

CÁLCULO DE DISTRIBUCIONES DE QUEMADO REALISTAS PARA LA CNA-UI Y LA CNA-UII MEDIANTE SIMULATED ANNEALING

Federico J. Clavero y Martín S. Silva

Unidad de Gestión Proyectos Nucleares, Nucleoeléctrica Argentina S.A., Laprida 3125, 1603, Villa Martelli, Argentina, fclavero@na-sa.com.ar

Palabras Clave: Reactor nuclear, Simulated Annealing, Atucha, Gestión de combustible

Resumen. Para la operación de reactores de tipo Atucha se necesita definir una estrategia de recambio de elementos combustibles. Esto es una definición geométrica que sirve como referencia para intercambiar los combustibles en el núcleo con el propósito de (entre otros intereses) maximizar el rendimiento de éstos y garantizar su integridad y la seguridad de la planta. Dada una estrategia, para analizar su factibilidad y su calidad se necesita contar con diferentes estimaciones realistas de la distribución de quemado que el núcleo tendría en equilibrio, siguiendo la estrategia propuesta. Se desarrolló un programa que permite obtener estas estimaciones usando un método Monte Carlo comúnmente llamado Simulated Annealing. Este programa fue utilizado para el diseño de estrategias con uranio levemente enriquecido (ULE) de las centrales nucleares Atucha I (CNA-UI) y Atucha II (CNA-UII) con resultados satisfactorios, constituyéndose en herramienta básica para ese tipo de diseño.

1. INTRODUCCIÓN

Para evaluar la factibilidad de una estrategia de recambios de elementos combustibles en reactores de agua pesada es necesario contar con distribuciones instantáneas de quemados para usar como punto de partida para la simulación de la gestión. En las centrales nucleares Atucha-I (CNA-UI) y Atucha-II (CNA-UII) esta simulación se realiza con el programa REC_AUT (Mollerach et al., 2008). Hasta el presente, las distribuciones instantáneas se generaban con un programa llamado GEN_DIST_INST. Este programa dio resultados satisfactorios en la gestión de la CNA-UII con uranio natural (UN), pero no permitió obtener resultados de calidad similar para estrategias de recambio con uranio levemente enriquecido (ULE).

En el contexto del estudio de cambio de diseño de UN a ULE para la CNA-UII, se desarrolló un módulo de cálculo, llamado GENDIST, que usa un método diferente al implementado en GEN_DIST_INST. Este método fue evaluado en reactores CANDU para diseñar estrategias de recambios (Buchan y Stewart, 2008). GENDIST funciona para la CNA-UII y también para la CNA-UI.

GENDIST está integrado en el programa DINO. DINO resuelve la ecuación de difusión estacionaria multigrupo (Silva, 2014). Su desarrollo en NA-SA permitió el cálculo de los armónicos superiores, utilizados para el mapeo de flujo en la Central Nuclear Atucha-II (CNA-UII) (Silva, 2012) y la Central Nuclear Embalse (CNE) (Clavero y Silva, 2015). Además, este programa corrige y actualiza módulos que ya no podían modificarse en PUMA 4 (Grant, 2004), como resultado de la obsolescencia del lenguaje de programación y su consiguiente falta de compilador. DINO está diseñado para ser compatible con los mismos archivos de entrada que PUMA. En particular implementa el método *time-average* (Mollerach et al., 2008), permitiendo obtener, dada una estrategia de recambios de combustibles, distribuciones de quemados de entrada y salida representativas de un estado promediado en el tiempo. Éste, sin embargo, no representa un estado realista del núcleo, en el que podría encontrarse la planta en un tiempo determinado.

En este trabajo se explica el método usado en GENDIST y se presentan ejemplos de aplicación.

2. DISEÑO DE GESTIÓN DE COMBUSTIBLE

El diseño de la gestión de combustible de la CNA-UI y la CNA-UII es una tarea compleja que está formada por muchas etapas de diferentes características. Para este informe son relevantes sólo las primeras cuatro etapas, que son

1. definición de estrategia de recambios,
2. cálculo *time-average* (con DINO o PUMA),
- 3. generación de distribución instantánea inicial (con GENDIST),**
4. simulación de recambios (con REC_AUT o manualmente).

Con negrita se marcó la etapa que resuelve el módulo GENDIST. Entre paréntesis se indica el programa que resuelve cada etapa. En adelante se detalla cada uno de estos puntos.

2.1. Definición de estrategia de recambios

Una estrategia de recambios en la CNA-UI y en la CNA-UII es una definición de caminos, zonas y quemados de salida para los canales de combustible del núcleo. Una zona es un conjunto

de canales, que no puede tener intersección con otras zonas. Un camino es un conjunto ordenado de N_C zonas, comenzando desde la zona 1 o de salida hasta la zona N_C o de entrada. Durante su tiempo de permanencia en el reactor, un elemento combustible ingresa fresco en la zona de entrada de un determinado camino, es movido en orden a las diferentes zonas del mismo camino hasta llegar a la zona de salida. Para cada camino se define también un quemado de salida, que es el valor para el cual un combustible que está en la zona de salida y cuyo quemado medio ha alcanzado dicho valor debe ser removido del núcleo. En la Figura 1 se graficó la estrategia de recambio para CNA-UII con UN, donde se muestra cada camino definido con un color diferente y se muestra las zonas de cada camino con su respectivo número, en el orden anteriormente explicado.

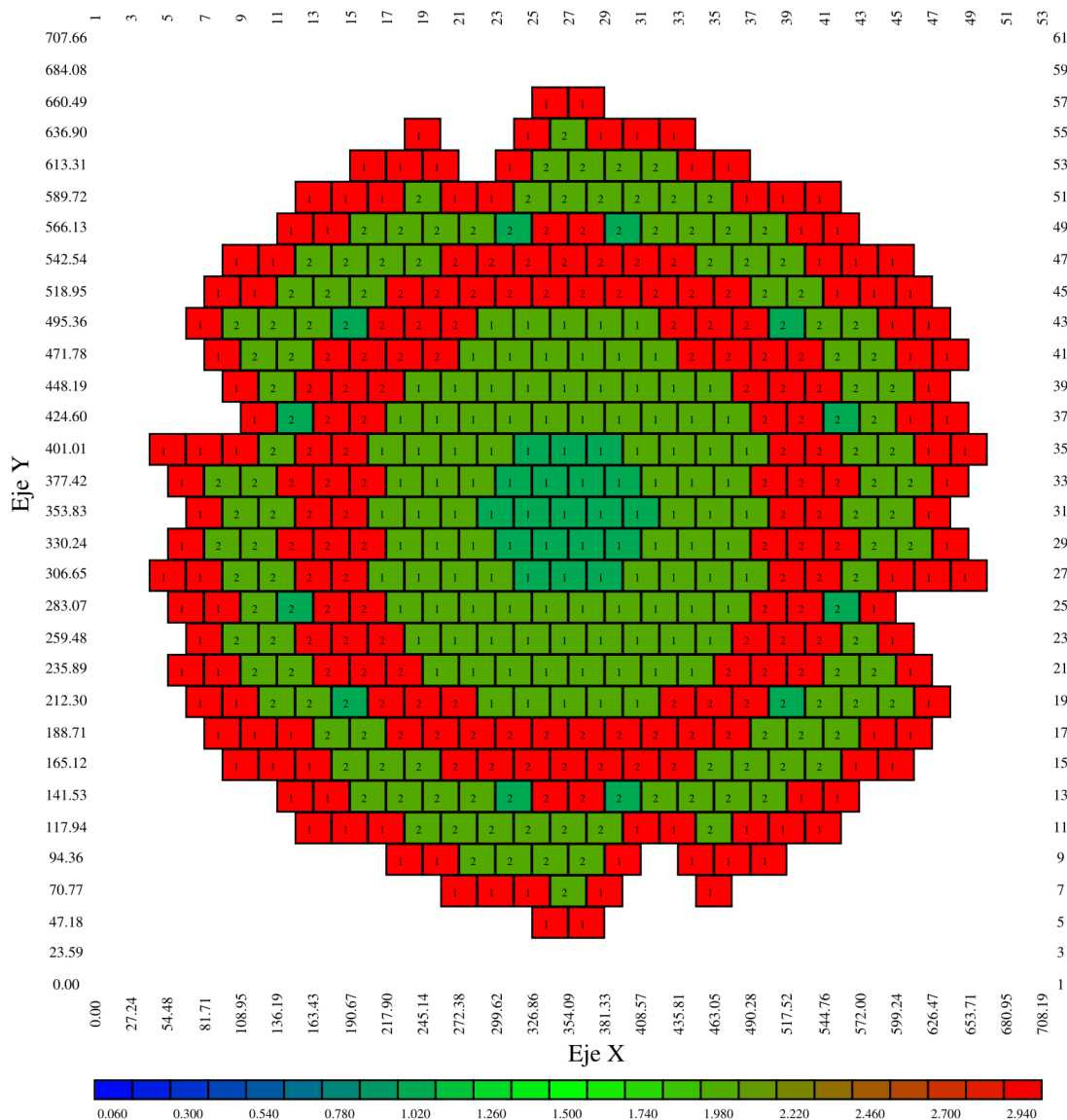


Figura 1: Estrategia de recambios nominal de UN de la CNA-UII. Cada color indica un camino diferente. El número sobre los canales son los números de zona. 1 es zona de salida y 2 es zona de entrada.

2.2. Cálculo *time-average*

El método *time-average* (implementado en PUMA y DINO) consiste en hacer un proceso iterativo de cálculos de núcleo, usando una estrategia de recambios y tablas de secciones eficaces integradas. Los resultados más importantes que se obtienen son el k -efectivo, los quemados de entrada Q_{Z0} y traslado Q_{Z1} de cada zona Z y la distribución de potencia promedio en el tiempo para cada canal y trozo del núcleo. En esta etapa se puede evaluar la factibilidad de la estrategia de recambios definida. En primer lugar, las potencias de canales deben estar por debajo de las potencias máximas establecidas en el diseño del núcleo con un margen adecuado. En segundo lugar, el k -efectivo debe alcanzar un valor típico fijado por la planta. Si alguna de estas evaluaciones falla debería considerarse modificar la estrategia de recambios.

2.3. Generación de distribución instantánea

Con la estrategia de recambios, los quemados de entrada y traslado de cada zona y la distribución de quemados de entrada y traslado por canal y trozo se calcula una distribución de quemados instantánea inicial. Luego, se obtiene una distribución de potencia instantánea para la distribución generada. Nuevamente, las potencias máximas no deben superarse, aunque se espera obtener en promedio márgenes menores a los del cálculo *time-average*, debido al efecto de los recambios.

2.4. Simulación de recambios

La distribución instantánea inicial se usa como punto de partida para simular la evolución del núcleo y el recambio de combustibles, siguiendo un criterio similar al del operador de la planta. El programa REC_AUT permite realizar esta simulación de manera automática. Esta simulación permite establecer si la estrategia de recambios es sostenible en el tiempo. En caso contrario es necesario volver a algún paso anterior.

3. MÉTODO DE GENDIST

Si el combustible del canal C tiene quemado medio $\bar{Q}(C)$ y pertenece a una zona Z que tiene quemado medio de entrada \bar{Q}_{Z0} y quemado medio de traslado \bar{Q}_{Z1} , obtenidos en el cálculo *time-average*, se define la edad en el canal $e(C)$ como

$$e(C) = \frac{\bar{Q}(C) - \bar{Q}_{Z0}}{\bar{Q}_{Z1} - \bar{Q}_{Z0}}. \quad (1)$$

La edad así definida toma valores entre 0 (cuando el combustible acaba de ingresar a la zona) y 1 (cuando está a punto de abandonar la zona). De manera recíproca a la ecuación (1), si un canal C tiene edad $e(C)$ se puede calcular el quemado para cada trozo T como

$$Q(C, T) = Q_{Z0}(C, T) + (Q_{Z1}(C, T) - Q_{Z0}(C, T))e(C). \quad (2)$$

La ecuación (2) define una forma de convertir edades a quemados de manera directa que permite trabajar en adelante únicamente con edades.

Se puede suponer que los combustibles son ingresados en intervalos periódicos en cada zona; en consecuencia, el conjunto de edades de cada zona forma una distribución uniforme. Concretamente, si una zona Z tiene N_Z canales, entonces el conjunto de edades E_Z es

$$E_Z = \left\{0, \frac{1}{N_Z}, \frac{2}{N_Z}, \dots, \frac{N_Z - 1}{N_Z}\right\} \subset \mathbb{R}. \quad (3)$$

Numerando los canales de la zona Z , que forman un conjunto C_Z , se puede definir una relación biunívoca entre el conjunto C_Z y E_Z mediante una permutación de E_Z . Si el reactor tiene M zonas disjuntas, entonces se define una *distribución de edades instantánea* D_e como una M -upla de permutaciones de cada conjunto de edades. Concretamente,

$$D_e = (\sigma(E_{Z_1}), \dots, \sigma(E_{Z_M})) \subset S(E_{Z_1}) \times \dots \times S(E_{Z_M}), \quad (4)$$

donde $\sigma(X)$ es una permutación del conjunto X , $S(X)$ es el conjunto de todas las permutaciones de X y E_{Z_i} es el conjunto de edades de la zona Z_i , definido en la ecuación (3). Cualquier posible distribución D_e de la ecuación (4) representa una posible distribución instantánea de quemados. Cabe notar que la mayoría de dichas distribuciones no son realistas, puesto que normalmente no se llegaría a dicho estado mediante los criterios de la planta (como respetar los límites de potencia). El conjunto de todas las D_e posibles es muy grande, con cardinal

$$\#\{D_{ei}\}_i = \sum_{k=1}^M N_{Z_k}!. \quad (5)$$

Para la estrategia de la Figura 1, $\#\{D_{ei}\}_i \approx 10^{174}$.

Para representar el criterio del operador en la distribución de edades, se proponen dos condiciones cualitativas:

1. El promedio de edades de un canal y sus vecinos debe ser lo más uniforme posible en todo el núcleo.
2. Las edades de cada canal del núcleo no deben ser, en promedio, ni muy similares ni muy diferentes a las edades de sus vecinos de la misma zona de quemado.

La primera condición se definió para evitar que existan regiones de alta y baja potencia causadas por el agrupamiento de combustibles frescos y quemados, respectivamente. La segunda condición se definió para evitar que en el futuro ninguna zona de quemado tenga dos combustibles frescos adyacentes. Por ejemplo, se podrían generar agrupamientos de combustibles muy quemados y combustibles muy frescos, que tienen en conjunto un promedio de edades aceptable. En poco tiempo los combustibles quemados se recambiarían y así se conformaría una región de combustibles frescos.

Para representar cuantitativamente las condiciones anteriores, se dan varias definiciones para finalmente plantear un problema de optimización. Primero, se define la *edad de la vecindad* $e_v(C)$ de un canal C como

$$e_v(C) = \frac{1}{1 + \#\langle C, C_v \rangle} (e(C) + \sum_{\langle C, C_v \rangle} e(C_v)), \quad (6)$$

donde $\#\langle C, C_v \rangle$ es el número de primeros vecinos de C y la suma se hace por cada vecino C_v de C . Se define la *distancia en edades* $d_e(e_1, e_2)$ como

$$d_e(e_1, e_2) = \min(|e_1 - e_2|, 1 - |e_1 - e_2|). \quad (7)$$

Con la (7) se define la distancia en edad de la vecindad $e_d(C)$ de un canal C como

$$e_d(C) = \begin{cases} \frac{1}{\#\langle C, C_v \rangle_{Z(C)}} \sum_{\langle C, C_v \rangle_{Z(C)}} d_e(C, C_v), & \#\langle C, C_v \rangle_{Z(C)} > 0, \\ 0, & \#\langle C, C_v \rangle_{Z(C)} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

donde $\#\langle C, C_v \rangle_{Z(C)}$ es el número de primeros vecinos C_v de C que están en la misma zona que C , y la suma se hace por cada uno de estos vecinos C_v . Finalmente, con las definiciones (6) y (8), para una distribución D_e se define la energía en edades E del núcleo como

$$E(D_e) = \sum_{C_k} |e_v(C_k) - e_{v0}| |e_d(C_k) - e_{d0}| \quad (9)$$

Las constantes e_{v0} y e_{d0} valen por defecto 0,5 y 0,25, respectivamente, y pueden asignarse por entrada de datos. Usando la ecuación (9) se define un problema de optimización, que consiste en hallar la distribución D_{e0} tal que

$$E(D_{e0}) \leq E(D_{ei}), \quad \forall D_{ei}. \quad (10)$$

Para el problema concreto de generar la distribución instantánea de quemados no es necesario hallar la mejor distribución de edades, sino una razonablemente buena. Para este tipo de problemas resulta apropiado emplear una heurística como un algoritmo Monte Carlo. El módulo GENDIST implementa un algoritmo de optimización llamado *Simulated Annealing* (SA).

3.1. Simulated Annealing

Simulated Annealing es una técnica probabilística para resolver problemas complejos de optimización. El nombre y la nomenclatura están basados en la técnica de recocido de materiales (Kirkpatrick et al., 2008). Esta técnica es útil para resolver problemas de optimización *aproximadamente*. Esto significa obtener un resultado suficientemente bueno, ya que obtener el resultado exacto es prácticamente imposible. En general, un problema de optimización está definido por una heurística o *energía* y consiste en obtener un estado que la minimiza. La técnica Simulated Annealing propone generar estados al azar que difieren poco en energía de un estado anterior. Si la diferencia es negativa entonces el estado generado se acerca más al resultado que se quiere obtener. Si la diferencia es positiva igualmente se contempla la *probabilidad* de que a partir del nuevo estado generado se generen otros que se acerquen más al óptimo. La *probabilidad* se define como una función que disminuye con saltos de energía positivos entre los dos estados y disminuye cuando aumenta un parámetro externo, definido como *temperatura*. A partir de un estado inicial, iterativamente se obtienen diferentes estados y al mismo tiempo se disminuye la temperatura (y por lo tanto la probabilidad de aceptación) de tal manera que para las últimas iteraciones sólo se aceptan aquellos estados que disminuyen la energía.

La idea de aceptar algunos estados que aumentan la energía es una solución al problema de mínimos locales. En el espacio de búsqueda, existen muchos estados cuyos *vecinos* (conjunto de estados que se pueden obtener mediante el generador) tienen todos mayor energía. Si se llegase a alguno de estos estados y no se permitiese pasar a un estado de mayor energía el algoritmo terminaría inmediatamente, obteniéndose como resultado un estado subóptimo. Si la temperatura se disminuye lentamente se espera recorrer un espacio de búsqueda mayor y que aumente la probabilidad de obtener un estado óptimo.

La implementación de Simulated Annealing para el problema concreto de la gestión de combustible requiere de la definición de cuatro partes: la función energía, la probabilidad de aceptación, la curva de disminución de la temperatura y el generador de estados vecinos. Se entiende como estado a una distribución de edades D_e .

Como función de energía se usó la definida en la ecuación (9).

Como probabilidad de aceptación se usó la función

$$p(\Delta E, T) = \begin{cases} 1, & \Delta E < 0, \\ 0, & \Delta E \geq 0 \text{ y } T = 0, \\ e^{-\frac{\Delta E}{T}}, & \Delta E \geq 0 \text{ y } T > 0, \end{cases} \quad (11)$$

donde ΔE es la diferencia entre la energía de la nueva distribución y la energía de la distribución anterior.

Como curva de temperatura se usó la función

$$T(r) = \frac{T_0}{1 + e^{\frac{T_r r - T_c}{T_w}}}, \quad (12)$$

donde $r = \frac{i}{N_{ite}}$, i es el número de iteración y N_{ite} es el número total de iteraciones; los parámetros T_r , T_c y T_w pueden ser fijados en la entrada de datos, usando como valores por defecto $T_r = 1,0$, $T_c = 0,12$ y $T_w = 0,16$, respectivamente. Los valores por defecto no tienen ningún significado especial, y pueden ser modificados libremente para mejorar el resultado. El parámetro T_0 se puede fijar por entrada o determinar automáticamente por defecto; en ese caso se realizan 1000 iteraciones con probabilidad de aceptación 1. Si en ese período la variación máxima en energía es ΔE_+ y la variación mínima en energía ΔE_- , entonces T_0 se calcula como

$$T_0 = 20 \frac{\Delta E_+ - \Delta E_-}{2}. \quad (13)$$

Como generador de distribuciones de prueba se usó el siguiente algoritmo:

1. elegir al azar un canal de todo el núcleo,
2. elegir al azar un canal distinto de la zona a la que pertenece el canal anterior,
3. intercambiar las edades de esos dos canales.

4. EVALUACIÓN DEL PROGRAMA

Se evaluaron los resultados y performance del método para dos casos particulares: la estrategia str23v4 de ULE para la CNA-UII y la estrategia nominal de ULE de la CNA-UI.

4.1. Estrategia str23v4 de ULE para la CNA-UII

La estrategia str23v4 tiene 3 caminos de 3 zonas cada uno. En las Figuras 2 y 3 se ilustra la definición de la estrategia para cada canal. En la Tabla 1 se muestra el margen mínimo y la cantidad de canales que superan potencias máximas de las 20 distribuciones obtenidas con GENDIST.

Se pudo obtener 7 de 20 distribuciones instantáneas aceptables. El tiempo total de ejecución fue de 110,45 min. usando un procesador AMD Athlon II X2 260 de 1.8 GHz. Esto significa que en promedio para un procesador de 3.0 GHz el programa encuentra una distribución aceptable cada 9 minutos y encuentra, al menos, una distribución con más de 90 % de probabilidad en 20 minutos. Estas observaciones son válidas sólo para esta estrategia en particular. Debido a la naturaleza estocástica del método de cálculo, es difícil asegurar que el programa pueda encontrar una solución, para alguna cantidad arbitrariamente grande de iteraciones.

En la Figura 4 se muestra la distribución de edades de la distribución 16 de la Tabla 1, para la que se calculó el mejor margen mínimo de 4,02 %. En la Figura 5 se muestra los márgenes de potencias correspondientes a esta distribución. Para evaluar la convergencia del algoritmo a un estado aceptable se muestra en la Figura 6 la edad promedio de primeros vecinos por canal y en la Figura 7, la distancia promedio de edades entre primeros vecinos de un canal. En el primer caso se observa que la edad promedio oscila alrededor de 0,5, que es el valor objetivo del método. En el segundo caso se observa que la distancia promedio oscila alrededor del valor objetivo 0,25; para algunos canales se muestra valores 0, porque éstos no tienen primeros vecinos de la misma zona.

Para la distribución 20 de la Tabla 1 se analizó la convergencia del algoritmo para 10^6 iteraciones. En la Figura 8 se muestra la curva de temperatura que se consideró para el cálculo. Esta curva se obtiene de la ecuación (12). Para cada iteración del algoritmo, se graficó la probabilidad de la ecuación (11) en la Figura 9. Puede verse que al inicio del cálculo se admite cualquier perturbación con probabilidad cercana a 1, y progresivamente se reduce hasta llegar a 0. En la Figura 10 se muestra la evolución de la energía definida en la ecuación (9). Puede verse que la energía es una combinación de una curva- s y una oscilación aleatoria. Esta oscilación disminuye a medida que el núcleo llega asintóticamente a un estado de mínima energía.

| Distribución | Margen mínimo [%] | Canales pasados |
|--------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 0,51 | 0 |
| 2 | -1,20 | 1 |
| 3 | -20,58 | 42 |
| 4 | 2,10 | 0 |
| 5 | -0,50 | 1 |
| 6 | 1,69 | 0 |
| 7 | -1,67 | 5 |
| 8 | -1,53 | 8 |
| 9 | -3,56 | 7 |
| 10 | -0,67 | 2 |
| 11 | -2,11 | 4 |
| 12 | -2,85 | 5 |
| 13 | 2,45 | 0 |
| 14 | -2,52 | 3 |
| 15 | -4,58 | 16 |
| 16 | 4,02 | 0 |
| 17 | -3,55 | 9 |
| 18 | -7,44 | 3 |
| 19 | 0,05 | 0 |
| 20 | 2,17 | 0 |

Tabla 1: Distribuciones generadas para la estrategia de ULE str23v4 de CNA-UII. Con negrita se resaltan las distribuciones con márgenes de potencia aceptables.

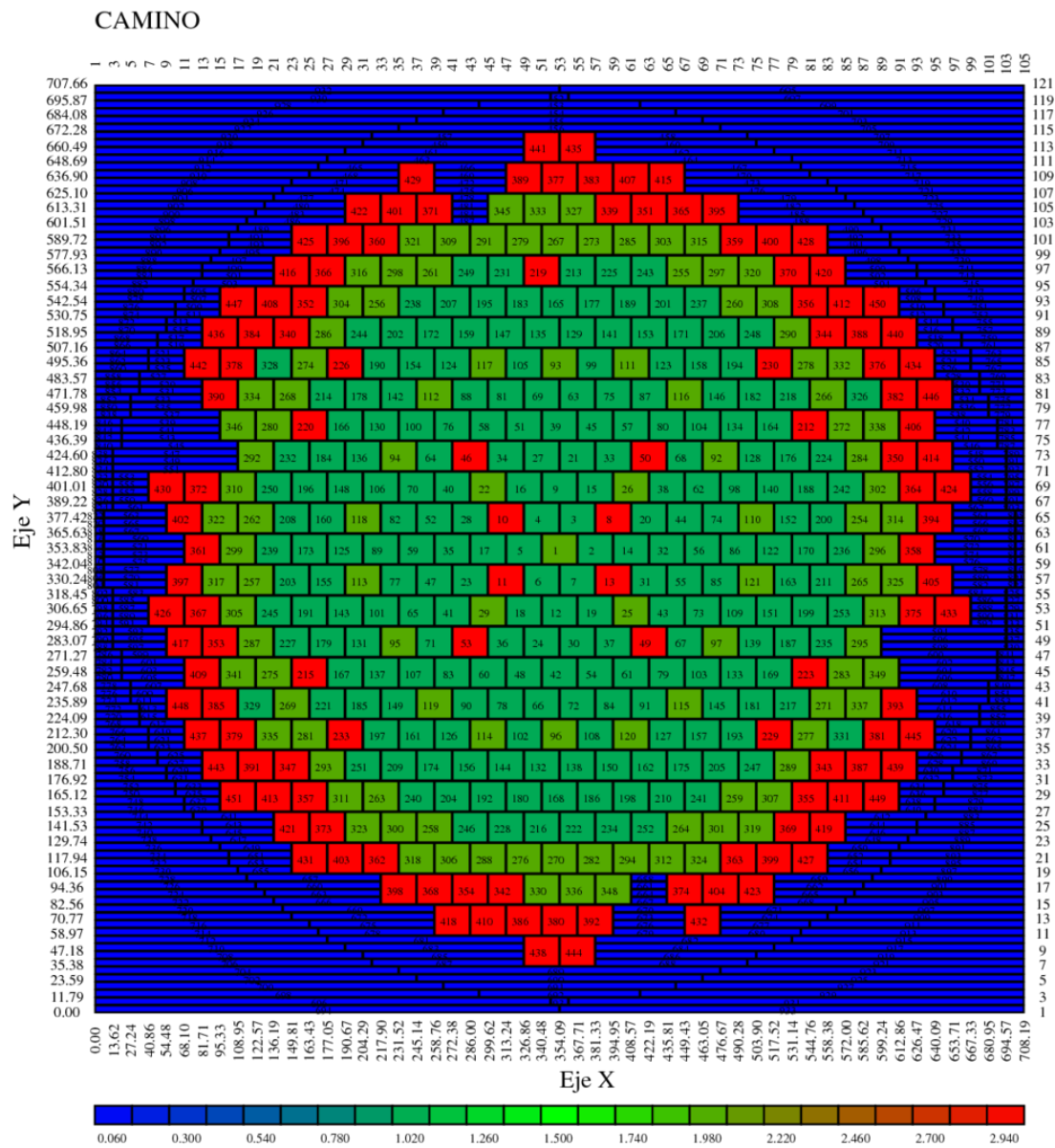


Figura 2: Definición de caminos de la estrategia str23v4 de ULE de la CNA-UII. Cada color representa un camino diferente.

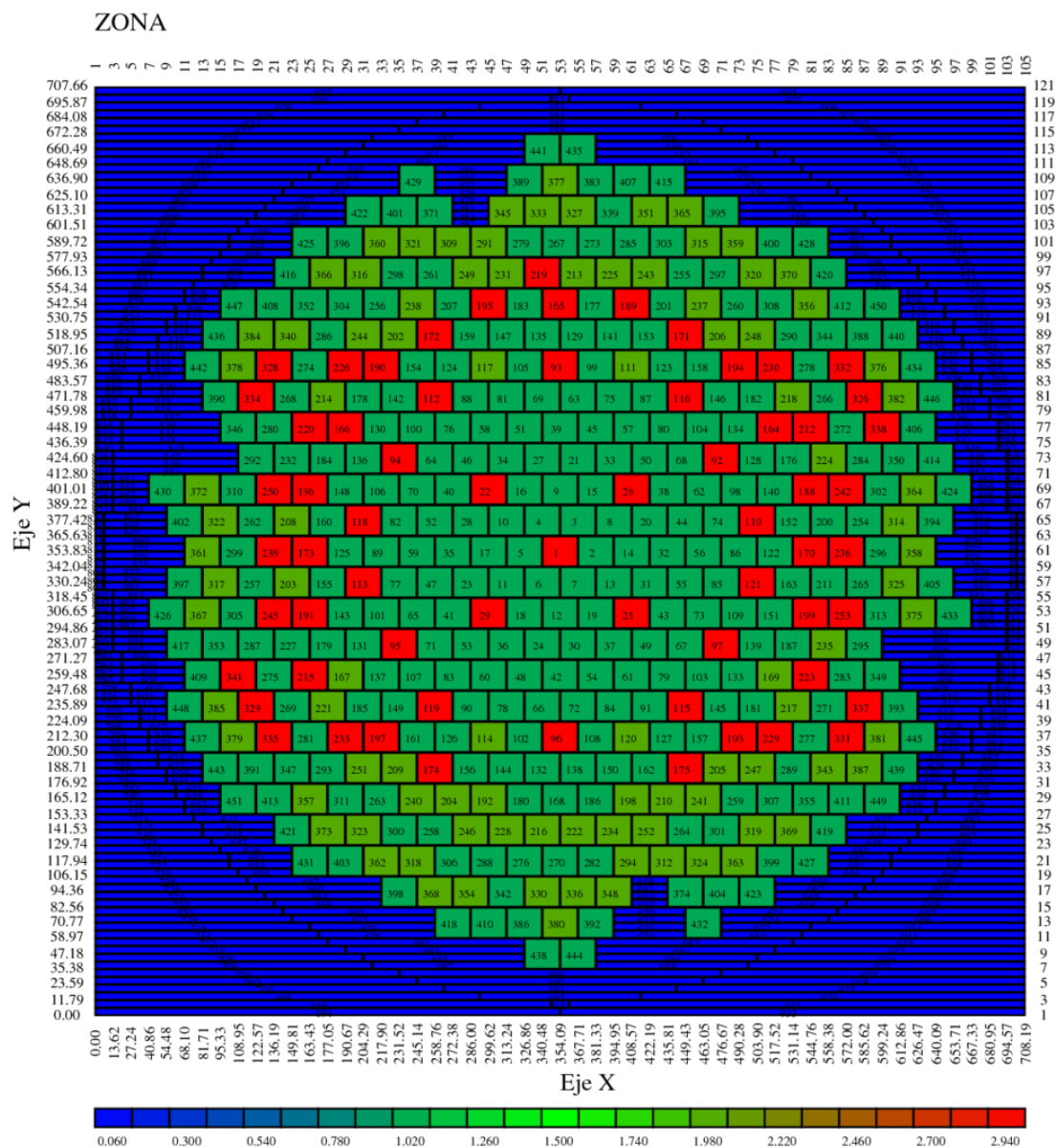


Figura 3: Definición de zonas de la estrategia str23v4 de ULE de la CNA-UII. Cada color representa una zona diferente.

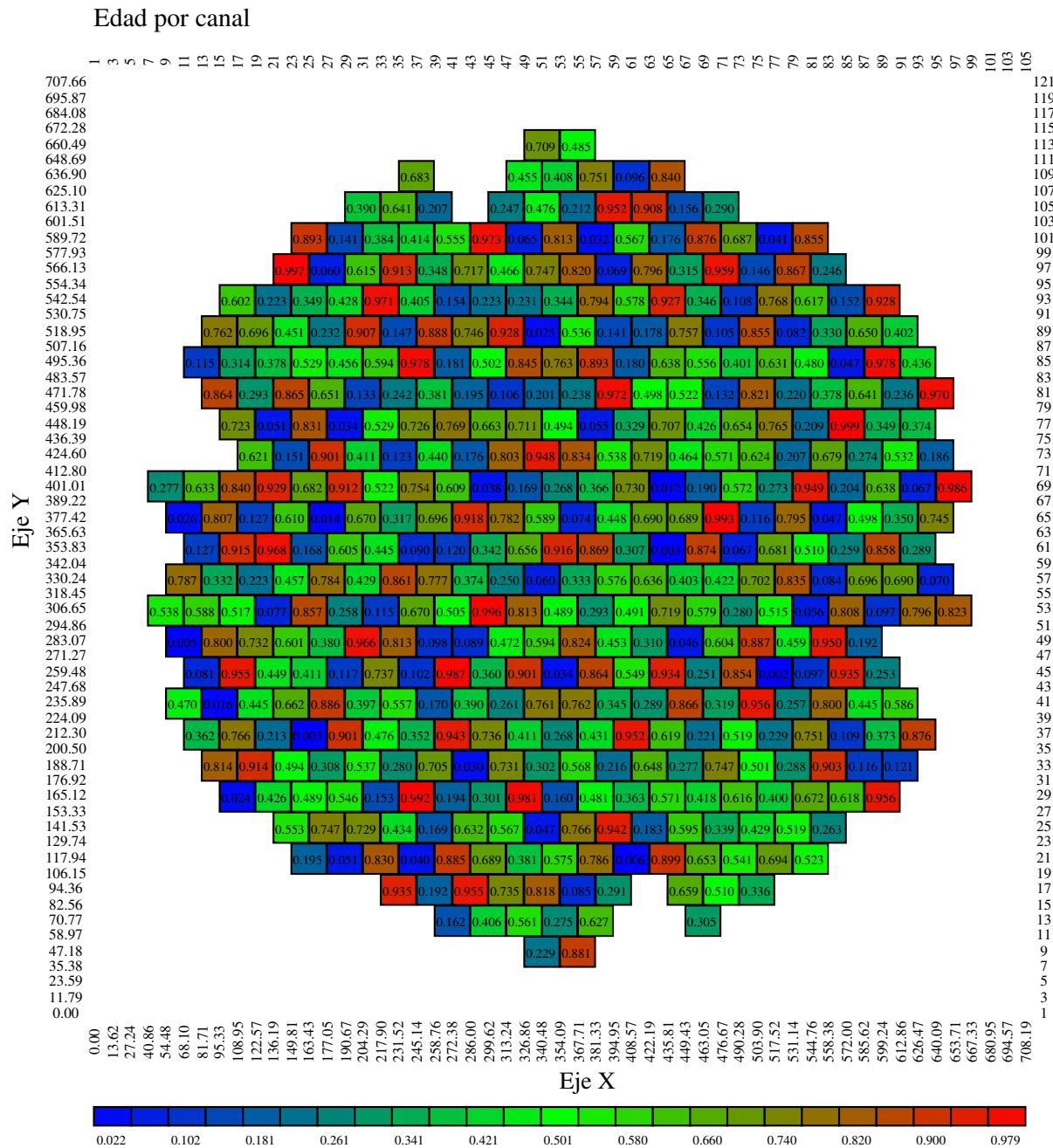


Figura 4: Edades por canal de la distribución 16 para la estrategia str23v4 de ULE de CNA-UII.

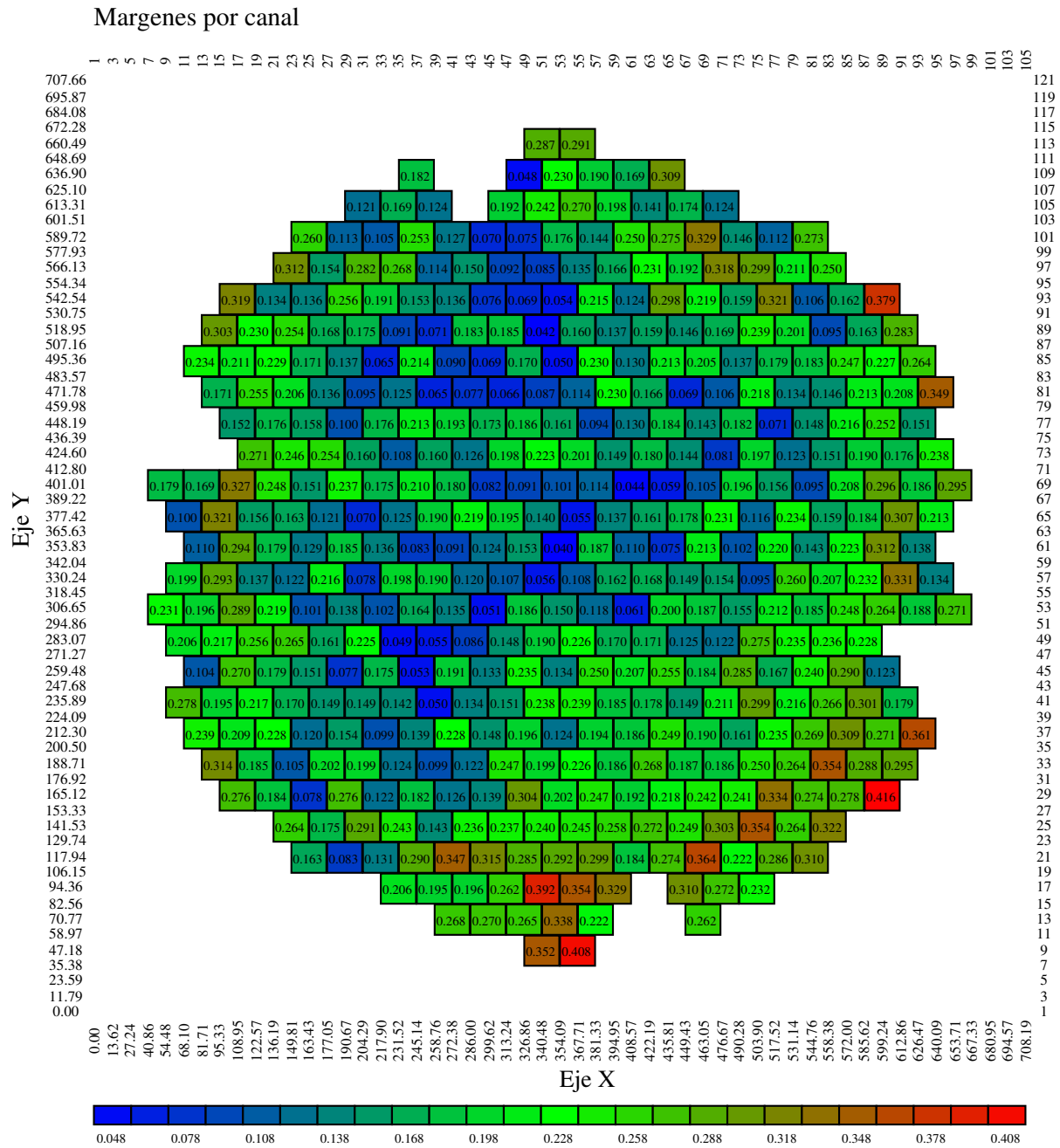


Figura 5: Márgenes de potencia por canal de la distribución 16 para la estrategia str23v4 de ULE de CNA-UII.

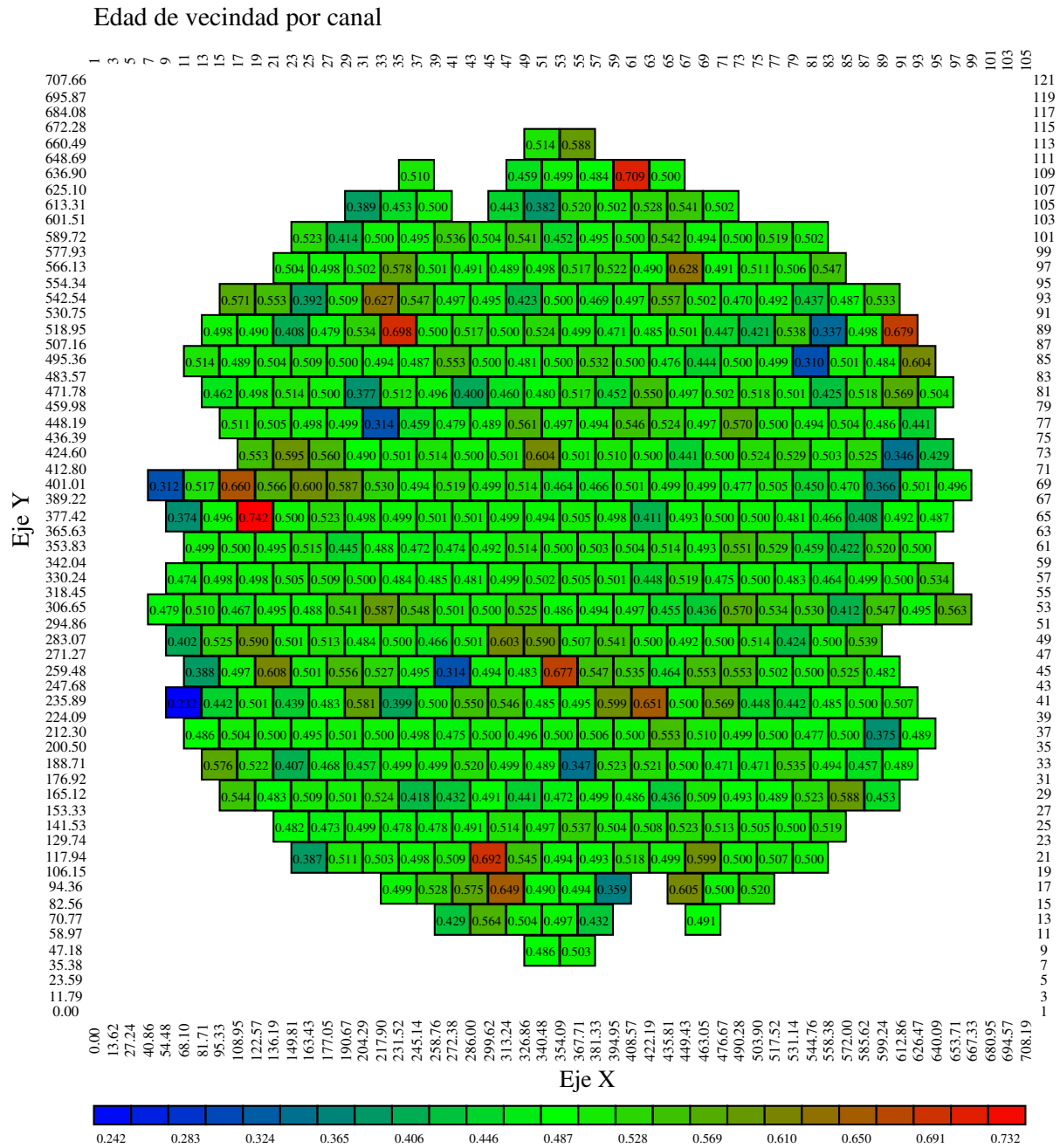


Figura 6: Edad promedio de primeros vecinos por canal de la distribución 16 para la estrategia str23v4 de ULE de la CNA-UII.

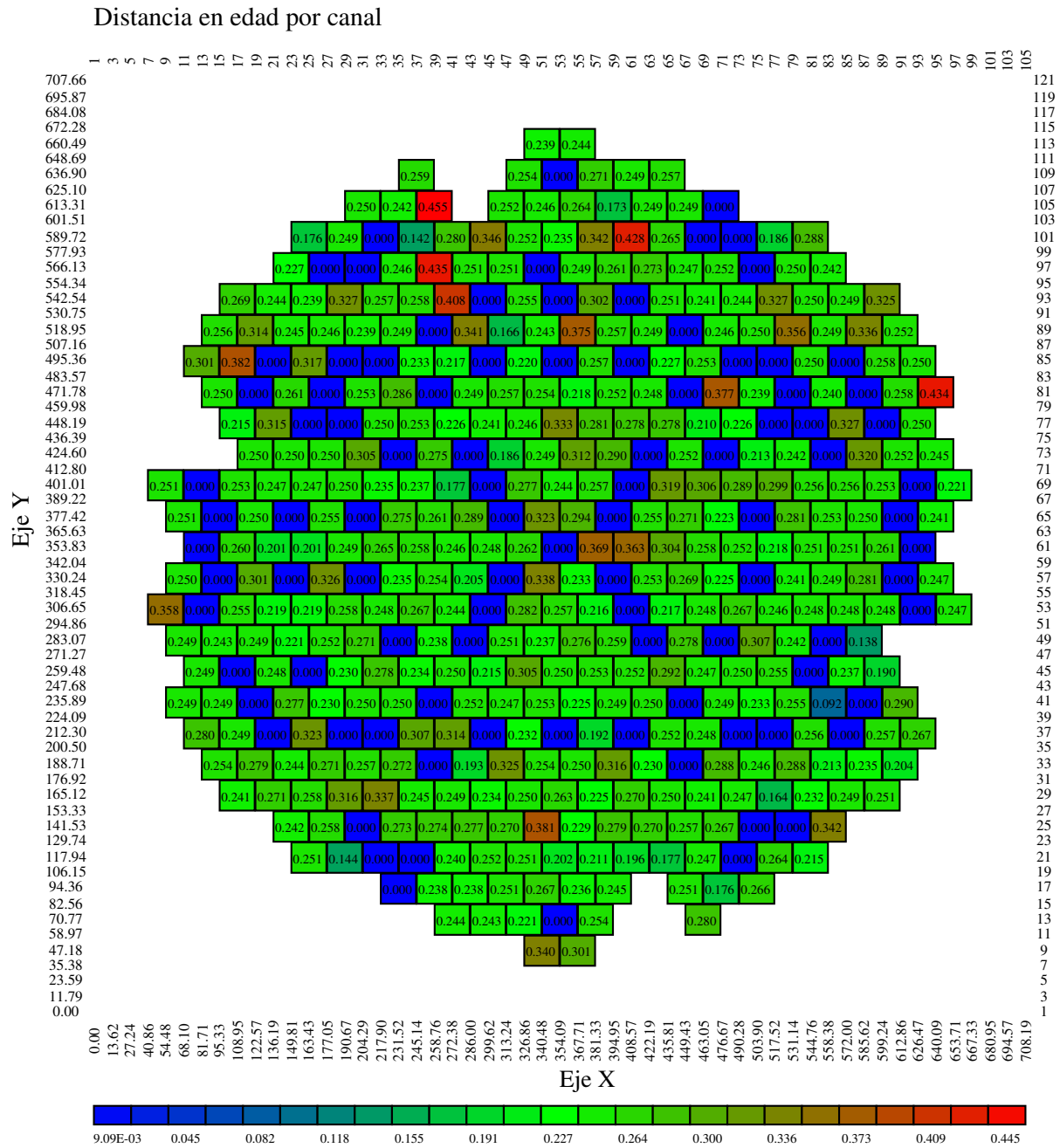


Figura 7: Distancia de edad promedio con primeros vecinos de zona por canal de la distribución 16 para la estrategia str23v4 de ULE de la CNA-UII.

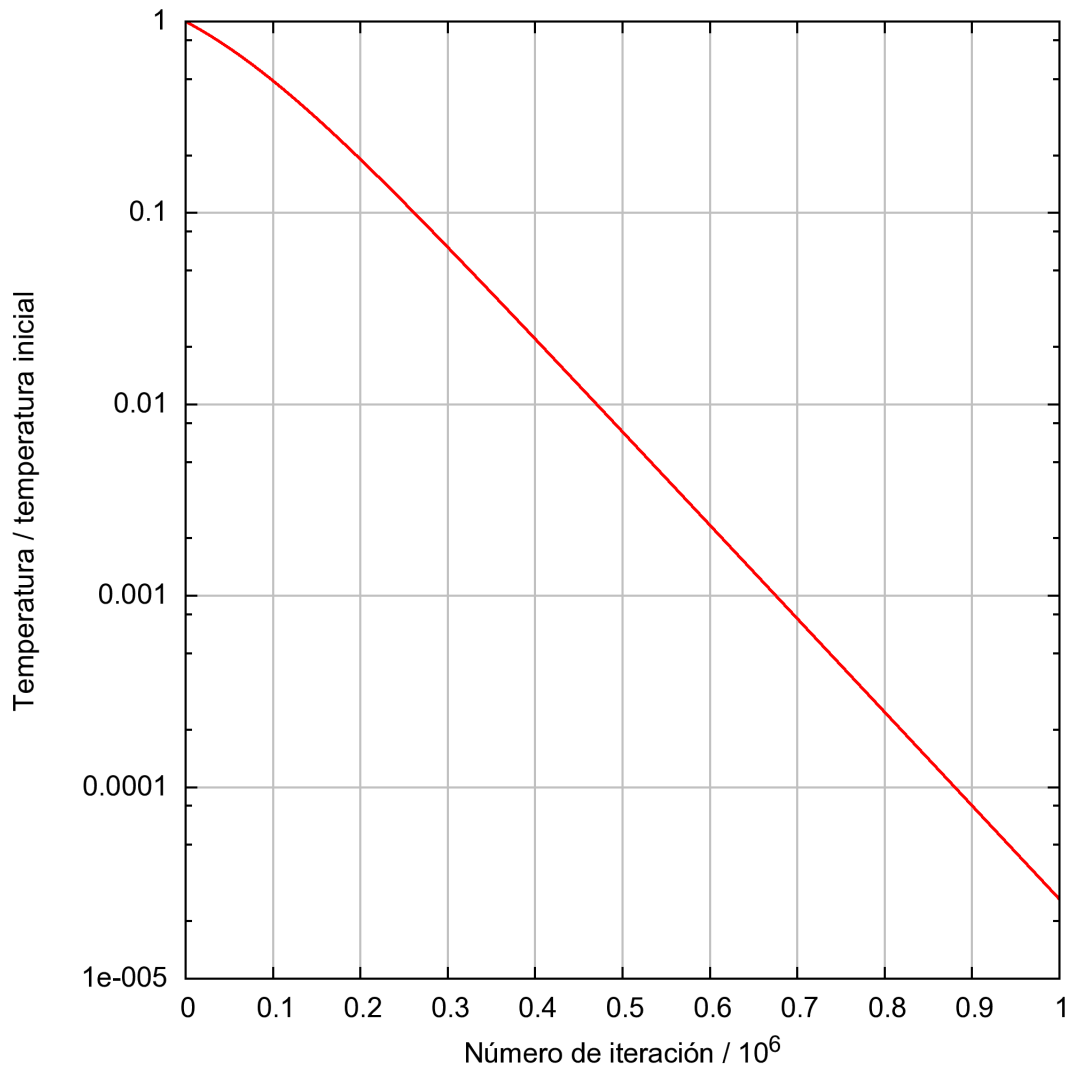


Figura 8: Evolución de la temperatura en función del número de iteración, para la distribución 20 de la estrategia str23v4 de la CNA-UII.

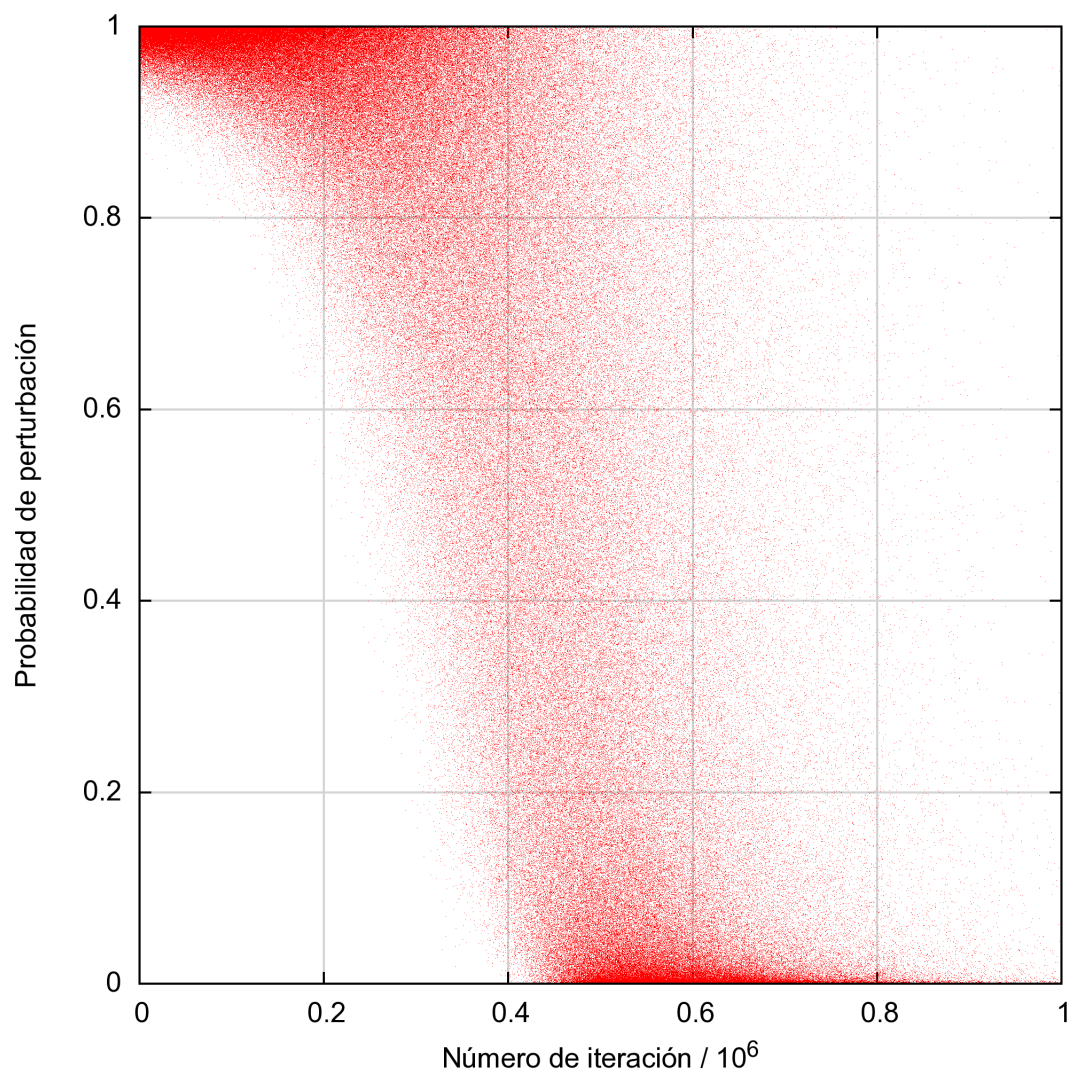


Figura 9: Probabilidad de perturbación de cada iteración, para la distribución 20 de la estrategia str23v4 de la CNA-UII.

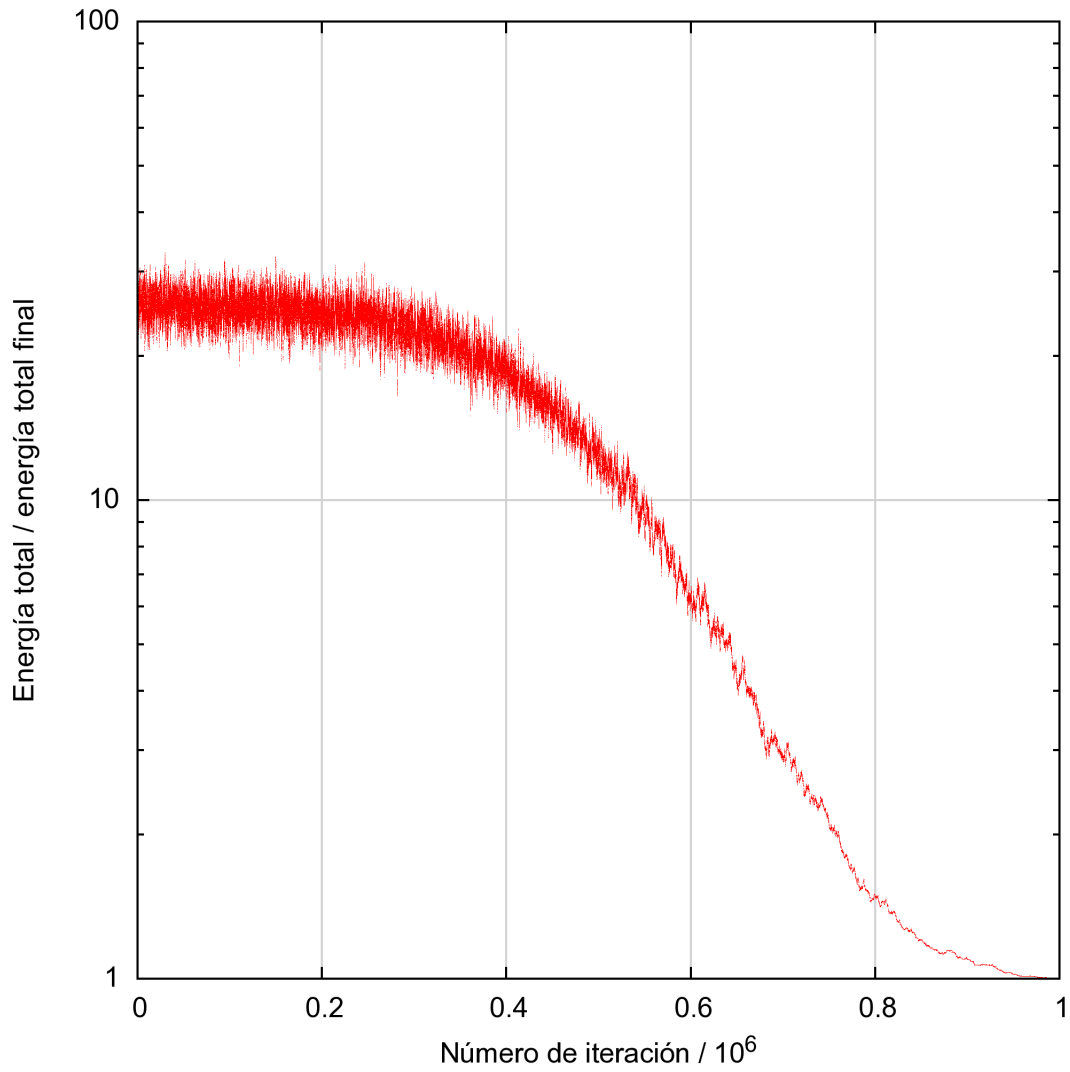


Figura 10: Evolución de la energía total en función del número de iteración, para la distribución 20 de la estrategia str23v4 de la CNA-UII.

4.2. Estrategia nominal de ULE de la CNA-UI

La estrategia nominal de la CNA-UI tiene 2 caminos, uno de 4 zonas y otro de 3 zonas. Se diseñó considerando que el canal 244 (R06) fue removido completamente del reactor. En las Figuras 11 y 12 se ilustra la definición de caminos y zonas para cada canal. En la Tabla 2 se muestra el margen mínimo y la cantidad de canales que superan potencias máximas de las 20 distribuciones obtenidas con GENDIST; de estas 20, 4 distribuciones cumplen los criterios de potencia. En particular, la distribución 7 tiene el mejor margen mínimo registrado: 0,73 % para el canal central 18 (H15).

| Distribución | Margen mínimo [%] | Canales pasados |
|--------------|-------------------|-----------------|
| 1 | -4,92 | 4 |
| 2 | -4,90 | 9 |
| 3 | -3,02 | 2 |
| 4 | -2,32 | 1 |
| 5 | -0,74 | 1 |
| 6 | -3,10 | 2 |
| 7 | 0,73 | 0 |
| 8 | 0,18 | 0 |
| 9 | -0,64 | 1 |
| 10 | -1,56 | 2 |
| 11 | -3,23 | 3 |
| 12 | -3,05 | 1 |
| 13 | -1,21 | 2 |
| 14 | -1,07 | 1 |
| 15 | -3,18 | 2 |
| 16 | -3,54 | 2 |
| 17 | 0,57 | 0 |
| 18 | -1,65 | 3 |
| 19 | 0,37 | 0 |
| 20 | -0,47 | 1 |

Tabla 2: Distribuciones generadas para la estrategia nominal de ULE de CNA-UI. Con negrita se resaltan las distribuciones con márgenes de potencia aceptables.

En la Figura 13 se muestra las edades de la distribución 7. Figura 14 se muestra la edad promedio de primeros vecinos por canal y en la Figura 15 se muestra la distancia promedio entre primeros vecinos por canal. En ambos gráficos se observa valores próximos a los ideales, similarmente como se mostró en las Figuras 6 y 7. Para este caso, la evolución de la energía se muestra en la Figura 17 y la probabilidad de perturbación, en la Figura 16. La curva de temperatura para este caso coincide con la de la Figura 8. Nuevamente, se observa un comportamiento similar al registrado en la Sección 4.1.

Se observa que el programa funciona de manera similar para CNA-UI y CNA-UII. La evolución de la energía y las probabilidades registradas tienen comportamientos cualitativamente parecidos en ambos casos. Para CNA-UI se obtuvo márgenes menores en las distribuciones aceptables. Este es consistente con los menores márgenes obtenidos en el *time-average*.

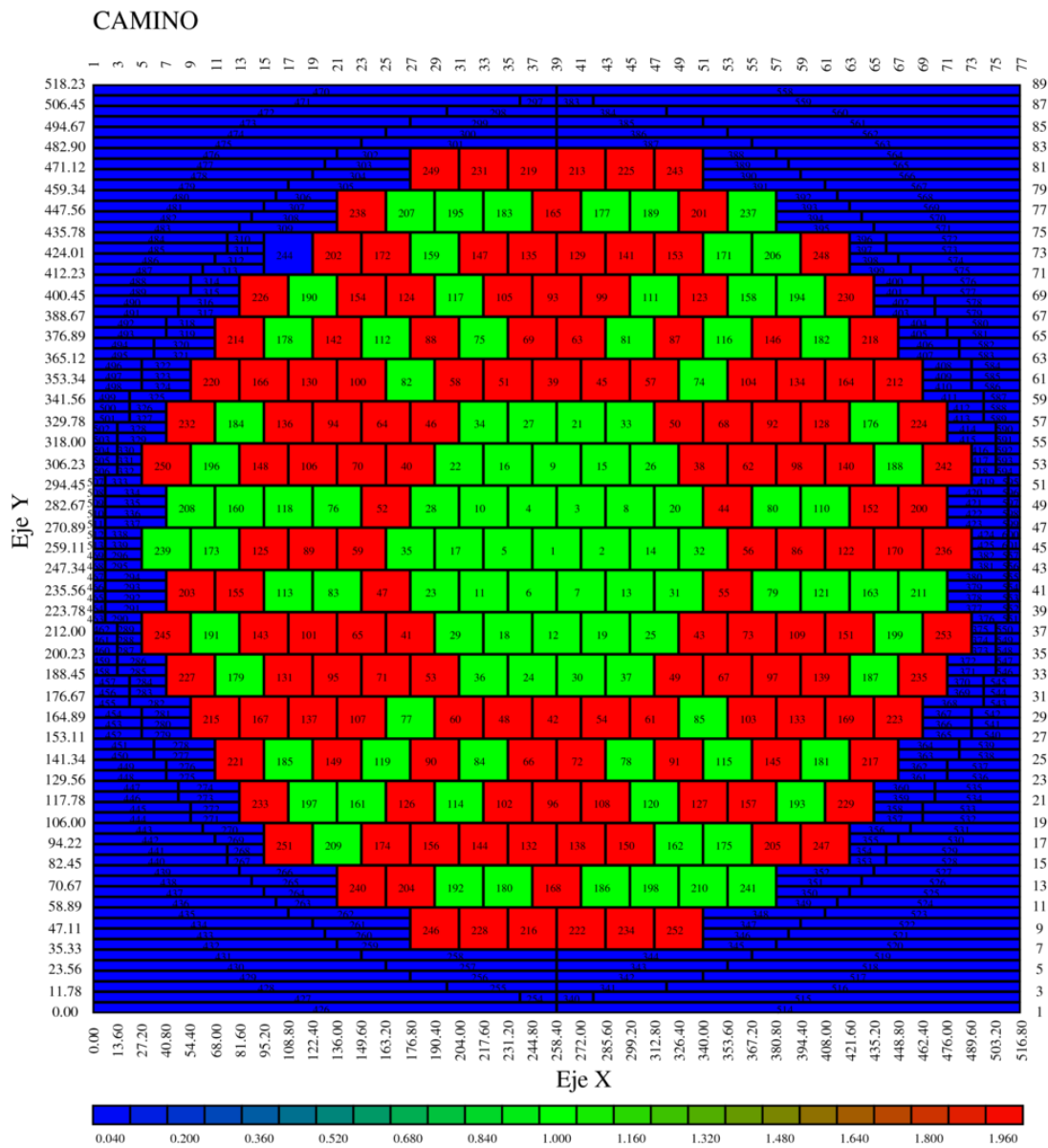


Figura 11: Definición de caminos de la estrategia nominal de ULE de la CNA-UI. Cada color representa un camino diferente.

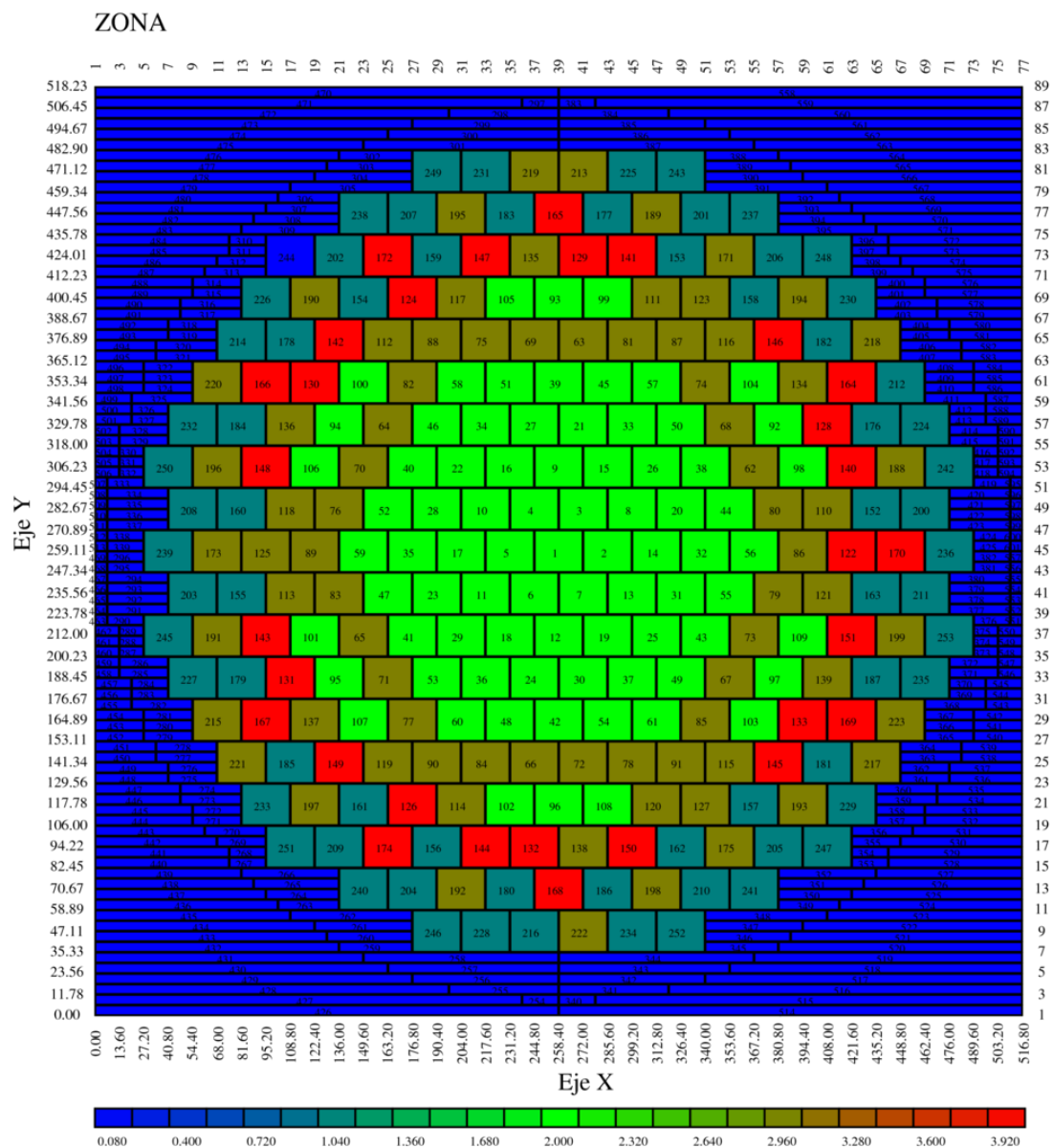


Figura 12: Definición de zonas de la estrategia nominal de ULE de la CNA-UI. Cada color representa una zona diferente.

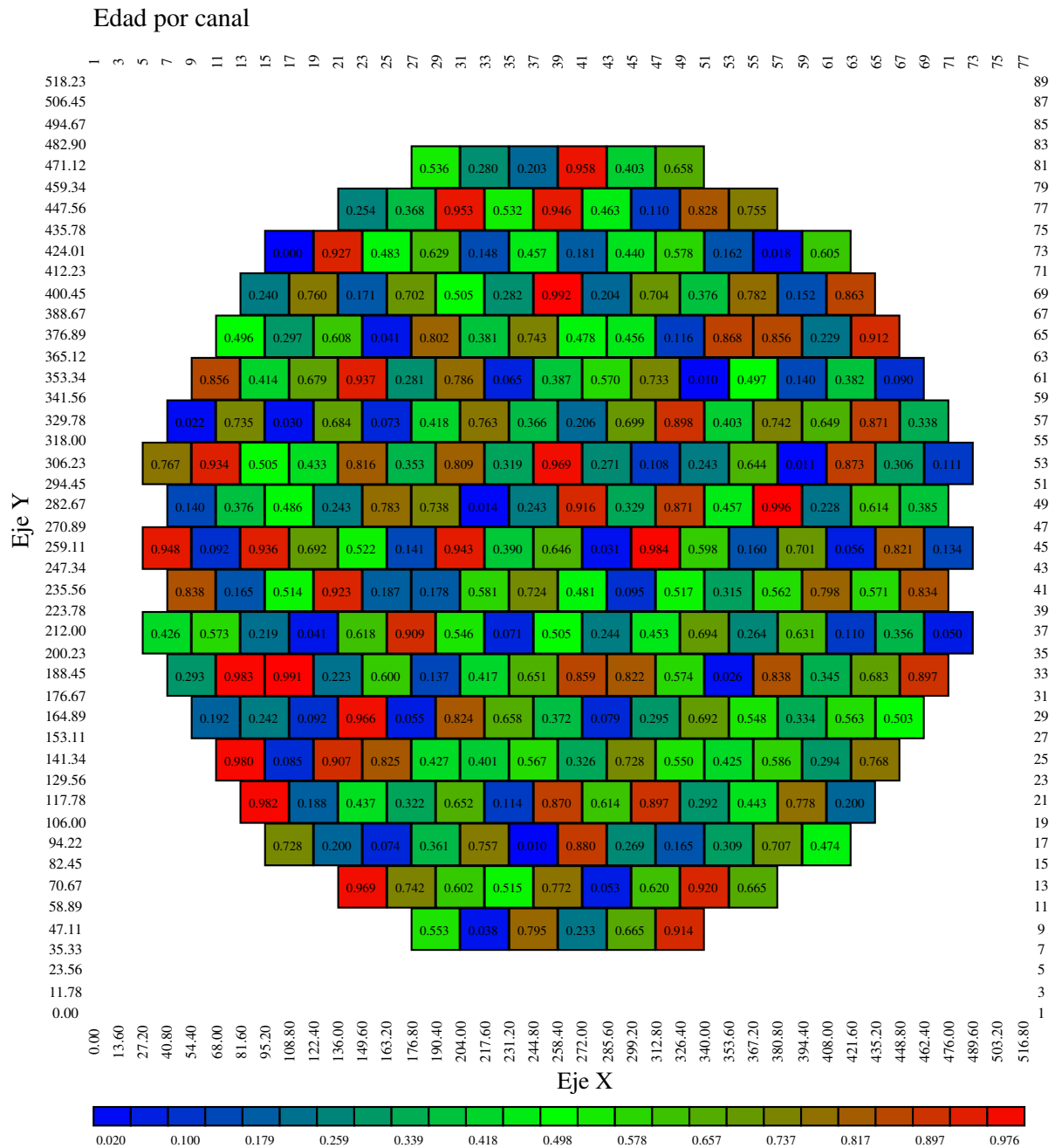


Figura 13: Edades por canal de la distribución 7 para la estrategia nominal de ULE de CNA-UI.

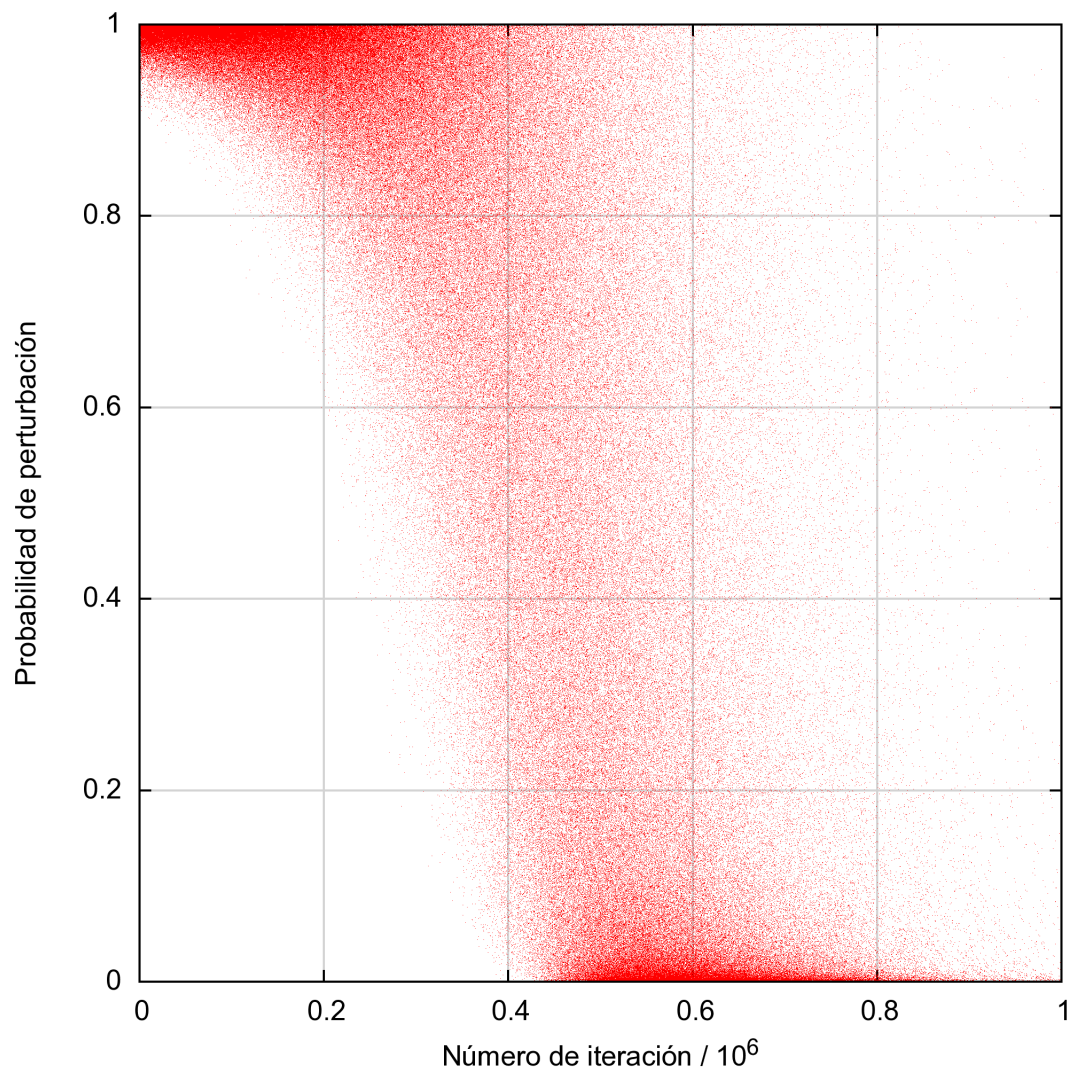


Figura 16: Probabilidad de perturbación de cada iteración, para la distribución 7 de la estrategia nominal de la CNA-UI.

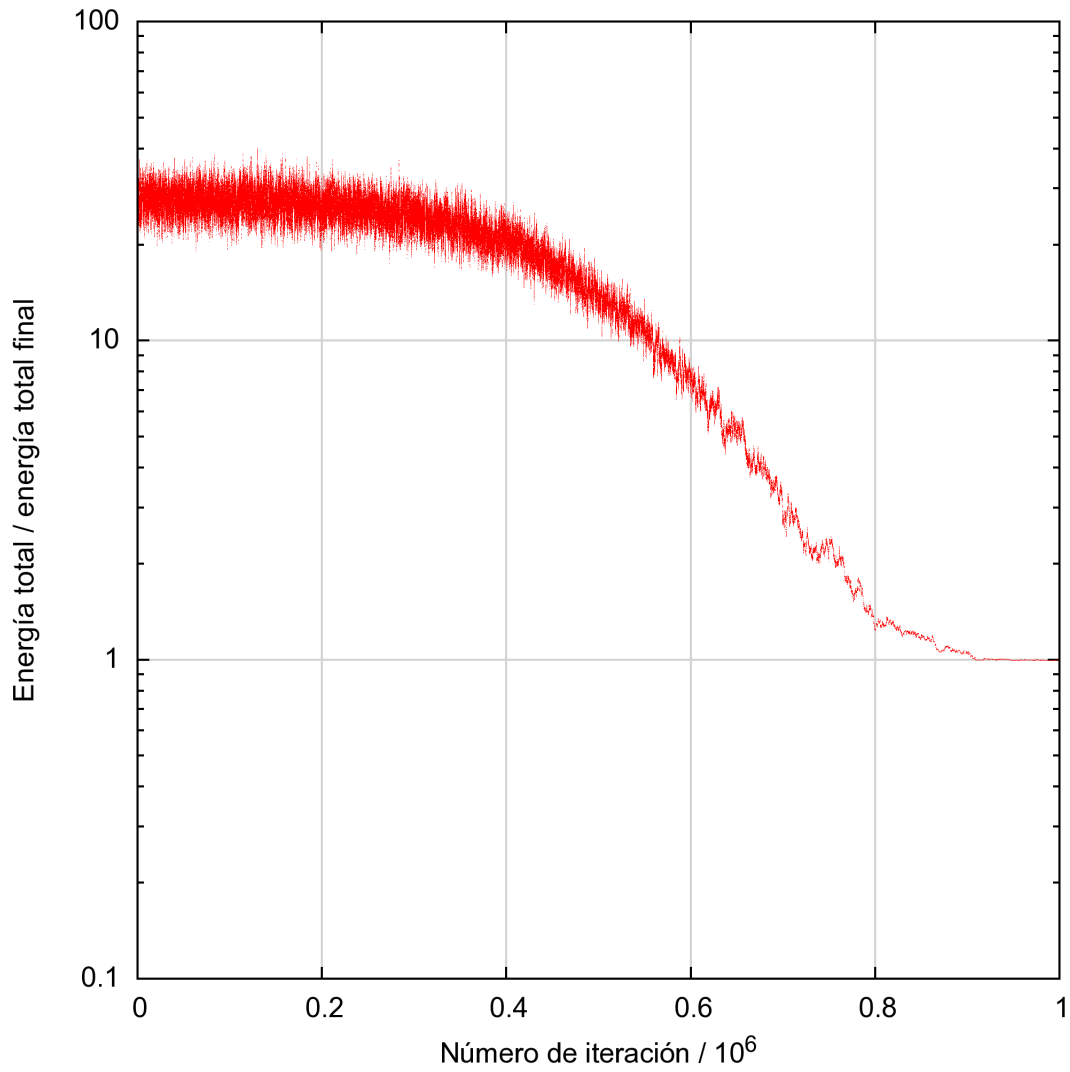


Figura 17: Evolución de la energía total en función del número de iteración, para la distribución 7 de la estrategia nominal de la CNA-UI.

5. CONCLUSIONES

Se programó y se evaluó un módulo de DINO para generar distribuciones de quemado instantáneas a partir de estados obtenidos mediante el método *time-average*. Este módulo es utilizable para la CNA-UI y CNA-UII.

Actualmente, este desarrollo está siendo usado para el diseño de la estrategia de recambios de CNA-UII con combustible ULE. Fue posible generar con éxito distribuciones de márgenes aceptables para algunas estrategias, algo que anteriormente no era posible sin modificación manual de los quemados.

Para el uso de las distribuciones instantáneas como estados iniciales de simulaciones detalladas es recomendable simular el recambio de al menos un núcleo completo. De esta manera se obtiene un estado más representativo de un estado real de planta.

Se comprobó además que el programa funciona correctamente para CNA-UI y se pudo obtener distribuciones razonables usando la estrategia de planta (combustible ULE).

REFERENCIAS

- Buchan P. y Stewart C. Application of simulated annealing to determining rfsp target exit irradiations. En *23rd CNS Nuclear Simulation Symposium*. Ottawa, Canada, 2008.
- Clavero F. y Silva M. Cálculo de los armónicos de distribución de flujo neutrónico para el reactor de embalse. En *XLII Reunión Anual*. AATN, Buenos Aires, 2015.
- Grant C. Manual del código "puma". Informe Técnico, CNEA, 2004. CNEA.C.RCN.MUS.059.
- Kirkpatrick S., Gelatt C., y Vecchi M. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671–680, 2008. doi:10.1126/science.220.4598.671.
- Mollerach R., Higa M., Silva M., y Fink J. Revision of the fuel management studies of the atucha-2 reactor. implementation of an automatic refuelling simulation program. En *23rd CNS Nuclear Simulation Symposium*. Ottawa, Canada, 2008.
- Silva M. *Desarrollo de un programa para calcular la distribución de flujo neutrónico por un método de síntesis modal basado en las lecturas de los detectores de la Central Nuclear Atucha-II*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 2012.
- Silva M. Cálculo de los armónicos superiores de la ecuación de difusión de neutrones en la geometría real del reactor. En *Mecánica Computacional*, volumen XXXIII, páginas 3081–3102. AMCA, San Carlos de Bariloche, 2014.