

Document downloaded from:

<http://hdl.handle.net/10251/61035>

This paper must be cited as:

Hidalga García-Bermejo, P.; Sekhri, A.; Baumann, P.; Morera Cano, D.; Miró Herrero, R.; Barrachina Celda, TM.; Verdú Martín, GJ. (2014). Validación del modelo acoplado TRACE/PARCS de KKL por medio de los datos de planta del evento disparo de turbina de 2001. 40ª Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. Grupo Senda.



The final publication is available at

<http://www.reunionanualsne.es/hemeroteca-ra/heme-ponencias>

Copyright Grupo Senda

Additional Information

## Validación del modelo acoplado TRACE/PARCS de KKL por medio de los datos de planta del evento disparo de turbina de 2001

Patricio Hidalgo<sup>2</sup>, Abdelkrim Sekhri<sup>1</sup>, Peter Baumann<sup>1</sup>, Daniel Morera<sup>2</sup>, Rafael Miró<sup>2</sup>, Teresa Barrachina<sup>2</sup>, Gumersindo Verdú<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KernkraftwerkLeibstadt AG  
5325 Leibstadt, Switzerland  
abdelkrim.sekhri@kkk.ch, Peter.Baumann@kkk.ch

<sup>2</sup>Institute for Industrial, Radiophysical and Environmental Safety (ISIRYM)  
Universitat Politècnica de València (UPV)  
Camí de Vera s/n, 46021 València, Spain  
pathigar@etsii.upv.es, dmorera@isirymp.upv.es, rmiro@isirymp.upv.es, tbarrachina@isirymp.upv.es, gverdu@isirymp.upv.es

**Resumen** – A fin de mejorar el modelado de la Central Nuclear de Leibstadt (KKL), se ha empleado el acoplamiento del código neutrónico 3D PARCS y el termohidráulico TRACE. Este trabajo se enmarca en el desarrollo de una metodología multi-física y multi-escala que permita el análisis de transitorios en el reactor, empleando las herramientas de simulación disponibles. Para comprobar la validez del modelo se ha simulado un transitorio complejo tipo Disparo de Turbina basado en el mismo evento real en planta y se han comparado los resultados. A su vez, se han generado las secciones eficaces necesarias correspondientes al ciclo en el que se sucedió el evento por medio de la metodología SIMTAB, desarrollada por el ISIRYM. El modelo empleado en TRACE está basado en el modelo previo existente para TRAC-BF1. La comparación con datos de planta muestra una buena concordancia con los datos de la simulación. Debido a ello, se puede concluir que el modelo acoplado TRACE/PARCS para KKL con la generación de secciones eficaces SIMTAB proporciona un análisis satisfactorio del transitorio complejo de Disparo de Turbina.

## 1 INTRODUCCIÓN

Este artículo informa sobre el proceso de validación del código acoplado TRACE de la NRC con PARCS. Para ello se han empleado datos de la planta Kern Kraftwerk Leibstadt (KKL) para evaluar la predicción de su modelo en TRACE/PARCS. El test de planta seleccionado para el *benchmark* es el dispro de turbina a 112% de potencia [1]. El objetivo del test fue asegurar la actuación satisfactoria de la planta, manteniéndose ésta en condiciones controladas gracias a sus sistemas automáticos de respuesta ante este evento.

Desde el punto de vista del *benchmark*, este test supone una prueba muy exigente para la termohidráulica y la neutrónica implementada en ambos códigos acoplados. En este suceso, los fenómenos termohidráulicos suponen un aumento de presión en la vasija al cerrar la válvula de control de la turbina (TCV) de manera inmediata. Ello produce una onda de sobrepresión que se propagará desde la turbina hasta la vasija por las líneas de vapor, al mismo tiempo que se produce la apertura de la válvula de bypass (TBV) para liberar el vapor. El cambio de estos parámetros se verá reflejado por el código TRACE. Otro aspecto interesante es que el reactor se mantendrá crítico, ya que la potencia se reduce por medio de una inserción selectiva de barras de control (SRI) y por medio de la reducción del flujo del reactor a través del cierre de sus válvulas de control (FCV) hasta el

18%. La capacidad del acople entre la neutrónica y la termohidráulica se probará por medio de la interacción entre el código neutrónico PARCS y TRACE.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL EVENTO

El test se inicia con el cierre de la TCV desde su posición totalmente abierta hasta el cierre completo en 200 ms. El cierre repentino de la TCV iniciará la apertura automática de la TBV con el desfase correspondiente. Este desfase provocará un incremento de presión en la vasija con la consecuente excursión de potencia. La excursión de potencia se evitará con el SRI junto con la reducción del flujo másico del reactor por medio de las FCV. La presión en la vasija se verá incrementada en un 110%. La tabla 1 muestra un resumen de los valores alcanzados en el transcurso del evento.

**Tabla 1. Secuencia del test Disparo de Turbina.**

Tiempo [ms]	Suceso
0	Flujo del reactor a 3370.85 kg/s
0	Presión en la vasija a 71.9 bar
0	Disparo de turbina
218	TCV comienza el cierre
230	Inicio de SRI banco 38
260	TBV inicia apertura ~ 0.325 %
300	FCV ~ 9.125 %
300	Inicio de SRI banco 40
305	FCV cerradas al 66%
440	TBV ~ 25 %
490	TBV ~ 50 %
780	Pico de presión en la vasija 73.1 bar
1020	Apertura máxima de TBV ~ 82 %
1410	SRI completado
2030	Pico del flujo de vapor a 2170.7 kg/s
4880	FCV a 18 %
9100	Flujo másico en el reactor ~ 1892 kg/s
9980	Pico de potencia ~ 58 %
29980	Presión en la vasija 68.0 bar

Los disparos de turbina tienen distintas duraciones según el momento o la planta donde se suceden. En esta ponencia, de acuerdo con los datos de planta de KKL el modelo simulará sólo los 20 primeros segundos.

### 3 MODELADO DE TRACE ACOPLADO CON PARCS PARA KKL

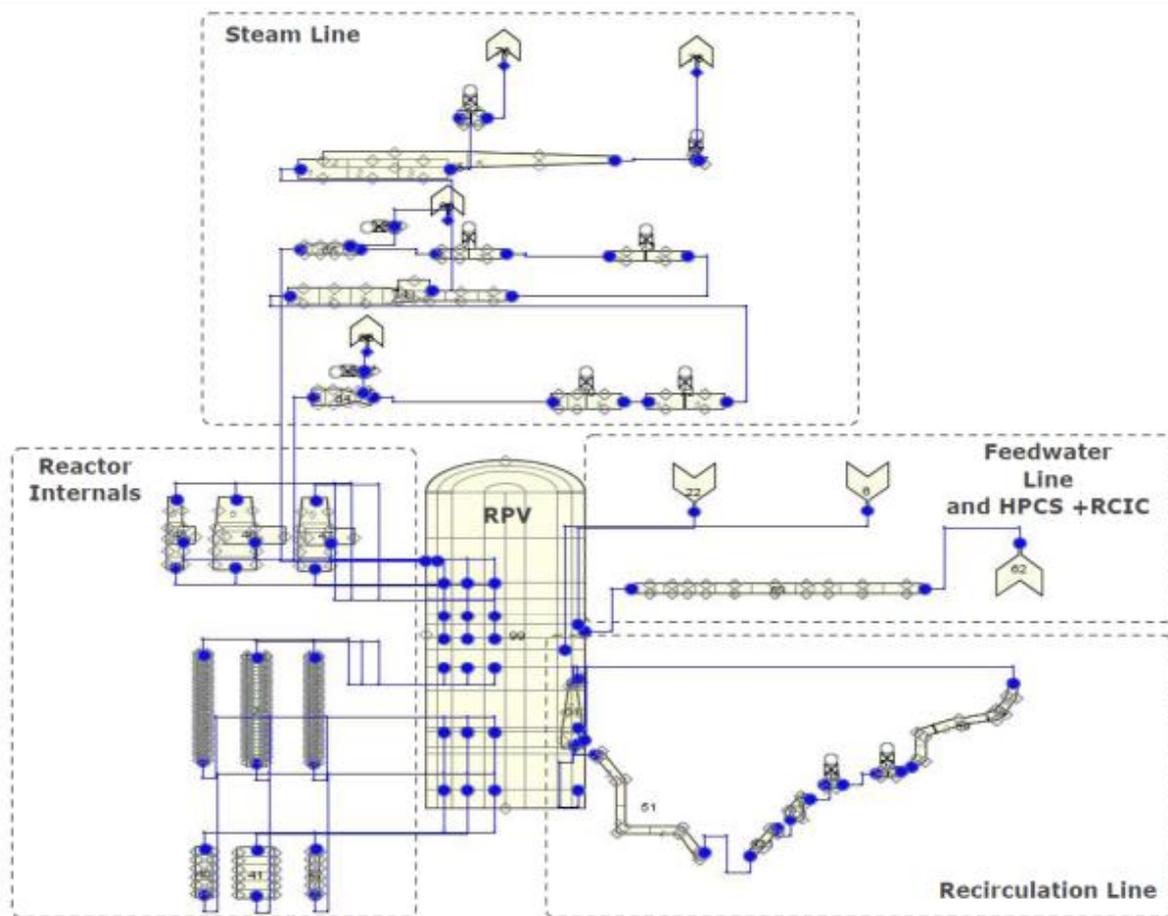
A fin de poder emplear el código TRACE para el análisis de transitorios en KKL se realizó la conversión del modelo ya existente en TRAC-BF1 [4] a TRACE. Se emplearon para este benchmark los datos de planta recogidos en el correspondiente informe [2]. La aplicación SNAP permitió a su vez realizar modificaciones en el antiguo modelo TRAC-BF1 y mostrar la ilustración recogida en la figura 1. Gracias al uso exhaustivo de los manuales de TRACE [5] [6] se ha podido realizar el modelo incluyendo los siguientes componentes:

1. Vasija del reactor (RPV) en 3D.
2. Regiones internas del reactor, incluyendo: 3 regiones en el núcleo, separadores y tubos guía.
3. Elementos combustibles simulados en 3 canales.
4. Línea de alimentación.
5. 2 lazos de recirculación, incluyendo: jet pumps, bombas de recirculación, FCV y líneas de succión.
6. 2 líneas de vapor divididas de manera asimétrica 3:1 respecto al flujo que transportan, de manera que una simula una única línea real, mientras que la otra agrupa a las otras 3. Esto incluye las main steam isolation valves (MSIV), válvulas de alivio de seguridad (SRV), colector, TCV y la entrada a la turbina.
7. Sistema de refrigeración del núcleo de emergencia (ECCS) incluyendo high pressure core spray (HPCS) y reactor core isolation cooling (RCIC)
8. Aparamenta de medida del reactor.
9. Sistemas de control (trips, logics, etc.).

La RPV se ha modelado con el componente 3D vessel. Se ha dividido en 15 niveles axiales, 4 anillos radiales, y un sector azimutal, dando un total de 60 celdas. 3 anillos radials contienen los separadores, y el anillo restante el downcomer (ver figura 2). El nucleo agrega los elementos combustibles en 3 canales radials desde el nivel 5 al 7 de la vasija. La generación de potencia corre por cuenta del código PARCS, acoplado a esos canales.

Los lazos de recirculación consisten en jet pumps, bombas de recirculación, FCV y líneas de succión y descarga.

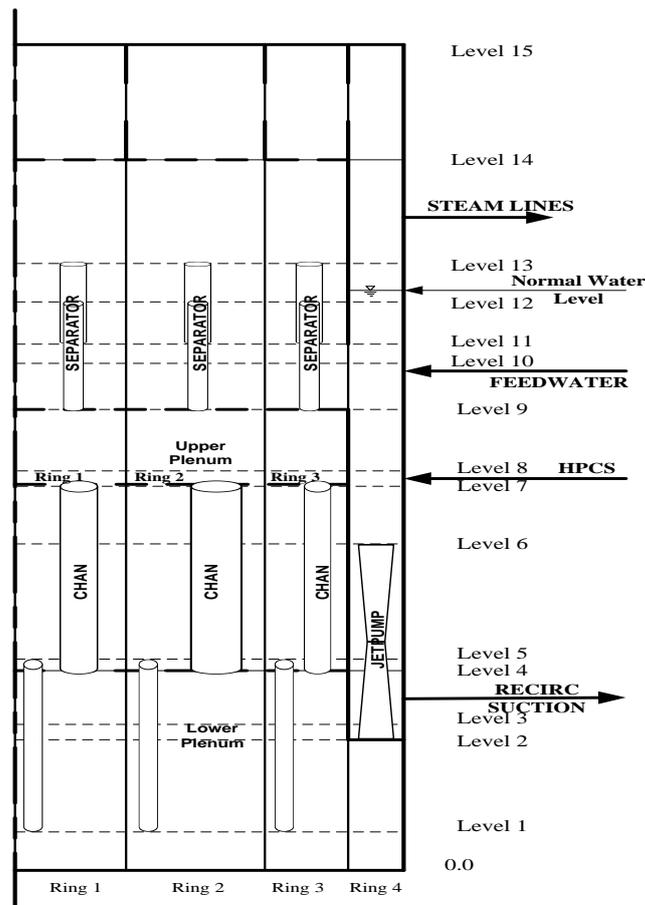
El diagrama nodal del modelo TRACE puede observarse en la figura 1.



**Figura 1. Modo 4 Modelo de planta KKL para TRACE.**

El cierre y apertura de las válvulas FCV, TCV y TBV son de gran importancia para el transcurso del evento y por ello se ha tratado de modelar estos movimientos en TRACE con el máximo rigor.

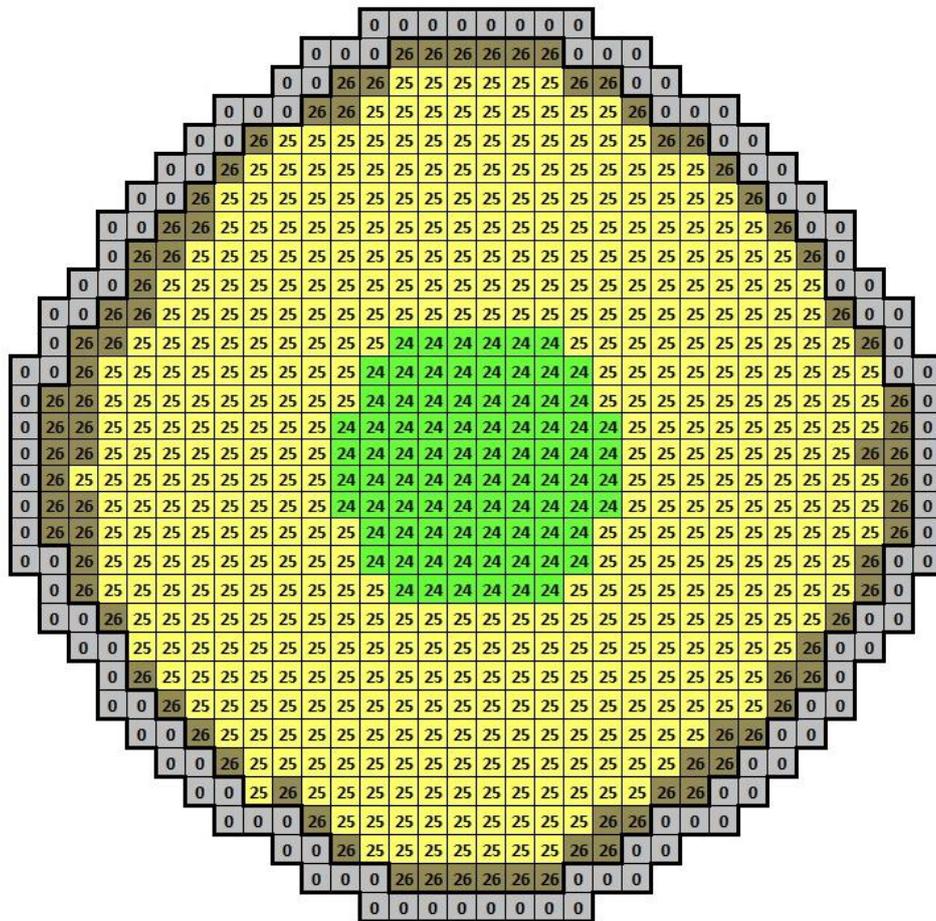
El nivel del reactor en KKL se mide de manera indirecta a través de la diferencia de presiones por medio de un transductor. Para ese análisis se representan 3 puntos de medida de presión en el modelo.



**Figura 2. Nodalización de la vasija y sus componentes integrantes en TRACE.**

El núcleo se modela usando sólo 3 canales, como ya se ha mencionado. Cada componente CHAN del modelo agrupa a una serie de elementos combustibles. La figura 3 muestra la distribución radial de los canales y que elementos combustibles lleva asociados. En el modelo TRACE se emplea esta distribución de canales a fin de obtener suficiente precisión sin perder en velocidad computacional. Esto se permite ya que el incremento de presión no es excesivamente alto y el tiempo del transitorio es suficientemente corto, por tanto los efectos radiales no son significativos.

El modelo TRACE se ha acoplado con PARCS. PARCS es un código tridimensional para simular la ecuación de la difusión en el núcleo del reactor de manera dependiente con el tiempo, multigrupo; así como la ecuación SP3 de transporte para geometrías ortogonales y no ortogonales. Por ellos PARCS se acopla directamente con el código termohidráulico TRACE que proporcionará a cada paso de tiempo la información necesaria para emplear la variación consecuente de las secciones eficaces según las variaciones termohidráulicas. Esta retroalimentación intercambiada entre ambos códigos proporciona mayor precisión y realismo en las variaciones de los parámetros del transitorio.



**Figura 3. Distribución de los elementos combustibles en el núcleo para TRACE y PARCS**

### 3.1 Limitación del modelo TRACE/PARCS

El modelo TRACE emplea las siguientes aproximaciones para su simplificación y facilidad de cálculo. Estas aproximaciones pueden resumirse como sigue:

1. La planta real contiene un modelo BWR con 4 líneas de vapor y su correspondiente valvulería.
2. La TBV se ha ajustado de acuerdo a su capacidad según el fabricante, dando un grado de libertad. Esto se da ya que no hay datos de planta.
3. La configuración del núcleo no corresponde a la configuración del evento. El evento se dio en el 2001, y los datos de secciones eficaces corresponden a lo que era el ciclo hasta la fecha, ciclo 19, para hacer posteriormente futuros cálculos.
4. Asimismo la configuración de barras de control no corresponde con la existente en el evento disparo de turbina, con lo que el movimiento de estas ha de adaptarse a la reactividad de las secciones eficaces disponibles.

Todas estas limitaciones no permiten una precisa comparación cuantitativa, especialmente en la variable de potencia. Así y todo, el *feedback* proporcionado por el acople entre un código termohidráulico y neutrónico si muestran una predicción coherente de los resultados del transitorio.

## 4 ESTADO ESTACIONARIO

### 4.1 Datos neutrónicos

El caso de referencia para KKL CASMO3/SIMULATE3; para convertir los datos de secciones eficaces a un formato legible por PARCS se emplea la metodología SIMTAB [9]. Esta metodología se ha desarrollado y validado para obtener los parámetros neutrónicos colapsados necesarios para los cálculos en 3D neutrónicos y termohidráulicos.

Para comprobar la validez de estos parámetros, se han comprobado parámetros relevantes del estado estacionario predicho por PARCS con los datos de SIMTAB. La comparación se realiza con el código NEM [8] y con SIMULATE3 [7].

La tabla 2 muestra los resultados de  $k_{eff}$ .

**Tabla 2. Comparación de  $k_{eff}$ .**

Código	$k_{eff}$	Error absolute (pcm)
$k_{eff}$ SIMULATE3	1.00398	-
$k_{eff}$ PARCS v2.7	1.00504	106.1
$k_{eff}$ NEM	1.006005	202.5

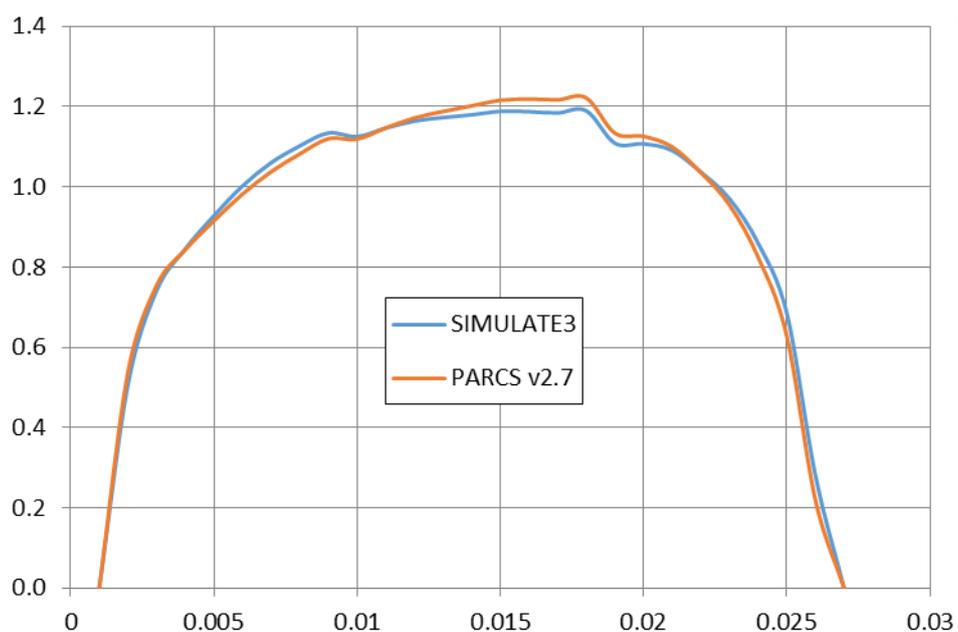
Asimismo se comparan los datos de los perfiles de potencia axial y radial en la tabla 3 y las figuras 4 y 5.

**Tabla 3. Perfil axial de potencia y error absolute de PARCS v2.7 y SIMULATE3.**

Nivel Axial	SIMULATE3	PARCS v2.7	Error Absoluto
1	0.000	0.000	0.000
2	0.506	0.537	0.031
3	0.741	0.754	0.013
4	0.845	0.843	0.002
5	0.928	0.915	0.013
6	1.002	0.982	0.020
7	1.060	1.038	0.022
8	1.102	1.082	0.020
9	1.134	1.120	0.014

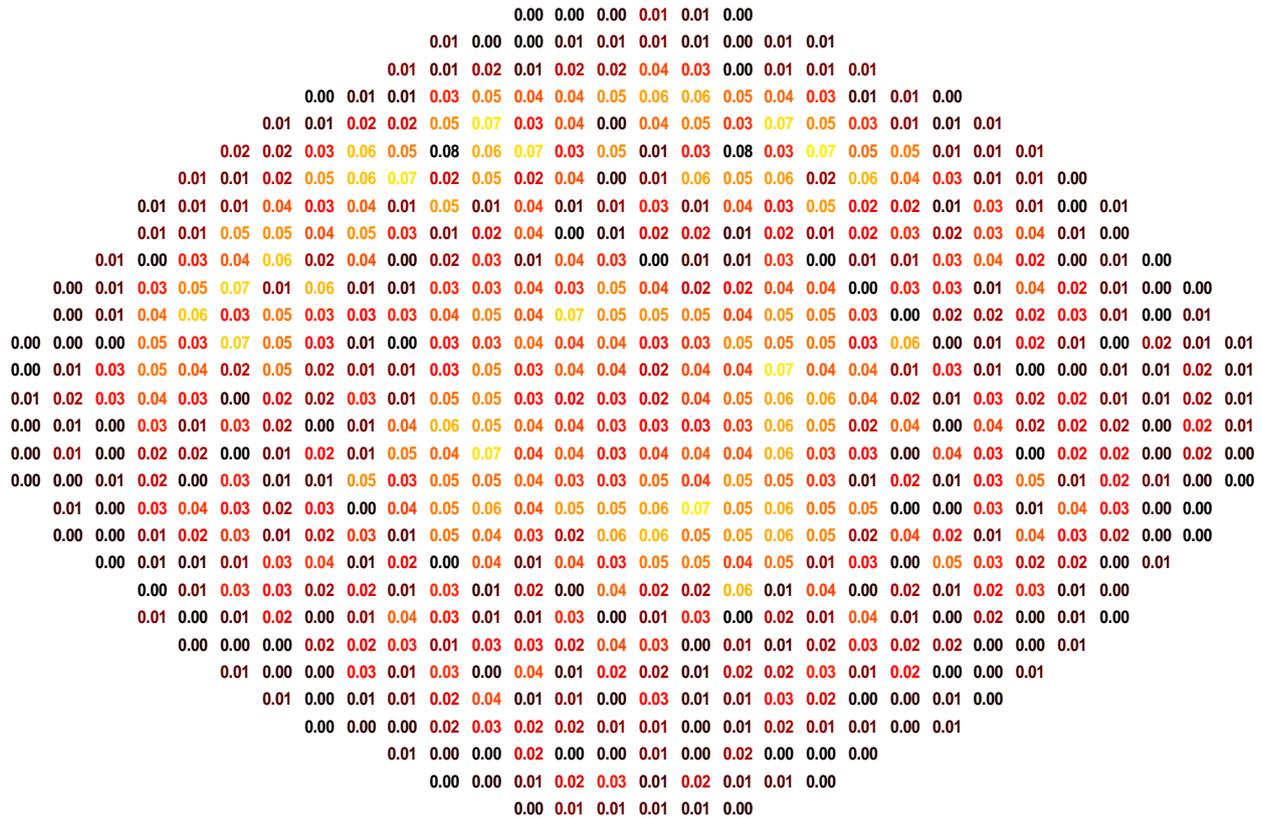
10	1.125	1.119	0.006
11	1.147	1.147	0.000
12	1.164	1.172	0.008
13	1.173	1.188	0.015
14	1.180	1.202	0.022
15	1.188	1.216	0.028
16	1.187	1.219	0.032
17	1.184	1.217	0.033
18	1.190	1.222	0.032
19	1.109	1.134	0.025
20	1.107	1.126	0.019
21	1.091	1.100	0.009
22	1.037	1.036	0.001
23	0.971	0.955	0.016
24	0.860	0.825	0.035
25	0.687	0.629	0.058
26	0.282	0.220	0.062
27	0.000	0.000	0.000

El error RMS del perfil axial de potencia entre PARCS y SIMULATE se sitúa en torno a 2.62%. La figura 4 muestra la comparativa gráfica.



**Figura 4. Perfil axial de potencia entre PARCSv2.7 y SIMULATE3**

Otro parámetro importante a comparar es el error absoluto en los nodos del perfil radial de potencia. La figura 5 muestra dicho error entre PARCS y SIMULATE, donde el error relativo no superaría el 2.94% en el caso más desfavorable.



**Figura 5. Error absoluto en el perfil radial de potencia PARCS v2.7 - SIMULATE3**

## 4.2 Condiciones previas al estado estacionario

El objetivo de esta sección es iniciar la ejecución de TRACE de la manera más próxima a las condiciones iniciales de planta al realizarse el disparo de turbina. Para ello se ejecuta en *stand alone* el código TRACE para obtener todas las variables convergidas y en el valor inicial correspondiente. Después se ejecutará el caso transitorio a partir de este estado estacionario. La tabla 4 ilustra los parámetros principales como potencia, presión, etc. Los valores iniciales del modelo coinciden con bastante coherencia con los datos de planta. Sin embargo algunos de esos parámetros muestran pequeñas diferencias como el flujo másico del reactor. Estas diferencias pueden atribuirse a las limitaciones y simplificaciones hechas en el diseño del modelo.

**Tabla 4. Condiciones previas al disparo de turbina.**

Parámetro	Datos de	Datos del	Desviación típica
-----------	----------	-----------	-------------------

	Planta	Modelo	(%)
Potencia del Núcleo (MW)	3514.9	3600	2.42
Presión del reactor (bar)	71.9	72.9	1.39
Flujo del reactor (kg/s)	9340	9354	3.00
Lazo de recirculación A / B (kg/s)	1685.3/1685.5	1742.9 / 1729.0	3.42 / 2.58
Flujo de vapor (kg/s)	1955	1968.7	0.70
Nivel del reactor (cm)	1435.3	1417.8	1.22
Área equivalente de TBV en su máxima apertura (m <sup>2</sup> )	1.18	1.18	0.00
Área equivalente al principio del transitorio TCV(m <sup>2</sup> )	1.07	1.07	0.00
Área equivalente al principio del transitorio FCV (m <sup>2</sup> )	0.06	0.06	0.00

## 5 RESULTADOS DEL TRANSITORIO

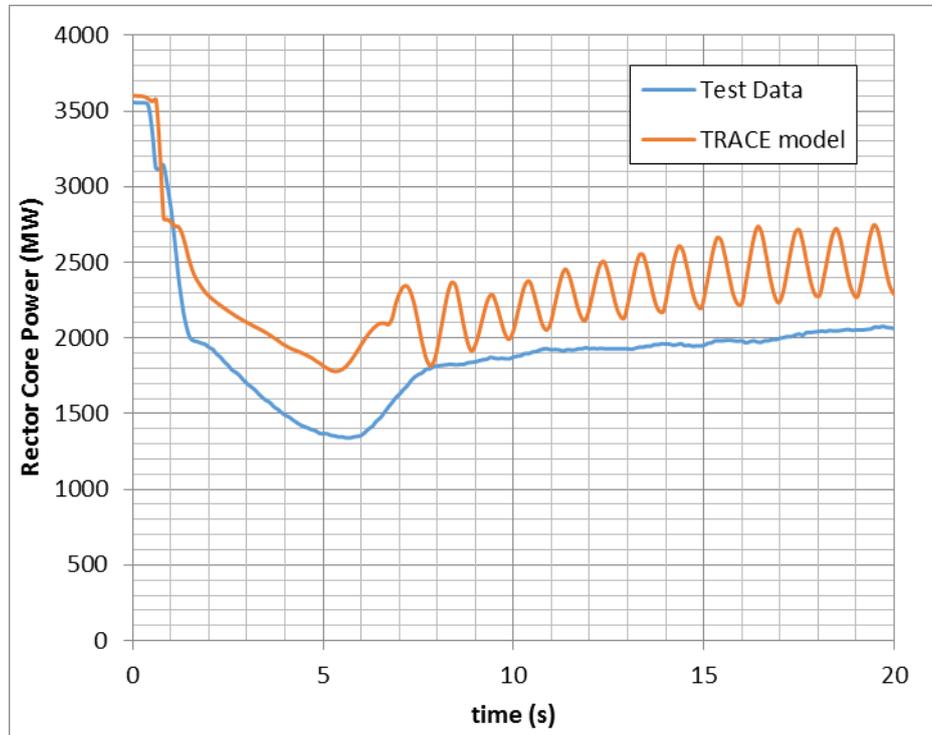
Un disparo de turbina en un reactor tipo BWR es un transitorio complejo a la hora de ser analizado. Este transitorio involucra el núcleo del reactor, la alta presión del refrigerante, las válvulas y líneas asociadas en torno a una complicada interacción con variables que evolucionan a alta velocidad. Asimismo el SCRAM se evita por medio de la SRI, por lo que el reactor permanece crítico y ello incrementa la complejidad al producirse interacciones entre la neutrónica y la termohidráulica del acoplamiento TRACE/PARCS. El Disparo de turbina comienza con el cierre repentino de la TCV y la apertura de TBV.

Desde el punto de vista del fluido, la onda de presión juega un rol importante durante la fase más temprana del transitorio (alrededor de 1.5 segundos) ya que la rápida acción de las válvulas causa ondas sónicas, así como ondas secundarias, propagadas hacia la vasija. La oscilación generada en las líneas de vapor se propaga con una relativamente reducida atenuación en el reactor. Esta oscilación inducida en la presión resulta en cambios fluctuantes en la distribución de la fracción de huecos y en el flujo másico. La magnitud del transitorio en el flujo neutrónico que se da lugar en el núcleo del reactor de agua a presión, se ve afectada en su distribución espacial debido a estos cambios en la presión.

La figura 6 muestra la evolución temporal de la potencia del reactor predicha por el TRACE/PARCS. Puede observarse que el código muestra unos resultados coherentes, gracias a la interacción de TRACE con la neutrónica de PARCS.

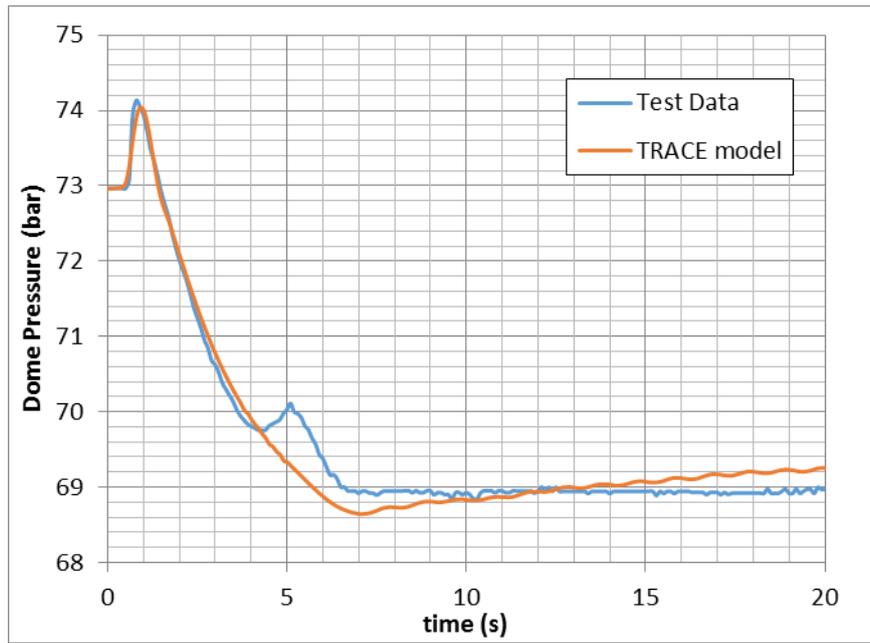
Después del disparo de turbina la presión se incrementa en la vasija debido al desfase con la apertura del TBV. El cierre al 18% de las FCV y la SRI reducen instantáneamente la excursión de potencia.

Las diferencias observadas en los 2 primeros segundos se deben a que PARCS emplea una configuración de código tipo ARO y el test parte de la configuración correspondiente al *core follow* del momento. Asimismo los materiales del reactor varían al no coincidir las secciones eficaces, como ya se ha mencionado. Alrededor del segundo 7 la potencia a oscilar debido a esos cambios de fase en los canales del núcleo.

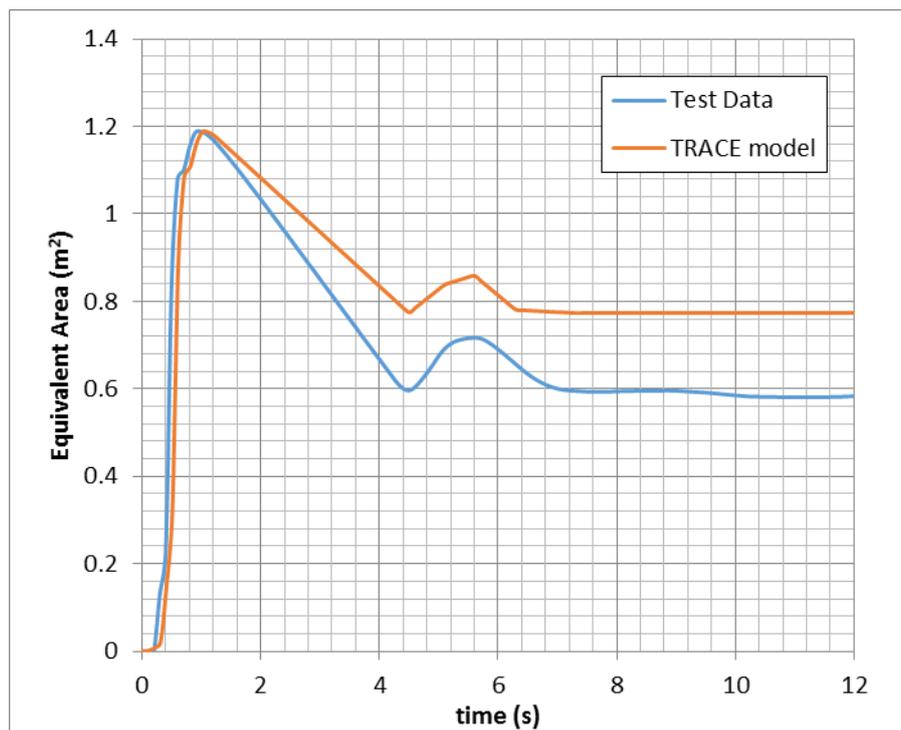


**Figura 6. Potencia del reactor.**

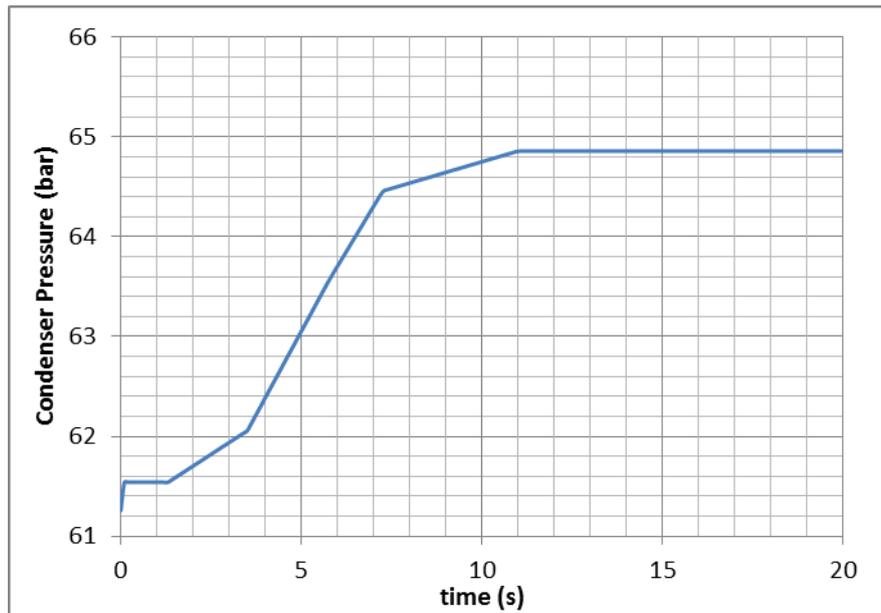
La figura 7 muestra comparación de la presión de la vasija predicha por TRACE y los datos reales. El modelo TRACE/PARCS no predice el segundo pico de potencia debido al comportamiento modelado en la TBV, mostrada en la figura 8. Las condiciones de contorno en la salida de la TBV se modelan usando el componente BREAK que simulará la presión en el condensador, situada alrededor de 62 bares. Como consecuencia es necesario ajustar el flujo de vapor a través de la TBV por medio de la presión del condensador, tal y como muestra la figura 9.



**Figura 7. Presión en la vasija.**

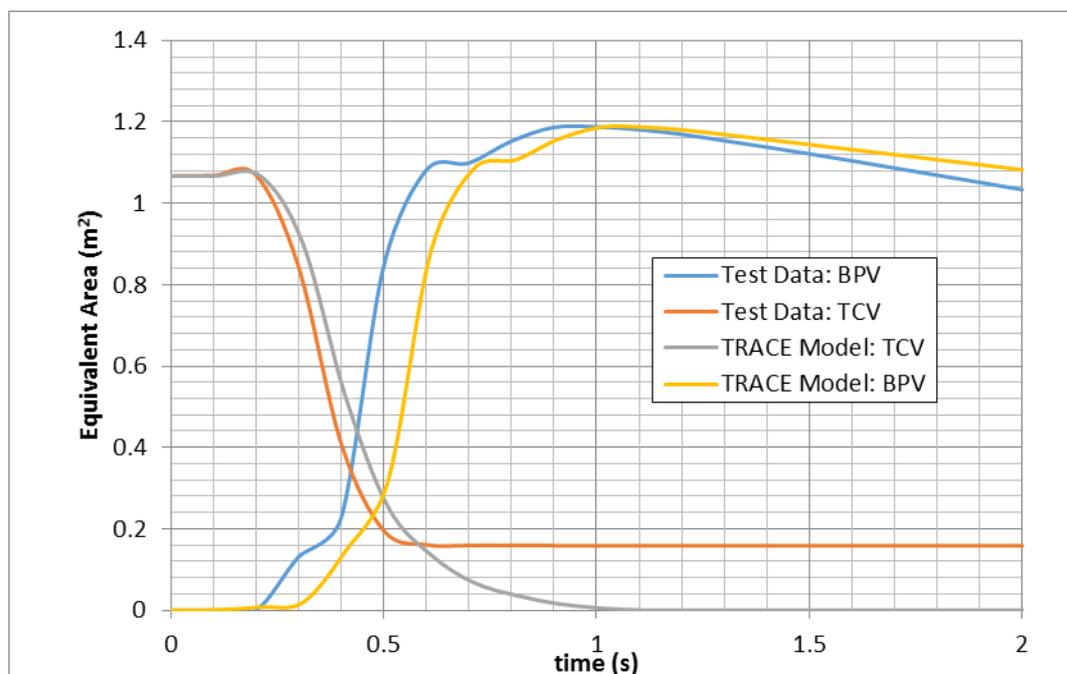


**Figura 8. Posición de la válvula de bypass.**



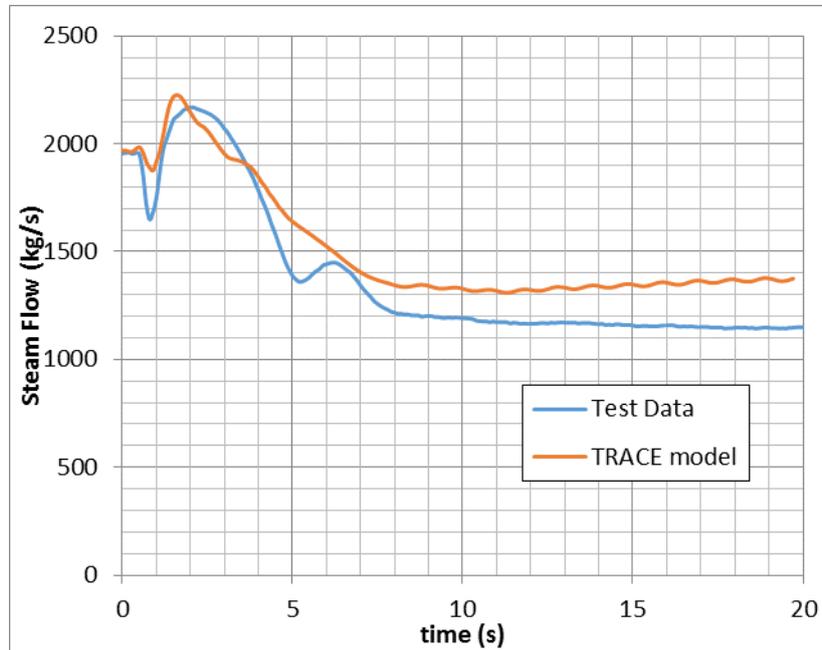
**Figura 9. Presión en el condensador modelada por TRACE.**

Como se menciona anteriormente el modelo TRACE posee ciertas simplificaciones que influyen inevitablemente en el curso del transitorio, y la mejora de este aspecto tendrá que ser considerada para trabajo futuro. La figura 10 muestra los movimientos de la TCV y la TBV durante el transitorio. El modelo agrega las 4 válvulas de cada tipo en una sola, teniendo que realizar un movimiento equivalente de apertura y cierre que corresponda a dicha simplificación.



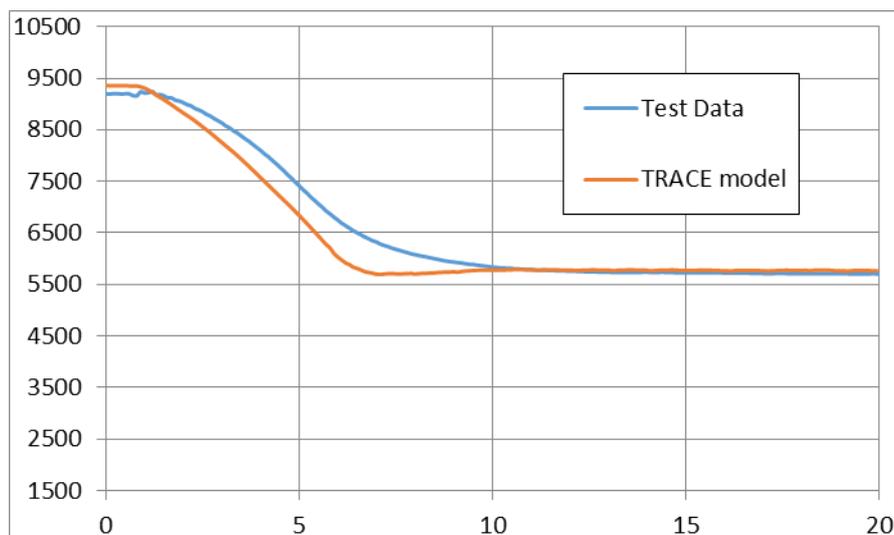
**Figura 10. Movimiento de las válvulas al inicio del transitorio.**

Puesto que se ha aplicado un comportamiento promedio equivalente en la figura 11 puede apreciarse como ello afecta al flujo de vapor predicho por TRACE

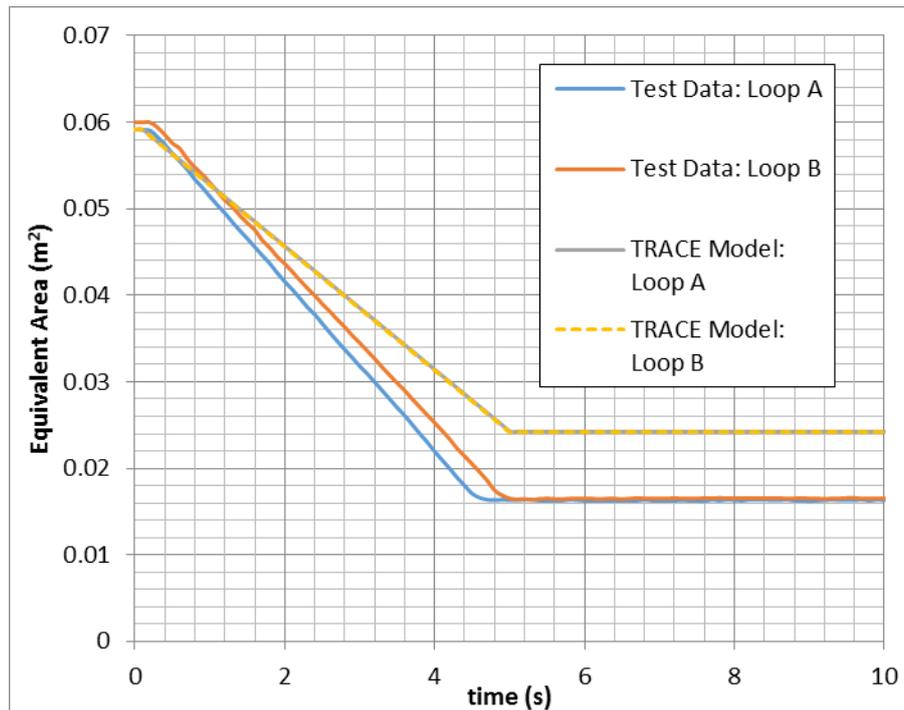


**Figura 11. Flujo total de vapor.**

La figura 12 muestra la evolución del caudal del reactor predicho por TRACE comparado con los datos de planta. TRACE muestra un comportamiento más lineal en las variaciones de flujo, a pesar de que el movimiento de las válvulas es idénticos en el modelo y en planta, como muestra la figura 13.



**Figura 12. Flujo total del núcleo.**



**Figure 13. Posición de las válvulas de control de flujo.**

## 6 CONCLUSIONES

Se ha empleado el modelo TRACE/PARCS de la planta KKL en este trabajo. Este modelo ha sido comparado con los resultados de planta medidos durante un disparo de turbina. El modelo TRACE/PARCS muestra una buena predicción del comportamiento de las variables en comparación con las medidas tomadas. Gracias al acoplamiento con el código neutrónico PARCS se consigue obtener resultados fiables sobre los efectos de retirada de barras de control y cálculo de potencia generada de acuerdo a las variaciones termohidráulicas. Las secciones eficaces empleadas por PARCS se obtuvieron con la metodología SIMTAB. Sobre los resultados presentados puede concluirse lo siguiente:

- El modelo acoplado TRACE/PARCS de KKL reproduce con coherencia las variaciones en los principales parámetros del reactor durante el transitorio simulado.
- La mejora de la comparación cuantitativa se realizará empleando las librerías de secciones eficaces correspondientes al momento del disparo de turbina, que se generarán con la metodología SIMTAB.
- El modelo TRACE de la planta será mejorado evitando simplificaciones a fin de realizar los movimientos y las variaciones de los componentes de la manera más realista posible.

- El acoplamiento entre TRACE y PARCS para la planta KKL se realizó de manera satisfactoria simulando el evento disparo de turbina. Para trabajo futuro se plantea la mejora de dicho modelo.

## 7 REFERENCIAS

1. KKL Technical Report BET/01/107 "Turbine Trip Test at 3550 MW", Revision 0.
2. A. Sekhri et al., "TRACE and TRAC-BF1 Benchmark against Leibstadt Plant Data during the Event Inadvertent Opening of ADS Valves," Proceeding of ICAPP12, Chicago Illinois, USA, June 24-28, CDROM 12247.
3. A. Sekhri TRACE and TRAC-BF1 Benchmark against Leibstadt Plant Data during the Event Inadvertent Opening of ADS Valves
4. J. A. Borkowski and N. L. Wade, editors. *TRAC-BF1/MOD1: an Advanced Best-Estimate Computer Program for Boiling Water Reactor Accident Analysis. Volume 1: Model Description*. Idaho National Engineering Laboratory, 1992.
5. United States Nuclear Regulatory Commission. *TRACE User's Manual. Volume 1: Modeling Guidelines*. 2007.
6. United States Nuclear Regulatory Commission. *TRACE User's Manual. Volume 2: Input Specification*. 2007.
7. Studsvik Scandpower, Inc., "SIMULATE-3, Advanced Three-Dimensional Two-Group Reactor Analysis Code. Studsvik/SOA-95/15.
8. T. Beam, K. Ivanov, A. Baratta, H. Finnemann, "Nodal Kinetics Model Upgrade in the Penn State Coupled TRAC/NEM Codes", *Annals of Nuclear Energy*, Vol.26, pp. 1205-1219 (1999) Verdú, G.J., Roselló, O., Gallardo, S., "Interfaz RETRAN-3D.MOD002/CASMO-SIMULATE-3.5.04.03 ", Documento Interno, Contrato con Iberdrola Ingeniería, S.A. 1999.