

Document downloaded from:

<http://hdl.handle.net/10251/61042>

This paper must be cited as:

Querol Vives, A.; Gallardo Bermell, S.; Verdú Martín, GJ. (2014). Escalado de una rotura pequeña en la rama caliente de la instalación LSTF a una central nuclear. 40ª Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. Grupo Senda.



The final publication is available at

<http://www.reunionanualsne.es/doc/40/ponencias/tecnicas/I+D+i/34/34-06.pdf>

Copyright Grupo Senda

Additional Information

ESCALADO DE UNA ROTURA PEQUEÑA EN LA RAMA CALIENTE DE LA INSTALACIÓN LSTF A UNA CENTRAL NUCLEAR

Andrea Querol, Sergio Gallardo, Gumersindo Verdú
*Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental,
Universitat Politècnica de València*
anquevi@upvnet.upv.es; sergalbe@iqn.upv.es; gverdu@iqn.upv.es

Resumen –El objetivo de este trabajo es estudiar si la fenomenología observada durante una rotura pequeña en la rama caliente de una instalación a pequeña escala, como Large Scale Test Facility (LSTF), es extrapolable a una planta real. Para ello, se considera el experimento 1-2 del Proyecto OECD/NEA ROSA, que simula una rotura en la rama caliente del 1%, y el código termohidráulico TRACE5 para reproducir la instalación LSTF y una planta real y así, poder comparar los resultados. Se han considerado dos modelos para la planta real: un modelo de la instalación LSTF escalado conservando la relación de potencia y volumen de LSTF original y un modelo típico PWR Westinghouse de 3 lazos. Los resultados obtenidos demuestran que los modelos de la instalación LSTF y LSTF escalado reproducen el mismo comportamiento durante todo el transitorio. Sin embargo, con el modelo Westinghouse de 3 lazos se observan importantes diferencias. La más importante es que la circulación natural no se reproduce adecuadamente. Con el fin de mejorar los resultados se ha estudiado el efecto de la nodalización de los tubos en U y de la vasija. Los resultados obtenidos demuestran que la nodalización de los tubos en U afecta a la reproducción de la circulación natural, mientras que la nodalización de la vasija no tiene un efecto tan relevante.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los fenómenos termohidráulicos que tienen lugar durante un accidente en una central nuclear es muy importante para la seguridad nuclear. Sin embargo, es imposible realizar experimentos a escala real para obtener dichos datos. Por este motivo, existe un gran número de instalaciones a pequeña escala que reproducen determinadas centrales nucleares. Este es el caso de la instalación “Large Scale Test Facility, LSTF” [1], que reproduce la unidad II de la central nuclear Tsuruga de la Agencia de Energía Atómica de Japón (JAEA), y que se utiliza en el marco del Proyecto de la OECD/NEA ROSA. Dicho proyecto se basa en una serie de experimentos realizados en la instalación LSTF con el fin de disponer de una base de datos experimentales para determinados accidentes basados en pequeñas roturas en diferentes localizaciones que permiten validar los resultados de simulación obtenidos con códigos termohidráulicos como TRACE5 [2, 3].

En este trabajo se pretende determinar si la fenomenología observada durante una pequeña rotura en la rama caliente de la instalación LSTF es extrapolable a una planta real. Para ello, se ha considerado el experimento 1-2 del Proyecto OECD/NEA ROSA [4] que simula una rotura en la rama caliente del 1% y diferentes modelos desarrollados con el código TRACE5. En concreto se va a considerar un modelo de la instalación LSTF comprobado por los autores en trabajos anteriores [5, 6, 7], un modelo escalado de la instalación LSTF en el que se conserva la relación de potencia y volumen de la instalación original y un modelo PWR Westinghouse de 3 lazos.

Los resultados obtenidos demuestran que los modelos de la instalación LSTF y el modelo escalado reproducen el mismo comportamiento durante todo el transitorio. Sin embargo, con el modelo de 3 lazos se observan diferencias importantes. La más importante es que la circulación natural no se reproduce adecuadamente. Con el objetivo de mejorar los resultados se ha estudiado la nodalización de los tubos en U y de la vasija de dicho modelo de TRACE5. Los resultados obtenidos demuestran que la nodalización de los tubos en U afecta a la reproducción de la circulación natural, mientras que la nodalización de la vasija no tiene tanta importancia.

2. MODELOS DE TRACE5

2.1. LSTF

La instalación experimental LSTF se ha modelado con TRACE5 con 81 componentes hidráulicos (7 BREAKs, 11 FILLs, 23 PIPEs, 2 PUMPs, 1 PRIZER, 22 TEEs, 14 VALVEs y 1 VESSEL).

La vasija se ha modelado con un componente 3-D VESSEL discretizado en 20 niveles axiales, 4 anillos radiales y 4 sectores acimutales y está conectado a diferentes componentes 1-D: 8 tubos guía para las barras de control (CRGTs), las ramas calientes y frías y el bypass.

12 componentes HTSTR (o estructuras de calor) simulan los elementos combustibles del núcleo y un componente POWER transmite la potencia desde las HTSTR al componente VESSEL. La distribución axial de potencia presenta un factor máximo de 1.495. El perfil de potencia radial está dividido en tres zonas utilizando los tres primeros anillos. Dependiendo del anillo radial se han considerado diferentes factores pico: 0,66 en el primer anillo, 1,51 en el segundo anillo y 1,0 en el tercer anillo.

Respecto al sistema secundario, cada generador de vapor está formado por un boiler, un separador, un downcomer y 141 tubos en U que se han simulado utilizando 3 componentes PIPE dependiendo de la longitud media real de los tubos en U.

Para simular la rotura se ha utilizado un componente VALVE conectado a un componente BREAK que simula las condiciones atmosféricas. El tamaño de la rotura es el que se especifica en el experimento 1-2 [4], el cual se corresponde con el 1% del área de la rama fría aunque la rotura se localiza en la rama caliente del lazo sin presionador.

También se ha tenido en cuenta la necesidad de activar el modelo especial de TRACE5, Choked flow [2, 3], al prever condiciones de flujo crítico.

2.2. Modelo escalado de LSTF

Puesto que la instalación LSTF se ha diseñado manteniendo la presión y la altura (FHFP) de su central de referencia (unidad II Tsuruga) y el escenario considerado en este trabajo es un SBLOCA, se ha utilizado el criterio de escalado potencia-volumen [8] para conservar la potencia y el inventario de refrigerante ya que al ser la misma presión, se mantienen las propiedades del fluido. Esta metodología de escalado se caracteriza por el uso de un factor de escalado o de diseño, Kv. En este caso, Kv se ha fijado en 48 puesto que la instalación LSTF está escalada según la relación 1:48 en áreas de paso y volúmenes de la central de referencia.

Respecto a las características geométricas, ambos modelos de TRACE5 simulan 2 lazos. El volumen de los diferentes componentes se ha escalado multiplicando por Kv, mientras que la altura es la misma que en la instalación LSTF. El número de tubos en U y de estructuras de calor utilizadas para simular la transferencia de calor entre el sistema primario y secundario y para simular las barras de combustible es también Kv veces mayor que en el modelo de la instalación LSTF. Los tubos en U, al igual que en el modelo de LSTF se han simulado mediante 3 componentes PIPE.

Las bombas de ambos modelos utilizan las mismas curvas adimensionales de comportamiento. La potencia del modelo escalado se define a partir de la curva de caída de potencia del modelo de la instalación LSTF escalada por el factor de escalado, manteniendo el tiempo.

En los componentes horizontales de la instalación las áreas de paso se han escalado manteniendo en ambos modelos el cociente de la raíz cuadrada del diámetro de la tubería, $l/\sqrt{d} = L/\sqrt{D}$, siendo l y d la longitud y diámetro de LSTF, mientras que L y D son la longitud y diámetro del modelo escalado. Además, en las partes horizontales se ha intentado mantener el número de

Froude [9]. Con esto y escalando el caudal másico y el volumen se obtiene la relación entre los diámetros y longitudes de LSTF y escalados:

$$D = d \cdot K_v^{2/5} \quad (1)$$

$$L = l \cdot K_v^{1/5} \quad (2)$$

Los caudales másicos del primario y de agua de alimentación principal y secundaria (MFW y AFW, respectivamente) también se han escalado teniendo en cuenta el factor de escalado, K_v . Para que el inventario de descarga a través de la rotura sea K_v veces mayor que en el modelo de LSTF, el tamaño de la rotura también se ha escalado teniendo cuenta dicho factor. La localización y orientación de la rotura es la misma que en la instalación LSTF. Las condiciones iniciales y de contorno, la temperatura, presión y velocidad en los sistemas primario y secundario son las mismas que en el modelo de LSTF.

Respecto al modelo de Choked flow se han utilizado los mismos coeficientes que en el modelo LSTF.

2.3. Modelo típico PWR Westinghouse de 3 lazos

Puesto que la mayoría de las centrales nucleares españolas son reactores PWR Westinghouse de 3 lazos, en este trabajo se ha considerado un modelo estándar de una central de 2686 MWt realizado con TRACE5.

En este caso, se han utilizado 103 componentes de TRACE5 (9 BREAKs, 16 FILLS, 53 PIPEs, 3 PUMPs, 1 PRIZER, 3 SEPARATOR, 17 VALVEs y 1 VESSEL). Para simular la vasija se ha utilizado un componente VESSEL 3-D conectado a 6 tubos guía para las barras de control (CRGTs), las ramas calientes y frías. Los tubos guías en este caso son diferentes: 3 permiten el paso entre el upper plenum y el upper head (niveles 13 y 16) y otros 3 conectan la salida del núcleo con el upper head (niveles 11 y 16).

Para reproducir los mismos fenómenos que en el experimento 1-2 algunos parámetros del modelo de 3 lazos se han tenido que ajustar utilizando un factor de escalado volumétrico que relacione la instalación LSTF y la central de 3 lazos. Dicho factor se ha obtenido a partir de la relación de volúmenes de las dos vasijas (35,77). Mediante 12 estructuras de calor se han simulado las 36056 barras de combustible que se encargan de suministrar la potencia del núcleo. Los perfiles de potencia axial y radial son los mismos que los utilizados en el modelo de la instalación LSTF. Del mismo modo se han escalado los caudales del sistema de refrigeración de emergencia de la plana (sistema de inyección de alta y baja presión y los acumuladores).

El sistema secundario consiste en 3 generadores de vapor. El número de tubos en U de cada generador de vapor equivale al número en la LSTF multiplicado por el factor de escalado del modelo de 3 lazos. En este caso, los tubos en U están simulados mediante un componente PIPE.

La rotura se ha simulado de la misma forma que en los modelos anteriores. El tamaño de rotura se ha calculado a partir del valor especificado en el experimento 1-2 [4] teniendo en cuenta el factor volumétrico característico del modelo de 3 lazos. La rotura se ha situado en el lazo 1, mientras que el presionador se encuentra en el lazo 3. Para el modelo de Choked flow se han considerado los mismos coeficientes que en los otros modelos.

3. DESCRIPCIÓN DEL TRANSITORIO

El experimento 1-2 simula un transitorio de una rotura del 1% en la rama caliente del lazo sin presionador. El 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 hasta que alcanza un valor determinado para activarse la señal de scram. Dicha señal produce el scram del reactor que se ha simulado mediante una curva de caída de potencia y además, se inicia la curva de parada de las bombas. Simultáneamente, se cierran las válvulas principales de vapor (MSIVs) y finaliza la inyección del agua principal de alimentación. El transitorio continúa con la activación de la señal de inyección de seguridad cuando la presión del sistema primario es menor que 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 experimento finaliza cuando las presiones de ambos sistemas, primario y secundario, se estabilizan.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del transitorio

Todos los resultados mostrados en este trabajo están normalizados al valor obtenido en el estado estacionario.

La Figura 1 muestra las presiones y los caudales máxicos por la rotura obtenidos con TRACE5 para los 3 modelos (LSTF, LSTF escalado y 3 lazos) en comparación con los resultados experimentales. Se observa que los modelos LSTF y LSTF escalado son capaces de reproducir el mismo comportamiento de las presiones que en el experimento de manera que a 1000 s la presión del primario cae mientras que la del secundario se mantiene. Al mismo tiempo, se vacían las ramas calientes y se termina la circulación natural. Sin embargo, con el modelo de 3 lazos la caída de presión del primario se adelanta unos 300 s aproximadamente, con lo que la circulación natural no se reproduce adecuadamente.

Respecto a los caudales máxicos por la rotura, los valores experimentales y los obtenidos con el modelo LSTF se han multiplicado por el factor K_v característico de cada modelo (LSTF escalado y 3 lazos) para poder ser comparados entre ellos. En el experimento, el flujo es completamente líquido desde el inicio hasta los 100 s. A partir de este momento, se produce el cambio a flujo bifásico líquido-vapor que se mantiene hasta que las ramas calientes se vacían a 1000 s. En este momento, el flujo pasa a monofásico vapor, termina la circulación natural y la presión del primario cae mientras que la del secundario se mantiene por la cantidad de vapor que se pierde y la gran pérdida de entalpía relativa que se produce.

A la vista de los resultados, los modelos LSTF y LSTF escalado reproducen de manera adecuada el caudal máxico experimental, aunque durante el flujo bifásico el caudal simulado es algo menor que el experimental y el cambio de fase desde bifásico a monofásico vapor se retrasa unos 60 s. Esto podría ser debido a la falta del coeficiente para flujo monofásico vapor en el modelo de Choked flow de TRACE5. Por otro lado, con el modelo de 3 lazos el cambio desde flujo bifásico a monofásico vapor se adelanta igual que pasaba con la caída de presión del primario.

El hecho de que el modelo de 3 lazos no tenga el mismo comportamiento que los modelos LSTF y LSTF escalado puede ser debido a diferencias en la geometría como el número de componentes PIPE utilizados para simular los tubos en U y la vasija.

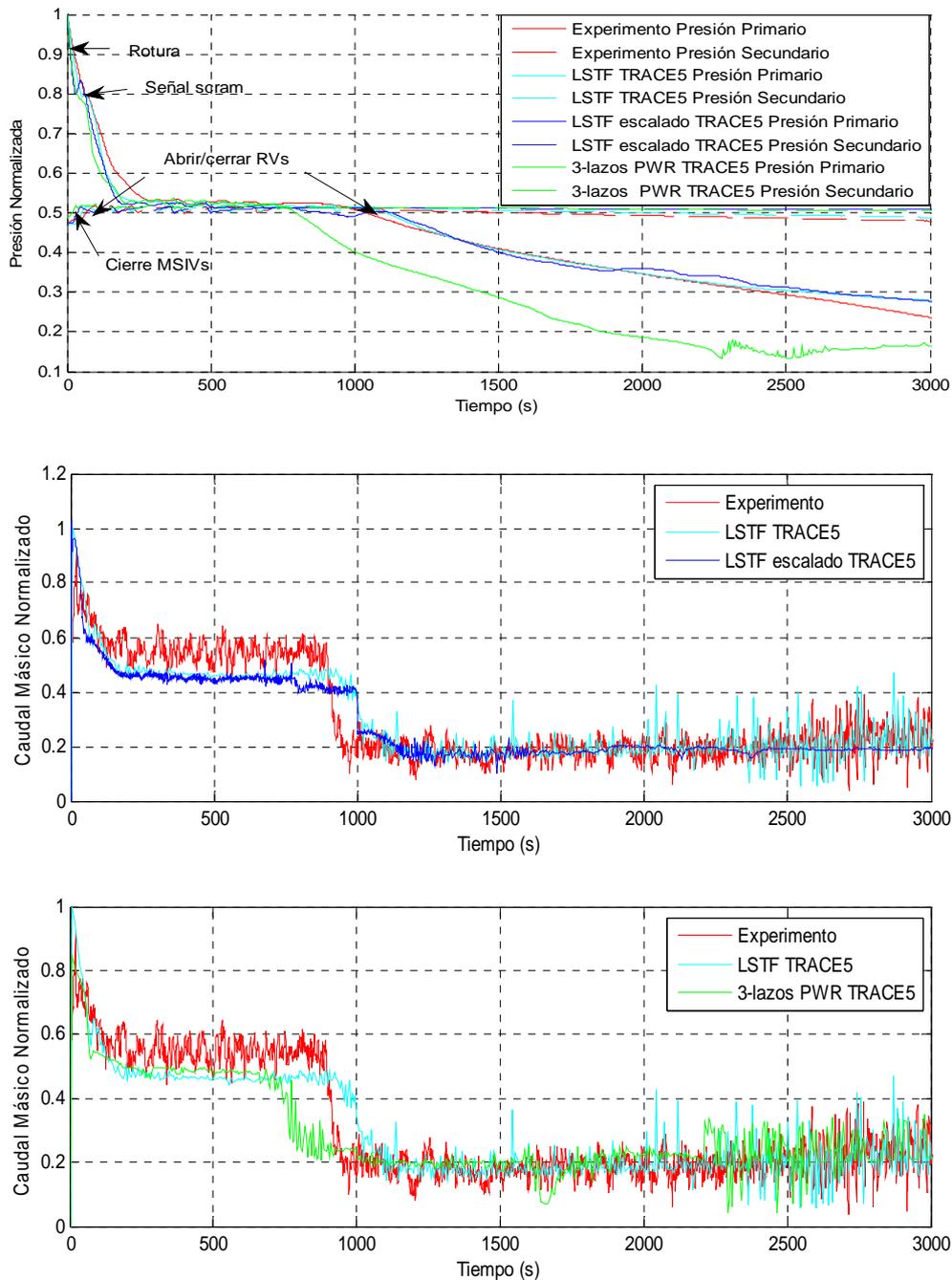


Figura 1. Presiones del Sistema y caudal másico por la rotura

4.2. Variaciones en la nodalización de los tubos en U

Con el fin de mejorar los resultados obtenidos con el modelo de 3 lazos se ha modificado la nodalización de los tubos en U utilizando 3 componentes PIPE para modelar los tubos en U en lugar de uno como estaba originalmente. Este hecho afecta a la simulación de la circulación natural como se puede ver en la Figura 2 donde se muestran las presiones y los caudales por la rotura obtenidos en comparación con los resultados experimentales y los simulados con los modelos LSTF y LSTF escalado.

Las mejoras son claras, ya que la presión del primario se mantiene sobre la del secundario hasta 1000 s aproximadamente, de acuerdo con el experimento y los resultados de TRACE5 obtenidos para los otros modelos. A pesar de esta mejora, todavía se observan diferencias entre las presiones simuladas que pueden deberse a diferencias geométricas que continúan existiendo entre los modelos (vasija, longitud de los tubos en U, volumen de acumuladores y de generadores de vapor, etc.).

Respecto a los caudales máscicos por la rotura, también se producen mejoras claras: el cambio de flujo bifásico a monofásico vapor se retrasa coincidiendo con el comportamiento que reproducen los otros modelos. En todos los casos, existe un pequeño retraso en dicho cambio de fase que puede ser debido a la falta del coeficiente para flujo monofásico vapor en el modelo de Choked flow de TRACE5.

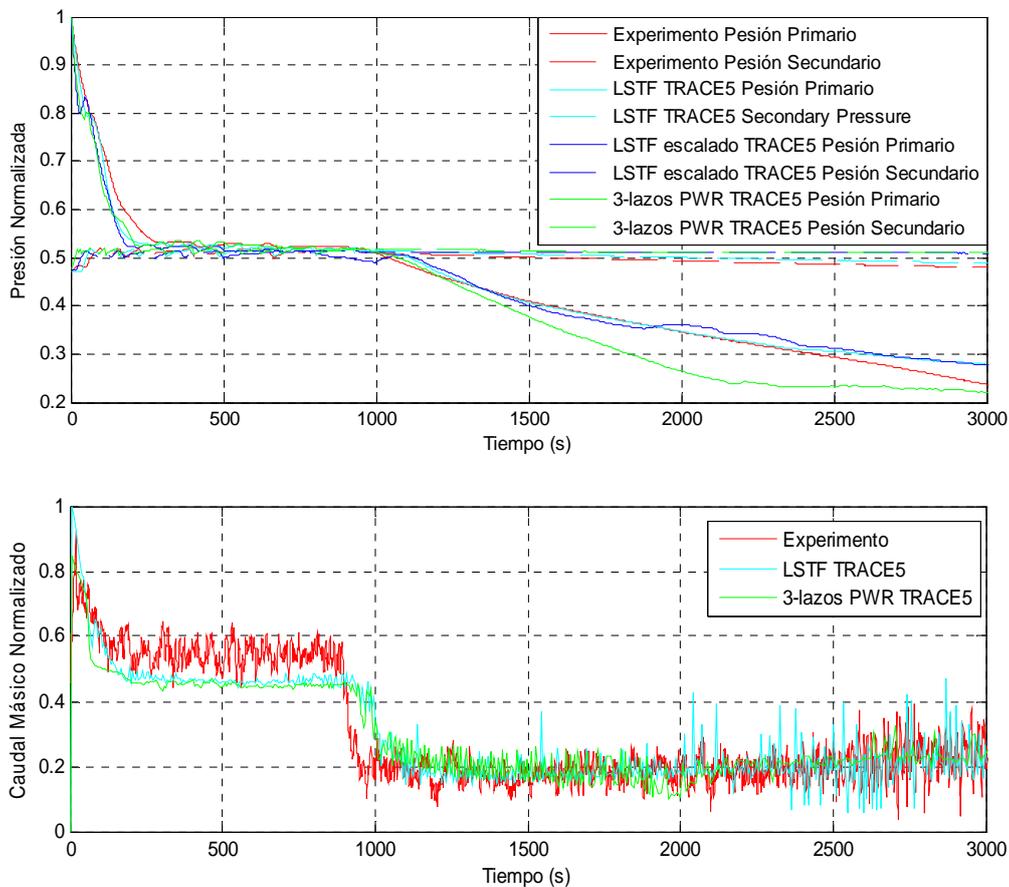


Figura 2. Presiones del Sistema y caudal máscico por la rotura. Nodalización tubos en U

4.3. Variaciones de la vasija

Siguiendo con el argumento de que las diferencias en las presiones simuladas entre el modelo de 3 lazos y los modelos LSTF y LSTF escalado pueden ser debidas a diferencias geométricas entre dichos modelos, en este apartado se ha estudiado el efecto de la vasija.

La vasija del modelo LSTF escalado se ha obtenido a partir de la vasija de LSTF multiplicando los parámetros geométricos que la definen por el correspondiente factor K_v . Sin embargo, la vasija del modelo de 3 lazos presenta algunas diferencias con respecto a las vasijas de LSTF y LSTF escalado como son el número de niveles axiales, el número y la posición de los tubos

guía, el volumen, las fracciones del área de paso, los diámetros hidráulicos, etc. Con el fin de igualar la geometría de las vasijas, se ha desarrollado un nuevo modelo de 3 lazos en el que el componente 3-D VESSEL se ha sustituido por el que se ha utilizado en el modelo LSTF escalado. Los resultados para las presiones y los caudales másicos por la rotura obtenidos se muestran en la Figura 3 en comparación con los valores experimentales y los obtenidos con los modelos LSTF y LSTF escalado. Como se puede ver, la presión del primario se ajusta más a los resultados experimentales y a la obtenida con los otros modelos, al menos hasta 1900 s. A partir de este momento, la caída de presión primaria reproducida con el modelo de 3 lazos es más rápida que la obtenida en el experimento y con los otros modelos. Esto puede ser debido a diferencias geométricas que continúan existiendo entre los modelos. Respecto al caudal másico por la rotura, como se puede ver no se produce ninguna mejora relevante.

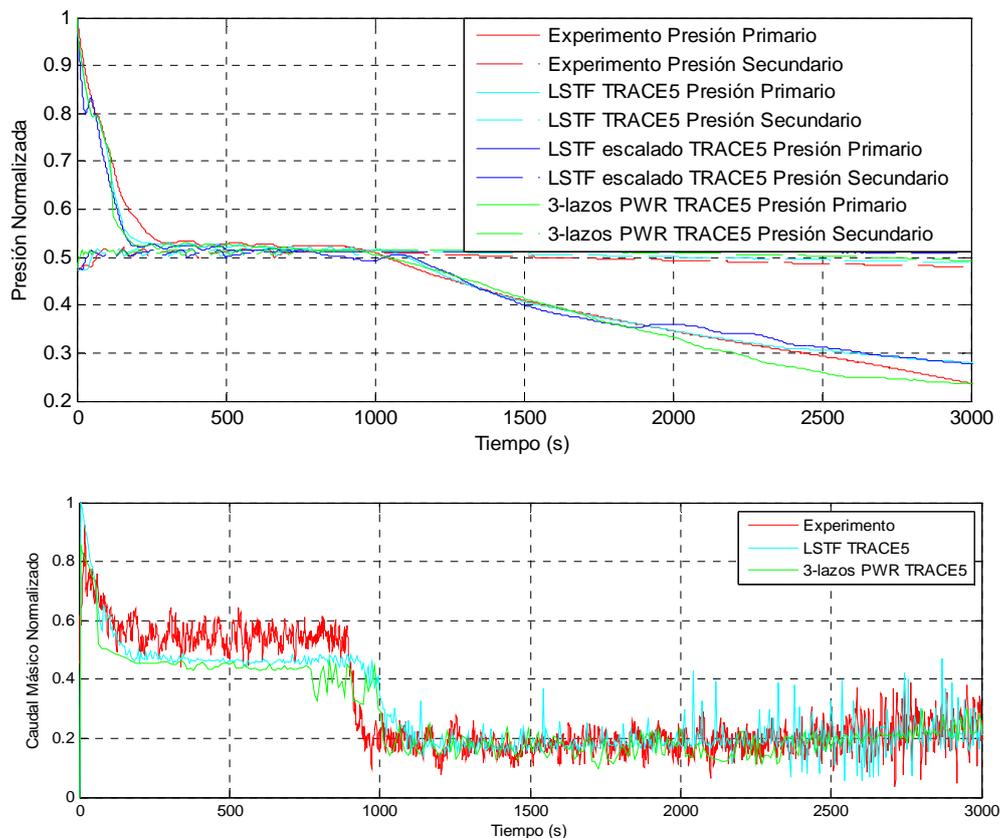


Figura 3. Presiones del Sistema y caudal másico por la rotura. Nodalización de la vasija

5. CONCLUSIONES

El experimento 1-2 del Proyecto OECD/NEA ROSA, que simula una rotura con pérdida de refrigerante (SBLOCA) del 1 % en la rama caliente de la instalación Large Scale Test Facility, LSTF, se ha aplicado a diferentes modelos de centrales nucleares desarrollados utilizando el código termohidráulico TRACE5. Estos modelos son: la instalación LSTF, LSTF escalado y un modelo de una planta de 3 lazos tipo Westinghouse. El modelo LSTF escalado se ha desarrollado aplicando el criterio de escalado potencia-volumen e intentando conservar el número de Froude en los componentes horizontales. La idoneidad del criterio de escalado potencia-volumen para conservar el tiempo, la potencia y el inventario de refrigerante ha quedado demostrada. Los resultados obtenidos confirman que el modelo LSTF escalado es capaz de reproducir el mismo comportamiento

observado en la instalación LSTF durante un transitorio SBLOCA. Sin embargo, utilizando el modelo de 3 lazos se observa que la caída de presión del sistema primario se adelanta y consecuentemente, la circulación natural termina antes que en el experimento. Esto puede ser debido a diferencias geométricas que existen entre los modelos como el número de grupos utilizado para simular los tubos en U del generador de vapor, la geometría de la vasija, etc. Para mejorar los resultados, se ha estudiado la influencia de la nodalización de los tubos en U y de la vasija. Los resultados obtenidos demuestran que la nodalización de los tubos en U afecta a la simulación de la circulación natural. Incrementando el número de componentes PIPE para simular los tubos en U, la caída de presión del primario se retrasa y la circulación natural se produce de acuerdo a los resultados experimentales. Sin embargo, variando la nodalización de la vasija, las mejoras que se producen no son tan importantes. Las diferencias que continúan existiendo entre los resultados del modelo de 3 lazos y los modelos LSTF y LSTF escalado, pueden ser atribuidas a diferencias geométricas que continúan existiendo entre los modelos.

AGRADECIMIENTOS

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. 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).
2. 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).
3. 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).
4. 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).
5. S. Gallardo, A. Querol and G. Verdú, “Simulation of 1% hot leg SBLOCA with TRACES”, Proceedings of 2012 International Congress on the Advances in Nuclear Power Plants, American Nuclear Society Annual Meeting, Chicago, Illinois, USA, (2012).
6. S. Gallardo, V. Abella, G. Verdú and A. Querol, Assessment of TRACE 5.0 against ROSA Test 3-1, cold leg SBLOCA, Office of Nuclear Regulatory Research, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, (2012).
7. S. Gallardo, A. Querol and G. Verdú, “Break size effects on CET response in an upper head SBLOCA transient”, Proceedings of the 20th International Conference on Nuclear Engineering, Anaheim, California, USA, (2012).
8. T.J. Liu, C.H. Lee and Y. s. Way, 1997, IIST and LSTF counterpart test on PWR station Blackout transient, Nuclear Eng. Des., 167, pp. 357-373.
9. S. Petelin, B. Mavko, B. Koncar and Y. A. Hassan, “Scaling of the small-scale thermal-hydraulic transient to the real nuclear power plant”, Nuclear Technology, volume(158), pp. 56-68, (2007).