

IMPLEMENTACIÓN DE RUTINAS PARA LA EXTRACCIÓN E INSERCIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES DENTRO DE LA PLATAFORMA DE CÁLCULO DyPRA

Vignolo, R.¹ San Sebastián, G.²

¹TECNA Estudios y Proyectos de Ingeniería S.A.
Encarnación Ezcurra 365, C1107CLA Buenos Aires, Argentina
rvignolo@tecna.com

²Nucleoeléctrica Argentina S.A
Francisco Narciso de Laprida 3100, B1603AAA Vicente López, Argentina
gsansebastian@na-sa.com.ar

Resumen

DyPRA es una herramienta que permite analizar y verificar el diseño de la Central Nuclear Atucha II. Este modelo matemático-computacional consiste en el acople de códigos de cálculo específicos que intercambian información entre sí a través de memoria compartida y la utilización de semáforos. En este contexto, PCE2c calcula cinética espacial, RELAP la termohidráulica de los 451 canales del núcleo, DYNETZ la termohidráulica de los circuitos primario y secundario así como también las lógicas de los Sistemas de Control, Limitación y Protección de la planta. En caso de que se requiera mayor detalle sobre el comportamiento de los controles del reactor, está la posibilidad de acoplar los mismos mediante la herramienta CATS que reproduce exactamente el funcionamiento del Teleperm XS. La Central Nuclear Atucha II requiere de un sistema de control de potencia global, así como también de uno de la distribución espacial de la potencia para evitar oscilaciones en la concentración espacial del xenón-135. La extracción y/o inserción de un elemento combustible produce una gran perturbación localizada y asimétrica de flujo que, si no es controlada adecuadamente, puede llevar a la Central a estados de operación indeseables. Esto puede producir, entre otras cosas, que se alcancen las potencias límite de canal y/o oscilaciones de xenón. Con el fin de poder determinar las estrategias de control más favorables y evaluar el comportamiento de la central frente a este tipo de perturbaciones, se introdujo la posibilidad de modelar extracciones e inserciones de combustibles durante cálculos transitorios del DyPRA, cuya combinación permite reproducir permutaciones, recambios o estrategias de mayor complejidad. En este trabajo se describe y analiza esta implementación y, posteriormente, se comparan los resultados obtenidos con mediciones en planta. Por otro lado, se discuten mejoras en el modelado y la posibilidad de implementarlas dentro de la nueva plataforma dypra2.

IMPLEMENTATION OF ROUTINES FOR THE EXTRACTION AND INSERTION OF FUEL ELEMENTS IN DYPRAs SUITE

Vignolo, R.¹ San Sebastián, G.²

¹TECNA Estudios y Proyectos de Ingeniería S.A.
Encarnación Ezcurra 365, C1107CLA Buenos Aires, Argentina
rvignolo@tecna.com

²Nucleoeléctrica Argentina S.A
Francisco Narciso de Laprida 3100, B1603AAA Vicente López, Argentina
gsansebastian@na-sa.com.ar

Abstract

DyPRA is a tool that allows to analyze and verify the design of Atucha II Nuclear Power Plant. This computational model consists of the coupling of several specific calculation codes that exchange information using shared memory and semaphores. In this context, PCE2c calculates spatial kinetics, RELAP the thermo-hydraulic of the 451 core channels, DYNETZ the thermo-hydraulic of the primary and secondary circuits as well as the Control, Limitation and Protection System Logics implemented in the plant. The possibility of coupling CATS tool is available in case more detail about the behavior of the control systems is required. This tool reproduces the exact role of Teleperm XS. Atucha II Nuclear Power Plant requires both a global power control system and a distribution power control system. The first one makes sure that the power remains bounded and the second one avoids xenon concentration oscillations. The extraction and/or insertion of a fuel element produces a great localized and asymmetric perturbation that, if not controlled, could lead the plant to undesirable operational states such as reaching a channel power limit and/or xenon oscillations. In order to determine the most suitable control strategies and evaluate the behavior of the plant for this kind of perturbations, the possibility of modeling extractions and insertions of fuel elements was implemented in DyPRA transient cases. The combination of these instructions allows modeling fuel elements permutations, refueling or more complex strategies. This work intends to explain, describe and analyze this implementation and compare results with measurements made in the plant. Finally, modeling improvements and their implementations in the new dypra2 platform are discussed.

Índice

1. Introducción	4
2. Rutinas	5
2.1. Extracción de elementos combustibles	5
2.2. Inserción de elementos combustibles	6
2.3. Implementación	7
3. Aproximaciones	9
3.1. Consideraciones Termohidráulicas	9
3.2. Extracción discreta de trozos	10
3.3. Xenón, Iodo y Precursores	12
3.4. Perturbaciones	12
3.5. Quemado	15
4. Resultados	15
4.1. Resultados Computacionales	15
4.2. Comparación con la planta	18
5. Implementación en dypra2	19
6. Conclusiones	22

1. Introducción

DyPRA [1, 2] es una herramienta que hace referencia a un conjunto de códigos computacionales que modelan la Central Nuclear Atucha II resolviendo un problema transitorio. Cada uno de ellos, en cada paso de tiempo, lee la información que los otros escribieron en segmentos de memoria compartida para realizar un tipo de cálculo específico y, a su vez, deja disponible sus resultados en memoria compartida para que los otros códigos puedan leerlos. Este esquema de acople esta sincronizado por un programa maestro llamado DyPRA. Brevemente, los códigos que participan son (ver figura 1):

RELAP modela cada uno de los canales (hay cuatrocientos cincuenta y un procesos individuales) refrigerantes, incluyendo el combustible, el refrigerante y la pared (ver Ref. [3]).

PCE2c modela la difusión de neutrones tridimensional dependiente del tiempo en el núcleo del reactor (cinética espacial, ver Refs. [4, 5]).

DYNETZ modela la planta completa, a excepción de los canales refrigerantes y la neutrónica espacial. Puede acoplarse al TXS, como se indica en el siguiente punto.

TXS (opcional) emula el comportamiento del sistema de control Teleperm XS, que incluye regulación de potencia y de distribución de potencia del reactor, temperatura del moderador, y nivel y presión del presurizador.

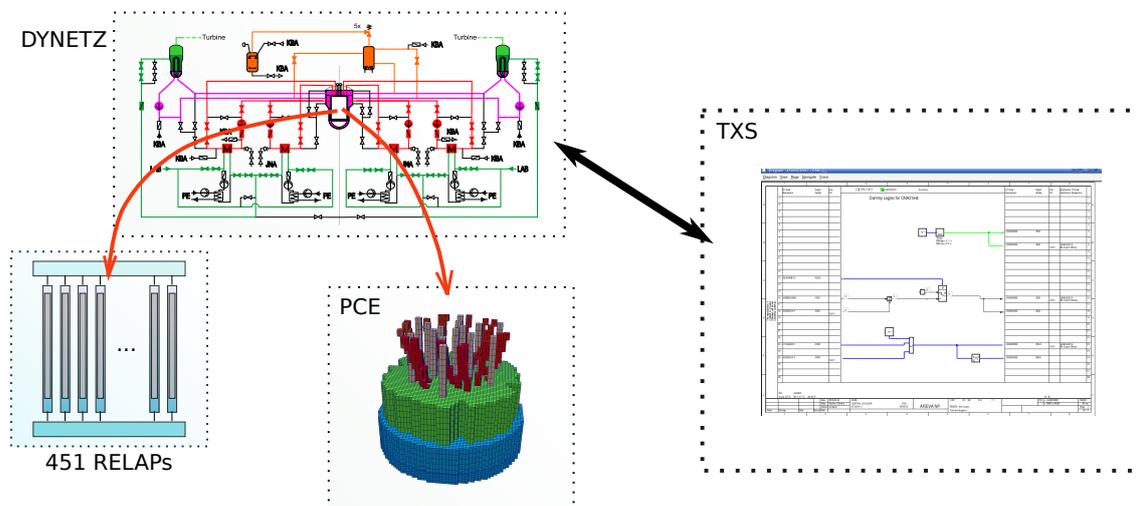


Figura 1: Códigos de cálculo presentes en la suite DyPRA.

El principal objetivo de la implementación de las rutinas para la extracción e inserción de elementos combustibles en PCE2c dentro de la plataforma DyPRA deviene de la necesidad de poder caracterizar la evolución temporal de determinadas variables de interés de la Central Nuclear Atucha II y observar las consecuentes decisiones llevadas a cabo por el sistema de control.

Previamente a alcanzar el 100 % de su potencia nominal, Atucha II comenzó con estrategias de intercambios de elementos combustibles con el fin de alcanzar su núcleo de equilibrio. Posteriormente, para además compensar pérdidas de reactividad debido al quemado, se implementarán estrategias de recambio de combustibles, donde combustibles frescos ingresarán al núcleo a expensas de retirar combustibles quemados.

La necesidad de modelar estos procedimientos surge de tener presente que la extracción y/o inserción de un combustible es una gran perturbación no simétrica y localizada que, si no es controlada adecuadamente, puede llevar a la central a estados de operación indeseables. Esto puede producir, entre otras cosas, oscilaciones en la concentración espacial del Xenón o un importante aumento de la potencia lineal en algún combustible.

Al extraer un combustible se presentan dos importantes fenómenos que ponen en evidencia la variación en la concentración espacial del Xenón o el aumento de la potencia lineal: por un lado, la remoción del Xenón presente en el combustible extraído y por el otro, un aumento del flujo térmico dentro del canal vacío y en sus inmediaciones. Aquellos combustibles afectados por este aumento de flujo verán, en el corto plazo, una disminución en la concentración de Xenón (contribución de reactividad positiva), pero, en el largo plazo y debido a la física inherente en la dinámica del Xenón, se pondrá en evidencia una contribución de reactividad negativa.

Por este motivo, la central posee implementado un sistema de control de potencia no sólo global (el cual la mantiene acotada entre ciertos límites), si no que también utiliza un sistema de control de la distribución espacial de la potencia que toma en consideración el valor de tres factores de asimetría azimutales $AZ_{14}(t)$, $AZ_{25}(t)$, $AZ_{36}(t)$ y un axial $AXI(t)$, definidos como

$$AZ_{ij}(t) = \frac{\text{potencia generada en el sexto } i - \text{potencia generada en el sexto } j}{\text{potencia generada en el sexto } i + \text{potencia generada en el sexto } j},$$

$$AXI(t) = \frac{\text{potencia generada en la mitad superior} - \text{potencia generada en la mitad inferior}}{\text{potencia total}}.$$

En otras palabras, si las oscilaciones del Xenón producidas por una perturbación localizada de la potencia no fuesen adecuadamente controladas, se generarían posteriores perturbaciones que realimentarían este fenómeno. En este contexto surge la necesidad de poder evaluar si el sistema de control implementado en la central puede hacer frente a dichas oscilaciones y/o a cualquier otro fenómeno relacionado con las estrategias de intercambio y/o recambio de elementos combustibles.

2. Rutinas

2.1. Extracción de elementos combustibles

Las modificaciones se realizaron únicamente dentro del código fuente de PCE2c debido a que es este programa el que se encarga de calcular la distribución de potencia en base a la geometría y materiales del núcleo. La implementación de la extracción o inserción de un elemento combustible se lleva a cabo mediante dos principales rutinas: `extraer_trozo_ec_()` e `insertar_trozo_ec_()`.

Si corresponde una extracción, la rutina `extraer_trozo_ec_()` es llamada `ntrozos` veces a partir del tiempo inicial que se establezca (siendo `ntrozos` la cantidad de volúmenes axiales presentes en la zona activa). Debe tenerse presente que la extracción no se realiza como un proceso continuo (ver subsección 3.2), sino discreto, en el que cada trozo¹ es removido de la zona activa luego de que se cumple una condición sobre el tiempo. Esto es, si el tiempo inicial de extracción es $t_{\text{ext},i}$, el tiempo de remoción del trozo j , $t_{\text{ext},j}$, será:

$$t_{\text{ext},j} = t_{\text{ext},i} + (\text{ntrozos} - j + 1) \frac{\Delta z_j}{v_{\text{ext}}} \quad \text{para } j = \text{ntrozos}, \dots, 1.$$

En cada uno de estos pasos, al combustible se le extrae el trozo que corresponde, almacenando su información de manera que ésta quede disponible para una posible futura inserción. Por otra parte, dado que el combustible es extraído una posición, las concentraciones de Iodo y Xenón son trasladadas a un trozo superior. En la subsección 3.3 se detalla qué ocurre con las concentraciones de precursores debido a la complejidad que presentan al estar calculadas a nivel de reticulado de cálculo y no de representación. Finalmente, en el trozo que corresponde rellenar con D_2O se remueven las concentraciones de Xenón, Iodo y precursores y el quemado es reemplazado por uno ficticio (negativo) que contiene las secciones eficaces del canal sin combustible (de ahora en más lo llamaremos canal vacío). La figura 2 presenta un esquema de la extracción de un combustible, mientras que la figura 3 muestra tanto la distribución de potencia en ausencia de dos combustibles como durante la extracción del combustible central.

Resta destacar qué ocurre con las perturbaciones al extraer un combustible en aquellos canales atravesados por alguna barra de control o cámara *incore* (recordar que tanto la presencia de una barra de control como la de una cámara *incore* se realiza mediante perturbaciones en las secciones eficaces del reticulado de cálculo). Para ello se analizaron dos esquemas: el primero consiste en remover las perturbaciones en las celdillas del reticulado de cálculo que atraviesan estos canales, mientras que el segundo mantiene el mismo esquema de perturbaciones, pero evita perturbar las secciones eficaces de fisión (ver subsección 3.4).

2.2. Inserción de elementos combustibles

Si corresponde una inserción la situación es análoga con excepción de algunas particularidades. En este caso se llama `ntrozos` veces la rutina `insertar_trozo_ec_()` a partir del tiempo inicial que se indique. Como se mencionó para la extracción, la inserción también es discreta, y la condición sobre el tiempo que rige la inserción del trozo j a la zona activa del núcleo es:

$$t_{\text{ins},j} = t_{\text{ins},i} + j \frac{\Delta z_j}{v_{\text{ins}}} \quad \text{para } j = 1, \dots, \text{ntrozos}.$$

En cada uno de estos pasos el trozo j del combustible ingresa a la posición superior del canal (es decir, al trozo `ntrozos`), por lo que el combustible es desplazado una posición hacia abajo. Se permite tanto ingresar un combustible previamente extraído de otro canal (con su quemado, Xenón, Iodo y precursores al momento de su extracción), como uno con un quemado uniforme (sin Xenón, Iodo y precursores).

¹Las metodologías de extracción e inserción aquí utilizadas requieren que las dimensiones axiales de los trozos Δz sean iguales. Por otra parte, la numeración de los trozos se corresponde con 1 en la parte inferior y `ntrozos` en la parte superior del núcleo.

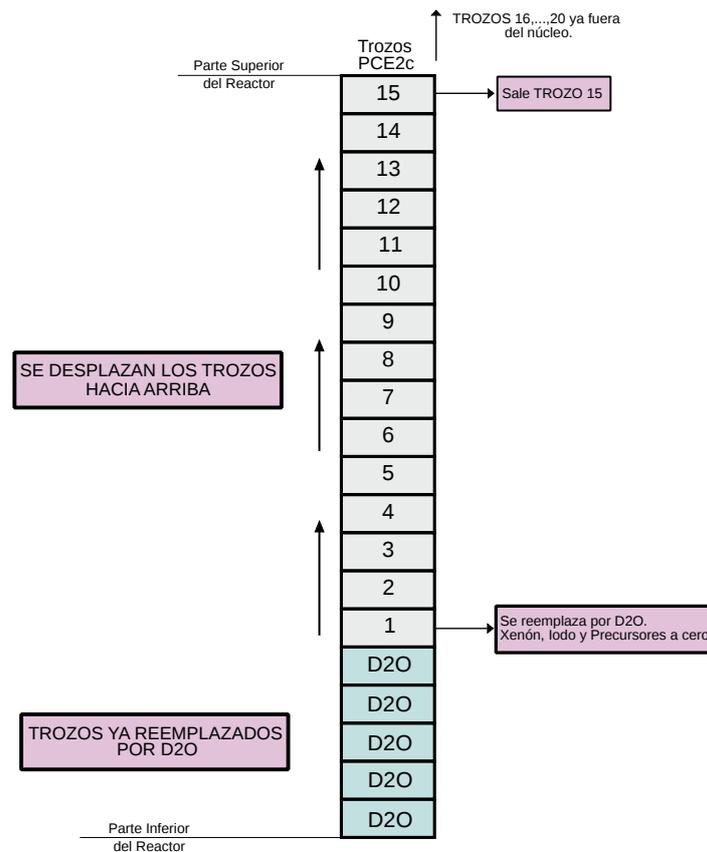


Figura 2: Esquema de la extracción de un elemento combustible para el modelo de Atucha II implementado en PCE2c.

2.3. Implementación

Las instrucciones deben indicarse en orden cronológico y se dan a nivel del *input* de PCE2c en la sección de QUEMADOS. Como se ha visto, existen dos posibles operaciones: la extracción y la inserción de algún elemento combustible. La combinación de las mismas permite reproducir procedimientos más complejos. Para una extracción es necesario definir el combustible a extraer, el quemado negativo y ficticio que posee las secciones eficaces del material que reemplaza al combustible (QUEMADO_DUMMY), el TIEMPO_INICIAL [s] y la VELOCIDAD [cm/s] de la extracción. Resumiendo, la instrucción para una extracción se da de la siguiente manera:

```
EXTRAER COMBUSTIBLE 203 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 15.0 VELOCIDAD 5.0
```

donde EXTRAER es una *keyword* principal y, por lo tanto, debe escribirse en primer lugar. Las palabras clave que le siguen pueden escribirse en el orden que se desee. Por otra parte, para una inserción es necesario definir:

```
INSERTAR EN_CANAL 1 COMBUSTIBLE_EXTRAIDO 203 TIEMPO_INICIAL 130.0 VELOCIDAD 5.0
```

donde, al igual que en el anterior caso, INSERTAR es una *keyword* principal y, por lo tanto, también debe escribirse en primer lugar.

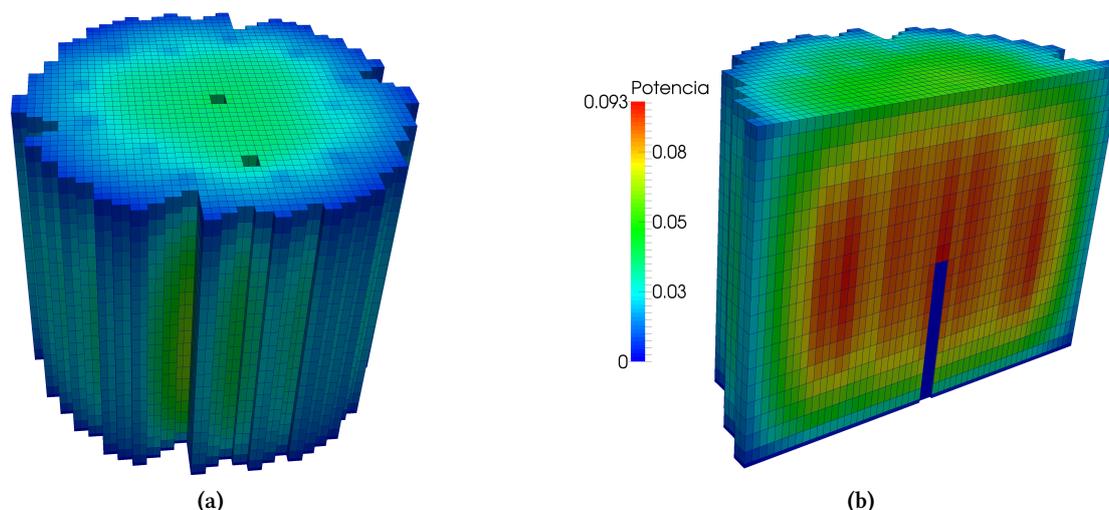


Figura 3: En las figuras se muestra, por un lado, la distribución de potencia en ausencia de dos elementos combustibles en el núcleo del reactor (a) y por el otro, la distribución de potencia en un determinado instante de la extracción del elemento combustible central (b).

En la última sentencia presentada se observa que en este caso se instruyó insertar al combustible 203 (que debe haber sido previamente extraído) en el canal 1 (que debe haber sido previamente desocupado). Por otra parte, en lugar de instruir insertar un combustible previamente extraído con la palabra clave `COMBUSTIBLE_EXTRAIIDO`, se podría haber utilizado como palabra clave `QUEMADO_UNIFORME`:

```
INSERTAR EN_CANAL 1 QUEMADO_UNIFORME 0.10 TIEMPO_INICIAL 130.0 VELOCIDAD 5.0
```

donde el número a continuación de `QUEMADO_UNIFORME` indica el valor del quemado uniforme del combustible a insertar (en este caso, uno fresco).

Existe una serie de limitaciones que detienen la ejecución del programa, las cuales se detallan a continuación:

1. Las instrucciones deben darse en orden cronológico.
2. No se permite realizar una inserción en un canal sin previamente haber realizado la extracción del combustible allí ubicado. En otras palabras, no puede insertarse un combustible en un canal ocupado por otro.
3. No puede insertarse un combustible en una posición si previamente no fue extraído de su posición original.
4. No se permiten las extracciones de dos elementos combustibles en simultáneo, como así tampoco las inserciones. Tampoco se permite realizar una extracción e inserción en simultáneo. Existe una única máquina de recambio en el reactor.

Anteriormente se mencionó que la combinación de las instrucciones elementales (`EXTRAER` e `INSERTAR`) pueden ordenarse de manera tal de reproducir procedimientos de mayor complejidad, como por ejemplo

- **Recambio:** este proceso consiste en mover un combustible parcialmente quemado (combustible 113) a un canal de un combustible quemado (combustible 1). Este último sale del núcleo y en la posición original del combustible 113 entra uno fresco.

```
* Ejemplo de un tipo de recambio.
QUEMADOS OFF {
EXTRAER COMBUSTIBLE 113 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 15.0 VELOCIDAD 5.0
EXTRAER COMBUSTIBLE 1 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 130.0 VELOCIDAD 5.0
INSERTAR EN_CANAL 1 COMBUSTIBLE_EXTRAIDO 113 TIEMPO_INICIAL 245.0 VELOCIDAD 5.0
INSERTAR EN_CANAL 113 QUEMADO_UNIFORME 0.10 TIEMPO_INICIAL 360.0 VELOCIDAD 5.0
}
```

Otra opción de recambio mas compleja consiste en, por ejemplo, la remoción de un combustible de la corona más externa del núcleo (combustible 430):

```
* Ejemplo de otro tipo de recambio.
QUEMADOS OFF {
EXTRAER COMBUSTIBLE 113 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 15.0 VELOCIDAD 5.0
EXTRAER COMBUSTIBLE 1 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 130.0 VELOCIDAD 5.0
INSERTAR EN_CANAL 1 COMBUSTIBLE_EXTRAIDO 113 TIEMPO_INICIAL 245.0 VELOCIDAD 5.0
INSERTAR EN_CANAL 113 QUEMADO_UNIFORME 0.10 TIEMPO_INICIAL 360.0 VELOCIDAD 5.0
EXTRAER COMBUSTIBLE 430 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 475.0 VELOCIDAD 5.0
INSERTAR EN_CANAL 430 COMBUSTIBLE_EXTRAIDO 1 TIEMPO_INICIAL 590.0 VELOCIDAD 5.0
}
```

Finalmente se presenta un caso que agrega información acerca del funcionamiento o manejo de las rutinas y que es conveniente tener presente. Supongamos que se han extraído dos elementos combustibles c_1 y c_2 . Posteriormente, se inserta c_1 en el canal correspondiente a c_2 . A continuación se vuelve a extraer este último insertado. De esta manera, se perderá la información del combustible c_2 dado que será reemplazada por la de c_1 . En otras palabras, si se instruye al programa a insertar en alguna otra posición al COMBUSTIBLE_EXTRAIDO c_2 , este insertará la información del combustible asociado a c_1 (actualizada según su historia en el núcleo). Si bien esto es una operación extraña, conviene mencionarla. La sintaxis de dicho procedimiento sería:

```
* Ejemplo de pérdida de información.
QUEMADOS OFF {
EXTRAER COMBUSTIBLE 113 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 15.0 VELOCIDAD 5.0
EXTRAER COMBUSTIBLE 1 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 130.0 VELOCIDAD 5.0
INSERTAR EN_CANAL 1 COMBUSTIBLE_EXTRAIDO 113 TIEMPO_INICIAL 245.0 VELOCIDAD 5.0
EXTRAER COMBUSTIBLE 1 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 360.0 VELOCIDAD 5.0
}
```

En este caso, la información del combustible 1 se pierde dado que es reemplazada por la del combustible 113 en la última extracción.

3. Aproximaciones

3.1. Consideraciones Termohidráulicas

El coeficiente de pérdida de carga asociado a un canal posee una contribución relacionada a la presencia del combustible. Como aproximación, este término se supuso constante durante la extracción e inserción debido a que el error introducido en el cálculo es despreciable al tener en cuenta la gran cantidad de canales presentes en el núcleo del reactor. Por otra parte, el coeficiente de pérdida

de carga posee una contribución dependiente del número de Reynolds. Al extraer un combustible, la temperatura del refrigerante en el canal disminuye y el valor de esta contribución aumenta. Teniendo estas dos consideraciones en cuenta, luego de la extracción el caudal en el canal es menor al caso donde sí se modelan todas las pérdidas de carga.

Se analiza el siguiente procedimiento con el fin de poner en evidencia lo anteriormente mencionado:

```

QUEMADOS OFF {
EXTRAER COMBUSTIBLE 1 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 10.0 VELOCIDAD 10.0
EXTRAER COMBUSTIBLE 155 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 100.0 VELOCIDAD 10.0
INSERTAR EN_CANAL 155 COMBUSTIBLE_EXTRAIDO 1 TIEMPO_INICIAL 200.0 VELOCIDAD 10.0
}

```

Al comienzo de la extracción del combustible 1, como puede verse en las figuras 4 y 5, la temperatura del refrigerante T_r en los trozos disminuye debido a la remoción de la fuente de calor. Por otra parte, T_r también disminuye a medida que atraviesa el canal debido a la potencia disipada hacia el moderador. Por este motivo, en un canal vacío, se llegará a una condición en la cual la temperatura de salida del núcleo es menor que la de entrada.

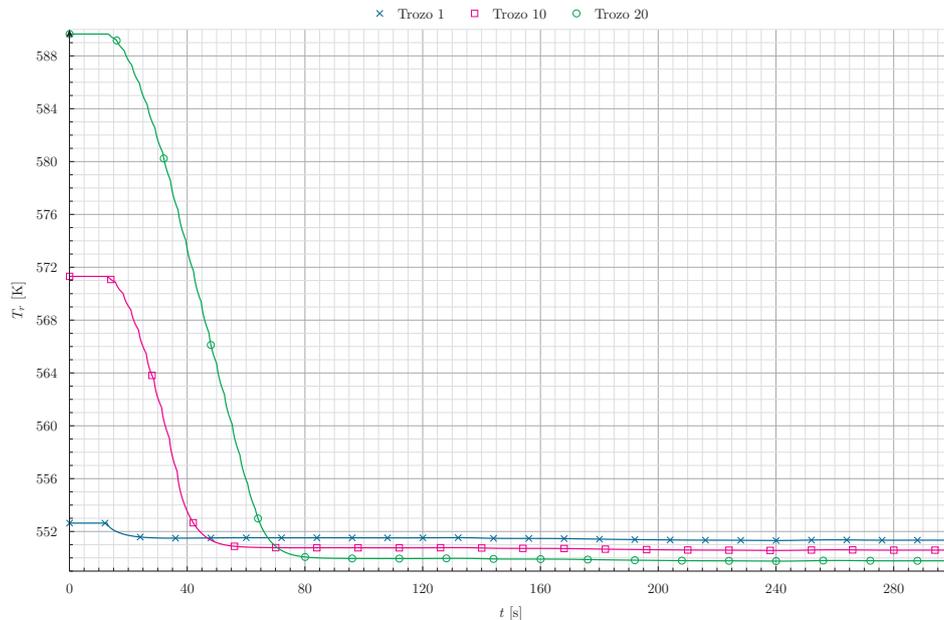


Figura 4: Evolución temporal de la temperatura del refrigerante en algunos trozos del canal 1 previo, durante y posterior a la extracción de su elemento combustible. Puede verse que a tiempos largos la temperatura de salida es menor a la de la entrada.

Durante una inserción se evidencian los mismos fenómenos. Las figuras 6 y 7 presentan tanto la evolución de la temperatura del refrigerante como la de la potencia según el procedimiento propuesto en el canal 155.

3.2. Extracción discreta de trozos

La extracción discreta de los trozos tiene como principal consecuencia la sobreestimación de la potencia generada en el canal, lo que resulta, en un sentido termohidráulico, en un cálculo conserva-

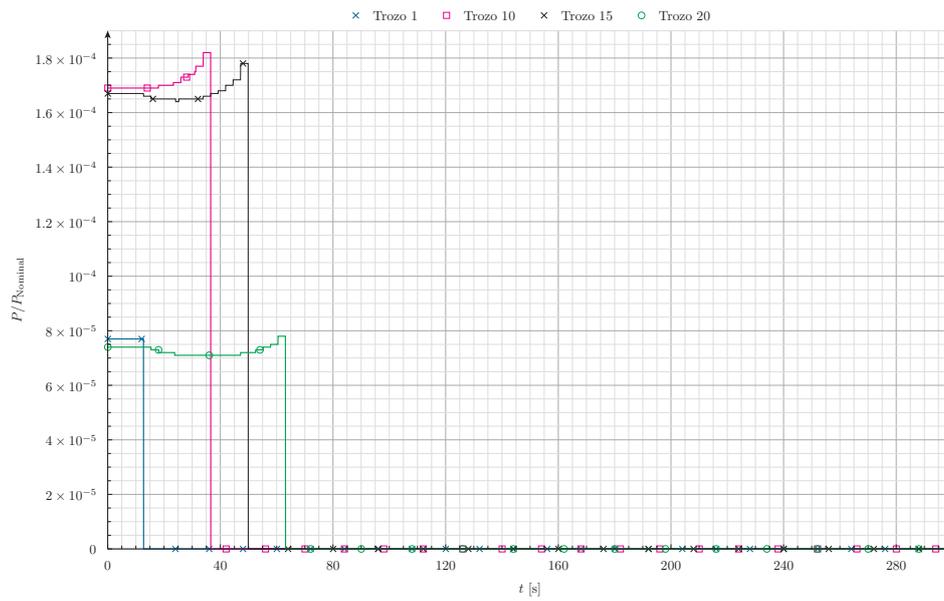


Figura 5: Evolución de la potencia en algunos trozos del canal 1 previo, durante y posterior a la extracción de su combustible.

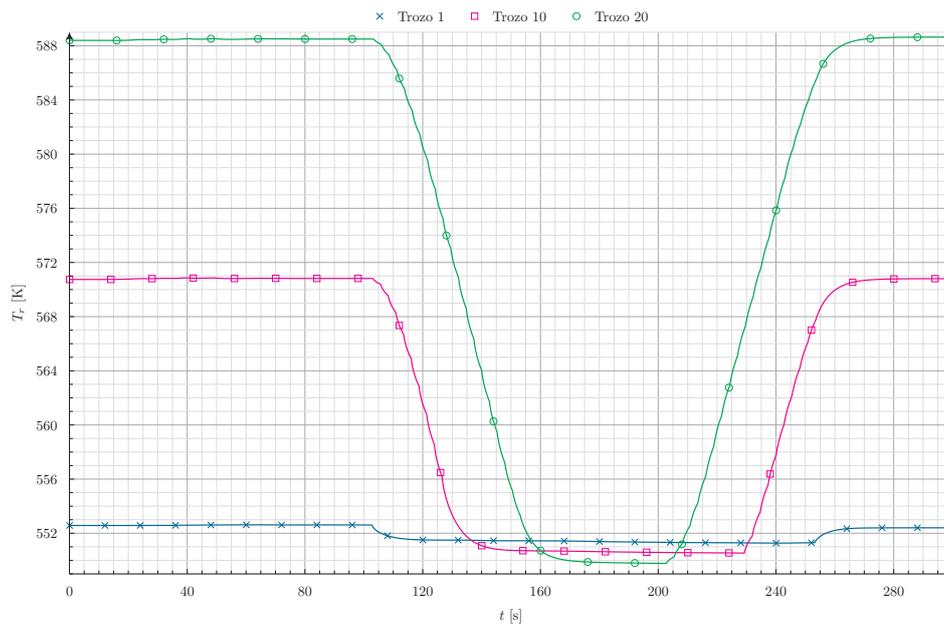


Figura 6: Evolución de temperatura del refrigerante en algunos trozos durante una inserción posterior a una extracción en el canal 155.

tivo. La implementación de una extracción continua podría llevarse a cabo obteniendo las secciones eficaces de un trozo a partir de una homogeneización de las secciones eficaces de un canal con combustible y de uno vacío. Esta implementación fue evitada debido a que en la mayoría de los casos este grado de detalle no es necesario. En otras palabras, el tiempo involucrado en la extracción de un trozo es considerablemente menor al implicado en el transitorio que se busca analizar.

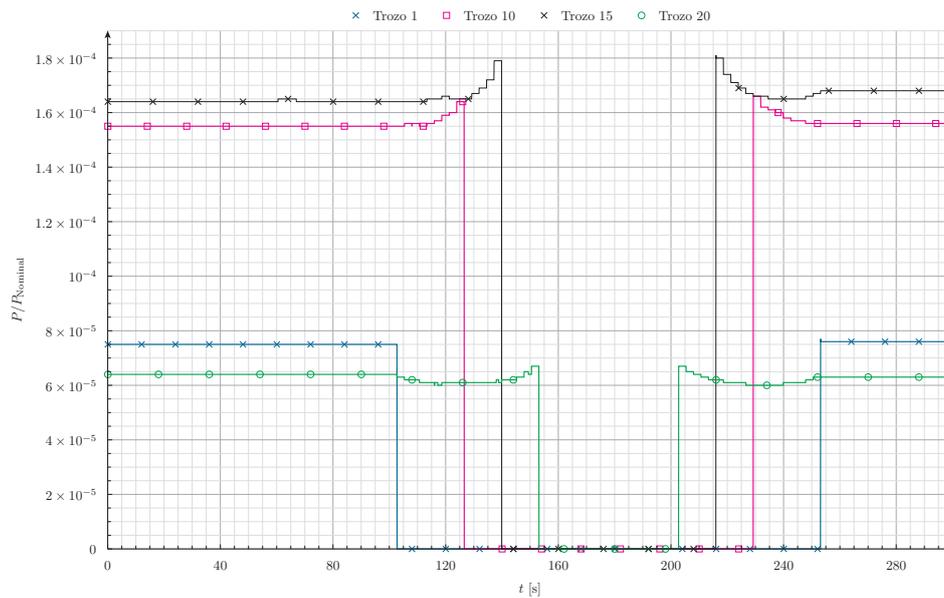


Figura 7: Evolución de la potencia en algunos trozos durante una inserción posterior a una extracción en el canal 155.

3.3. Xenón, Iodo y Precursores

Previamente se mencionó que las concentraciones de Iodo y Xenón están dadas a nivel del reticulado de representación. Por otra parte, las concentraciones de precursores se calculan a nivel de reticulado de cálculo. Esta diferencia existe debido a que el Xenón (y en consecuencia el Iodo) se utiliza para obtener las secciones eficaces, que se dan a nivel de trozos (reticulado de representación).

Debido a que la discretización axial del reticulado de cálculo no es regular, no es posible extraer o insertar las concentraciones de precursores de manera análoga a las concentraciones de I y Xe. Por este motivo se decidió trabajar con estas concentraciones de la siguiente manera:

- en la extracción: se anulan en el trozo extraído y en el resto de los trozos se mantienen invariantes (aunque su evolución continúa),
- en la inserción de un combustible previamente extraído: las concentraciones reaparecen en las posiciones de las que fueron anteriormente removidas.

3.4. Perturbaciones

El correcto esquema de perturbaciones consistiría en obtener tanto las nuevas secciones eficaces como las perturbaciones a partir de cálculos de celda para el caso de un canal sin combustible. Sin embargo, esto involucraría un importante esfuerzo computacional adicional que no se justifica. Sumado a esto, los modelos de celda resultarían más complejos que aquellos utilizados para obtener las secciones eficaces y perturbaciones de un canal con combustible. Esto tiene que ver con el hecho de que un canal vacío no se encuentra sumergido en un mar de infinitos canales vacíos, por lo que se tendría que realizar una macrocelda que permitiese reflejar la realidad luego de colocar condiciones de contorno periódicas o de reflexión.

Para evitar lo anteriormente mencionado se decidió trabajar con el siguiente esquema: las secciones eficaces perturbadas del canal vacío provienen de las mismas perturbaciones que se implementan en un canal con combustible, a excepción de las secciones eficaces de fisión, que se mantienen nulas. La presencia de las barras de control y de las cámaras *incore* son tenidas en cuenta, mientras que las perturbaciones provenientes de los separadores de inconel son removidas debido a que no se dispone de un reticulado de cálculo regular en sentido axial.

En la figura 8 se muestra la evolución de la temperatura del refrigerante en el canal 155 cuando las perturbaciones son removidas o insertadas junto con el combustible. Es importante comparar esta evolución con aquella presentada en la figura 6 y observar las pronunciadas oscilaciones presentes en la temperatura durante la inserción del combustible.

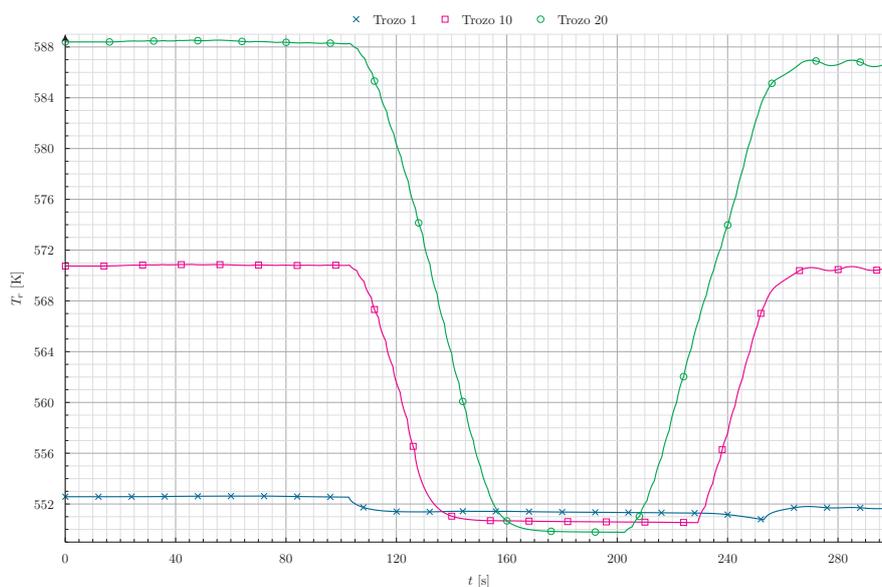


Figura 8: Evolución de temperatura del refrigerante en algunos trozos durante una extracción e inserción en el canal 155 removiendo o insertando las perturbaciones junto con elemento combustible.

Con el fin de justificar aquellas oscilaciones, se presentan las figuras 9 y 10. Ambas muestran la evolución de variables de interés del sistema de control de potencia, pero se diferencian en el esquema utilizado para las perturbaciones. La figura 9 se corresponde con aquella donde en las perturbaciones son removidas o insertadas junto al combustible, mientras que la figura 10 mantiene las perturbaciones aún luego de que el combustible haya sido extraído (sin perturbar las secciones eficaces de fisión).

Analizando la figura 9, y teniendo en cuenta el procedimiento de extracciones e inserciones de elementos combustibles previamente detallado, pueden obtenerse las siguientes conclusiones. Dado que el combustible del canal 155 es extraído a los 100 s, las perturbaciones son removidas y en consecuencia se observa un gran aumento de la potencia asociado a la reactividad positiva que esto introduce (además de la introducida por la extracción del Xenón). Luego, a los 200 s un combustible proveniente de otra parte del reactor es insertado en esta posición, por lo que las perturbaciones de la barra de control vuelven a ser introducidas. Esto genera una gran disminución de la potencia, asociada a la reactividad negativa que se introduce por la barra (además de la introducida por el Xenón). A continuación, el sistema de control responde extrayendo alguna barra, pero no mucho

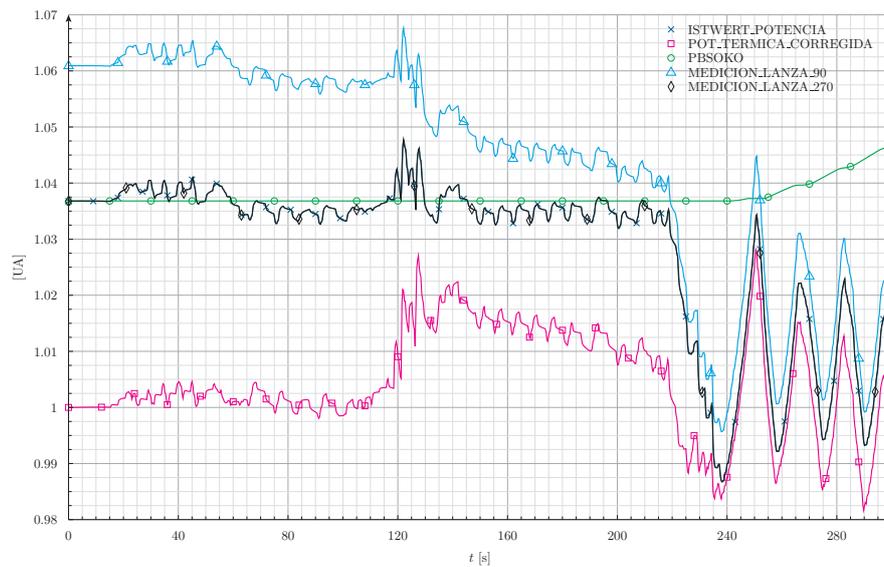


Figura 9: Evolución de variables de interés del sistema de control de potencia sin considerar las perturbaciones, es decir, removiéndolas o insertándolas junto al combustible. A partir de los 10 s comienza la extracción del combustible central, que sólo es perturbado parcialmente por una cámara *incore*. Luego de los 100 s comienza la extracción del combustible 155 (perturbado considerablemente por una barra de control). Por último, a los 200 s comienza la inserción del combustible extraído de la posición central en el canal 155.

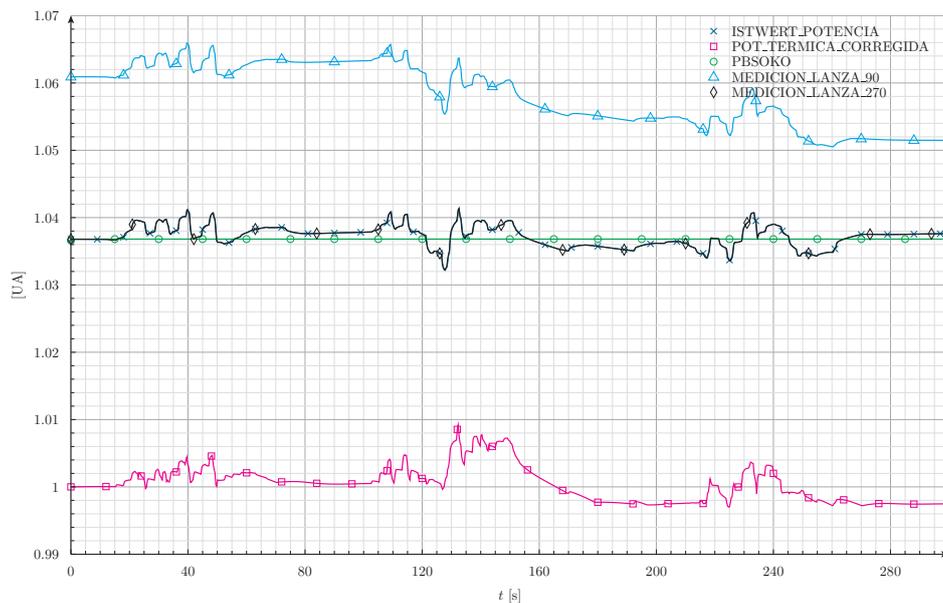


Figura 10: En este caso, la evolución de variables de interés del sistema de control de potencia han sido obtenidas teniendo en cuenta que las perturbaciones no son removidas al extraer el elemento combustible. El procedimiento propuesto es análogo al de la figura 9.

después una nueva perturbación es introducida debido a que el combustible continuó su descenso. Por este motivo se presentan aquellas pronunciadas oscilaciones. Por otro lado, muy diferente es lo que ocurre en la figura 10, donde las perturbaciones se mantienen (esquema que se eligió para el

modelo debido a que representa mejor la realidad).

3.5. Quemado

Se incorporó la posibilidad de quemar los elementos combustibles, teniendo en cuenta que cada trozo evoluciona en quemado B según

$$B(\text{trozo, canal})_{t+\Delta t} = B(\text{trozo, canal})_t + \frac{k}{m_0(\text{trozo, canal})} \int_t^{t+\Delta t} Q(\text{trozo, canal}) dt,$$

donde

$$Q(\text{trozo, canal}) = \text{energía por fisión} \times \text{número de fisiones por segundo}, \quad (3.1)$$

$m_0(\text{trozo, canal})$ se tomó equivalente a la masa de Uranio en un trozo de un combustible fresco y k equivale a una constante que reordena las unidades.

Debe tenerse presente que esto involucra mayores tiempos de cálculo debido a la necesidad de actualizar las secciones eficaces interpolando según el quemado. Por este motivo se decidió realizar la interpolación cada una cierta acumulación de quemado en un trozo. De esta manera, la sentencia para quemar queda determinada por:

```
QUEMADOS ON DELTA_QUEMADO 1.0 {
EXTRAER ...
...
}
```

donde DELTA_QUEMADO refiere al quemado que debe acumular un trozo para así actualizar sus secciones eficaces.

4. Resultados

4.1. Resultados Computacionales

A continuación se presentan los resultados obtenidos al realizar una corrida en la cual se propuso el siguiente procedimiento:

```
QUEMADOS ON DELTA_QUEMADO 0.1 {
EXTRAER COMBUSTIBLE 155 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 1000.0 VELOCIDAD 2.0
EXTRAER COMBUSTIBLE 1 QUEMADO_DUMMY -200.0 TIEMPO_INICIAL 3000.0 VELOCIDAD 2.0
INSERTAR EN_CANAL 1 COMBUSTIBLE_EXTRAIDO 155 TIEMPO_INICIAL 5000.0 VELOCIDAD 2.0
INSERTAR EN_CANAL 155 COMBUSTIBLE_EXTRAIDO 1 TIEMPO_INICIAL 7000.0 VELOCIDAD 2.0
}
```

con un tiempo final de 90×10^3 s, ligeramente superior a un día, para evidenciar la evolución del Xenón, lectura de las cámaras, potencia en los sextos, etc.

Algunas evoluciones temporales de interés se presentan en las figuras 11, 12, 13 y 14. En ellas puede apreciarse como el sistema de control consiguió manejar satisfactoriamente las perturbaciones realizadas, estabilizando, por ejemplo, las concentraciones de Xenón o las potencias en los sextos.

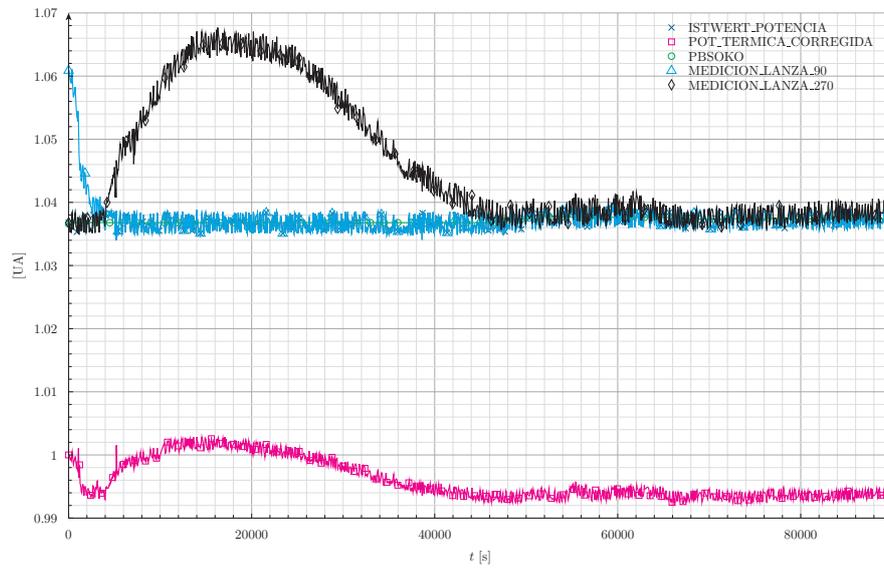


Figura 11: Evolución de variables de interés del sistema de control de potencia para una corrida de un día de duración.

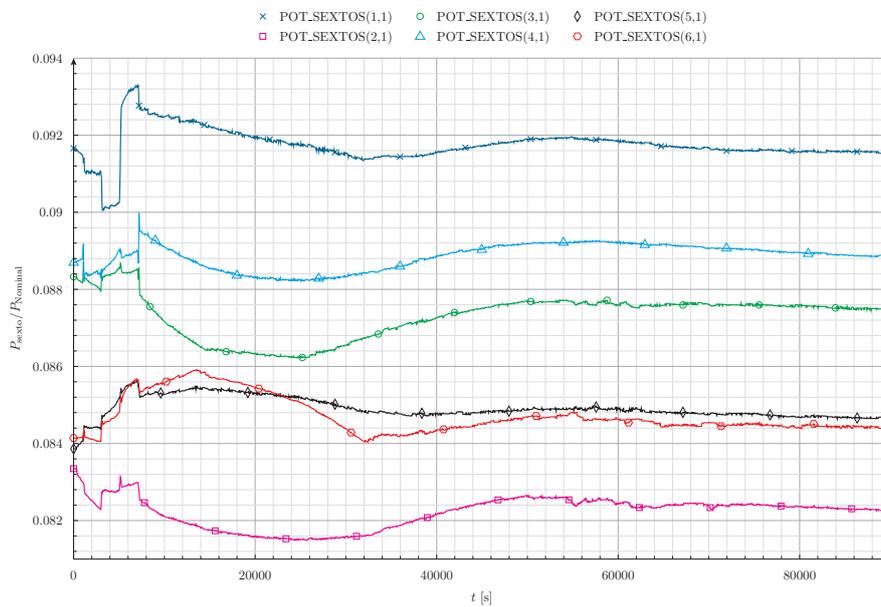


Figura 12: Evolución de la potencia en los sextos inferiores para una corrida de un día de duración. Entre los 1000s y 7000s se observan grandes perturbaciones asociadas a las extracciones e inserciones de combustibles.

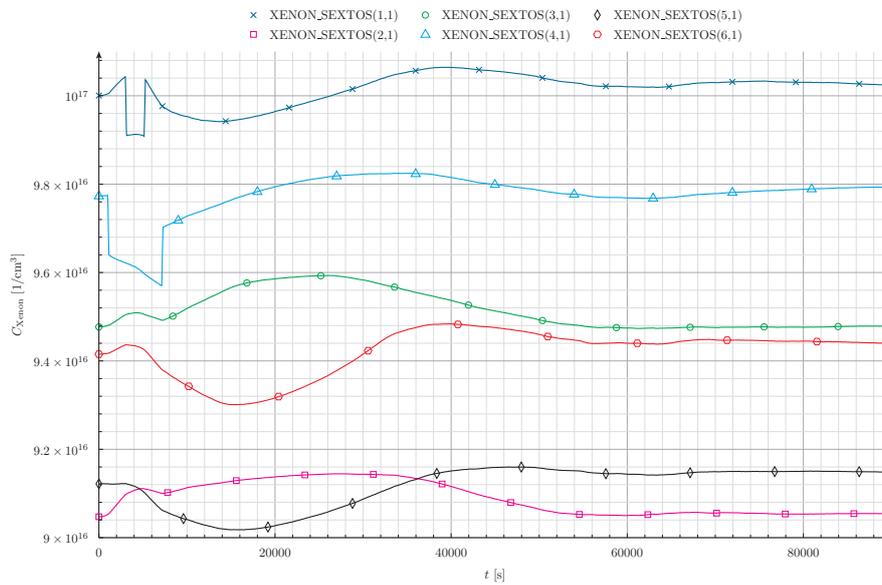


Figura 13: Evolución de la concentración de Xenón en los sextos inferiores para una corrida de un día de duración. Los saltos en las concentraciones se deben a la extracción o inserción de un combustible. Puede verse como a tiempos largos se consigue controlar adecuadamente las oscilaciones del Xenón, lo que también se evidencia en las potencias en los sextos presentadas en la figura 12.

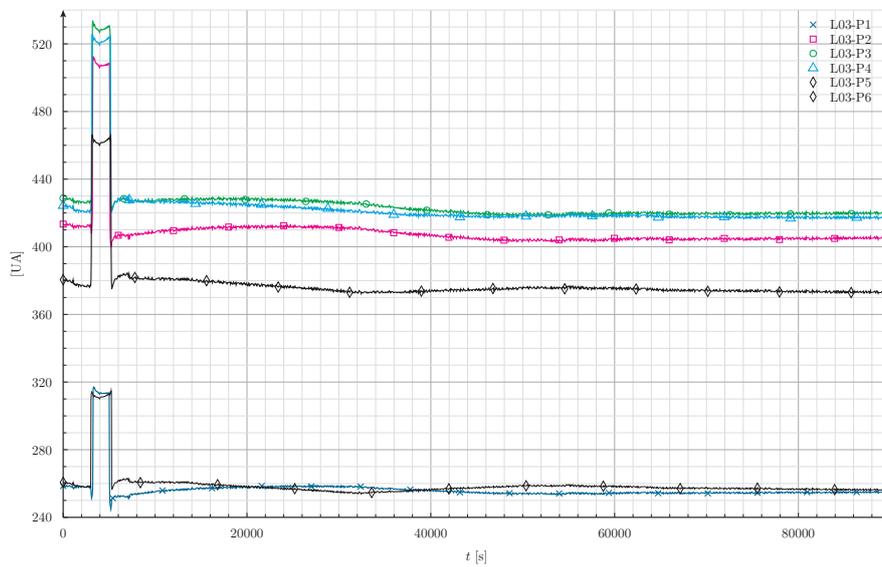


Figura 14: Evolución de la lectura de la cámara *incore* número 3 (próxima al elemento combustible central) para una corrida de un día de duración. Puede verse como a partir de los 3000 s la lectura de la cámara aumenta debido a que en el canal vacío el flujo térmico es muy superior al presente en un canal con combustible. Luego, a los 5000 s un combustible vuelve a ocupar dicho canal y la lectura disminuye.

4.2. Comparación con la planta

Si bien el objetivo principal del modelo es obtener un comportamiento cualitativo de la planta para un ajuste inicial de los controles, se plantearon distintos casos de prueba con el fin de validar dicho modelo con la planta y así poder entender las limitaciones y posibles mejoras. El primer caso de prueba consiste en evaluar el incremento del flujo cuando se inserta un elemento combustible en una posición adyacente a una lanza *incore*. En la figura 15 se muestra el promedio axial de la lanza *incore* #14 cuando se introduce un nuevo elemento combustible en el canal 129.

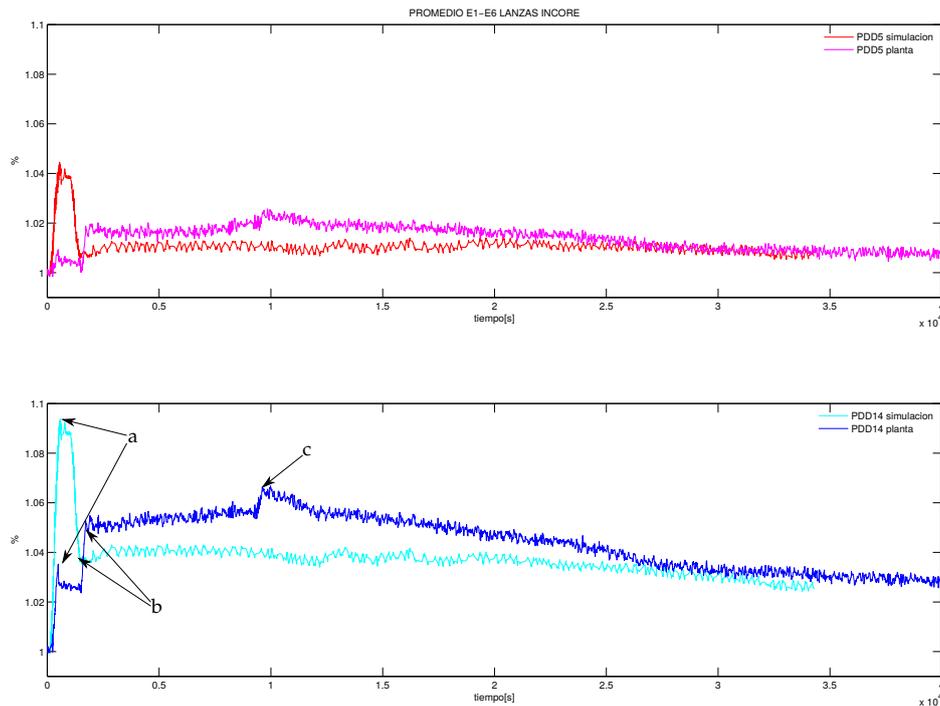


Figura 15: Evolución del promedio axial de la lanza *incore* # 14 durante y posterior al recambio de un elemento combustible en el canal 129. El punto señalado como **a** muestra como es sobreestimada la lectura de la cámara en la simulación (fenómeno debido probablemente a las secciones eficaces de canal vacío utilizadas). En el punto **b** se produce la inserción del combustible fresco. El punto **c** señala una perturbación ocurrida en la planta (otro recambio). A tiempos largos se ve como se predicen las mismas evoluciones.

En primer lugar se nota una diferencia importante en el flujo estimado cuando el canal se encuentra vacío debido a las secciones eficaces utilizadas. En general, en la planta se observa que el flujo con el canal vacío es menor al flujo luego de introducir un combustible nuevo, mientras que en la simulación ocurre lo contrario. Esto es un punto a mejorar en el futuro. También se observa una diferencia del orden del 1 % entre el flujo estimado luego de que se introduce el nuevo combustible. A largo plazo se forma el xenón en el EC nuevo y los flujos tienden a igualarse.

El segundo caso de prueba que se planteó consiste en comparar la pérdida de reactividad debida al quemado del combustible. Para eso se compara la reactividad de las barras de control medida en la planta a potencia constante (98 %) y sin recambios de EC, con la obtenida mediante simulación a lo largo de 1 día (figura 16).

En la curva simulada se observa una pérdida de reactividad de alrededor de 0.34 mk/día, que se corresponde con el valor teórico de diseño de la central. En la planta se observa una pérdida mucho

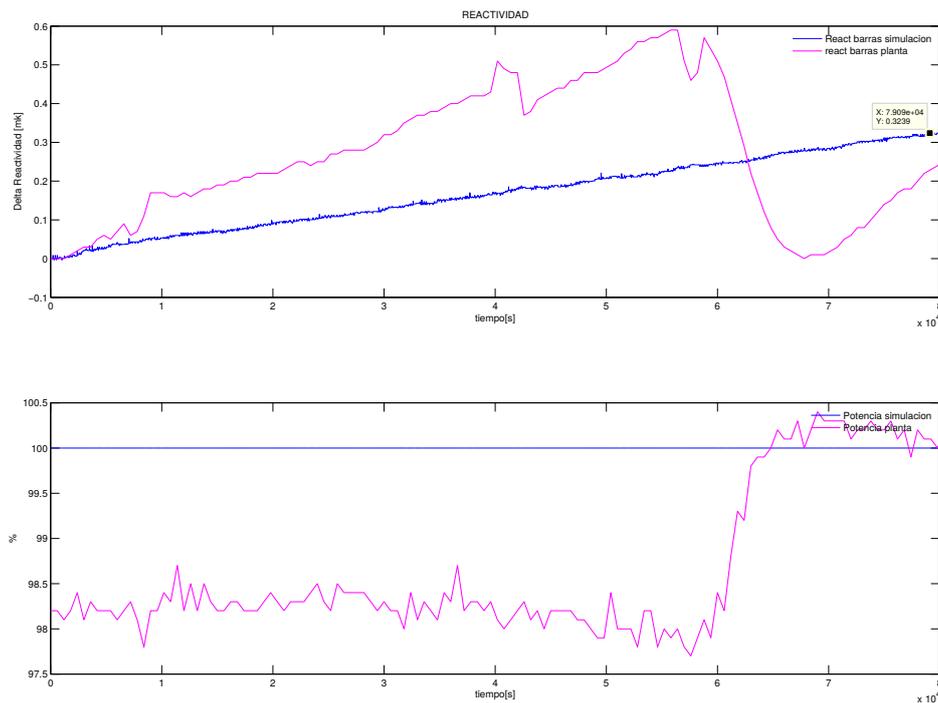


Figura 16: Evolución de la reactividad introducida por las barras (equivalente a la pérdida por el quemado). En la planta se observa una pérdida mayor debido a la pureza del agua pesada.

mayor debido a que agua pesada se encuentra degradada, su concentración actual es de 99.61 % cuando debería ser mayor a 99.8 %. Es de esperar que ambas curvas se comporten igual al recuperar la composición del agua pesada.

5. Implementación en dypra2

Dypra2 es una herramienta que ha terminado su desarrollo pero se encuentra en una etapa de verificación. El objetivo de esta *suite* es equivalente al del anterior DyPRA pero con un enfoque completamente diferente, que aprovecha el desarrollo de otros códigos que a su vez le confieren una versatilidad muy superior. Para poder aprovechar esta versatilidad es necesario poder manipular adecuadamente una serie de herramientas, principalmente wasora. Ya no existe un código DyPRA maestro que sincroniza la ejecución de los demás, si no que la ejecución de ellos respeta las instrucciones dadas a través de un *input* de wasora. PCE2c y DYNETZ son reemplazados por sus correspondientes *plugins* de wasora, *PCEx* y *dynetz*, por lo que las variables de ambos códigos son accesibles en un mismo *input* así como también pueden ser modificadas en tiempo de ejecución (características que permiten plantear transitorios sin la necesidad de recompilar los fuentes). Por otro lado, RELAP sigue compartiendo y recibiendo la información necesaria a través de memoria compartida (por medio de instrucciones de wasora o mediante una rutina externa de C). La descripción exhaustiva del dypra2 escapa el objetivo de este trabajo, lo que aquí se propone es analizar la implementación de un posible método de extracción de combustibles en esta plataforma.

Para extraer un combustible es necesario mover los quemados de cada trozo del canal hacia arriba. Lo mismo con las concentraciones de xenón, yodo y precursores. Este movimiento puede realizarse de manera discreta (como lo programado dentro de PCE2c y utilizado en DyPRA) o de manera continua. A continuación, haciendo uso de las ventajas de wasora y PCEx frente al PCE2c, se presenta una extracción continua. PCEx tiene la posibilidad de acceder a las secciones eficaces mediante una tabla de doble entrada (no sólo en función del quemado q , si no que también a través de cualquier otro parámetro dado incluso a nivel de reticulado de cálculo). Utilizando la tabla de doble entrada (que es posible extender a N parámetros de entrada dados a nivel de reticulado de cálculo) se definió un parámetro x_i que representa la proporción del trozo ocupado por agua pesada durante la extracción de ese trozo (ver figura 17). De esta manera, un trozo define sus secciones eficaces a partir de su quemado q y valor de x_i . Así, las secciones eficaces corresponden a las originales para el valor de quemado cuando $x_i = 0$, mientras que corresponden las del agua pesada para canal vacío cuando $x_i = 1$. La interpolación es bilineal para un par (q, x_i) . Por último, es necesario actualizar aquellos trozos que están conformados por dos valores de quemado, xenón y concentración de yodo (dados por el quemado, xenón y yodo que están siendo removido hacia arriba y los que vienen a reemplazar provenientes desde abajo). En este sentido se decidió tomar un quemado, concentración de xenón y yodo pesados con el volumen. Es importante entender que el xenón y yodo se mueven hacia arriba respetando una foto instantánea del núcleo al momento de comenzar la extracción. Esto tiene que ver con que se consideran mucho más apreciables las variaciones de xenón y yodo por el movimiento de los trozos que por la dinámica inherente a evolución de los mismos.

Teniendo presente lo anterior, se presentan a continuación las sentencias a agregar en el *input* de wasora de una corrida transitoria para modelar la extracción continua de un elemento combustible:

```

VAR fuel_to_extract trozo_que_miro tiempo_inicial
fuel_to_extract = 65
trozo_que_miro_0 = 1
tiempo_inicial = 300

VAR velocidad delta_t xi
velocidad = 3.0
delta_t = deltaz(15)/velocidad # tiempo necesario para extraer un trozo
xi_0 = 0

VECTOR aux_burnup_vec SIZE ntrozos
VECTOR aux_concxe_vec SIZE ntrozos
VECTOR aux_conci_vec SIZE ntrozos

VAR i1 i2 j1 j2 iz1 iz2

i1 = regiones_y_canales((fuel_to_extract 1)*4+1)
i2 = regiones_y_canales((fuel_to_extract 1)*4+2) 1
j1 = regiones_y_canales((fuel_to_extract 1)*4+3)
j2 = regiones_y_canales((fuel_to_extract 1)*4+4) 1

calc_index(ii ,jj ,kk) := ii + nx*(jj 1) + nx*ny*(kk 1)

IF ((t > (tiempo_inicial 0.01* dt)) & (t < (tiempo_inicial + ntrozos*delta_t + 0.01* dt)))

# Estos vectores auxiliares ayudan a movernos hacia arriba.
# Es decir, aquí sacamos una foto del combustible antes de extraerlo.
IF equal(xi,0.0)
aux_burnup_vec(i) = mat_burnup(fuel_to_extract , i)
aux_concxe_vec(i) = mat_concxe(fuel_to_extract , i)
aux_conci_vec(i) = mat_conci(fuel_to_extract , i)

```

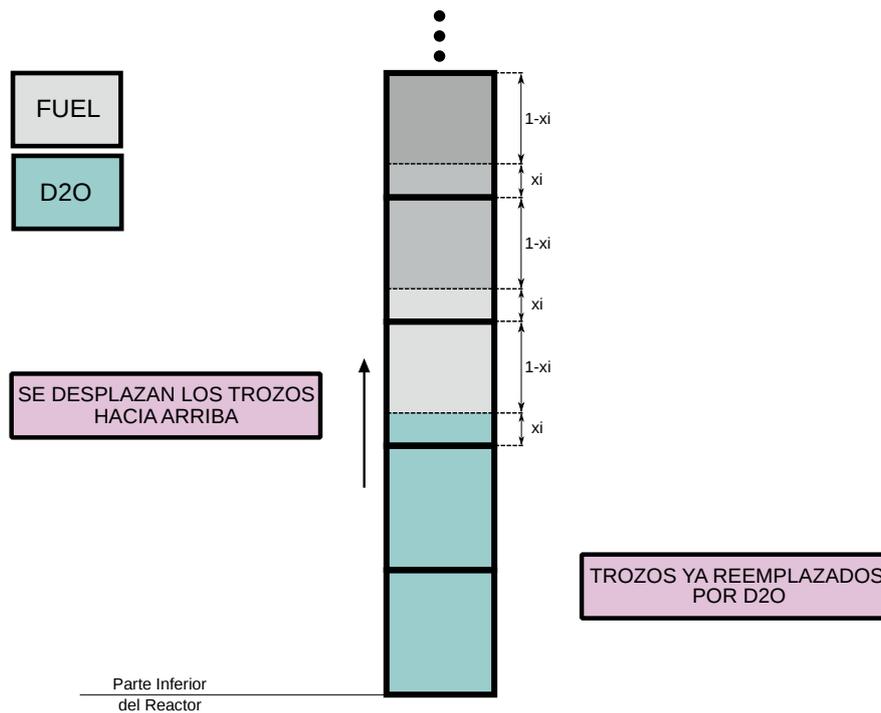


Figura 17: Representación esquemática de una extracción continua. Pueden verse trozos completamente reemplazados por agua pesada, trozos conformados por una combinación de agua pesada y combustible y trozos dados por dos quemados diferentes (escala de grises). Para los primeros, las secciones eficaces corresponden a las de canal vacío sin importar el quemado ($x_i = 1$), los segundos poseen un valor de $x_i \neq 0 \vee x_i \neq 1$ por lo que sus secciones eficaces están dadas mediante una combinación de las del combustible a ese quemado y del canal vacío. Por último, los terceros poseen un valor de $x_i = 0$ y secciones eficaces correspondientes al quemado pesado con el volumen ocupado por cada uno de ellos. El movimiento del xenón (e iodo) es análogo, de esta forma los trozos reemplazados por agua pesada no poseen xenón, aquellos conformados por combustible y agua pesada interpolan linealmente entre 0 y la concentración de xenón original del trozo inferior y en los trozos formados por combustibles a diferentes quemados se interpola linealmente entre las dos concentraciones existentes al comenzar la extracción.

ENDIF

```
# Usamos una aproximacion ya que xi puede resultar mayor a 1
# en un paso de tiempo y eso implica que el trozo salio un poco
# mas, por lo que el trozo de arriba tmb deberia modificarse.
xi = limit(((t ( trozo_que_miro 1) * delta_t) tiempo_inicial) / delta_t , 0, 1)

iz1 = if(trozo_que_miro=1, nrefl1 , trozo_que_miro+nrefl1+1)
iz2 = if(trozo_que_miro=1, nrefl1+2, trozo_que_miro+nrefl1+1)

# Cuando estamos en el trozo = 1, iz contempla las divisiones dadas por
# la presencia de los separadores de inconel. Por ese motivo hacemos
# este manejo.
IF equal(trozo_que_miro , 1.0)
# vec_distparam es un vector dado a nivel de reticulado de calculo que
# representa el parametro de entrada para las XS junto al quemado.
vec_distparam(calc_index(i,j1,iz1))<i1:i2> = xi
vec_distparam(calc_index(i,j2,iz1))<i1:i2> = xi
vec_distparam(calc_index(i,j1,iz1+1))<i1:i2> = xi
vec_distparam(calc_index(i,j2,iz1+1))<i1:i2> = xi
vec_distparam(calc_index(i,j1,iz2))<i1:i2> = xi
vec_distparam(calc_index(i,j2,iz2))<i1:i2> = xi
ELSE
vec_distparam(calc_index(i,j1,iz1))<i1:i2> = xi
```

```

    vec_distparam(calc_index(i,j2,iz2))<i1:i2> = xi
ENDIF

# No necesitamos mover el quemado del trozo que miramos,
# solo es necesario actualizar estas concentraciones.
mat_concxe(fuel_to_extract,trozo_que_miro) = (1-xi)*aux_concxe_vec(trozo_que_miro)
mat_conci(fuel_to_extract,trozo_que_miro) = (1-xi)*aux_conci_vec(trozo_que_miro)

# Para los trozos que estan por encima hay que actualizar el quemado, xenon y iodo
mat_burnup(fuel_to_extract,j)<1:1;trozo_que_miro+1:ntrozos> = xi*aux_burnup_vec(j-1) ←
+ (1-xi)*aux_burnup_vec(j)
mat_concxe(fuel_to_extract,j)<1:1;trozo_que_miro+1:ntrozos> = xi*aux_concxe_vec(j-1) ←
+ (1-xi)*aux_concxe_vec(j)
mat_conci(fuel_to_extract,j)<1:1;trozo_que_miro+1:ntrozos> = xi*aux_conci_vec(j-1) ←
+ (1-xi)*aux_conci_vec(j)

IF equal(xi,1.0)
    trozo_que_miro = trozo_que_miro + 1
    xi = 0.0
ENDIF
ENDIF

```

6. Conclusiones

Fue posible modificar el código fuente de PCE2c e implementar satisfactoriamente rutinas de extracción e inserción de elementos combustibles. Estas nuevas rutinas de PCE2c volcadas en el DyPRA permiten modelar y evaluar estrategias de movimientos de elementos combustibles en la Central Nuclear Atucha II. En otras palabras, ahora es posible analizar los fenómenos involucrados en el recambio de elementos combustibles desde un punto de vista integral de la planta.

Por otro lado, conviene destacar que existen mejoras a implementar, como por ejemplo, evitar la extracción discreta con el método propuesto utilizando la implementación del dypra2, generar mejores secciones eficaces y perturbaciones de un canal vacío, modificar el coeficiente de pérdida de carga asociado al movimiento del elemento combustible en el canal, etc. Sin embargo, a la hora de realizar esta tarea se decidieron las soluciones de compromiso presentadas en este informe debido a que se adaptan satisfactoriamente a los actuales requerimientos.

Referencias

- [1] G. Theler. *Nodalización de la CNA II para analizar transitorios de operación y control acoplando DYNETZ, PCE y RELAP*. Inf. téc. 10105-G-IT-005. TECNA S.A., 2010.
- [2] G. Theler. *Cálculo de condiciones de estado estacionario de la CNA2 con DyPRA*. Inf. téc. 10105-G-IT-019. TECNA S.A., 2012.
- [3] G. Theler. *RELAP5CPL: Extensión del código RELAP para permitir la realización de simulaciones termofluidodinámicas acopladas con códigos de cálculo externos*. Inf. téc. 10105-G-IT-001. TECNA S.A., 2010.
- [4] G. Theler y M. Rivero. *PUMITACPL: Extensión del Programa Cinético Espacial de cálculo neutrónico 3D para permitir simulaciones con realimentación termohidráulica y señales de control externas*. Inf. téc. 10105-G-IT-004. TECNA S.A., 2010.

- [5] G. Theler. *Descripción de las extensiones al Programa Cinético Espacial (PCE) realizadas por TECNA*. Inf. téc. 10527-N-IT15-301. TECNA S.A., 2015.