

Estudio de la extracción de calor residual por un generador de vapor en presencia de incondensables modelado con TRACE: experimento PKL III G1.1.

C. Berna, A. Escrivá, J.L. Muñoz-Cobo & A. Romero
Instituto de Ingeniería Energética
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera 14, 46022 Valencia (España)
Tel.: 0034-963877631, Fax: 0034-963877639, Email: aescriva@iqn.upv.es

Sinopsis

Un amplio trabajo ha sido llevado a cabo durante las últimas décadas en el conocimiento y desarrollo de códigos termo-hidráulicos. Estos códigos tienen como objetivo la simulación del comportamiento de un reactor durante transitorios y accidentes. Acuerdos entre la NRC de Estados Unidos y el CSN de España en el área de investigación en seguridad nuclear han dado como resultado el acceso del CSN a los códigos best-estimate en fase de desarrollo de la NRC, como por ejemplo el código TRACE.

El presente trabajo se encuadra dentro del ámbito de desarrollo de estos códigos, en él se realiza la simulación del experimento PKL III G1.1 utilizando la interface SNAP y el código TRACE. Dicho experimento tiene como objetivo fundamental el estudio de la extracción del calor residual por el generador de vapor en presencia de gases incondensables.

El transitorio del experimento se inicia con la parada del sistema de extracción del calor residual (RHRS), seguido de una fuerte extracción del inventario de refrigerante en el circuito primario, lo que hace que el núcleo quede parcialmente descubierto. Seguidamente se va elevando el nivel de líquido realizando una serie de inyecciones escalonadas. La situación descrita hace que el intercambio de calor en los tubos en U del GV presente zonas activas y pasivas, situación difícil de simular mediante los actuales códigos termo-hidráulicos. Concluyendo, el objetivo fundamental es analizar la capacidad del código TRACE para simular la situación descrita con anterioridad, habiéndose obtenido unos resultados aceptables, contribuyendo con ello al testeo y mejora del código.

1.- Descripción del test experimental G1.1.

1.1.- Estado Estacionario Inicial.

El test PKL III G1.1 llevado a cabo en la instalación experimental PKL consiste en el estudio de la extracción del calor residual por un generador de vapor en presencia de gases incondensables, el resto de lazos se encuentran aislados durante la ejecución del test.

Las condiciones iniciales del test se alcanzaron en una fase preliminar. Dicha fase comenzó con el llenado completo con agua con una concentración de boro de 2000 ppm y a presión ambiente ($p_{\text{prim}} \sim 1$ bar) del lazo de trabajo. A partir de este punto se procedió a un lento vaciado del inventario del primario del lazo hasta alcanzar una altura de $\frac{3}{4}$ del lazo (inventario de refrigerante en el primario de aproximadamente 1060 kg, correspondiendo a un nivel de la lámina líquida de 7.75 m. tomando como referencia 0 la parte inferior del lower plenum). De forma conjunta a la extracción del líquido se fue realizando un llenado con N_2 , sustituyendo así los volúmenes de líquido por no condensables (volumen de N_2 introducido en la instalación PKL de aproximadamente 0.6 m^3 en condiciones normales de presión y temperatura).

Seguidamente a la disminución del inventario de refrigerante del primario, se baja la potencia del núcleo hasta aproximadamente 200 kW (simulación del calor de

desintegración residual en el núcleo, 0.6% de su potencia térmica a plena carga), manteniéndose constante a lo largo de la realización de toda la fase experimental. Durante todos los procesos citados con anterioridad y, hasta el inicio de la fase de test, el calor producido por el núcleo fue extraído mediante el sistema de extracción del calor residual (RHRS). El circuito secundario del lazo activo se mantuvo a una presión constante de 2 bares y a 12.2 m. el nivel de líquido durante toda la duración del test. La configuración de la instalación en el inicio del test (SOT) se presenta en la Figura 1 y Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones iniciales del Test G1.1.

Circuito primario	
Condiciones generales de flujo y transferencia de calor	Condiciones de parada fría. Sin flujo. 1 lazo lleno de agua hasta $\frac{3}{4}$, N ₂ encima. 3 lazos restantes aislados. RHRS activo en el lazo de trabajo.
Inventario de refrigerante	1060 kg (PRZ aislado)
Concentración de Boro	2000 ppm
Potencia térmica	200 kW
Presión	≈ 1 bar (presión atmosférica)
Temperatura a la salida del núcleo	≈ 333 K
Circuito secundario	
Presión en el secundario del SG (resto de lazos aislados)	≈ 1 bar (presión atmosférica)
Temperatura en el secundario del SG	≈ 298 K
Nivel de agua	≈ 12.2 m.

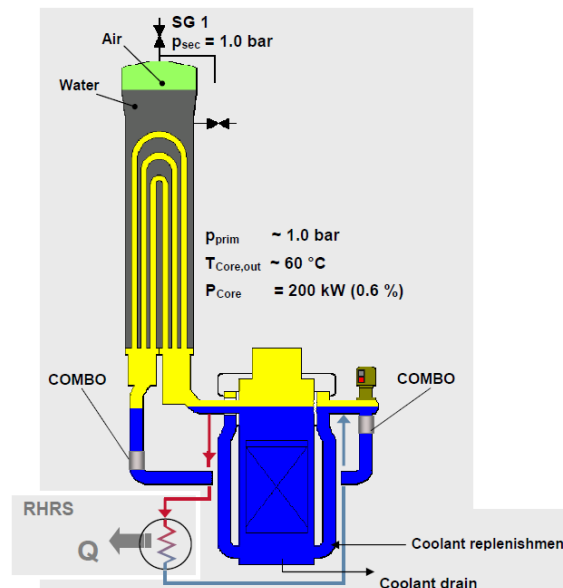


Figura 1. Configuración inicial de la instalación experimental PKL al inicio del test G1.1.

1.2.- Fase de realización del test.

El test comienza con el cierre del RHRS. Esta parada súbita produce un rápido calentamiento de inventario del refrigerante del primario y, por consiguiente, el inicio de la formación de vapor en el núcleo (aproximadamente 5-10 minutos después de la parada de RHRS), con la aparición en el núcleo del burbujeo típico de la ebullición.

La secuencia experimental es la siguiente: tras el cierre del RHRS, se mantiene al sistema sin modificaciones durante 440s. Seguidamente se realiza una fuerte extracción inicial (reducción a prácticamente el 60% del inventario de refrigerante inicial), que deja el núcleo parcialmente descubierto. Tras ella se realizan una serie de inyecciones, finalizando el test con una extracción final (drenado). La secuencia completa de extracciones e inyecciones se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Secuencia de eventos relevantes a lo largo del Test G1.1.

Tiempo [s]	Tiempo, SOT [s]	Eventos	Inventario de refrigerante [kg] +/- 20kg
0	-	Estado Estacionario de Partida	1060
7900	0	Inicio del Test (SOT)	1060
8340	440	Inicio de Extracción, 0.219 kg/s	1060
10120	2220	Fin de Extracción	670
23750	15850	Inicio de Inyección, 0.06433 kg/s	670
25460	17560	Fin de Inyección	780
27060	19160	Inicio de Inyección, 0.0613 kg/s	780
28610	20710	Fin de Inyección	875
34960	27060	Inicio de Inyección, 0.06322 kg/s	875
35830	27930	Fin de Inyección	930
45620	37720	Inicio de Inyección, 0.0633 kg/s	930
46410	38510	Fin de Inyección	980
49220	41320	Inicio de Inyección, 0.06587 kg/s	980
50890	42990	Fin de Inyección	1090
53400	45500	Inicio de Inyección, 0.0666 kg/s	1090
53700	45800	Aumento de la Inyección, 0.1298 kg/s	1110
55010	47110	Fin de Inyección	1280
57150	49250	Inicio de Extracción, 0.703 kg/s	1280
57520	49620	Fin de Extracción	1020
58890	50990	Fin del Test (EOT)	1020

2.- Modelado con TRACE

El objetivo de este trabajo es comparar los resultados experimentales con las predicciones realizadas mediante el código de simulación SNAP-TRACE. Para ello se dispone de un modelo 1D de la instalación experimental PKL. También se ha realizado la simulación del test experimental en un modelo con vasija 3D de una instalación comercial de agua a presión (PWR).

2.1.- Fase de Acondicionamiento.

Los modelos disponibles, tanto el de PKL como el de planta, no se encontraban en las condiciones iniciales del test G1.1, por ello ha sido necesario realizar un proceso de adaptación. A continuación se presenta el procedimiento seguido para ambos casos.

2.1.1.- Modelo 1D de la instalación PKL.

La configuración del modelo 1D de partida de la instalación PKL ha sido el del test experimental PKL III E2.2, dicho modelo nos ha sido facilitado por el Grupo de Análisis Dinámico de Sistemas Energéticos del Instituto de Técnicas Energéticas de la Universidad Politécnica de Cataluña. Las condiciones experimentales de dicho test son las siguientes:

- Presión primario, 42 bares
- Presión secundario, 28 bares
- Potencia, 530 kW
- Inventario de refrigerante en el primario, 2250 kg
- Concentración de boro, 1000 ppm

Por ello, se ha debido proceder a la adaptación desde las condiciones presentadas arriba a las condiciones iniciales del test G1.1. El trabajo realizado no solamente ha consistido en la obtención de las condiciones iniciales del test, sino también en la implementación de diversos elementos que difieren respecto a los del modelo disponible. A modo de ejemplo, algunos de los cambios realizados han sido los siguientes: aislamiento de los 3 lazos inactivos (introducción de válvulas en la parte inicial de la rama caliente y fin de la fría); introducción del sistema de extracción del calor residual (RHRS); reducción de la potencia (desde los 530kW a los 200kW); ajuste de presiones y temperaturas en los distintos elementos; introducción del

2.2.- Fase Estacionaria y parada del RHRS.

Una vez alcanzadas las condiciones iniciales del test G1.1 se deja evolucionar el sistema en estas condiciones durante un periodo de tiempo (fase de pre-test), en este caso fueron 7900s, para a continuación iniciarse el experimento G1.1 propiamente dicho. El test se inicia con el cierre del sistema RHRS, lo que produce un rápido aumento de la temperatura en el núcleo.

2.2.1.- Modelo 1D de la instalación PKL.

Durante la fase estacionaria que precede al test propiamente dicho, debido a la circulación forzada causada por el RHRS, se tiene una estratificación térmica con la altura a lo largo del núcleo. Sin embargo, a partir de este punto y causado por el cierre del RHRS, se tiene una evolución diferente de la temperatura experimental respecto a la de la simulación con TRACE para dicho modelo 1D. Esta diferencia es causada porque la interrupción de la circulación forzada hace que se produzca un mezclado, con la consiguiente homogeneización en las temperaturas en todos los niveles del núcleo (Figura 4), fenomenología que no es capaz de reproducir el modelo 1D. A continuación se presenta el procedimiento seguido para, en la medida de lo posible, reducir dichas diferencias.

Como se ha comentado arriba, el mezclado no se produce en el modelo 1D, ya que al ser elementos unidimensionales no son capaces de reproducir los procesos de mezcla en régimen de circulación natural, Figura 5. Por ello y con el objetivo de reproducir estos procesos de mezclado ha sido necesario introducir una serie de by-passes entre los diferentes elementos del núcleo y componentes adyacentes, Figura 6 (3% de la superficie de flujo de la pipe del núcleo). Consiguiéndose así un mejor mezclado a lo largo del núcleo, Figura 7.

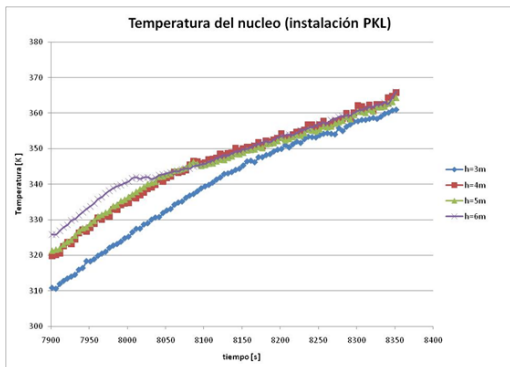


Figura 4. Evolución de la temperatura del núcleo con el cierre del RHRS (instalación PKL).

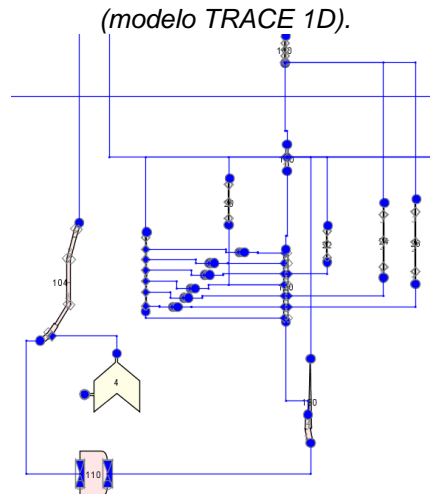


Figura 6. Configuración del modelo de TRACE con los by-passes auxiliares.

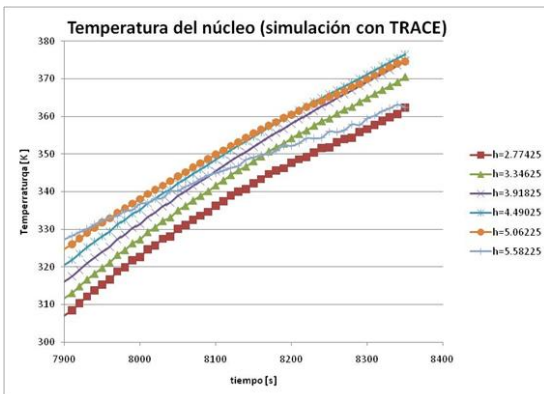


Figura 5. Evolución de la temperatura del núcleo con el cierre del RHRS (simulación con TRACE).

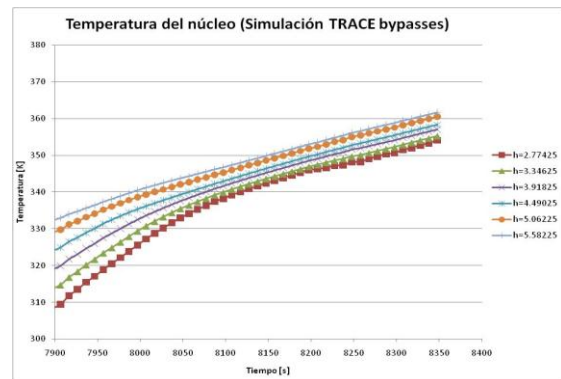


Figura 7. Evolución de la temperatura del núcleo con el cierre del RHRS (modelo TRACE 1D con by-passes).

2.2.2.- Modelo 3D de la instalación industrial de agua a presión.

Cabe reseñar la caída de presión del circuito primario que se tiene una vez obtenida la configuración inicial. El causante de dicha caída es el Break que aparece en la Figura 3, dicho Break fue el encargado de mantener la presión en el primario en todo momento en un valor próximo a la presión atmosférica durante los procesos de acondicionamiento para alcanzar las condiciones iniciales del test. Una vez se tiene el sistema en un estado “estacionario”, con todos los parámetros en valores similares a los del inicio del test, se procede a la eliminación de dicho elemento, teniendo que mantenerse todos los parámetros en valores aproximadamente constantes. Pues bien, esto no ocurre así, sino que se tiene que durante un tiempo de aproximadamente 10000s. se produce un descenso de la presión, bajando desde 1 a 0.25 bares (Figura 8a). Esta caída de presión es debida a la disminución de la masa de incondensables presentes en el lazo primario (Figura 8b).

Una vez realizadas las pertinentes comprobaciones, se ha corroborado que se produce una pérdida de masa de los elementos incondensables (causado probablemente por algún error del código). Para compensar dicha pérdida, se ha sustituido el break de estabilización por un Fill, de forma que se introduce “artificialmente” la masa perdida durante los cálculos internos del código. Obteniéndose que, introduciendo una masa de $7.5 \cdot 10^{-3}$ kg/s, la presión se mantiene en torno a la atmosférica a lo largo del tiempo. Así, con la introducción de dicho elemento, la masa perdida es recuperada consiguiendo que la instalación se mantenga en unas condiciones similares a las del inicio del test G1.1.

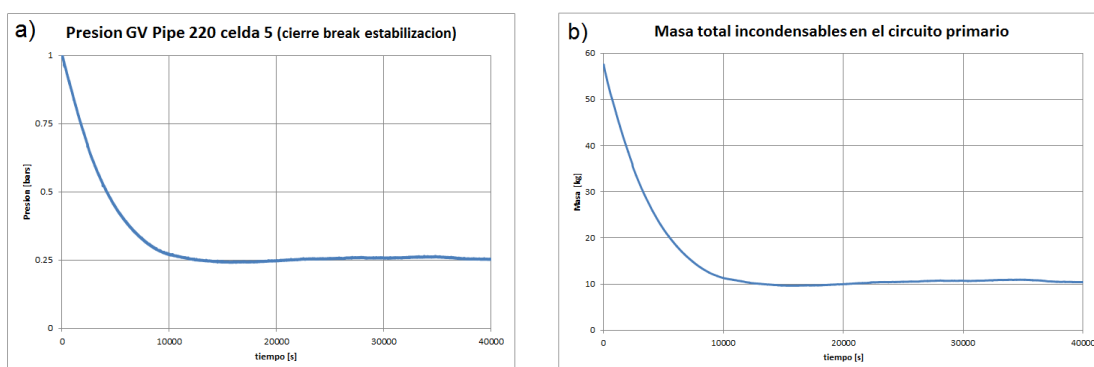


Figura 8. Circuito primario: a) Evolución de la presión;
b) Evolución de la masa total de gases incondensables.

3.- Comparación de los resultados experimentales con las simulaciones.

Una vez alcanzadas las condiciones iniciales del test G1.1 se procede a la realización de la simulación, para ello se sigue la secuencia de eventos mostrados en la Tabla 2. Las graficas presentadas a continuación muestran los resultados obtenidos mediante el código TRACE (hasta el momento actual de la simulación), tanto para el modelo de la propia instalación experimental (PKL con todos los componentes 1-D), como el de la aplicación a planta (PWR con vasija 3-D). Estas graficas son: el nivel colapsado de líquido, las temperaturas en el núcleo y la presión en el Upper Plenum, Figuras 9,10 y 11 respectivamente.

Respecto al nivel de la lámina líquida (Figura 9) decir que la simulación con TRACE del modelo PKL (línea PKL Simul., Figura 9) da unos resultados aceptables, si bien presenta ciertas divergencias, además se tiene una evolución con unos acusados dientes de sierra, hecho que no sucede en las medidas experimentales. Respecto a la simulación de la planta PWR (línea PWR Simul., Figura 9) decir que sigue de una forma mucho más ajustada los valores experimentales obtenidos en la instalación PKL y sin la aparición de los comentados dientes de sierra de la simulación 1D.

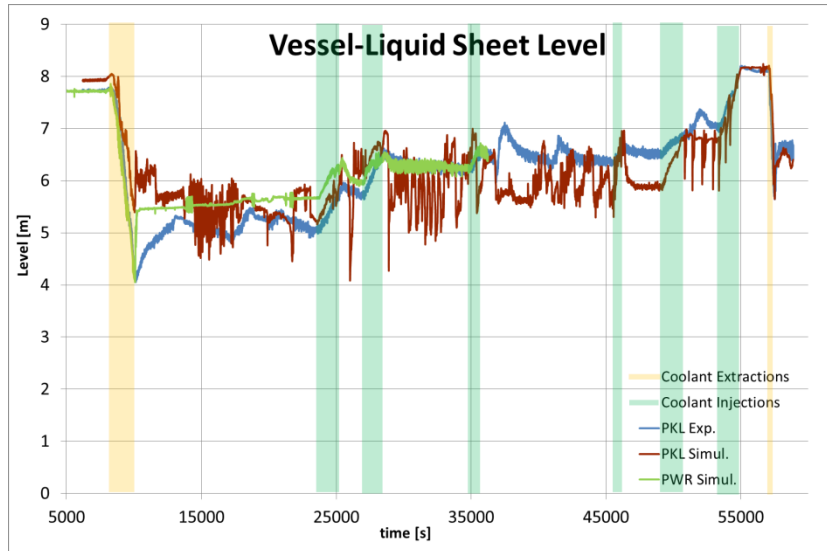


Figura 9. Nivel de la lámina líquida (PKL valores experimentales, PKL simulación con TRACE y PWR simulación con TRACE).

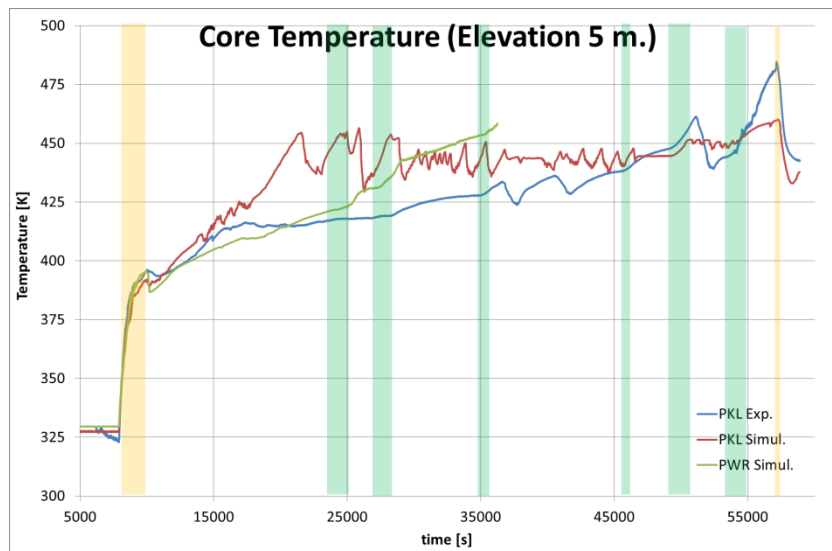


Figura 10. Temperatura del núcleo (PKL valores experimentales, PKL simulación con TRACE y PWR simulación con TRACE).

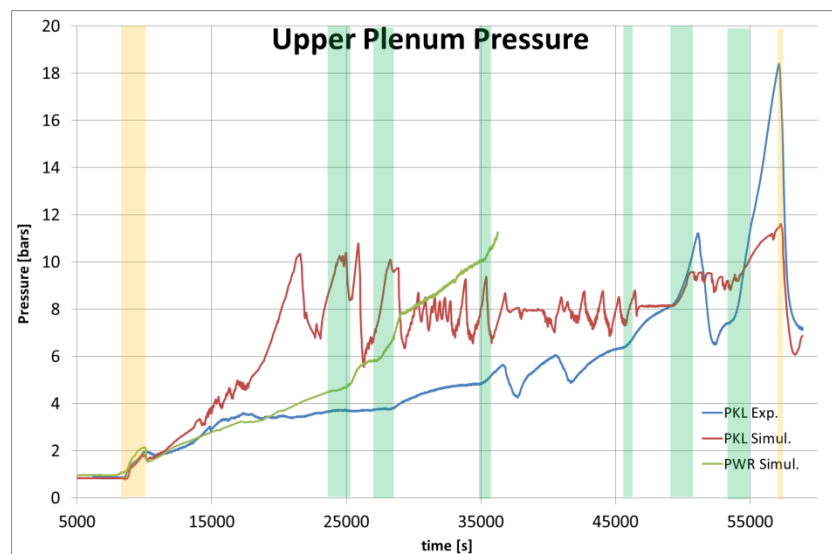


Figura 11. Presión en el Upper Plenum (PKL valores experimentales, PKL simulación con TRACE y PWR simulación con TRACE).

Respecto a la temperatura del núcleo (Figura 10) decir que la simulación con TRACE del modelo PKL (línea PKL Simul., Figura 10) da unos resultados aceptables, si bien supera los valores experimentales en la zona central del experimento desde los 15000-45000 segundos aproximadamente. Además alcanza un valor de 450 K y ahí se mantiene con una evolución en forma de constantes dientes de sierra, hecho que no sucede en las medidas experimentales. Respecto a la simulación de la planta PWR (línea PWR Simul., Figura 10) decir que sigue de una forma mucho más ajustada los valores experimentales obtenidos en la instalación PKL, si bien a partir del segundo 25000 da unos resultados algo superiores a los experimentales, pero a falta de alcanzar mayores tiempos en la simulación se puede decir que sus resultados son mucho más ajustados.

Similares comentarios a los efectuados para la anterior figura pueden ser realizados para los valores de la presión en el Upper Plenum (Figura 11). Destacando que para la simulación con TRACE de la planta PKL las divergencias son aún mayores y la evolución en forma de dientes de sierra es aun más acusada.

3.3.- Comentarios Finales.

En líneas generales se puede decir que se obtienen unos resultados satisfactorios para ambos modelos. Si bien el modelo 1D presenta unos valores más alejados respecto a los experimentales que los del modelo de planta con vasija 3D, presentando también mayores fluctuaciones de las magnitudes frente a una evolución más lineal de los valores experimentales y de la simulación con vasija 3D. Por lo tanto, cabe reseñar la mejor capacidad de reproducción con el modelo de vasija 3D frente al modelo 1D, si bien debería ser analizada la implementación del código para subsanar el problema que causa la pérdida de masa detectada en los gases incondensables (corregida mediante la introducción de un Fill que inyecta masa de forma constante a lo largo de toda la simulación). Destacando que los elementos 1-D del modelo PKL no son adecuados para la simulación de experimentos que presentan procesos de circulación natural.

Bibliografía.

- 1 – Quick Look Report PKL III G1.1.
Test Report NTCTP-G/2008/en/0008-B, Erlangen, 18th February 2009.
S.P. Schollenberger

- 2 - Description of the PKL III Test Facility.
Report FANP NT31/01/e30, Erlangen, July 2001.
H. Kremin, H. Limprecht, R. Güneysu, K. Umminger