

Análisis del evento causado por la apertura involuntaria de válvulas de seguridad y alivio en la central nuclear de Leibstadt utilizando el código TRACE

D. Blanco¹, A. Escrivá¹, J.L. Muñoz-Cobo¹, C. Berna¹, L. Rosinelli², A. Sekhri² & K. Fischer²

¹Instituto de Ingeniería Energética
Universitat Politècnica de València

Camino de Vera 14, 46022 Valencia (España)

Tel.: 0034 963879245, Fax: 0034 963877639, Email: dablade@upv.es

² Kernkraftwerk Leibstadt AG
5325 Leibstadt (Suiza)

Resumen – El objetivo fundamental de los códigos termohidráulicos es simular el comportamiento de un reactor nuclear frente a distintos escenarios, como transitorios de planta y accidentes. El desarrollo de estos códigos ha sido promovido durante mucho tiempo por varias organizaciones. Uno de los códigos en desarrollo, que cuenta con el apoyo de la comisión reguladora nuclear de Estados Unidos (NRC) y distintos grupos internacionales, es el código TRACE, el cual despierta gran interés por parte de centrales nucleares actuales y futuras.

Ha sido llevada a cabo la implementación y validación de un nuevo modelo de planta KKL desarrollado específicamente para el código TRACE, similar al ya existente de TRAC-BF1. En este proceso, se han realizado simulaciones de varios transitorios típicos en los que se ha evaluado la capacidad de respuesta del modelo, enfocando las mejoras necesarias para actualizar el modelo.

Este trabajo resume el análisis realizado con el código TRACE-V5 del evento de apertura involuntaria de las válvulas de alivio y de seguridad de la central KKL. Durante el funcionamiento normal de la planta, se produjo una apertura involuntaria de 8 válvulas de alivio, lo que provocó una rápida despresurización de la vasija del reactor seguido de una caída del nivel del agua y la activación de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo. La actividad del sistema de inyección de alta presión se inicia para mantener el nivel del reactor y refrigerar el núcleo. El evento ha sido reproducido por el código TRACE logrando unos resultados satisfactorios. El modelo de control utilizado en TRACE es una adaptación del antiguo modelo de TRACB-F1 y siendo posible, en este transitorio, verificar el comportamiento de los sistemas involucrados.

1. INTRODUCCIÓN

La central nuclear de Leibstadt (en alemán: Kernkraftwerk Leibstadt, KKL) es un reactor tipo BWR que se encuentra en operación desde 1984. Tiene una potencia térmica de 3600 MW, con los que produce 1220 MW de energía eléctrica. Actualmente se está realizando una labor de adaptación del modelo de la planta, del ya existente y validado con el código TRAC-BF1, al código TRACE, mediante el cual se pretende conseguir un modelo que permita reproducir lo más fielmente posible el comportamiento de la central.

Con el principal objetivo de verificar el funcionamiento del control del sistema ADS (*Automatic Depressurization System*) implementado en el nuevo modelo de TRACE de la central nuclear de Leibstadt, se ha ejecutado un transitorio provocado por la apertura involuntaria de varias válvulas de alivio. Para verificar el comportamiento de este control, se han llevado a cabo los primeros 350 segundos del test denominado SCRAM 124, en el que actúan los elementos relevantes de interés para nuestro objetivo, pudiendo comprobar el rendimiento de TRACE y del nuevo modelo en los aspectos parciales indicados.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE LA PLANTA

El modelo TRACE para KKL se ha creado utilizando la herramienta SNAP (*Symbolic Nuclear Analysis Package*).

Este modelo incluye las cuatro líneas de vapor y las 16 válvulas de alivio de seguridad. Ocho de estas válvulas tienen la función de control del sistema denominado ADS, el cual es el que propicia el transitorio de estudio. Para cada SRV se ha desarrollado un nuevo modelo de control, que incluyen la operación para el modo de operación de seguridad y los modos de operación de alivio y “lógica low-low”

En este apartado se describe de una forma general el modelo que ha sido desarrollado para la reproducción de la planta, Figura 1.

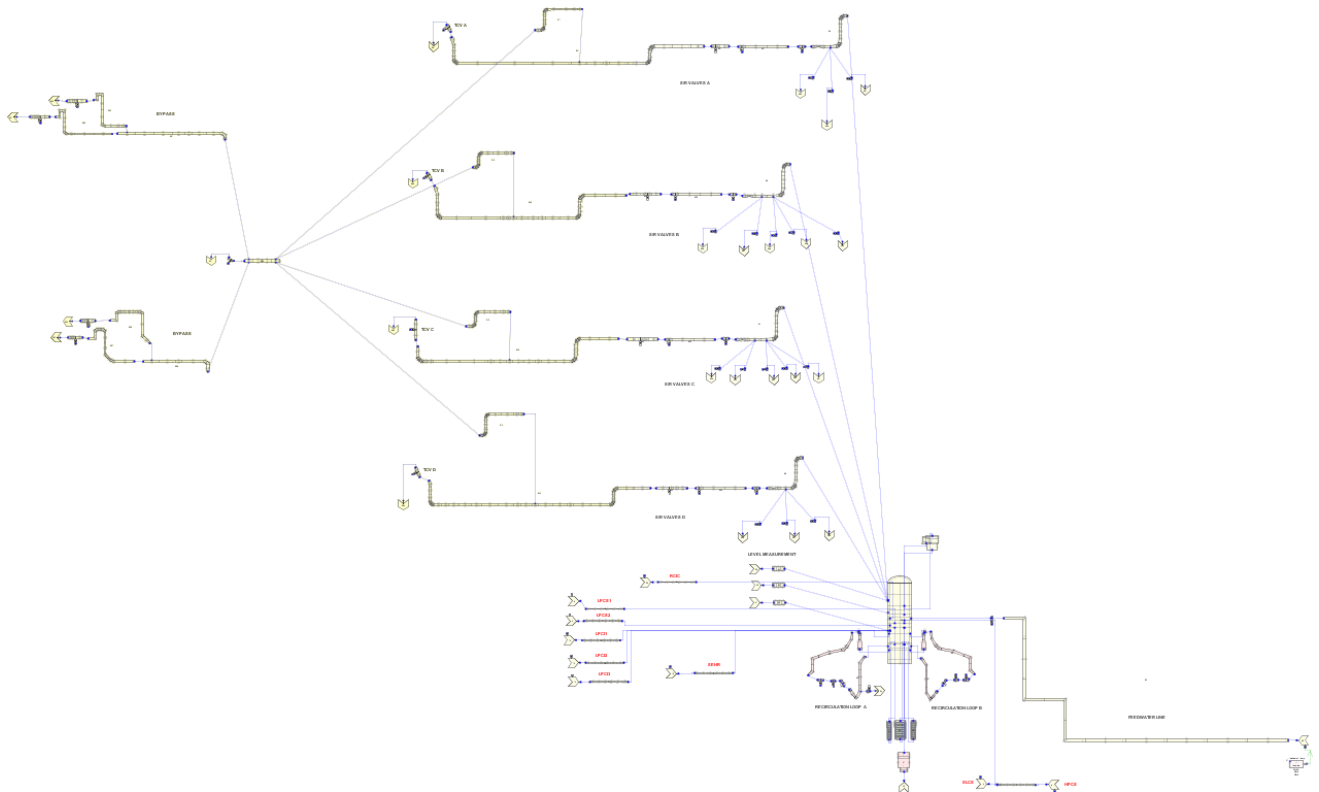


Figura 1. Visualización esquemática de la planta KKL con SNAP.

El modelo de la parte hidráulica actual dispone de un componente de vasija en 3D, con 15 niveles axiales, 1 azimutal y 2 radiales. El anillo radial interior de la vasija representa el núcleo, mientras que el exterior equivale al downcomer. Se han incluido los componentes pertinentes para componer los lazos de recirculación, tales como bombas, válvulas y bombas de chorro, y las líneas correspondientes de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo. La línea de alimentación también está incluida.

Por otro lado, las líneas de vapor principal a turbina están modeladas de manera individual. El anterior modelo de TRAC-BF1 unificaba las cuatro líneas de vapor en una, pero se ha considerado distinguir cada una de las líneas para una representación más rigurosa que se irá perfeccionando tras futuros estudios. Las líneas de baipás también están incluidas.

En cuanto a la modelación de la transmisión de calor, se utilizan estructuras de calor que simulan la transferencia entre dos puntos a diferente temperatura (aislamiento de los diferentes componentes) y componentes *chan* que reproducen la generación de calor por parte del combustible del núcleo.

En la parte de control, encontramos una adaptación completa del modelo de TRAC-BF1, el cual comprende la mayoría de acciones a ejercer en operación estacionaria y de actuaciones de emergencia. Consta de composiciones complejas, similares a los mapas electrónicos que componen los sensores y actuadores de la central real.

Los distintos sistemas pueden comprender un nivel de complejidad mayor o menor, encontrándonos algunos, como el de presión o el de recirculación, configurados por una cantidad importante de señales y transformaciones de estas. Otros sistemas de actuación, como el HPCS o el SEHR, son más simples y requieren menos pasos en el tratamiento de las señales.

Esta situación es la que crea la necesidad de verificación de los sistemas de control del nuevo modelo de TRACE. Los controles complejos pueden presentar complicaciones si su comportamiento no ha sido testeado en diferentes escenarios, sobre todo de carácter transitorio.

3. DESCRIPCIÓN DEL TRANSITORIO

El transitorio comienza con la activación del Sistema de Despresurización Automática (ADS), que controla la apertura de las válvulas de alivio. El vapor se libera a través de las válvulas de alivio de seguridad y, por lo tanto, la apertura de las válvulas de control de la turbina (TCV) debe reducirse para mantener constante la presión de entrada de la turbina. Al comienzo del transitorio, la despresurización produce un aumento significativo de nivel debido al incremento de la mezcla de fluidos. Posteriormente, este nivel de agua disminuye debido a la pérdida de inventario. A los 22 segundos del comienzo del evento, el reactor es parado debido al bajo nivel de agua en la vasija, lo que conduce a un disparo de la turbina. La rápida disminución de la presión del vapor principal provoca que las válvulas principales de aislamiento de vapor (MSIV) comiencen a cerrarse a los 33 segundos y un segundo aumento en el nivel del agua conlleva al disparo de las bombas de recirculación y las bombas de agua de alimentación al alcanzar el agua el límite de nivel superior.

Después del cierre de las TCV y las MSIV, el aislamiento de la vasija sufre un colapso vacío y un rápido aumento del nivel del reactor, más tarde la bomba de agua de alimentación (FW) se disparará debido a la señal de nivel alto en el *downcomer*. Después de la caída de presión en la RPV, aparece flashing en la línea FW y, por lo tanto, desplaza una cantidad considerable de agua al RPV. El HPCS y el sistema de enfriamiento del aislamiento del núcleo del reactor (RCIC) son activados manualmente para proporcionar una refrigeración adecuada al reactor.

La tabla 1 muestra la comparación entre los datos de la planta KKL y los resultados de la simulación del código TRACE para el tiempo transitorio en el que tienen lugar los eventos principales.

Tabla 1. Comparación de datos KKL y resultados de simulación TRACE para el transitorio SCRAM 124.

EVENTO	TIEMPO DATOS KKL (s)	TIEMPO TRACE (s)
Apertura de las válvulas de seguridad y alivio con lógica ADS debido a una falsa alarma del nivel del reactor – comienzo del transitorio	0	0
SCRAM	22	26
Disparo de las bombas de recirculación	24	26
TCVs totalmente cerradas	26	25
MSIVs comienzan a cerrarse	33	38
MSIVs totalmente cerradas	37	44
Disparo de la bomba FW	41	65
Disparo de las bombas de recirculación	41	26
Caudal FeedWater = 0	50	54
Activación del sistema RCIC	70	78
Comienza la inyección del RCIC en el núcleo	82	78
Comienza la inyección del HPCS en el núcleo	169	180
RCIC turbine tripped	323	333
Válvulas de la línea del HPCS se cierran	336	327

La comparación entre los resultados de la simulación TRACE y los datos de la planta KKL para las principales variables del transitorio la SCRAM 124 se mostrará en las siguientes figuras. Los resultados obtenidos son satisfactorios, aunque el control del agua de alimentación no actúa correctamente desde el momento en que se detiene el flujo másico. Después de esto, aparece el flashing y los parámetros de la simulación se alejan de los datos medidos.

La potencia del reactor ha sido impuesta, es decir, no hay retroalimentación de la termohidráulica en este parámetro. Por lo tanto, la caída en la potencia del reactor a ~ 80% debido al colapso vacío al comienzo del transitorio no es capturada por el modelo TRACE. Básicamente, el reactor está a plena potencia hasta que se activa la señal de SCRAM y la curva de decaimiento se implementa a partir de este momento (ver Figura 2).

Para el flujo másico total del núcleo del reactor, se ha encontrado una evolución muy similar entre los datos de la planta KKL y los resultados de las simulaciones TRACE (mostrado en la Figura 3). Existe una diferencia en la estabilización inicial, y es que la simulación TRACE comienza con un caudal en el núcleo del 100%, en comparación con los datos de la planta, que es de alrededor del 90%, sin embargo, ambas curvas evolucionan de manera muy similar durante todo el transitorio. Solo aparecen pequeñas diferencias, justo después de la SCRAM y cerca del final del transitorio.

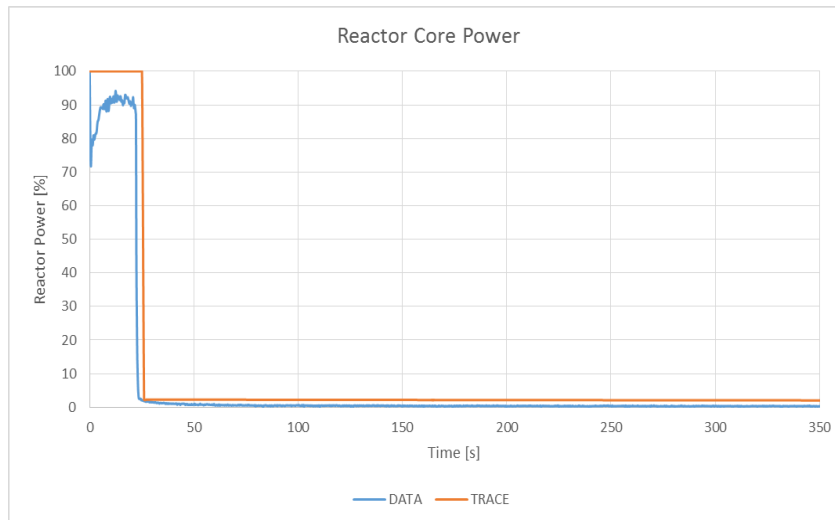


Figura 2. Evolución de la potencia del núcleo.

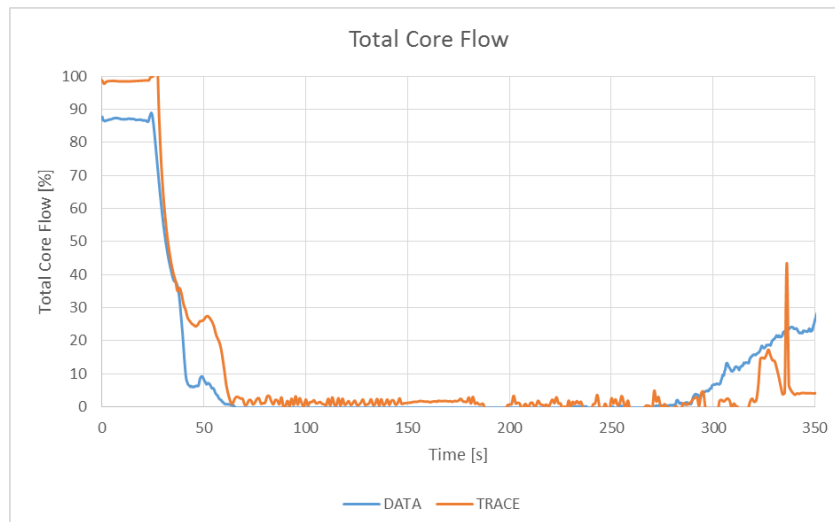


Figura 3. Evolución del flujo másico a través del núcleo.

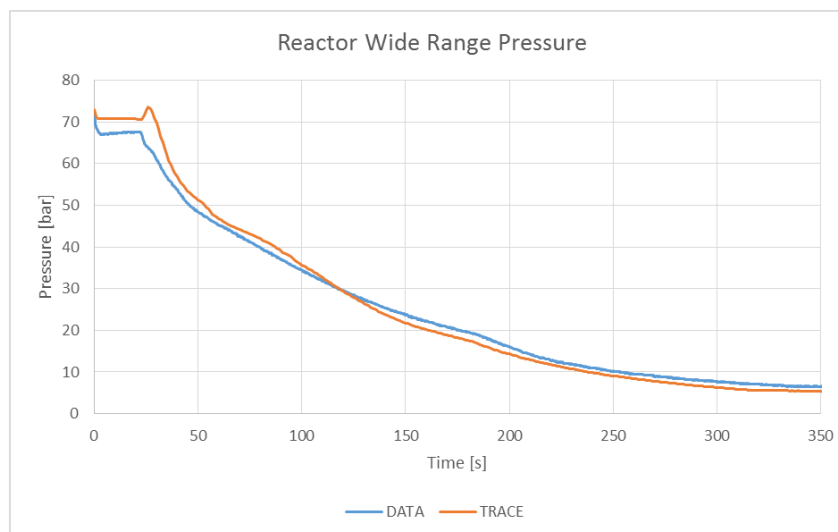


Figura 4. Evolución de la presión en la vasija.

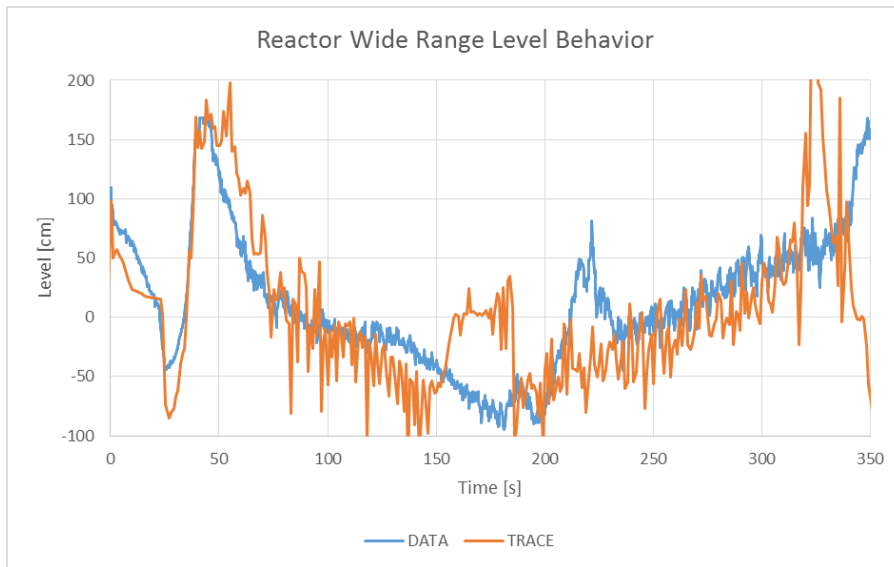


Figura 5. Evolución del nivel de agua en el núcleo.

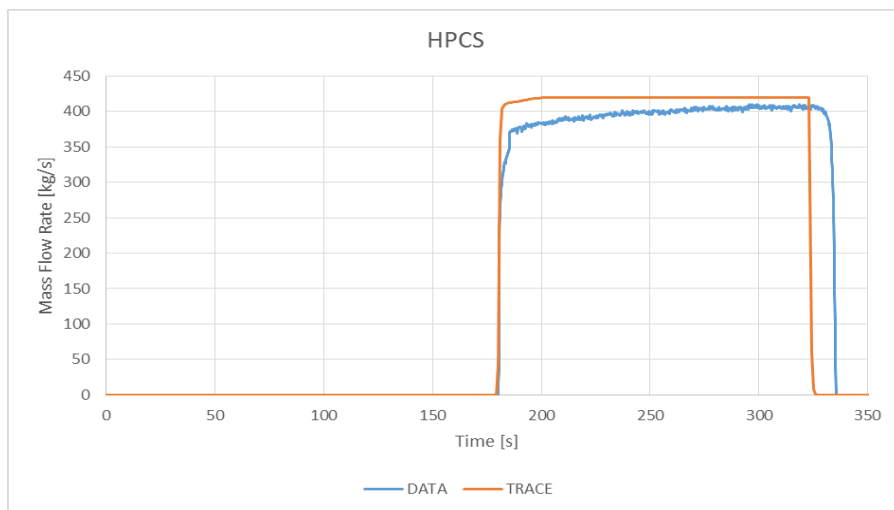


Figura 6. Evolución del caudal del sistema HPCS.

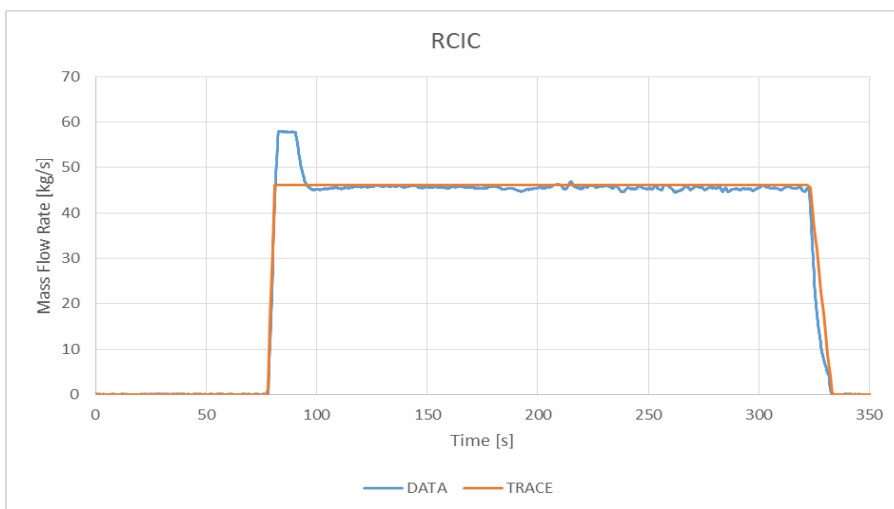


Figura 7. Evolución del caudal del sistema RCIC.

Como se muestra en la Figura 4, la presión en el domo tiene una tendencia decreciente. A partir de un valor similar previo al SCRAM en ambos casos, la evolución de la presión de la simulación con TRACE tiene una pendiente ligeramente mayor de la que muestra el comportamiento de la planta real durante los primeros instantes. Aproximadamente, después de cuarenta segundos de transitorio, la evolución de las dos series de datos es muy similar, pudiendo apreciar solo ligeras diferencias entre los datos de KKL y los valores de simulación TRACE.

Para el nivel del reactor (determinado por los sensores de rango amplio, Figura 5), se ha encontrado una evolución muy similar entre ambos casos, siendo ambas curvas muy similares en términos generales, aunque existen mayores fluctuaciones en el modelo TRACE que las presentadas en la planta KKL. Aparece una ligera discrepancia que consiste en que la simulación ejecutada con TRACE tiene un avance en el aumento del nivel del reactor, este aumento de nivel tiene lugar en la planta KKL entre los segundos 200 y 240, mientras que en los resultados de TRACE se produce entre los segundos 150 y 190, aproximadamente. Estos datos están relacionados con el nivel de referencia, que se encuentra cercano a los 13,5 m. En la Figura 5, el nivel correspondiente a 0 cm indica el nivel de referencia.

En la simulación, la caída de nivel inicial provoca la reactivación de las bombas de recirculación. Durante el transitorio real, el disparo de la bomba de recirculación para reducir el flujo del núcleo se anticipa y no se llega a alcanzar el valor mínimo que se llega en TRACE. El modelo del sistema de control funciona correctamente, pero el criterio utilizado no se corresponde exactamente con los *setpoints* de la planta en este transitorio.

Por último, el sistema HPCS y el sistema RCIC tienen un comportamiento muy similar entre los resultados obtenidos y los datos de la planta, tal y como se muestra en las Figuras 6 y 7. Con respecto al RCIC, hay un pequeño pico que se produce en planta, durante los primeros 10 segundos de inyección aproximadamente. Este aumento en el caudal excede el límite de capacidad del elemento utilizado en TRACE, por lo que no se reproduce.

4. CONCLUSIONES

El test estudiado, donde la apertura de las válvulas ADS se produce debido a una falsa alarma del nivel del reactor, ha sido reproducido por el código TRACE, con el cual se comienzan a comprobar las capacidades del modelo de control, el cual ha sido adaptado del antiguo modelo de TRAC-BF1.

Previamente a la simulación del transitorio, se han alcanzado las condiciones estacionarias adecuadamente. Además, se ha ejecutado un transitorio nulo antes del inicio de la prueba. En ambos casos, se ha conseguido una correcta estabilización con una buena precisión de los valores de los parámetros principales. Después de esto, se ejecutó la del test SCRAM 124 mediante el código TRACE, cuyos resultados se incluyen en este informe.

En términos generales, los resultados logrados son satisfactorios. Resaltar que la captura de la aparición del fenómeno de *flashing* por el código TRACE, que afecta al flujo en la línea de alimentación, ha podido causar ligeras discrepancias en la simulación.

El resto de los parámetros de simulación TRACE tienen una evolución bastante fiel con respecto a los datos de la planta KKL. Este es el primer transitorio utilizado para probar el rendimiento del nuevo modelo de control TRACE de la planta KKL. En consecuencia, se deben ejecutar nuevos transitorios, para continuar con la verificación de más sistemas de control que no hayan actuado en este test.

Desde el conocimiento que nos aporta el estudio expuesto, podemos concluir que el modelo actual responde adecuadamente y reproduce los eventos marcados de un modo fiable, representando estos resultados que los sistemas de control involucrados actúan correctamente.



AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación de este trabajo a la Central Nuclear de Leibstadt.

REFERENCIAS

- 1 - KKL System Data for Transient Analysis Codes - RPV, Nuclear Boiler and Recirc System and Fuel handling. BET/02/131. REV. 005
- 2 - Auslösung des SEHR-ADS während Instandhaltungsarbeiten an den Blitzschutzbeschaltungen. BEE/07/0011
- 3 - Review of KKL SEHR-ADS Event using TRAC-BF1 and Impact of HPCS Cold Water Spray on Marathon Control Rods. BET/02/131
- 4 - Analysis with TRACE of the KKL SEHR-ADS event (SCRAM124). GTIM-18/03