

# Simulación con TRACE5 de una Rotura Pequeña del 1% en la Rama Caliente

Andrea Querol, Sergio Gallardo, Gumersindo Verdú  
Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universitat Politècnica de València  
anquevi@upvnet.upv.es; sergalbe@iqn.upv.es; gverdu@iqn.upv.es

**Resumen** – Durante un transitorio de rotura pequeña con pérdida de refrigerante (SBLOCA) la despresurización puede ser tan lenta que retrase la entrada del sistema de acumuladores, siendo necesaria la actuación del sistema de inyección de alta presión (HPI) para mantener la temperatura del núcleo lo suficientemente baja como para evitar el descubrimiento del núcleo. Con esto se evita el descubrimiento del núcleo y, por tanto, un aumento de la temperatura de vaina (PCT). En este trabajo se ha simulado, con el código termohidráulico TRACE5, el Test 1-2 del Proyecto OECD/NEA ROSA que reproduce una rotura del 1% en la rama caliente de un reactor de agua a presión (PWR). Los resultados obtenidos se comparan con los valores experimentales para estudiar el efecto de la estratificación del líquido en la rama caliente, la geometría y el tamaño de la rotura y el caudal inyectado por el sistema HPI.

## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se ha utilizado el código termohidráulico TRACE5 [1] para simular el Test 1-2 (SB-HL-17 in JAEA) [2], realizado en la instalación experimental LSTF [3]. Dicho experimento reproduce un transitorio SBLOCA del 1% en la rama caliente de un PWR tipo Westinghouse de 4 lazos escalado 1:48 en volumen. Durante este tipo de transitorios, la despresurización puede ser tan lenta que retrase la entrada del sistema de acumuladores, siendo necesaria la actuación del sistema de inyección de alta presión (HPI) para mantener la temperatura del núcleo lo suficientemente baja como para evitar el descubrimiento del núcleo. Con esto se evita el descubrimiento del núcleo y, por tanto, el aumento de la temperatura de vaina (PCT).

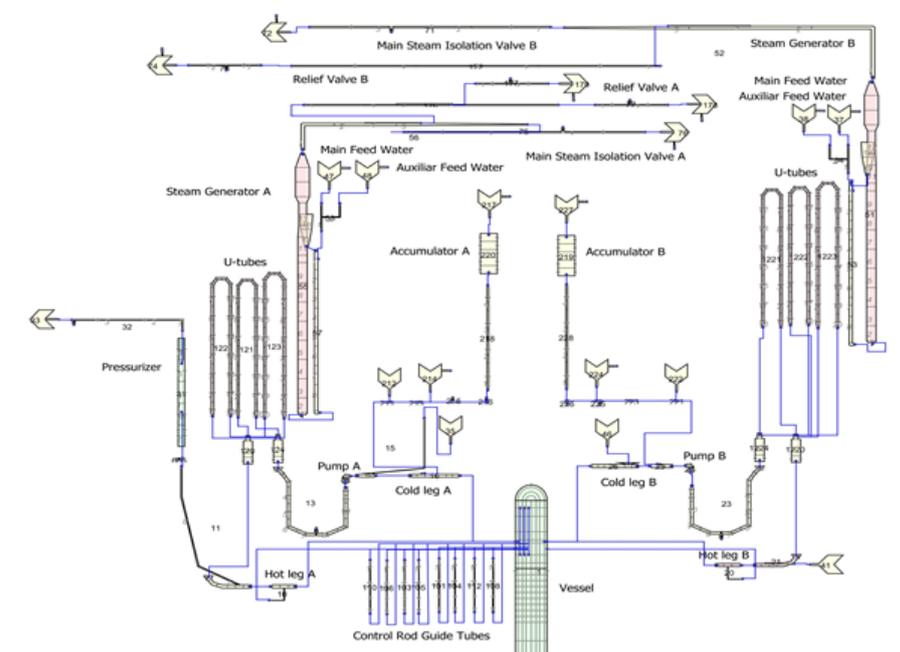
El objetivo del presente trabajo es estudiar los parámetros más importantes para modelar la rotura, entre los que se encuentran la estratificación del líquido, la geometría y el tamaño de la rotura. La estratificación del líquido se ha estudiado mediante la introducción de un componente 3-D para simular la rama caliente en lugar de un componente 1-D TEE. La geometría de la rotura se ha estudiado utilizando dos modelos de rotura: orificio y tobera. Para estudiar el efecto del tamaño de la rotura se han considerado diferentes tamaños. Por último, se ha realizado un análisis variando el caudal del sistema de inyección de alta presión (HPI) desde el valor de actuación en situación normal hasta el fallo total del sistema y se ha estudiado la relación entre el caudal másico del sistema HPI y el inventario de descarga a través de la rotura.

## 2. MODELO DE TRACE5

La instalación experimental LSTF se ha modelado con 82 componentes hidráulicos del código TRACE5 (7 BREAKs, 11 FILLs, 24 PIPEs, 2 PUMPs, 1 PRIZER, 22 TEEs, 14 VALVEs and 1 VESSEL). La Figura 1 muestra la nodalización del modelo utilizando la herramienta informática SNAP (Symbolic Nuclear Analysis Package) [4].

La transferencia de calor se ha simulado mediante 48 componentes HTSTR (tubos en U de los generadores de vapor, potencia del núcleo, calentadores del presionador y pérdidas de calor). 30 componentes HTSTRs simulan las barras de combustible del núcleo y un componente POWER transmite la potencia desde las HTSTR al componente VESSEL.

La vasija se ha modelado con un componente 3-D VESSEL dividido en 19 niveles axiales, 4 anillos radiales y 10 sectores acimutales. Los niveles 1 y 2 corresponden al lower plenum de la vasija. El núcleo se sitúa entre los niveles 3 y 11. El nivel 12 simula el upper core plate. Los niveles del 13 al 15 caracterizan el upper plenum de la vasija. En el nivel 16 se encuentra el upper core support plate. Finalmente, el upper head se define entre los niveles 17 y 19. La vasija está conectada a diferentes componentes 1-D: 8 tubos guía para las barras de control (CRGTs), las ramas calientes de ambos lazos (nivel 15), ambas ramas frías (nivel 14) y el bypass (nivel 15).



**Figura 1. Nodalización del modelo de LSTF con SNAP.**

Para simular la rotura se ha utilizado el modelo tobera (un componente VALVE conectado a un BREAK). Dicho componente BREAK se ha modelado siguiendo las consideraciones del manual de usuarios de TRACE5 [5] para simular las condiciones atmosféricas. Además se ha tenido en cuenta la necesidad de activar el modelo de Choked flow [5] al prever condiciones de flujo crítico.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL TRANSITORIO

El Test 1-2 simula un transitorio de una rotura del 1% en la rama caliente del lazo B, sin presionador, en la instalación experimental LSTF. Dicho transitorio empieza con la apertura del componente VALVE que simula la rotura. Debido a la pérdida de refrigerante a través de la rotura, la presión del sistema primario empieza a caer. Cuando la presión alcanza el punto determinado para activarse la señal de scram, ésta se activa y se produce el scram del reactor, simulado mediante una curva de caída de potencia, y se inicia la curva de parada de las bombas. Simultáneamente, se cierran las válvulas principales de

vapor (MSIVs) y la inyección del agua principal de alimentación finaliza. El transitorio continúa con la activación de la señal de inyección de seguridad cuando la presión del sistema primario disminuye de un determinado valor y a la vez se inicia la inyección de agua auxiliar en el sistema secundario. Cuando la presión del sistema primario alcanza un determinado valor se produce la inyección del sistema de acumuladores. El Test 1-2 finaliza cuando las presiones de ambos sistemas, primario y secundario, se estabilizan.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todos los resultados mostrados en este trabajo están normalizados al valor obtenido en el estado estacionario. El tiempo se ha normalizado según la duración total del transitorio, es decir, 5000 s y se indica como NT.

### 4.1. Modelo 1-D vs modelo 3-D

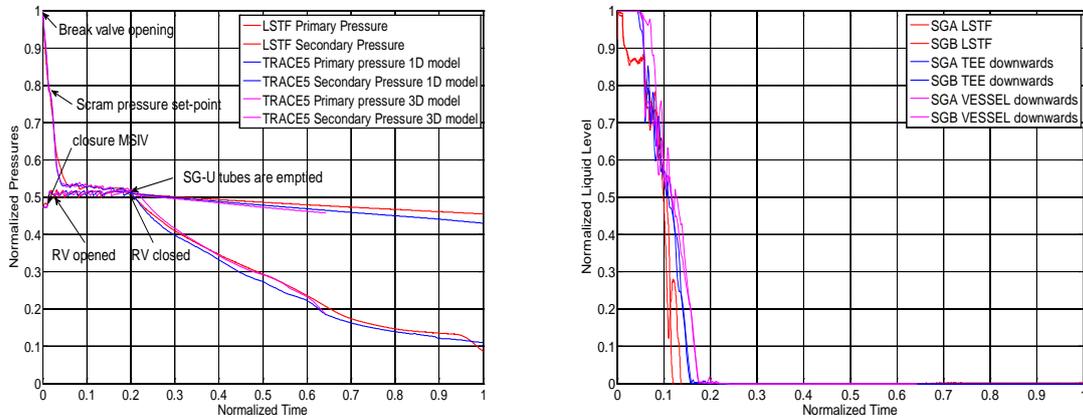
Para estudiar la estratificación del líquido se ha introducido un componente 3-D VESSEL para reproducir la tubería horizontal que simula la rama caliente del lazo B. Originalmente, dicha rama caliente se modeló con un componente 1-D TEE activando el modelo especial OFFTAKE [1] disponible en TRACE5. El objetivo de dicho modelo es reproducir fielmente la estratificación de líquido en tuberías horizontales. La rotura se ha modelado mediante la conexión de un componente VALVE y un componente BREAK. El tamaño de la rotura representa el 1% del área de paso de la rama caliente y la orientación de la rotura es hacia abajo. El nuevo componente 3-D VESSEL se ha definido variando el parámetro GRAV para reproducir una tubería horizontal, introduciendo la tarjeta de gravedad: GC = 0.0, GYTC = 0.0, GXRC = -1.0 and GZC = 0.0.

También se ha analizado el efecto de la discretización de la vasija horizontal, que simula la rama caliente, en anillos y sectores acimutales para conseguir una mejor reproducción del régimen bifásico. Se ha dividido en 3 anillos, 10 sectores acimutales y 4 niveles axiales. Los 30 sectores en cada dirección se han conectado a diferentes componentes PIPEs que se han unido a un componente PIPE N-sides. Los resultados obtenidos con este nuevo modelo se han comparado con los experimentales y con los simulados utilizando un componente 1-D TEE para simular la rama caliente.

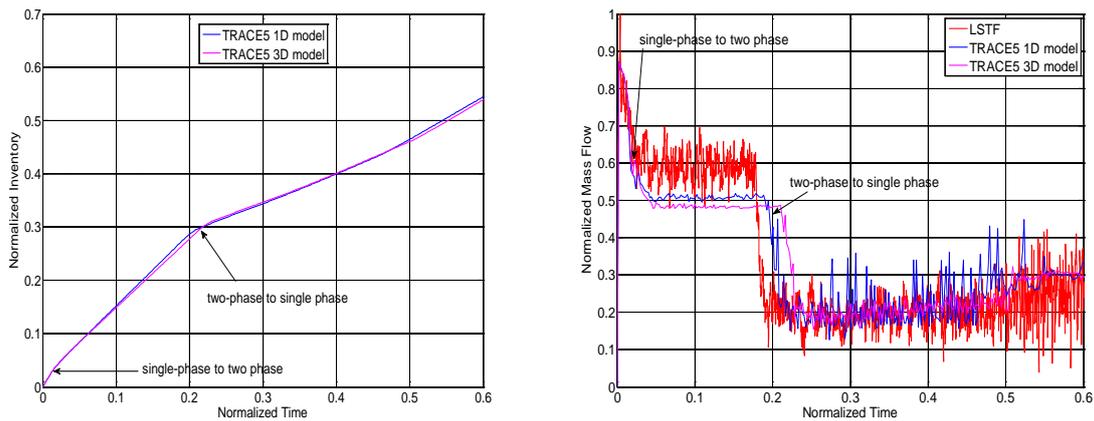
Como se puede ver en la Figura 2, donde se muestran las presiones del sistema y el nivel de líquido de los tubos en U, inmediatamente después de iniciarse la rotura la presión del primario cae. Cuando la presión del primario alcanza el punto determinado para que se produzca la señal de scram, éste se produce y se cierran las MSIVs, con lo que aumenta la presión del secundario (a 0,01 NT). Después, la presión del primario continúa cayendo, hasta casi alcanzar la presión del sistema secundario, manteniéndose ligeramente por encima a partir de entonces. Durante este periodo, el sistema secundario elimina calor del sistema primario, mientras tiene lugar circulación natural. El comportamiento cíclico (abrir/cerrar) de las válvulas de alivio (RVs) es necesario para mantener constante la presión del secundario y la del primario superior a la del secundario. Las RVs se cierran completamente a 0,2 NT, los tubos en U de los generados de vapor se vacían y la circulación natural termina. A partir de este momento, la presión del primario pasa a ser inferior de la del secundario. Ésta caída es más rápida cuando se utiliza el componente 1-D debido a que los tubos en U se vacían ligeramente más rápido.

El inventario de descarga y el caudal por la rotura obtenidos para ambos modelos de simulación se muestran en la Figura 3. El caudal por la rotura es monofásico líquido hasta 0,02 NT, cuando cambia a régimen bifásico. Este régimen se mantiene hasta 0,2

NT, momento en el que se produce el cambio a monofásico vapor. Debido a la gran cantidad de vapor saliendo del sistema, la presión del primario empieza a ser inferior a la del secundario. El inventario de descarga a través de la rotura es muy similar en ambos modelos de simulación.

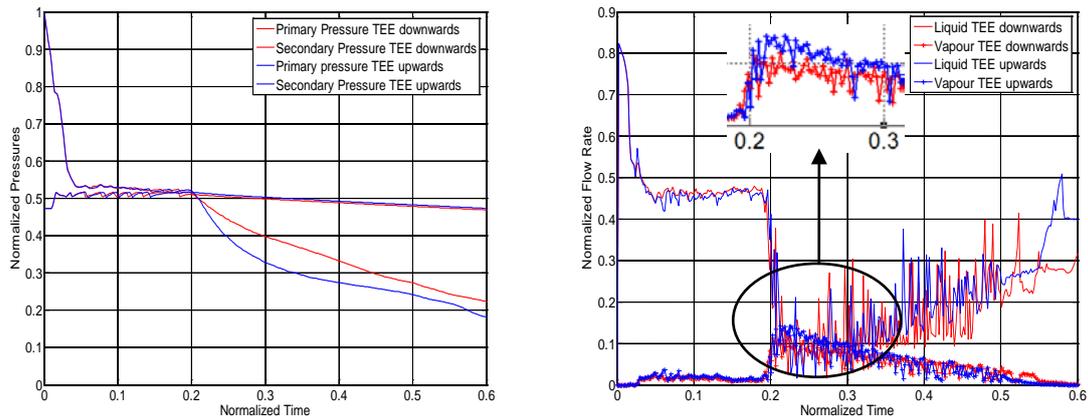


**Figura 2. Presiones del sistema y nivel de líquido de los tubos en U (1D vs 3D).**

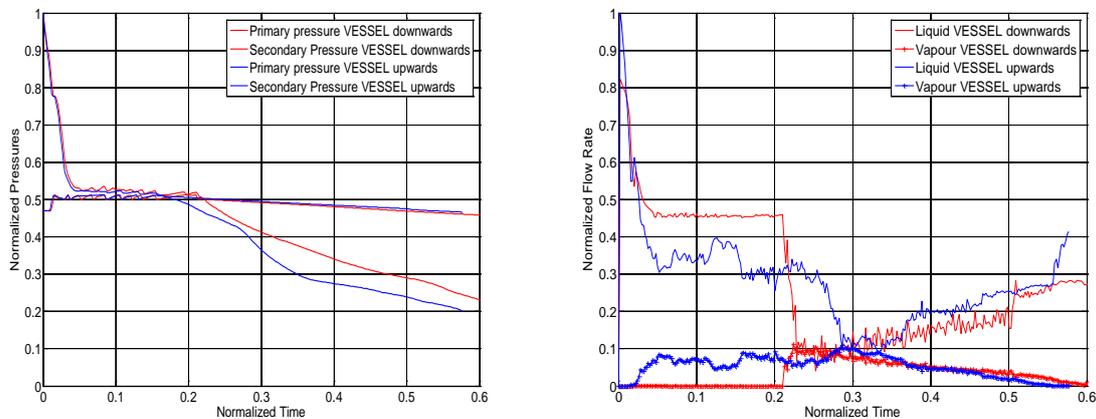


**Figura 3. Inventario de descarga y caudal a través de la rotura (1D vs 3D).**

A la vista de los resultados, se prueba la existencia de estratificación de líquido en la rama caliente durante el transitorio al utilizar el componente 3-D VESSEL. Con el objetivo de confirmar este hecho, se ha realizado un cambio en la orientación de la rotura, hacia arriba, utilizando ambos modelos (1-D vs. 3-D). La Figura 4 muestra las presiones del sistema y los caudales de líquido y vapor a través de la rotura obtenidos utilizando el componente 1-D TEE y ambas orientaciones. La caída de presión del sistema primario es más rápida en el caso de la rotura orientada hacia arriba, mientras que no hay importantes diferencias en la presión del secundario. Entre 0,2 y 0,3 NT el caudal de vapor a través de la rotura es mayor en la orientación hacia arriba lo que explica la caída de presión más rápida de este modelo. En la Figura 5, donde se muestran las presiones y los caudales de líquido y vapor a través de la rotura para ambas orientaciones, se puede ver que se comportan de manera similar a como ocurría con el modelo 1-D. Sin embargo, el caudal de líquido y vapor a través de la rotura son diferentes desde el principio del transitorio en el modelo 3-D. En ambos casos, se observa la estratificación de líquido.



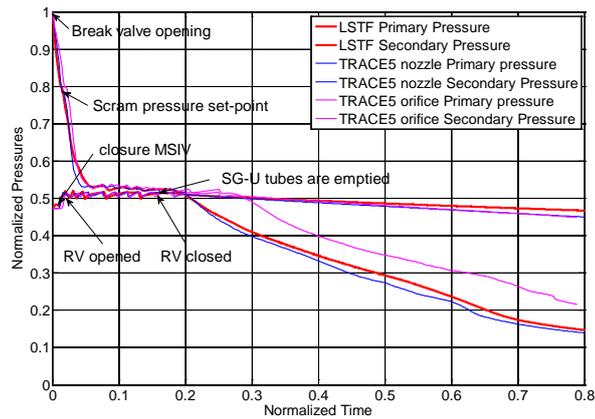
**Figura 4. Presiones del sistema y caudales por la rotura (1-D TEE).**



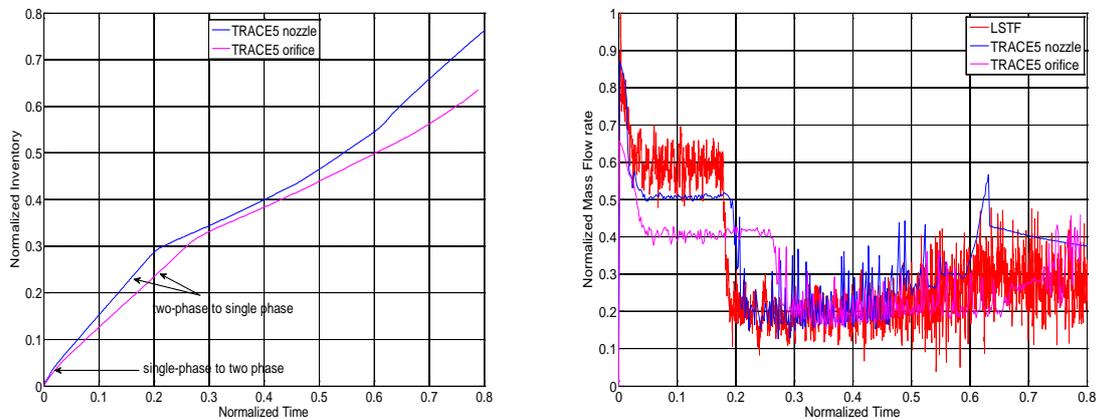
**Figura 5. Presiones del sistema y caudales por la rotura (3-D VESSEL).**

#### **4.2- Modelo orificio vs modelo tobera**

Para estudiar la geometría de la rotura se han utilizado dos modelos: orificio y tobera. En el modelo de orificio se simula la descarga de refrigerante directamente a la atmósfera, mientras que en el modelo tobera se utiliza un componente VALVE conectado a un componente BREAK, que simula las condiciones del tanque de almacenamiento. Las presiones del sistema obtenidas con ambos modelos de simulación se muestran en la Figura 6. Como se puede ver, los dos casos reproducen el mismo comportamiento hasta 0,2 NT. A este tiempo, los tubos en U se vacían y la circulación natural termina en el modelo de tobera produciendo la caída de presión del sistema primario similar a como ocurre en el experimento, mientras que en el modelo de orificio esto se retrasa (a 0,3 NT). En la Figura 7, se muestra la respuesta de ambos modelos en cuanto al inventario de descarga y el caudal por la rotura. Como se puede ver, el inventario de descarga es ligeramente inferior en el caso del orificio, lo que retrasa el cambio de fase a monofásico vapor. Estas discrepancias pueden ser debidas a las diferentes pérdidas de carga en la sección de la rotura, afectando a la evolución de la presión. A la vista de estos resultados, se puede decir que el modelo de rotura tobera reproduce mejor los resultados experimentales. Sin embargo, el modelo orificio reproduce más fielmente las condiciones de descarga a la atmósfera.



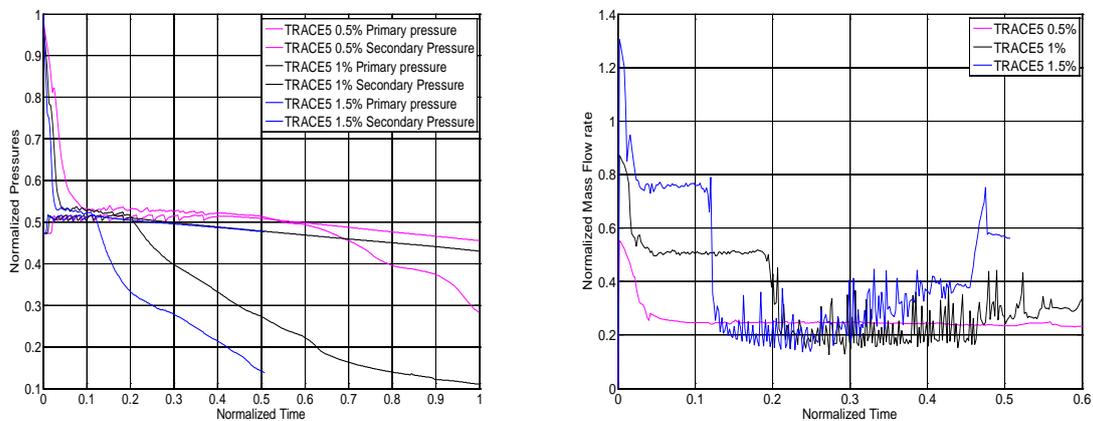
**Figura 6. Presiones del sistema (nozzle vs. orificio).**



**Figura 7. Inventario de descarga y caudal por la rotura (nozzle vs. orificio).**

### 4.3- Análisis del tamaño de la rotura

Para realizar este análisis se han considerado 3 casos (0,5%; 1% y 1,5%). Las presiones del sistema y el caudal por la rotura obtenidos tras simular estos tres casos se muestran en la Figura 8.

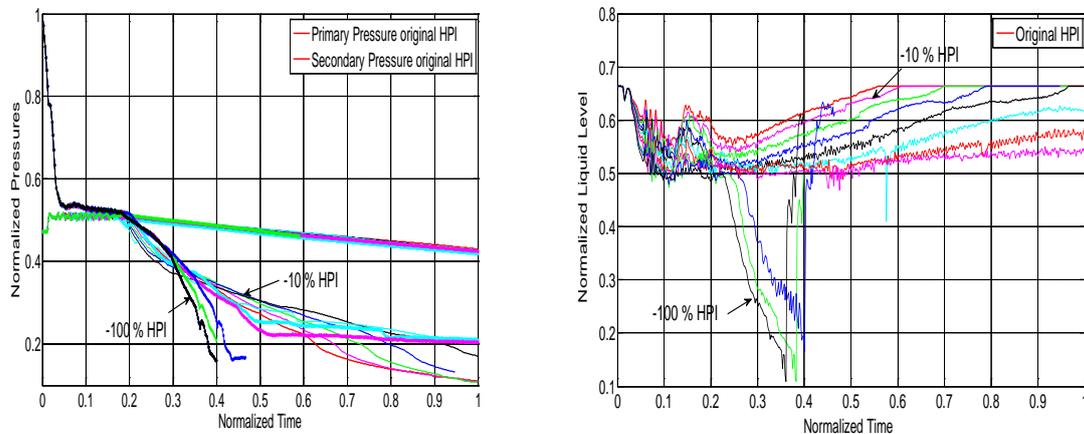


**Figura 8. Presiones del sistema y caudal por la rotura (tamaño rotura).**

La caída de presión se retrasa a medida que disminuye el tamaño de la rotura, lo que afecta a la entrada de los sistemas de acumuladores y HPI. En todos los casos ambos sistemas actúan evitando el descubrimiento y la subida de la PCT. Sin embargo, en caso de que se produjese el fallo del sistema HPI, una rotura pequeña podría resultar crítica puesto que la entrada de los acumuladores se retrasaría mucho y se produciría el descubrimiento del núcleo. Por esta razón, se ha realizado un análisis de sensibilidad variando el caudal del sistema HPI cuyos resultados se muestran a continuación.

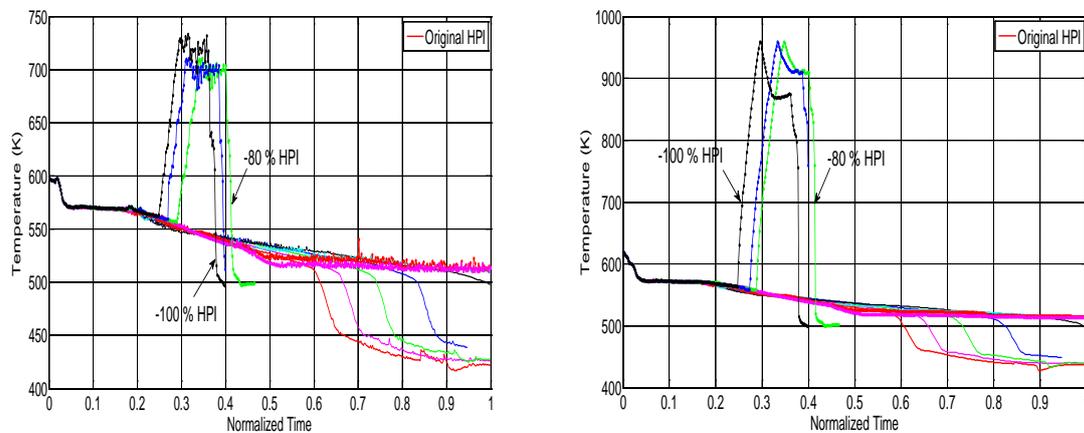
#### 4.4- Análisis de sensibilidad del caudal del sistema HPI

Para realizar este análisis de sensibilidad se han considerado 10 casos, en los que se ha variado el caudal de inyección del HPI desde el caudal en funcionamiento normal hasta el fallo total. La Figura 9 muestra las presiones del sistema y el nivel del núcleo para los diferentes casos.



**Figura 9. Presiones del sistema y nivel de líquido del núcleo (análisis HPI).**

Como se puede ver a medida que aumenta el caudal inyectado por el sistema HPI la presión del primario se mantiene durante más tiempo. El nivel del núcleo demuestra que cuando el caudal del sistema HPI se reduce más del 80%, con respecto al inyectado en funcionamiento normal, el núcleo se vacía y, a pesar de que la inyección de los acumuladores se produzca antes, no se evita el del núcleo.



**Figura 10. CET y PCT (análisis HPI).**

Tanto la CET como la PCT, mostradas en la Figura 10, sufren un incremento cuando el caudal del sistema HPI se reduce por debajo del 80 % del que se inyectaría en funcionamiento normal. Ambas temperaturas se reducen drásticamente a 0,4 NT debido a la actuación del sistema de protección del núcleo de la instalación LSTF. La entrada del sistema de acumuladores produce el rellenado del núcleo y del sistema primario evitando que la PCT siga subiendo. El máximo valor que se alcanza de PCT está sobre 980 K.

## 5. CONCLUSIONES

El código termohidráulico TRACE5 se ha utilizado para simular el Test 1-2 del Proyecto OECD/NEA ROSA y estudiar la estratificación del líquido, el efecto de la geometría de la rotura y el caudal inyectado por el sistema HPI. Se ha confirmado la existencia de estratificación de líquido en la rama caliente al utilizar un componente 3-D en la rama caliente y variando la orientación de la rotura. Además, se ha observado que el modelo tobera reproduce mejor las condiciones reales en las que se realizó el experimento aunque el modelo orificio simule mejor la pérdida de refrigerante directamente a la atmósfera. En caso de fallo del sistema HPI, las roturas pequeñas podrían resultar críticas ya que el punto de entrada del sistema de acumuladores no se alcanza fácilmente y se puede producir el descubrimiento del núcleo. Por esta razón, se ha realizado un análisis variando el caudal inyectado por el sistema HPI. Los resultados demuestran que, cuando el caudal inyectado por el sistema HPI se reduce más del 80% del caudal en funcionamiento normal, se produce el descubrimiento del núcleo y el incremento de la CET y la PCT.

## AGRADECIMIENTOS

En este trabajo aparecen los resultados que se obtuvieron en el Proyecto Internacional OECD/NEA ROSA. Los autores agradecen al "Management Board" del Proyecto ROSA su consentimiento a esta publicación, y al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) por el apoyo técnico y financiero en virtud del acuerdo STN/1388/05/748. Además este trabajo también ha sido apoyado por la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación y Ciencia, referencia AP2009-2600.

## REFERENCIAS

1. Division of Risk Assessment and Special Projects. Office of Nuclear Regulatory Research. U. S. Nuclear Regulatory Commission, TRACE V5.0. Theory manual. Field Equations, Solution Methods and Physical Models, Nuclear Regulatory Commission, U.S. (2007).
2. Thermalhydraulic Safety Research Group, Nuclear Safety Research Center, Final Data Report of OECD/NEA ROSA Project Test 1-2 (1% hot-leg break LOCA experiment with HPI:SB-HL-17 in JAEA), Japan Atomic Energy Agency, Japan (2008).
3. The ROSA-V Group, ROSA-V Large Scale Test Facility (LSTF) system description for the third and fourth simulated fuel assemblies, JAERI-Tech, Japan (2003).
4. Nuclear Regulatory Commission and Applied Programming Technology, Symbolic Nuclear Analysis Package (SNAP) User's Manual, Nuclear Regulatory Commission, U.S., (2007).
5. Division of Risk Assessment and Special Projects, Office of Nuclear Regulatory Research. U. S Nuclear Regulatory Commission, TRACE V5.0. User's manual. Volume 1: Input Specification, Nuclear Regulatory Commission, U.S. (2007).