

Análisis de estabilidad de Peach Bottom NPP mediante TRACE/PARCS

Consuelo Gómez-Zarzuela

Universitat Politècnica de València
Camí de Vera s/n, 46021, València, Spain
congoque@etsii.upv.es

**Consuelo Gómez-Zarzuela, Agustín Abarca, Teresa Barrachina, Rafael Miró,
Gumersindo Verdú**

Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)

Universitat Politècnica de València
Camí de Vera s/n, 46021, València, Spain
congoque@etsii.upv.es, tbarrachina@isirymp.upv.es, aabarca@isirymp.upv.es,
rmiro@isirymp.upv.es, gverdu@isirymp.upv.es

RESUMEN

En las últimas décadas han tenido lugar diversos eventos de inestabilidad en distintas centrales tipo BWR debido a la complejidad de la reacción de dichas centrales. Algunos de estos eventos han sido provocados de forma controlada durante test mientras que otros han tenido lugar durante operación normal de forma incontrolada. Se conocen comúnmente tres tipos de inestabilidades en BWR: Inestabilidades debidas a un fallo en el Sistema de control, inestabilidades en un canal termohidráulico e inestabilidades de acoplamiento neutrónico-termohidráulico. Cuando éstas últimas ocurren, existen dos modos de oscilación que pueden ser observados a través de los canales, oscilación de todo el núcleo o en fase y oscilación regional o fuera de fase.

Debido a que realizar experimentos empíricos en centrales nucleares implica grandes dificultades, se requiere el uso de códigos de sistema termohidráulicos y neutrónicos acoplados para poder simular escenarios complejos, como aquellos en los que tiene lugar una inestabilidad acoplada. En particular, el presente trabajo se ha realizado mediante el uso del código de sistema termohidráulico TRACE acoplado con el código neutrónico PARCS.

El objetivo del presente trabajo es representar mediante dichos códigos la fenomenología que tiene lugar en la central nuclear de Peach Bottom Unit-2 cuando opera en un determinado punto de su mapa potencia-caudal. Dicho punto, llamado PT_UPV, se sitúa en la región de exclusión.

El núcleo de reactor se ha modelado mediante 72 canales termohidráulicos, 71 representan el núcleo activo y uno representa el *bypass*. Con este *mapping*, se evita la posibilidad de condicionar la configuración de la oscilación. Por otro lado, se consigue una buena precisión en un tiempo computacional aceptable.

Una vez se ha realizado la simulación, los resultados se han comparado con los obtenidos en un trabajo anterior en el que se representó el mismo caso pero mediante los códigos acoplados RELAP5/PARCS. Dicho trabajo fue validado y por ello nos sirve de referencia para validar el procedimiento efectuado mediante TRACE/PARCS.

INTRODUCCIÓN

La estabilidad en centrales tipo BWR ha sido un tema de constante preocupación desde el punto de vista de la seguridad y el diseño desde sus inicios. La adopción de márgenes de seguridad y procedimientos de operación para evitar la región inestable ha limitado significativamente los problemas de seguridad [1], [2].

En lo relativo a la seguridad BWR, el tipo más importante de inestabilidades de potencia es aquel que envuelve tanto la termohidráulica como la neutrónica de la central. Éste tipo de inestabilidad implica dos lazos de realimentación, por un lado, la realimentación neutrónica, donde los cambios en la reactividad son debidos a variaciones en la fracción de huecos, y por otro la realimentación termohidráulica, que afecta al caudal de recirculación de la entrada y a la caída de presión. En este lazo, al ocurrir una inestabilidad, el caudal que atraviesa los canales se vuelve inestable y comienza a oscilar debido a una realimentación positiva de la presión, por ejemplo, o a una onda de densidad. A su vez, dentro de este tipo, se pueden encontrar dos clases de inestabilidades: Inestabilidades es fase o de núcleo completo, en las cuales todo el núcleo oscila a la misma frecuencia, e inestabilidades fuera de fase o regionales, en las cuales, mientras la potencia en una parte del núcleo crece, en la otra mitad decrece.

A lo largo de los años se han desarrollado diferentes códigos para representar los fenómenos que tienen lugar durante dichas inestabilidades para así obtener un conocimiento en profundidad de la dinámica del reactor y de cómo ésta reacciona en estos escenarios. Uno de los últimos códigos desarrollados por la USNRC en este sentido es el código de sistema termohidráulico TRACE, el cual, acoplado con PARCS (código neutrónico), permite la simulación de inestabilidades neutrónicas-termohidráulicas. No obstante, este procedimiento está aún en periodo de validación.

El objetivo de este trabajo es contribuir a la validación de esta metodología. Con este propósito, se ha seleccionado uno de los test de estabilidad a bajo caudal realizado en la central nuclear de Peach Bottom Unit-2. Los resultados obtenidos se han comparado con los obtenidos para el mismo caso pero representado mediante los códigos acoplados RELAP5/PARCS. Dicho trabajo fue validado en su momento.

El presente trabajo está organizado como sigue: En el capítulo 1 se incluye una descripción del modelo utilizado. En el capítulo 2 se muestran los resultados junto con sus comentarios y explicaciones. Finalmente, en el capítulo 3 se detallan las conclusiones.

1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

1.1 Peach Bottom LFST

En 1977 se realizaron en la central nuclear de Peach Bottom Unit-2 cuatro test de estabilidad a bajo caudal (*Low Flow Stability Test*, LFST) al final de su ciclo 2 para caracterizar el comportamiento inestable de la central. Las condiciones en las que se realizaron los distintos test se indican en la Tabla 1.

Se ha seleccionado el punto de operación PT3 como punto de partida del presente trabajo. El punto PT3 se encuentra en los límites de la región estable del mapa potencia-caudal de la central, como se puede observar en la figura 1.

Tabla 1: Condiciones de operación en los LFST [3].

Test Number	Reactor Power		Core Flow Rate		Core Pressure
	(MW _t)	(% Rated)	(kg/s)	(% Rated)	(MPa)
PT1	1995	60.6	6753.6	51.3	6.89
PT2	1702	51.7	5657.4	42.0	6.84
PT3	1948	59.2	5216.4	38.0	6.93
PT4	1434	43.5	5203.8	38.0	6.89
<i>PT_UPV</i>	<i>1997</i>	<i>60.6</i>	<i>4660.7</i>	<i>34</i>	<i>7.02</i>

.Así pues, partiendo de PT3, se va a realizar un movimiento de barras de la misma forma que se realizaría en la realidad para desplazar el punto de operación de la central al punto PT_UPV, situado en la región de exclusión. Las condiciones del punto PT_UPV se han indicado también en la tabla 1, aunque no pertenecen al *benchmark*.

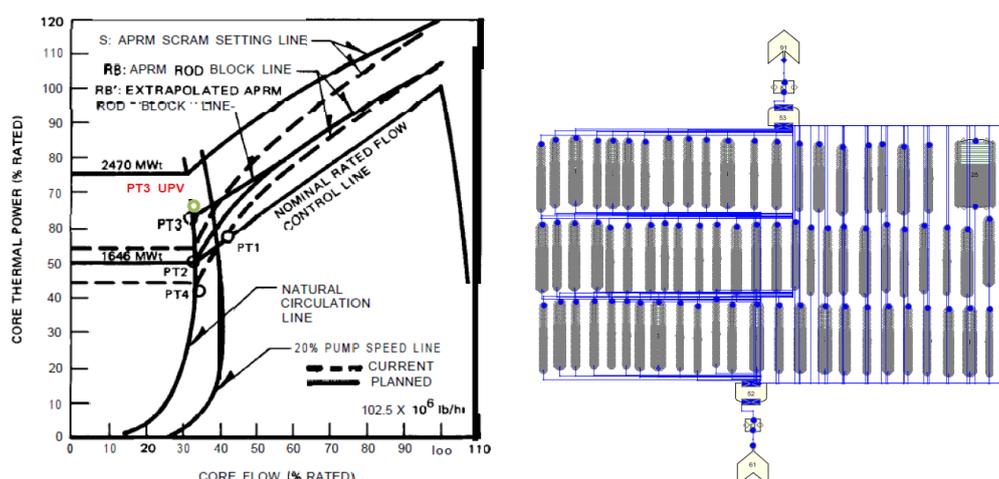


Figura 1: Localización del punto PT_UPV. Figura 2: Representación del modelo en SNAP.

1.2 Descripción del input

Como se ha indicado anteriormente, los códigos utilizados para realizar las simulaciones han sido TRACE v5.0 y PARCS v3.0. El modelo definido incluye sólo el núcleo del reactor.

TRACE es un código *best-estimate* de sistema desarrollado para analizar comportamientos tanto en estado estacionario como transitorios en centrales de agua ligera. Los caudales de agua/vapor se determinan mediante la resolución de seis ecuaciones diferenciales parciales. El conjunto de ecuaciones consiste en las ecuaciones de conservación de la masa, energía y momento para líquido y gas por separado [4].

El núcleo del reactor se ha modelado mediante 72 canales termohidráulicos (elemento *chan* en TRACE), 71 representan el núcleo activo mientras que 1 representa el *bypass* del

núcleo. Además de los distintos *chans*, se han utilizado los componentes *fill* y *break* para definir las condiciones de contorno a la entrada y a la salida respectivamente (caudal máximo a la entrada y presión y fracción de huecos a la salida). La figura 2 es una representación gráfica del modelo obtenido a partir de la herramienta SNAP.

La representación del núcleo seleccionada busca evitar la posibilidad de condicionar la configuración de la oscilación. El objetivo es que el perfil oscilatorio no pueda verse afectado. De esta forma, la representación de la conexión entre los nodos termohidráulicos y los neutrónicos, también conocida como *mapping*, se ha dividido en cuatro cuadrantes en función del primer y segundo armónicos de la potencia (modos Lambda), obtenidos previamente mediante el código VALKIN, y en función también de la potencia del elemento y el mapa de combustible. La figura 3 representa el mapa termohidráulico resultante de aplicar dicho procedimiento.

Las propiedades de los combustibles se han tomado del caso de referencia, el modelo de RELAP5/PARCS. El núcleo se ha dividido en 64 nodos, donde el primer y último nodo de todos los canales representa los reflectores inferior y superior respectivamente. La figura 4 muestra la relación entre los nodos axiales termohidráulicos y los neutrónicos, siendo estos últimos 26 nodos axiales (24 activos).

En lo que respecta al código neutrónico, se ha seleccionado un conjunto de secciones eficaces de 435 composiciones. Las condiciones del Xenón consideradas para esta simulación son las mismas que proporciona el código SIMULATE-3.

El método de cálculo utilizado por el código PARCS es el *HYBRID*. Éste método es una combinación de los métodos *ANM/NEM* del mismo código. Para el código TRACE, el método de cálculo seleccionado es el semi-implícito.

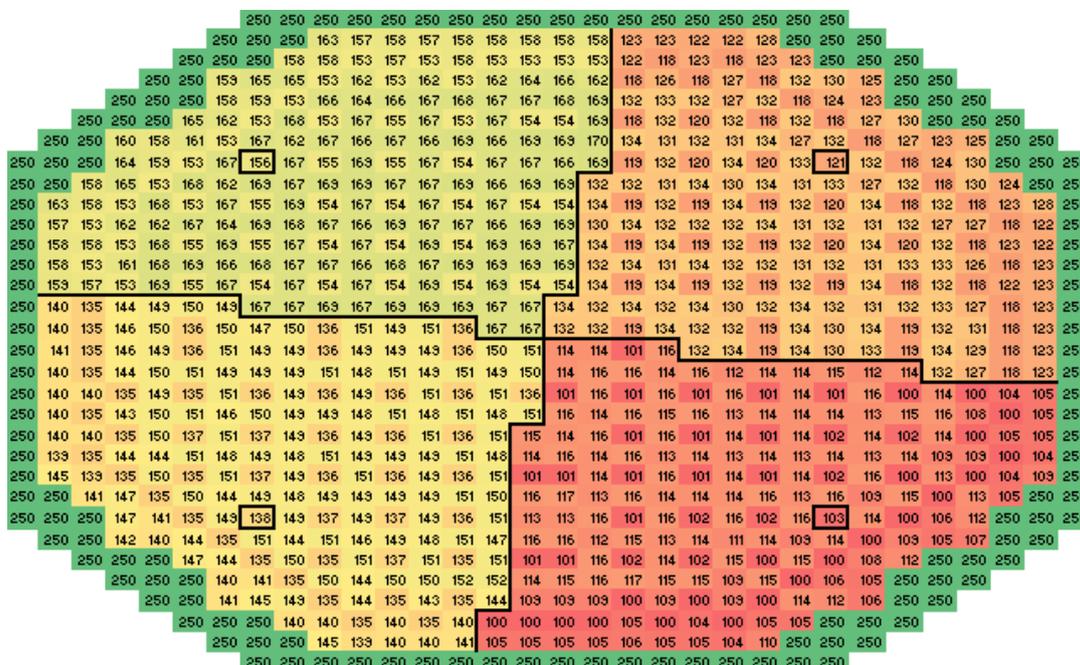


Figura 3: Mapa termohidráulico.

64		26
63		25
⋮		⋮
47		13
46		
45		
44		
43		
42		12
⋮		⋮
5		2
4		
3		
2		
1		1

TRACE PARCS

Figura 4: Relación entre los nodos termohidráulicos y los neutrónicos.

2 RESULTADOS

2.1 Estado estacionario

El primer paso en el proceso es asegurar que las condiciones del punto de operación PT3 se cumplen, ya que en este caso son las condiciones iniciales del modelo. Para ello, se ha buscado obtener la misma distribución de caudales por los canales que se tiene en el caso de referencia. Para conseguir dicha distribución, se han ajustado los coeficientes de fricción del *bypass*. Para comprobar la similitud de las condiciones iniciales, se ha incluido una comparación de la potencia axial para el estado estacionario entre el modelo de referencia y el del presente trabajo (figura 5).

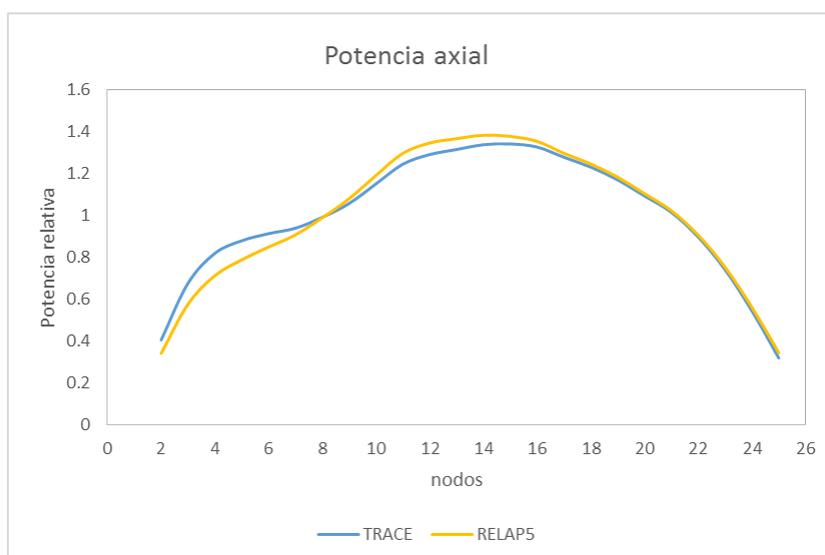


Figura 5: Perfil de potencia axial en el estado estacionario

Se puede observar que el caso de referencia alcanza una potencia máxima mayor que la de TRACE, mientras que la pendiente inicial comienza con valores iniciales más bajos, pero es monótona creciente en todo momento. La potencia obtenida por TRACE tiene cambios de pendientes más pronunciados en la mitad inferior del reactor. Cabe resaltar que los factores de fricción utilizados son los mismos, por lo que se puede deducir que el cálculo de la caída de presión debida a la fricción difiere entre los dos códigos.

2.2 Resultados del transitorio

La simulación parte del punto PT3 y después de 10 segundos, las condiciones de operación se desplazan introduciéndose en la región de exclusión y estableciéndose en un nuevo punto llamado PT_UPV. Para representar dicho desplazamiento, se simula un movimiento de barras de la misma forma que se realizaría en una central nuclear real. De esta forma, los bancos son progresivamente extraídos hasta que todos los bancos están fuera casi en su totalidad. El movimiento de barras dura 5 segundos [5].

Previamente al movimiento de barras, se deja un transitorio nulo de 10 segundos, así, el movimiento comienza a los 10 segundos y termina a los 15 segundos del inicio de la simulación. Después, el transitorio continúa libremente 45 segundos más.

Uno de los parámetros más importantes es la potencia del reactor. La figura 6 muestra la potencia generada para el caso de TRACE y para el de RELAP5.

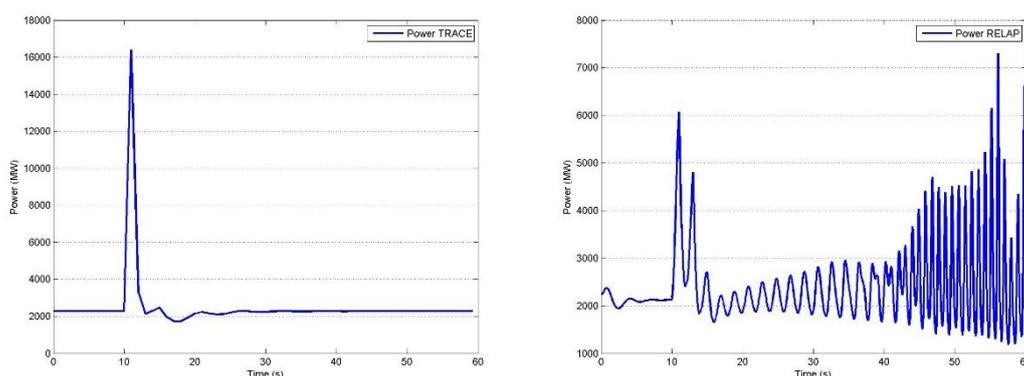


Figura 6: Evolución de la potencia total en el caso de TRACE (dcha.) y RELAP5 (izqda.).

Observando las figuras, se puede distinguir el momento en que la perturbación comienza ($t=10$ s), pero después del movimiento de las barras de control, la oscilación en TRACE es muy subamortiguada y en poco tiempo vuelve a la estabilidad. En cambio RELAP5 representa una oscilación cada vez más inestable.

La principal razón del comportamiento estable de TRACE es la difusión numérica, implícita al código. Debido a la necesidad de lidiar con dicha difusión, se ha reajustado la malla de nodos y el tiempo de paso, de forma que el número de Courant sea lo más próximo a 1 posible, siempre por debajo de dicho límite [6]. Es por ello que el número de nodos se ha reajustado a 64 (el caso de referencia tiene 26 nodos), aunque esto no ha sido suficiente para “excitar” el caso y obtener oscilaciones. Por otro lado, el paso de tiempo máximo se ha establecido en $\Delta t=0.01$ s, mientras que el método de cálculo utilizado ha sido el método semi-implícito, que implica menor difusión numérica que el método SETS.

En el análisis de resultados, tanto las condiciones de entrada como las de salida se han tenido en cuenta. Se han estudiado cuatro canales, uno por cada cuadrante. La selección de dichos canales se ha basado en la situación, pues se han buscado aquellos que están centrados

dentro de su cuadrante para evitar posibles influencias de la periferia, y en el número de canales agrupados, pues se han usado canales individuales, para ver la evolución unitaria (figura 3).

A la hora de la representación del resto de resultados, éstos se mostrarán únicamente hasta el segundo 40, pues a partir de dicho momento la simulación en RELAP5 se vuelve caótica debido a que las condiciones termohidráulicas se vuelven extremas y dichos valores no se encuentran en las tablas de las secciones eficaces.

La Figura 7 representa la evolución de la potencia generada por los distintos *chans* seleccionados, tanto en TRACE como en RELAP5. La comparación se realiza con el correspondiente de la misma diagonal, debido a que el caso de referencia nos permite conocer el perfil de la posible inestabilidad.

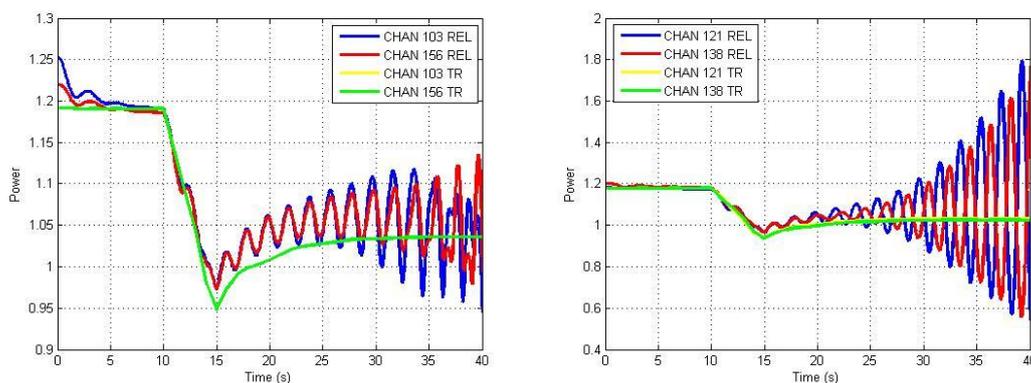


Figura 7: Comparación de la evolución de la potencia generada por *chans* unitarios.

Las curvas roja y azul representan la simulación en RELAP5 mientras que la verde y amarilla se corresponden con TRACE. La figura de la derecha compara los *chans* 103 y 156 y la imagen de la izquierda compara los *chans* 121 y 138. A pesar de la ausencia de oscilaciones por parte de TRACE, que ya se ha visto en la potencia total, la evolución que siguen los dos códigos es similar. Se puede decir que el valor al que converge TRACE es equivalente al valor medio de las oscilaciones en RELAP5.

Las Figura 8 y Figura 9 muestran la misma comparación para el caso del caudal másico. En este caso, las diferencias se acentúan. En TRACE, el caudal se mantiene en un valor inferior al de RELAP en todo momento, excepto durante el periodo que dura la perturbación. Además, a la salida se observa un pico excesivamente alto en TRACE en comparación con RELAP5.

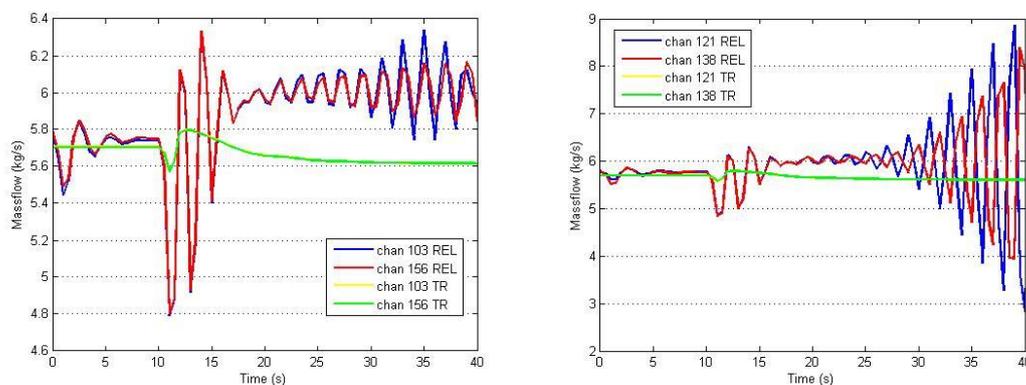


Figura 8: Comparación de la evolución del caudal másico de entrada.

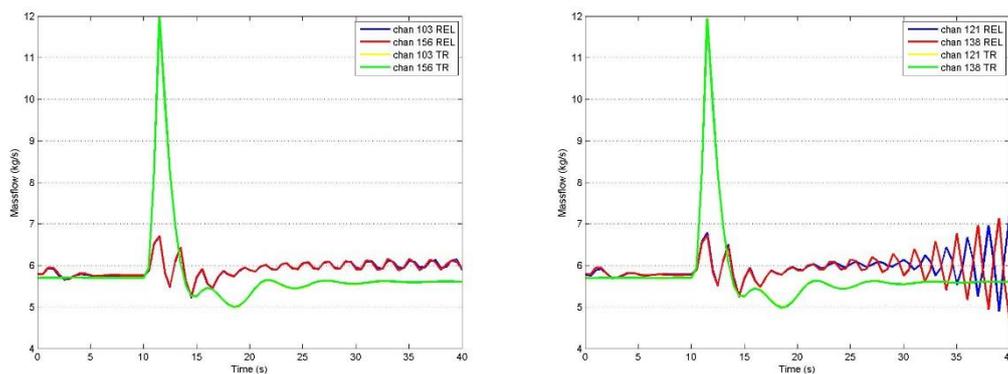


Figura 9: Comparación del caudal másico de salida.

Se ha analizado otros parámetros para obtener más información acerca de la ausencia de oscilación en la simulación de TRACE. La Figura 10 muestra la evolución de la fracción de huecos a la salida en los *chans* 103 and 121. La evolución en los *chans* 138 y 156 es equivalente a la mostrada.

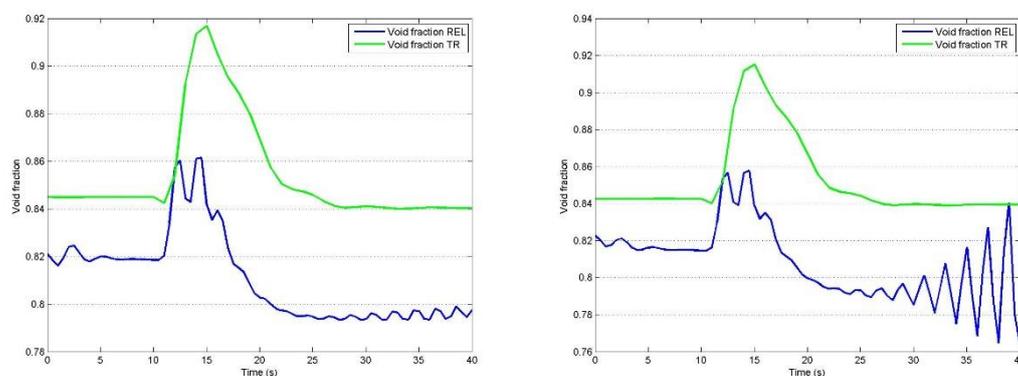


Figura 10: Comparación de la evolución de la fracción de huecos a la salida para los *chans* 103 (izqda.) y 121 (dcha.).

En este caso, el valor de la fracción de huecos es mayor en TRACE que en RELAP5. Esta diferencia oscila entre un 2% y un 6% en su máximo.

Es interesante analizar la temperatura del moderador también (Figura 11 y Figura 12).

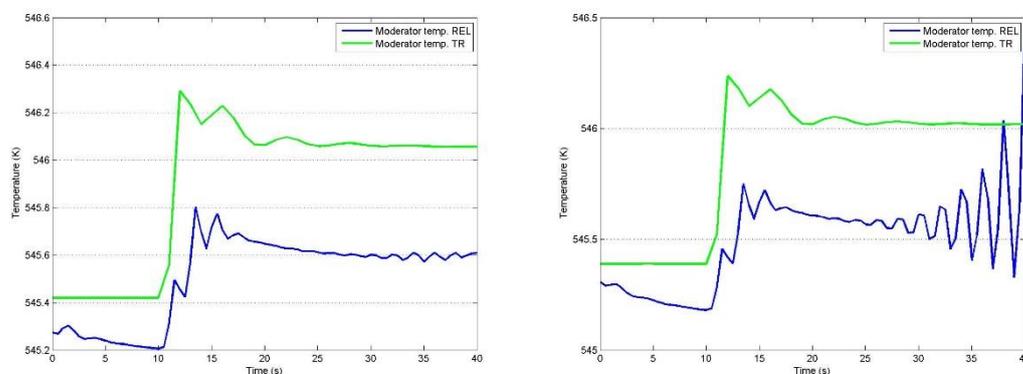


Figura 11: Comparación de la evolución de la temperatura del moderados para los *chans* 103 (izqda.) y 121 (dcha.).

En el caso de la temperatura del moderador a la entrada, la máxima diferencia no alcanza 1K, si bien los valores de TRACE se mantienen por encima de RELAP5. Todo parece indicar que las variaciones van a aparecer en la presión.

La misma diferencia es observada en la temperatura del moderador a la salida. En este caso la temperatura es importante ya que la presión a la salida es condición de contorno y por tanto constante. Así pues, una mayor temperatura del moderador se corresponde con la fracción de huecos analizada anteriormente. En este caso, también llama la atención que, mientras la temperatura en RELAP permanece casi constante, la evolución de TRACE es más pronunciada, reflejándose el momento de la perturbación y la posterior oscilación.

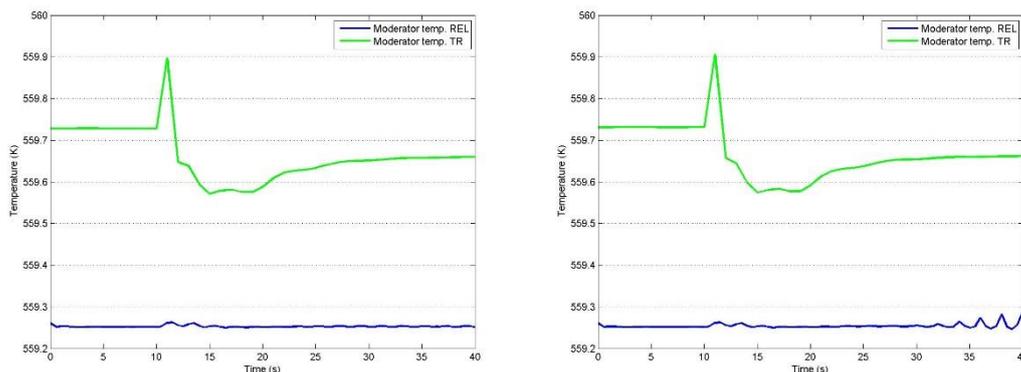


Figura 12: Comparación de la evolución de la temperatura del moderador a la salida en los *chans* 103 (izqda.) y 121 (dcha.).

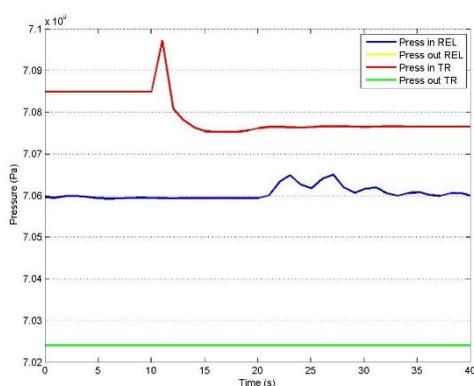


Figura 13: Comparación de la evolución de la presión a la entrada y a la salida.

Para finalizar, se ha analizado la presión. La presión a la salida está solapada, por lo que sólo se observa una línea verde, esto es así debido a la característica de condición de contorno (Figura 13). En lo que respecta a la entrada, la presión en TRACE es mayor que en RELAP, por lo que la caída de presión también es mayor, y consecuentemente, la fracción de huecos es mayor, como se ha visto en la Figura 10.

Dicha diferencia en la presión devuelve el debate a los coeficientes de fricción, ya que TRACE calcula la presión de entrada a partir de la presión de salida más la caída de presión a lo largo de los *chans*. Como la caída de presión de los *chans* depende de los coeficientes de fricción, habrá que reajustar dichos coeficientes para eliminar la diferencia de presiones de entrada entre RELAP y TRACE.

A todo lo anterior hay que añadir que, una característica que diferencia el caso de TRACE del de RELAP5 es el uso de *chans* en lugar de *pipes*. Dicho cambio implica variaciones internas que hay que tener en cuenta y corregir.

3 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha representado un modelo de TRACE para caracterizar la central nuclear de Peach Bottom Unit-2 y realizar un análisis de estabilidad.

El input consiste en un modelo de núcleo formado por 71 canales termohidráulicos más uno que representa el bypass. En cuanto al modelo neutrónico, está formado por un conjunto 435 composiciones que conforman las secciones eficaces. El mapping está basado en la forma espacial de los modos Lambda, obtenidos previamente mediante el código VALKIN, desarrollado en la UPV.

Los análisis de estabilidad se han realizado en el punto PT_UPV situado en la región de exclusión y los resultados se han comparado con un caso previamente validado que representa el mismo caso mediante los códigos RELAP5/PARCS.

Los resultados obtenidos no muestran oscilaciones en TRACE, a diferencia del caso de referencia. Es necesario trabajar en la disminución de la difusión numérica, intentando aproximar más el número de Courant a 1, así como en un mejor ajuste de los coeficientes de fracción.

No obstante, es importante remarcar que este modelo está muy constreñido debido a las condiciones de contorno y las limitaciones de un modelo tan simple. Futuros trabajos añadirán al modelo todos los elementos de la vasija, dotándolo de cierto grado de libertad a algunos parámetros, y que mostrarán una evolución más completa.

REFERENCES

- [1] M. García-Fenoll, A. Abarca, “Study of different perturbations applied on operating conditions of the cycle 14 on Ringhals stability Benchmark with RELAP5/PARCS coupled”, Proc. Int. Nuclear Atlantic Conference, Belo Horizonte, MG, Brazil, October 24-28, 2011.
- [2] Antonella Lombardi, A. Petruzzi, “Analyses of Instability Events in the Peach Bottom-2 BWR Using Thermal-Hydraulic and 3D Neutron Kinetic Coupled Codes Technique”, Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2008.
- [3] Jorge Solis, Kostadin N. Ivanov. “Boiling Water Reactor Turbine Trip (TT) Benchmark. Volume I: Final Specifications”. NEA/NSC/DOC. 2001.
- [4] USNRC, “TRACE V5.0, Theory Manual: Field Equations, Solution Methods and Physical Models”, 2010.
- [5] A. Abarca, T. Barrachina. “Instability Analysis in Peach Bottom NPP using a Whole Core Thermalhydraulic-Neutronic Model with Relap5/Parcs v2.7”. SNA+MC 2010, Tokyo, Japan.
- [6] Yunlin Xu, Thomas Downar. “Application of TRACE/PARCS to BWR stability analysis” Annals of Nuclear Energy 36 (2009) pp. 317-323.