR,h)
end

***** FIN LISTADO PROGRAMA PRINCIPAL, UUPRI.M

```

```

***** INICIA LISTADO DE LA SUBROUTINA QUE CALCULA LA FUNCION DE BESSEL IO(z)

function y = besseli0(z)
% BESSEL MODIFICADA DE PRIMERA CLASE ORDEN CERO IO(z)
i=sqrt(-1);
y=besseln(0,i*z);

***** FIN LISTADO DE LA SUBROUTINA QUE CALCULA LA FUNCION DE BESSEL IO(z)

***** INICIA LISTADO DE LA SUBROUTINA QUE CALCULA LA FUNCION DE BESSEL K0(z)

function y = bessell0(z)
% BESSEL MODIFICADA DE SEGUNDA CLASE ORDEN CERO KO(z)
i=sqrt(-1);
y=besselh(0,i*z)*pi*i/2;

***** FIN LISTADO DE LA SUBROUTINA QUE CALCULA LA FUNCION DE BESSEL K0(z)

***** INICIA LISTADO DE LA SUBROUTINA QUE GENERA LA DISTRIBUCION DE POTENCIA
RADIAL (Biplolinomial)

function [AC,BC,areaa]=uupolil(pausa,rm,potori,potmax)
r0=0;rf=1;
AM=[0 0 0 1; 0 0 1 0; rm^3 rm^2 rm 1; 3*rm^2 2*rm 1 0]
AR=[potori 0 potmax 0]';
AC=AM\AR;
areaa= 1/4*(rm^4)*AC(1)+1/3*(rm^3)*AC(2)+1/2*(rm^2)*AC(3)+rm*AC(4)
if pausa==1, pause, end
areab=1.-areaa
BM=[rf^3 rf^2 rf 1; rm^3 rm^2 rm 1; 3*rm^2 2*rm 1 0
1/4*(rf^4-rm^4) 1/3*(rf^3-rm^3) 1/2*(rf^2-rm^2) (rf-rm)];
BR=[0 potmax 0 areab]';
BC=BM\BR;
RAG=[r0:.01:rm]';PAG=polyval(AC,RAG);
RBG=[rm:.01:rf]';PBG=polyval(BC,RBG);
plot(RAG,PAG,'o',RBG,PBG,'+'); title('polimomio central y periferico');
if pausa==1, pause, end

***** INICIA LISTADO DE LA SUBROUTINA QUE GENERA LA DISTRIBUCION DE POTENCIA
RADIAL (Biplolinomial)

***** INICIA LISTADO DE LA SUBROUTINA QUE CALCULA LA DISTRIBUCION DE Keff
RADIAL.

function k=uukfast(pausa,POL,IO,KO,RAD,h,axs1,indrck)
indrck=max(size(POL));
if pausa==1, disp('fast 1'),pause, end
c1=-KO(indrck)/(2*pi);GM(1:indrck)=IO(1:indrck).*c1;
c2=-IO(indrck)/(2*pi);GM((indrck+1):indrck)=KO((indrck+1):indrck).*c2;
if pausa==1, disp('fast 2'),pause, end
GM={GM.*POL}.*RAD;
if pausa==1, disp('fast 3'),pause, end
s2=2*pi*uusim(GM,h);
if pausa==1, disp('fast 4'),pause, end
% p9=POL(indrck),ax9=axs1,i09=IO(indrck),s29=s2
if pausa==1, disp('fast 5'),pause, end
k=POL(indrck)/(axs1*IO(indrck)-s2);
if pausa==1, disp('fast 6'),pause, end

***** FIN LISTADO DE LA SUBROUTINA QUE CALCULA LA DISTRIBUCION DE Keff
RADIAL.

```