

PROCEDIMIENTO DE ACOPLAMIENTO DE LOS CÓDIGOS TRAC-BF1 Y PARCSv2.7

A. Jambrina¹, T. Barrachina¹, R. Miró¹, G. Verdú¹, A. Concejal², J. Melara²

¹Instituto de Seguridad Nuclear, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)

Universitat Politècnica de València - UPV

Camí de Vera s/n, 46021 Valencia

²Iberdrola Ingeniería y Construcción S.A.U.

Av. Manoteras, 20. Edificio C. 28050 Madrid

ajambrina@iqn.upv.es, tbarrachina@iqn.upv.es, rmiro@iqn.upv.es, gverdu@iqn.upv.es,
acbe@iberdrola.es, jls@iberdrola.es

SINOPSIS

El código termohidráulico TRAC-BF1 sigue siendo ampliamente utilizado en el análisis de transitorios base de diseño en centrales nucleares BWR. Con el objetivo de aumentar la capacidad de análisis con el código TRAC-BF1, se ha acoplado con el código neutrónico 3D PARCS v2.7. De esta forma, se dispone de un código acoplado termohidráulico-neutrónico que permite la simulación de transitorios considerando neutrónica 3D y procesos termohidráulicos en múltiples canales con geometría 1D.

El procedimiento seguido para acoplar TRAC-BF1 a PARCSv2.7 se ha basado en el criterio de modificar el código neutrónico limitando las modificaciones dentro del código fuente termohidráulico. Consiguiendo una herramienta robusta y fiable, sin necesidad de modificar el fichero de entrada de TRAC-BF1. El acoplamiento entre ambos códigos se realiza a través del protocolo de comunicación PVM (Parallel Virtual Machine).

Inicialmente el código TRAC-BF1 estaba preparado para ser acoplado con NEM. El acoplamiento con PARCS supone una mejora dentro de los códigos termohidráulico-neutrónicos 3D, ya que el número de información que TRAC-BF1 comparte con PARCS es mayor que en el caso del acoplamiento con el código NEM.

Además de las variables termohidráulicas: temperatura del combustible y densidad del moderador, se intercambia información acerca de la posición de las barras de control. Esto es importante si se simula un transitorio en el que el movimiento de barras se determina por variables de control del código termohidráulico. Se ha añadido también el intercambio de la concentración de boro, para poder tener en cuenta la realimentación por boro en las secciones eficaces, incorporándose la capacidad de simular transitorios severos en los que se requiere inyección de boro.

La cualificación de modificaciones se ha realizado mediante el análisis del transitorio por disparo de turbina en la C. N. Peach-Bottom cuyos resultados se presentan en otra ponencia.

1. INTRODUCCIÓN

El acoplamiento entre códigos es la técnica de ejecutar dos o más códigos de manera que entre ellos se intercambien aquellas variables que sean de interés común para ambos.

La resolución de modelos tridimensionales y multidisciplinarios hace necesario el empleo de códigos acoplados. Son de principal interés el campo neutrónico, termohidráulico, termomecánico de las estructuras y la física del combustible. La combinación de los códigos tiene lugar en sistemas integrados o en plataformas de software donde son acoplados entre ellos para obtener las rutas de cálculo deseadas.

Los principales objetivos son la mejora de las capacidades de predicción de las simulaciones y el abastecimiento a la ingeniería nuclear con herramientas de simulación más modernas.

Como un ejemplo de las actividades llevadas a cabo en este campo, varios *benchmarks* han sido definidos en el campo del acoplamiento termohidráulico-neutrónico con un éxito creciente en términos de participación y nivel de modelización.

Las herramientas de simulación multifísica están en proceso de mejora continua debido al incremento de la potencia de cálculo por un lado y al perfeccionamiento de los métodos numéricos y modelos físicos por otro.

1.1. Estado del arte en cálculos multifísica

Para el caso particular del acoplamiento termohidráulico-neutrónico, el problema consiste en intercambiar las variables que contienen la potencia generada por elemento combustible y las distribuciones de propiedades termohidráulicas necesarias para poder realizar la realimentación en las secciones eficaces, tanto para estados estacionarios como para cálculos transitorios.

En primer lugar, siempre hay que hacer un balance entre precisión y eficiencia, ya que no se puede conseguir ambas a la vez, para ganar en precisión hay que refinar la malla de los modelos y esto vienen acompañado por un aumento en los tiempos de cálculo y de los recursos computacionales que nos reduce la eficiencia y viceversa. En segundo lugar hay que tener en cuenta el error que se encuentra inherente a la formulación matemática de las ecuaciones y a la implementación de los modelos en los códigos, errores que provienen de los truncamientos y aproximaciones realizadas al resolver los sistemas de ecuaciones diferenciales propios de cada disciplina.

El interés que tiene el acoplamiento de códigos termohidráulicos y neutrónicos para una representación realista del comportamiento del núcleo del reactor o la planta completa se ha visto reflejado en el desarrollo de varios ejercicios internacionales de intercomparación de códigos (*benchmarks*) dirigidos por la Agencia de Energía Nuclear (NEA) de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD).

El ejercicio más destacado en el estudio de reactores BWR es análisis del transitorio de disparo de turbina (TT) en la central nuclear de Peach-Bottom – unidad2 en el estado de Pensilvania, EE.UU.

La Tabla 1 presenta un resumen de los acoplamientos de códigos más conocidos en el ámbito nuclear.

Tabla 1. Lista de códigos acoplados más empleados.

Termohidráulica/Física del núcleo	Termohidráulica/CFD
- RELAP5/SIMTRAN (España)	- RELAP5/FLUENT
- RELAP5/NESTLE (EE.UU.)	- TRACE/CFX
- RELAP5/PANTHER/VIPRE (Inglaterra)	Numerical reactor
- RELAP5-S/PANBOX/COBRA (Alemania)	- DeCART/StarCD
- RELAP5/PARCS, RELAP5/NEM (EE.UU.)	Termohidráulica/Contención
- RELAP5/BARS (Suecia)	- RELAP5-CONTAIN (PVM)
- RELAP5/QUABOX/COBRA (Croacia)	- RELAP5-CONTEMPT4
- TRAC-P/PARCS (EE.UU.)	- RELAP/COCO
- TRAC-PF1/NEM, TRAC-BF1/NEM (EE.UU.)	- RELAP/GOTHIC
- RETRAN-3D/CORETRAN (EE.UU.)	Combustible/Neutrónica
- RETRAN-3D/SIMULATE-3K (EE.UU.)	- FRAPCON/PARCS
- RETRAN-3D/ARROTTA/VIPRE02 (CORETAN, EE.UU.)	- FALCON/PARCS
- ATHLET/QUABOX (Alemania)	Termohidráulica/Accidente severo
- ATHLET/BIPR08 (Alemania, Rusia)	- SCDAP/RELAP ATHLET-CD
- ATHLET/DYN3D (Alemania)	(ECORE, EFIRE, TRAPG)
- CATHARE/CRONOS/FLICA4 (Francia)	- ICARE/CATHARE
- CATHARE/COCCINELLE/THYC (Francia)	- RELAP5/MELCOR
- MARS/MASTER (Corea)	- MELCOR/CONTAIN
	- SCDAP/RELAP-3D/CONTAIN

1.2. El código TRAC-BF1/PARCSv2.7

El código acoplado TRAC-BF1 [1]/PARCSv2.7 [2] es un código termohidráulico-neutrónico que puede ser utilizado para simular transitorios considerando fenómenos neutrónicos con geometría 3D y procesos termohidráulicos en geometría 1D de múltiples canales (o incluso geometría 3D representando la vasija del reactor) [3], [4], [5], [6] [7].

Como módulo termohidráulico emplea el código de mejor estimación, o *best-estimate*, TRAC-BF1 [1], el cual utiliza un modelo hidrodinámico de dos fluidos y resuelve un sistema de seis ecuaciones las cuales definen el fenómeno termohidráulico. Este código tiene modelos para los componentes habituales de un reactor BWR, como pueden ser canales, bombas, ... Los elementos de combustible que constituyen el núcleo del reactor se modelan como componentes de múltiples canales. Para modelar la transferencia de calor al combustible se utiliza una ecuación de transferencia de calor axial-radial. Los procesos termohidráulicos son modelados resolviendo seis ecuaciones: de balance de masa, momento y energía, para la fase líquida y vapor.

Como módulo neutrónico se utiliza el simulador de núcleo nodal PARCSv2.7 [2], que simula la respuesta dinámica del reactor a perturbaciones de reactividad, resolviendo la ecuación de la difusión neutrónica en estado estacionario y transitorio. Este código es aplicable tanto a reactores tipo BWR como PWR, con elementos de combustible con geometría rectangular o cilíndrica. PARCSv2.7 [2] resuelve la ecuación de la difusión neutrónica con la aproximación de dos grupos de energía por defecto, pudiendo una resolución multigrupo. Éste simula la respuesta dinámica del reactor a perturbaciones de reactividad resolviendo la ecuación de la difusión neutrónica en estado estacionario y transitorio.

2. ACOPLAMIENTO DE CÓDIGOS TERMOHIDRÁULICOS Y NEUTRÓNICOS

Varios requisitos previos deben ser considerados cuando tratamos el acoplamiento de códigos termohidráulicos, ya sean de planta o de núcleo, con códigos de cinética neutrónica. El objetivo que buscan estos requisitos es proporcionar soluciones lo más precisas posibles a cálculos acoplados de transitorios operacionales detallados y escenarios accidentales empleando una cantidad de tiempo de cálculo razonable para dicho efecto. Para satisfacer estos requisitos se debe desarrollar e implementar las metodologías de acoplamiento basándose en los siguientes componentes básicos:

1. Procedimiento de acoplamiento, códigos en serie o códigos en paralelo.
2. Implementación del acoplamiento, interno o externo.
3. Nodalización espacial apropiada para la aplicación.
4. Algoritmos para intercambiar el paso de tiempo en cálculos acoplados transitorios.
5. Esquemas numéricos del acoplamiento entre códigos, explícitos, semi-implícitos e implícitos.
6. Esquemas para controlar la convergencia del cálculo acoplado.

De acuerdo a estos criterios, el código acoplado TRAC-BF1/PARCSv2.7 sigue la configuración:

El **procesamiento** que sigue el código TRAC-BF1/PARCSv2.7 es en **paralelo**, permitiendo a los códigos ejecutarse por separado e intercambiar datos durante el cálculo a través de una interfaz común, PVM (*Parallel Virtual Machine*) [8].

El código acoplado utiliza un **esquema de integración interno** en el que la solución termohidráulica se respalda en el código TRAC-BF1 y la solución de cinética espacial se basa en código PARCS v2.7.

La **nodalización espacial** va unida al **coste computacional** y a la **precisión** del cálculo. Para ello se lleva a cabo la aplicación de la **Metodología SIMTAB** [9].

Los sistemas de ecuaciones a resolver en el acoplamiento termohidráulico/neutrónico son no lineales y están fuertemente acoplados. El **acoplamiento temporal** de los dos códigos es **explícito** para poder asegurar la **estabilidad**.

3. PROCEDIMIENTO DE ACOPLAMIENTO DE LOS CÓDIGOS TRAC-BF1 Y PARCSv2.7

3.1. Procedimiento de acoplamiento

El procedimiento seguido para acoplar TRAC-BF1 a PARCSv2.7 se ha basado en el criterio de modificar el código neutrónico limitando las modificaciones dentro del código fuente termohidráulico. Consiguiendo una herramienta robusta y fiable, sin necesidad de modificar el fichero de entrada de TRAC-BF1.

En base a la estructura de programación interna que el código PARCS incluye en su versión v2.7 [10], [11], [12], la integración de ambos códigos emplea el esquema de conexión PVM.

El acoplamiento temporal de ambos códigos es explícito. PARCS utiliza los datos de la solución termohidráulica (densidad y temperatura del moderador, temperatura del combustible, concentración de boro, fracción de control) calculado por TRAC-BF1 e incorporara los efectos de la realimentación a través de las secciones eficaces. TRAC-BF1 resuelve la transmisión de calor en el núcleo mediante la distribución de potencia calculada por PARCS.

Dentro del marco del código acoplado TRAC-BF1/PARCS v2.7, PARCS se diseña para ser un proceso autónomo, que se comunica con la interfaz de proceso general mediante el uso de las construcciones implementadas en la PVM. Con el fin de acomodar PARCSv2.7 a los requisitos de la interfaz general, se llevan a cabo una serie de modificaciones sobre el esquema de la rutina de especificación de datos de PARCS (PDMR.f). La función de esta subrutina es funcionar como intermediaria entre los procesos involucrados en la PVM y el código neutrónico PARCS.

La subrutina PDMR.f, inicialmente implementada en el código PARCS para su acoplamiento con el código termohidráulico RELAP5 (y, posteriormente, con TRACE) lleva a cabo varias tareas: la primera de ellas se refiere al tratamiento de las matrices de permutación; en segundo lugar, gestiona la transferencia de información de control inicial y dependiente del tiempo necesaria para la coherencia de cálculo entre PARCS y el código termohidráulico; por último, controla tanto el procesamiento como la transferencia de los vectores de datos de propiedades dependientes del espacio y el tiempo (tanto hacia como desde la interfaz general).

El flujo de comunicación entre el código termohidráulico (anteriormente RELAP5) y PARCS es el que se observa en la Figura 1.

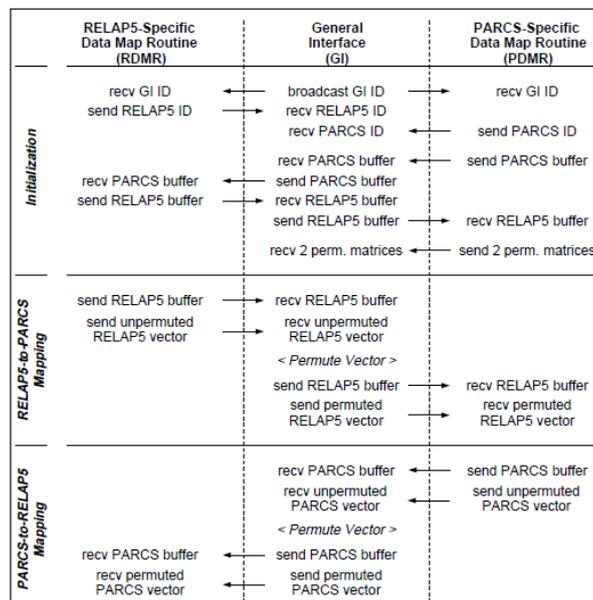


Figura 1.- Flujo de comunicación entre RELAP5 y PARCS.

La tarea principal de la PDMR es controlar la comunicación de datos entre la interfaz general y PARCS. La PDMR está diseñada para cumplir con varios requisitos: a) requisitos variables, b) proceso de control y flujo de información, c) inicialización, y d) asignación de datos de la interfaz general a PARCS.

La Figura 2 muestra el diagrama de flujo en PARCS/PDMR.

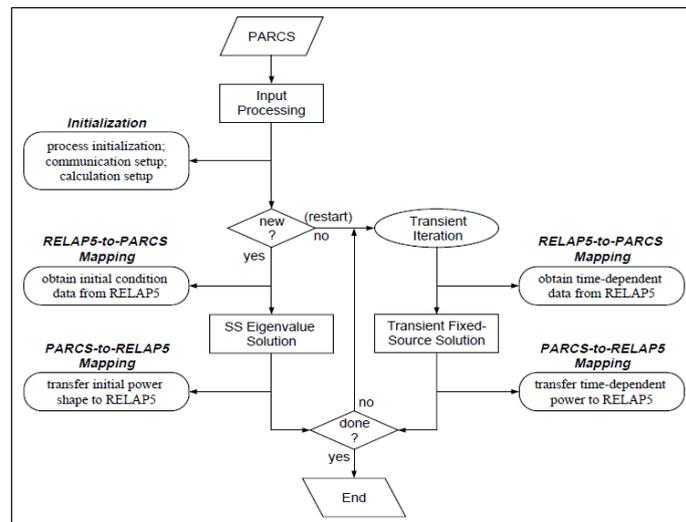


Figura 2.- Diagrama de flujo PARCS/PDMR.f.

La subrutina principal que se encarga de la gestión de la información que comparte con el código termohidráulico es la subrutina PDMR.f. Esta subrutina evalúa 3 casos diferentes (véase la Figura 3):

- PDMR(1): se encarga de la inicialización del proceso de comunicación.
- PDMR(2): se encarga de la recepción de las variables termohidráulicas (*th2neut*).
- PDMR(3): se encarga del envío de la potencia al código termohidráulico (*neut2th*).

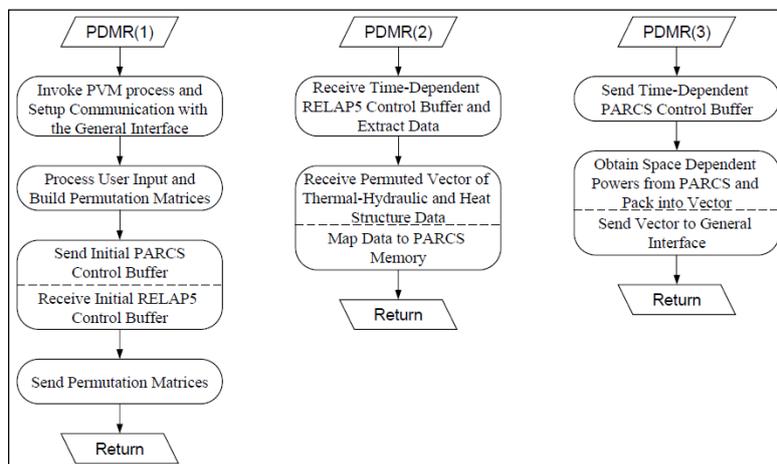


Figura 3.- Unidades funcionales de la subrutina PDMR.f.

La interfaz de comunicación PVM dentro del código PARCS está programada de manera que las subrutinas que empiezan por **PDMR*** son las encargadas de enviar la información recibida en los *buffers* de la PVM a variables locales del código.

Las subrutinas que comienzan por **GI*** son las que incluyen la recepción de la información del código termohidráulico a través de la PVM.

De esta manera, las subrutinas GI* siempre son llamadas por las subrutinas PDMR*. En la Figura 4 se muestra el orden de llamada a la subrutina PDMR.f, así como las los módulos que comprenden la misma, con el fin tener una visión global del esquema de acoplamiento.

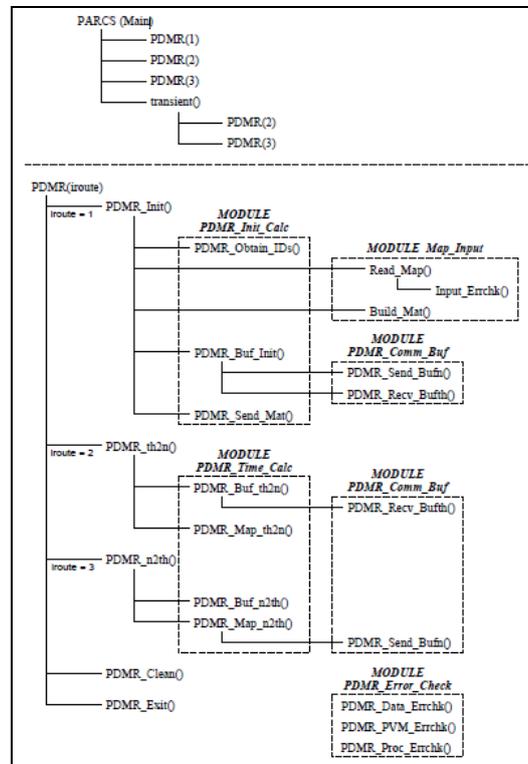


Figura 4.- Orden de llamada y módulos de la subrutina PDMR.f

En base al esquema de acoplamiento entre RELAP5 y PARCS v2.7 implementado en PARCS, se llevan a cabo las modificaciones sobre el propio código PARCS, así como sobre el código termohidráulico TRAC-BF1.

3.2. Modificaciones introducidas en los códigos

Las modificaciones implementadas en el código termohidráulico TRAC-BF1 se basan en criterio de minimización de las modificaciones sobre el código con respecto a la versión acoplada con el código neutrónico NEM.

En esta línea, las modificaciones introducidas hacen referencia a:

- La dimensión de los vectores que contienen las variables termohidráulicas que TRAC-BF1 envía ha de adaptarse a las necesidades de cálculo del código neutrónico. Dicha dimensión representa los nodos axiales de interés. PARCS requiere que la dimensión se ajuste a los nodos axiales activos.
- El código termohidráulico TRAC-BF1 inicialmente tiene implementado el envío de una serie de variables termohidráulicas al código NEM: densidad del moderador, temperatura del combustible, concentración de boro y fracción de control. Por su parte, el código PARCS requiere del envío de variables adicionales como son la temperatura

del moderador y la temperatura del combustible en el centro y la superficie de la pastilla. Para ello, se implementa en TRAC-BF1 el cálculo de la temperatura en el centro y la superficie de la pastilla; así como el envío de las nuevas variables.

El objetivo del cálculo de la temperatura en el centro y la superficie de la pastilla es permitir a PARCS, a través de las opciones del fichero MAPTAB, el cálculo de la temperatura Doppler teniendo en cuenta una temperatura media del combustible, T_{avg} , o una interpolación lineal con un determinado peso entre las temperaturas del centro y la superficie del combustible.

$$T_{doppler} = T_{avg} \quad \bullet \quad T_{doppler} = (1 - \omega) \cdot T_f^0 + \omega \cdot T_f^s$$

- c) El código PARCS precisa tener información relativa a la finalización del cálculo, bien por motivos de convergencia o de tiempo. TRAC-BF1 que funciona como código master sobre PARCS ha de enviarle dicha información. Se implementa en TRAC-BF1 el envío de una señal de finalización, para estado estacionario y transitorio.
- d) El código termohidráulico ha de regular el envío de las variables termohidráulicas; es por ello, que hasta que internamente no haya podido calcular las distribuciones de las propiedades no ha de hacer uso de los protocolos de comunicación de la PVM. En concreto, se ha resuelto el problema en los casos de establecerse un nuevo paso de tiempo o de superar el número de iteraciones externas por criterio de convergencia.
- e) Los parámetros de edición de *restart* están marcados en el acoplamiento por el código TRAC-BF1. El código PARCS requiere conocer el criterio de edición para la generación correcta de los ficheros de salida. Se implementa en TRAC-BF1 el envío de la variable que marca el paso de tiempo de edición de *restart*.

En las Tablas 2 y 3 se muestran las subrutinas modificadas y añadidas en el código TRAC-BF1.

Tabla 2. Subrutinas modificadas en el código TRAC-BF1

Subrutinas modificadas en TRAC-BF1		
alcm3d.f	get3d01.f	timstp.f
datafr3d.f	post.f	to3d01.f
datato3d.f	power.f	trans.f
fchn.f	rodht.f	

Tabla 3. Subrutinas añadidas en el código TRAC-BF1

Subrutinas añadidas en TRAC-BF1
datato3d2.f.f

Por su parte, las modificaciones implementadas en el código neutrónico PARCS se basan en la adaptación del esquema de acoplamiento seguido con el código RELAP5/TRACE a las necesidades del código termohidráulico TRAC-BF1.

En esta línea, las modificaciones introducidas hacen referencia a:

- a) Se incorpora al código neutrónico PARCS la opción de acoplamiento con el código termohidráulico TRAC-BF1.
- b) En base a la implementación del código TRAC-BF1 y los requisitos de acoplamiento entre éste y el código PARCS, y haciendo uso del esquema de acoplamiento entre RELAP5/PARCS, se condiciona la recepción de *buffers* de control de carácter termohidráulico y se definen los parámetros termohidráulicos necesarios en el código neutrónico para exista una coherencia interna y se realicen los correctamente.
- c) El código TRAC-BF1 acoplado con NEM, recibía del mismo una serie de parámetros no útiles para el código termohidráulico puesto que poseía de su propio fichero de entrada esta información. En virtud del criterio de minimizar las modificaciones sobre el mismo, se implementa el envío de un paquete de parámetros *dummy* en el código PARCS.
- d) El código PARCS requiere en su acoplamiento de la recepción de parámetros de inicialización necesarios para el cálculo a lo largo de la simulación. Estos parámetros son el tiempo de simulación, los pasos de tiempo de cálculo, de edición, de graficado, de edición de *restart*.
- e) Se implementa en el código neutrónico la recepción de las variables termohidráulicas enviadas por el código TRAC-BF1 de acuerdo a su esquema interior. Estas variables son: densidad del moderador, temperatura media del combustible, concentración de boro, temperatura del moderador, temperatura en el centro y la superficie de la pastilla de combustible, así como fracción de control.
- f) Se implementa dentro del código PARCS la reordenación y, por consiguiente, renombramiento de los canales termohidráulicos puesto que no existe un criterio uniforme a la hora de nombrar a los canales en el input termohidráulico.
- g) El código PARCS funciona como código *slave* respecto a TRAC-BF1; por ello necesita que éste le marque la finalización de cálculo, tanto por criterios de convergencia como de tiempo, en estado estacionario y transitorio. Se implementa la recepción de esta señal que previamente ha sido implementada en el código termohidráulico.
- h) El código TRAC-BF1 envía la fracción de control relativa a los bancos de barras de control de reactividad; sin embargo, PARCS necesita para sus cálculos internos de la posición de las mismas. Es por ello que se implementa la conversión de la fracción de control en posición de inserción.
- i) TRAC-BF1 requiere ser realimentado por el código PARCS con la potencia axial colapsada nodal 3D. Este variable no era calculada inicialmente por el código neutrónico, por lo que se implementa su cálculo así como su envío al código termohidráulico.
- j) De forma adicional se lleva a cabo el cálculo y edición de la potencia de los detectores LPRM media, así como por nivel y detector, en base a la potencia de los ocho nodos adyacentes.

- k) Se hace necesario implementar una correcta gestión de la edición del *restart*, ya que PARCS hace uso de esta información en las ejecuciones en modo transitorio.
- l) La codificación de PARCS inicial generaba tras una simulación en modo transitorio unos ficheros de salida *.out y *.sum demasiado grandes para realizar su lectura. En base a ello, se implementan en el código una serie de modificaciones con el objetivo de optimizar la escritura: reducir el tamaño de los ficheros, sin perder información útil.

En la Tabla 4 se muestran las subrutinas modificadas en el código PARCS v2.7.

Tabla 4. Subrutinas modificadas en el código PARCS v2.7

Subrutinas modificadas en PARCS v2.7		
genedit.f	pdmr_initM.f	preproc.f
gi.f	pdmr_mapM.f	readcntl.f
gi_commM.f	pdmr_timeM.f	settsfp.f
gi_mapM.f	pdmr_varM.f	sseig.f
outer.f	pp_outer.f	transient.f
pdmr.f	pp_settsfp.f	

4. CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto es actualizar, adaptar y mantener el código termohidráulico TRAC-BF1, inicialmente acoplado al código neutrónico 3D NEM. Para ello se ha llevado a cabo el acoplamiento de TRAC-BF1 con el código neutrónico 3D PARCS,

De esta forma se incorpora una herramienta robusta y fiable que permite la simulación de transitorios considerando neutrónica 3D y procesos termohidráulicos en múltiples canales con geometría 1D, mejorando la comprensión de los fenómenos de interés para la seguridad y la reducción de los márgenes de seguridad debido a una mejor evaluación de las incertidumbres; sino que además se ha reducido considerablemente el tiempo de cálculo.

REFERENCIAS

- [1] Idaho National Laboratory, “TRAC-BF1/MOD1: An Advanced Best Estimate Computer Program For Boiling Water Reactor Accident Analysis. Vol 1: Model Description”, INEL, Febrero 1992. University of Michigan, “PARCS v3.0 U.S. NRC Core Neutronics Simulator. Theory Manual”, Rockville, 2009.
- [2] University of Michigan, “PARCS v2.7 U.S. NRC Core Neutronics Simulator. Theory Manual”, Rockville, 2006. Idaho National Laboratory,
- [3] Puente F., Avramova M., Ivanov K., “High Accuracy Modeling for Advanced Nuclear Reactor Core Design Using Monte Carlo Based Couple Calculations”, International Conference on Mathematics, Computational & Reactor Physycs (M&C 2009), 2009.
- [4] Sofu T., et al., “Coupled BWR calculations with the Numerical Nuclear Software System”, M&C/SNA, 2007.
- [5] Ivanov K., Barratta A., “Coupling Methodologies for Best Estimate Safety Analysis”. International Conference on Mathematics, Computation, Reactor Physics and Environmental Analysis, M&C 1999, pp.493-502, Vol 1, Madrid, Septiembre 1999.

- [6] Miró, R, Barrachina T., Abarca A., Verdú G., Pereira C., Martínez-Murillo J., “Implementation of control rod movement and boron injection options by using control variables in RELAP5/PARCS V2.7 coupled code”.Noviembre, 2010.
- [7] IAEA, “Use and Development of Coupled Computer Codes for the Analysis of Accidents at Nuclear Power Plants”. Proceedings of a technical meeting held in Vienna, 26–28 November 2003. Enero, 2007.
- [8] PVM: Parallel Virtual Machine. “A Users' Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing”, MIT Press Scientific and Engineering Computation, Janusz Kowalik, Editor, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [9] Roselló, O., “Desarrollo de una metodología de generación de secciones eficaces para la simplificación del núcleo de reactores de agua ligera y aplicación en códigos acoplados neutrónicos termohidráulicos” Tesis, 2004.
- [10] Barber D., Downar T., “Software Requirements Specification for the Parcs-Specific Data Map Routine in the Coupled RELAP5/PARCS Code”, Technical Report, PU/NE-98-11, Purdue University, (1998).
- [11] Barber D., Downar T., “Software Design and Implementation Document for the PARCS-Specific Data Map Routine in the Couple RELAP5/PARCS Code”, Technical Report, PU/NE-98-13, Purdue University, (1998).
- [12] Barber D., Downar T., “Software Requirements Specification for the General Interface in the Coupled Code”, Technical Report, PU/NE-98-18, (1998).