

PROYECTO FINAL INTEGRADOR DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA NUCLEAR CON ORIENTACIÓN EN APLICACIONES

**IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE
MAPEO DE FLUJO PODESY A LA
CENTRAL NUCLEAR ATUCHA I**

Pablo Ezequiel Brahim
Autor

Mg. Ing. Martín Sebastián Silva
Tutor

Ing. Federico Andrés Giovagnoli
Co-tutor

Julio, 2019

Instituto Dan Beninson
Universidad Nacional de San Martín

Mg. Ing. Martín Sebastián Silva

DECLARA

Que Pablo Ezequiel Brahim ha realizado bajo mi supervisión el Proyecto Final Integrador de la Carrera de Ingeniería Nuclear con Orientación en Aplicaciones titulado:

Implementación del programa de mapeo de flujo PODESY para la Central Nuclear Atucha-I

Una vez revisado, autorizo el comienzo de los trámites para su presentación como trabajo fin de grado.



MARTIN S. SILVA

Yo, Pablo Ezequiel Brahim,

DECLARO

Mi autoría del trabajo que se presenta en la memoria de este Proyecto Final Integrador de la Carrera de Ingeniería Nuclear con Orientación en Aplicaciones que tiene por título:

Implementación del programa de mapeo de flujo PODESY para la Central Nuclear Atucha-I

Lo cual firmo,



PABLO E. BRAHIM

en la Universidad de San Martín
12/07/2019

A mi mamá, mi papá, mis tres hermanos y Sole

Resumen

El presente trabajo describe el proceso de implementación del programa de mapeo de flujo PODESY para la Central Nuclear Atucha I (CNA-UI) en el marco del proyecto de su extensión de vida. Dicho programa fue originalmente desarrollado para Atucha II y permite obtener la distribución de flujo neutrónico instantáneo en tiempo real a partir de las lecturas de los detectores in-core. Del mapeo de flujo se obtienen numerosos parámetros operativos relevantes para la vigilancia de la distribución de potencia del núcleo.

El proceso de implementación involucró la adaptación del código fuente para representar aquellos aspectos en los que difieren las dos unidades de Atucha y la generación y acondicionamiento de las entradas del programa para generar el modelo del reactor de CNA-UI. Entre las tareas de actualización de los datos de entrada se incluye el cálculo de los armónicos en la geometría del reactor. Para esta tarea se utilizó el programa DINO, desarrollado por NA-SA. Además, se debieron generar las bases de datos de barras de control para las correcciones y se debió armar el modelo para el cálculo de difusión de PODESY en la geometría de CNA-UI.

La adaptación del programa a CNA-UI presenta diversos desafíos debido a que existen diferencias significativas a considerar. La discrepancia más relevante se encuentra en el sistema de control de reactividad, que en este caso emplea menor cantidad de barras pero de material más absorbente. El sistema además posee un programa de rotación entre bancos de control con diferentes configuraciones en el reactor. En el trabajo se describe la etapa de evaluación de rendimiento del programa adaptado y acondicionado a CNA-UI. La primera parte de esta etapa consta de una serie de pruebas de escritorio en las que se contrasta contra simulaciones con los programas PUMA y DINO, utilizando lecturas de detectores interpoladas en la malla de cálculo, con el objetivo de confirmar que la metodología implementada es adecuada para el problema que se quiere resolver. Una vez verificado el correcto funcionamiento de todos los módulos del programa, el trabajo se completa con la instalación en planta y la validación utilizando mediciones en tiempo real.

El programa PODESY adaptado ha demostrado un buen funcionamiento general en operación normal siguiendo con gran precisión la evolución de los principales parámetros de la planta. Durante las maniobras de arranque se observó un incremento considerable en el error de mapeo debido al alto grado de apantallamiento entre las barras de control negras. Este hecho implicará el desarrollo de una metodología alternativa para la representación de escenarios de planta con alto grado de inserción de barras.

Abstract

The present work describes the process of implementation of the PODESY flux mapping program for the Atucha-I Nuclear Power Plant (CNA-UI) within the framework of its life extension project. The mentioned program was originally developed for Atucha-II and it allows to obtain the instantaneous neutron flux distribution in real time from the readings of the in-core detectors. From the flux mapping, numerous relevant operating parameters are obtained for the monitoring of the power distribution of the core.

The implementation process involved the adaptation of the source code to represent those aspects in which the two Atucha units differ and the generation and conditioning of the program inputs to generate the model of the CNA-UI reactor. Among the tasks of updating the input data the calculation of the harmonics in the geometry of the reactor were included. For this task, the DINO program, developed by NA-SA, was used. In addition, the control rod databases for the corrections had to be generated and the model for the calculation of PODESY diffusion in the CNA-UI geometry had to be assembled.

The adaptation of the program to CNA-UI presents several challenges due to the significant differences to consider. The most relevant discrepancy is found in the reactivity control system, which in this case uses fewer rods but also more absorbent material. The system also has a rotation program between control rod banks within the different configurations in the reactor. In this work, the stage of performance evaluation of the program adapted and conditioned to CNA-UI is described. The first part of this stage consists of a series of desktop tests that are used as contrasts for the simulations with the PUMA and DINO programs, using readings of interpolated detectors in the calculation mesh, the goal being to confirm that the methodology implemented is adequate for the problem that needs to be solved. Once the correct functioning of all the modules of the program had been verified, the work will be completed with the installation on Site and its validation using measurements in real time.

The adapted PODESY program has demonstrated a good general functioning in normal operation representing with great precision the evolution of the main parameters of the Plant. During the start-up maneuvers, a considerable increase in the mapping error is observed due to the high degree of shielding effect between control rods. This fact will imply the development of an alternative methodology for the representation of different Plant scenarios with a high degree on the control rods insertion.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.2. La Central Nuclear Atucha I	2
1.3. El programa PODESY	11
1.3.1. Estructura del programa	14
2. Adaptación de PODESY para CNA-UI	20
2.1. Cálculo de autofunciones	20
2.2. Cálculo de las bibliotecas de factores f_b	23
2.3. Adaptación de entradas y códigos	23
2.3.1. Entrada de datos general	23
3. Pruebas de escritorio	34
3.1. Evaluación del módulo LSFIT	34
3.1.1. Metodología de evaluación	34
3.1.2. Resultados y discusiones	36
3.2. Evaluación del módulo STAFI	48
3.2.1. Metodología de evaluación	49
3.2.2. Resultados y discusiones	49
3.3. Evaluación del módulo FLUX	52
3.3.1. Metodología de evaluación	52
3.3.2. Resultados y discusiones	52
3.4. Evaluación del módulo HETERO	53
3.4.1. Metodología de evaluación	53
3.4.2. Resultados y discusiones	53
3.5. Evaluación integral del programa PODESY	55
3.5.1. Metodología de evaluación	55
3.5.2. Resultados y discusiones	56
4. Pruebas con señales de planta	64
4.1. Evaluación y análisis del comportamiento de PODESY	64
4.1.1. Error cuadrático medio	65
4.1.2. Oscilaciones de xenón	65
4.1.3. Determinación de parámetros operativos	67
4.1.4. Recambios de combustible	70
4.1.5. Estado de arranque después de una parada larga	76
5. Conclusiones	79
Referencias	80
Agradecimientos	81

Índice de figuras

1.1. Esquema de una barra combustible de CNA-1.	3
1.2. Esquema de un elemento combustible de CNA-1.	4
1.3. Esquema de la distribución de canales por zona hidráulica.	5
1.4. Esquema del sistema de refrigeración del núcleo de Atucha I.	6
1.5. Esquema del sistema moderador dentro del núcleo de Atucha I.	7
1.6. Disposición y recorrido de las barras de control.	9
1.7. Esquema de la posición de las lanzas de detectores y de la asignación de canales por zona de vigilancia.	10
1.8. Esquema de la posición de los detectores en cada lanza y de la asignación de las zonas de vigilancia axiales.	11
1.9. Diagrama de bloques del programa PODESY.	14
1.10. Entradas y salidas principales del módulo STAFI.	17
1.11. Entradas y salidas principales del módulo BURNUP.	17
1.12. Entradas y salidas principales del módulo FLUX.	17
1.13. Entradas y salidas principales del módulo HETERO.	18
1.14. Entradas y salidas principales del módulo LSFIT.	18
1.15. Entradas y salidas principales del módulo INTER.	19
2.1. Modos armónicos azimutales de primer orden.	21
2.2. Modos armónicos azimutales de segundo orden.	22
2.3. Modo armónico 14 (radial).	22
3.1. Errores cuadráticos medios del mapeo de flujo en los detectores (arriba) y de la comparación entre los los flujos calculados y los teóricos en canales y trozos (abajo) en función de la cantidad de armónicos. Error de $\pm 1\%$ en las lecturas de los detectores.	37
3.2. Errores cuadráticos medios del mapeo de flujo en los detectores (arriba) y de la comparación entre los los flujos calculados y los teóricos en canales y trozos (abajo) en función de la cantidad de armónicos. Error de $\pm 5\%$ en las lecturas de los detectores.	38
3.3. Errores cuadráticos medios del mapeo de flujo en los detectores (arriba) y de la comparación entre los los flujos calculados y los teóricos en canales y trozos (abajo) en función de la cantidad de armónicos. Error de $\pm 10\%$ en las lecturas de los detectores.	39
3.4. Esquema de los volúmenes perturbados simulados en cada caso.	40
3.5. Parametrización del banco R3 y cada una de sus barras.	42
3.6. Parametrización del banco RG y cada una de sus barras.	44
3.7. Parametrización de los bancos negros intercambiados.	45
3.8. Errores cuadráticos medios del ajuste en detectores al utilizar 6, 10 y 14 armónicos para distintos estados de planta.	46
3.9. Errores cuadráticos medios de la comparación con flujos teóricos en canales y trozos al utilizar 6, 10 y 14 armónicos para distintos estados de planta.	47
3.10. Errores cuadráticos medios del ajuste en detectores al utilizar las bases de 6 y 7* armónicos.	48

3.11. Errores cuadráticos medios de la comparación con flujos teóricos en canales y trozos al utilizar las bases de 6 y 7* armónicos.	48
3.12. Parametrización del banco R3 y cada una de sus barras con y sin STAFI activado.	49
3.13. Parametrización del banco RG y cada una de sus barras con y sin STAFI activado.	50
3.14. Parametrización de los bancos negros alternativos con y sin STAFI activado.	51
3.15. Diferencias en reactividades efectivas calculadas con FLUX y PUMA	52
3.16. Error cuadrático medio en la potencia por canal entre los cálculos con FLUX y PUMA	53
3.17. Errores cuadráticos medios del mapeo en detectores con y sin la corrección por quemado.	54
3.18. Errores cuadráticos medios de la comparación con flujos teóricos en canales y trozos con y sin la corrección por quemado.	54
3.19. Errores cuadráticos medios, máximos y mínimos en el cálculo de potencia por canal con y sin la corrección por quemado.	55
3.20. Errores cuadráticos medios de las potencias por canal obtenidas con respecto a PUMA en operación normal.	56
3.21. Errores cuadráticos medios de las potencias por canal obtenidas con respecto a PUMA en operación normal con cambio de banco negro.	57
3.22. Potencias lineales máximas calculadas por PODESY y PUMA.	58
3.23. Error relativo en el cálculo de potencia lineal con PODESY y PUMA.	58
3.24. Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 1 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)	59
3.25. Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 2 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)	60
3.26. Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 3 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)	60
3.27. Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 4 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)	61
3.28. Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 5 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)	61
3.29. Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 6 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)	62
3.30. Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 7 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)	62
3.31. Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 8 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)	63
4.1. Errores cuadráticos medios del ajuste y seguimiento del banco R1.	65
4.2. Seguimiento del factor axial total y el coeficiente del primer modo axial.	66
4.3. Seguimiento del factor axial total y la posición de la barra parcial 13.	67
4.4. Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 1.	67
4.5. Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 2.	68
4.6. Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 3.	68
4.7. Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 4.	68
4.8. Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 5.	69
4.9. Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 6.	69
4.10. Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 7.	69
4.11. Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 8.	70
4.12. Evolución del error cuadrático medio del ajuste en detectores durante el recambio 1.	71
4.13. Evolución de los coeficientes de los modos azimutales y de la inserción del banco R1 durante el recambio 1.	72

4.14. Evolución del error cuadrático medio del ajuste en los detectores y de la inserción de bancos durante el recambio 2.	73
4.15. Evolución de los coeficientes de los modos azimutales y del flujo integrado en la lanza 8.	74
4.16. Evolución del error cuadrático medio del ajuste en los detectores durante el recambio 3.	75
4.17. Evolución de los coeficientes de los modos azimutales y del flujo integrado en la lanzas 3 y 4.	76
4.18. Evolución del error cuadrático medio del ajuste y de la potencia durante el arranque	77
4.19. Evolución del error cuadrático medio y de la inserción de los distintos bancos de barras durante el arranque.	77

Índice de tablas

1.1.	Características de las barras de control de CNA-UI.	8
1.2.	Correspondencia de lanzas con denominación de planta.	11
1.3.	Glosario de los archivos de datos principales del programa.	16
2.1.	Descripción de los armónicos obtenidos del cálculo.	21
2.2.	Inserción nominal proyectada de barras y cantidad de pasos considerados.	23
3.1.	Coefficientes de la combinación lineal de autofunciones que componen cada conjunto de flujos sintetizados	36
3.2.	Error cuadrático medio del ajuste en detectores para cada caso y cantidad de armónicos de la expansión considerados.	40
3.3.	Error cuadrático medio de la comparación con los flujos teóricos en canales y trozos para cada caso y cantidad de armónicos de la expansión considerados.	40
3.4.	Valores de los coeficientes de la expansión y errores para cada caso con 6 armónicos.	40
3.5.	Condiciones de arranque ensayadas y error cuadrático medio en el ajuste en detectores y de la comparación con los flujos teóricos de PUMA en canales y trozos.	45
3.6.	Condiciones de arranque ensayadas y error cuadrático medio en el ajuste en detectores y de la comparación con los flujos teóricos de PUMA en canales y trozos activando el módulo STAFI.	51
4.1.	Características de las operaciones del recambio 1.	70
4.2.	Características de las operaciones del recambio 2.	72
4.3.	Características de las operaciones del recambio 3.	74

Capítulo 1

Introducción

El programa PODESY (*Power Density Synthesis*) [1] fue desarrollado por Nucleoeléctrica Argentina S.A (NA-SA) [2] para brindar información en tiempo real al sistema de limitaciones sobre el estado de una gran cantidad de parámetros operacionales de la Unidad II de la Central Nuclear Atucha (CNA-UII) con una precisión y robustez altas. Este sistema actúa en un estado de planta más allá de la zona de regulación y antes de la protección. Como asistencia al sistema de limitación, la CNA-UII cuenta con una computadora de procesos llamada READAT que permite calcular en tiempo real y con gran precisión un conjunto de parámetros de la planta basándose en mediciones. Los resultados de estos cálculos *Best Estimate* permiten verificar que los márgenes de operación estimados por el sistema de limitación de la planta son conservadores. Entre los programas que se ejecutan en la computadora de procesos, PODESY permite calcular la distribución de potencia del núcleo basándose en las mediciones de los detectores in-core, las posiciones de las barras de control y la distribución de quemados, provista por otro programa llamado BURNUP. El cálculo realizado por PODESY consiste en representar la distribución de flujo térmico del núcleo como una combinación lineal de autofunciones (o armónicos) de la ecuación de difusión de neutrones en la geometría real del reactor, para un estado de quemados promediado en el tiempo (*Time Average*) y con las barras de control en la posición nominal. Sobre esa combinación lineal, a posteriori, se aplican correcciones que tienen en cuenta las desviaciones en el flujo local debidas a la posición real de las barras de control y al quemado instantáneo. Estas correcciones se fundan en la teoría de perturbaciones. Para el caso de las barras de control se utiliza una base de datos pre-calculada en función de la inserción de cada una de las barras. Para el quemado, en cambio, se calculan las correcciones en base a la distribución estacionaria de flujo, calculada periódicamente usando teoría de difusión para el quemado instantáneo.

El gran valor de la información proporcionada por el programa a la operación sumado a una posible extensión de vida en el futuro motivan y fundamentan su implementación a la Unidad I (CNA-UI), que posee un reactor conceptualmente similar pero con diferencias significativas que deben ser apropiadamente consideradas. Entre las discrepancias relevantes a la distribución del flujo neutrónico se encuentran la cantidad, naturaleza y disposición de las barras de control y el enriquecimiento del combustible.

El menor tamaño de Atucha I significa una menor distancia entre las zonas de influencia de las barras de control, en este caso de Hafnio y de acero inoxidable. El combustible utilizado se halla enriquecido al 0.85 % lo que implica una estrategia de gestión del combustible distinta y una dinámica de recambio relativamente menos intensa.

En las secciones siguientes se presentarán los objetivos generales del trabajo, una descripción del reactor detallando los aspectos técnicos particulares relevantes de Atucha I y finalmente una descripción de la arquitectura del programa y de sus subprogramas constituyentes.

1.1. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es adaptar el programa PODESY al uso en la Central Atucha I verificando su correcto funcionamiento en base a pruebas de escritorio. Una vez hecha esta verificación, se busca implementarlo en la Central de manera de poder hacer una evaluación preliminar de su funcionamiento en tiempo real con señales de planta.

1.2. La Central Nuclear Atucha I

La Central Nuclear Atucha I (CNA-UI) se encuentra ubicada en la localidad de Lima (Partido de Zárate, Buenos Aires), sobre la margen derecha del Río Paraná de las Palmas. El diseño del reactor está basado en el prototipo alemán MZFR y la construcción, iniciada en 1968, estuvo a cargo de la subsidiaria Kraftwerkunion (KWU) de Siemens, mediante un esquema de contrato llave en mano. La Central fue conectada al Sistema Eléctrico Nacional en 1974 convirtiéndose en la primera de América Latina. Actualmente entrega una potencia eléctrica de 362 MW y es operada por NA-SA. El proceso termodinámico que tiene lugar en CNA-UI, al igual que el de cualquier central térmica de vapor, se puede representar como un ciclo de Rankine, con la particularidad de que en este caso se utiliza un reactor nuclear como fuente de calor.

El reactor nuclear es de tipo PHWR (Presurized Heavy Water Reactor), es decir que se trata de un recipiente de presión que utiliza agua pesada como moderador y refrigerante. La principal ventaja que surge al utilizar agua pesada como moderador de neutrones respecto al agua liviana es la mayor economía de neutrones debido a una relación aproximada de 660 a 1 en las secciones eficaces de captura neutrónica para el rango térmico de energía. Este hecho es el que habilita el uso de uranio natural como combustible, sin la necesidad de enriquecer, compensando en cierto grado los costos que conlleva la tecnología de agua pesada.

Otra característica única de la moderación con agua pesada es la mayor estabilidad de la reacción en cadena. Esto se debe a que la energía de enlace del núcleo de deuterio es relativamente baja (2,2 MeV), lo que le permite a los neutrones energéticos, y especialmente a la radiación gamma, disociar los núcleos de deuterio produciendo neutrones adicionales. El campo de radiación gamma dentro del reactor está compuesto por la contribución de los fotones de alta energía producidos directamente en las fisiones y por los fotones de alta energía provenientes del decaimiento de los productos de fisión y demás núcleos inestables producidos en el núcleo, cuyas vidas medias varían desde segundos a horas o incluso años.

Esta última contribución a la producción de neutrones por radiación gamma o *fotoneutrones* aporta un retraso a la respuesta del reactor frente a cambios en el ritmo de fisión. Esto significa que el uso de agua pesada como moderador proporciona un margen de acción mayor ante cualquier eventualidad involuntaria que implique un cambio de reactividad que atente contra la estabilidad de los combustibles. Además, la presencia de esta fuente de fotoneutrones permite realizar la aproximación a crítico del reactor sin necesidad de una fuente externa.

A continuación se presenta una descripción resumida de la Central, iniciando con el combustible para pasar al sistema primario de refrigeración, sistema de recambios, sistema moderador y finalmente el sistema de control de reactividad por barras.

Elementos combustibles

Atucha I inicialmente utilizaba combustible con uranio natural, pero entre 1995 y 2001 se llevó adelante el proyecto de conversión del núcleo a combustible de Uranio Levemente Enriquecido (ULE) al 0,85% [3] con el fin de optimizar el ciclo de combustible. Esta modificación permitió incrementar el nivel de quemado de 5,9 a 11,0 $\frac{MWd}{kgU}$, resultando en una disminución del ritmo de

recambio y una reducción en el consumo de elementos combustibles y del volumen de combustibles irradiados almacenados en las piletas del sitio.

El calor, entonces, proviene principalmente de la energía depositada por los productos de la fisión de núcleos de ^{235}U en la matriz del combustible de dióxido de uranio sinterizado en forma de pastillas cilíndricas. Las pastillas se apilan y envuelven por una vaina de zircaloy-4 en atmósfera de helio componiendo la longitud activa de una barra combustible. Las barras combustibles cuentan además con dos discos compensadores, un anillo y tubo soporte y dos tapones de cierre (ver Figura 1.1).

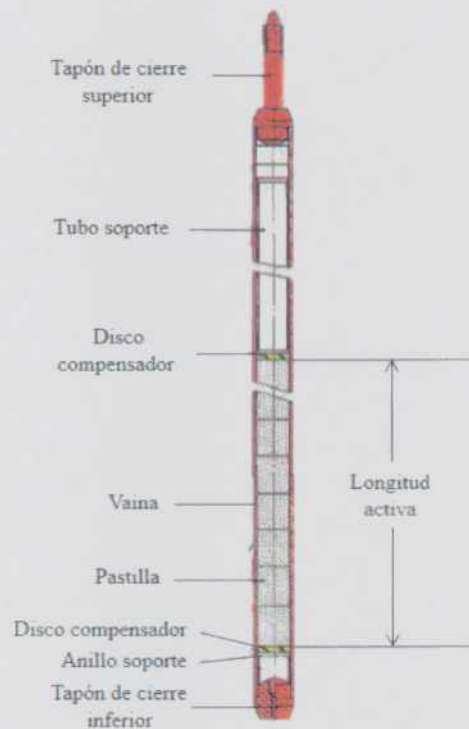


Figura 1.1: Esquema de una barra combustible de CNA-1.

El arreglo de 37 barras combustibles junto con los separadores, placas soporte, acoplamientos y cuerpos de relleno, conforman cada uno de los elementos combustibles verticales de Atucha I (ver Figura 1.2). Los elementos combustibles se encuentran alojados en los 253 canales refrigerantes con arreglo triangular mostrados en la Figura 1.3 que atraviesan el tanque del moderador, por donde circula el refrigerante intercambiando calor con las barras combustibles. Es importante aclarar que el número de elementos combustibles distribuidos entre los canales se ha modificado desde los 253 establecidos en el diseño original, pasando por 250 a partir de la década del noventa, hasta los 241 actuales. Esta última modificación [4] fue concebida con el objetivo de reducir la fluencia de neutrones y el consecuente daño por irradiación en el recipiente de presión y es la que se modela en este trabajo.

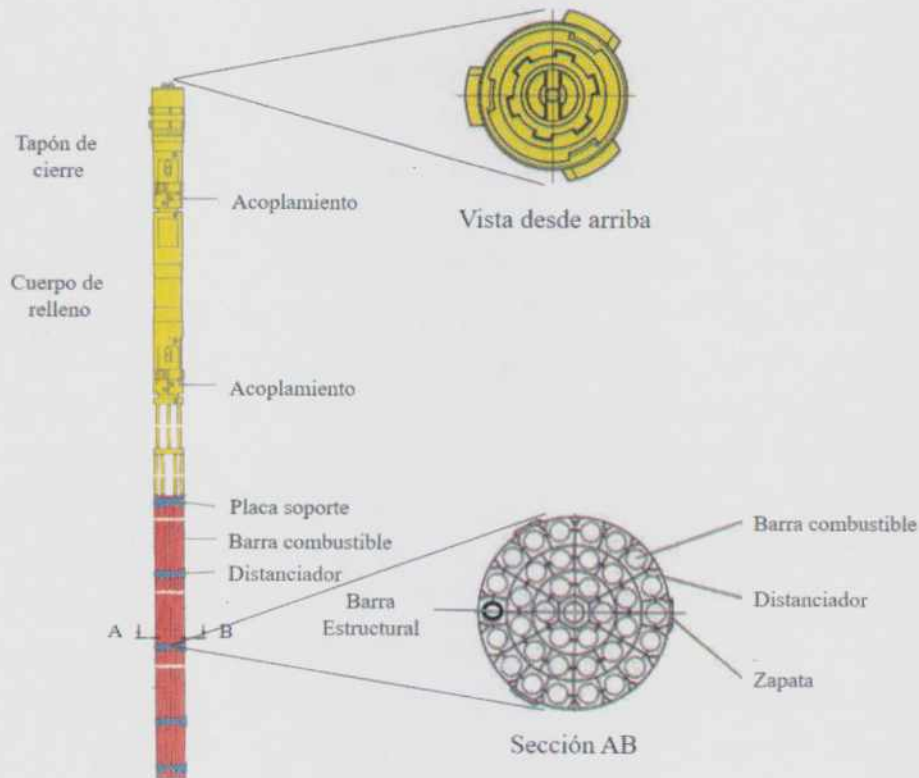


Figura 1.2: Esquema de un elemento combustible de CNA-1.

Sistema primario de refrigeración

El Sistema está compuesto por los canales de refrigeración, dos circuitos en paralelo o *loops* con un generador de vapor y una bomba principal, y un presurizador.

El agua pesada de refrigeración a alta presión (aproximadamente 115 bar) penetra por los dos cabezales de entrada del recipiente de presión, uno por loop, al espacio anular entre éste y el tanque del moderador, y fluye hacia el plenum inferior. Desde allí, el medio refrigerante se distribuye entre los 253 canales de refrigeración. Debido al perfil de potencia radial del núcleo y con el fin de obtener temperaturas similares a la salida de los canales refrigerantes, estos se dividen en 8 zonas hidráulicas controladas por toberas de regulación de caudal (ver Figura 1.3).

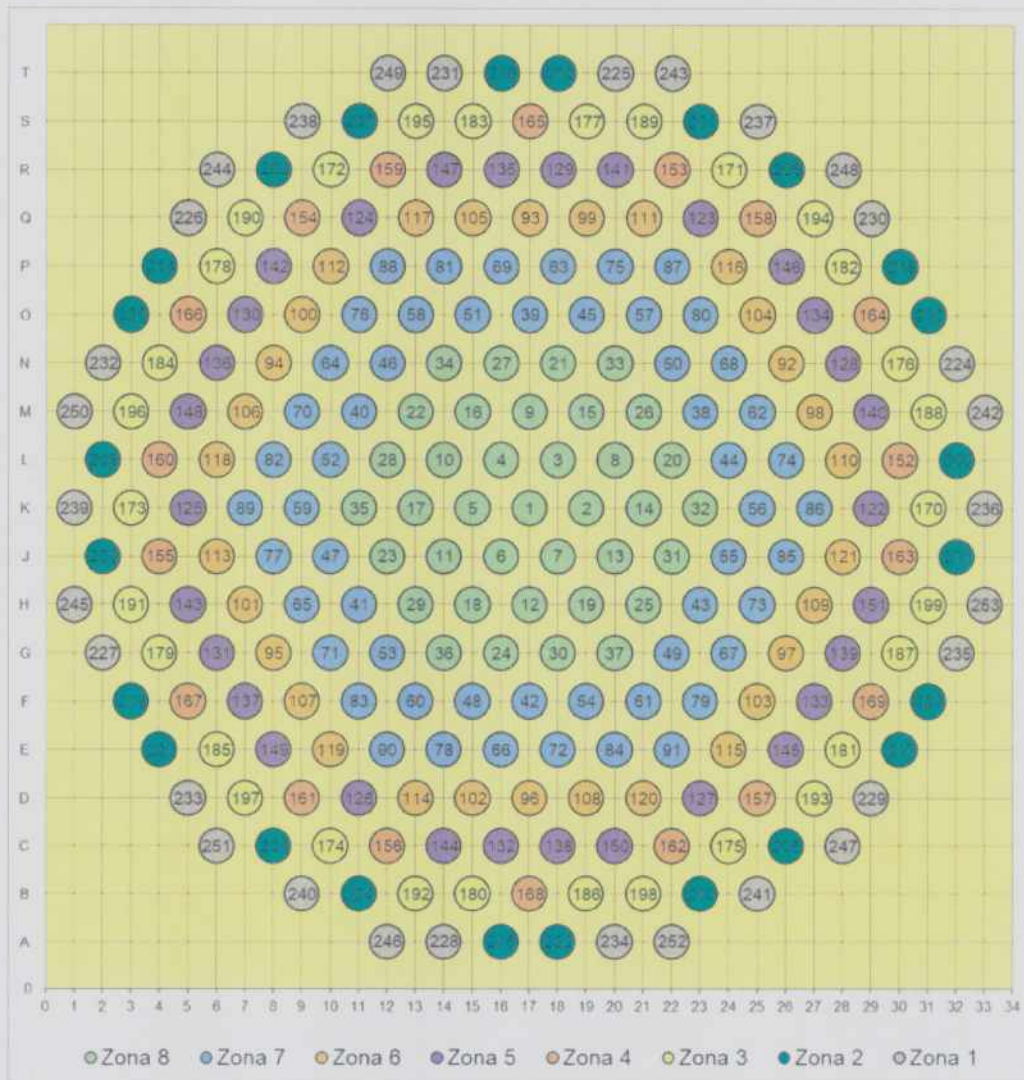


Figura 1.3: Esquema de la distribución de canales por zona hidráulica.

El empleo de refrigerante a alta presión le permite alcanzar altas temperaturas sin llegar a la ebullición, mejorando el rendimiento del ciclo. Luego de remover calor del núcleo, el refrigerante sale desde los canales refrigerantes hacia el plenum superior y desde allí abandona el recipiente de presión por los dos cabezales de salida. El recorrido del refrigerante dentro del recipiente de presión es esquematizado en la Figura 1.4. Al abandonar el recipiente de presión, el refrigerante es dirigido hacia un generador de vapor. Ambos generadores de vapor consisten en un haz de tubos en U verticales invertidos en una carcasa cilíndrica. Tienen como misión transferir calor del refrigerante del reactor, que circula por los tubos, al agua liviana del circuito secundario, que circula por la carcasa, y cambia su estado de agregación a vapor. A la salida de cada generador de vapor se ubica una bomba centrífuga vertical de descarga única para impulsar al fluido nuevamente al recipiente de presión, cerrando de esta manera el circuito primario. El circuito además cuenta con un presurizador para mantener la presión requerida del sistema.

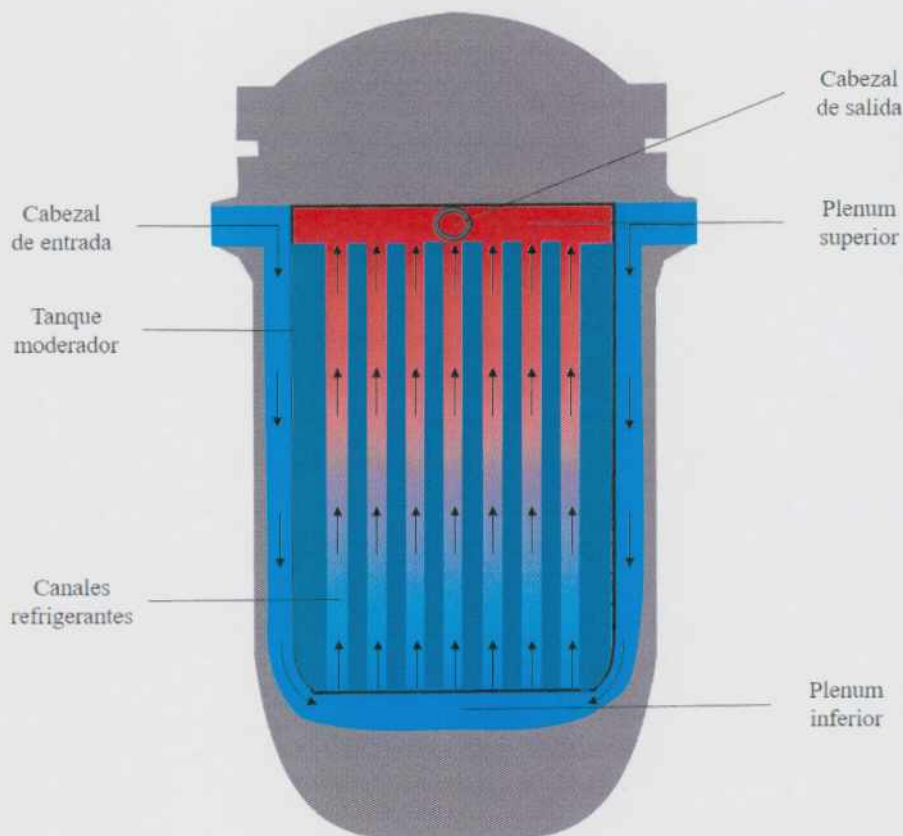


Figura 1.4: Esquema del sistema de refrigeración del núcleo de Atucha I.

Sistema moderador

El agua pesada es contenida en el tanque del moderador ubicado dentro del recipiente de presión, atravesado por los canales refrigerantes. Debido a la transferencia de energía por parte de los neutrones en las colisiones, la radiación gamma y la transferencia de calor a través de las paredes de los canales refrigerantes, el moderador ve aumentada su energía interna y su temperatura. Por este motivo, el moderador cuenta con su propio sistema de refrigeración. Este sistema trabaja a la misma presión que el circuito primario y está compuesto por dos bombas y dos intercambiadores de calor.

En la Figura 1.5 se muestra un esquema del recorrido del moderador dentro del recipiente de presión. El moderador penetra el tanque por sus 2 cabezales de entrada y desciende por dos cañerías próximas a la pared del tanque moderador hasta una tubería con forma de toroide con orificios que distribuye el caudal uniformemente en el tanque del moderador. El flujo asciende por el tanque, entre los canales de refrigeración, y en la parte superior se ubica un toroide similar que succiona este caudal a través de los orificios y lo devuelve a su circuito de refrigeración a través del cabezal de salida.

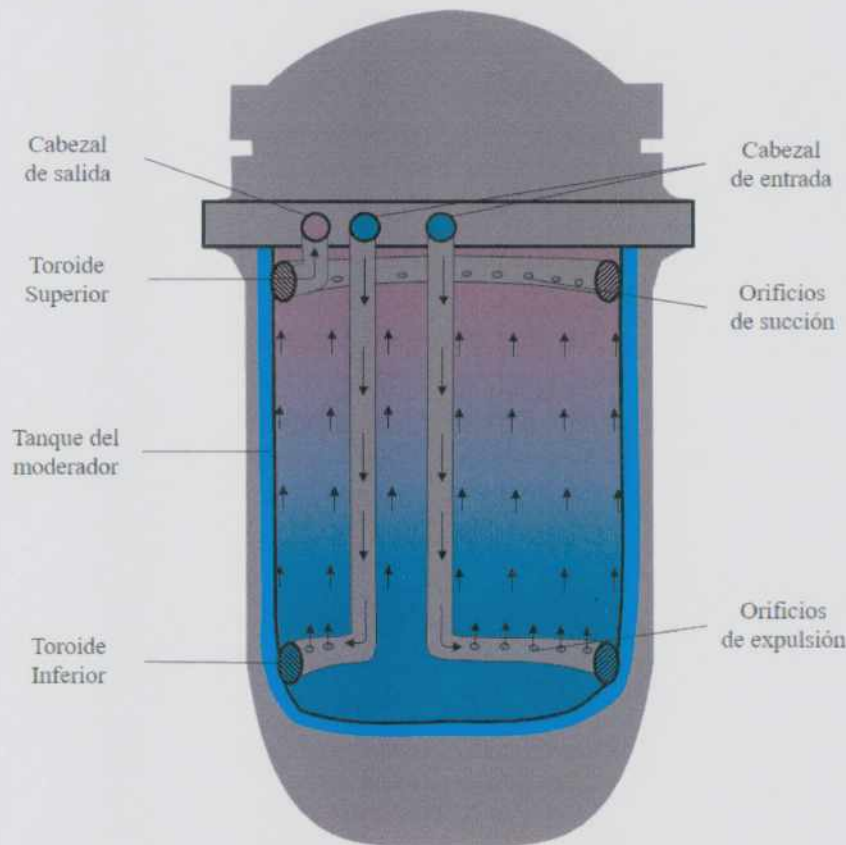


Figura 1.5: Esquema del sistema moderador dentro del núcleo de Atucha I.

Máquina de recambio de combustibles

La máquina de carga tiene la función de extraer, insertar y transportar elementos combustibles entre los distintos canales y es la encargada de recibir los elementos frescos y despedir los elementos quemados del núcleo desde y hacia el edificio de piletas. La máquina posee un tambor con la capacidad de almacenar hasta 4 elementos combustibles y un espacio para las herramientas necesarias para extraer y colocar el tapón de cierre de los canales. Durante las operaciones de recambio la máquina se acopla al sistema primario para mantener el flujo de refrigerante en el canal.

Gestión de combustibles

La gestión de elementos combustibles tiene el cometido de establecer un programa de recambios que maximice la utilización del material fisil, es decir el quemado medio de extracción, cumpliendo con los márgenes de potencia apropiados.

Cada combustible permanece en el canal un determinado tiempo hasta que alcanza cierto valor de quemado predefinido. El combustible quemado puede ser trasladado a otro canal que mejore su eficiencia energética o extraído del núcleo si ha alcanzado un grado alto de quemado.

El núcleo es dividido en una o más partes disjuntas llamadas caminos que se subdividen en partes, también disjuntas, denominadas zonas de modo que los combustibles sólo pueden trasladarse entre zonas de un mismo camino. Este proceso es optimizado mediante la definición de una estrategia de recambios.

La estrategia de recambio para cada camino consiste en extraer un elemento de su primera zona, reemplazarlo por uno de la zona 2 y así sucesivamente hasta cargar un elemento fresco en la última zona. En general, para cada operación de recambio, se elige el camino que tiene el

combustible con el quemado más alto.

Sistema de barras de control

La reactividad y la distribución de la población neutrónica son controladas por las 29 barras de control. Debido a que la tapa del recipiente de presión debe estar despejada para el desplazamiento de la máquina de recambio de elementos combustibles, las barras de control se introducen en la vasija del reactor a través del borde exterior de la tapa. Las barras absorbentes tienen un recorrido oblicuo a lo largo del reactor con ángulos entre 15° y 21° . Las barras de control de CNA-UI son sistemas acoplados compuestos, ordenadamente desde el extremo superior, por un amortiguador de choque, barra de soporte, barra magnética, barra absorbente superior y barra absorbente inferior, además de las piezas correspondientes de guía y unión. En la Tabla 1.1 se muestran algunas características de las barras de control de CNA-UI.

Tipo	Cant.	Función	Material barra sup.	Material barra inf.	Long. [mm]	Recor. [mm]
Negras	24	Regulación y corte	Hf	Hf	10630	5932
Grisés Totales	3	Regulación	Inox	Inox	10630	5932
Grisés Parciales	2	Control osc. Xe	Zy	Inox	10155	3784

Tabla 1.1: Características de las barras de control de CNA-UI.

Las barras de control se agrupan en bancos de a 3, los bancos negros R1, R2 y R3 y el banco gris RG. En operación normal uno de los 3 bancos negros se usa para regular mientras que los otros dos quedan para corte, aunque durante las maniobras de arranque los tres bancos se usan para regular y compensar el transitorio de producción de xenón. El banco negro operativo es intercambiado con una frecuencia de 5 años de plena potencia. Además, se cuenta con dos barras parciales P1 y P2 que solo pueden introducirse hasta la mitad del núcleo con el objetivo de controlar las oscilaciones axiales de xenón. En la Figura 1.6 se muestra la disposición de las barras respecto de los canales en una vista superior del núcleo.

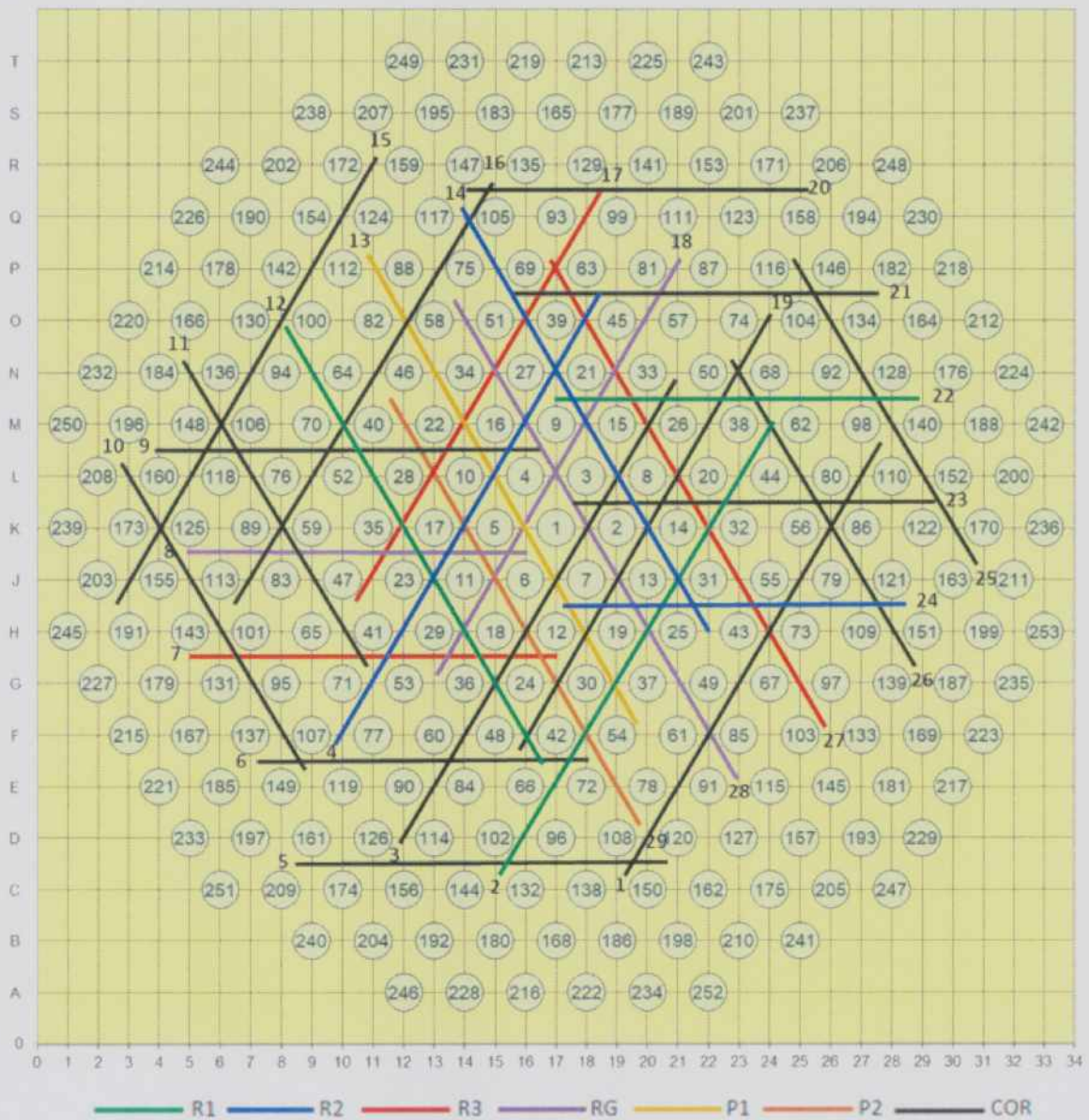


Figura 1.6: Disposición y recorrido de las barras de control.

Detectores in-core

El sistema de monitoreo del reactor cuenta con un conjunto de 48 detectores autoenergizados de Vanadio. Los detectores se distribuyen en 2 lanzas cortas (L1 y L2) con 3 niveles de detectores y 6 lanzas largas (L3, L4, L5, L6, L7 y L8) con 7 niveles de detectores. En función de la disposición de cada lanza se pueden definir los canales que cada una monitorea o “vigila”, agrupándolos en zonas y niveles de vigilancia. En el esquema de la Figura 1.7 se muestra la disposición de las lanzas de detectores y una definición preliminar de las zonas vigiladas que se debió crear para este trabajo debido a que dicho concepto no existe en CNA-UI. Además en la Figura 1.8 se muestra un esquema de la disposición de los detectores a lo largo del núcleo y de las zonas de vigilancia axiales definidas.

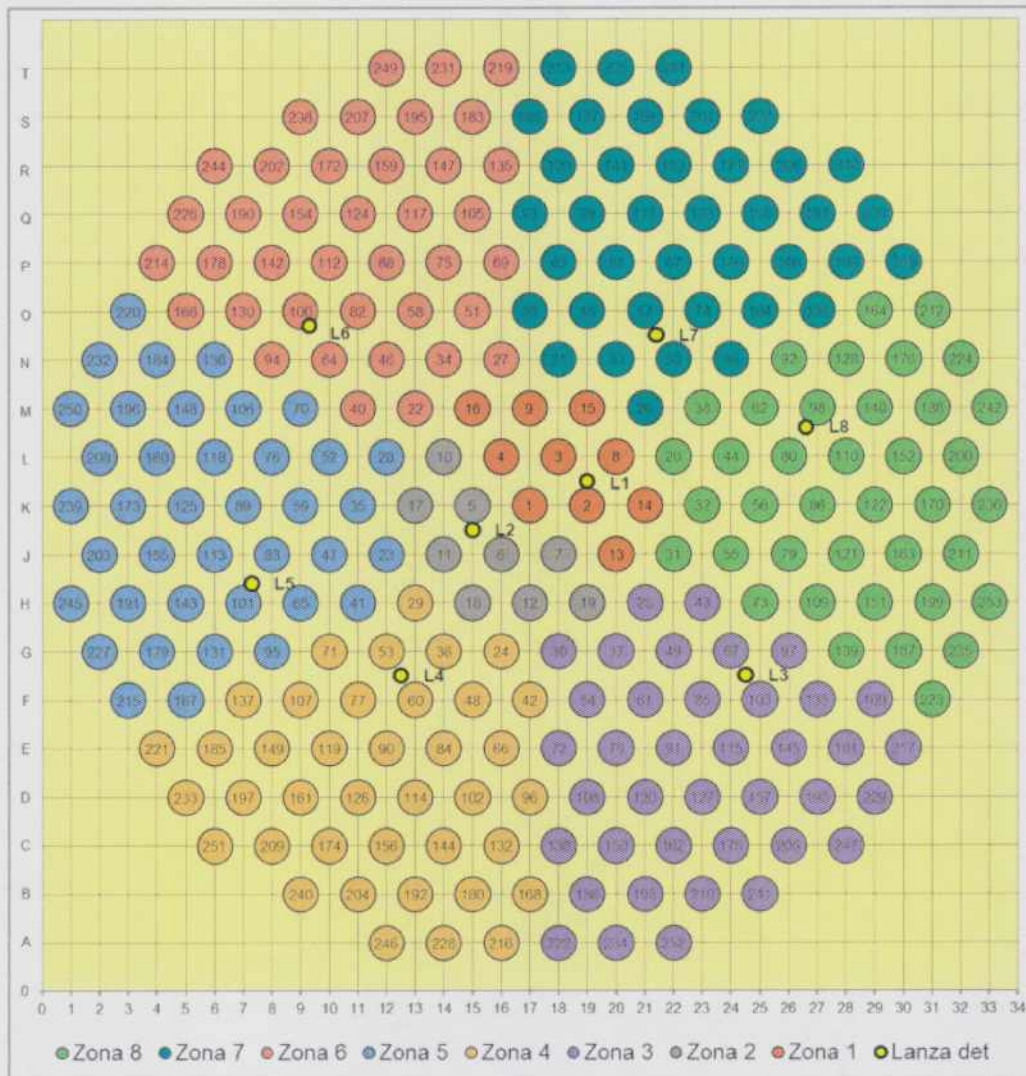


Figura 1.7: Esquema de la posición de las lanzas de detectores y de la asignación de canales por zona de vigilancia.

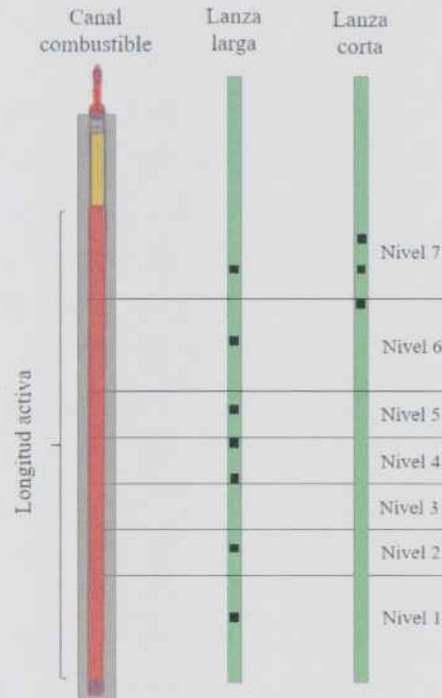


Figura 1.8: Esquema de la posición de los detectores en cada lanza y de la asignación de las zonas de vigilancia axiales.

En la Tabla 1.2 se muestra la correspondencia de las lanzas de detectores con las denominaciones de planta.

Lanza 1		Lanza 2		Lanza 3		Lanza 4	
1	-	8	-	15	NU21X147	22	NU21X157
2	-	9	-	16	NU21X146	23	NU21X156
3	-	10	-	17	NU21X145	25	NU21X155
4	-	11	-	18	NU21X144	25	NU21X154
5	NU21X223	12	NU21X213	19	NU21X143	26	NU21X153
6	NU21X222	13	NU21X212	20	NU21X142	27	NU21X152
7	NU21X221	14	NU21X211	21	NU21X141	28	NU21X151
Lanza 5		Lanza 6		Lanza 7		Lanza 8	
29	NU21X167	36	NU21X117	43	NU21X127	50	NU21X137
30	NU21X166	37	NU21X116	44	NU21X126	51	NU21X136
31	NU21X165	38	NU21X115	45	NU21X125	52	NU21X135
32	NU21X164	39	NU21X114	46	NU21X124	53	NU21X134
33	NU21X163	40	NU21X113	47	NU21X123	54	NU21X133
34	NU21X162	41	NU21X112	48	NU21X122	55	NU21X132
35	NU21X161	42	NU21X111	49	NU21X121	56	NU21X131

Tabla 1.2: Correspondencia de lanzas con denominación de planta.

1.3. El programa PODESY

PODESY [1] permite obtener la distribución de flujo térmico instantáneo dentro del reactor a partir de las lecturas de los detectores in-core. Se basa en la posibilidad de aproximar dicha

distribución por una combinación lineal de las autofunciones de la ecuación de difusión en estado estacionario.

$$\phi(\vec{r}) \approx \sum_{j=1}^{N_f} \psi_j(\vec{r}) c_j \quad (1.1)$$

Las autofunciones se obtienen con el programa DINO [5] desarrollado por NA-SA que realiza el cálculo de difusión tridimensional por el método de diferencias finitas para el reactor con posición de barras nominal y quemado promediado en el tiempo.

Los coeficientes de la expansión se obtienen por el método de cuadrados mínimos a partir de las mediciones de los detectores y los valores de las autofunciones evaluadas en los detectores y puntos de interés.

Para compensar los efectos de la posición real de barras y del quemado instantáneo, se utilizan factores de corrección. La metodología de cálculo de los factores involucra la evaluación de flujos para el núcleo en estado promediado en el tiempo o *Time Average* (TAV).

Las secciones subsiguientes están dedicadas a explicar la metodología de corrección y describir la estructura del programa y las funciones de cada uno de sus módulos.

Estado promediado en el tiempo o *Time Average*

El método *Time Average* o de estado promediado en el tiempo permite obtener una estimación de los quemados de extracción y de traslado de cada zona de quemados en que está dividido el núcleo, así como también el factor de multiplicación y la distribución de potencia promedio del núcleo en equilibrio de quemados.

El método consiste en atribuir a cada fracción de elemento combustible secciones eficaces promediadas entre el quemado de entrada de ese trozo y el de extracción, iterándose entre los cálculos de potencia y quemados.

El cálculo posterior con las distribuciones de quemados obtenidas da por resultado una distribución de flujo neutrónico constituida por el promedio temporal de flujo a lo largo de la estada de cada combustible en su lugar. Dada una configuración de barras de control, esta distribución es única y es constante aunque no realista. Una situación real tendrá flujos que oscilan alrededor de los flujos TAV con una amplitud aproximada del 10 %.

Corrección por posición real de barras

La corrección por posición de barras es necesaria debido a que las barras no permanecen fijas en su posición nominal, sino que se encuentran en constante movimiento en función de los requerimientos del sistema de control para compensar asimetrías de flujo a lo largo y ancho del núcleo y para corregir el nivel global de la potencia del reactor.

El movimiento de las barras produce efectos perturbativos en la distribución de flujo. Estos efectos son instantáneamente locales en las cercanías del volumen afectado por el extremo de las barras, y dilatadamente globales afectando, luego del reajuste de las distribución de xenón y parámetros termohidráulicos, la distribución de flujo en el reactor. Los efectos globales, por consiguiente, afectan a las lecturas de los detectores y se manifiestan en la expansión en serie. Los efectos localizados, en cambio, no son detectados ni pueden ser representados por las autofunciones.

Para corregir el flujo térmico en cada punto del reactor cuando la posición real difiere de la posición nominal se utilizan factores de corrección por barras f_b , que vinculan los flujos con barras en posición nominal con los flujos con barras en posición real con igual distribución de quemado:

Finalmente, la distribución de potencia es:

$$P(\vec{r}) = \sum_{g=1}^2 \kappa \Sigma_{fg} \phi_g(\vec{r}) \tag{1.7}$$

Esta última es la distribución de potencia buscada.

1.3.1. Estructura del programa

Dentro de PODESY convive un conjunto de módulos independientes que realizan operaciones específicas. Las entradas principales del programa, la intervención de cada módulo y sus interacciones se muestran en el diagrama de bloques de la Figura 1.9.

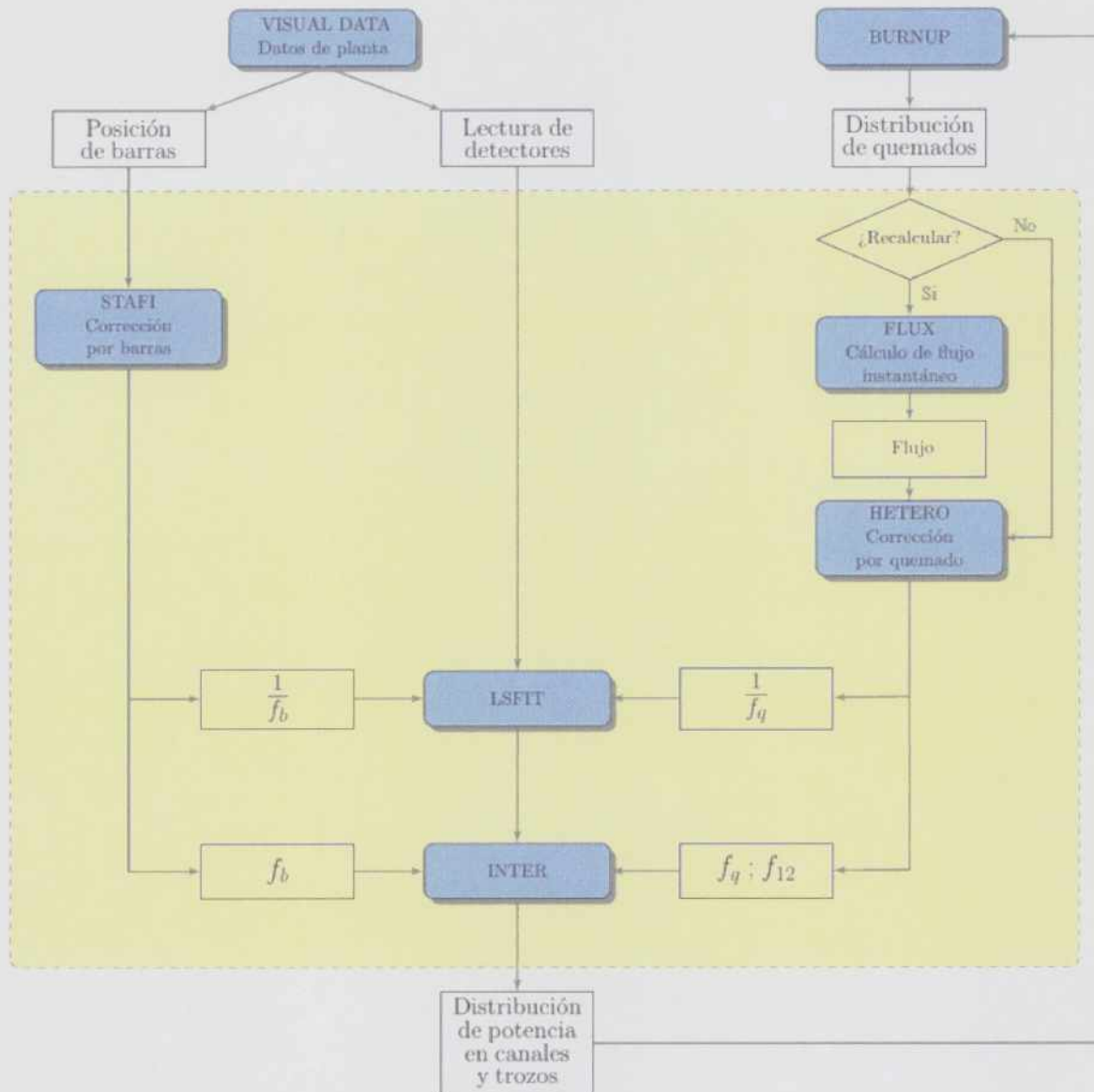


Figura 1.9: Diagrama de bloques del programa PODESY.

Internamente el programa almacena un gran número de archivos de datos incluyendo a los externos provenientes de las mediciones y los datos internos que incluyen a los archivos de entradas de datos del programa y de cada uno de los módulos, y los archivos generados e intercambiados

entre ellos durante la corrida del programa. En la Tabla 1.3 se muestra una lista a modo de glosario con los archivos de datos principales del programa y su descripción.

Archivo	Contenido
<i>burnup.ant</i>	Distribución de quemado utilizado por FLUX.
<i>burnup.dat</i>	Distribución de quemados instantáneos por canal y trozo actuales en $[\frac{kWd}{TnU}]$.
<i>burnup.inp</i>	Entrada de datos de BURNUP. Contiene las tolerancias de días de plena potencia y diferencia de quemado para recalcular.
<i>dpp.ant</i>	Días de plena potencia inmediatos anteriores.
<i>ecmc.dat</i>	Registro de las operaciones ejecutadas por la máquina de recambio.
<i>eigen.dat</i>	Valores de las autofunciones evaluadas en las posiciones de los detectores y canales y trozos.
<i>exp_calc.mat</i>	Matriz de expansión de flujo. Permite realizar el cálculo de flujo en los canales a partir de las mediciones de los detectores in-core.
<i>exp_phi.mat</i>	Matriz de ajuste. Permite obtener los coeficientes de la combinación lineal de autofunciones a partir de las mediciones de los detectores in-core.
<i>flux.dat</i>	Distribución de flujo rápido y térmico en canales y trozos calculado por FLUX.
<i>flux.inp</i>	Entrada de datos para el módulo FLUX. Contiene numerosos parámetros del reactor utilizados en el cálculo, como regiones del modelo, volúmenes perturbados, tablas de secciones eficaces y tablas de quemado.
<i>fluxindet.dat</i>	Valores de flujo térmico en detectores calculado por FLUX.
<i>maquina.dat</i>	Carga de cada posición de la máquina de carga.
<i>nucleo.dat</i>	Última distribución de quemados calculada por BURNUP.
<i>phi_calc.dat</i>	Distribución de flujo térmico en detectores y canales y trozos resultante de la expansión por autofunciones.
<i>podesy.inp</i>	Entrada de datos de PODESY. Contiene las tarjetas de cada módulo con diversas opciones de procesamientos e impresión, junto con numerosos parámetros.
<i>podesy_rea.dat</i>	Señales de planta. Incluye lecturas de los detectores, posición de barras, potencia térmica total y días de plena potencia.
<i>power.dat</i>	Potencia térmica total en MW y días de plena potencia.
<i>powerdist.dat</i>	Potencia integrada por trozo en kW obtenida a la salida de PODESY.
<i>stafi.dat</i>	Biblioteca de factores de corrección al flujo en canales y trozos por posición real de barras
<i>stafid.dat</i>	Biblioteca de factores de corrección al flujo en detectores por posición real de barras
<i>stafip.dat</i>	Biblioteca de factores de corrección a la potencia en canales y trozos por posición real de barras

Tabla 1.3: Glosario de los archivos de datos principales del programa.

En las siguientes secciones se describe cada uno de los módulos involucrados en el mapeo de

flujo realizado por PODESY.

Módulo STAFI

Este módulo es el encargado de seleccionar los factores de corrección por barras de control en función de la posición de cada barra a partir de las señales que recibe de planta. En la Figura 1.10 se presentan las entradas y salidas principales de STAFI.



Figura 1.10: Entradas y salidas principales del módulo STAFI.

Módulo BURNUP

Este módulo es externo a PODESY y es el encargado de realizar el cálculo de la distribución de quemado a partir de las distribuciones de potencia calculadas por PODESY. El cálculo se ejecuta si se cumple alguna de las siguientes condiciones:

- La diferencia en días de plena potencia entre actualizaciones supera una tolerancia determinada.
- Se registran movimientos de elementos combustibles.

En la Figura 1.11 se presentan las entradas y salidas principales de BURNUP.



Figura 1.11: Entradas y salidas principales del módulo BURNUP.

Módulo FLUX

Este módulo es el encargado de realizar el cálculo de la distribución de flujo térmico y rápido por diferencias finitas con la distribución instantánea de quemados calculada por el programa BURNUP. En la Figura 1.12 se presentan las entradas y salidas principales de FLUX.

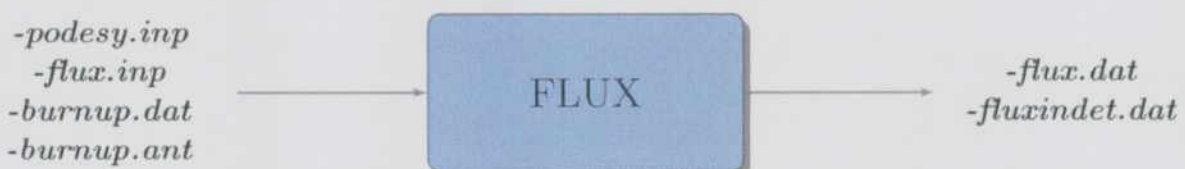


Figura 1.12: Entradas y salidas principales del módulo FLUX.

La actualización de la distribución de flujos se realiza si se cumple alguna de las siguientes condiciones:

- Se supera un umbral determinado de variación de quemado en algún canal combustible
- Hubo cambios en la posición de los combustibles

Módulo HETERO

Este módulo es el encargado de calcular los factores de corrección por quemado (Ecuación 1.3) y de relación entre flujos rápidos y térmicos (Ecuación 1.4) instantáneos en canales y trozos.

Los flujos instantáneos son calculados por FLUX y los flujos promediados en el tiempo se corresponden al modo fundamental de la expansión en autofunciones. En la Figura 1.13 se presentan las entradas y salidas principales del módulo.

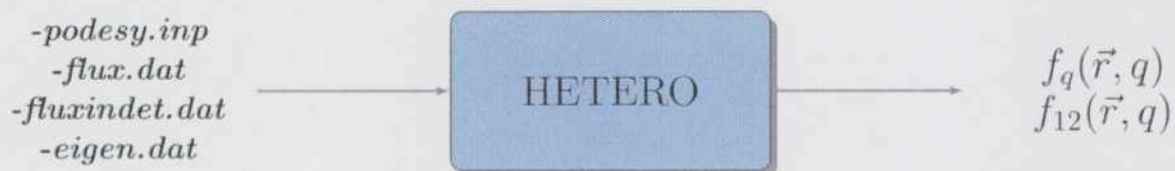


Figura 1.13: Entradas y salidas principales del módulo HETERO.

Módulo LSFIT

Este módulo es el encargado de realizar los cálculos matriciales del método de cuadrados mínimos a partir de las lecturas de los detectores en planta y la matriz de expansión. En la Figura 1.14 se presentan las entradas y salidas principales de LSFIT.



Figura 1.14: Entradas y salidas principales del módulo LSFIT.

Es importante notar que tanto el archivo *eigen.dat* como, en consecuencia, *exp_phi.mat* y *exp_calc.mat*, se deben recalculan en caso de producirse cambios relevantes en el estado o dinámica del reactor como, por ejemplo, modificaciones en la estrategia de gestión de combustible. La matriz de expansión se recalcula automáticamente en el caso de que se desconecten o se declaren detectores fallados.

La cantidad de autofunciones a emplear en la expansión de flujo se puede seleccionar desde el archivo de entrada *podesy.inp*.

Módulo INTER

Este módulo es el encargado de calcular la distribución de potencia del núcleo basado en la distribución de flujo (térmico y rápido), las secciones eficaces de fisión y la energía por fisión. En la Figura 1.15 se presentan las entradas y salidas principales de INTER.



Figura 1.15: Entradas y salidas principales del módulo INTER.

Procesando los resultados obtenidos junto con diversos parámetros operativos leídos del archivo *podesy.inp*, se reportan resultados importantes para la operación como potencias zonales, márgenes a límites operacionales y alertas de violaciones de límites operativos.

Capítulo 2

Adaptación de PODESY para CNA-UI

La adaptación del programa tuvo como objetivo acondicionar el código original para que sea utilizable tanto para CNA-UI como para CNA-UII. Ese trabajo consistió principalmente en incluir un operador condicional y replicar las líneas apropiadas en cada uno de los módulos, redimensionando y redefiniendo las variables y parámetros apropiados para representar las características específicas de CNA-UI.

Por otro lado, se debieron adaptar los archivos de entrada de datos correspondientes *podesy.inp* y *flux.inp*. Además se obtuvo el conjunto de autofunciones solución de la ecuación de difusión para el reactor de Atucha I con distribución de quemado promedio y posición nominal de barras necesario para la expansión del flujo y se calcularon las bibliotecas de factores de corrección por barras.

En las siguientes secciones se detalla la metodología implementada en el cálculo de las autofunciones y de los factores de corrección, se muestran las entradas de datos y se comentan algunos aspectos relevantes del proceso de su producción. Finalmente, se describe la adaptación aplicada al código módulo por módulo.

2.1. Cálculo de autofunciones

Se calcularon 15 modos armónicos para el reactor de Atucha I con posición nominal de barras y quemado promediado en el tiempo resolviendo la ecuación de difusión por diferencias finitas con el programa DINO.

Se modeló el núcleo con 241 canales con combustibles, que es el estado actual de operación de la planta. Además, se utilizó un mallado de la geometría igual al usado en PUMA para la gestión de combustible. También se utilizaron las tablas de secciones eficaces y perturbaciones usadas para gestión de combustible. Los resultados de DINO fueron procesados con el utilitario PREPODESY para generar el archivo *eigen.dat* para LSFIT.

Para analizar los resultados de las evaluaciones es importante tener presente la funcionalidad y orientación de los armónicos a lo largo y ancho del reactor. En la Tabla 2.1 se describen las autofunciones calculadas y a continuación se muestran planos axiales de los modos azimutales y radial puro.

# Armónico	Descripción	Abreviación
0	Fundamental	FUND
1	1er axial	AX1
2	1er azimutal	AZ1+
3	1er azimutal	AZ1-
4	2do axial	AX2
5	1er axial + 1er azimutal	AX1+AZ1+
6	1er axial + 1er azimutal	AX1+AZ1-
7	2do azimutal	AZ2+
8	2do axial + 1er azimutal	AX2+AZ1+
9	2do azimutal	AZ2-
10	2do axial + 1er azimutal	AX2+AZ1-
11	1er axial + 2do azimutal	AX1+AZ2+
12	1er axial + 2do azimutal	AX1+AZ2-
13	No identificable	13
14	1er radial	RAD
15	1er axial + 1er radial	AX1+RAD

Tabla 2.1: Descripción de los armónicos obtenidos del cálculo.

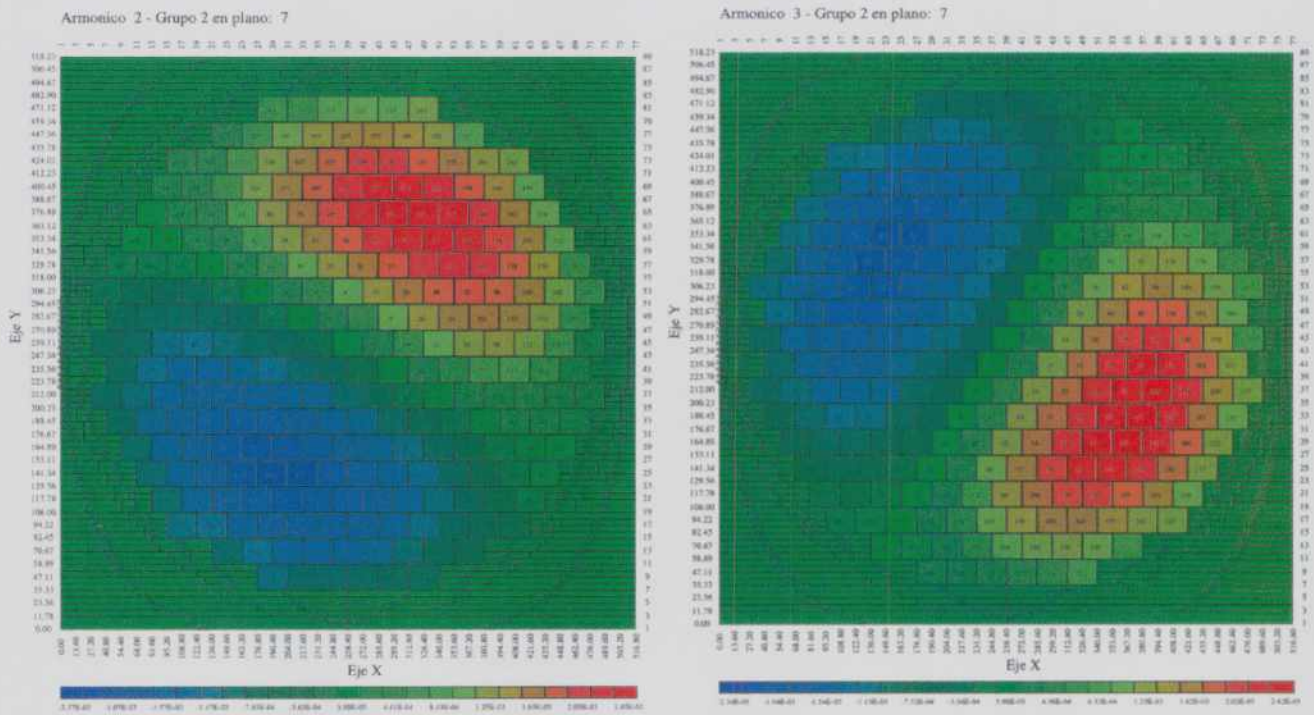
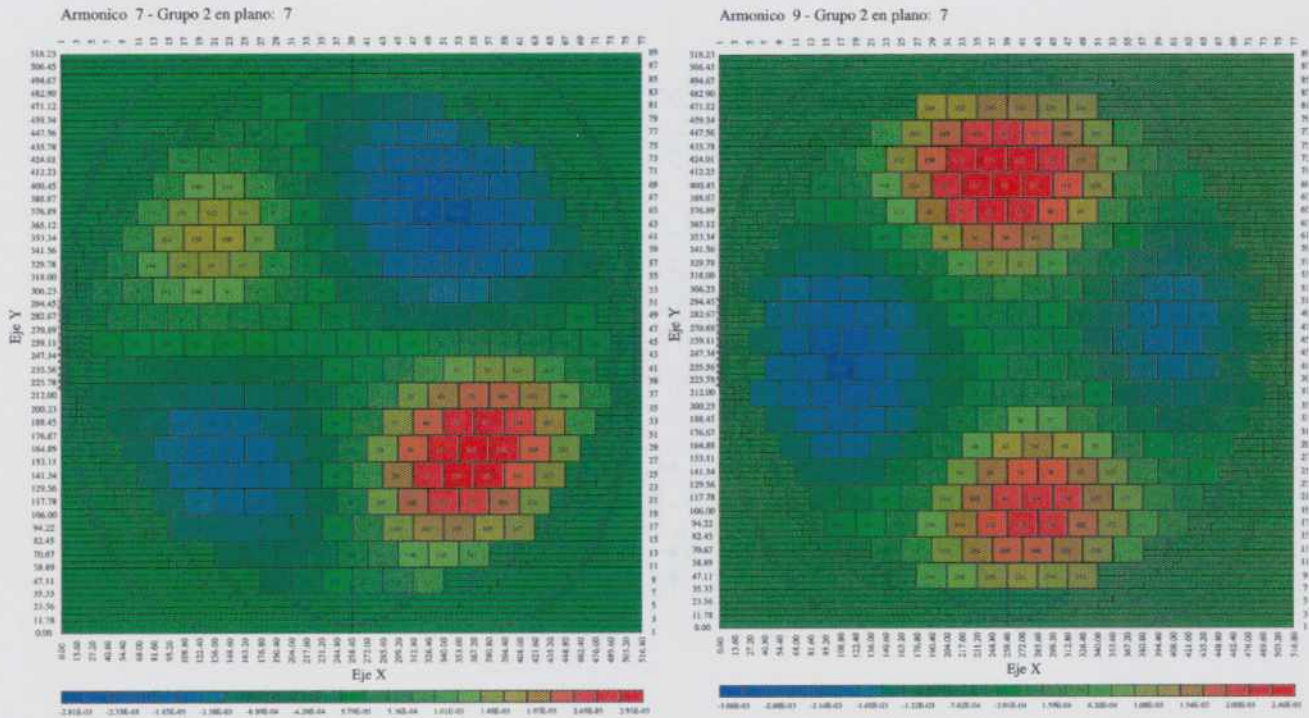


Figura 2.1: Modos armónicos azimutales de primer orden.



(a) Modo armónico 7.

(b) Modo armónico 9.

Figura 2.2: Modos armónicos azimutales de segundo orden.

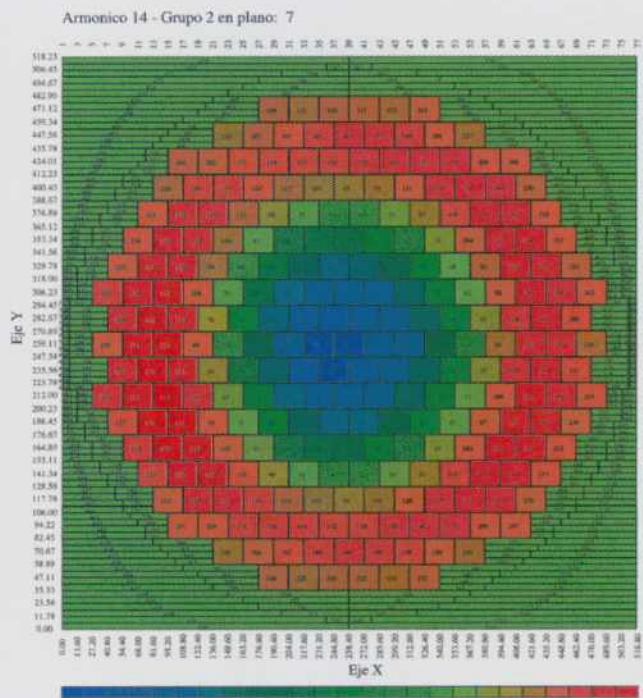


Figura 2.3: Modo armónico 14 (radial).

2.2. Cálculo de las bibliotecas de factores f_b

Los factores de corrección por posición real de barras se obtuvieron con el programa auxiliar PREPODESYS que, basándose en simulaciones de DINO sobre el estado *Time Average*, calcula la distribución de flujo y potencia moviendo cada barra entre su límite superior y su límite superior, mientras las demás quedan en posición nominal. El recorrido se subdivide de manera que el extremo de la barra queda en los planos del mallado de DINO de modo de no diluir las secciones eficaces incrementales. Como resultado, PREPODESYS genera las bibliotecas de factores en los archivos *stafi.dat*, *stafip.dat* y *stafid.dat*.

La configuración nominal de barras y la cantidad de pasos por bancos utilizadas se muestra en la Tabla 2.2 .

Banco	Ins [cm]	Ins [%]	#Pasos
R1	0.00	0.00	21
R2	0.00	0.00	21
R3	85.00	14.97	21
P1	150.00	26.42	21
P2	150.00	26.42	21
Gris	350.00	61.65	21
Corte	0.00	0.00	2

Tabla 2.2: Inserción nominal proyectada de barras y cantidad de pasos considerados.

Las barras avocadas al control y regulación del reactor se discretizan en 21 pasos ya que pueden recorrer todo el núcleo mientras que los factores de corrección para las barras de corte sólo se calculan para las posiciones totalmente extraídas o totalmente insertadas debido a que no se encuentran en el núcleo en condiciones normales.

2.3. Adaptación de entradas y códigos

2.3.1. Entrada de datos general

El archivo *podesy.inp* se divide en bloques o capítulos que incluyen instrucciones de ejecución, especificaciones de lista y especificaciones de función. El archivo contiene un bloque por módulo y una entrada general con el contenido que se muestra en el cuadro debajo. Notar que el signo de exclamación significa comentario, en color gris se presentan algunas tarjetas opcionales y en verde se describe cada instrucción.

```

* PODESY GENERAL
TITLE: ATUCHA 1
NDET: 8 7 !nlanzas ndetxlanza
DET_COOR: 19.0 10.5 15.0 9.5 24.5 6.5 12.5 6.5 !coordenadas x y de los
detectores en pasos de red
7.3 8.4 9.3 13.7 21.4 13.5 26.6 11.6
DET_AXIAL: 1.04 2.55 4.06 4.82 5.57 7.08 8.59 !coordenada z de los detectores
NGROUPS: 2 !cantidad de grupos de energía
NCAN: 253 10 !cantidad de canales y trozos
CAN_COOR: !coordenadas x y de centro de canal
17 10 19 10 18 11 16 11 15 10 16 9 18 9 20 11 17 12 14 11
[...]
6 3 22 1 33 8
NRDD: 29 !cantidad de barras de control
CAN_AXIAL: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 !niveles axiales
MINDET: -100 !mínimo tolerable de lectura en detector
MINPOW: -100 !mínimo tolerable de lectura de potencia
RUN

```

Es importante notar que este bloque es el primero en ser leído por el programa y en él se definen parámetros globales (cantidad de lanzas, detectores por lanza, número de canales, etc) que permiten diferenciar entre CNA-UI y CNA-II en una etapa temprana de la corrida. Este hecho fue la principal herramienta empleada para la diferenciación dentro del código.

Adaptación de LSFIT

Entrada desde *podesy.inp*.

En el cuadro debajo se detalla el contenido de la entrada de datos producida para LSFIT.

```

* LSFIT
NEIGEN: 7 !cantidad de autofunciones a emplear en el mapeo (fundamental +
armónicos)
MATRIX CALCULATION CONDITIONAL !calcular la matriz de expansion si cambia
NEIGEN
!MATRIX CALCULATION !calcular la matriz de expansión en cada corrida
!FLUX EXPANSION !se utiliza la matriz de expansion almacenada
PRINT COEFFICIENTS !imprimir los coeficientes de Fourier de la expansión
COMPARE: 2 !imprimir comparaciones entre flujos calculados y teóricos
FAILED: 8 >1 2 3 4 8 9 10 11 !declaración de detectores fallados
FAILERR: -50. 50. !porcentaje de error que activa alarma por posible falla
MAXFAIL: 20 !cantidad máxima admisible de detectores fallados
!TEST !opcional para pruebas
RUN

```

Hay que mencionar que por practicidad las lanzas cortas se definen virtualmente largas y los detectores inexistentes se declaran con la tarjeta FAILED junto con los detectores reales fallados.

Modificaciones en el código del módulo LSFIT (*modlsfit.90*)

La adaptación de LSFIT implicó modificar las dimensiones del arreglo de detectores y el orden de los armónicos para la impresión, en función de la Central en cuestión utilizando como

discriminador la cantidad de canales dada en la entrada general.

A continuación se muestra un ejemplo de la impresión de los coeficientes de Fourier para una corrida empleando 15 armónicos y un ejemplo de la adaptación de las dimensiones del arreglo de detectores en la impresión.

```
# 1 COEFICIENTES DE LA EXPANSION EN SERIE
-----
FUNDAM AXIAL1 AZIM1 AZIM1- AXIAL2 AZ1+AX AZ1-AX AZIM2+ AZ1+AX2 AZIM2-
AZ1-AX2 AZ2+AX1 AZ2-AX1 RADIAL1 RADIAL2 RAD+AX1
1.0000 -0.0059 0.0027 0.0027 0.0060 0.0015 -0.0015 0.0018 -0.0018 0.0021
0.0011 0.0009 0.0015 -0.0025 -0.0037 -0.0014
-----
```

Original CNA-UII

Adaptado CNA-UI-II

```
write(salida,"('# 0 LECTURAS DE DET...')")
write(salida,"(6es13.5)")det
write(salida,"(/)")

write(salida,"('# 0 LECTURAS DE DET...')")
if(ncan.eq.253)then
  write(salida,"(7es13.5)")det
  write(salida,"(/)")
else
  write(salida,"(6es13.5)")det
  write(salida,"(/)")
endif
```

El arreglo de detectores los ordena en 7 filas de lanzas de detectores, ordenadas de la 1 a la 7, y 8 columnas de niveles, desde el 1 (superior) al 8 (inferior).

Adaptación de STAFI

Entrada desde *podesy.inp*.

En el cuadro debajo se detalla el contenido de la entrada de datos producida para STAFI.

```
* STAFI
NROD: 29 !cantidad de barras de control
UPSTEP: 35.0 !altura del reflector superior en cm
LOW STEP: 54.3 !altura del reflector inferior en cm
ACTIVE: 532.7 !longitud activa del combustible en cm
!posición nominal de barras en cm de proyección sobre el eje axial del núcleo
!COR R1 CR R2 COR COR R3 RG COR COR R1 P1 R2 COR COR R3 RG COR COR COR R1
!COR R2 COR COR R3 RG P2
NOMINAL: 0 0 0 0 0 0 85 350 0 0 0 0 150 0 0 0 85 350 0 0 0 0 0 0 0 0 85 350 150
!número máximo de pasos de cada barra con los que se calcularon los factores
NMAXSTEP: 21
!cantidad de pasos por barra
STEP: 2 21 2 21 2 2 21 21 2 2 2 21 21 2 2 2 21 21 2 2 2 21 2 21 2 2 21 21 21
!NO CORRECT !opcional para no corregir
PRINT !impresión completa de los factores de corrección en la salida
RUN
```

La configuración nominal de barras debe ser la misma que se utilizó para el cálculo de las autofunciones con DINO. Los pasos de inserción deben ser iguales a los utilizados para el cálculo de los factores de corrección por posición de barras con PREPODESYS.

Modificaciones en el código del módulo STAFI (stafi.f90)

El módulo originalmente definía las dimensiones y los valores de algunos parámetros directamente en la sección de declaración de variables del módulo general y subrutinas. Entre ellos, la dimensión de los arreglos de posición y ángulo de barra y los pasos de inserción con sus valores por defecto. Para resolverlo se eliminaron de la declaración los parámetros específicos y se redefinieron los arreglos como vectores de alojamiento variable. El dimensionamiento se realiza una vez leída la cantidad de barras desde la entrada del módulo. La cantidad característica de barras leída de la tarjeta NROD de *podesy.inp* se utiliza para discriminar entre centrales al asignar los valores por defecto y formatos de impresión. A continuación se ilustra la metodología para el arreglo de posición nominal por defecto.

Original CNA-UII	Adaptado CNA-UI-II
<pre> module modStafi implicit none real*4 :: rod0(18) data rod0 /0,531.2,138.45,0,378.62,24.22,& 0,531.2,138.45,0,378.62,24.22,& 0,531.2,138.45,0,378.62,24.22,& 0,531.2,138.45,0,378.62,24.22/ </pre>	<pre> module modStafi implicit none real*4, allocatable :: rod0(:) subroutine ReadStafi(unidad, salida) implicit none if(index(linea,'NROD').gt.0)then i=index(linea,':') read(linea(i+1:),*) nstab allocate(rod0(nstab)) if(nstab.eq.29)then allocate(rod0(nstab)) if(nstab.eq.29)then rod0= (/0,0,0,0,0,0,85,350,& 0,0,0,0,150,0,0,0,85,& 350,0,0,0,0,0,0,0,0,& else rod0= (/0,531.2,138.45,0,378.62,24.22,& 0,531.2,138.45,0,378.62,24.22,& 0,531.2,138.45,0,378.62,24.22/ endif </pre>

Adaptación de FLUX

Entrada desde *podesy.inp*.

En el cuadro debajo se detalla el contenido de la entrada de datos producida para FLUX.

```

* FLUX
MIN BU: 1.5 !incremento mínimo de quemado para actualizar el flujo instantáneo
REPORT EMPTY !opcional para informar canales vacíos
RUN

```

Entrada desde *flux.inp*.

En el cuadro debajo se detalla el contenido de la entrada de datos principal, producida para FLUX.

En las primeras líneas se definen distintos parámetros del reactor, se define la geometría y la discretización o mallado del sistema, vinculando regiones con canales y trozos con segmentos.

La discretización utilizada por FLUX es una réplica del utilizado por PUMA para la gestión de combustible y en DINO para el cálculo de las autofunciones. Se debieron adaptar los datos contenidos en las entradas de PUMA al formato requerido por FLUX.

```

*****
* Estado estacionario con xenon equilibrio, quemado instantaneo y barras
* en posicion nominal - para PODESY
*****
OPCIONES BARRAS CICLO QUEMADO XENON PRUEBA
!IMPRIMIR ITERACIONES !opcional
POTENCIA TOTAL !térmica en MW 1179

INSERCIÓN DE BARRAS !nominal en cm proyectado sobre el eje axial
!COR R1 COR R2 COR R3 RG COR R1 P1 R2 COR R3 RG COR R1
!COR R2 COR R3 RG P2
0 0 0 0 0 85 350 0 0 0 150 0 0 0 85 350 0 0 0 0 0 0 85 350 150

PRECISION !para el cálculo de flujo y keff
1.0E-9

DETECTORES INCORE !nlanzas ndetxlanza
8 7

COORDENADAS_DETECTORES !x y z
285.6 270.89 110.9
[...]
380.8 294.45 510.9

NCANALES NTROZOS
253 10

!constantes del modelo de cálculo por diferencias finitas
NX NY NZ NREFL1 NREFL2 NRegionesReactor NTotalRegiones
76 88 28 5 24 425 601

Correlacion Segmento a Trozo
0 0 0 0 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8 9 9 10 10 0 0 0 0

Radio Externo y Centro
251.2 258.4 259.114801

Coeficientes de Continuidad
1.1155 0.8488

DELTAX
6.8 6.8 6.8 6.8 6.8 6.8 6.8 6.8 6.8 6.8
[...]
6.8 6.8 6.8 6.8 6.8 6.8

```

```

DELTAY
5.59 5.59 5.59 5.59 5.59 5.59 5.59 5.59 5.59 5.59
[...]
5.59 5.59 5.59 5.59 5.59 5.59 5.59 5.59 DELTAZ
13.575 13.575 13.575 13.575
[...]
26.635 26.635 26.635 26.635 8.75 8.75 8.75 8.75

PRECISION PARA EL CALCULO ESTATICO
1.0E-9

REGIONES Y CANALES
!// *** elemento 1
37 41 43 47
[...]
!// *** elemento 601
76 77 45 46

```

La entrada de datos principal de FLUX sigue con la definición de las secciones eficaces macroscópicas incrementales para los distintos materiales de las barras (ver Tabla 1.1) y de los tubos guía. Se debieron seleccionar los juegos de secciones eficaces contenidos en la entrada de PUMA y trasladarlos con el ordenamiento de barras empleado. Luego se especifica la localización por coordenadas de los volúmenes perturbados por las porciones inferior y superior de cada barra y de los tubos guía.

```

Potencia de Fision
1.0

PERTURBACIONES POR COORDENADAS NumMaxPerturbaciones NumMaxPertLocales
87 20
!secciones eficaces incrementales
!//*** JUEGO 1 *** BANCO CORTE BARRA 1 20.00 grados
1.016173E-03 -1.298750E-03 2.123982E-03 7.465641E-03 0.000000E+00
-8.427960E-04 2.602221E-05 0.000000E+00 -3.498985E-05 5.527860E-04
-2.562883E-03 4.312503E-02

!//*** JUEGO 2 *** PARTE SUPERIOR
1.614859E-03 7.615535E-04 -6.874290E-04 -1.347803E-03 0.000000E+00
1.015037E-04 6.383204E-06 0.000000E+00 1.017109E-06 -3.714066E-05
7.639823E-05 -2.913016E-03

[...]

!//*** JUEGO 87 *** TUBO GUIA BARRA 29 BANCO PARC
3.623576E-03 -3.234272E-03 -1.052704E-04 9.058886E-05 0.000000E+00
-1.336790E-04 1.483574E-06 0.000000E+00 -4.028743E-06 9.799687E-06
-3.014308E-04 7.555260E-04

```

```

!// Localizacion de las perturbaciones:
!// *****

!//*** VOLUMEN 1*** BANCO CORTE BARRA 1 20.00 grados
20 !número de volúmenes perturbados por la barra
!x1 !x2 !y1 !y2 !z1 !z2
374 401.2 253.226 276.782 54.3 80.935
367.2 394.4 247.337 270.893 80.935 107.57
[...]
285.6 312.8 106.002 129.557 533.73 560.365
278.8 306 94.224 117.779 560.365 587

!//*** VOLUMEN 2 *** PARTE SUPERIOR
326.4 353.6 182.558 206.114 294.015 320.65
326.4 353.6 170.78 194.336 320.65 347.285
[...]
285.6 312.8 106.002 129.557 533.73 560.365
278.8 306 94.224 117.779 560.365 587

!//*** VOLUMEN 87 *** TUBO GUIA BARRA 29 BANCO PARC
20
190.4 217.6 276.782 300.338 54.3 80.935
190.4 217.6 270.893 294.449 80.935 107.57
[...]
272 299.2 123.668 147.224 533.73 560.365
278.8 306 117.779 141.335 560.365 587

```

Finalmente se incluyen las tablas de secciones eficaces del combustible en función del quemado, del reflector (agua pesada) en función de la altura, es decir de la temperatura, y la tabla de secciones eficaces para los canales vacíos obtenidas de las entradas de PUMA.

```

!tablas de secciones eficaces de combustible en función del quemado
TABLAS NumTablas LongTableLine LongTable
1 11 25
! TABLA 1
0.000000E+00 !quemado
1.418610E+00 9.853176E-01 1.724955E-03 8.193436E-03 1.212556E-04
3.908144E-03 8.071450E-04 5.265179E-03 6.192183E-02 4.357495E-01
[...]

1.200000E+04
1.413703E+00 9.808408E-01 2.062022E-03 8.248574E-03 1.181698E-04
4.528376E-03 6.732380E-04 5.029213E-03 5.092822E-02 3.804134E-01
!tablas de secciones eficaces de reflector
REFLECTORES
! Inferior
1.40852E+00 9.93113E-01 9.64975E-07 1.16738E-02 6.86469E-05
5.26061E-05 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

```

```

! Superior
1.52019E+00 1.09017E+00 8.43448E-07 1.06369E-02 9.04091E-05
4.58304E-05 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

! Radial
1.45786E+00 1.03814E+00 9.32192E-07 1.12853E-02 7.96530E-05
4.92209E-05 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

TABLAS DE CANAL VACIO
1.43357E+00 1.02687E+00 0.35564E-04 0.10773E-01 0.81730E-04
0.11519E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
FIN DATOS

```

La adaptación de la entrada principal de FLUX para el cálculo del reactor de CNA-UI debió ser adecuadamente verificada y contrastada con un número importante de cálculos con PUMA. Los resultados son mostrados en la sección de evaluación del módulo FLUX.

Modificaciones en el código del módulo FLUX (flux.f90)

El módulo originalmente definía las dimensiones y los valores de algunos parámetros directamente en la sección de declaración de variables del módulo general y subrutinas. Entre ellos, dimensión de los arreglos de posición y ángulo de barras con sus valores por defecto, dimensión de arreglos de potencias zonales, valores para la inicialización de la representación del reactor y de la red de cálculo. Para resolverlo se eliminaron de la declaración los parámetros específicos y se redefinieron los arreglos como vectores de alojamiento variable. La definición se realiza en la sección del código que requiere al parámetro y/o arreglo determinado en función de la Central en cuestión utilizando la cantidad de canales como parámetro discriminador. A continuación se muestra un ejemplo ilustrativo de la metodología aplicado al código del módulo FLUX.

Original CNA-UII	Adaptado CNA-UI-II
<pre> module flux implicit none real*8 :: plmax_sec(0:6) </pre>	<pre> module flux implicit none real*8, allocatable :: plmax_sec(:) subroutine potencias(POWER) implicit none if(ncan.eq.253)then allocate(plmax_sec(8)) else allocate(plmax_sec(6)) endif </pre>

Dentro del código además se debieron definir valores por defecto de parámetros de cálculo, canales próximos a cada lanza, numeración, nomenclatura de canales, se debieron introducir los arreglos de inserción de barras e índices de lectura de datos. A continuación se muestran dos ejemplos de adaptaciones realizadas al código, donde se debió replicar el tratamiento de las perturbaciones de las barras y acondicionar los índices de lectura del archivo *flux.inp*.

Original CNA-UII	Adaptado CNA-UI-II
<pre>subroutine IntroducirPertBarras implicit none !/* PARA INSERTAR LA BARRA 1*/ :) call insertar_barra(1,barras(13),InsAbajo(13)) [...]</pre>	<pre>subroutine IntroducirPertBarras implicit none if(ncan.eq.253) then !/* PARA INSERTAR LA BARRA 1*/ : call insertar_barra(1,barras(1),InsAbajo(1)) [...]</pre>
<pre>!/* PARA INSERTAR LA BARRA 1*/ :) call insertar_barra(1,barras(13),InsAbajo(13)) [...]</pre>	<pre>!/* PARA INSERTAR LA BARRA 1*/ :) call insertar_barra(1,barras(13),InsAbajo(13)) [...]</pre>
<pre>!/* PARA INSERTAR TUBOS GUIA */ : call insertar_tubos_guia</pre>	<pre>!/* PARA INSERTAR TUBOS GUIA */ : call insertar_tubos_guia</pre>
<pre>subroutine insertar_tubos_guia implicit none integer :: N</pre>	<pre>subroutine insertar_tubos_guia implicit none integer :: N</pre>
<pre>do N=1,18 call perturbar(36 + N,ZonaActiva)) end do</pre>	<pre>if(ncan.eq.253) then do N=1,29 call perturbar(58 + N,ZonaActiva) end do else do N=1,18 call perturbar(36 + N,ZonaActiva)) end do endif</pre>

Adaptación de HETERO

Entrada desde *podesy.inp*.

En el cuadro debajo se detalla el contenido de la entrada de datos producida para HETERO.

```
* HETERO
! NO CORRECT !opcional para no corregir
! PRINT !opcional para imprimir las correcciones por quemado instantáneo en la
salida
RUN
```

Modificaciones en el código del módulo HETERO (hetero.f90)

No requirió adaptación.

Adaptación de INTER

Entrada desde *podesy.inp*.

En el cuadro debajo se detalla el contenido de la entrada de datos producida para INTER.

Esta sección contiene las definiciones de todos los parámetros necesarios para el cálculo de la distribución de potencia, y variables operativas derivadas, a partir de la distribución de flujo sintetizada. Entre ellos se encuentra la tabla de conversión de flujo térmico y rápido a potencia en función del quemado, correspondiente a las dos últimas columnas de la segunda fila de la tabla de combustible, la definición de las zonas hidráulicas del núcleo y de las zonas de vigilancia consideradas (ver Figura 1.7), definición de los límites de potencia de canal por zona hidráulica

y de potencia lineal.

```

* INTER
!factores de flujo rápido y térmico a potencia en función del quemado
FISSION: 25 >0.00 6.192183E-02 4.357495E-01
50.00 6.213924E-02 4.309351E-01
[...]
12000.00 5.092822E-02 3.804134E-01
SECTION: 0 >640.72 !sección transversal de cada canal combustilble
HEIGHT: 0 >53.27 !altura de trozo
NZONES: 8 !cantidad de zonas de vigilancia
NAXIAL: 7 !cantidad de zonas de vigilancia axiales
NHYD: 8 !cantidad de zonas hidráulicas
!cantidad de canales por zona de vigilancia
SURVILLANCE ZONE SIZE: 10 9 39 39 39 39 39 39
SURVEILLANCE ZONE:
!canales pertenecientes a cada zona de vigilancia
! Zona 1
1 2 3 4 8 9 13 14 15 16

[...]

! Zona 8
20 31 32 38 44 55 56 62 73 74 85 86 92 98 109 110 121 122 128 139 140 151 152
163 164 170 176 187 188 199 200 211 212 223 224 235 236 242 253
!correlación entre trozos y zonas de vigilancia axial
SURVEILLANCE LEVELS: 1 1 2 3 4 5 6 6 7 7
HYDRAULIC ZONE SIZE: 30 24 30 18 30 30 54 37 !cantidad de canales por zona
hidráulica
HYDRAULIC ZONE:
!canales pertenecientes a cada zona hidráulica
! Zona 1
224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238
239 240 241 243 245 247 248 249 250 251 252 253 242 244 246
[...]

! Zona 8
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
30 31 32 33 34 35 36 37
!máxima potencia total de canal admisible por zona hidráulica (incluye potencia
depositada en el moderador)
HYDRAULIC LIMITS: 2.088 2.697 3.809 4.334 5.393 6.212 7.104 7.377
!máxima potencia lineal admisible por zona de vigilancia
LINEAR POWER ALARM: 2 >485 510
COOLANT FRACTION: 0.95 !fracción de potencia generada depositada en el
refrigerante
PEAK FACTOR: 0 >1.144!relación entre la potencia máxima y promedio del EECC
debido al autoblandaje

```

```

GRAD FACTOR: 0 >1!relación entre la potencia máxima y promedio del EECC debido
al gradiente macroscópico de flujo
NRODS: 37 !cantidad de barras por EECC
NOMINAL POWER: 1179 !potencia térmica nominal del reactor
!factor de transformación de flujo a potencia para los detectores
BASE CALIBRATION: 2.4
! COMPARE CHANNEL POWER !comparar potencias por canal calculadas con valores
teóricos
! PRINT: CHANNEL POWER, LINEAR POWER, DETECTORS, RODS !opcionales de impresión
! COMPARE LINEAR POWER - FACTOR : 18457890.6 !comparar potencias lineales
calculadas con teóricas con un factor multiplicativo
*END

```

Modificaciones en el código del módulo INTER (inter.f90)

El trabajo de adaptación constó en incluir los formatos de impresión de la distribución de potencia y sus derivados, discriminando entre ambas Centrales en función de sus parámetros característicos. A continuación se ilustra la metodología para la impresión de potencia integrada por zona de vigilancia donde se utiliza la cantidad de niveles axiales de vigilancia (de detectores) como discriminador.

Original CNA-UII	Adaptado CNA-UI-II
<pre> module modInter subroutine salida(unidad, opc) write(unidad,"(/,'# 3 POTENCIA INTEGRADA & POR ZONA DE VIGILANCIA (EN MW)')") write(unidad,"(' ZONA ABAJO ->ARRIBA')") write(unidad,"(5x,6i9,'INFERIOR SUPERIOR \$ TOTAL FAXIAL')")(i,i=1,naxial) </pre>	<pre> module modInter subroutine salida(unidad, opc) write(unidad,"(/,'# 3 POTENCIA INTEGRADA & POR ZONA DE VIGILANCIA (EN MW)')") write(unidad,"(' ZONA ABAJO ->ARRIBA')") if (naxial.eq.7) then write(unidad,"(5x,7i9,'INFERIOR SUPERIOR \$ TOTAL FAXIAL')")(i,i=1,naxial) else write(unidad,"(5x,6i9,'INFERIOR SUPERIOR \$ TOTAL FAXIAL')")(i,i=1,naxial) endif </pre>

Capítulo 3

Pruebas de escritorio

Luego de la adaptación del código y sus entradas, es preciso realizar las evaluaciones pertinentes al programa resultante con el objetivo de obtener información acerca de su comportamiento y de sus limitaciones. En esta etapa la evaluación se realizó primeramente por módulos individuales y finalmente para el programa integrado. En todos los casos se utilizó a PUMA como programa de cálculo de referencia.

Los aspectos específicos a evaluar, además de la correcta adaptación del código y del funcionamiento general de los módulos, fueron:

- Robustez del programa para desvincular al mapeo de las fluctuaciones naturales en las lecturas de los detectores.
- Grado de independencia entre barras a nivel de perturbaciones (hipótesis del método de corrección).
- Contribución de los armónicos a la representación de la distribución de flujo y análisis de la cantidad óptima.
- Efectividad de la metodología de corrección por posición real de barras.
- Efectividad de la metodología de corrección por quemado instantáneo.
- Capacidad del programa para representar distintos estados de planta.
- Incidencia de modificaciones en la gestión de combustible sobre la precisión del mapeo.
- Incidencia del cambio de banco negro operativo sobre la precisión del mapeo.

3.1. Evaluación del módulo LSFIT

La evaluación del módulo LSFIT persigue resultados certeros que permitan analizar la robustez y representatividad del método de cuadrados mínimos aplicado al mapeo de flujo a partir de las lecturas de los detectores in-core en CNA-UI.

Se definieron 10 bases con las primeras 6 a 15 autofunciones (6 a 15 arm) y una base de 7 (7* arm) que contiene las primeras 6 y el 14 que permite analizar la contribución del modo radial a la representación de la distribución de flujo.

3.1.1. Metodología de evaluación

Se prepararon diversos exámenes:

- *Representación de estados virtuales de planta:* mediante señales sintéticas de detectores compuestas por una combinación lineal de modos armónicos puros afectadas por distintos grados de errores aleatorios. La evaluación se realiza analizando los errores cuadráticos del ajuste en los detectores y de la comparación entre los flujos del mapeo y teóricos puros para cada canal y trozo, variando el número de autofunciones de la expansión.
- *Representación de estados perturbados:* se simula el comportamiento oscilatorio de Xe y su efecto sobre la distribución de la población neutrónica a través de la definición de distintos volúmenes simétricos afectados por secciones eficaces incrementales opuestas. Se evalúan los errores y los coeficientes de la expansión en autofunciones analizando la representación de las perturbaciones por parte del mapeo mediante la activación de los distintos armónicos.
- *Respuesta ante cambios en la configuración de barras:* utilizando las autofunciones calculadas en posición nominal de barras se evalúan las respuestas del mapeo parametrizando la inserción del banco R3 y banco RG completos y cada una de sus barras individualmente. Luego se evalúa la respuesta del método intercambiando el banco negro introducido y finalmente se realizan pruebas con alto grado de inserción de barras, simulando condiciones de arranque.
- *Representación de estados reales de planta:* a partir de los flujos en detectores interpolados en la distribución de flujos de PUMA para estados instantáneos de planta a lo largo del tiempo, se realiza el mapeo y se analizan los errores al variar la cantidad de armónicos de la expansión. Adicionalmente se evalúa contribución del armónico radial a la representación del flujo especialmente en el estado de recambio intensivo, donde la asimetría radial se ve incrementada.

Análisis de la precisión del mapeo

Resulta conveniente explicitar los parámetros de precisión principalmente empleados en el análisis del mapeo que se utilizarán en las secciones próximas.

Si nombramos $d(i)$ con $i : 1, 2, \dots, n_d$ a las señales puras de flujo en los n_d detectores utilizadas para la expansión en serie y $\phi(i)$ a los flujos en detectores calculados por PODESY, la precisión del ajuste en los detectores se mide mediante el error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés), definido como:

$$RMSE(det) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_d} \frac{(d(i) - \phi(i))^2}{n_d}} \quad (3.1)$$

El RMSE es un parámetro característico del mapeo y brinda información importante referente a la bondad del ajuste y la capacidad del programa para representar la distribución instantánea del flujo neutrónico.

En algunos casos es posible contar con valores de referencia obtenidos con programas validados como PUMA o DINO con los cuales contrastar los resultados obtenidos con PODESY en los puntos de interés \vec{r} , que resultan ser los centros de los n_{tr} trozos o segmentos axiales de los n_{ch} canales que componen el núcleo. En esos casos, el error cuadrático medio de la comparación en canales y trozos se define como:

$$RMSE(cyt) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{ch} \times n_{tr}} \frac{(\phi(\vec{r}) - \phi_{ref}(\vec{r}))^2}{n_{ch} \times n_{tr}}} \quad (3.2)$$

En esos casos también se cuenta con resultados de referencia de potencias lineales y potencias por canal, utilizados principalmente para evaluar el funcionamiento del programa íntegro.

3.1.2. Resultados y discusiones

Representación de estados virtuales de planta

Los flujos puros en los detectores y en los canales y trozos se sintetizaron efectuando las combinaciones lineales de las autofunciones con los coeficientes que se muestran en la Tabla 3.1.

Configuración	FUND	AX1	AZ1+	AZ1-	AX2	AX1+AZ1+	AX1+AZ1-
ϕ_1	1	0.2	0.1	-	-	-	-
ϕ_2	1	0.2	0.1	-0.1	-	-	-
ϕ_3	1	0.2	0.1	-0.1	0.1	-	-
ϕ_4	1	0.2	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-
ϕ_5	1	0.2	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1

Tabla 3.1: Coeficientes de la combinación lineal de autofunciones que componen cada conjuntos de flujos sintetizados

Para evaluar la respuesta del método a fluctuaciones en las lecturas de los detectores, se utilizaron como señales de entrada al programa los flujos en los detectores sintetizados afectados por errores aleatorios de $\pm 1\%$, $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$ con una distribución uniforme.

En los gráficos de las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran los errores cuadráticos medios del mapeo en los detectores y de la comparación con los flujos teóricos en canales utilizando diferentes cantidades de armónicos en la expansión al utilizar las señales sintéticas afectadas.

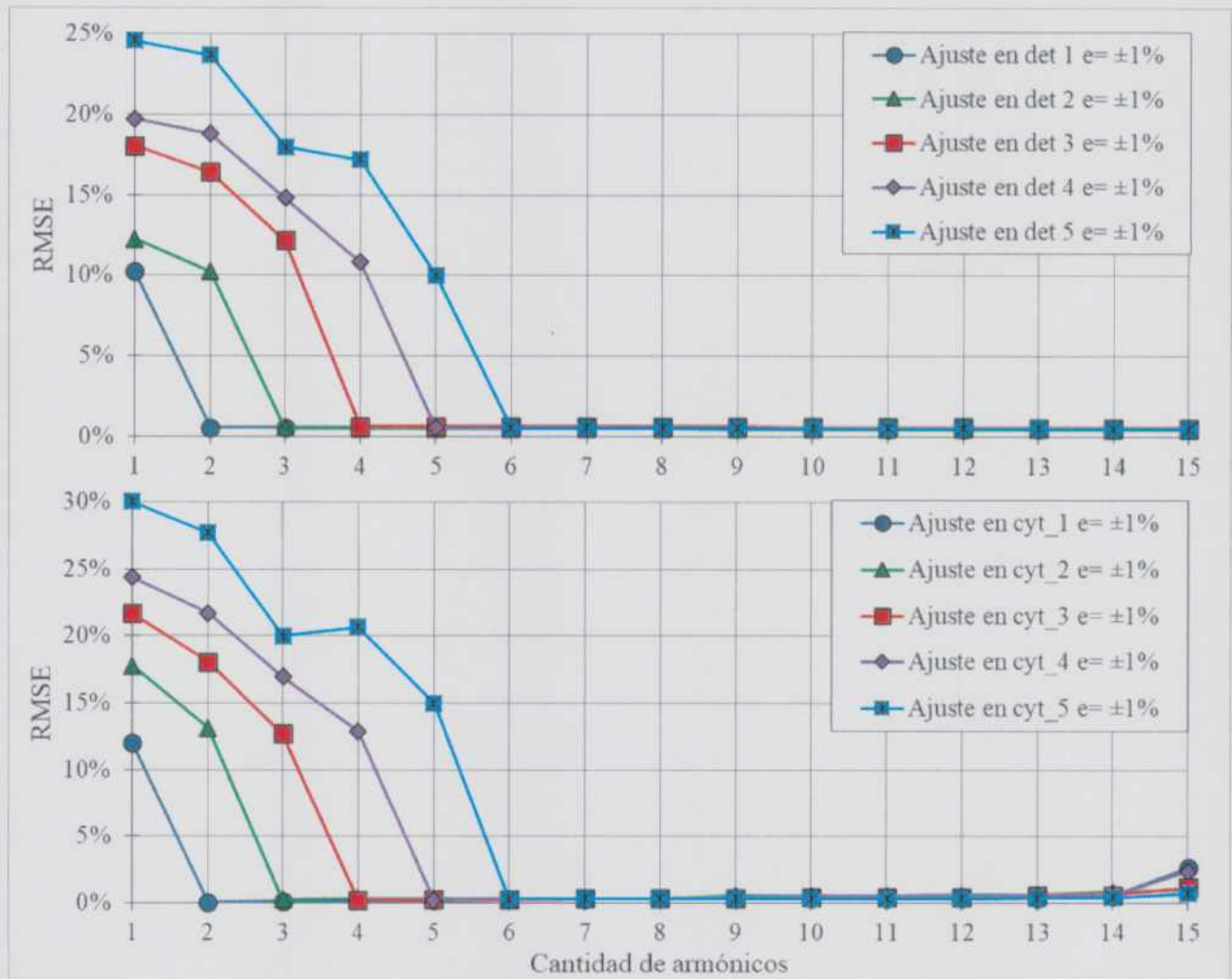


Figura 3.1: Errores cuadráticos medios del mapeo de flujo en los detectores (arriba) y de la comparación entre los flujos calculados y los teóricos en canales y trozos (abajo) en función de la cantidad de armónicos. Error de $\pm 1\%$ en las lecturas de los detectores.

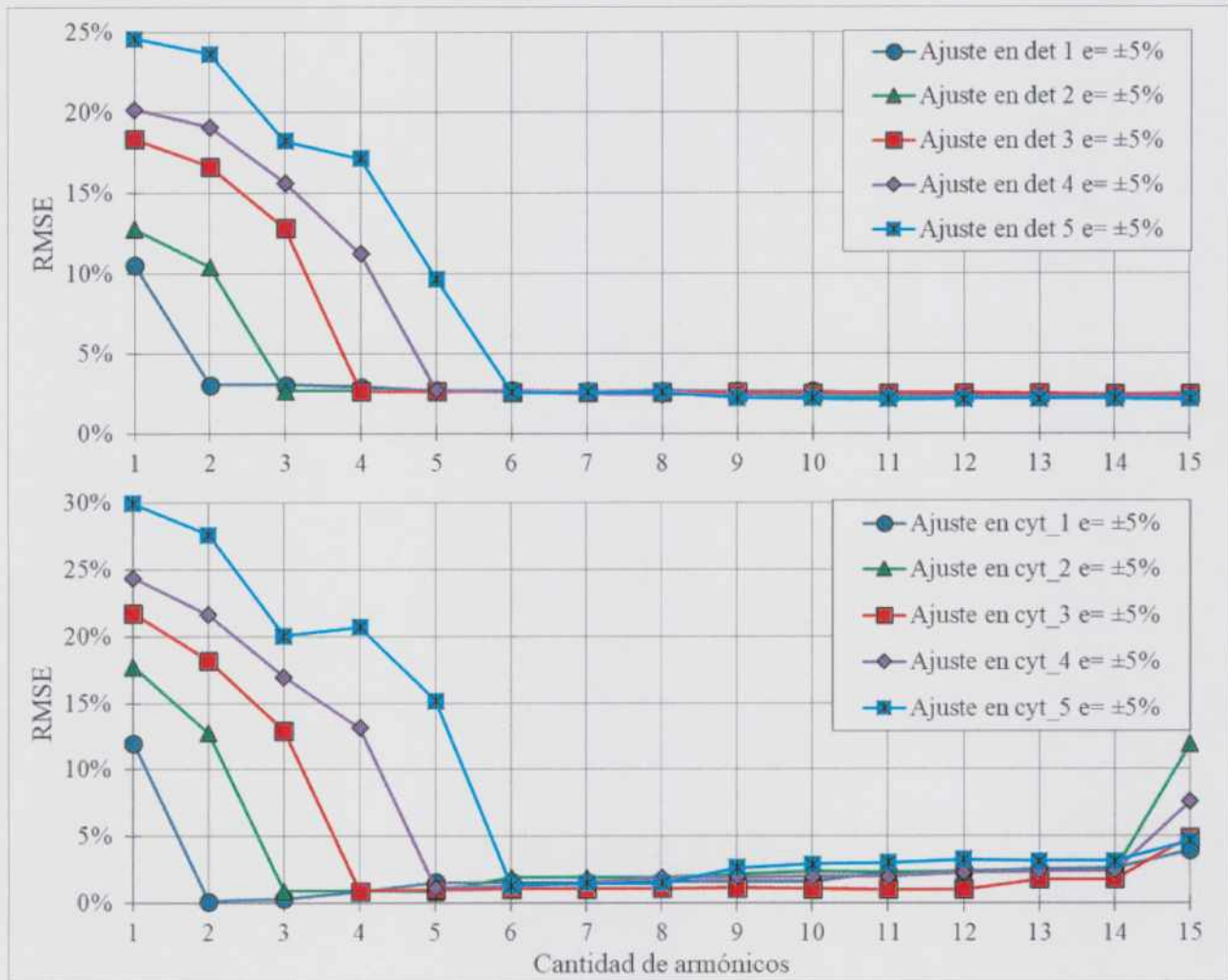


Figura 3.2: Errores cuadráticos medios del mapeo de flujo en los detectores (arriba) y de la comparación entre los los flujos calculados y los teóricos en canales y trozos (abajo) en función de la cantidad de armónicos. Error de $\pm 5\%$ en las lecturas de los detectores.

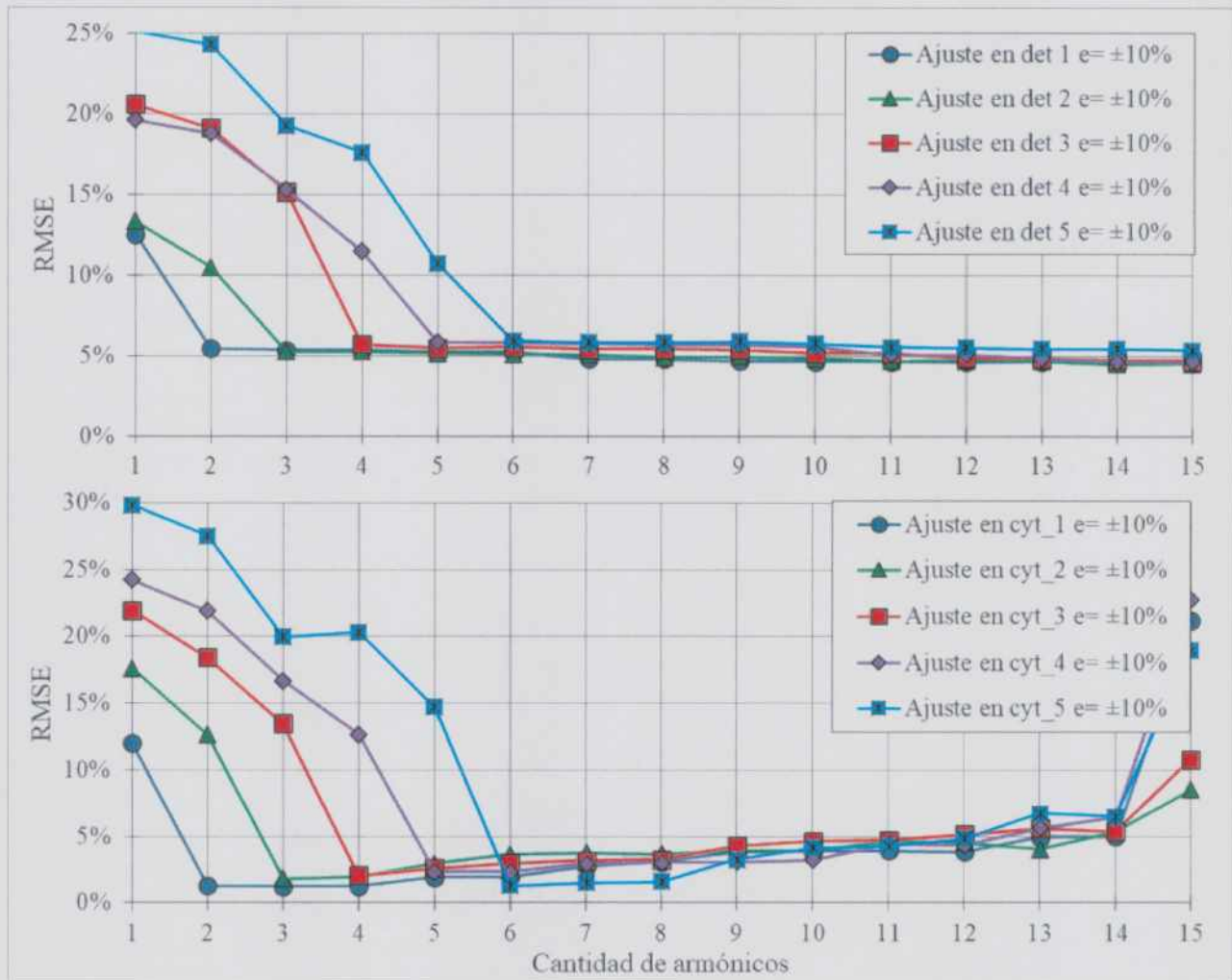


Figura 3.3: Errores cuadráticos medios del mapeo de flujo en los detectores (arriba) y de la comparación entre los los flujos calculados y los teóricos en canales y trozos (abajo) en función de la cantidad de armónicos. Error de $\pm 10\%$ en las lecturas de los detectores.

Como se observa en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3, y como es esperable, el error cuadrático medio del ajuste por cuadrados mínimos en los detectores decrece al aumentar el número de grados de libertad, es decir, el número de armónicos de la expansión. Al completar el conjunto mínimo de armónicos con los que se sintetizaron cada una de las señales se observa una disminución pronunciada en el error del mapeo en detectores y un mínimo en el error en canales y trozos. A partir de ese punto el error en canales y trozos aumenta en la medida en que se incrementa la cantidad de modos de la expansión. Esto se debe principalmente a que una mayor cantidad de autofunciones le significan al método una mayor cantidad de grados de libertad para ajustarse al flujo en los detectores, en la práctica esto también significa una recreación de la distribución de flujos más compleja, pero menos realista.

Como primera conclusión, se observa que el método posee una capacidad elevada para aminorar la incidencia de las fluctuaciones en las señales de los detectores. También se observa que la precisión del mapeo es buena al utilizar una cantidad de armónicos igual o mayor a la correspondiente con la cual se sintetizaron los flujos del reactor hasta el armónico 15, a partir del cual el mapeo resulta inverosímil. Esto significa que para determinar la cantidad de autofunciones óptima a emplear en la expansión es necesario analizar la contribución de cada uno en la representación de la distribución de flujo del núcleo en distintos estados.

Representación de estados perturbados

Se simularon las distribuciones de Xe en el núcleo como volúmenes (prismas de base rectangular) con secciones eficaces incrementales en la entrada PERTURBACIONES de DINO. Los seis casos perturbados son esquematizados en la Figura 3.4.

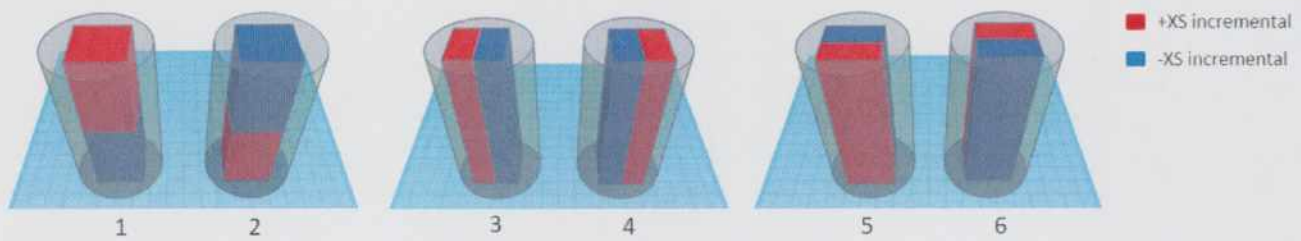


Figura 3.4: Esquema de los volúmenes perturbados simulados en cada caso.

Nomalmente, una oscilación de xenón controlada produce un aumento local de la absorción del orden de $10^{-6}cm^{-1}$. Se corrió el programa DINO utilizando una sección eficaz (XS) incremental de $\pm 10^{-5}cm^{-1}$, distribución de quemado TAV y barras en posición nominal.

En las Tablas 3.2 y 3.3 se muestran los errores del ajuste en los detectores y de la comparación con los flujos teóricos en canales y trozos para cada caso y diferente cantidad de armónicos empleados en la expansión.

#Caso	RMSE (det)		
	6 arm	10 arm	14 arm
1	0.416 %	0.415 %	0.163 %
2	0.476 %	0.475 %	0.141 %
3	0.342 %	0.325 %	0.322 %
4	0.357 %	0.339 %	0.335 %
5	0.201 %	0.148 %	0.125 %
6	0.193 %	0.156 %	0.104 %

Tabla 3.2: Error cuadrático medio del ajuste en detectores para cada caso y cantidad de armónicos de la expansión considerados.

#Caso	RMSE (cyt)		
	6 arm	10 arm	14 arm
1	0.580 %	0.579 %	0.449 %
2	0.653 %	0.653 %	0.519 %
3	0.654 %	0.674 %	0.680 %
4	0.664 %	0.687 %	0.695 %
5	0.792 %	0.800 %	0.772 %
6	0.742 %	0.777 %	0.787 %

Tabla 3.3: Error cuadrático medio de la comparación con los flujos teóricos en canales y trozos para cada caso y cantidad de armónicos de la expansión considerados.

Se puede observar que el error del ajuste decrece con la cantidad de armónicos, pero la representación de las perturbaciones tiene una precisión comparable en canales y trozos.

En la Tabla 3.4 se muestran los coeficientes de Fourier resultantes de la expansión con 6 armónicos para cada caso.

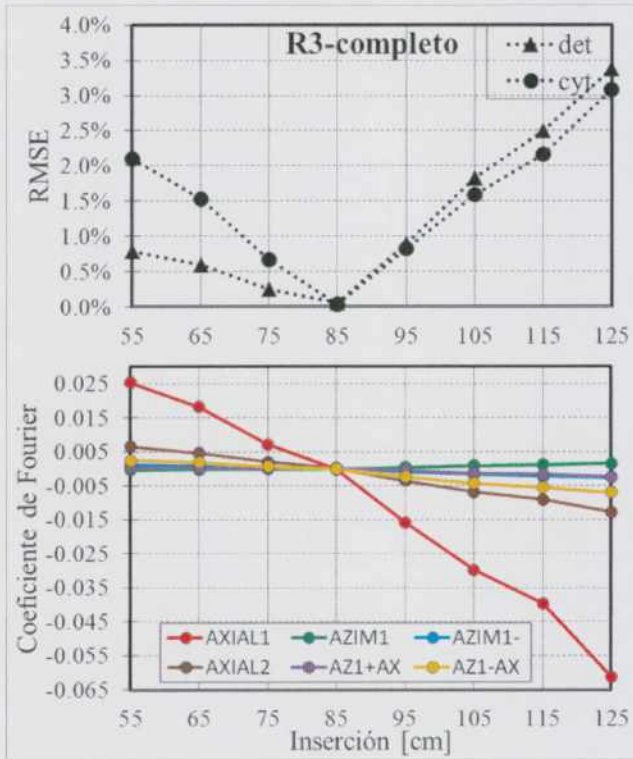
#Caso	FUND	AX1	AZ1+	AZ1-	AX2	AX1+AZ1+	AX1+AZ1-
1	1.0000	0.0836	-0.0003	-0.0004	0.0016	0.0005	-0.0001
2	1.0000	-0.0848	0.0003	-0.0001	0.0005	0.0007	0.0004
3	1.0000	-0.0006	0.0201	0.0325	0.0003	-0.0003	0.0004
4	1.0000	0.0007	-0.0199	-0.0325	-0.0001	0.0005	-0.0006
5	1.0000	-0.0011	0.0365	-0.0214	-0.0005	0.0004	-0.0003
6	1.0000	0.0005	-0.0361	0.0209	0.0007	-0.0001	0.0000

Tabla 3.4: Valores de los coeficientes de la expansión y errores para cada caso con 6 armónicos.

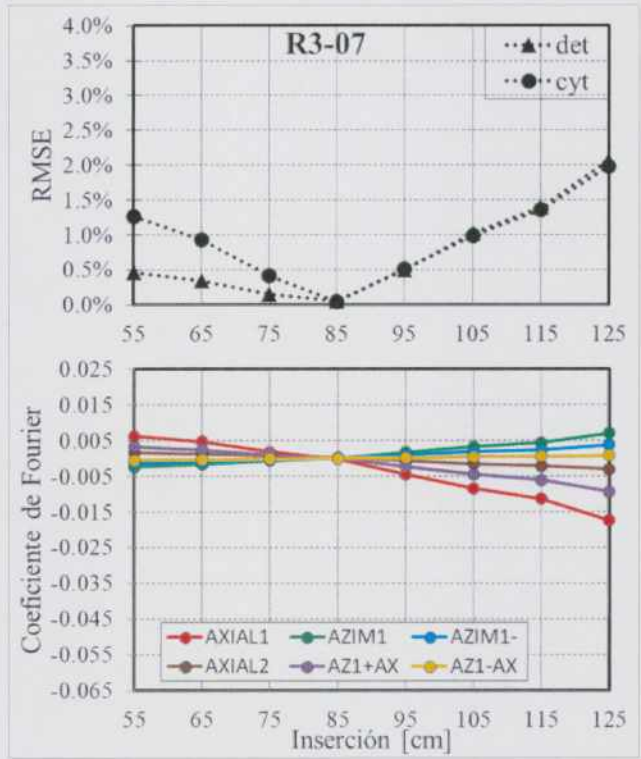
Se puede observar que las distribuciones 1 y 2 son representadas apropiadamente por el primer armónico de la expansión (axial de orden 1). Las distribuciones 3, 4, 5 y 6 son muy bien representadas por los armónicos 2 y 3 (azimutales conjugados de orden 1). Los signos de sus coeficientes se explican teniendo en cuenta que el plano nodal de ambos modos (Figura 2.1a y Figura 2.1b) atraviesan diagonalmente los volúmenes de las perturbaciones.

Respuesta ante cambios en la configuración de barras

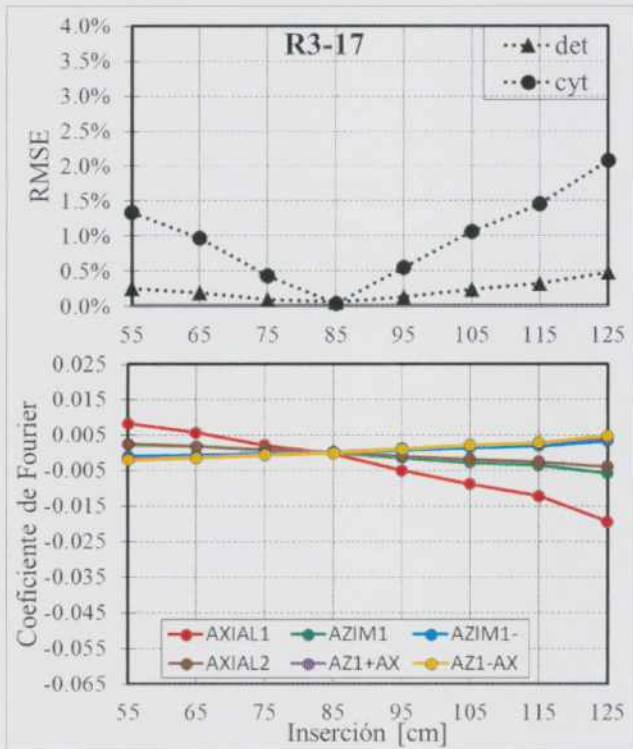
Se calcularon los flujos en detectores y canales y trozos con DINO utilizando la distribución de quemado TAV con la que se calcularon las autofunciones y se varió la configuración de barras en la entrada. Se varió la inserción del banco negro R3 (posición nominal 85 cm) y cada una de sus barras individualmente desde 55 cm hasta 125 cm con pasos de 10 cm. Por otro lado, se varió la inserción del banco RG (posición nominal 350 cm) y cada una de sus barras individualmente desde 300 cm hasta 400 cm con pasos de 10 cm. Los flujos en detectores calculados fueron utilizados como entrada para el cálculo de PODESY. Se corrió el programa utilizando los primeros 6 armónicos. En los gráficos de las Figuras 3.5a, 3.5b, 3.5c y 3.5d se muestran los errores cuadráticos medios del ajuste en los detectores y de la comparación con los flujos teóricos en canales y trozos junto con los coeficientes de Fourier de las autofunciones para las parametrizaciones del banco negro y cada una de sus barras.



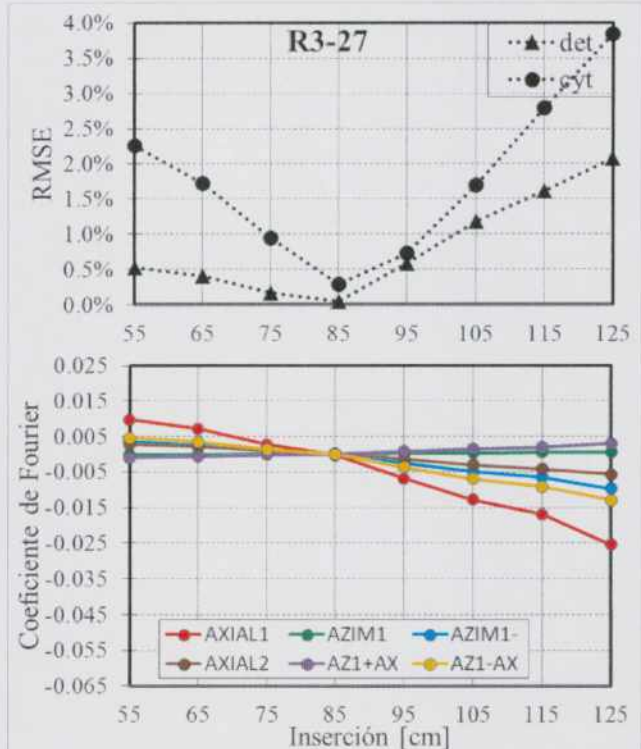
(a) Banco R3 completo.



(b) Barra negra 7.



(c) Barra negra 17.



(d) Barra negra 27.

Figura 3.5: Parametrización del banco R3 y cada una de sus barras.

El error del mapeo se incrementa al alejarse la configuración de barras de la nominal. Se observa que el error del ajuste en los detectores asciende con menor pendiente hacia inserciones menores que la nominal, en comparación con el error hacia inserciones mayores. Esto se explica teniendo en cuenta el perfil axial de flujo y, naturalmente, de la importancia neutrónica. Por este motivo el efecto sobre la distribución de flujo de la extracción de una porción de barra en la zona

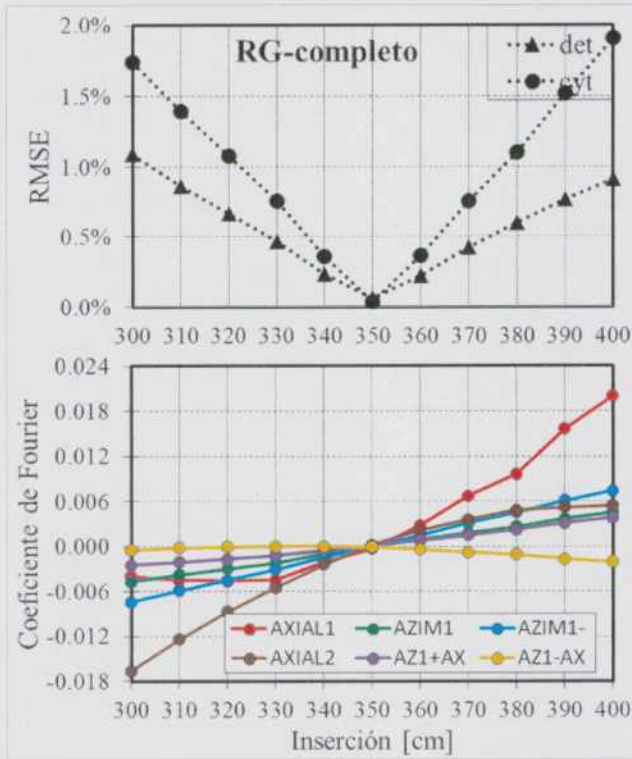
cercana a los límites del reactor es menor al efecto de la inserción de la misma porción en las cercanías del centro del núcleo.

En todos los casos la evolución del primer y segundo armónico axial es esperable teniendo en cuenta que, por un lado y a medida que las barras se extraen de su posición nominal, la distribución axial de flujo se eleva en el extremo superior del reactor y que, por el otro y a medida que la barras se insertan desde la posición nominal, la distribución axial de flujo en el extremo superior se deprime.

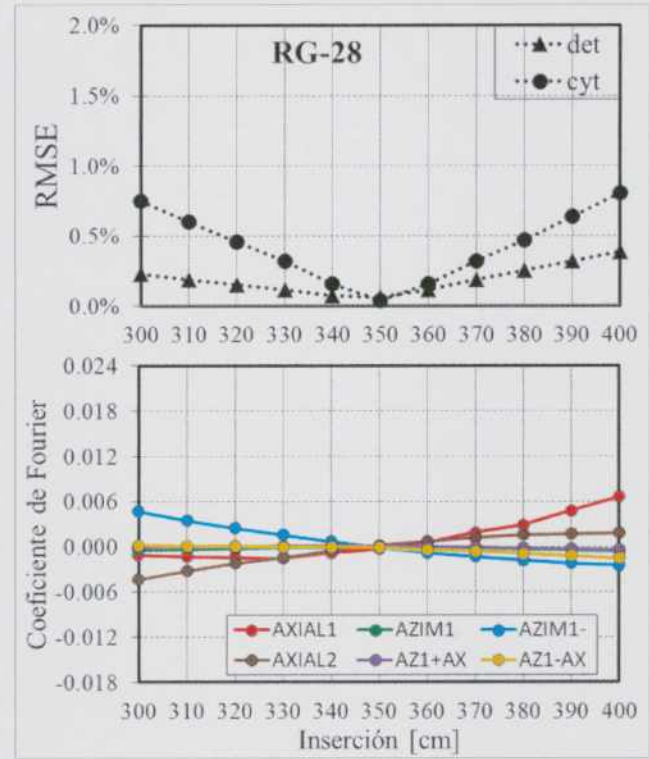
Por otro lado, la orientación oblicua de las barras produce un fenómeno de rotación en el moldeo de la distribución neutrónica que se representa principalmente a través de los armónicos azimutales de primer orden. El comportamiento de dichos armónicos, en relación a sus signos, se explica en función de sus distribuciones espaciales y de la posición del banco o barra que se parametriza. Por ejemplo, en el caso de la barra negra 7, la extracción de barra y la consecuente elevación del flujo en el plano azimutal en su vecindad se representa con la suma de los armónicos azimutales opuestos, mientras que la inserción de la barra más allá de la posición nominal, y su depresión en el flujo, se representa con la suma. Razonamiento similar explica el comportamiento de los armónicos azimutales para el caso de la parametrización de la barra 17 y 27. Particularmente, en este último caso, el armónico AZ1- no contribuye a la representación del efecto de su movimiento debido a que su recorrido prácticamente coincide con el plano nodal.

Los coeficientes de Fourier del banco completo se aproximan muy bien como la suma de los coeficientes de cada una de sus barras por separado. Esto es un resultado muy importante debido a que significa que el apantallamiento entre las barras del banco negro es despreciable, hipótesis importante en la que se basa el método de corrección por posición de barras empleado por el módulo STAFI que se evaluará más adelante.

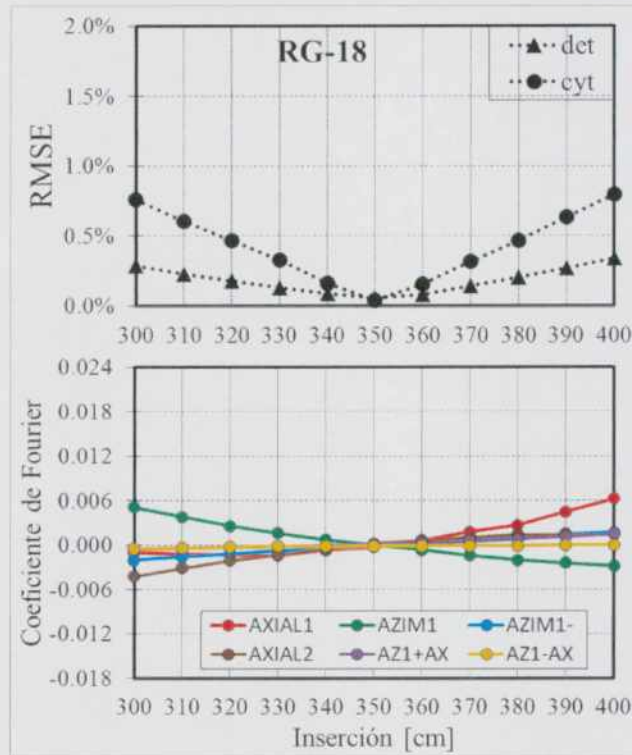
En los gráficos de la Figura 3.6a, 3.6b, 3.6c y 3.6d se muestran los resultados de las parametrizaciones del banco RG y cada una de sus barras.



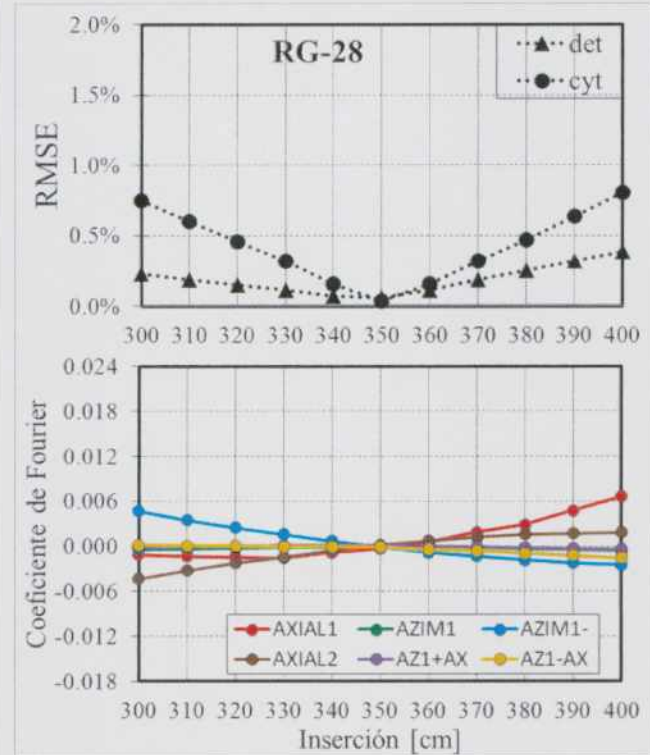
(a) Banco RG completo.



(b) Barra gris 8.



(c) Barra gris 18.

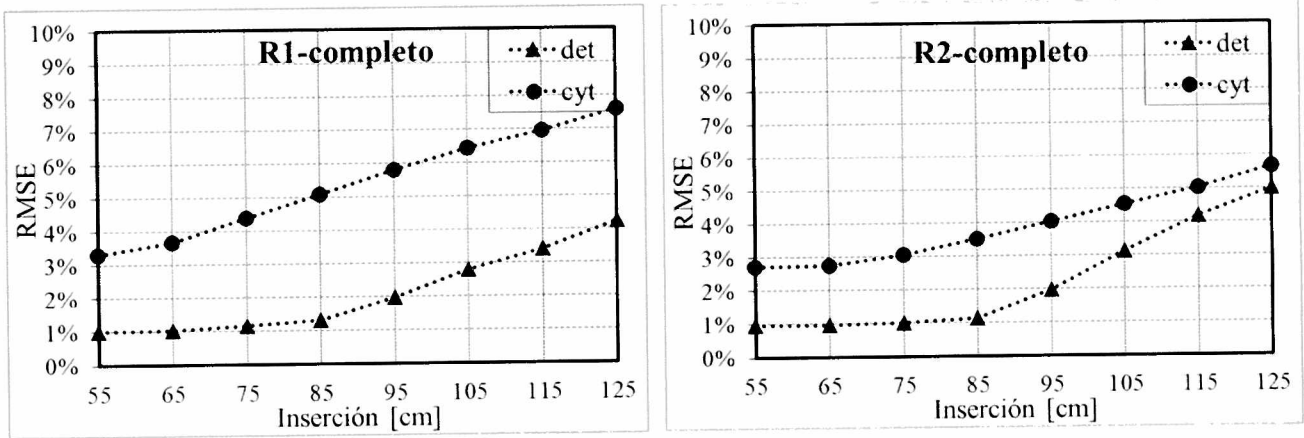


(d) Barra gris 28.

Figura 3.6: Parametrización del banco RG y cada una de sus barras.

Con el mismo razonamiento pero en condiciones opuestas, en general el error del ajuste en los detectores es mayor al extraer las barras grises de su posición nominal debido a que el efecto sobre el campo de neutrones se produce más cerca del centro del núcleo.

Los efectos sobre la distribución axial de flujo son representados por el primer o segundo armónico en función de la zona perturbada. Por su funcionalidad, el primer axial es el encargado



(a) Banco R1 completo.

(b) Banco R2 completo.

Figura 3.7: Parametrización de los bancos negros intercambiados.

de representar principalmente las variaciones en los extremos del plano axial, mientras que el segundo armónico axial, por su parte, representa principalmente las variaciones en la región central del plano axial. La extracción de las barras grises produce una elevación de flujo en la zona central del núcleo, mientras que la inserción produce una depresión de flujo en el extremo inferior. Por otro lado, el comportamiento de los armónicos azimutales se explican con la misma lógica aplicada al banco negro.

A pesar de la mayor proximidad entre las barras, debido al mayor grado de inserción en ángulo, pero con una influencia individual sobre la distribución de flujo más liviana, los coeficientes de Fourier del banco completo se aproximan muy bien como la suma de los coeficientes de cada una de sus barras por separado evidenciando un grado de apantallamiento también despreciable.

Finalmente el ensayo de intercambio de banco negro arrojó los resultados que se muestran en las Figuras 3.7a y 3.7b.

Se observa que en ambos casos tanto el error del ajuste en los detectores como el error de la comparación con los flujos teóricos en canales y trozos aumentan con la inserción. Dichos errores son relativamente más chicos para el caso del intercambio con el banco R2 probablemente debido a que su recorrido es algo más parecido al del banco R3 y a que el recorrido del banco R1 es más próximo a los detectores.

Condiciones de alta inserción

Con el objetivo de evaluar la precisión en la representación de condiciones simuladas de arranque con 6 armónicos, se realizaron cálculos con PUMA para altos grados de inserción de barras y se extrajeron los flujos interpolados en detectores. Las condiciones ensayadas y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.5.

# Condición	Banco							RMSE	
	COR	R1	R2	R3	RG	P1	P2	Det	Cyt
1	-	26.4 %	26.4 %	-	100 %	26.4 %	26.4 %	15.4 %	16.5 %
2	-	26.4 %	-	26.4 %	100 %	26.4 %	26.4 %	12.9 %	14.6 %
3	-	-	26.4 %	26.4 %	100 %	26.4 %	26.4 %	13.3 %	16.1 %
4	-	44 %	44 %	44 %	100 %	26.4 %	26.4 %	16.4 %	20.8 %
5	44 %	44 %	44 %	44 %	100 %	26.4 %	26.4 %	78.8 %	93.9 %

Tabla 3.5: Condiciones de arranque ensayadas y error cuadrático medio en el ajuste en detectores y de la comparación con los flujos teóricos de PUMA en canales y trozos.

Se observa que la precisión en el mapeo empeora al aumentar el porcentaje de inserción de barras, especialmente para el caso de los bancos de corte. Esto se debe a que en estos escenarios la proximidad entre barras es alta y el efecto de apantallamiento se ve intensificado. Los errores altos en el ajuste para estas condiciones podrían significar la necesidad de implementar una metodología de mapeo diferente para los casos de arranque. Esta discusión se desarrollará más adelante, una vez concluidas las etapas de evaluación del programa.

Representación de estados reales de planta

Se utilizaron como entrada al programa los flujos interpolados en los detectores de distintos cálculos de flujo instantáneo con PUMA de estados de planta reales a lo largo del tiempo. Se utilizaron distintos conjuntos de armónicos para analizar su capacidad para representar los estados de planta postulados. Cabe mencionar que durante el periodo analizado la estrategia de recambio de combustible difiere con la considerada en el cálculo de la distribución de quemado promediada en el tiempo con la cual fueron calculadas las autofunciones. En las Figuras 3.10 y 3.11 se muestran los resultados al utilizar 6, 10 y 14 armónicos.

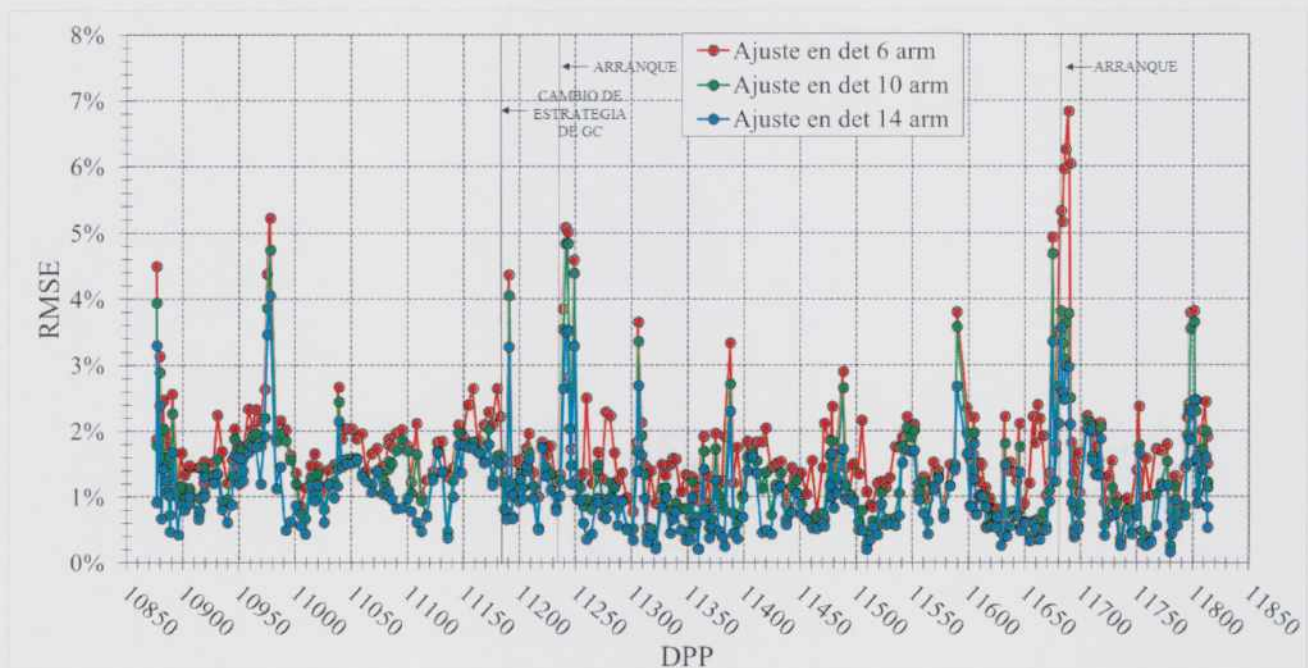


Figura 3.8: Errores cuadráticos medios del ajuste en detectores al utilizar 6, 10 y 14 armónicos para distintos estados de planta.

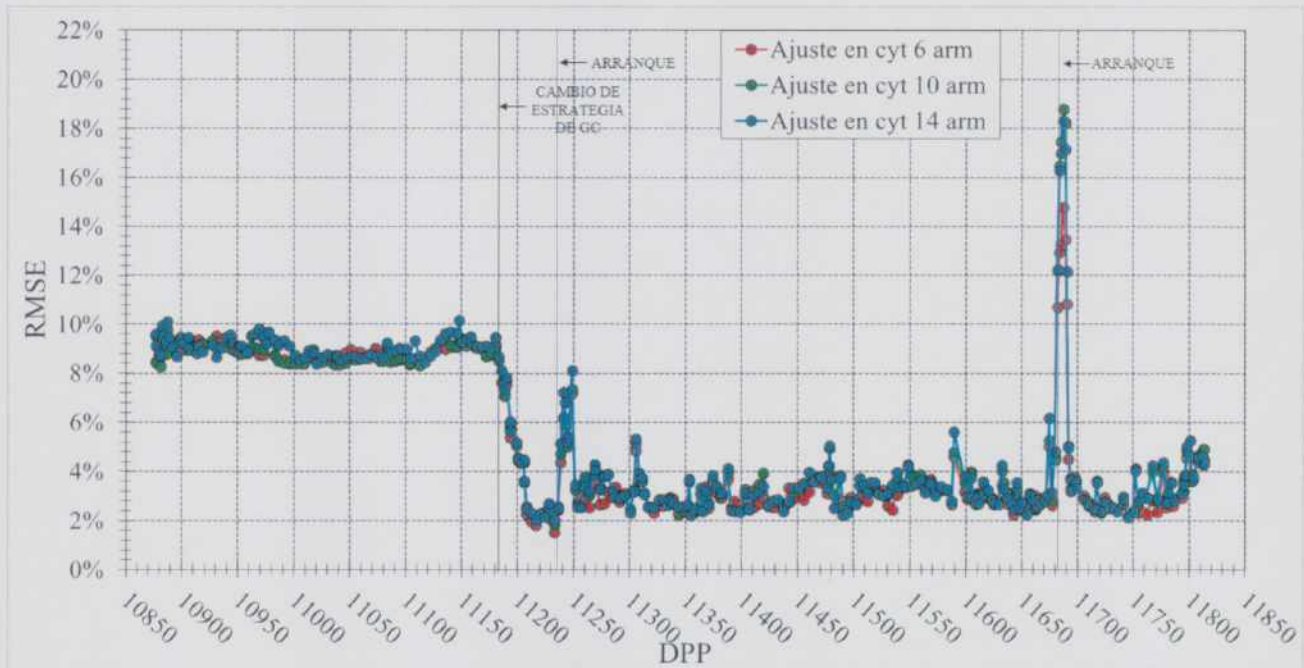


Figura 3.9: Errores cuadráticos medios de la comparación con flujos teóricos en canales y trozos al utilizar 6, 10 y 14 armónicos para distintos estados de planta.

Como era de esperar, al utilizar una mayor cantidad de armónicos el error de ajuste se reduce. Por su parte, el error en la comparación en canales y trozos no acusa grandes diferencias al variar la cantidad de armónicos del ajuste, pero se observa una tendencia a empeorar al aumentar su cantidad. Con 15 armónicos ambos errores escapan de la norma. En la gran mayoría de los casos los errores se mantienen acotados con valores esperables y aceptables teniendo en cuenta que no se ha corregido por posición real de barras ni por quemado instantáneo. La disminución pronunciada en el error de ajuste en canales y trozos alrededor de los 11180 días de plena potencia coincide con un cambio en la estrategia de gestión de combustible. Una modificación en la estrategia de recambios tiene una alta incidencia sobre la distribución de flujo en el núcleo. Debido a la disminución en el error se deduce que la gestión resultante se aproxima mejor a la considerada en el cálculo de las autofunciones de la expansión. El aumento en los errores entre los 11240 y 11250 y entre los 11680 y 11690 días de plena potencia coincide con dos estados de arranque. Durante esta etapa existe un alto grado de inserción de barras, hecho que significa un alejamiento grande del estado del núcleo con el cual fueron calculadas las autofunciones.

Para examinar la contribución a la representación de la distribución del flujo del armónico radial, se analizaron los errores al utilizar la base de autofunciones 7^* arm. En las Figuras 3.10 y 3.11 se muestran los resultados al utilizar 6 y 7^* arm armónicos.

Al agregar una autofunción al ajuste el error se reduce. Sin embargo no se evidencia una mejoría en la precisión de cálculo en canales y trozos.

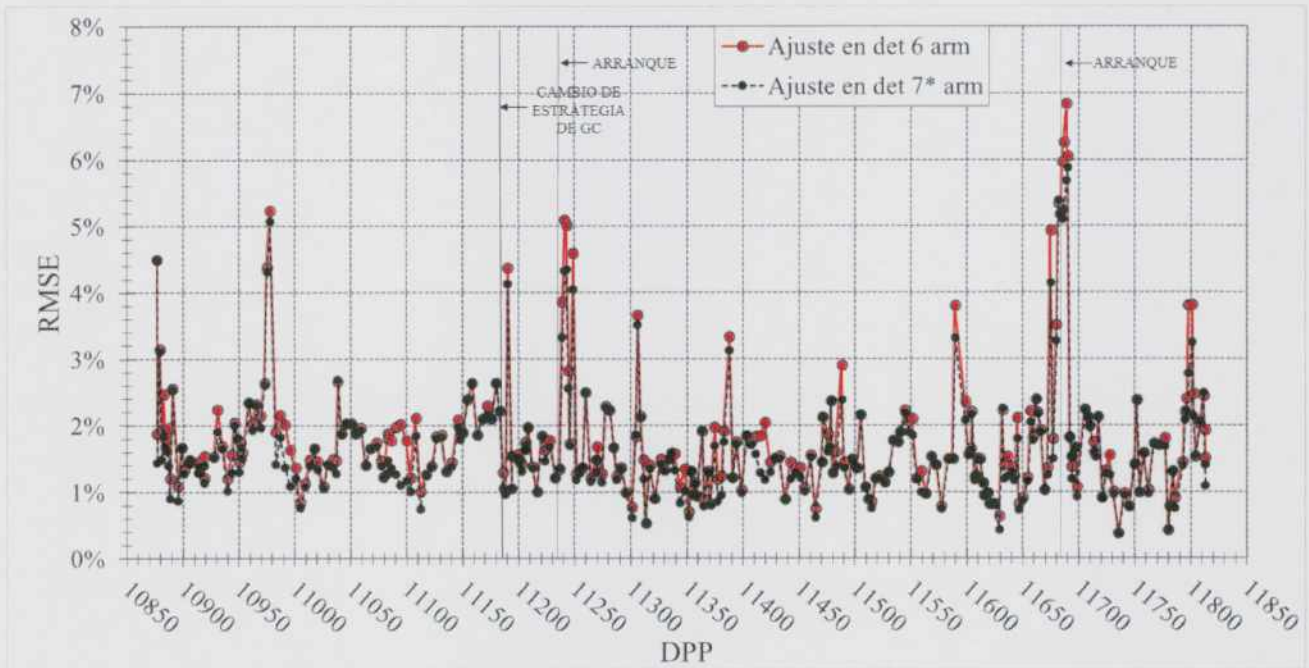


Figura 3.10: Errores cuadráticos medios del ajuste en detectores al utilizar las bases de 6 y 7* armónicos.

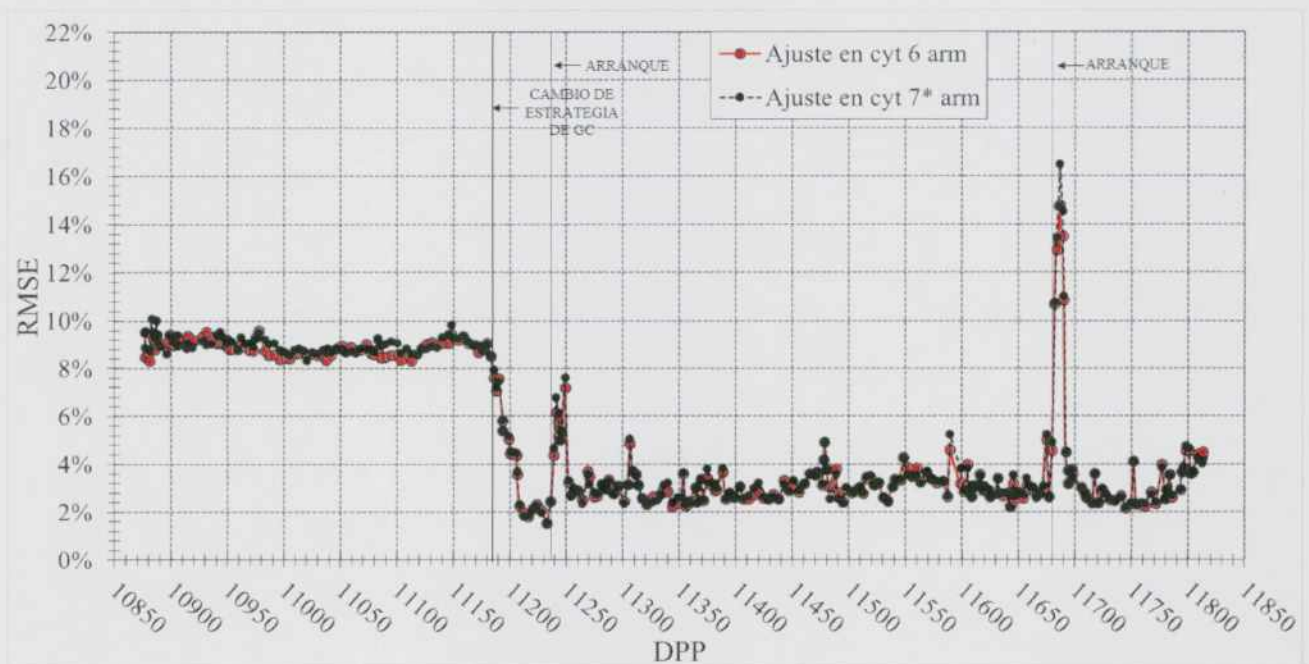


Figura 3.11: Errores cuadráticos medios de la comparación con flujos teóricos en canales y trozos al utilizar las bases de 6 y 7* armónicos.

3.2. Evaluación del módulo STAFI

La evaluación del módulo STAFI persigue resultados certeros que permitan verificar el buen funcionamiento del método de corrección por posición real de barras.

3.2.1. Metodología de evaluación

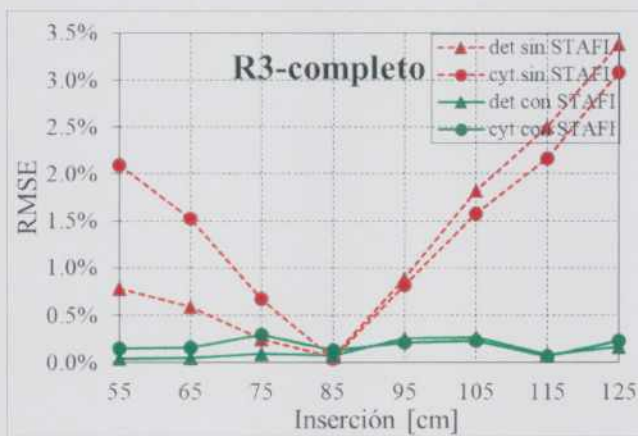
Con el fin de evaluar el funcionamiento de la metodología de corrección, se repitieron los siguientes ensayos activando el módulo STAFI:

- *Parametrización de los bancos operativos:* se parametriza el banco R3 y el banco RG completos y cada una de las barras
- *Parametrización de banco negro intercambiado:* se intercambia el banco negro utilizado y se parametriza su inserción.
- *Condiciones de alta inserción:* se evalúa la representación de las condiciones de arranque simuladas.

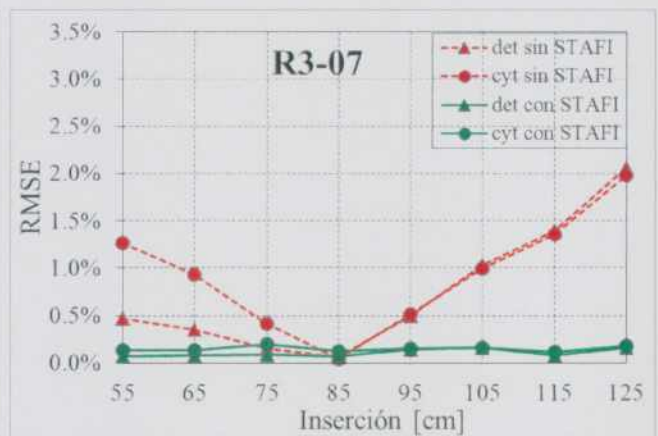
3.2.2. Resultados y discusiones

Parametrización de bancos operativos

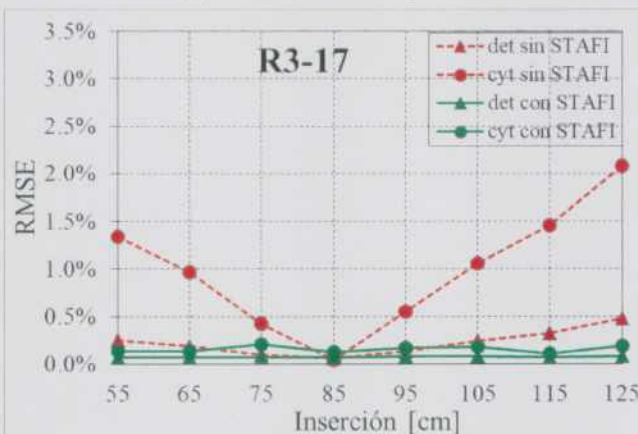
Se corrió el programa PODESY activando el módulo STAFI y utilizando nuevamente los primeros 6 armónicos y distribución de quemado promediada en el tiempo. En las Figuras 3.12a a 3.12d se muestran los errores en detectores y en canales y trozos para los ensayos de parametrización del banco R3 con y sin STAFI activado y en las Figuras 3.13a a 3.13d de la parametrización del banco RG.



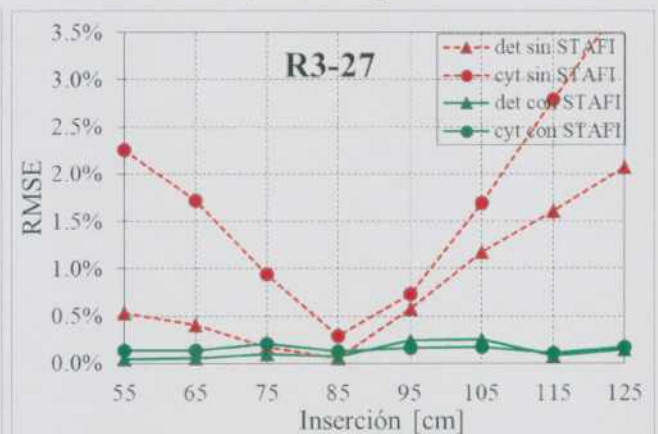
(a) Banco R3 completo.



(b) Barra negra 7.



(c) Barra negra 17.



(d) Barra negra 27.

Figura 3.12: Parametrización del banco R3 y cada una de sus barras con y sin STAFI activado.

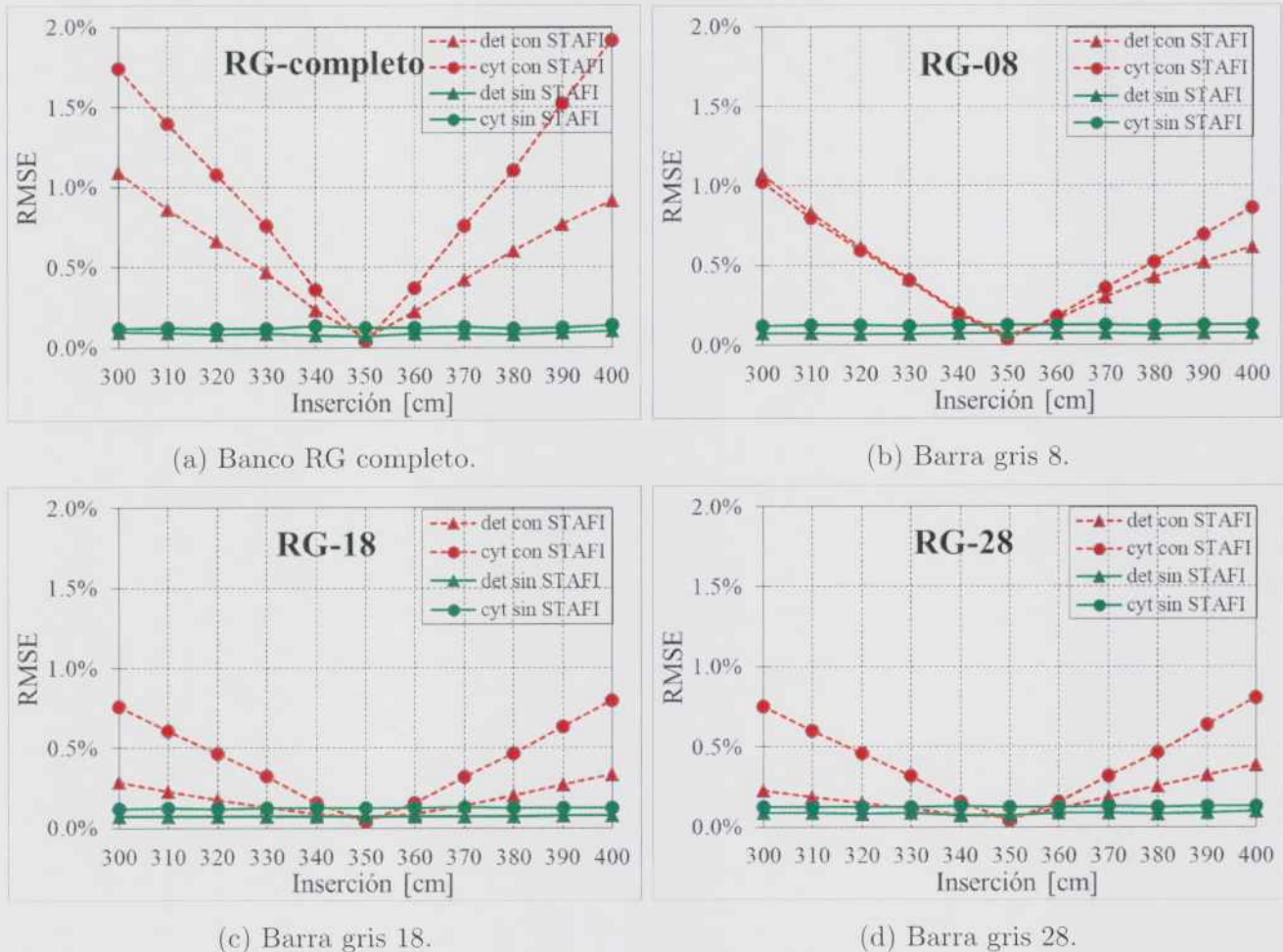


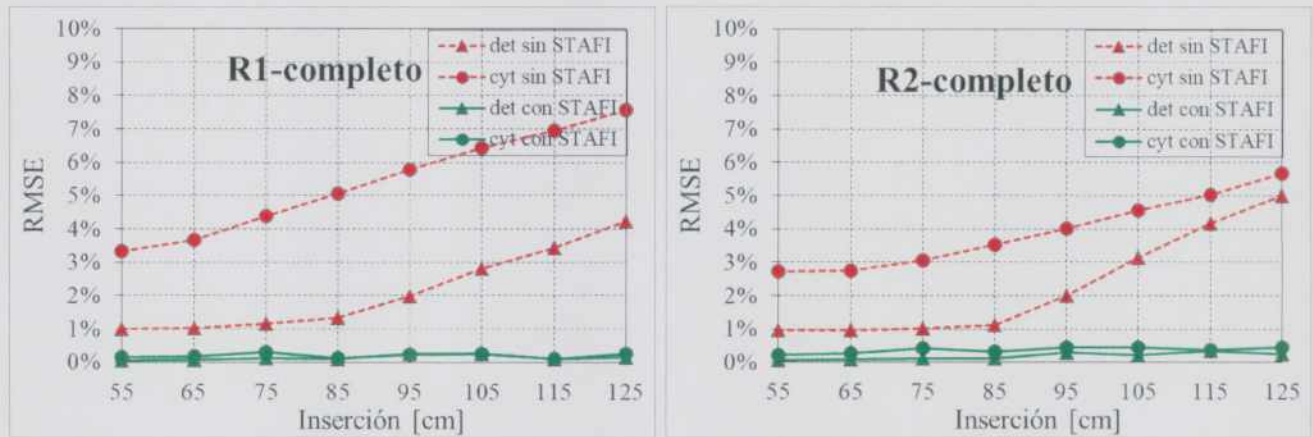
Figura 3.13: Parametrización del banco RG y cada una de sus barras con y sin STAFI activado.

Como se observa en los gráficos presentados, los errores del ajuste en detectores y de la comparación con flujo teóricos en canales y trozos disminuyen contundentemente a valores despreciables, resaltando la alta efectividad del método de corrección en las condiciones ensayadas con ambos bancos operativos.

Los errores en la parametrización de los bancos completos son comparables a los obtenidos al parametrizar cada una de sus barras. Este resultado junto con los obtenidos en la evaluación del módulo LSFIT verifican que la hipótesis de independencia entre las barras a nivel de perturbaciones es apropiada para operación normal.

Parametrización de banco negro intercambiado

Se sustituyó el banco R3 por los bancos negros 1 y 2 y se parametrizaron en el rango de operación, manteniendo las demás barras en posición nominal con quemado promedio. Los resultados se presentan en las Figuras 3.14a y ??.



(a) Banco R1 completo.

(b) Banco R2 completo.

Figura 3.14: Parametrización de los bancos negros alternativos con y sin STAFI activado.

Se observa que las correcciones fueron muy efectivas para bajar los errores en canales y trozos. Una particularidad se produce en el caso de la parametrización del banco R2 a partir de los 85 cm. La oscilación con tendencia creciente del error en canales y trozos con la corrección por barras se debe a que con configuración nominal, con la cual se calcularon los factores de corrección, las barras del banco R2 se ven parcialmente apantalladas por las del banco R3. Esto se ve reflejado en los factores de corrección y, por lo tanto, en el error en canales y trozos cuando el apantallamiento desaparece en ausencia del banco R3.

Condiciones de alta inserción

Se volvieron a calcular los estados simulados de arranque activando la corrección por posición real de barra. Los resultados se muestran en la Tabla

# Condición	Banco							RMSE	
	COR	R1	R2	R3	RG	P1	P2	Det	Cyt
1	-	26.4 %	26.4 %	-	100 %	26.4 %	26.4 %	0.9 %	1.2 %
2	-	26.4 %	-	26.4 %	100 %	26.4 %	26.4 %	0.7 %	0.9 %
3	-	-	26.4 %	26.4 %	100 %	26.4 %	26.4 %	0.7 %	1.1 %
4	-	44 %	44 %	44 %	100 %	26.4 %	26.4 %	10.3 %	9.6 %
5	44 %	44 %	44 %	44 %	100 %	26.4 %	26.4 %	38.3 %	37.1 %

Tabla 3.6: Condiciones de arranque ensayadas y error cuadrático medio en el ajuste en detectores y de la comparación con los flujos teóricos de PUMA en canales y trozos activando el módulo STAFI.

Se observa una mejoría general alta en el ajuste. Sin embargo en las condiciones 4 y 5 el error continua siendo excesivo. Como se mencionó anteriormente, en estos escenarios las barras se encuentran muy próximas entre sí y el efecto de apantallamiento se ve intensificado. Teniendo en cuenta que los factores de corrección para las barras de corte se calcularon solo para la posición totalmente extraída y totalmente insertada, se volvieron a determinar los errores en el mapeo para la condición 5 utilizando una biblioteca de factores de 21 pasos para cada una de las barras. Como resultado se obtuvo un error cuadrático medio en el ajuste en los detectores del 39.0% y del 47.5% en la comparación con los flujos teóricos, no se evidenció mejora. Se comprueba que la corrección por posición real de barras con respecto a la posición nominal no es lo suficientemente efectiva en los estados típicos de arranque.

3.3. Evaluación del módulo FLUX

La evaluación del módulo FLUX persigue resultados certeros que permitan verificar la exactitud para el cálculo de difusión en forma independiente.

3.3.1. Metodología de evaluación

Se analizaron los resultados del cálculo con FLUX utilizando como referencia cálculos con PUMA para casos de la gestión de combustible en distintos estados de planta. Se analizaron las diferencias en reactividad efectiva y los errores cuadráticos medios en las potencias por canal con más de 360 casos en un período de 1180 dpp.

3.3.2. Resultados y discusiones

En la Figura 3.15 se muestran las diferencias en reactividad efectiva en el cálculo de cada caso con FLUX y con PUMA. Adicionalmente se muestra la cantidad de canales vacíos dentro del núcleo, parámetro que evidencia un cambio en la estrategia de combustible y señala los estados de arranque con vaciado.

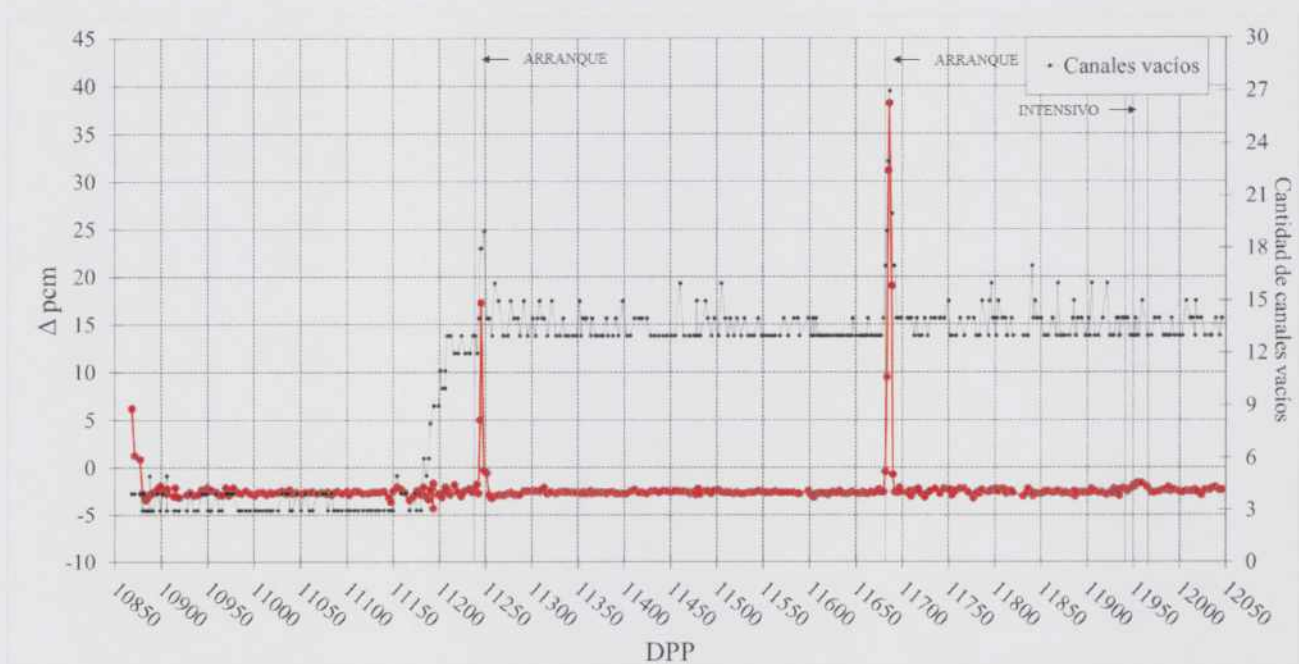


Figura 3.15: Diferencias en reactividades efectivas calculadas con FLUX y PUMA

Se observa que la diferencia en reactividad asciende en estados de arranque. Estos escenarios de planta tienen la particularidad de contar con un alto grado de inserción de barras para cubrir el exceso de reactividad del núcleo reducido en xenón. El poder perturbativo de las barras introduce un error considerable en el cálculo de diferencias finitas de FLUX. De todos modos los valores logrados son aceptables teniendo en cuenta que incluso con PUMA se observan errores incrementados para cálculos de reactor en estados fuertemente perturbados.

Además se observa una discrepancia sistemática de aproximadamente 2,5 pcm. La persistencia del error sugiere una diferencia en el modelado del reactor. Sin embargo, la precisión en el cálculo es aceptable para el método de corrección por quemado instantáneo. En la Figura 3.16 se muestra el error cuadrático medio en los cálculos de potencia por canal para cada uno de los casos analizados.

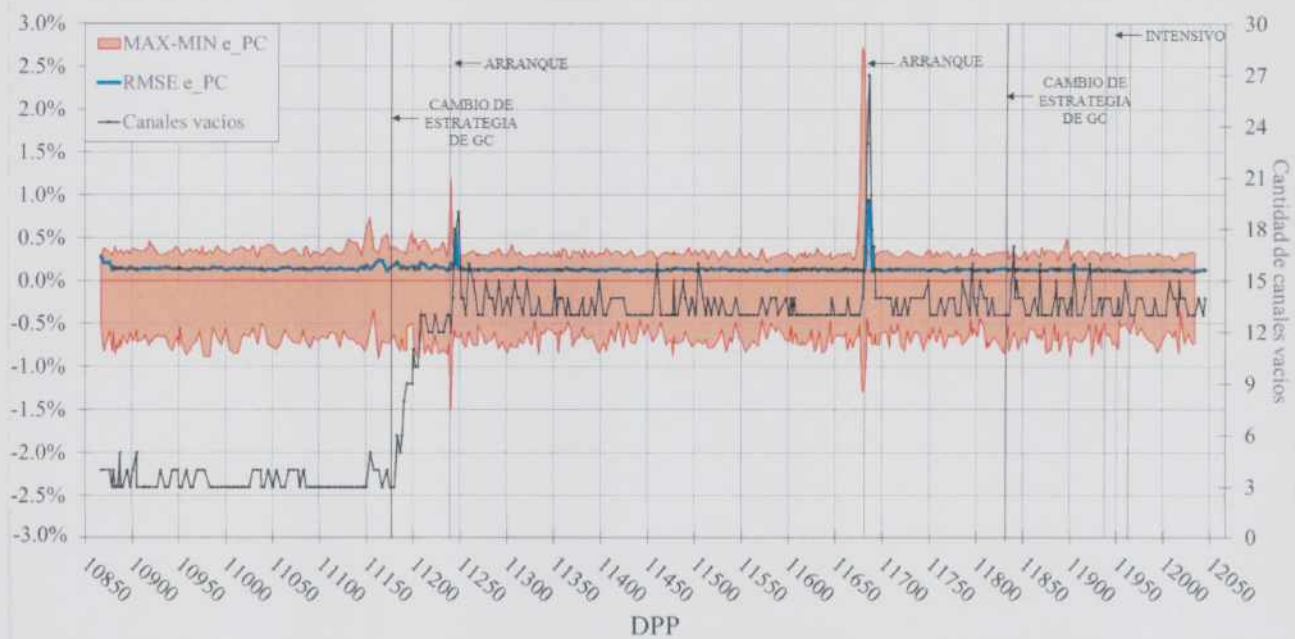


Figura 3.16: Error cuadrático medio en la potencia por canal entre los cálculos con FLUX y PUMA

Se observan picos de error en casos de arranque. La precisión en el cálculo es igualmente aceptable.

3.4. Evaluación del módulo HETERO

La evaluación del módulo HETERO persigue resultados certeros que permitan verificar el buen funcionamiento del método de corrección por quemado instantáneo.

3.4.1. Metodología de evaluación

Se analizaron los resultados del cálculo con PODESY activando HETERO y utilizando como entrada del programa los flujos interpolados en los detectores de escenarios de planta calculados con PUMA para los mismos casos de gestión de combustible utilizados para la evaluación de FLUX pero recalculados con posición de barras nominal para independizar el cálculo de los efectos de las barras. Es importante aclarar que dentro de la primera etapa del periodo considerado se ha seguido un programa de gestión de combustible distinto al considerado en la determinación de la distribución de quemado promediada en el tiempo con la que fueron calculadas las autofunciones.

Se analizaron las mejoras en los errores cuadráticos medios del mapeo en los detectores y en los flujos en canales y trozos. Además se analizaron los errores en el cálculo de la potencia por canal, uno de los parámetros operativos más importantes y de mayor interés para el monitoreo del funcionamiento del reactor entregado por PODESY.

3.4.2. Resultados y discusiones

En las Figuras 3.17 y 3.18 se muestran los errores en los detectores y de la comparación en canales y trozos con los cálculos con PUMA con y sin la corrección con HETERO.

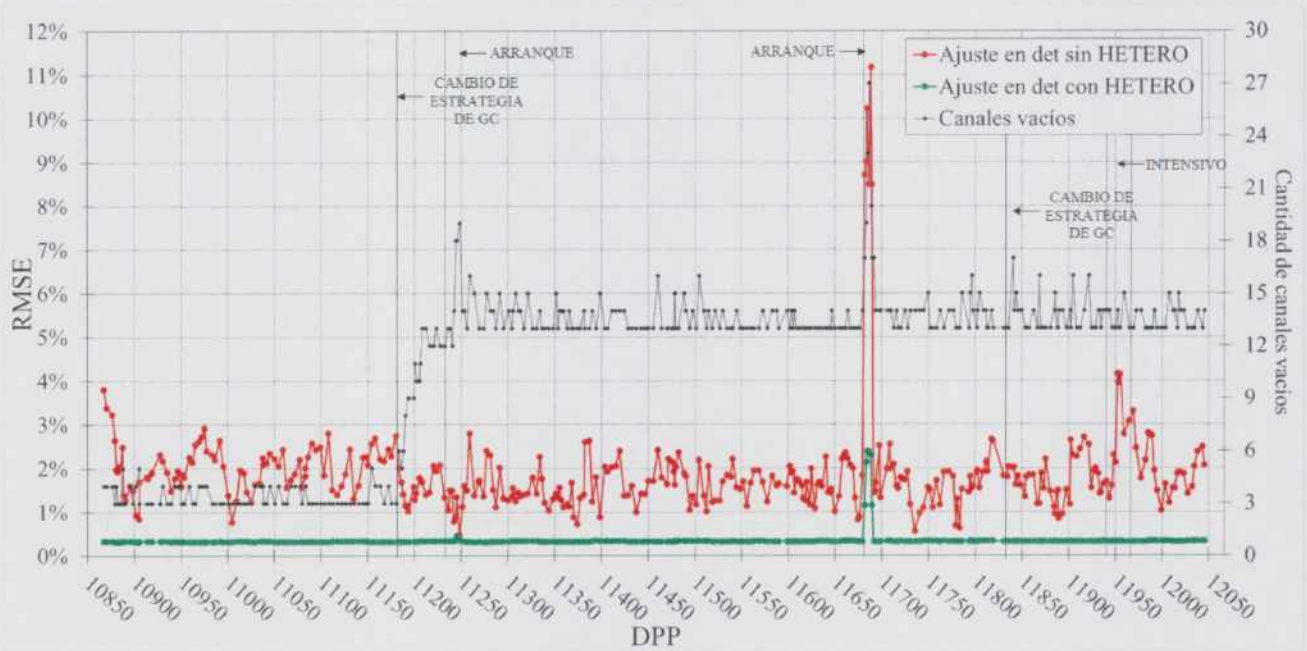


Figura 3.17: Errores cuadráticos medios del mapeo en detectores con y sin la corrección por quemado.

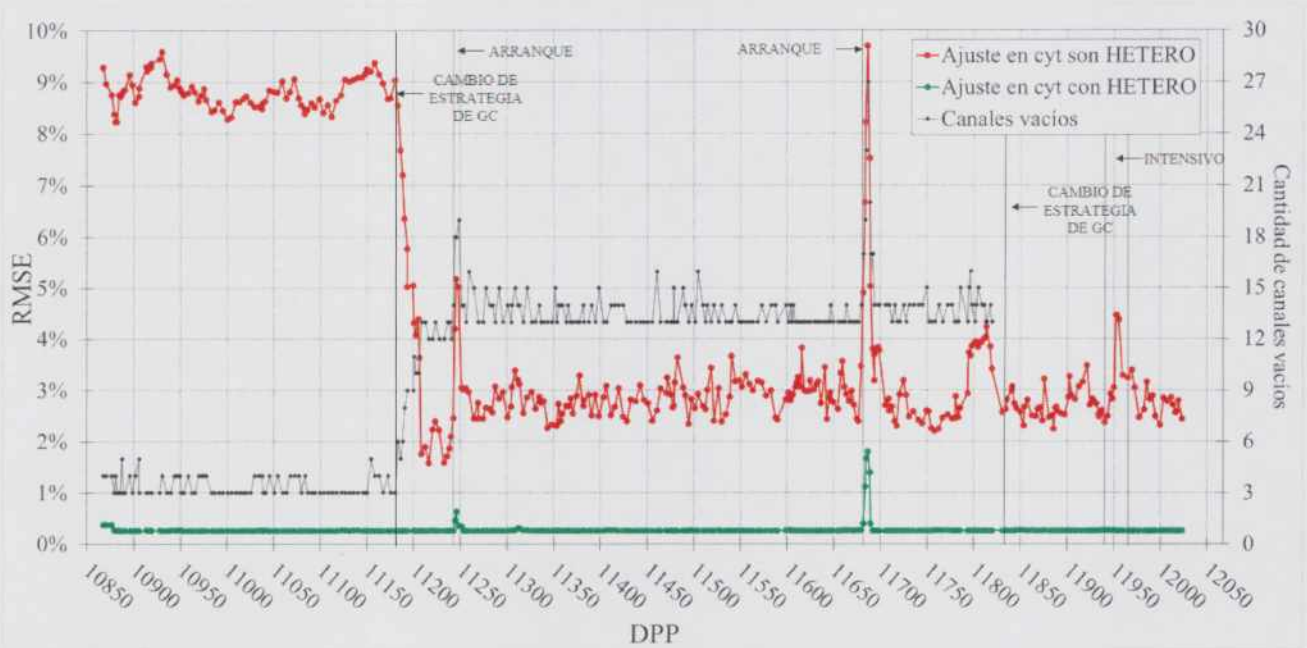


Figura 3.18: Errores cuadráticos medios de la comparación con flujos teóricos en canales y trozos con y sin la corrección por quemado.

Se evidencia una mejora general notable en el ajuste en los detectores y en la comparación con PUMA en canales y trozos. Se mantiene el incremento en el error para los casos de arranque

debido a tratarse de un estado de planta muy alejado del promedio y por la imprecisión de la corrección heredada del cálculo con FLUX.

En la Figura 3.19 se muestra el error cuadrático medio, el error máximo y el error mínimo en la comparación de potencia por canal con PUMA con y sin la corrección con HETERO.

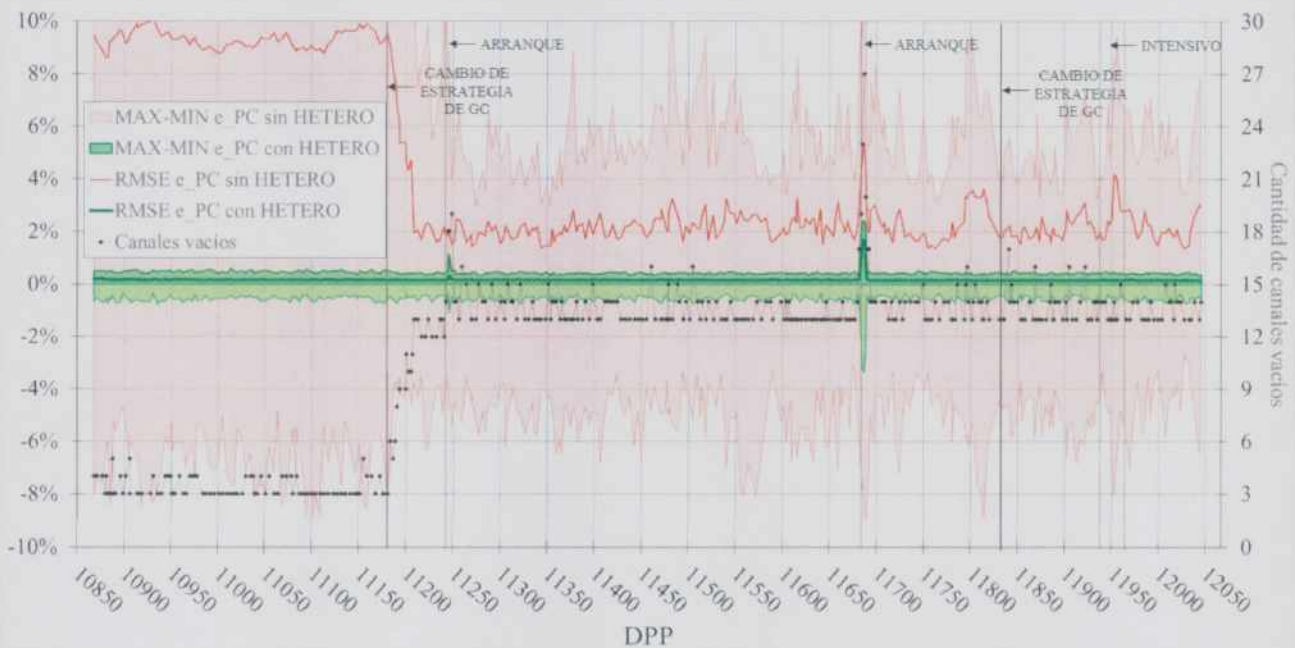


Figura 3.19: Errores cuadráticos medios, máximos y mínimos en el cálculo de potencia por canal con y sin la corrección por quemado.

Los errores mínimos y máximos en la potencia por canal se mantienen acotados en un rango muy pequeño en diversos estados de núcleo, salvo en los casos de arranque del reactor.

La mejora en el cálculo introducida por la corrección por quemado instantáneo resulta eficiente. Se evidencia una disminución en la precisión del mapeo en casos de arranque que, en realidad, se vería potenciado por el efecto adverso del alto grado de inserción sobre el método de corrección por barras debido al incremento del fenómeno de apantallamiento.

3.5. Evaluación integral del programa PODESY

3.5.1. Metodología de evaluación

La evaluación del programa íntegro constó de dos instancias de comparación entre las potencias por canal calculadas con PODESY y PUMA para distintos estados de planta, para luego evaluar la precisión en el cálculo de parámetros derivados de la distribución de potencia obtenida en cada caso. Las evaluaciones se pueden agrupar en:

- *Operación normal con arranques y distintos programas de gestión de combustible:* se evaluó el rendimiento del programa a lo largo de 950 días de plena potencia con distintos escenarios de planta.
- *Operación normal con cambio de banco negro y recambio intensivo:* el sistema de control incluye un programa de intercambio del banco negro insertado con una frecuencia aproximada de 5 años de plena potencia. Este cambio es una fuente de error crítica y la evaluación del error introducido es una medida importante de la robustez y de las limitaciones de la metodología de

cálculo. Se evaluó la precisión en el mapeo por un periodo reciente de 220 días de plena potencia incluyendo un cambio de banco negro insertado y una etapa de régimen intensivo de recambio en esas condiciones. La estrategia de gestión de combustible se condice con la utilizada en la determinación de la distribución promedio de quemado para el cálculo de las autofunciones.

- *Cálculo de potencia lineal máxima:* para los casos considerados anteriormente, se comparan los valores de potencia lineal máxima calculados por PODESY y PUMA.
- *Cálculo de margen de potencia de canal por zona hidráulica:* para los casos considerados anteriormente, se comparan los márgenes de potencia de canal por zona hidráulica calculados por PODESY y PUMA.

3.5.2. Resultados y discusiones

Operación normal con arranque y recambio intensivo

En la Figura 3.20 se muestran los resultados de error cuadrático medio, error máximo y mínimo de potencia por canal del mapeo con los cálculos de PUMA para los 291 casos utilizando 6 armónicos para la expansión.

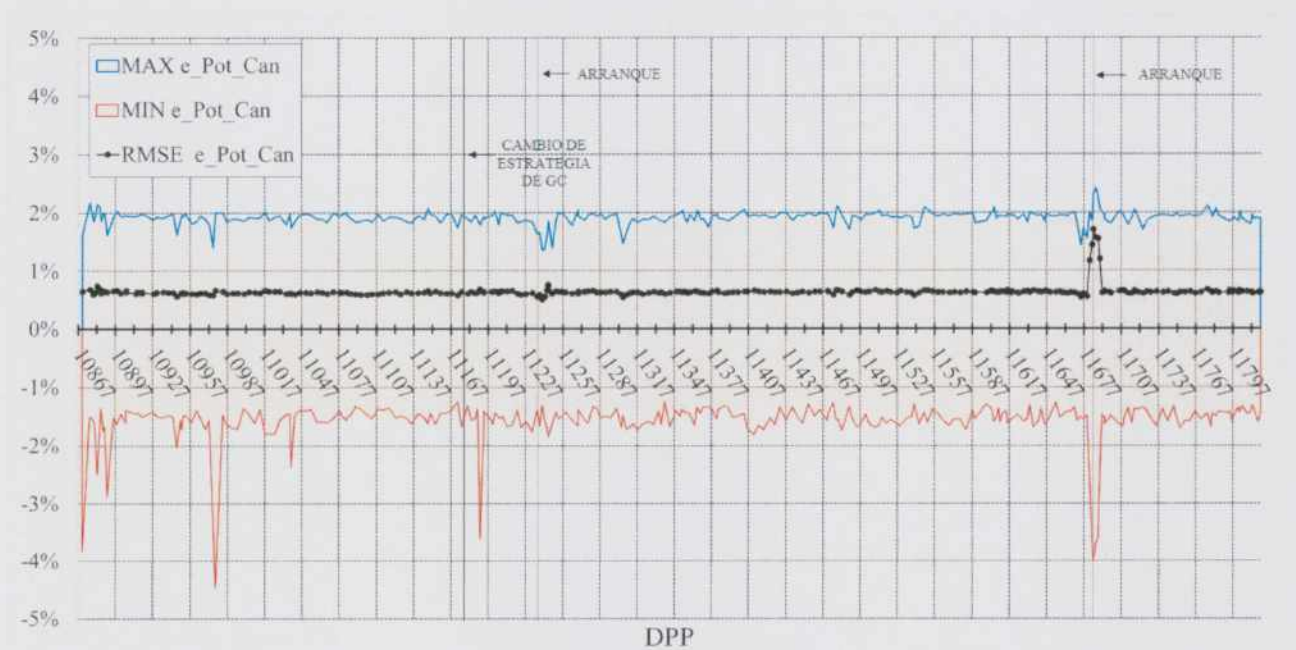


Figura 3.20: Errores cuadráticos medios de las potencias por canal obtenidas con respecto a PUMA en operación normal.

Se puede observar que el error cuadrático medio es bajo incluso en el estado de arranque donde se observa un pico producto al alto grado de apantallamiento entre las barras en estados de alta inserción.

Operación normal con cambio de banco negro y recambio intensivo

En la Figura 3.21 se muestran los resultados de error cuadrático medio, error máximo y mínimo de potencia por canal del mapeo con los cálculos de PUMA para los 75 casos utilizando 6 armónicos para la expansión.

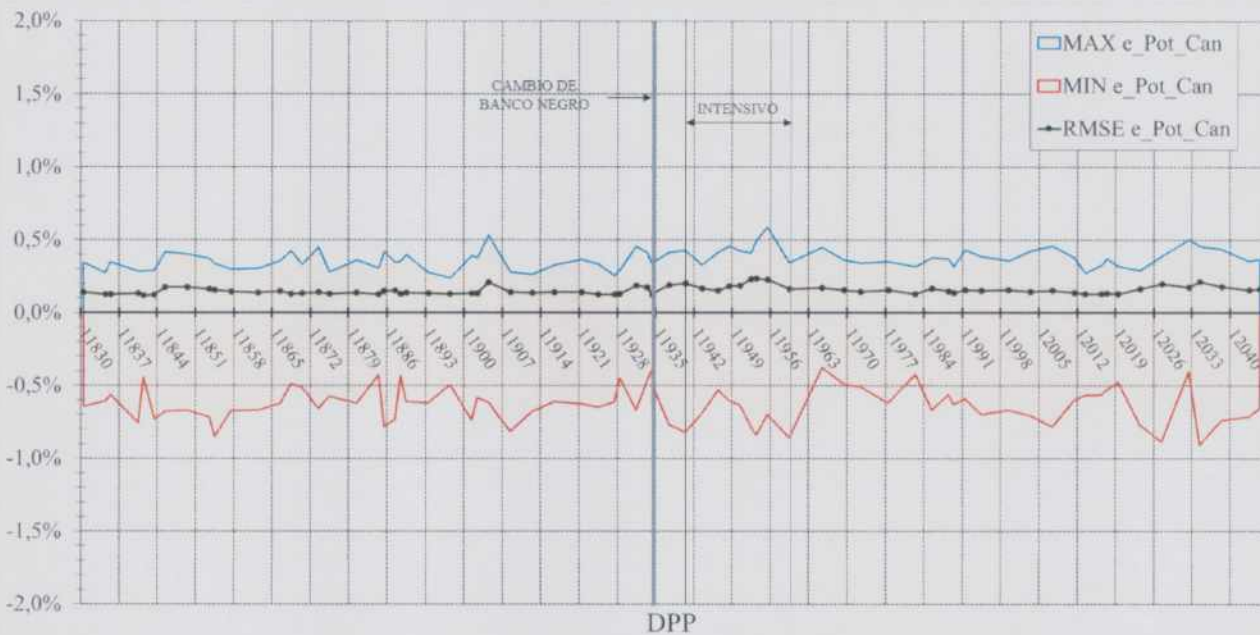


Figura 3.21: Errores cuadráticos medios de las potencias por canal obtenidas con respecto a PUMA en operación normal con cambio de banco negro.

Los resultados son contundentes. Los errores se mantienen acotados a un intervalo muy reducido, revelando una capacidad alta del programa para operar en uno de los escenarios de planta más exigentes para el método. Incluso se aprecia una mejora general en el acuerdo debido a que el programa de gestión de combustible implementado concuerda con el considerado en el cálculo de las autofunciones.

Cálculo de potencia lineal máxima

La potencia lineal máxima es el parámetro primordial a controlar para evitar daño por exceso de temperatura en los elementos combustibles. El límite considerado actualmente en la planta es de 485 W/cm. En las Figuras 3.22 y 3.23 se muestran las comparaciones en los cálculos entre PODESY y PUMA en los 366 casos de planta considerados. Cabe aclarar que los casos de PUMA, y por ende los de PODESY, han sido calculados con potencia nominal. Por lo tanto se espera que en los casos de arranque calculados sean sobrepasados, a pesar de que la potencia en dichos estados se mantiene acotada muy por debajo de la potencia desarrollada en régimen.

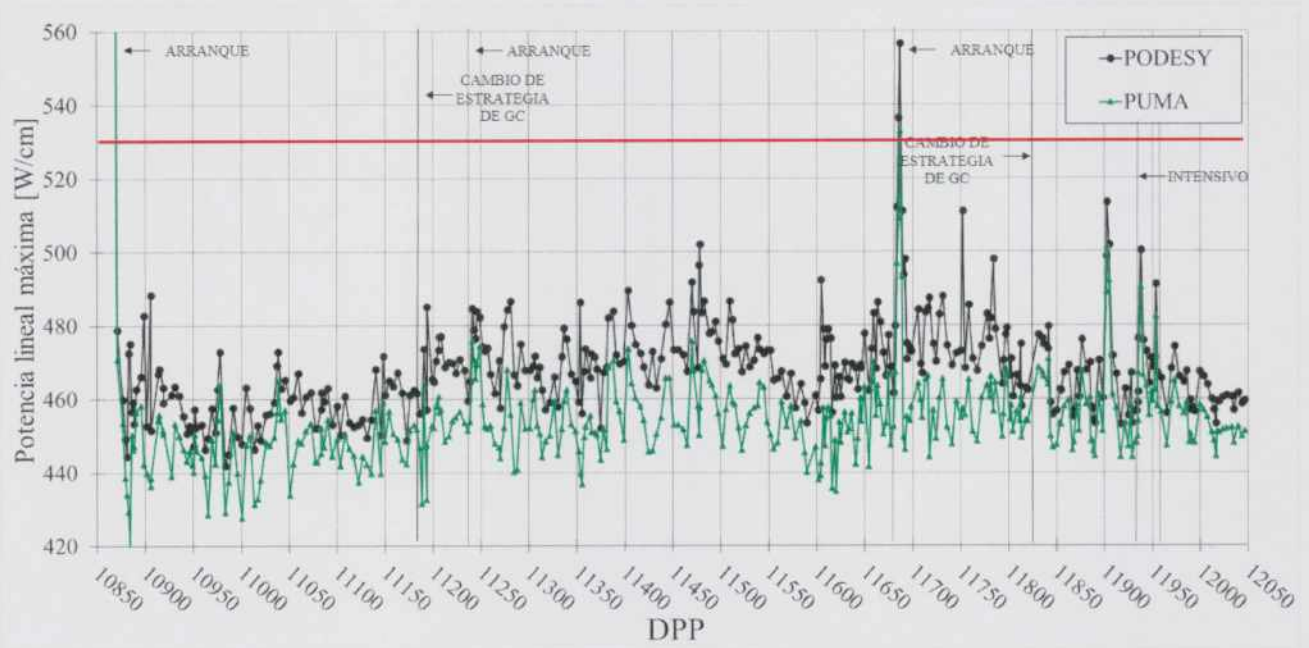


Figura 3.22: Potencias lineales máximas calculadas por PODESY y PUMA.

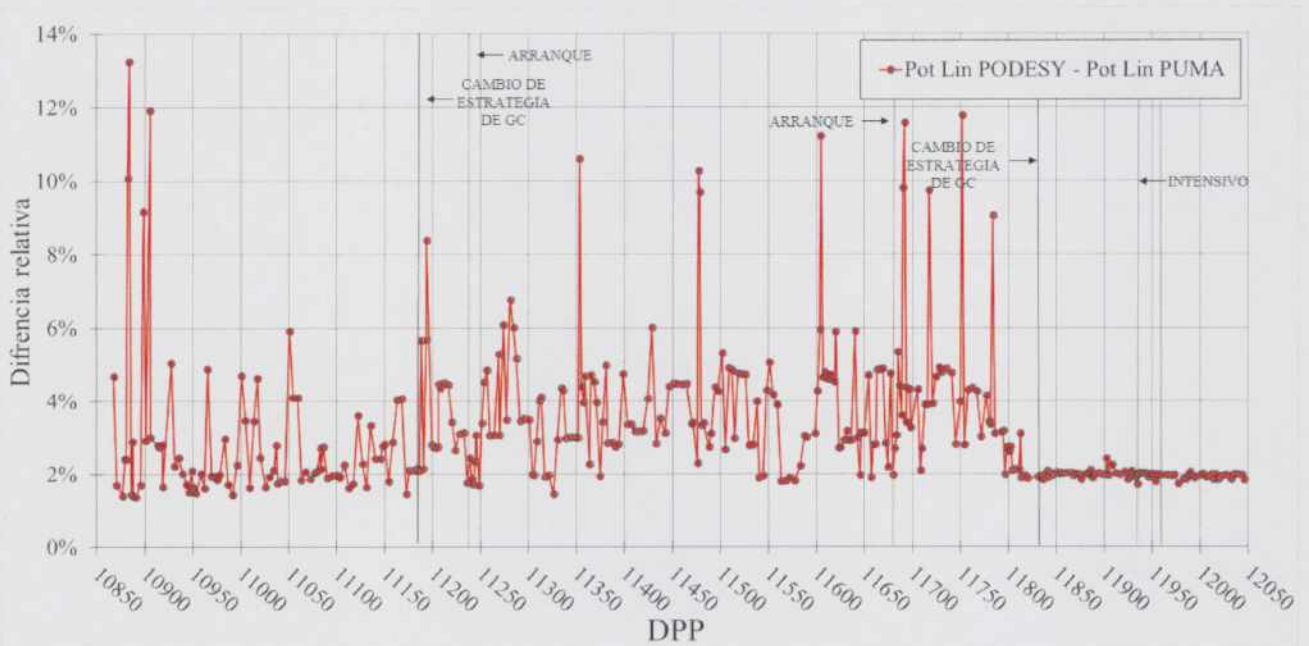


Figura 3.23: Error relativo en el cálculo de potencia lineal con PODESY y PUMA.

Se observa una sobrestimación de la potencia lineal máxima de PODESY con respecto a PUMA en todos los casos. Se evidencia una mejora notable en la precisión del cálculo en los casos de planta incluidos dentro de la estrategia de gestión de combustible con la que fueron calculadas las autofunciones.

Cálculo de potencia máxima de canal por zona hidráulica

La potencia máxima de canal por zona hidráulica es otro de los parámetros que se deben controlar para garantizar que la seguridad de los elementos combustibles no se vea comprometida.

Los límites por zona hidráulica se definen en el módulo INTER y son determinados bajo el escenario de salida de servicio de las bombas del sistema primario sin daño considerable a los combustibles.

Desde la Figura 3.24 a la 3.31 se muestran las comparaciones en los cálculos de los márgenes entre PODESY y PUMA en los 366 casos de planta considerados. Las diferencias de margen mostradas corresponde a la resta entre el calculado por PUMA y el calculado por PODESY, de manera que si la diferencia es positiva significa que la potencia de canal máxima en la zona hidráulica en cuestión es sobrestimado y el margen es más conservativo.

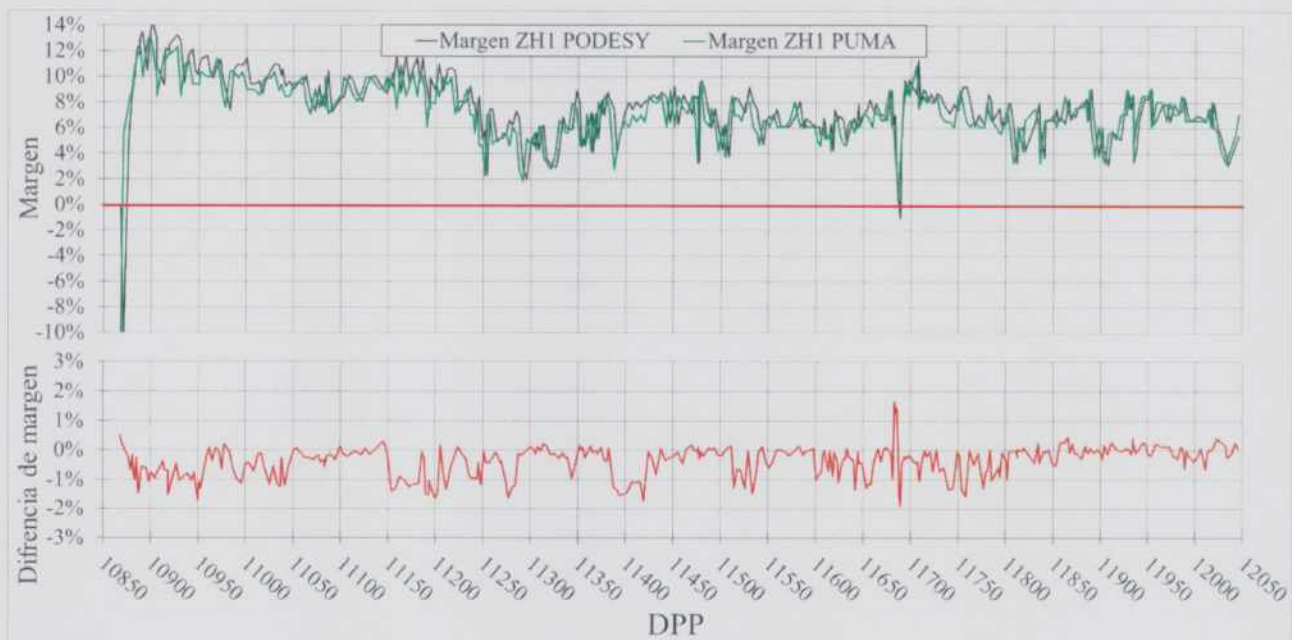


Figura 3.24: Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 1 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)

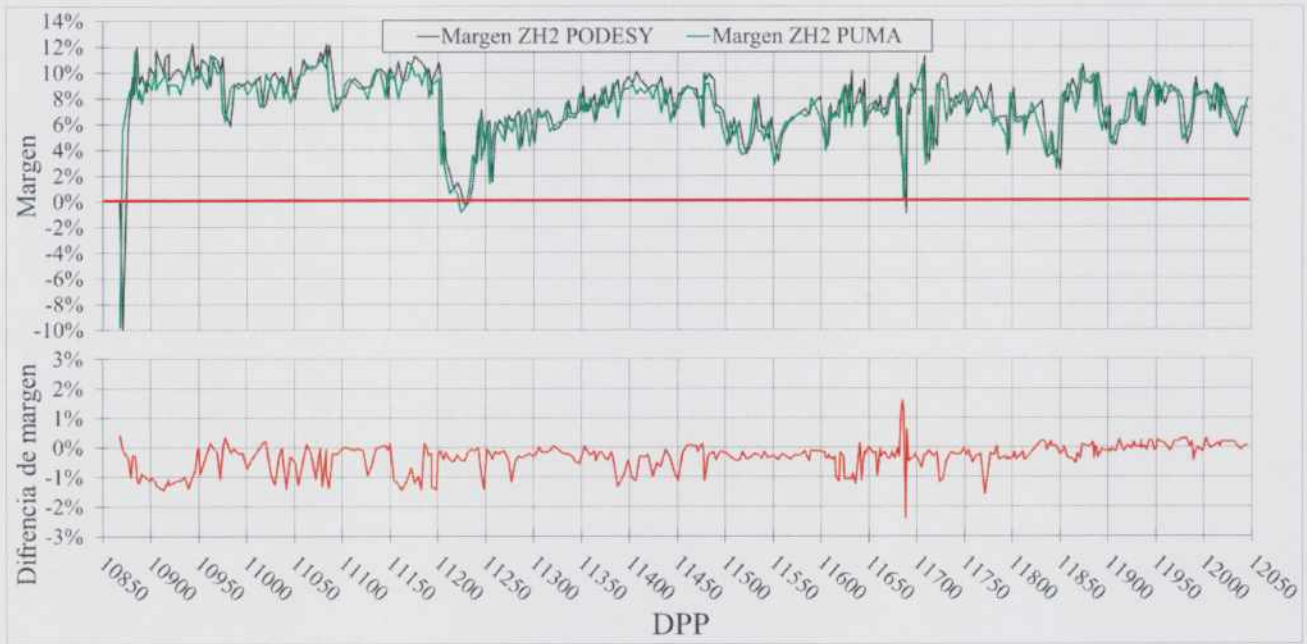


Figura 3.25: Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 2 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)

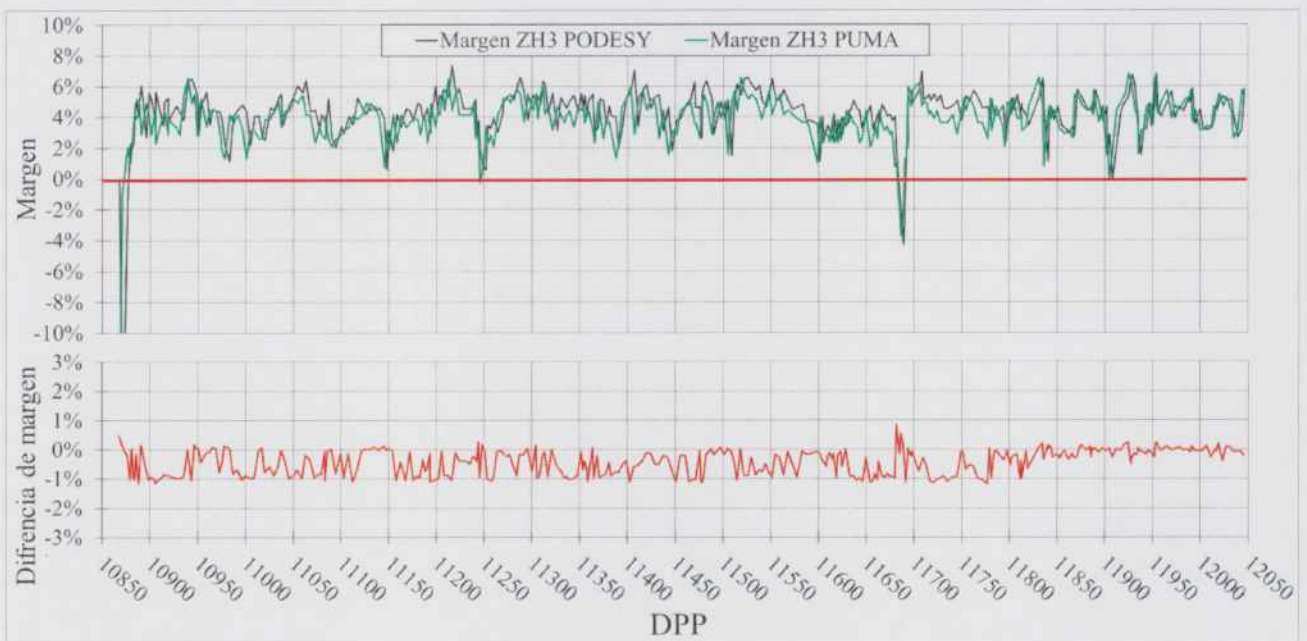


Figura 3.26: Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 3 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)

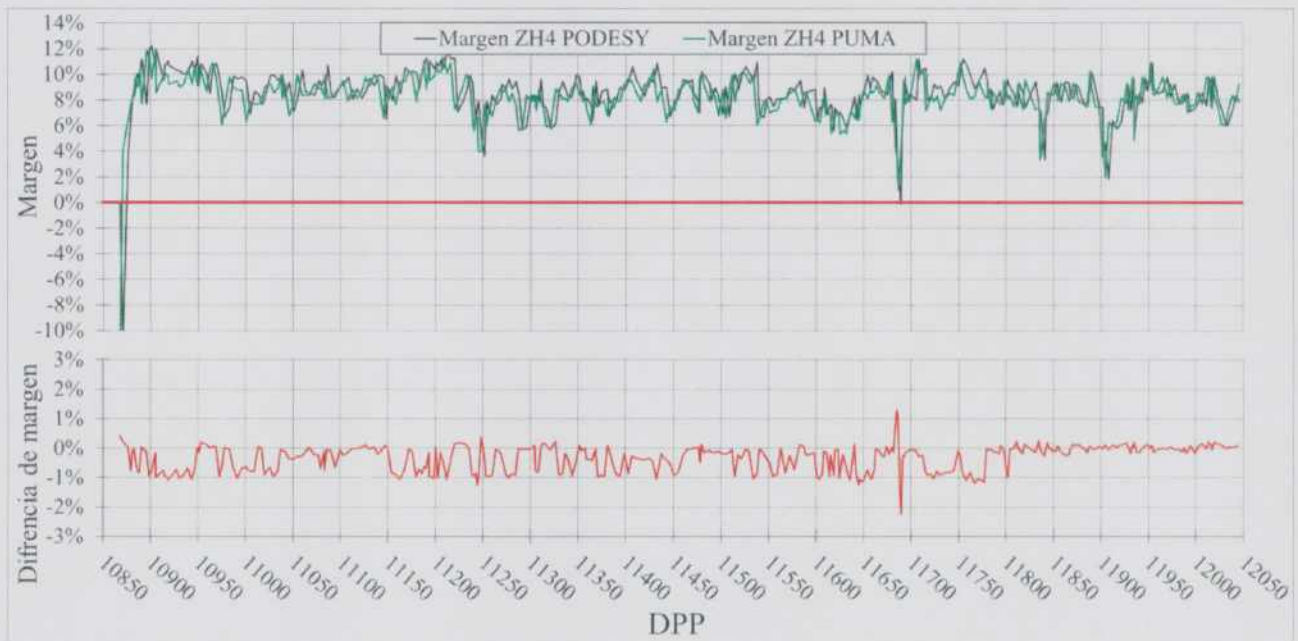


Figura 3.27: Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 4 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)

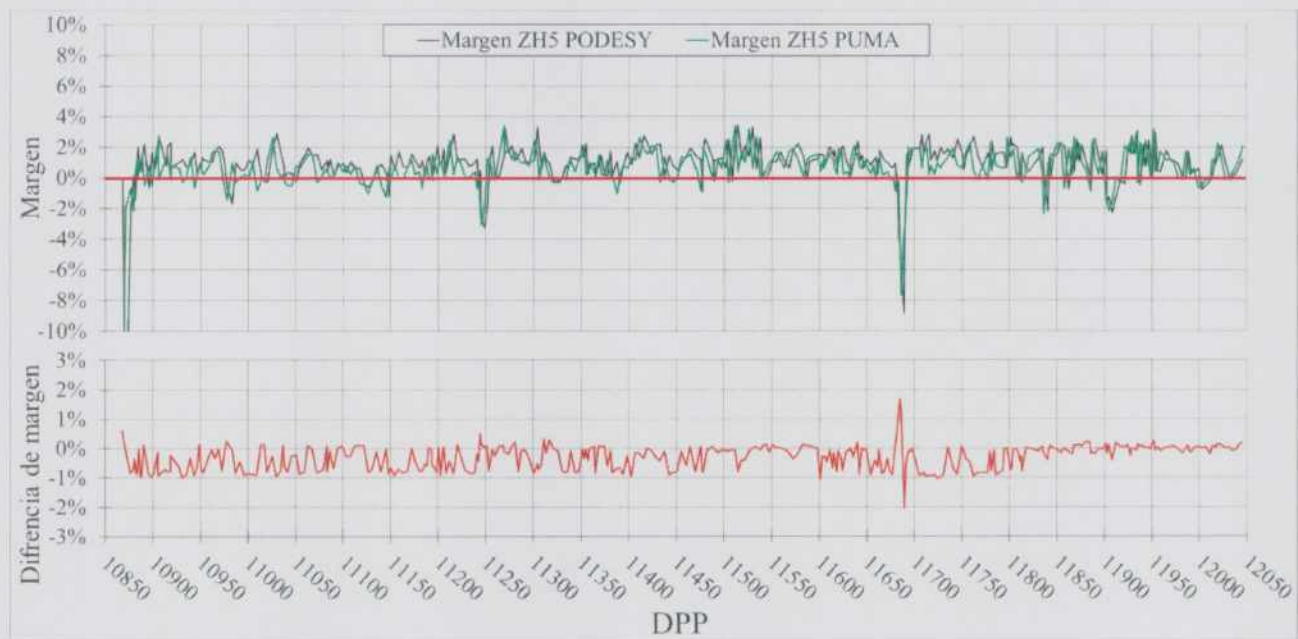


Figura 3.28: Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 5 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)

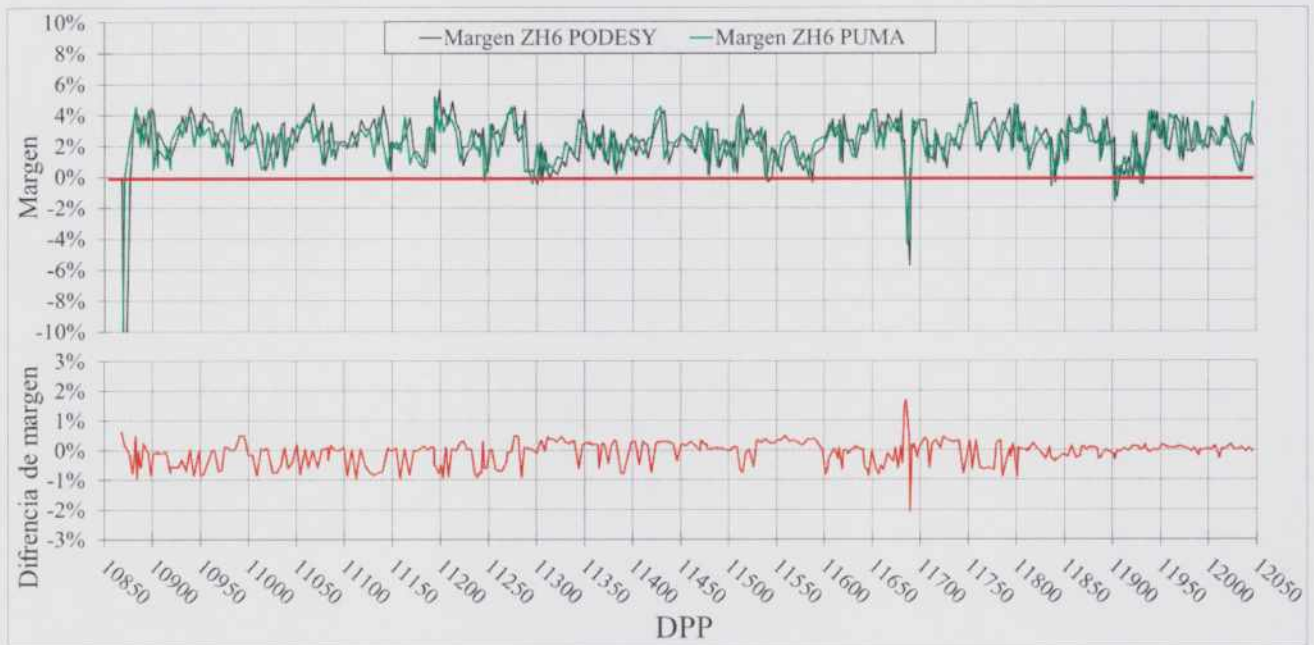


Figura 3.29: Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 6 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)

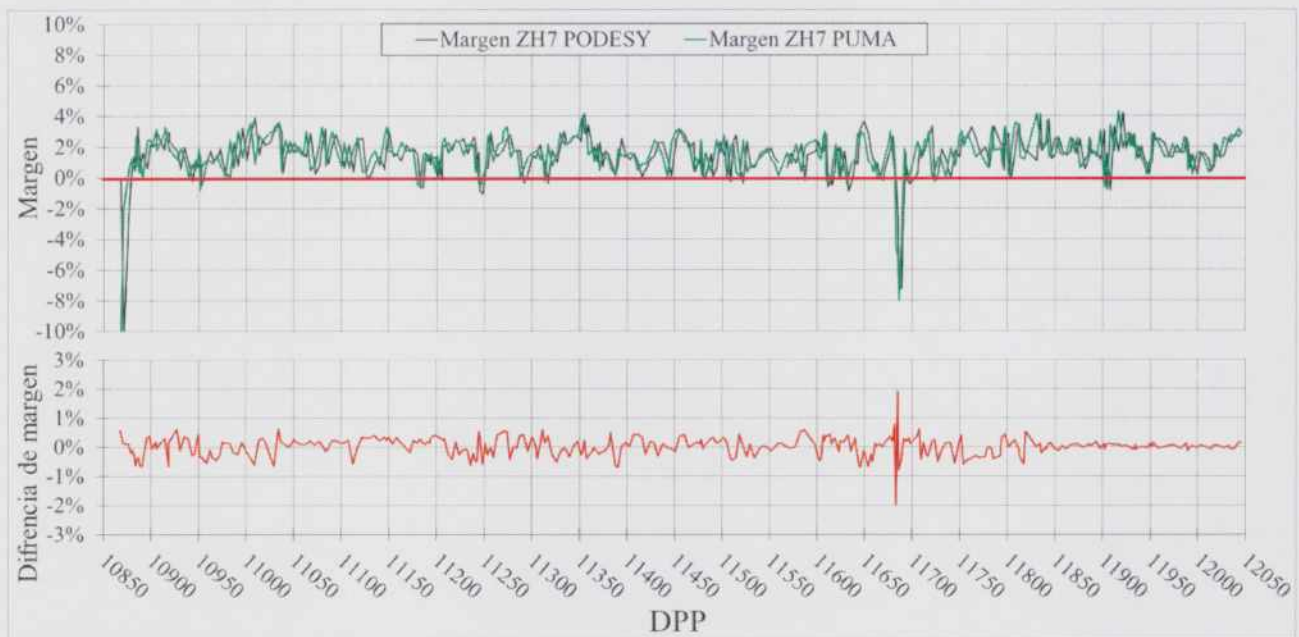


Figura 3.30: Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 7 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)

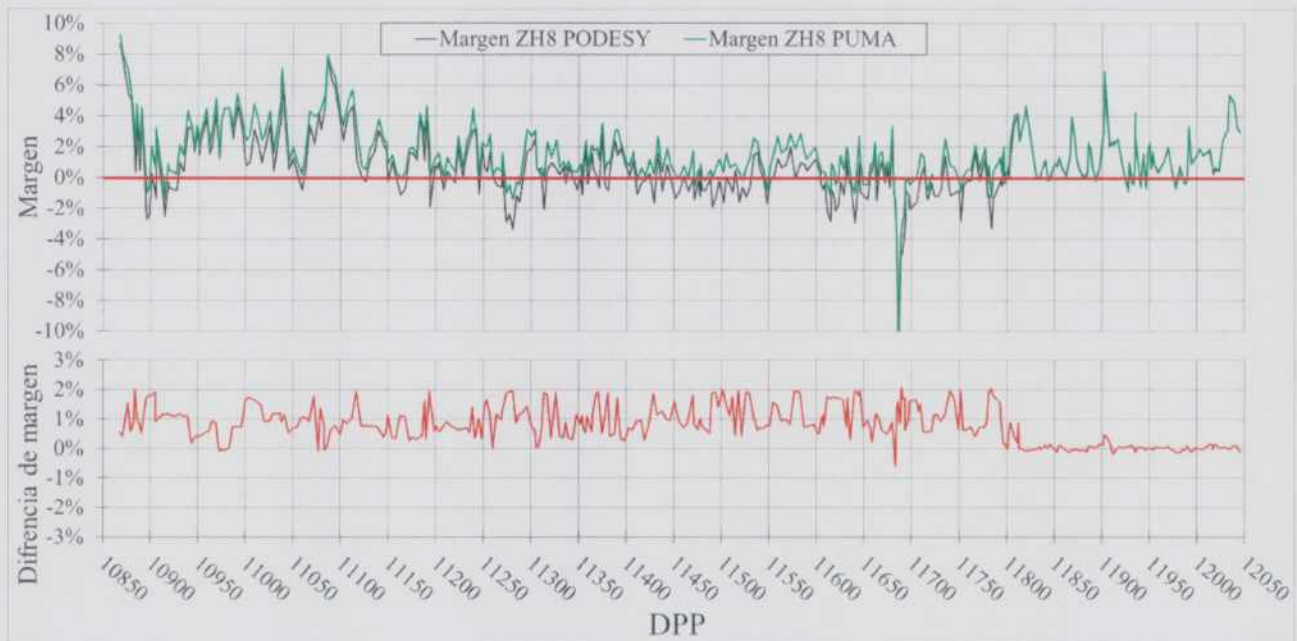


Figura 3.31: Márgenes de potencia de canal máxima en la zona hidráulica 8 calculados con PODESY y PUMA (arriba) y su diferencia (abajo)

Se observa que la diferencia entre los márgenes se mantiene acotada en todos los casos considerados. Nuevamente se observa que la diferencia se achica notablemente en los casos de planta incluidos dentro de la estrategia de gestión de combustible con la que fueron calculadas las auto-funciones.

Capítulo 4

Pruebas con señales de planta

Una vez concluida la etapa de pruebas de escritorio de forma exitosa, se deben iniciar las pruebas con señales reales de planta. Las señales instantáneas requeridas por el programa son:

- Lecturas de los detectores
- Posición de barras
- Potencia térmica
- Días de plena potencia
- Operaciones de la máquina de carga

Se gestionó la adquisición de los datos de planta con una frecuencia de 2 minutos y se acondicionó la lectura del archivo confeccionado en el módulo **MODPODESY**.

4.1. Evaluación y análisis del comportamiento de PODESY

Se analizó la conducta del programa frente a distintos escenarios de planta a lo largo de 240 horas de operación normal a plena potencia. Es importante aclarar que durante el periodo considerado el sistema de control de reactividad por barras empleó el banco R1 y que la estrategia de gestión de combustible es consistente con la cual fueron calculadas y evaluadas las autofunciones de la expansión.

Los aspectos principales a evaluar fueron:

- Magnitud del error cuadrático medio del ajuste en los detectores.
- Capacidad de seguimiento de las oscilaciones axiales de xenón.
- Determinación de parámetros operativos.
- Respuesta ante recambios de combustible en distintas posiciones.
- Funcionamiento en estado de arranque

4.1.1. Error cuadrático medio

En la Figura 4.1 se muestra el error cuadrático medio de mapeo en los detectores y el seguimiento de la inserción promedio del banco R1.

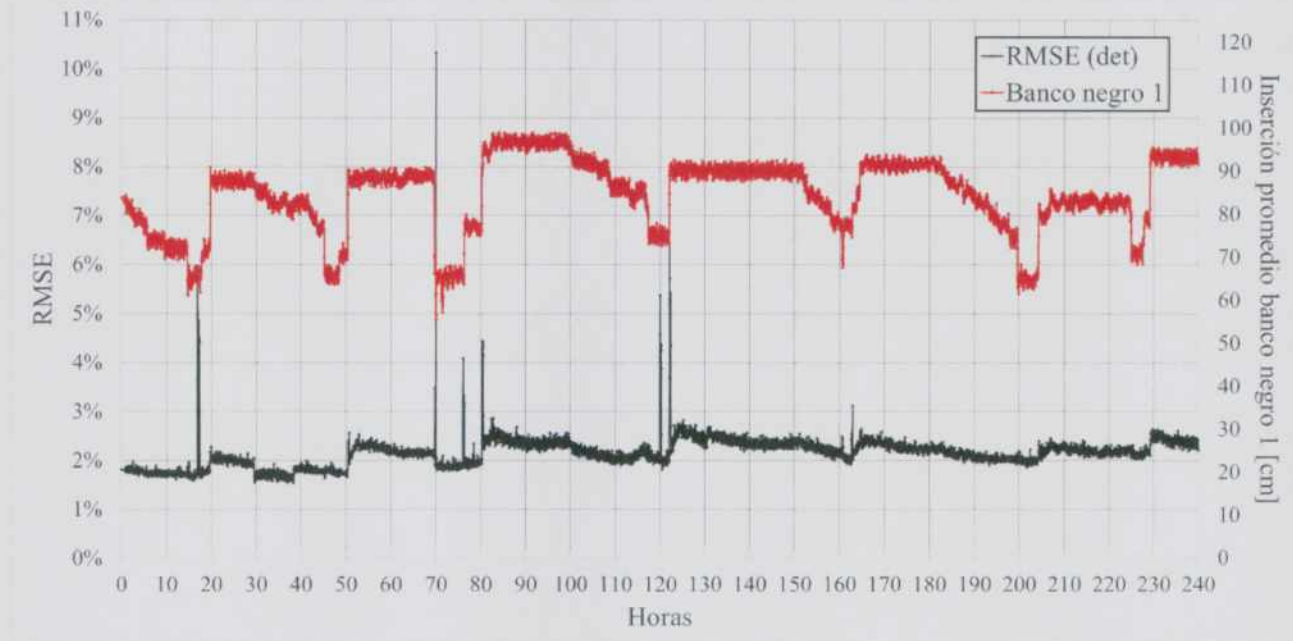


Figura 4.1: Errores cuadráticos medios del ajuste y seguimiento del banco R1.

Como primer resultado importante se observa que entre recambios el error en los detectores se mantiene dentro de límites aceptables y son comparables a los que se obtienen en el probado y adoptado mapeo de CNA-UII [8].

El error se dispara al realizarse un recambio de combustible, especialmente si el recambio se realiza en un canal cercano a una de las lanzas de detectores debido a la fuerte perturbación del flujo local que se introduce durante la operación. Este efecto se puede remediar desvinculando del mapeo a la lanza vecina. Actualmente el sistema de señales de planta, particularmente de la máquina de recambio, no dispone de un sistema de registro instantáneo de información sobre el canal sobre el que se realiza la operación, aunque se espera implementarlo en un futuro cercano.

Finalizada la secuencia de recambio se observa que el error desciende suavemente en la medida en que la concentración de xenón evoluciona hacia el equilibrio, creciendo en el combustible fresco y disminuyendo en el combustible semiquemado que ha acumulado el absorbente durante su permanencia de aproximadamente 30 minutos en alguna de las posiciones de la máquina de recambio.

4.1.2. Oscilaciones de xenón

Se analiza la capacidad del programa para representar correctamente las oscilaciones axiales de xenón visualizando el seguimiento del estado de planta con el coeficiente del primer armónico axial y del factor axial total definido de la siguiente manera:

$$F_{AXT} = \frac{\sum_{n=5}^7 P_n - \sum_{n=1}^4 P_n}{\sum_{n=5}^7 P_n + \sum_{n=1}^4 P_n} \quad (4.1)$$

donde P_n es la potencia integrada calculada en el nivel de vigilancia n , con los niveles numerados desde abajo hacia arriba del núcleo. La inserción continua de barras y la diferencia en las

densidades del moderador entre ambas mitades debido al gradiente de temperatura establecen un signo naturalmente negativo para este variable.

En la Figura 4.2 se muestra el seguimiento de la planta por el factor axial total y del coeficiente de Fourier del primer axial.

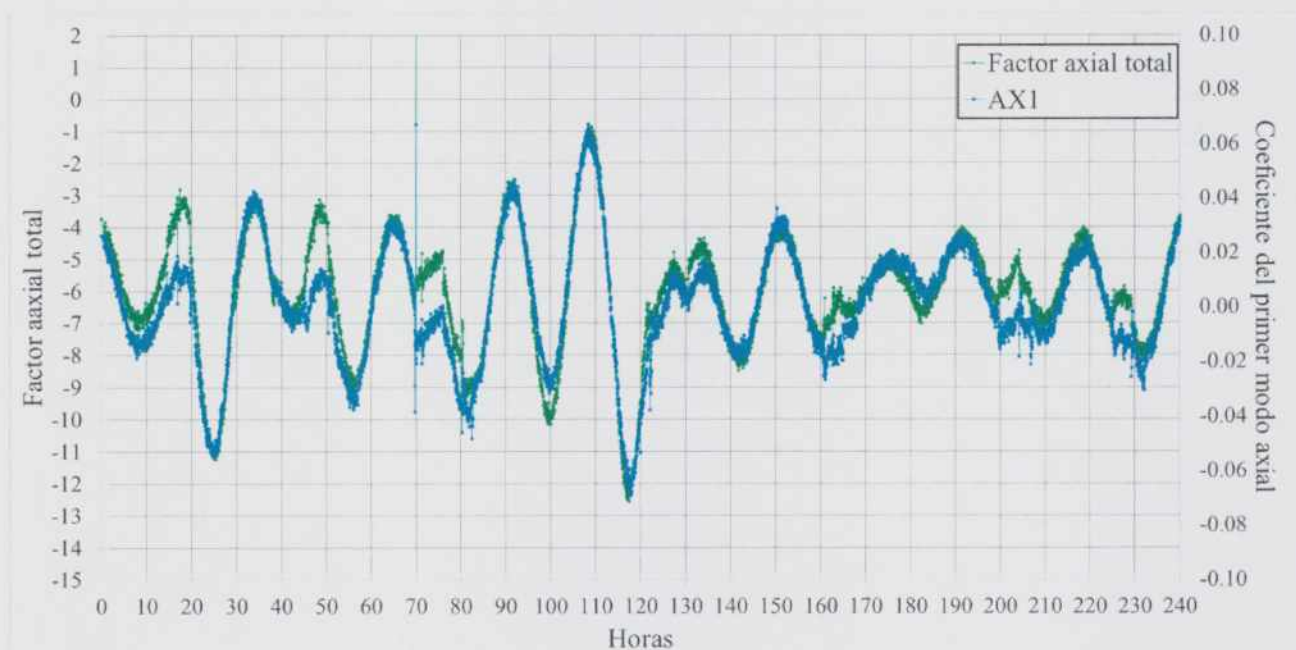


Figura 4.2: Seguimiento del factor axial total y el coeficiente del primer modo axial.

Se observa que ambos parámetros evolucionan con un grado alto de acuerdo y representan correctamente el fenómeno oscilatorio del xenón de periodo aproximado de 20 horas en las condiciones analizadas.

Adicionalmente se analiza la representación de la función de control de las oscilaciones de Xenón por parte de las barras parciales.

En la Figura 4.3 se muestra el efecto de la inserción de la barra parcial sobre el comportamiento oscilatorio de la población neutrónica debida a la oscilación axial de la concentración de xenón.

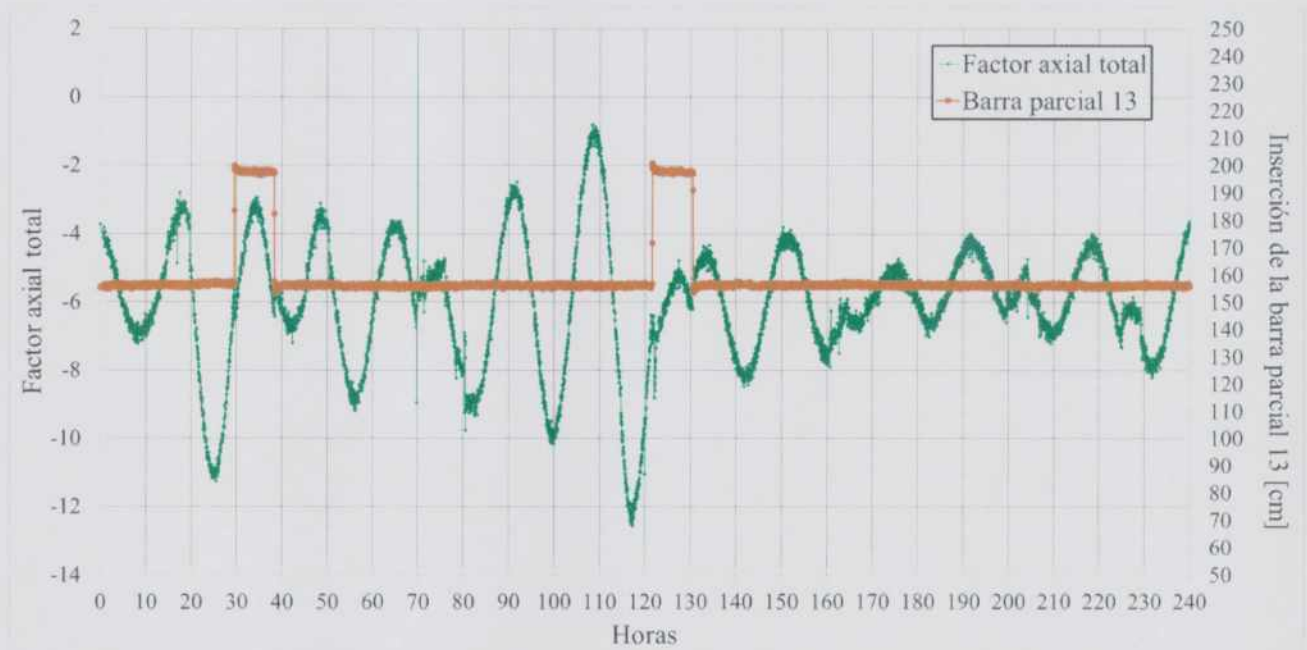


Figura 4.3: Seguimiento del factor axial total y la posición de la barra parcial 13.

La sensibilidad del programa para representar y evidenciar la acción de control de las barras parciales sobre las oscilaciones axiales por medio del factor axial total es alta.

4.1.3. Determinación de parámetros operativos

Uno de los parámetros de planta más relevantes desde el punto de vista de la seguridad que PODESY es capaz de proporcionar es el cálculo instantáneo del margen al límite de potencia de canal por zona hidráulica. Los valores límites se definen aplicando un margen determinado a la potencia que ocasionaría un daño al elemento combustible más comprometido de cada zona hidráulica en caso de parada de las bombas del circuito primario.

Desde la Figura 4.4 a la 4.11 se muestra la evolución del margen para cada zona hidráulica en el muestreo de 240 horas considerado.

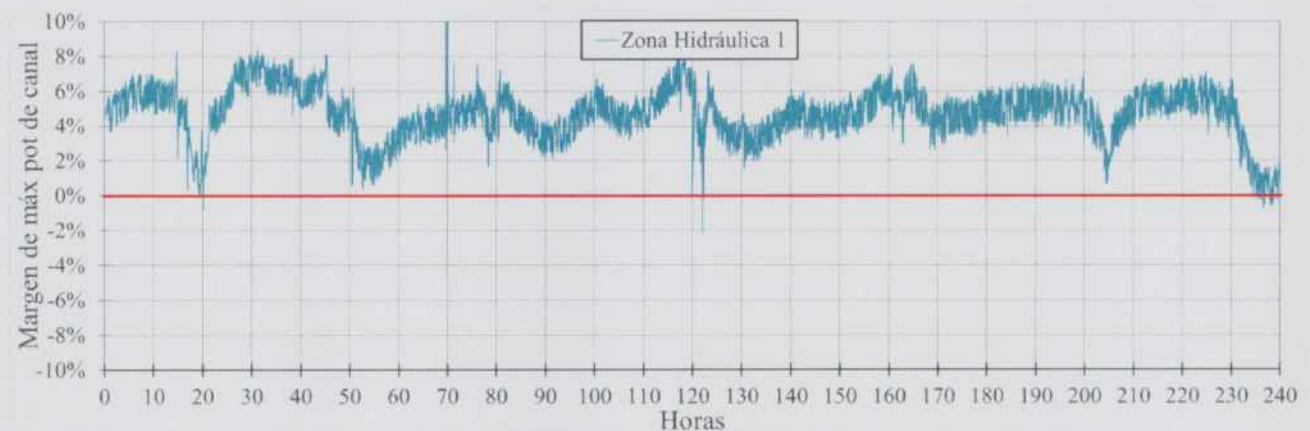


Figura 4.4: Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 1.

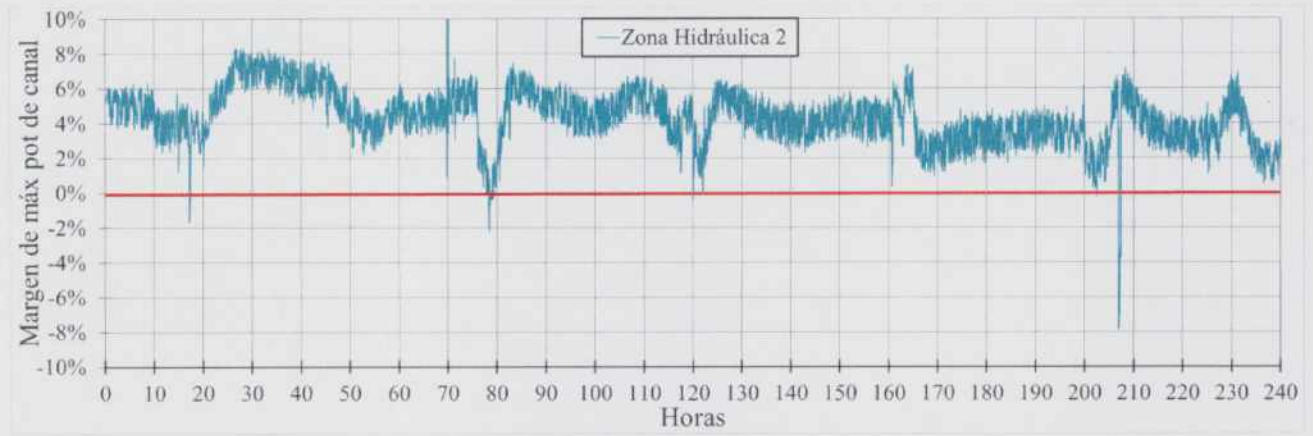


Figura 4.5: Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 2.

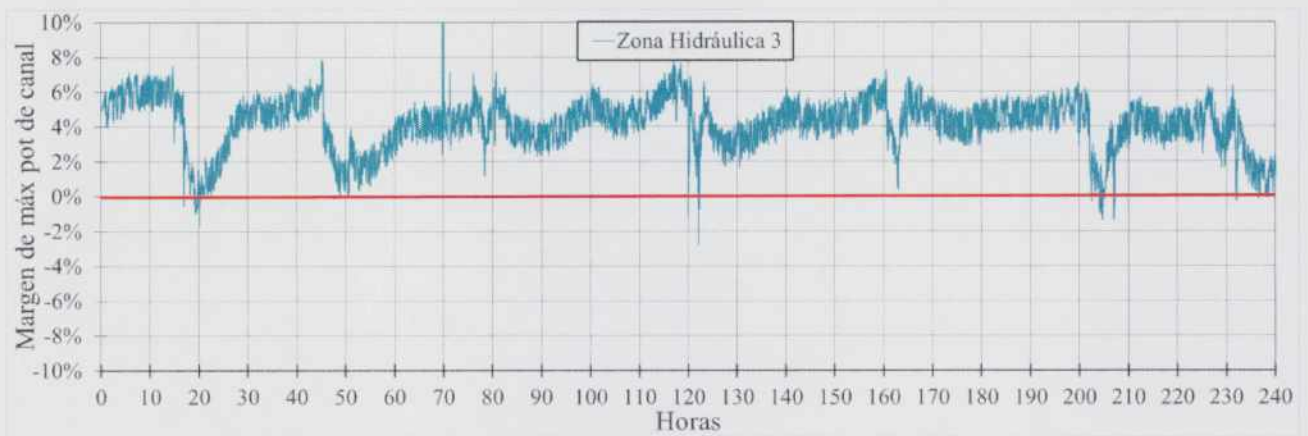


Figura 4.6: Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 3.

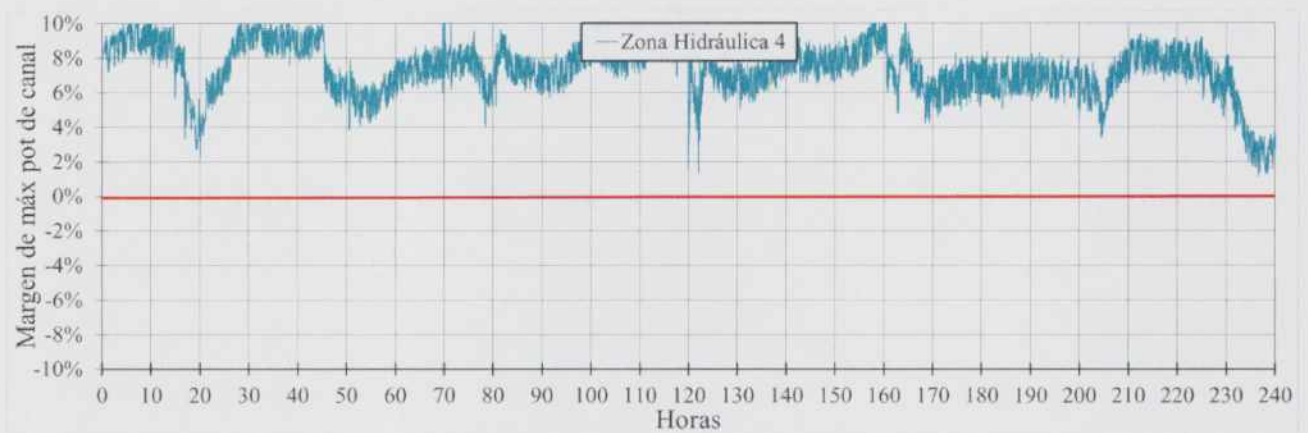


Figura 4.7: Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 4.

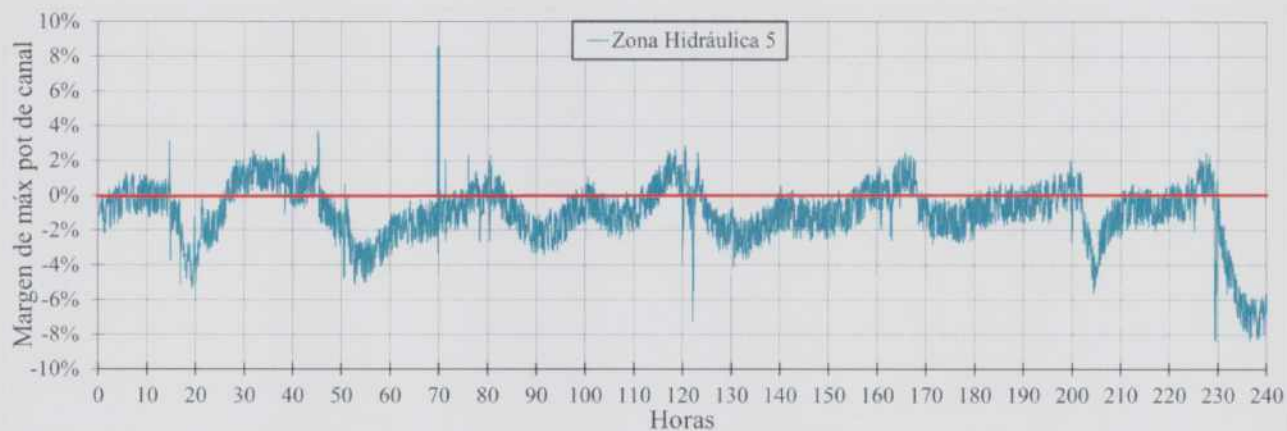


Figura 4.8: Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 5.

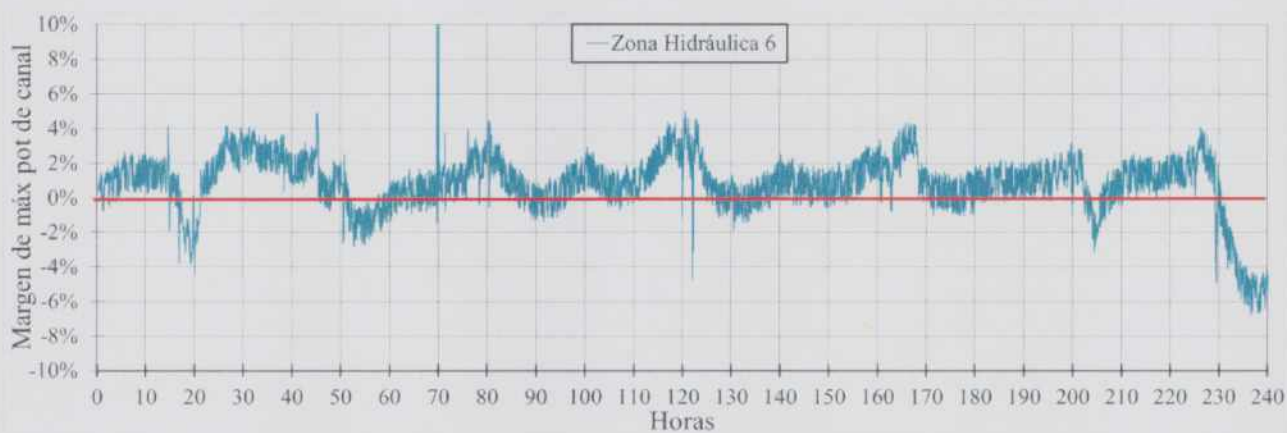


Figura 4.9: Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 6.

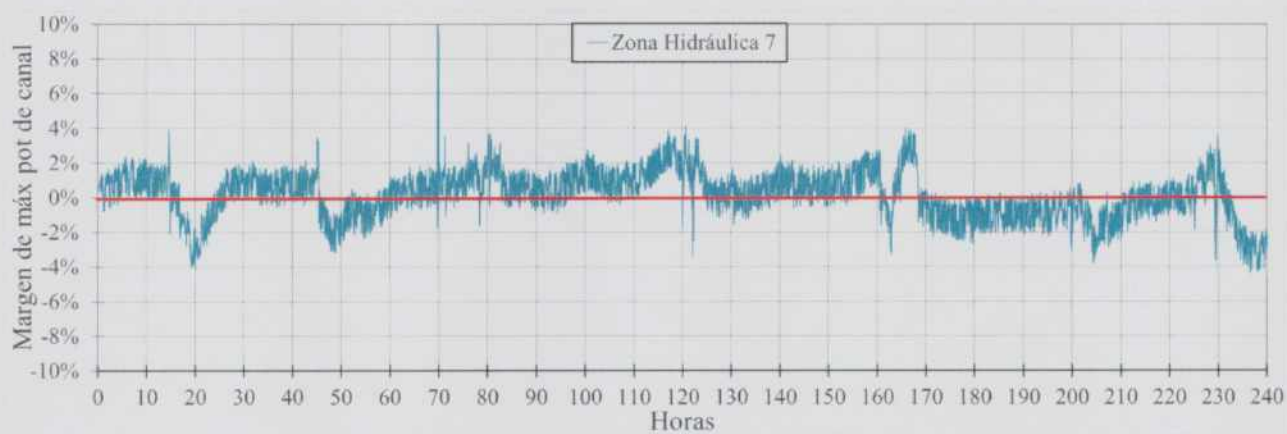


Figura 4.10: Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 7.

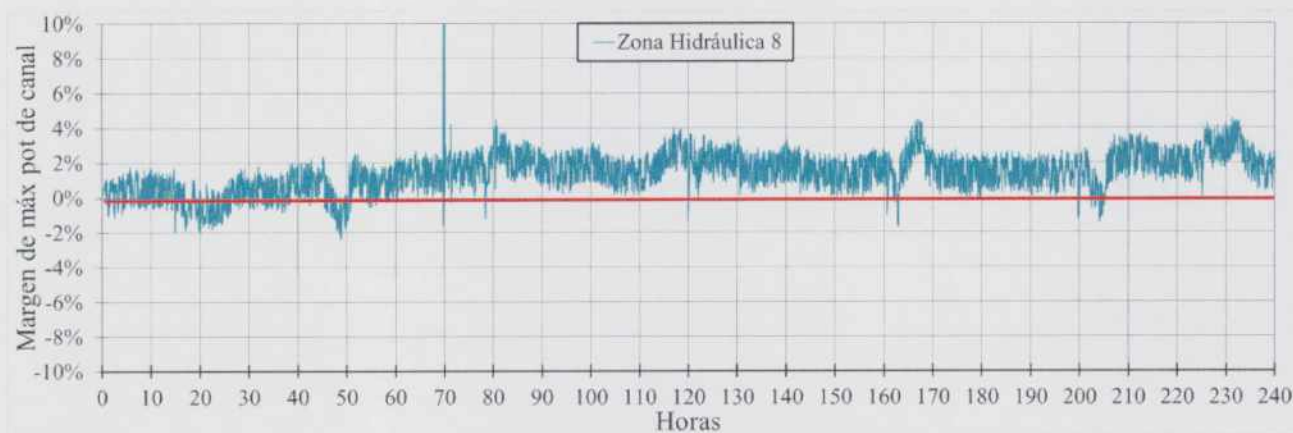


Figura 4.11: Margen de potencia máxima de canal en la zona hidráulica 8.

En las 8 zonas termohidráulicas se observa una disminución drástica del margen al realizar un recambio de combustible seguida de una recuperación que se prolonga hasta el siguiente recambio. La caída pronunciada del margen se debe a los fuertes transitorios provocados por los recambios de combustible. Estos transitorios no son considerados en la metodología de cálculo de la gestión de combustible, dentro de la cual el concepto de límite a la potencia por canal es utilizado como uno de los condicionantes, donde la condición sobre la potencia por canal es evaluada en el estado estacionario del núcleo luego de cada recambio.

De todas maneras es necesario aclarar que en la metodología involucrada en la determinación de los límites se aplican una serie de consideraciones conservativas de manera tal que la reducción en el margen provocada por los recambios es tolerable.

4.1.4. Recambios de combustible

La evaluación del mapeo durante operaciones de recambio persigue el objetivo de analizar e interpretar la evolución del error del ajuste en los detectores y estudiar el comportamiento de los coeficientes de los armónicos azimutales durante los procedimientos.

La magnitud del error en el ajuste durante los recambios depende en primer lugar de la posición relativa del canal sobre el que se opera con respecto a la lanza de detectores más cercana, y en segundo lugar depende de la dimensión de la perturbación en el flujo durante el procedimiento. Esta perturbación depende principalmente del quemado del combustible extraído, que determina la cantidad de núcleos físis de U^{235} , Pu^{239} y Pu^{241} y demás productos de fisión, y también depende de la importancia neutrónica, relativa a la proximidad del canal al centro geométrico del núcleo.

Se seleccionaron 3 casos de prueba representativos, correspondientes a una secuencia de operaciones dentro del periodo evaluado.

A continuación se evalúa y analiza la evolución del mapeo para cada recambio por separado.

Recambio 1

En la Tabla 4.1 se presentan las características de las dos operaciones del recambio 1.

Operación	Canal	Quemado medio [$\frac{MWd}{TnU}$]	Lanza próxima	Proximidad
Reactor → Máquina de carga	142	1999.028	6	media
Máquina de carga → Reactor	142	0	6	media

Tabla 4.1: Características de las operaciones del recambio 1.

En la Figura 4.12 se muestra la evolución del error cuadrático medio en los detectores y de la inserción del banco negro durante el primer recambio de combustible de la secuencia.

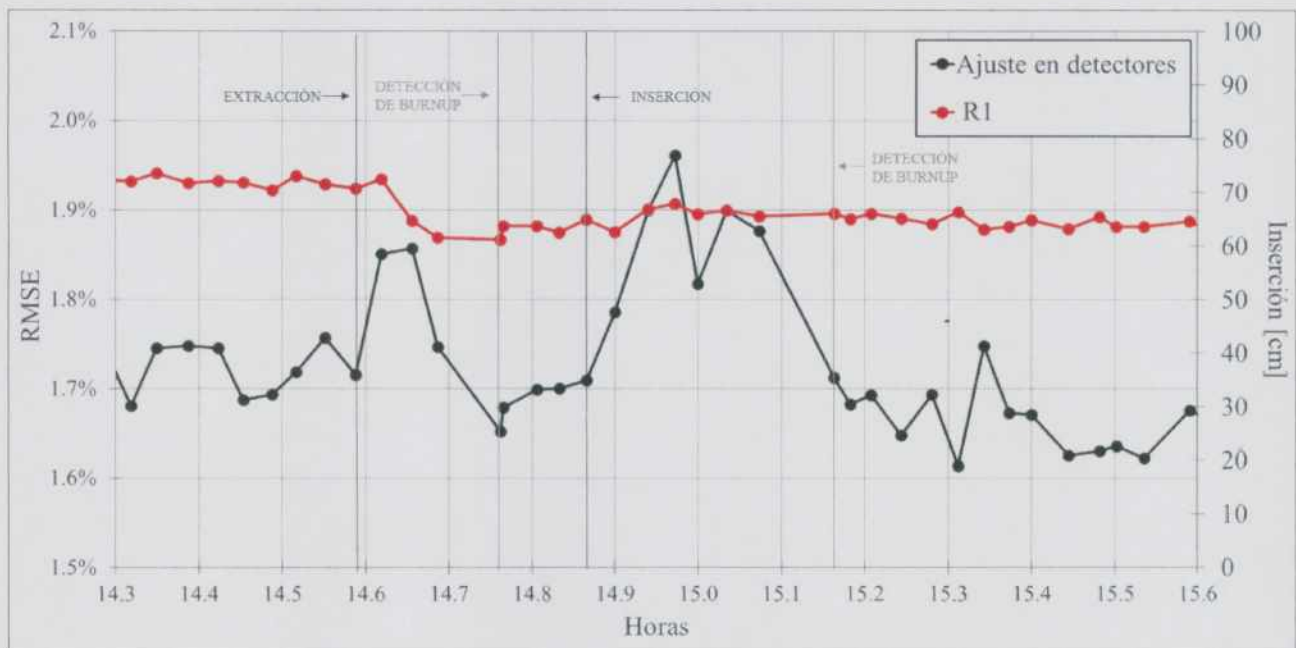


Figura 4.12: Evolución del error cuadrático medio del ajuste en detectores durante el recambio 1.

El aumento en el error del ajuste se ve incrementado al recambiar el combustible semiquemado del canal 142 por uno fresco, sin embargo la magnitud del cambio es pequeña debido a que la lanza 6 no está expuesta directamente al canal recambiado y que la diferencia entre el quemado del combustible extraído y el insertado es chica.

Para explicar la evolución de los armónicos azimutales hay que analizar, por un lado, el impacto del recambio sobre la distribución de flujo en las cercanías y por el otro, los movimientos de los bancos de barras de control. En el recambio 1 la extracción de barra negra y gris es significativa y su accionamiento se debe a la disminución en la reactividad asociada a la extracción de un combustible con quemado medio bajo (teniendo en cuenta que el quemado medio del núcleo en operación normal es mayor a $5000[\frac{MWd}{T_{nU}}]$) y cercano al nivel de quemado correspondiente al máximo de concentración de Pu^{239} y Pu^{241} en la pastilla combustible.

El comportamiento de los armónicos azimutales en este caso es gobernado por la perturbación al flujo producido principalmente por el movimiento del banco negro. En la Figura 4.13 se muestra la evolución de los coeficientes armónicos azimutales con la inserción del banco negro.

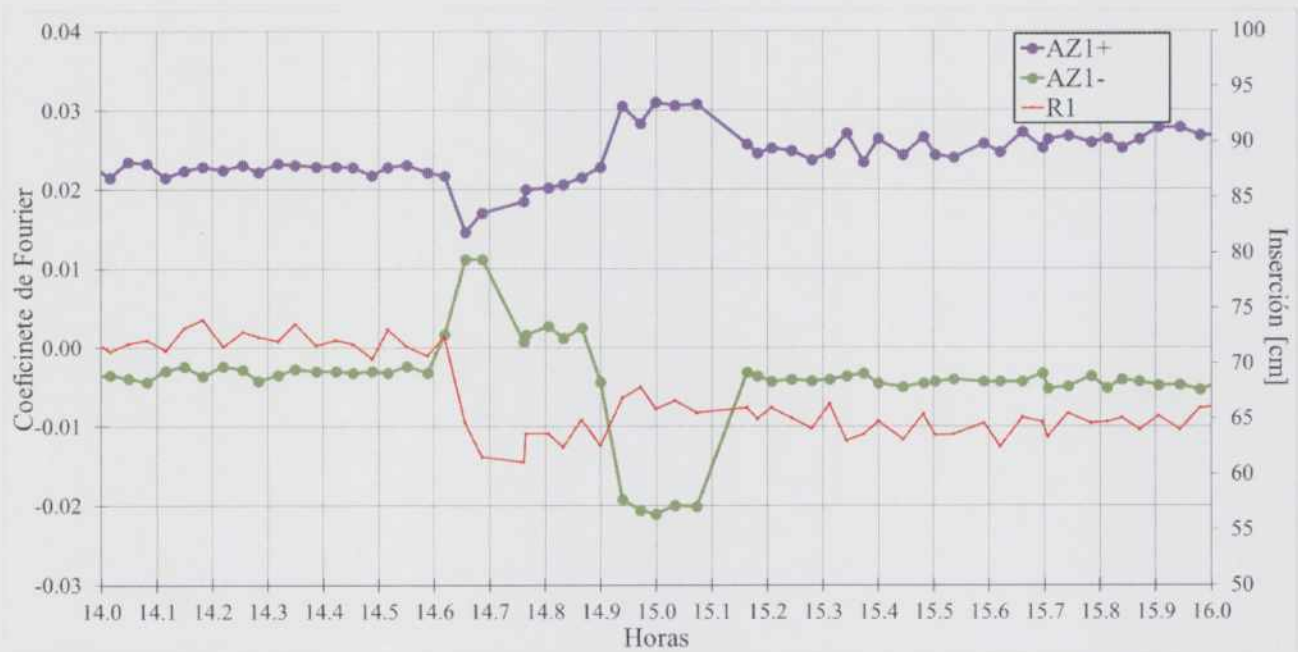


Figura 4.13: Evolución de los coeficientes de los modos azimutales y de la inserción del banco R1 durante el recambio 1.

Visualizando la funcionalidad de los armónicos azimutales y teniendo en cuenta que han sido calculados para el reactor con quemado promedio y posición nominal de barras del banco R3, se puede interpretar que el efecto más determinante para comprender el signo característico y los cambios de magnitud de ambos armónicos es el producido por el recorrido de la barra 2 del banco R1 debido a que es la única barra del banco que en su movimiento atraviesa volúmenes correspondientes a sectores de funcionalidad opuesta entre ambos modos armónicos. Esto explica por qué el signo característico del coeficiente armónico AZ1+ es positivo, mientras que el de AZ1- es negativo al emplear el banco R1.

Al insertar el banco R1 el efecto se incrementa y el coeficiente de AZ1+ es más positivo y el de AZ1- es más negativo. El efecto contrario ocurre cuando el banco es extraído, como en este caso.

Recambio 2

En la Tabla 4.2 se presentan las características de las dos operaciones del recambio 2.

Operación	Canal	Quemado medio [$\frac{MWd}{TnU}$]	Lanza próxima	Proximidad
Reactor \rightarrow Máquina de carga	62	5904.436	8	alta
Máquina de carga \rightarrow Reactor	62	1999.028	8	alta

Tabla 4.2: Características de las operaciones del recambio 2.

En la Figura 4.14 se muestra la evolución del error cuadrático medio en los detectores y de la inserción del banco negro durante el segundo recambio de combustible de la secuencia.

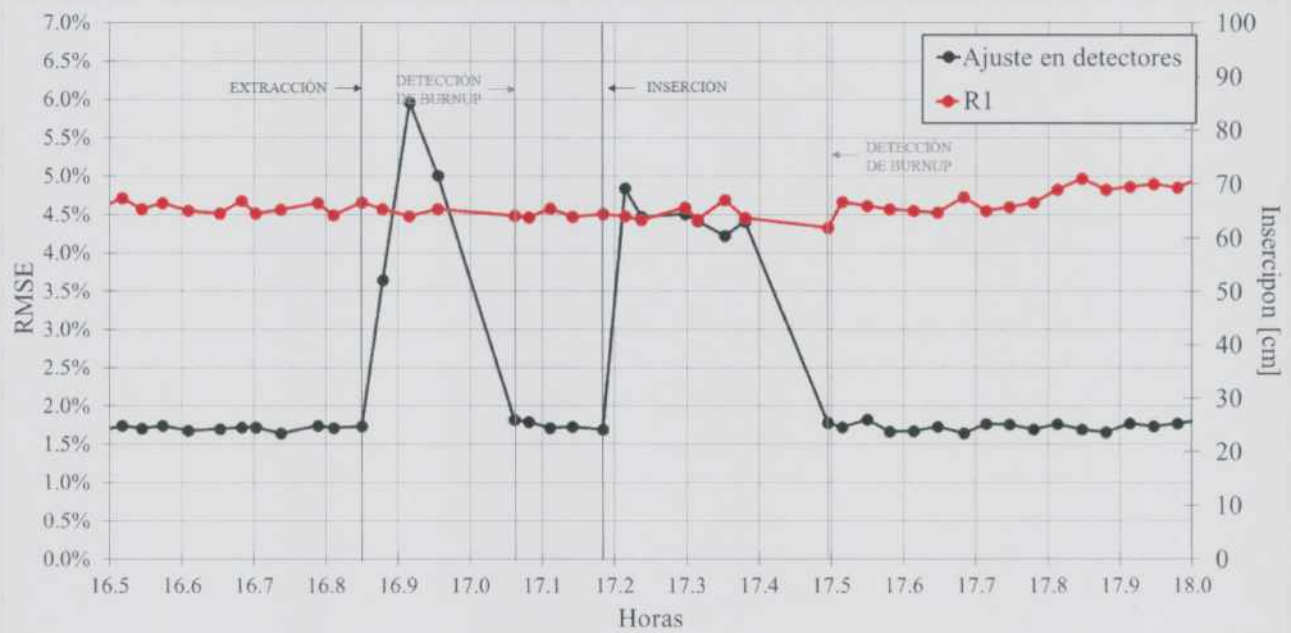


Figura 4.14: Evolución del error cuadrático medio del ajuste en los detectores y de la inserción de bancos durante el recambio 2.

El error del ajuste se ve notablemente incrementado al recambiar el combustible semiquemado del canal 62 por el extraído en el recambio 1. El alto error en el ajuste se explica teniendo en cuenta que la operación es realizada en un canal con cercanía directa a la lanza 8 de detectores por lo tanto las mediciones de sus detectores y en consecuencia también el mapeo se ven alterados por una perturbación local que no representa el comportamiento general de la zona de vigilancia de la lanza.

En este caso el sistema de control por barras no tomó acciones apreciables por lo que la evolución de los armónicos azimutales se explica por el efecto de las operaciones en la población neutrónica de la vecindad del canal. Como monitor de la variación del flujo se utiliza el flujo medido normalizado e integrado en los detectores de la lanza 8. En la Figura 4.15 se muestra la evolución de los coeficientes armónicos azimutales y del flujo normalizado e integrado en la lanza 8.

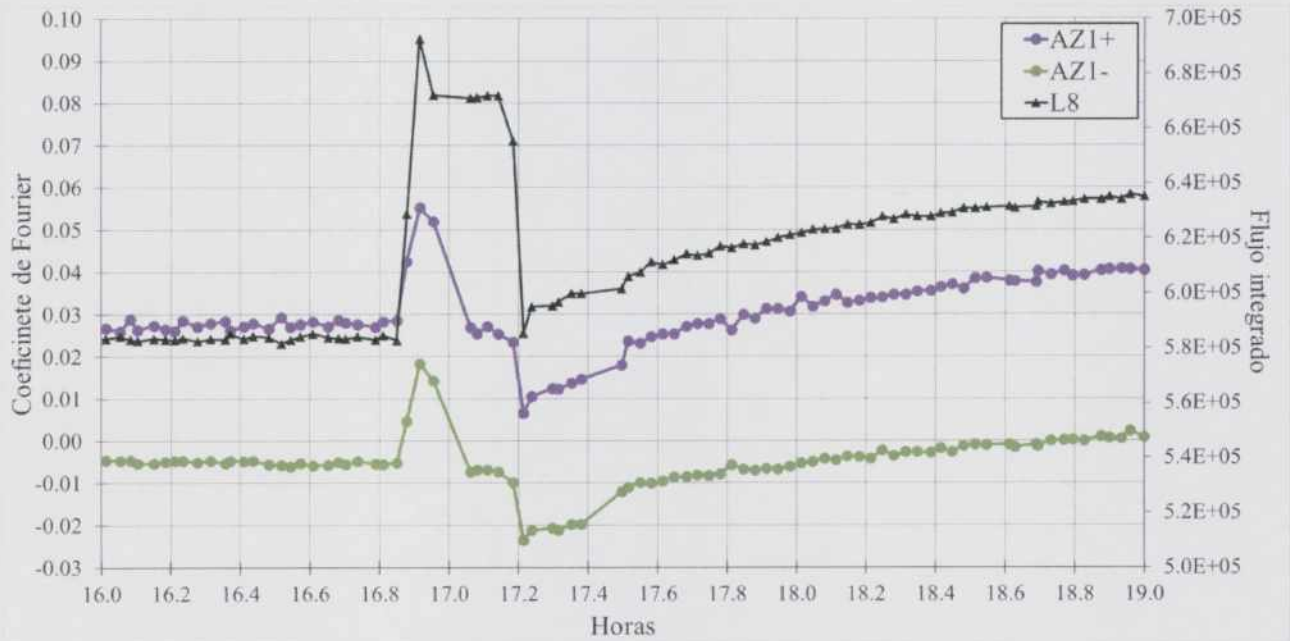


Figura 4.15: Evolución de los coeficientes de los modos azimutales y del flujo integrado en la lanza 8.

Se observa que al extraer el combustible el flujo en la posición de la lanza de detectores aumenta considerablemente. Al tratarse de un reactor submoderado, la introducción de agua pesada en el espacio antes ocupado por el elemento combustible produce un aumento de flujo en la vecindad del canal. Al introducir el combustible ocurre el efecto inverso y evoluciona según la variación de xenón hacia el equilibrio. Los armónicos azimutales evolucionan en el sentido de la perturbación de flujo en la lanza 8. La funcionalidad de ambos modos azimutales en el área del canal es positiva, esto explica por qué el coeficiente de la expansión aumenta al extraer el combustible recambiado con el consecuente aumento de flujo y disminuye con la disminución del flujo en la introducción.

Recambio 3

En la Tabla 4.3 se presentan las características de las dos operaciones del recambio 3.

Operación	Canal	Quemado medio [$\frac{MWd}{TnU}$]	Lanza próxima	Proximidad
Reactor → Máquina de carga	54	9525.956	4-3	baja
Máquina de carga → Reactor	54	5904.436	4-3	baja

Tabla 4.3: Características de las operaciones del recambio 3.

En la Figura 4.16 se muestra la evolución del error cuadrático medio en los detectores y de la inserción del banco negro durante el tercer recambio de combustible de la secuencia.

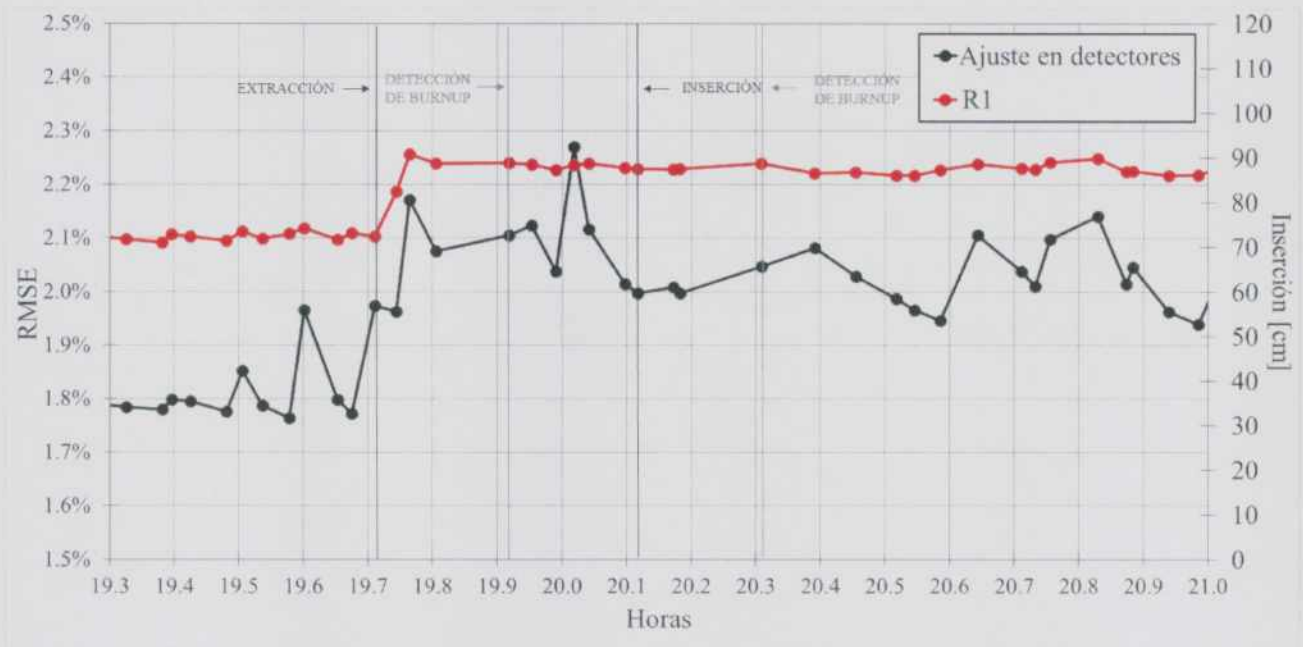


Figura 4.16: Evolución del error cuadrático medio del ajuste en los detectores durante el recambio 3.

El aumento en el error del ajuste se ve incrementado al recambiar el combustible semiquemado del canal 54 por el extraído del canal 62, sin embargo la magnitud del cambio es pequeña debido a que las lanzas 3 y 4 se encuentran muy alejadas del canal recambiado y a que la diferencia entre el quemado de extracción y de inserción es chica.

En este caso el sistema de control por barras no tomó acciones al efectuar la extracción del combustible, la evolución de los armónicos azimutales se explica por el efecto de las operaciones en la población neutrónica en la vecindad del canal. Como monitor de la variación del flujo se utiliza el flujo medido normalizado e integrado en los detectores de las lanzas 3 y 4. En la Figura 4.17 se muestra la evolución de los coeficientes armónicos azimutales y del flujo normalizado e integrado en la lanzas 3 y 4.

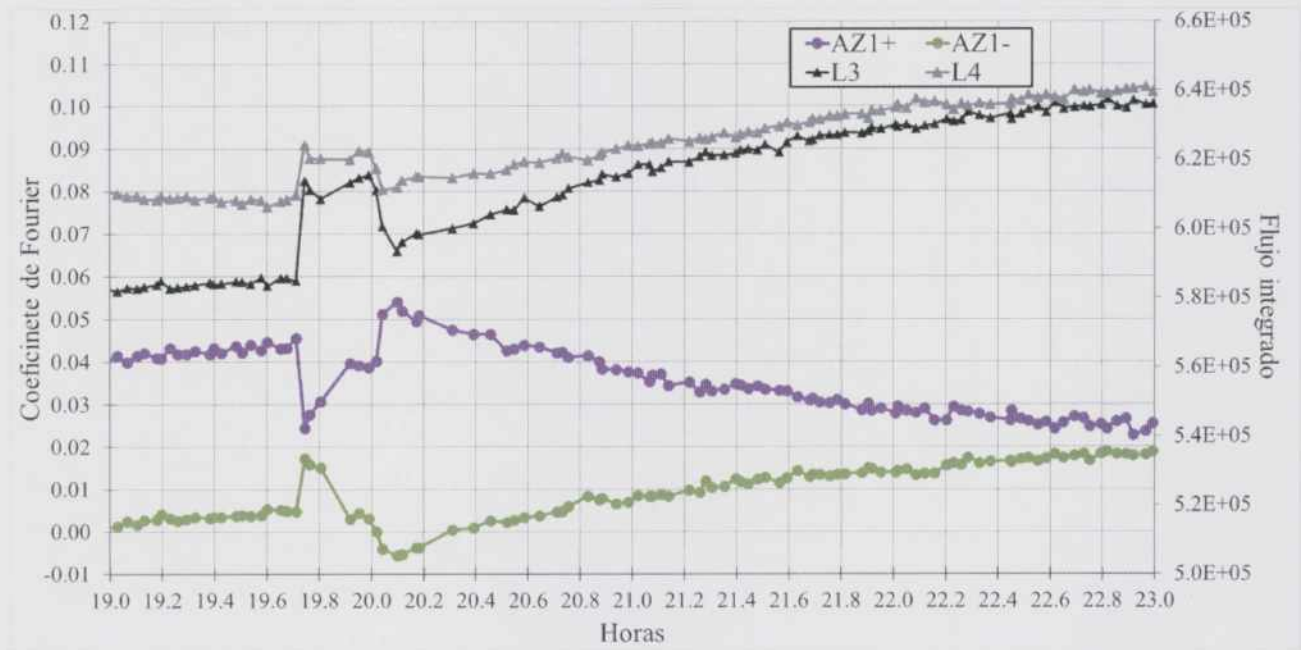


Figura 4.17: Evolución de los coeficientes de los modos azimutales y del flujo integrado en las lanzas 3 y 4.

Se observa que al extraer el combustible el flujo en la posición de ambas lanzas de detectores aumenta considerablemente por las mismas razones mencionadas en el recambio 1. Los armónicos azimutales evolucionan en el sentido de la perturbación de flujo en ambas lanzas. La funcionalidad del modo armónico AZ1+ es negativa en el área del canal, mientras que la funcionalidad del modo armónico AZ1- es positiva, esto explica porqué al extraer el combustible recambiado con el consecuente aumento de flujo el coeficiente del armónico AZ1+ disminuye y el correspondiente al armónico AZ1- se incrementa. El efecto contrario se manifiesta al insertar el combustible en el canal.

4.1.5. Estado de arranque después de una parada larga

El núcleo en estado de arranque luego de una parada de más de dos días se caracteriza por poseer una alta reactividad en exceso debido a que todo el xenón ha decaído y demanda el empleo de un alto grado de inserción de barras para compensar el exceso de reactividad. Estas condiciones afectan la precisión del programa debido a que, por un lado, la distribución de la población de neutrones difiere mucho con respecto a la distribución promedio en operación normal con la que fueron calculadas las autofunciones de la expansión, afectando además la eficiencia de la corrección por quemado y por otro lado, el accionamiento de manera aditiva de las barras de control implica un aumento sustancial del efecto de apantallamiento entre barras, fenómeno que implica una violación a la hipótesis de independencia en la que se basa la metodología de corrección por posición de barras.

En las Figuras 4.18 se muestra la evolución del error y la potencia y en la Figura 4.19 la evolución de error y de la inserción de los bancos de barras durante las primeras 120 horas desde el arranque.

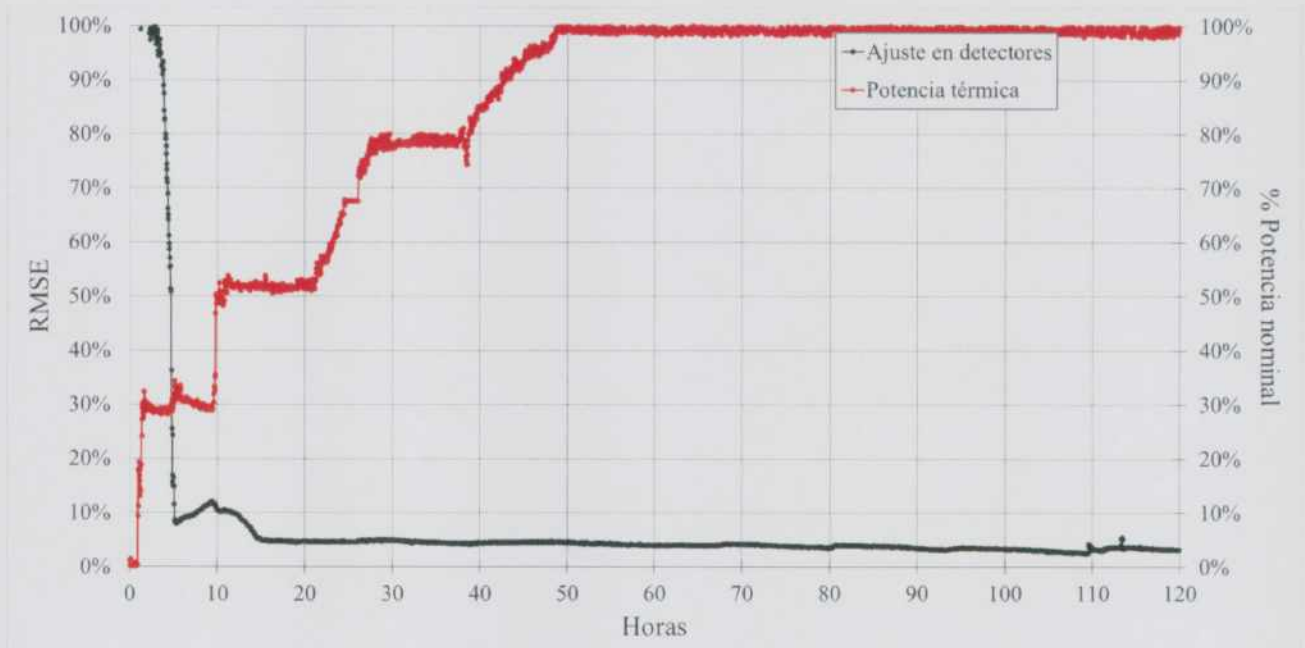


Figura 4.18: Evolución del error cuadrático medio del ajuste y de la potencia durante el arranque

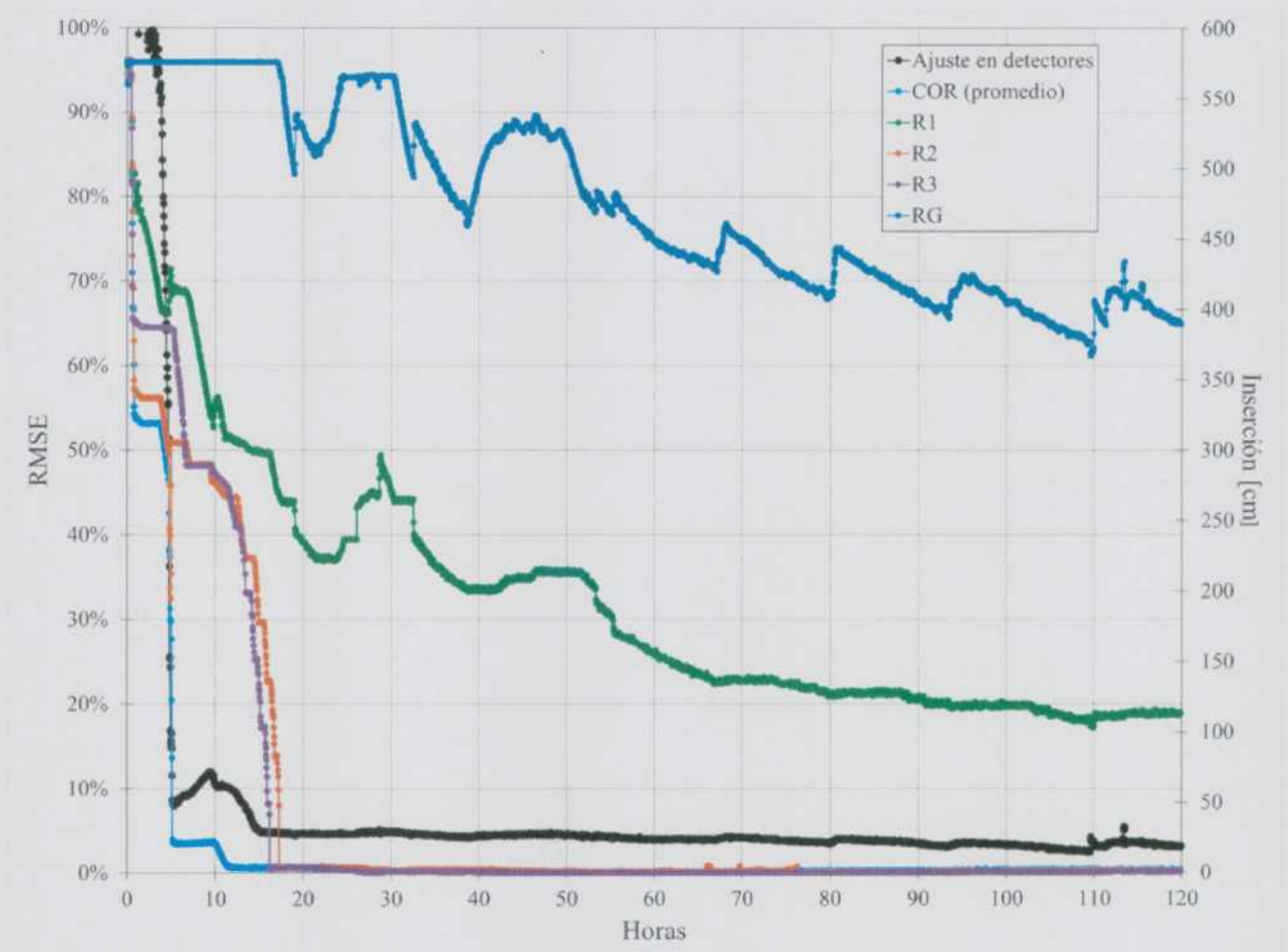


Figura 4.19: Evolución del error cuadrático medio y de la inserción de los distintos bancos de barras durante el arranque.

En la Figura 4.19 se observa la dependencia clara del error cuadrático medio del ajuste en los detectores con el grado de inserción de barras. Los errores cuadráticos medios más pronunciados se observan en las primeras horas principalmente debido a la inserción de los bancos de corte y en los desarrollos de potencia con alta tasa de incremento. Luego de la extracción completa de los bancos negros, el error en el mapeo considerablemente reducido desciende conforme se retiran progresivamente los bancos negros operativos. Luego de la extracción de los bancos R2 y R3, el error es gobernado principalmente por el grado de inserción del banco R1. Notar que la acción de control del banco R1 durante el desarrollo de la potencia involucra por momentos un aumento en el grado de inserción. Esto se debe a la depresión en la concentración de xenón al incrementar la potencia, debido al aumento instantáneo en las absorciones, que debe ser debidamente compensada.

Capítulo 5

Conclusiones

El programa PODESY se ha adaptado exitosamente a la CNA-UI, demostrando un buen funcionamiento general en la etapa de prueba de escritorio.

Se determinó una cantidad óptima de 7 autofunciones (modo fundamental + 6 armónicos) para representar los efectos no estacionarios del núcleo.

Se ha verificado que en operación normal las hipótesis de la metodología de cálculo se cumplen de buena manera, en particular no se observaron problemas de apantallamiento de las barras de control considerables. Sin embargo, durante las maniobras de arranque los efectos de apantallamiento se vuelven importantes afectando la precisión del mapeo. En esta primera etapa se considera tolerable el error debido a que el transitorio dura pocas horas. En el futuro deberá analizarse una metodología alternativa para mejorar la representación de los bancos de corte insertados en el núcleo.

Se instaló la versión implementada de PODESY en la planta y se hizo funcionar en tiempo real con las mediciones de planta durante más de un mes. En ese periodo se observó un comportamiento adecuado siguiendo la evolución de los principales parámetros: factor de forma axial y potencias máximas con gran precisión.

Actualmente el programa se encuentra en periodo de evaluación por personal de la planta.

Referencias

- [1] Silva M.S. 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.
- [2] NA-SA. Nucleoeléctrica Argentina, 2019. URL <http://www.na-sa.com.ar>, [Online; accedido el 3 de Junio , 2019].
- [3] Fink, Sidelnik, J., Perez, R., Higa, Casario, Alvarez, L. Avances del proyecto de utilización de uranio levemente enriquecido en la CNA-I en 1998-1999. XXVI Reunión anual de la AATN, Bariloche, noviembre de 1999.
- [4] Roqueta, D. Diseño de una estrategia de recambio de combustible para el núcleo de 241 canales de la Central Nuclear Atucha 1. XII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2016), sesión 24: aplicaciones a reactores nucleares de potencia, UTN Facultad Regional Córdoba, noviembre 2016.
- [5] M. Silva, Cálculo de los armónicos superiores de la ecuación de difusión de neutrones en la geometría real del reactor."XXXIII Reunión Anual de la ENIEF, San Carlos de Bariloche, 23-26 de septiembre de 2014.
- [6] Grant, C. Manual del código puma versión 4. Manual C.RCN.MUS.059, CNEA, 2005.
- [7] Silva, M. Implementación del sistema BURNUP para seguimiento de elementos combustibles en la computadora de procesos en CNA-II. Informe técnico NA-SA IT-FA/XX/2015.
- [8] M. Silva, Validación del programa de mapeo de potencia en la etapa inicial de operación de Atucha-2. XLI Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, Buenos Aires, 3 de diciembre de 2014.

Agradecimientos

Le agradezco a mi mamá, mi papá y mis hermanos por apoyarme en todas mis decisiones y por ayudarme a concretar los objetivos que me propuse y me propongo. A mi novia Soledad por haberme apoyado y soportado durante gran parte del transcurso del trabajo.

Le quiero agradecer especialmente a mi tutor de proyecto Martín quién, con gran competencia y amabilidad, me ha sabido enseñar, guiar, impulsar y acompañar en todo momento y en toda circunstancia a lo largo del año.

También le agradezco a mi co-tutor Federico que con generosidad y entusiasmo ha colaborado con el trabajo en diversas oportunidades y me ha recibido amablemente en la planta en diversas visitas y a todo el equipo de Unidad de Gestión de Proyectos Nucleares del Edificio Nodus por su buen trato y predisposición.