

Análisis de Alta Fidelidad de un Elemento Combustible BWR con los códigos COBRA-TF/PARCS y TRACE

A. Abarca^a, R. Miró^a, T. Barrachina^a, G. Verdú^a, A. Soler^d, A. Concejal^b, J. Melara^c, M. Albendea^c

^a Inst. de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)
Universitat Politècnica de València
Camí de Vera s/n, 46021 València, España
aabarca@isiryum.upv.es, tbarrachina@isiryum.upv.es, rmiro@iqn.upv.es, gverdu@iqn.upv.es

^b Iberdrola Ingeniería y Construcción S.A.U
Av./ Manoteras, 20. Edificio C. 28050 Madrid
acbe@iberdrola.es

^c Iberdrola Generación Nuclear
C/ Tomas Redondo, 1. 28033 Madrid
jls@iberdrola.es, manuel.albendea@iberdrola.es

^d SEA Propulsión SL
Av. / Atenas 75. Las Rozas. Madrid.
asoler@iberdrola.es

Resumen – Se ha modelado un elemento de combustible BWR 10 x 10, que contiene 91 varillas de combustible (81 de longitud total y 10 de longitud parcial) y una gran barra de agua de sección cuadrada en la parte central del mismo.

Dicho elemento combustible se ha modelado detalladamente: a nivel de subcanal con el código COBRA-TF y utilizando los modelos paramétricos para elementos combustibles BWR que posee el código de planta TRACE.

Se ha realizado un ejercicio de comparación de los resultados obtenidos por ambos códigos en la simulación de un estacionario y en un pequeño transitorio de inyección de caudal, destacando las diferencias observadas

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un estudio comparativo que quiere mostrar las capacidades de los códigos acoplado de sistema y de subcanal, como TRACE y CTF/PARCS respectivamente, para modelar y simular la fenomenología que tiene lugar el los elementos combustibles BWR de nuevo diseño. El elemento combustible seleccionado presenta una matriz de varillas de 10 por 10, tiene 91 varillas de combustible (81 de longitud total y 10 de longitud parcial), y además de una gran barra de agua central de sección cuadrada. Los modelos desarrollados intentan representar de forma realista el diseño del combustible con las capacidades disponibles en cada código.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan los modelos desarrollados para ambos códigos, TRACE y CTF; en la sección 3 se comentan los resultados de la simulación del estacionario, mientras que en la 4 se presentan los

resultados de un pequeño transitorio de inyección. Finalmente en la sección 5 se presentan las principales conclusiones extraídas del estudio realizado.

2. DESCRIPCIONES Y MODELOS

Como puede observarse en la figura 1, el elemento combustible analizado es posee un matriz de varillas 10 por 10, con 91 varillas de combustible (81 de longitud total (FLRs) y 10 de longitud parcial a 2/3 (PLRs)), además de una gran barra de agua de sección cuadrada. En la tabla 1 se listan los principales datos geométricos utilizados para desarrollar los modelos.

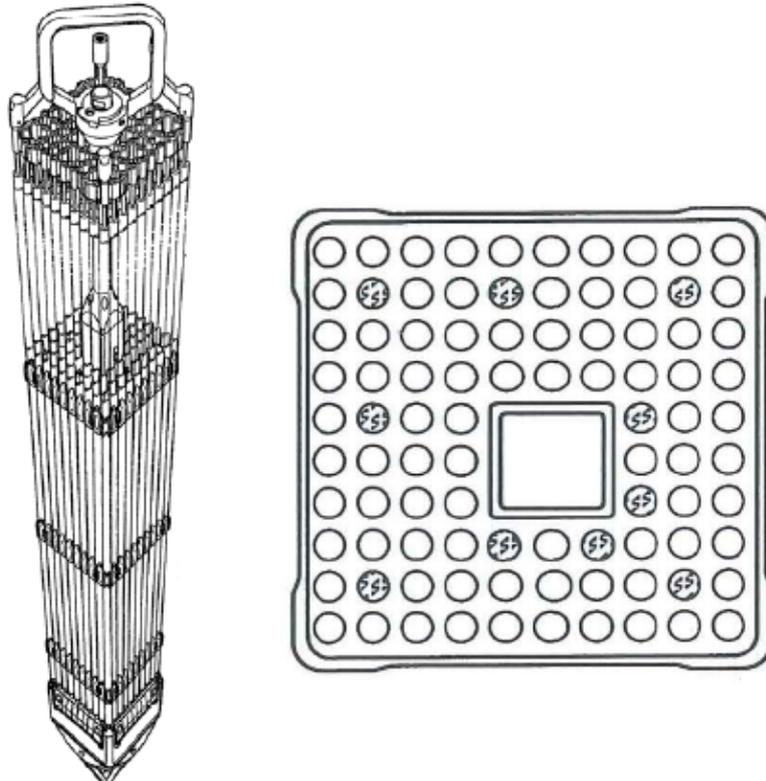


Figura 1: Esquema del element combustible analizado.

Tabla 1: Datos geométricos del elemento combustible.

| | |
|-----------------------------------|-------|
| Fuel pitch (mm) | 152.4 |
| Pin pitch (mm) | 12.95 |
| Pellet diameter (mm) | 8.87 |
| Clad inside diameter (mm) | 9.04 |
| Clad outside diameter (mm) | 10.28 |
| Rod to channel gap (mm) | 3.858 |
| Water channel to rod gap (mm) | 3.26 |
| Channel wall thickness (mm) | 1.70 |
| Water channel outer width (mm) | 35.0 |
| Water channel wall thickness (mm) | 0.80 |

Se ha desarrollado un único modelo detallado para el código CTF y dos modelos diferentes para el código TRACE utilizando los datos disponibles. Los dos modelos del último código se diferencian en su complejidad; el más simple (SIMPLE TRACE) utiliza la opción de canal BWR convencional de TRACE, mientras que el avanzado (ADVANCE TRACE) utiliza la propia opción de *advance BWR channel* de la última versión de TRACE (versión 5, patch 3).

2.1. El modelo de COBRA-TF.

El modelo de alto realismo de CTF representa, con el mayor grado de fidelidad que permite el código, las características de diseño del elemento combustible. El modelo incluye la representación de las PLRs, la barra de agua, el canal del combustible y los cambios geométricos a nivel axial (área, diámetro hidráulico y huecos entre varillas) que tienen lugar a través del combustible en el nivel de la varilla de combustible (pin level).

El esquema que se presenta en la figura 2 muestra que el modelo de CTF contiene 92 subcanales incluyendo la barra de agua. Cada subcanal se encuentra dividido en 28 nodos axiales y conectado con sus correspondientes estructuras de calor. Además la barra de agua está conectada a nueve estructuras de calor que representan el intercambio de calor entre el fluido que circula a través de la propia barra y el fluido que circula en los subcanales colindantes. También el canal que rodea al combustible está representado por estructuras de calor pasivas.

En la sección transversal del lado izquierdo de la figura 2 se han resaldado en azul las posiciones de los subcanales que contienen PLRs como estructuras de calor, mientras que la barra de agua se representa en Amarillo. En el lado derecho de esta misma figura se muestra un esquema simplificado de la nodalización axial y la conexión axial de las estructuras de calor.

| | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 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 | 38 | 39 | 40 |
| 41 | 42 | 43 | 44 | 92 | | | 45 | 46 | 47 |
| 48 | 49 | 50 | 51 | | | | 52 | 53 | 54 |
| 55 | 56 | 57 | 58 | | | | 59 | 60 | 61 |
| 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 |
| 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 |

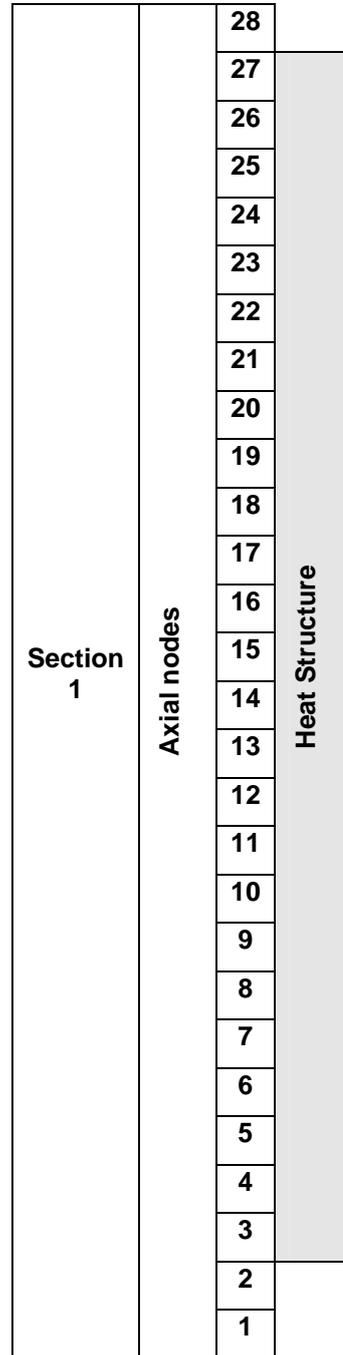


Figura 2: Esquema de la nodalización del modelo de COBRA-TF.

2.2. Los modelos de TRACE.

Las figuras 3 y 4 representan, respectivamente, el esquema de los modelos, simple y avanzado, desarrollados para el código TRACE. En el modelo simple, el elemento combustible está representado por un único canal termohidráulico conectado a una estructura de calor que representa las 91 varillas de combustible (incluyendo la PLRs). En el modelo avanzado, se ha utilizado las características de *advance channel* que posee TRACE, permitiendo la representación de las barra de agua y las PLRs; esto significa que el elemento combustible se representa mediante dos canales (uno para el refrigerante que pasa a través de la varillas de combustible y otro para la barra de agua) y dos estructuras de calor para las FLRs y PLRs respectivamente. Axialmente, ambos modelos constan de 28 nodos, al igual que el de CTF.

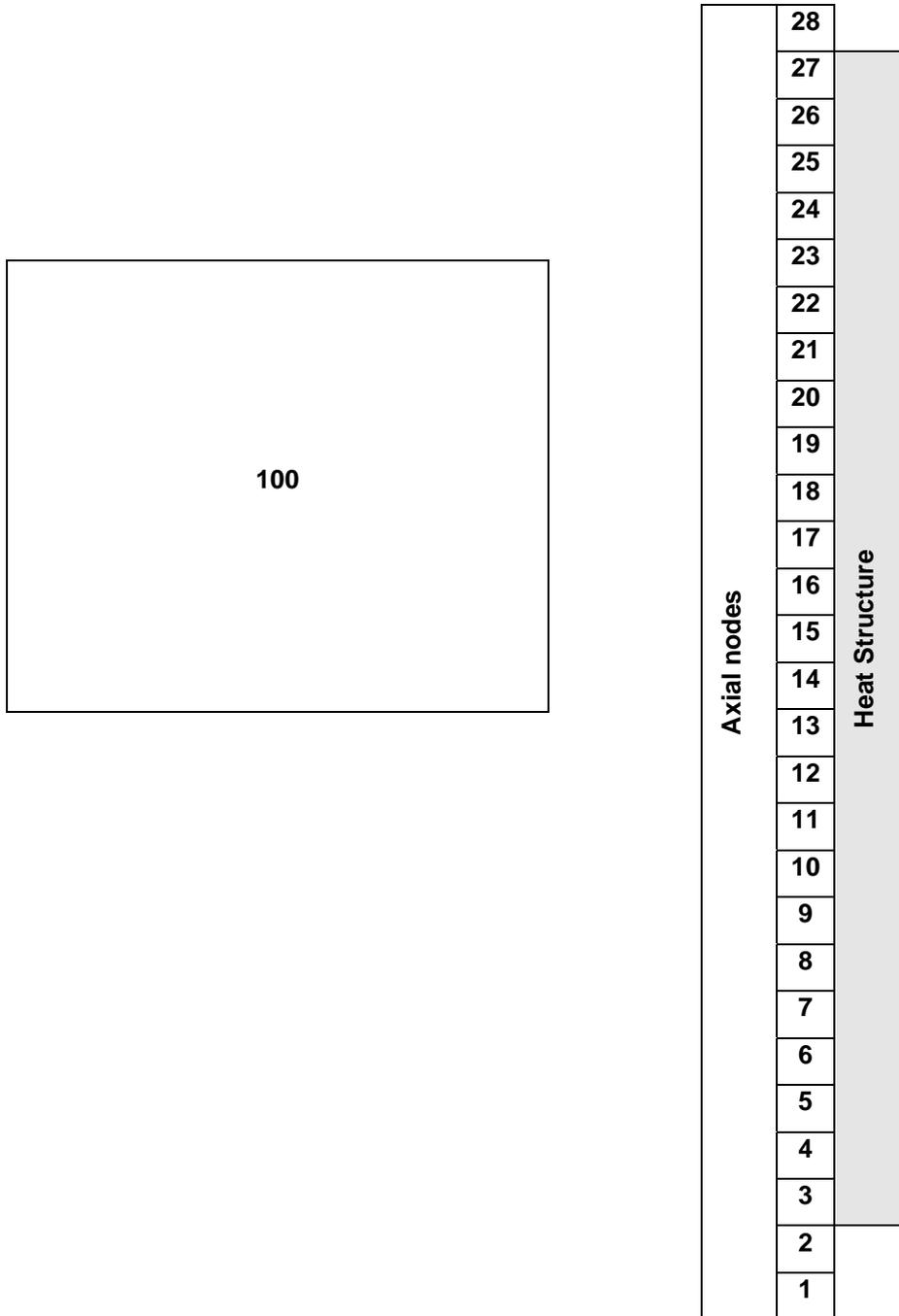


Figure 3: Esquema de la nodalización del modelo SIMPLE TRACE.

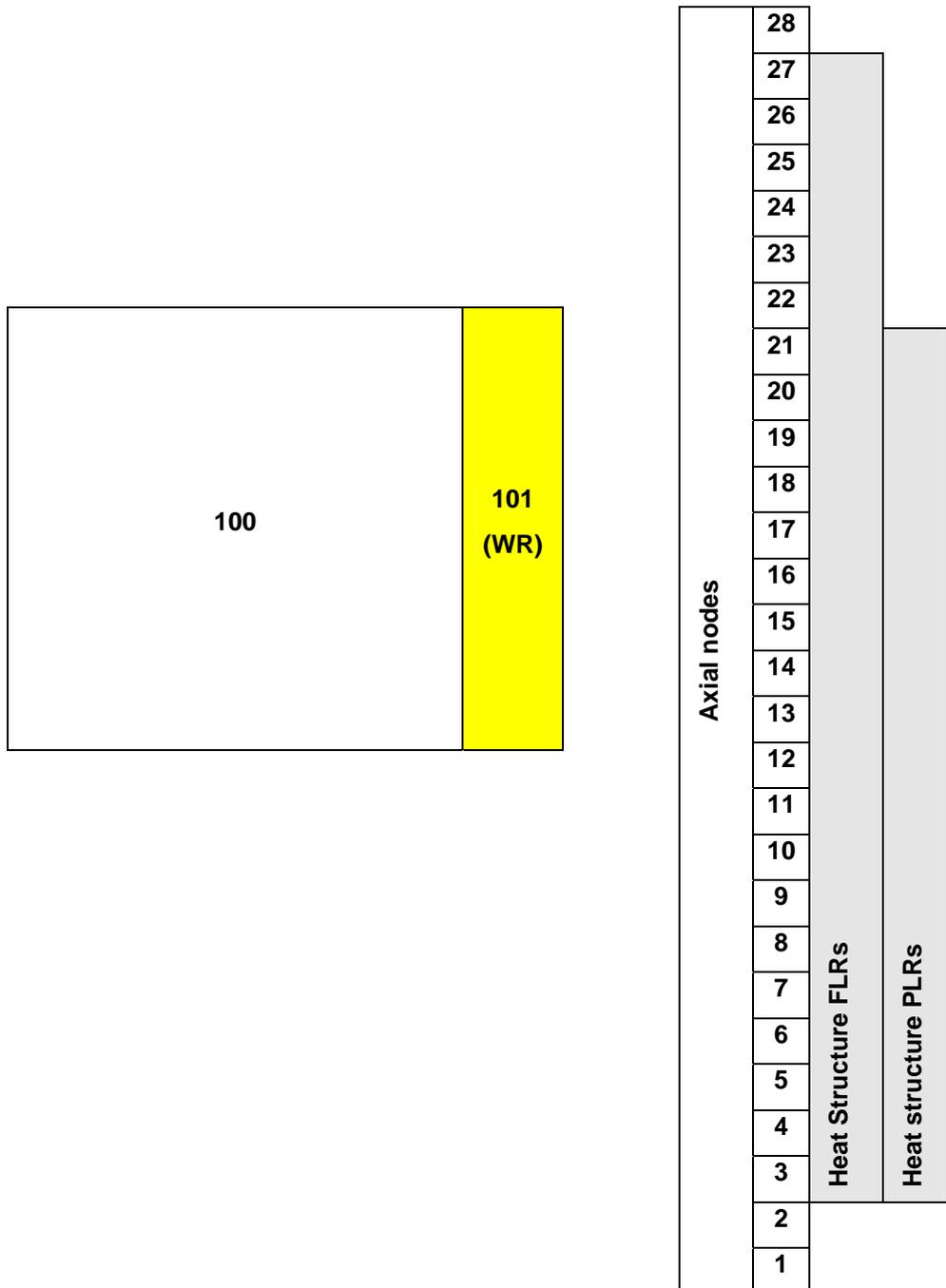


Figure 3: Esquema de la nodalización del modelo ADVANCE TRACE.

El modelo de PARCS es el mismo para ambos códigos acoplados, CTF/PARCS y TRACE. Cada noda axial de los modelos termohidráulicos está conectado a un nodo neutrónico a través del esquema de acople que proporciona la correspondiente realimentación de variables entre códigos. La agrupación de los dos nodos axiales inferiores, así como el superior se representan como reflector en el modelo neutrónico. También cabe remarcarse que PARCS utiliza condiciones de simetría radialmente y de flujo nulo en la parte superior e inferior.

3. RESULTADOS DEL ESTACIONARIO

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones y las diferencias observadas entre los resultados obtenidos con ambos códigos y los modelos desarrollados. En las figuras 5-13 se presenta una comparación de las principales variables termohidráulicas obtenidas con los tres modelos y los códigos acoplados CTF/PARCS y TRACE.

Como puede observarse en la figura 5, los perfiles axiales obtenidos son considerablemente diferentes. Los modelos de CTF y ADVANCED de TRACE muestran mayores potencias pico en el nodo 16, que coincide con el fin de las varillas de longitud parcial. Los resultados se pueden explicar por el diferente nivel de detalle de los modelos y códigos al representar las varillas de longitud parcial y la consideración de la existencia de la barra de agua en los modelo ADVANCE de TRACE y CTF.

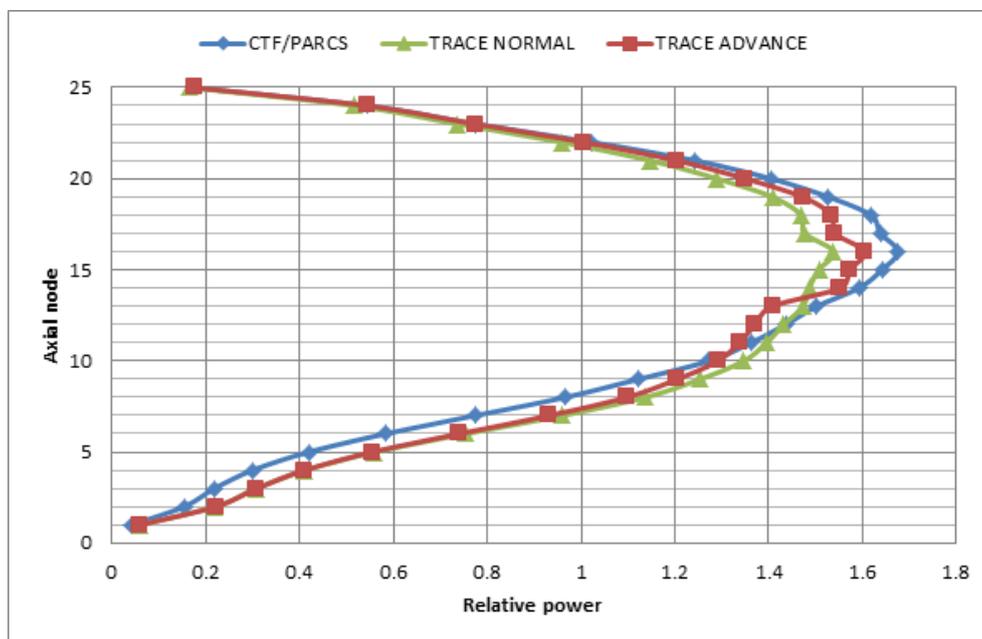


Figura 5: Comparación del perfil axial de potencia.

La figura 6 muestra una considerable discrepancia entre la caída de presión calculada por ambos códigos termohidráulicos. El código CTF predice una mayor caída de presión, alrededor de 0.14MPa, mientras que los dos modelos de TRACE predicen alrededor de 0.1MPa. Ya que no se han cuantificado las pérdidas de presión locales, por espaciadores, la explicación de dichas diferencias vendría dada por los diferentes modelos y correlaciones utilizadas por los códigos para calcular la fricción con la pared y la interfacial.

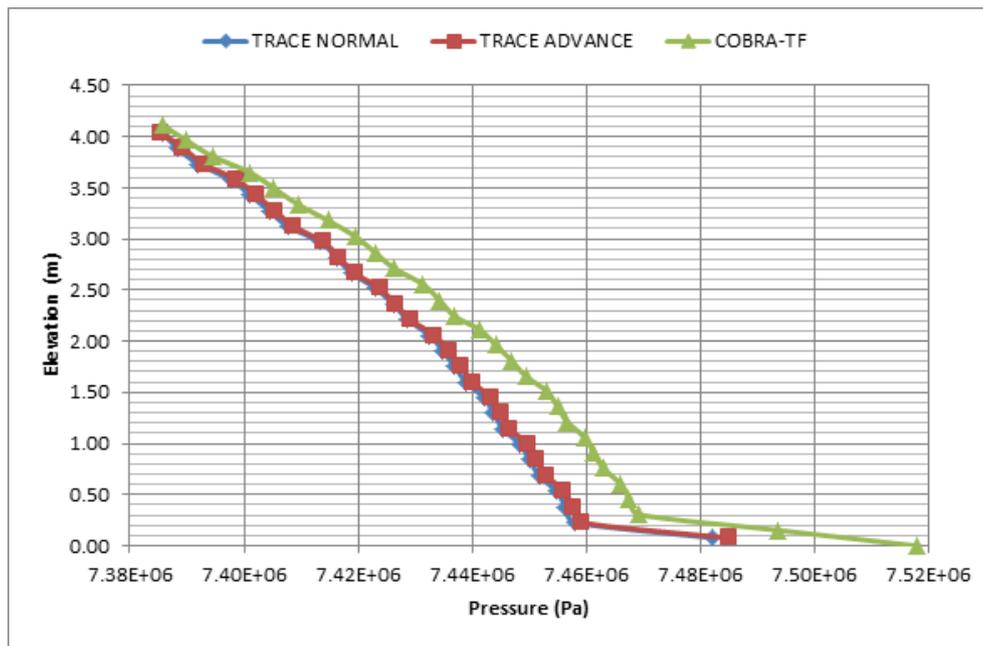


Figura 6: Comparación del perfil axial de presión.

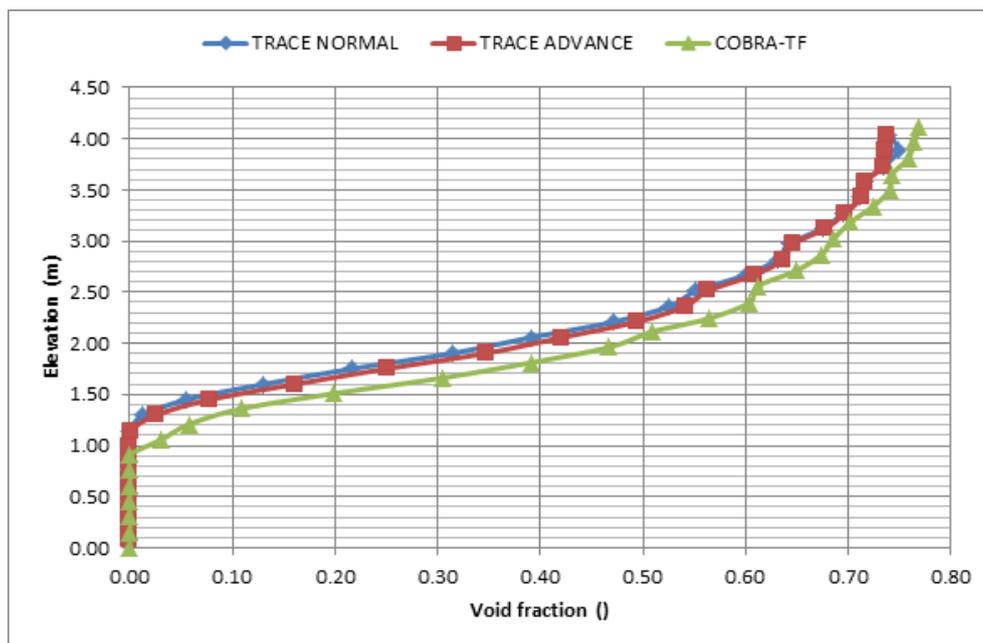


Figura 7: Comparación del perfil axial de fracción de huecos.

Las diferencias en la predicción de la fracción de huecos está relacionada con las anteriormente comentadas diferencias en la caída de presión y perfil axial de potencia. CTF predice una mayor fracción de huecos, principalmente en la parte intermedia e inferior del elemento combustible, porque la presión es menor a la que calcula TRACE. Además en las figuras 8 y 9 se presentan los perfiles de temperatura y densidad del líquido en función de la elevación, que presentan ligeras diferencias entre los resultados obtenidos con ambos códigos.

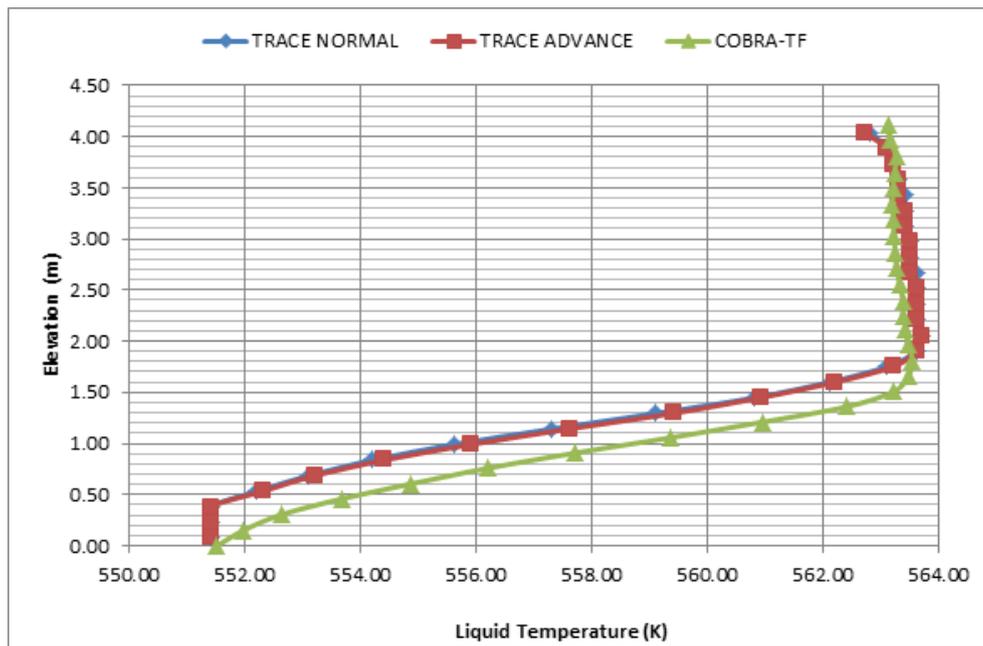


Figura 8: Comparación de los perfiles de temperatura del líquido.

Otro aspecto a tener en cuenta en los resultados es la diferencias en el perfil de velocidades calculados por CTF y TRACE. Como se muestra en las figuras 10 y 11, CTF predice velocidades más altas, tanto para la fase líquida como vapor, desde el punto en el que se establece el régimen bifásico. Este comportamiento puede deberse a numerosos factores, diferencias en la formulación de las ecuaciones en el código de subcanal, que tiene en cuenta flujos cruzados y efectos tridimensionales en el transporte de momento, diferencias en los modelos de fricción anteriormente comentados, y diferentes predicción de regímenes del fluido debido a las diferencias en la fracción de huecos calculadas.

La figura 12 presenta el perfil de temperaturas del líquido en calculados para el modelo ADVANCE de TRACE y el modelo de CTF. Como se puede apreciar, la temperatura alcanzada por el refrigerante que circula a través de la barra de agua es similar para ambos casos.

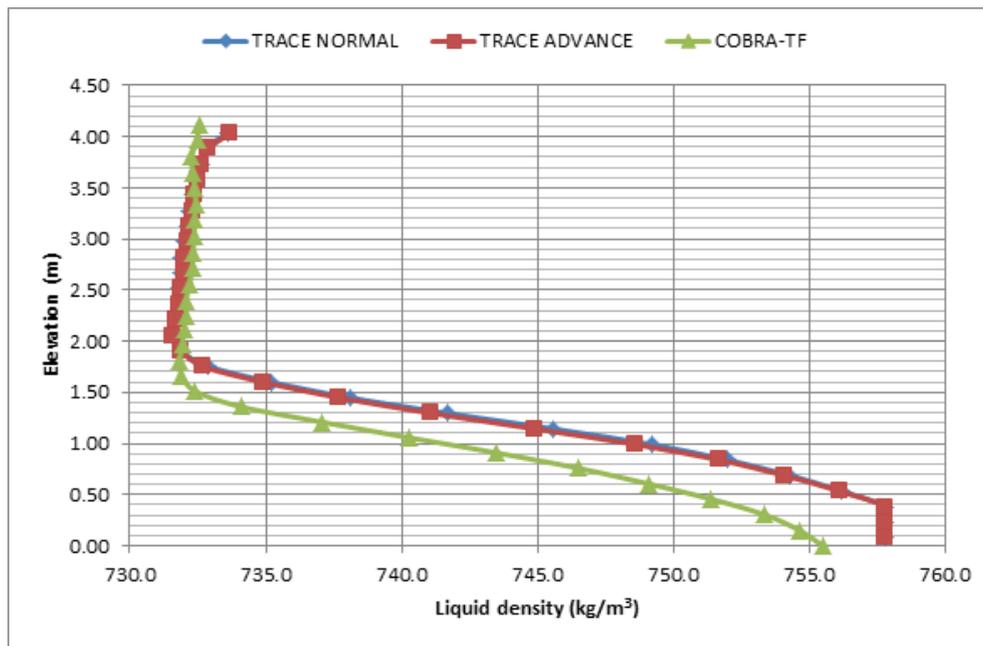


Figura 9: Comparación de los perfiles de densidad del líquido.

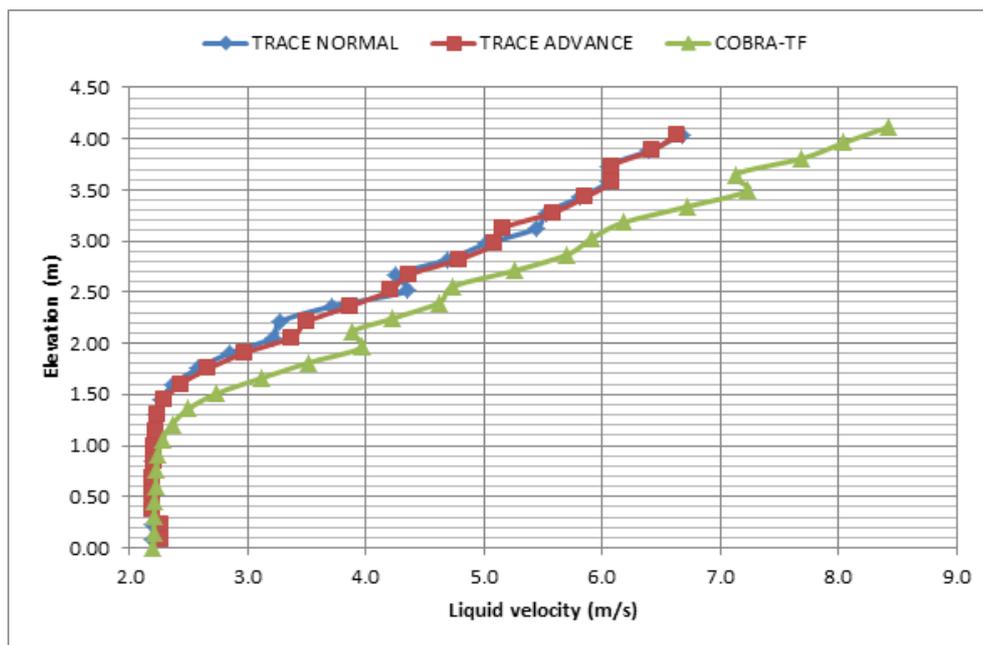


Figura 10: Comparación de los perfiles de velocidad del líquido.

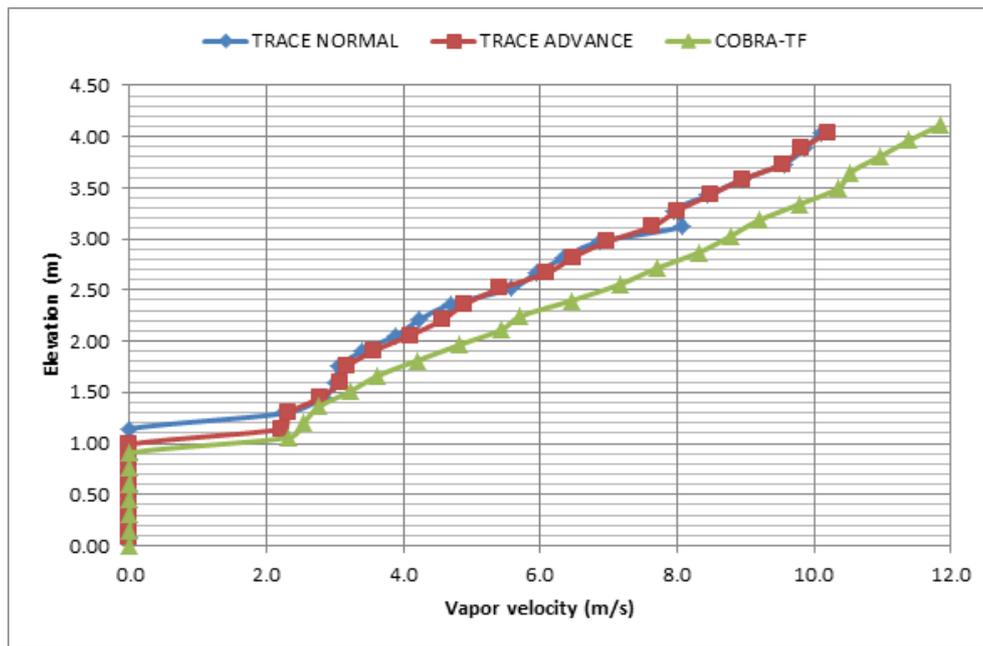


Figura 11: Comparación de los perfiles de velocidad del vapor.

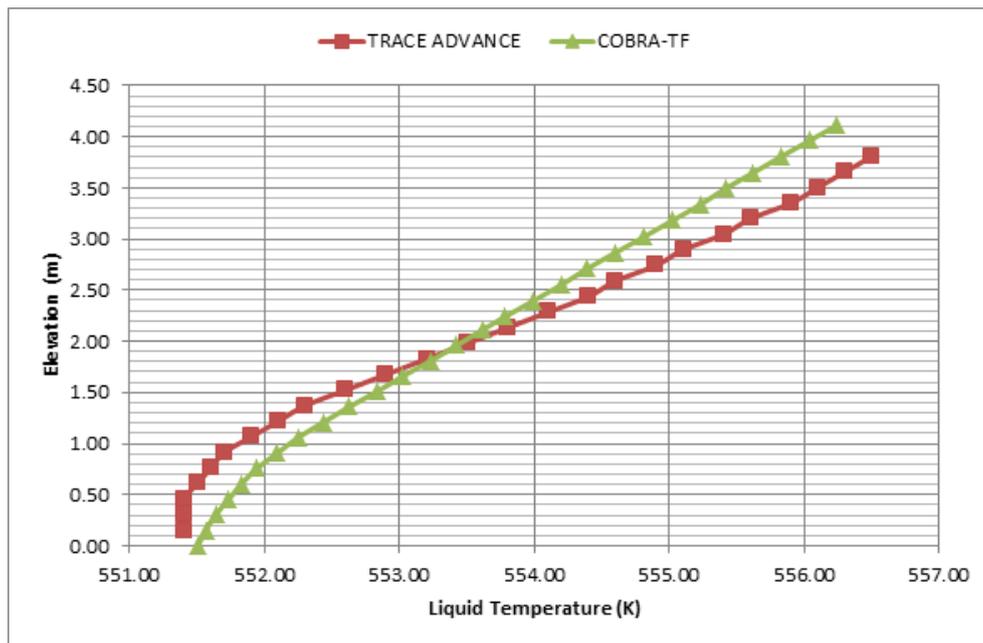


Figura 12: Comparación de los perfiles de temperatura en la barra de agua.

4. RESULTADOS DEL TRANSITORIO

Finalmente, en este apartado se presentan los resultados obtenidos durante el transitorio acoplado de inyección realizado. En la figura 13 se presenta la perturbación aplicada durante el transitorio, mientras que en las figuras 14 y 15 se presenta una comparación de los resultados obtenidos con el modelo ADVANCED de TRACE y CTF, para la presión en la entrada y la fracción de huecos en la salida.

Los resultados, como era de esperar, están desvirtuados por las diferencias en las caídas de presión y demás parámetros existentes en el estacionario. No obstante cabe decirse que el comportamiento de CTF es más estable, presenta menos oscilaciones en las

variables, que TRACE. Y la oscilación tras la perturbación está representada de manera más abrupta en los resultados de CTF, debido a la formulación de las ecuaciones de estado y al diferente esquema numérico de los códigos.

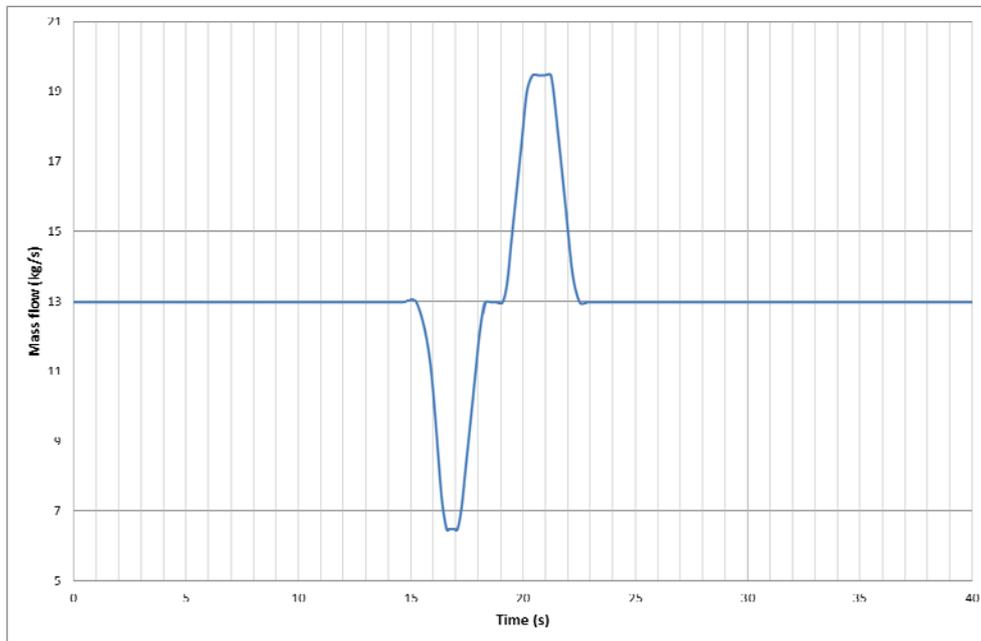


Figura 13: Perturbación aplicada en el caudal de alimentación.

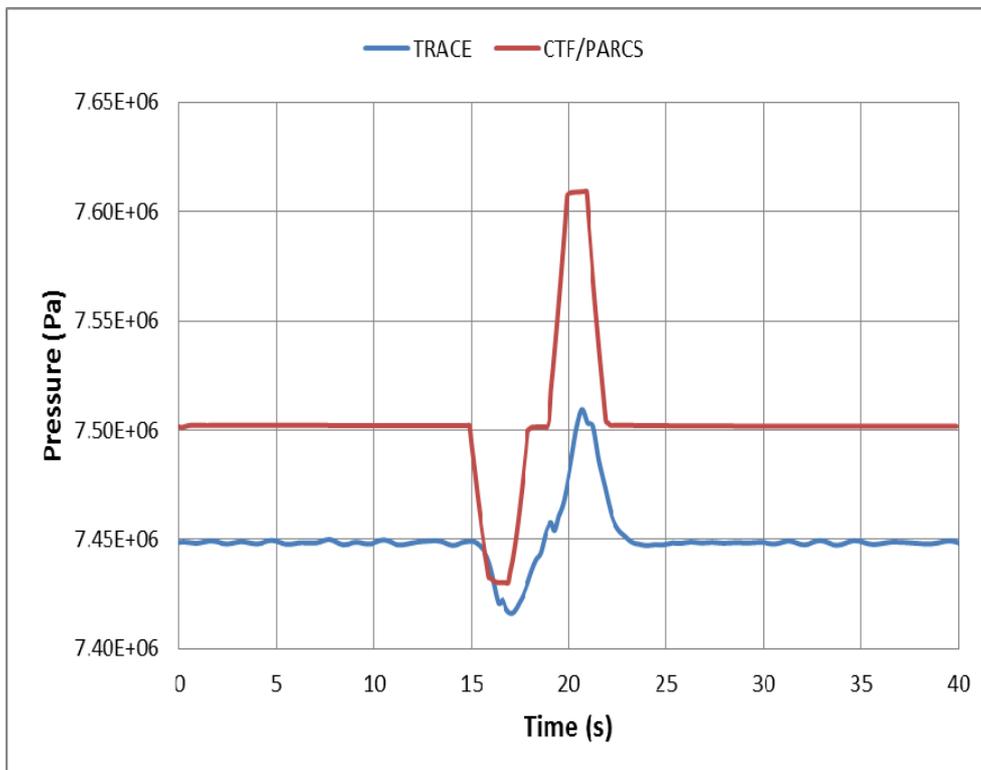


Figura 14: Comparación de la evolución de la presión a la entrada.

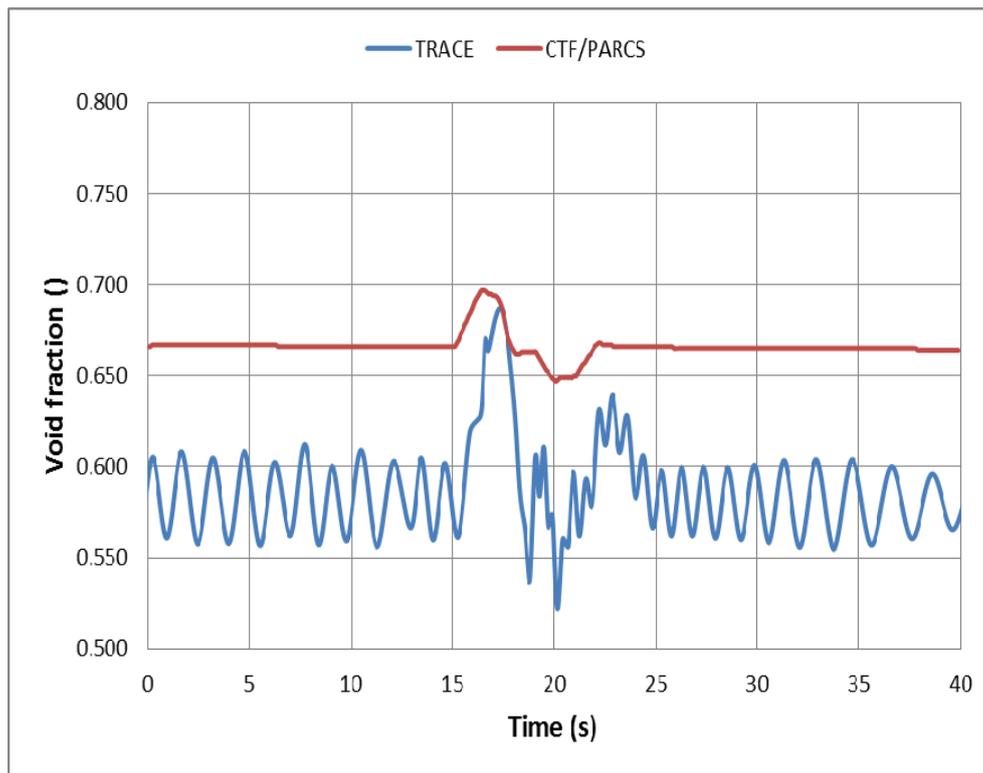


Figura 15: Comparación de la evolución de la fracción de huecos a la salida.

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado una comparación entre los códigos acoplados CTF/PARCS y TRACE utilizando un moderno elemento combustible tipo BWR de matriz 10 por 10. Los resultados obtenidos con ambos modelos de TRACE (SIMPLE y ADVANCED) muestran tendencias muy similares. Por otra parte, los resultados obtenidos con el código de subcanal CTF presentan ligeras diferencias en los resultados del estacionario. Los resultados de CTF muestran mayores caídas de presión a lo largo del elemento y predicen una fracción de huecos superior a la calculada por TRACE. Estas diferencias pueden explicarse al diferente grado de fidelidad del código CTF, que tiene en cuenta efectos tridimensionales y flujos cruzados a lo largo de la longitud del combustible, cambios geométricos a nivel de subcanal (varilla de combustible), pero también al uso de diferentes modelos y correlaciones en ambos códigos comparados.

Para entender mejor el diferente comportamiento de ambos códigos (TRACE y CTF) simulando modernos elementos combustibles tipo BWR, sería deseable realizar estudios más amplios que tengan en cuenta los diferentes modelos y correlaciones utilizados por ambos códigos, y realizar comparaciones con resultados experimentales. De hecho, este estudio podría considerarse un primer intento de mostrar la diferente capacidad de los códigos de sistema y subcanal para representar elementos combustibles BWR con alto nivel de detalle, y los resultados obtenidos en cada aproximación realizada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente patrocinado por Iberdrola Generación Nuclear.

REFERENCIAS

- 1) T. Downar, D. Lee, Y. Xu, T. Kozlowski, J. Staundenmier, "PARCS v2.7 US NRC Core Neutronics Simulator" (2006).
- 2) COBRA/TRAC – "A Thermal-Hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems. Equations and Constitutive Models". **Vol. 1. NUREG/CR-3046 PNL-4385** (1983).
- 3) COBRA/TRAC – "A Thermal-Hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems. Users' Manual". **Vol. 3. NUREG/CR-3046 PNL-4385** (1983).
- 4) Abarca, T. Barrachina, R. Miró, G. Verdú, "A Procedure for Coupled Thermal-hydraulic Subchannel and Neutronic Codes Using COBRA-TF and PARCS". *INAC* (2011).