

# ANTEPROYECTO DE NÚCLEO DEL REACTOR CAREM 120 CON 235 ELEMENTOS COMBUSTIBLES.

Beliera, J. I.

Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

Se propone un núcleo con 235 elementos combustibles para un reactor tipo CAREM de 350 MW térmicos.

Se obtuvo un ciclo de equilibrio de 480 días, con un quemado de extracción promedio del orden de 30000MWd/TonU. Se evaluaron con buenos resultados: márgenes de apagado con criterio de falla única, factores de pico de potencia y coeficientes de temperatura de combustible y vacío de refrigerante.

Los cálculos neutrónicos se realizaron con la línea HUEMUL-PUMA.

## Preliminary design of the core of CAREM 120 reactor with 235 fuel elements.

A core consisting of 235 fuel elements for a CAREM type reactor with a thermal power of 350MW is proposed.

A cycle length of 480 days was achieved, resulting in an average discharge burnup of over 30000 MWd/TonU. The following safety margins were evaluated with acceptable results: Shutdown with and without a control rod failing, power peak factor, void and fuel temperature coefficients.

All neutronic calculations were carried out with HUEMUL-PUMA.

## 1. DEFINICIONES

**Factor de forma del núcleo:** relación entre el valor máximo de todos los valores medios de celda para cada canal y trozo y el valor medio de todo el núcleo para la potencia específica por unidad de volumen del reactor.

**Factor de pico del núcleo:** es una estimación del factor de forma correspondiente a la barra combustible donde se da la máxima potencia específica. Se calcula para cada canal y trozo multiplicando el factor de forma del núcleo por el factor de forma de la celda.

**PUMA:** Código para el cálculo del núcleo [1].

**HUEMUL:** Código para el cálculo de celda [2].

## 2. INTRODUCCIÓN Y RESUMEN

Se presenta un anteproyecto de un reactor de convección natural de entre 100 MW y 120 MW eléctricos (350 MW térmicos).

Se propone un núcleo de 235 elementos combustibles, de 220 cm de longitud. La cantidad de pines por elemento combustible es 91 y el paso entre pines es de 1,38 cm. El diámetro aproximado del núcleo resultó 230cm.

En 92 de esos elementos hay barras absorbentes de 12 dedos. Las barras se agrupan en "bancos" de una, tres o seis barras de los cuales 6 son del

Sistema de Ajuste y Control y los demás del Sistema de Extinción.

Se consideró una estrategia de recambio a tres zonas.

El objetivo planteado para la duración del ciclo de equilibrio fue que superase el año de operación a plena potencia.

Para cada paso de quemado calculado se evaluaron los parámetros más importantes tales como el factor de forma, el factor de pico, el exceso de reactividad, el margen de apagado y los coeficientes de reactividad de vacío y de temperatura del combustible.

El quemado promedio de descarga buscado fue de 30000MWd/TonU.

Para el cálculo en potencia se utilizaron tablas de secciones eficaces con consideración de superposición lineal para las dependencias con los distintos parámetros.

Para el margen de apagado se consideró reactor frío sin xenón, para ello se utilizaron tablas sin dependencias paramétricas, es decir se considero todo el reactor sin xenón y a 25°C.

Los cálculos neutrónicos fueron realizados con la línea de cálculo HUEMUL-PUMA.

Se empleo la biblioteca WLUP a 69 grupos.

### **3. DATOS GEOMÉTRICOS**

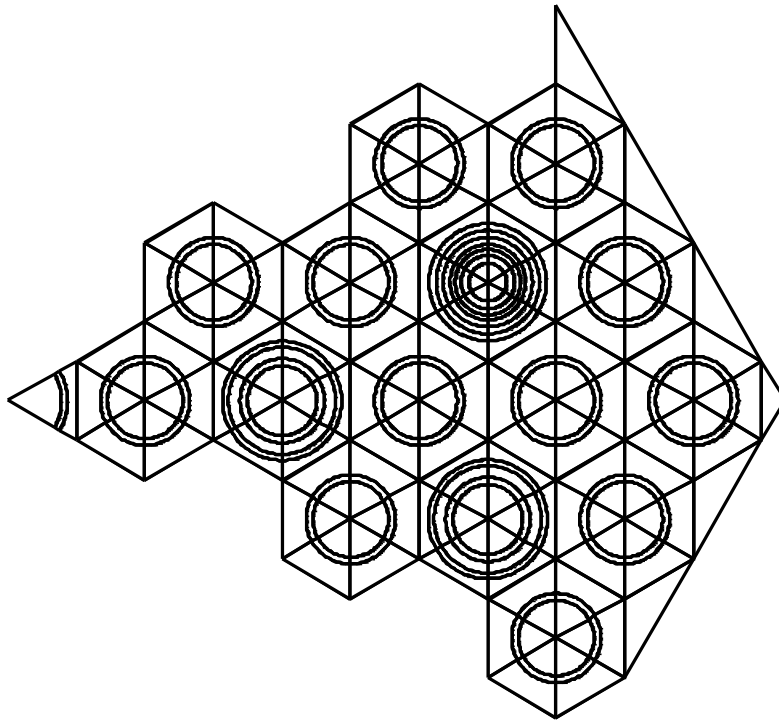
#### **3.1 Cálculo de celda**

En la figura 1 se observa el modelo de celda empleado. Representa un sexto del elemento combustible y contiene dos posiciones para barras de control y un pin con venenos quemables. La discretización es mayor en torno a los elementos absorbentes.

El pin central es un pin de instrumentación.

Las condiciones de contorno son de periodicidad en el sentido azimutal y de frontera blanca en el sentido radial.

Los principales parámetros geométricos se listan en la tabla 1.



**Figura 1.** Modelo de celda empleado para el cálculo con HUEMUL.  
Corresponde a un sexto del elemento combustible.

Pitch entre barras [cm]	1,38
Radio barra combustible [cm]	0,45
Radio pastilla combustible [cm]	0,38
Radio barra absorbente[cm]	0,35
Radio externo guía de barra absorbente [cm]	0,425
Cantidad de barras combustibles	78
Cantidad de barras combustibles con venenos quemables	6
Cantidad de barras absorbentes	12
Cantidad de barras de instrumentación	1
Longitud de las barras [cm]	220

**Tabla 1.** Principales datos del modelo de celda empleado en el cálculo.

### 3.2 Cálculo de núcleo

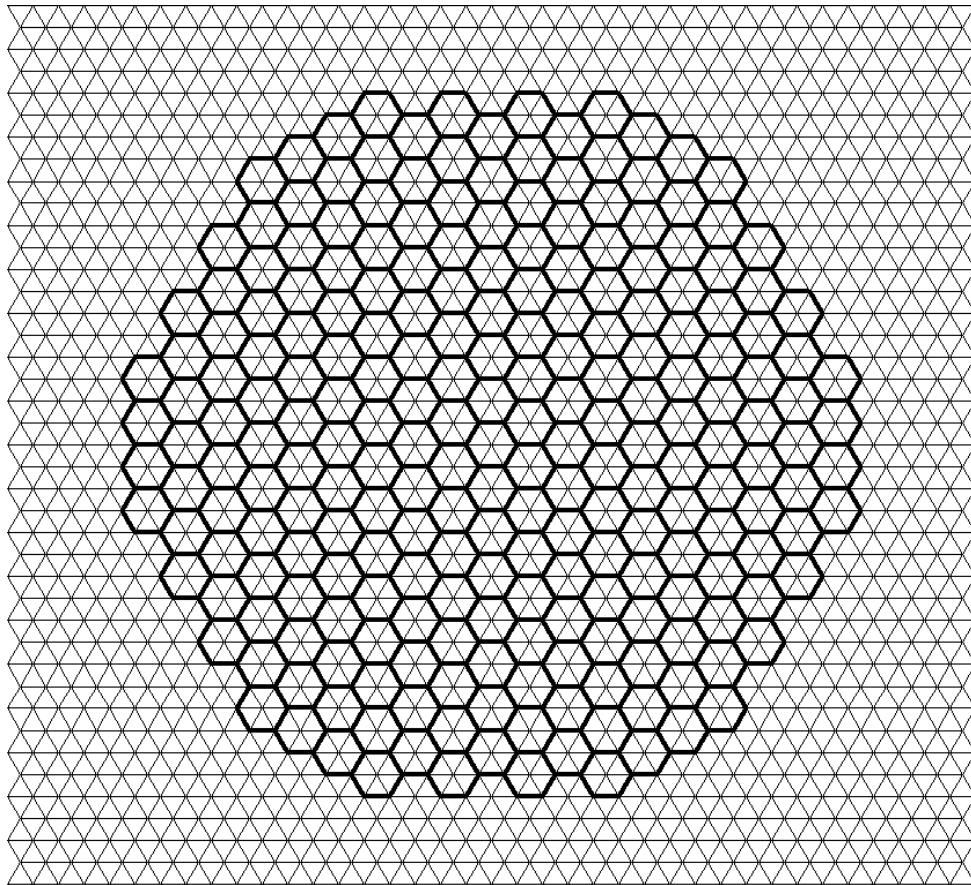
En la figura 2 se puede ver la propuesta de núcleo con 235 elementos y la discretización empleada para la red de cálculo. Cada elemento se representó con 6 triángulos. La condición de contorno del sistema fue de corriente entrante nula.

Se discretizó axialmente en 20 trozos de 11 cm dentro de la parte activa. Por encima y por debajo de dicha zona se representan 24 cm subdivididos en 3 trozos de 8 cm.

Se evaluaron mayores discretizaciones, de 24 triángulos por elemento y 40 trozos axiales, se observaron diferencias significativas solo en los márgenes

de apagado. Se reportan los valores obtenidos con la mayor discretización para esos casos.

El paso entre elementos combustibles es de 13.54 cm. El diámetro aproximado fue de 230 cm y la altura del núcleo de 220 cm.



**Figura 2.** Discretización en cortes transversales del núcleo empleada para el cálculo en PUMA. En el sentido longitudinal se emplearon trozos regulares de 11,24 cm para la zona activa.

## 4. MATERIALES

### 4.1 Cálculo de celda

Las concentraciones empleadas para todos los materiales fueron iguales a las empleadas en los modelos del CAREM-25 [3].

Se considero el uranio enriquecido al 3.1% para todos los elementos combustibles y sin perfiles axiales.

Tan solo se modificó la densidad del agua, considerando como valor central el correspondiente a la saturación para la presión de diseño y una temperatura promedio entre la salida y la entrada del núcleo.

Para esto se considero una temperatura de salida de saturación y una diferencia de temperatura en el núcleo de 30°C.

## 4.2 Cálculo de núcleo

Los materiales en PUMA son asignados mediante tablas de secciones eficaces a 5 grupos de energía que se obtuvieron mediante el código HUEMUL.

En la tabla 2 se muestran todos los materiales definidos para el núcleo. No se tiene en cuenta en esta el hecho de que los elementos combustibles puedan contener separadores.

Por fuera del núcleo se modeló un reflector de acero de características similares al del CAREM-25 [3]. Se optó por incluir el reflector ya que mejora el resultado del factor de pico, el cambio que produce en la reactividad del sistema no es importante.

Número de tabla	Enriquecimiento [%]	# de barras con VQ	# de barras absorbentes
1	3,1	6	0
2	3,1	6	12
3	3,1	0	0
4	3,1	0	12

**Tabla 2.** Tablas de materiales para el cálculo de los bloques de secciones eficaces utilizadas en PUMA.

Los dos primeros trozos (22 cm) y los dos últimos trozos (22 cm) de todos los elementos combustibles no tienen venenos quemables (tablas 3 y 4).

Para los cálculos en potencia se usaron tablas con los parámetros que se muestran en la tabla 3. Se utilizó interpolación cuadrática entre el valor central y los dos valores del parámetro más cercano al de interés.

Quemado [MWd/TonU]	0 / 500 / 1000 / 1500 / 2000 / 2500 / 3000 / 3500 / 4000 / 4500 / 5000 / 5501 / 6001 / 6501 / 7001 / 7501 / 8001 / 8501 / 9001 / 9501 / 10001 / 11002 / 12002 / 13002 / 14002 / 15002 / 16003 / 17003 / 18003 / 19003 / 20003 / 21003 / 22004 / 23004 / 24004 / 25004 / 26004 / 27004 / 28004 / 29004 / 30004 / 31005 / 32005 / 33005 / 34005 / 35005 / 36005 / 37005 / 38005 / 39005 / 40005
Temp. Refrigerante [°C]	210 / 310 / 410
Dens. Refrigerante [Kg/m <sup>3</sup> ]	382.25 / 486.5 / 590.25 / 695 / 799.25
Temp. Combustible [°C]	360 / 460 / 560
Xenón [At/cm <sup>3</sup> ]	0 / 1.1852e+15

**Tabla 3.** Parámetros y valores asociados que se emplearon en las tablas de secciones eficaces para los cálculos en potencia.

## 5. BARRAS DE CONTROL

Las barras de control son representadas en PUMA dando directamente las secciones eficaces del elemento con la barra de control insertada, asignándole al trozo axial correspondiente el número de material que lo caracteriza.

Las barras son agrupadas en bancos cuyos nombres se indican en la figura 3.

El reactor tiene 92 barras de control elegidas de manera de que sea subcrítico en estado isotérmico a 25 °C, considerando criterio de falla única.

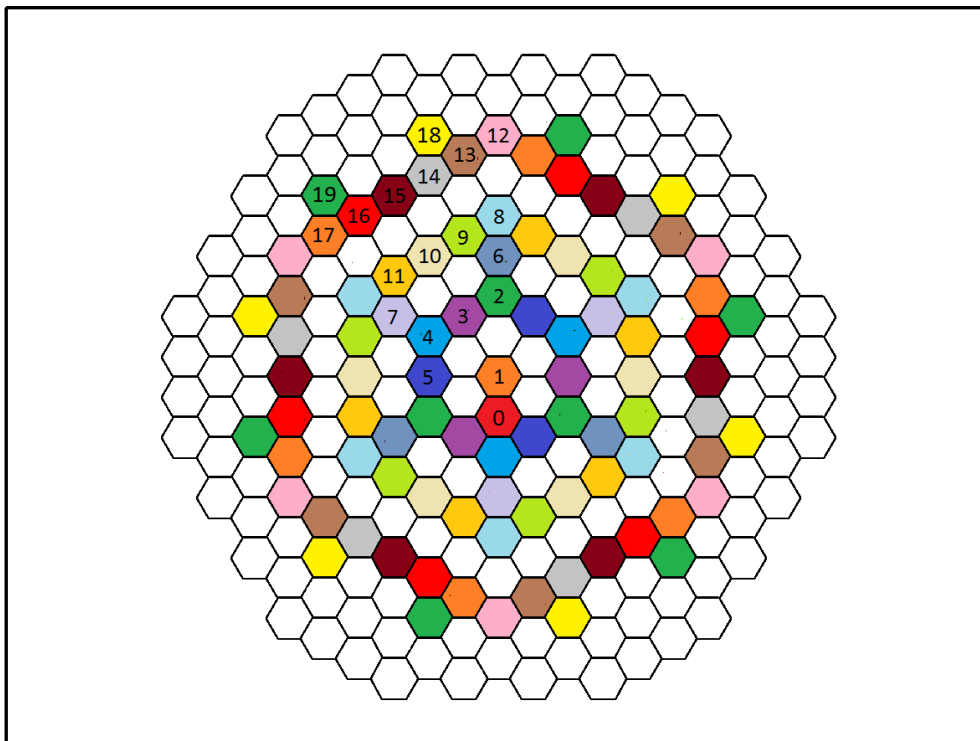
Los bancos 1, 3, 5, 6, 7 y 10 son los que se utilizan para la búsqueda de criticidad.

El orden de inserción de dichos bancos es el que se indica a continuación: 10 1 3 5 6 7. La extracción es en el orden inverso.

Tanto la elección de los bancos como de su orden de inserción para la puesta a crítico se eligieron intentando minimizar el factor de forma a lo largo del ciclo de equilibrio.

Todos los bancos se insertan secuencialmente, se ha visto que se obtienen mejores resultados al mover distintos bancos de manera simultánea, pero son análisis de mayor nivel de detalle.

El factor de forma es muy fuertemente dependiente de la estrategia de puesta a crítico, por lo que se supone que esta es una de las variables que más se pueden mejorar.



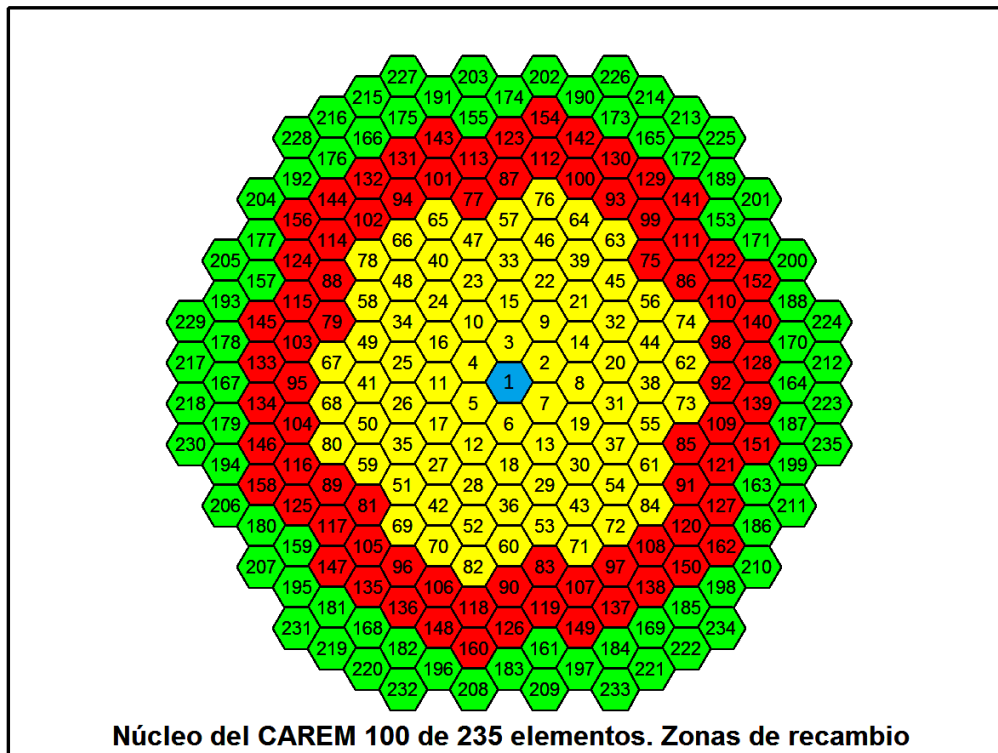
**Figura 3.** Posiciones de los elementos con barras de control y número de banco asociado. A excepción del banco 0, todos los bancos tienen simetría de un sexto en el núcleo.

## 6. ESTRATEGIA DE RECAMBIO DE COMBUSTIBLES

En la figura 4 Se indica la numeración de los elementos combustibles y se colorean las distintas zonas de recambio. En la posición central se coloca un elemento fresco en todos los ciclos.

La estrategia elegida inserta los elementos frescos en el anillo intermedio, luego los pasa al anillo central y finalmente al periférico antes de salir del núcleo.

Los canales se mueven según su numeración, como se detalla en la tabla 1 del apéndice.



**Figura 4.** Número asociado a los elementos combustibles y zonas de recambio. En las posiciones pintadas en rojo se introducen elementos frescos, los que estaban en esas posiciones se pasan a la zona amarilla, luego a la zona verde y luego son extraídos. El elemento pintado en azul se reemplaza por uno fresco en todos los ciclos.

## **7. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO Y RECAMBIO DE COMBUSTIBLES**

El modelo de PUMA se acopla con un modelo de THERMIT en simetría 1 provisto por la División Física de Reactores Avanzados del Centro Atómico Bariloche.

El ciclo de combustible consistió en una evolución en pasos temporales constantes y el correspondiente cálculo de criticidad, todo considerado a plena potencia de 350MW térmicos. Tras el cálculo del último de dichos estados se realizó el recambio de combustible y se calculó un nuevo ciclo si la distribución de quemados a BOC se consideró no convergida.

Se eligió un paso de 30 días, ya que pasos menores no modifican el resultado.

En total se alcanzan los 480 días a plena carga, lo que corresponde al cálculo de 17 estados. En el estado correspondiente a los 480 días se realizan las operaciones de recambio de acuerdo a especificaciones dadas en la sección 6.

El cálculo de cada estado consiste en realizar una evaluación de la distribución de los parámetros termohidráulicos con THERMIT a partir de una distribución de potencia de PUMA, y luego a partir de estos valores calcular los valores de la nueva distribución de potencia, buscando la criticidad de acuerdo a las reglas de movimiento de las barras enunciadas en el inciso 5. El procedimiento es iterativo entre PUMA y THERMIT para cada estado.

## **8. RESULTADOS**

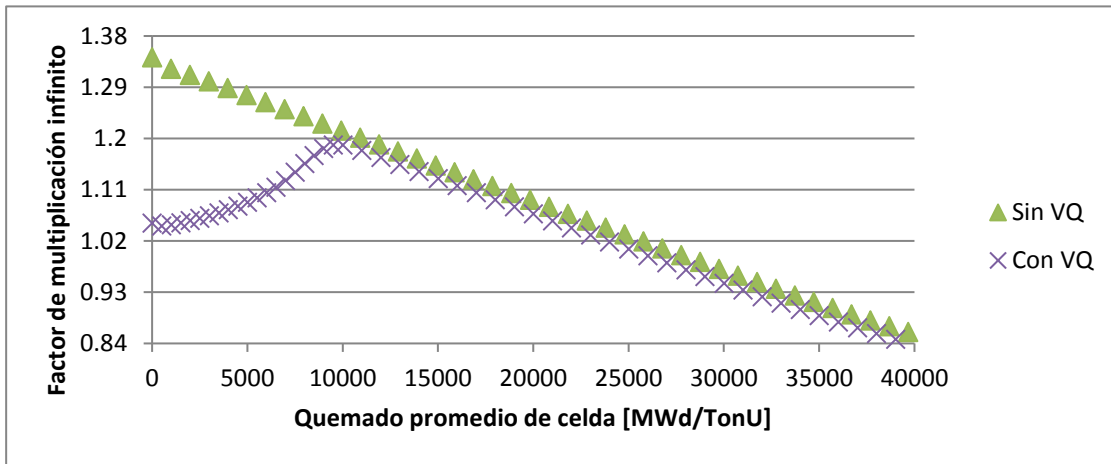
### **8.1 Cálculo de Celda**

En la figura 5 se muestran los resultados para el factor de multiplicación infinito para el cálculo de celda de los elementos combustibles con y sin pines con venenos quemables.

Se observa una fuerte diferencia en la evolución hasta aproximadamente 10000 MWd/TonU, a partir de lo cual ambos elementos siguen una tendencia similar.

Esto corresponde aproximadamente a un tercio del quemado de extracción para los elementos combustibles, por lo que se espera que la presencia de venenos quemables a fin de ciclo en el núcleo de equilibrio sea baja, en especial si se considera que los elementos frescos son insertados en posiciones con flujos relativamente altos.





**Figura 5.** Evolución del factor de multiplicación K infinito con el quemado promedio de celda. Para las celdas sin barra de control. Se compararan los casos con y sin pines con venenos quemables.

## 8.2 Cálculo de núcleo

### 8.2.1 Quemado de extracción y longitud del ciclo

El quemado medio de salida obtenido con PUMA es de de 30600 MWd/T. Cumpliendo el objetivo que se había planteado.

Debido a la carga de uranio, esto redunda en una longitud del ciclo de 480 días, alcanzando el objetivo propuesto de superar el año de operación a plena potencia.

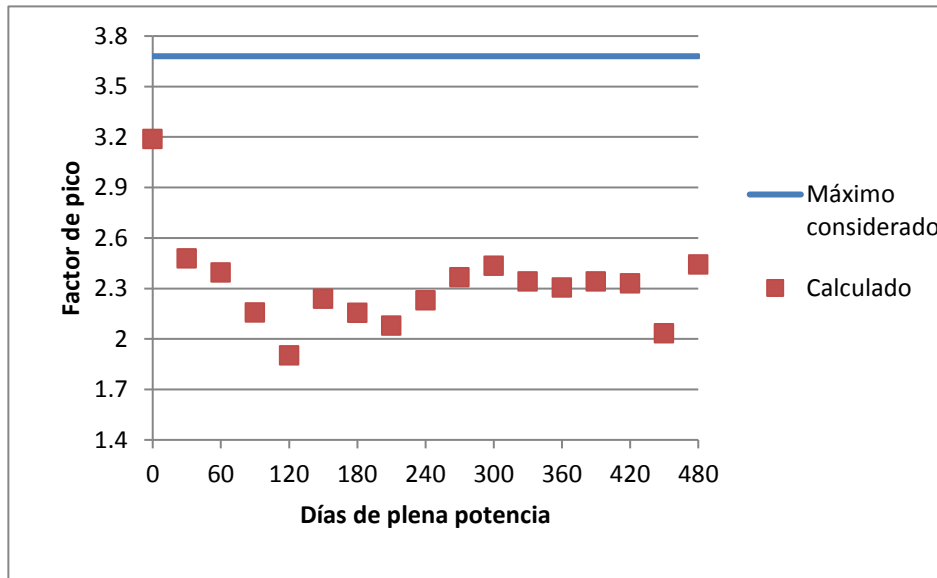
### 8.2.2 Factores de forma y de pico

Para el CAREM 25 se consideró 2.95 como límite para el factor de pico. Como tiene 61 elementos combustibles, cada uno con 108 varillas combustibles de 140 cm de longitud esto resulta en una densidad media de potencia de 108.4 w/cm.

En este diseño tenemos 235 elementos combustibles con 78 varillas y 220 cm de longitud, lo que implica una densidad media de 86.8 w/cm.

Si fijamos la condición de no pasar de la densidad de potencia máxima del CAREM 25 podríamos tolerar un factor de pico de hasta 3.68, lo cual se cumple. Sin embargo, éste es un criterio muy básico que podría no ser suficientemente conservativo.

En la figura 6 se muestran los factores de pico obtenidos para el núcleo en equilibrio, comparados con el límite máximo considerado.



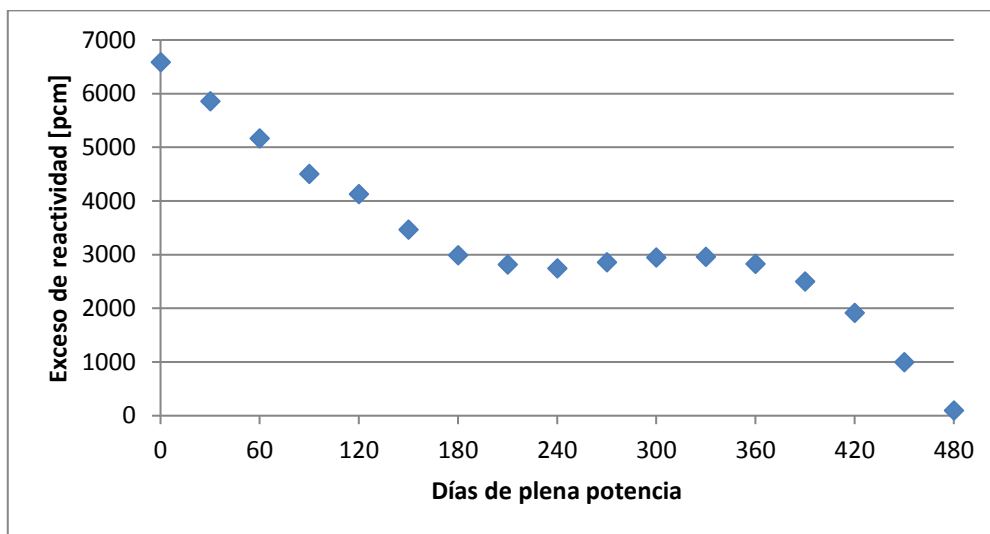
**Figura 6.** Factores de forma y pico para a lo largo del ciclo para el núcleo en equilibrio.

### 8.2.3 Exceso de reactividad

En la figura 7 se muestra la evolución del exceso de reactividad a lo largo del ciclo.

Se ve que hacia la mitad del ciclo la reactividad llega a una meseta transitoria, mientras dura dicha meseta es necesario extraer barras de control, por lo que la inserción de los bancos no resulta monótonamente creciente. De cualquier manera esto es fuertemente dependiente de cuales bancos son definidos para el control y en qué orden son insertados.

El exceso de reactividad a fin de ciclo es del orden del error del cálculo, sin embargo al evaluar un ciclo de 450 días este resultó de más de 2000pcm, por lo que se consideró la opción de 480 días como la más cercana a lo buscado.



**Figura 7.** Exceso de reactividad durante el ciclo de operación con el núcleo de equilibrio.

### 8.2.4 Coeficientes de temperatura y vacío.

En la tabla 5 se presentan los resultados para los coeficientes de vacío y el de temperatura de combustible a lo largo del ciclo de equilibrio.

En ambos casos resultaron claramente negativos, por lo que no representan una condición insegura para el reactor.

Días	Coeficiente de vacío [pcm/(Kg/m <sup>3</sup> )]	Coeficiente de temperatura de combustible [pcm/°C]	Días	Coeficiente de vacío [pcm/(Kg/m <sup>3</sup> )]	Coeficiente de temperatura de combustible [pcm/°C]
0	-22	-2.4	270	-20	-2.4
30	-21	-2.5	300	-21	-2.5
60	-21	-2.5	330	-22	-2.5
90	-20	-2.5	360	-22	-2.5
120	-20	-2.5	390	-22	-2.5
150	-20	-2.5	420	-21	-2.6
180	-20	-2.5	450	-19	-2.5
210	-19	-2.5	480	-20	-2.6
240	-19	-2.5			

**Tabla 5.** Coeficientes de Vacío de refrigerante y temperatura de combustible para el ciclo de EQ, calculados con PUMA.

### 8.2.5 Núcleo frío

En la tabla 6 se muestran los resultados para los márgenes de apagado sin falla y con falla única.

Para todos los casos se ve que se cumplen los criterios de margen de apagado mayor a 3000 pcm sin falla y mayor a 1000 pcm con falla única.

Los cálculos fueron realizados con reactor isotérmico a 25 °C sin xenón. Se calculó sólo para el reactor a comienzo de ciclo, ya que esta es la situación menos favorable.

Número de banco	Reactividad [pcm]	Número de banco	Reactividad [pcm]	Número de banco	Reactividad [pcm]
sin falla	-4000	6	-3800	13	-3700
0	-2600	7	-3700	14	-3400
1	-3700	8	-3700	15	-2700
2	-3700	9	-3500	16	-3100
3	-3200	10	-3400	17	-3300
4	-3500	11	-3600	18	-3600
5	-3200	12	-3800	19	-3100

**Tabla 6.** Márgenes de apagado a BOC sin falla y fallando alternadamente una barra de cada banco.

## 9. CONCLUSIONES

Se calculó el modelo según las características geométricas especificadas, llegando a una configuración de núcleo de equilibrio.

Se alcanzó un quemado promedio de extracción de 30600 MWd/TonU, lo cual satisface los requerimientos de diseño.

La longitud del ciclo de equilibrio fue de 480 días, alcanzando el requerimiento de superar el año de operación.

Los coeficientes de temperatura de combustible y de vacío son claramente negativos y en módulo similar a los del CAREM-25.

La configuración cumple los criterios adoptados para margen de apagado sin falla y con falla única.

El diseño evaluado podría utilizarse para continuar el proyecto con los requerimientos actuales.

## 10. REFERENCIAS

[1].- C. Grant.

***Manual del Sistema PUMA Versión 6.*** CNEA, MCO-06REC-2

[2].- C. Grant.

***Manual del sistema "HUEMUL" versión 4.*** CNEA, MCO-06-REC-1

[3] Weir. Ferraro

**Actualización de cálculos a nivel de celda para el reactor CAREM 25.**

## 11. APENDICE. ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE COMBUSTIBLES

En la tabla 1 se detalla la gestión de combustible empleada para la búsqueda del núcleo de equilibrio. El elemento central (1), se cambia todos los ciclos.

La estrategia fue hecha a tres zonas.

Primer ciclo	Segundo ciclo	Tercer ciclo	Primer ciclo	Segundo ciclo	Tercer ciclo	Primer ciclo	Segundo ciclo	Tercer ciclo
75	84	153	108	51	186	133	26	211
77	82	155	109	50	187	134	25	212
79	80	157	110	49	188	135	24	213
81	78	159	111	48	189	136	23	214
83	76	161	112	47	190	137	22	215
85	74	163	113	46	191	138	21	216
86	73	164	114	45	192	139	20	217
87	72	165	115	44	193	140	19	218
88	71	166	116	43	194	141	18	219
89	70	167	117	42	195	142	17	220
90	69	168	118	41	196	143	16	221
91	68	169	119	40	197	144	15	222
92	67	170	120	39	198	145	14	223
93	66	171	121	38	199	146	13	224
94	65	172	122	37	200	147	12	225
95	64	173	123	36	201	148	11	226
96	63	174	124	35	202	149	10	227
97	62	175	125	34	203	150	9	228
98	61	176	126	33	204	151	8	229
99	60	177	127	32	205	152	7	230
100	59	178	128	31	206	154	6	231
101	58	179	129	30	207	156	5	232
102	57	180	130	29	208	158	4	233
103	56	181	131	28	209	160	3	234
104	55	182	132	27	210	162	2	235
105	54	183						

**Tabla 1.** Gestión de combustibles usada para la búsqueda del núcleo de equilibrio.