

Participación española en el desarrollo de la Plataforma Europea para Simulación de Reactores Nucleares (NURESIM)

Diana Cuervo, Carolina Ahnert, José M^a Aragonés, Nuria García-Herranz, José J. Herrero, Javier Jiménez y J. Andrés Lozano

Departamento de Ingeniería Nuclear; ETSI Industriales; Universidad Politécnica de Madrid

El proyecto europeo NURESIM constituye el primer paso de la investigación y desarrollo de una plataforma europea común de simulación avanzada de la presente y próximas generaciones de reactores nucleares. Tras resumir las características principales de este proyecto europeo, se describe la participación española, centrada en el desarrollo de nuevos códigos integrados para la simulación fiel y detallada del núcleo del reactor, incluyendo la cinética neutrónica y la termohidráulica tridimensionales y acopladas (multifísica) en las multiescalas relevantes: la escala del combustible –celda o pastilla combustible– y la escala del núcleo completo –nodo o parte de elemento combustible–, incluyendo los reflectores y los componentes relevantes de la vasija del reactor acoplados al análisis termohidráulico de la planta. Los resultados de verificación y demostración, así como de implantación e integración en la plataforma común, han sido muy positivos.

The NURESIM European project constitutes the first step towards the research and development of a common European platform for advanced simulation of the present and next generations of nuclear reactors. After summarizing the main characteristics of this European project, the Spanish participation is described, which is focused in the development of new integrated codes for the accurate and detailed simulation of the reactor core, including the three-dimensional and coupled (multiphysics) neutronic kinetics and thermal-hydraulics at the relevant multiscales: the fuel scale -fuel cell or pellet-, and the whole core scale -node or part of fuel assembly-, including the reflectors and the relevant components of the reactor vessel coupled to the thermal-hydraulics analysis of the plant. The results of verification and demonstration, as well as of implementation and integration in the common platform, have been very positive.

EL PROYECTO EUROPEO NURESIM

El futuro de la ciencia y tecnología nuclear demanda, tanto a nivel de investigación como de la industria, una nueva generación de herramientas de simulación que sean no sólo más precisas, sino también modulares y rápidas, que tengan mayor fidelidad y facilidad de mantenimiento y uso y que, además, puedan ser acopladas fácilmente entre sí para facilitar un análisis multidisciplinar de problemas complejos.

Estas son las líneas en las que se está desarrollando el proyecto NURESIM (*Nuclear REactor SIMulation*) del 6º Programa Marco de la UE y Euratom, que pretende dar los pasos iniciales para construir una Plataforma Estándar Europea de Simulación que permita modelar, almacenar, visualizar y reutilizar datos y resultados para la presente y las próximas generaciones de reactores

nucleares [1]. Este proyecto cuenta con la participación de 18 instituciones de distintos países que incluyen laboratorios, institutos y universidades de alto prestigio en desarrollo de métodos de simulación en reactores nucleares (figura 1).

El proyecto tiene como objetivos claves: la integración de modelos físicos avanzados en una plataforma distribuida y abierta; la incorporación de los últimos avances en física de núcleo, termohidráulica y acoplamiento multifísica; el uso de análisis deterministas y estadísticos de sensibilidad e incertidumbre; la verificación y validación preliminar; y, por último, el entrenamiento, la diseminación del conocimiento y la garantía de calidad. Los objetivos específicos de NURESIM son: iniciar el desarrollo de la próxima generación de herramientas de estimación óptima con validación experimental (termohidráulica, física de núcleo y multifísica) para los reactores

presentes y futuros. La mejoradas capacidades de predicción, estandarización y robustez de la plataforma europea NURESIM se dirige a satisfacer las necesidades de la industria, las organizaciones reguladoras, las universidades, el gobierno y las instituciones privadas.

La plataforma común de software usada por los códigos de simulación en NURESIM es SALOME, que es un conjunto de herramientas de software abierto para pre- y post-proceso, integración y paralelización de códigos de cálculo.

El proyecto integrado NURESIM se ha dividido en cinco subproyectos (SP): Física del núcleo (SP1) del que es coordinador la Universidad Politécnica de Madrid; Termohidráulica (SP2) con la coordinación del CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique); Multifísica (SP3) coordinado por Paul Scherrer Institut (PSI); Análisis de sensibilidad e incertidumbre (SP4) coordinado por la Universidad de Karlsruhe; e Integración (SP5) con la coordinación del CEA. La coordinación y gestión general del proyecto NURESIM está siendo llevada a cabo por el CEA.

Se espera que el proyecto tenga impacto estratégico a largo plazo en las siguientes áreas: desarrollo de nuevos algoritmos numéricos para la mejora de la precisión y eficiencia de las simulaciones numéricas de los fenómenos físicos en física de reactores y termohidráulica de núcleo y de planta, incluyendo la cuantificación y reducción de las incertidumbres computacionales mediante la incorporación de técnicas avanzadas de sensibilidad e incertidumbre y la asimilación de datos experimentales; la integración de desarrollos nuevos más allá del estado del arte de módulos de software de simulación en una plataforma común europea; y el entrenamiento y diseminación del conocimiento adquirido.

Los objetivos finales y los productos obtenidos de la plataforma de software NURESIM son: la convergencia hacia un conjunto de códigos y librerías

de datos limitado y consistente, presentando importantes mejoras comparado con los existentes actualmente, lo que servirá como referencia para otros desarrollos (dentro de SALOME); el desarrollo de interfaces entre aplicaciones para el software de referencia mencionado; y la verificación y demostración de este software mediante la comparación con problemas estándar (benchmarking) en Reactores de Agua Liger (LWR: PWR, BWR y VVER) [2].

ANTECEDENTES DEL GRUPO INVESTIGADOR ESPAÑOL

El grupo de investigación de Física de Reactores del Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid, dirigido por los profesores J.M. Aragonés y C. Ahnert, tiene una larga experiencia investigadora que está reflejada en el Sistema Español de Análisis de Núcleos de Agua a Presión (SEANAP). Este sistema consta de un conjunto de códigos que llevan a cabo el análisis de núcleo en sus distintas etapas y del que forman parte los códigos COBAYA y SIMTRAN. El sistema SEANAP ha sido validado extensamente con análisis de recargas, diseños del núcleo, pruebas de arranque y seguimiento en línea de la operación de muchos ciclos de las centrales PWR españolas, así como en benchmarks internacionales de transitorios en PWR de forma acoplada al código RELAP5 [3].

SUBPROYECTO DE FÍSICA DEL NÚCLEO

Este grupo de trabajo comprende el uso y mejora de los códigos de cálculo de las ecuaciones neutrónicas en sus diferentes modalidades y aproximaciones, tanto probabilista con el método de Montecarlo en el código TRIPOLI4, como determinista con los códigos APOLLO2 y CRONOS2 franceses, el DYN-3D alemán y el nuevo código COBAYA-ANDES (COBAYA3) de la UPM.

El código de difusión nodal ANDES (Analytical Nodal Diffusion Equation Solver) contiene un nuevo método para la resolución de núcleo 3D completo en malla cartesiana o triangular que se basa en una diagonalización de la matriz del sistema de ecuaciones planteado por la ecuación de difusión en multigrupos, y la resolución del mismo en el espacio de los llamados flujos modales, en oposición a los flujos físicos, donde los grupos de



Figura 1: El Proyecto Europeo NURESIM: 18 Organizaciones de 13 Estados.

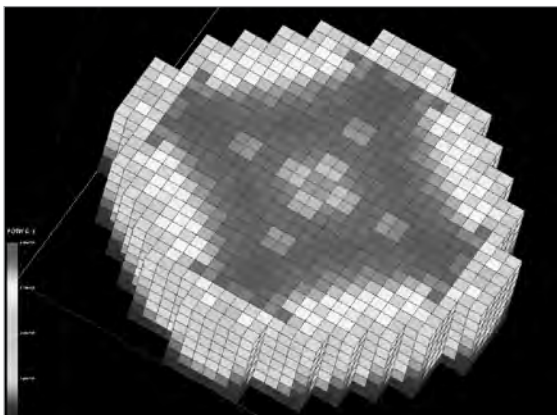


Figura 2: Visualización de un archivo MED generado con COBAYA3 en SALOME. Caso correspondiente a núcleo PWR con 157 elementos, 4 nodos por elemento.

geometría triangular-Z, superándose la energía se encuentran desacoplados [4]. De esta manera es posible formular una solución analítica de la ecuación de difusión que confiere al método un mayor orden de aproximación comparable a los obtenidos con métodos de desarrollo del flujo en polinomios base, compartiendo con ellos la necesidad de una iteración de fugas transversales cuando el problema es formulado en más de una dimensión [5].

ANDES puede simular problemas estacionarios y cinéticos (transitorios) resolviendo la ecuación de difusión neutrónica en multigrupos con dependencia temporal, así como las ecuaciones de balance de los precursores de neutrones diferidos. Además incluye la posibilidad de acoplamiento con códigos termohidráulicos de canales a través de su interfaz de programación. El acoplamiento a través de memoria estática ya ha sido realizado con COBRA-IIIc y COBRA-TF obteniendo buenos resultados [6].

Por otro lado, se ha extendido la formulación antes expuesta a nodos de

dificultades asociadas a la mayor complejidad de la misma. Dicha geometría permitirá la simulación de reactores con elementos combustibles hexagonales como los de tipo VVER, así como algunos de los diseños de reactores de GENERACIÓN IV (SFR, VHTR).

El código COBAYA3 resuelve la ecuación de difusión por diferencias finitas en malla cartesiana a la escala de la barra de combustible homogeneizada con huelgo, vaina y refrigerante asociado. Incluye una corrección por efectos de transporte, malla y heterogeneidad, en forma de coeficientes de discontinuidad en las interfaces [7].

La cantidad de incógnitas y parámetros que se necesitan manejar en la resolución práctica de un reactor tridimensional, hacen imposible la utilización de un único computador por falta de memoria y por los altos tiempos de ejecución. Para salvar este obstáculo, el núcleo se descompone en subdominios formados por cuatro cuartos de elementos combustibles alternando entre las distintas combinaciones posibles en cada iteración.

Como condición de frontera para dichos subdominios se utilizan las relaciones corriente a flujo en las interfases, que tienen la particularidad de producir ecuaciones homogéneas y ser menos afectadas por los niveles de flujo. Además se acelera el esquema iterativo de descomposición en subdominios con la solución nodal calculada por ANDES entre cada solución detallada. De esta manera se pueden resolver núcleos tridimensionales en periodos de tiempo que se esperan aceptables cuando el código se ejecute con un número elevado de procesadores.

SUBPROYECTO DE MULTIFÍSICA

En este subproyecto se han revisado los actuales tipos de acoplamiento neutrónico-termohidráulico considerando el estado del arte en este área. En lo que se refiere a la aportación de la UPM, ésta se centra en el desarrollo e implementación de las interfaces necesarias para realizar eficazmente el acoplamiento entre la neutrónica (ANDES, COBAYA3) y la termohidráulica (con cualquiera de los códigos actualmente disponibles, NEPTUNE-CFD, CATHARE y FLICA4) [8,9]. El interés en este último código reside en que se

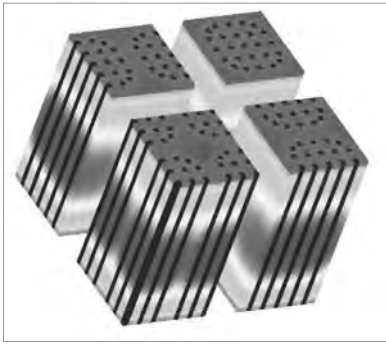


Figura 3: Diferentes tipos de subdominios para cada tipo de disección.

trata del código de subcanales europeo integrado en NURESIM.

Estas interfaces son una evolución de los tradicionales métodos de acoplamiento, denominados *tight coupling*, en los que se compilaban conjuntamente ambos códigos y se interconectaban compartiendo unas estructuras de memoria que contenían las variables que debían ser intercambiadas. Ahora dicho intercambio se puede realizar a través de la plataforma SALOME utilizando el formato MED, lo cual permite el acoplamiento con cualquier otro código integrado en la plataforma sin necesidad de compilar ambas fuentes en un mismo ejecutable.

El esquema del acoplamiento multiscala neutrónico-termohidráulico incluye dos niveles que se muestran en la figura 5. En los cálculos a nivel nodal, los nodos neutrónicos (elementos o cuartos de elemento) pueden tener asociados uno o cuatro canales termohidráulicos (parte superior de la figura 5). En los cálculos de difusión neutrónica 3D en malla fina (con un punto de malla por barrita) los elementos tienen asociados subcanales detallados (parte inferior de la figura

5). Es especialmente importante este tratamiento tridimensional debido a que los fenómenos termohidráulicos tienen un efecto axial importante [10].

Durante la integración en la plataforma SALOME, se han encapsulado los diferentes módulos del código COBAYA3 a través de una interfaz de C++ y se han creado las librerías dinámicas que contienen dichos módulos. En la práctica, los módulos son conjuntos de subrutinas que son llamados como si de una caja negra se tratase. El usuario final no ve lo que hay dentro de estas cajas, sino que sólo obtiene unas salidas frente a unos determinados datos de entrada.

El control de la ejecución en la plataforma SALOME se realiza utilizando un módulo de ésta llamado SUPERV (supervisión) en el cual el usuario puede definir fácilmente cuál va a ser su ruta de cálculo para un caso determinado. La definición de una determinada ruta de cálculo se realiza mediante la creación de un grafo en el entorno gráfico de la plataforma (ver figura 6 donde se muestra con detalle uno de estos grafos), labor muy sencilla llevada a cabo mediante la unión sucesiva de los distintos módulos que desempeñan diferentes tareas.

Cada módulo aparece representado como una caja con conexiones en la parte inferior. Enlazándolas en un determinado orden se realiza una ejecución secuencial del grafo y se obtienen los resultados del caso, ya sea como gráficos 3D dentro de SALOME, o en el tradicional archivo de salida del código que es así mismo generado. Este tipo de definición del flujo de cálculo está enfocado a permitir definir el tipo de acoplamiento de forma fácil mediante la unión de módulos lo que facilitará también el uso de estos módulos de cálculo en paralelo.

Por último, también se ha avanzado en el desarrollo de la plataforma SALOME ampliando el ámbito de aplicación de los códigos del CEA, FLICA4 y CRONOS2. Se ha validado su integración dentro de SALOME ejecutándose varios casos acoplados correspondientes al benchmark de Rotura de Línea de Vapor Principal (MSLB) organizado por la Agencia de Energía Nuclear (NEA)³ (ver figura 7).

CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto integrado NURESIM pretende crear las bases para el establecimiento de una Plataforma Tecnológica Europea de Simulación en Reactores de Fisión que permita la integración de nuevos algoritmos de cálculo en las distintas áreas 11.

Un importante papel en el proyecto NURESIM será llevado a cabo por el Grupo de Usuarios, grupo que incluirá organizaciones de la industria nuclear, compañías de desarrollo de software, organismos reguladores y otras instituciones interesadas en el uso de la plataforma NURESIM. El papel de este grupo será proporcionar información sobre el uso de la plataforma para su desarrollo y mejora.

Cabe remarcar que NURESIM se prolongará a lo largo de 2008, pero se espera que estos trabajos tengan continuidad en NURESP (*Nuclear Reactor European Simulation Project*), nuevo proyecto integrado que está siendo preparado para su presentación en el 7º Programa Marco de la UE. Este nuevo proyecto pretende ser no sólo una continuación de NURESIM integrando nuevos métodos de cálculo, sino también introduciendo el análisis termomecánico de combustible y posibilitando el enlace de éste con otros proyectos europeos 12.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo es financiado parcialmente por la Comisión Europea bajo el 6º Programa Marco de Investigación y Desarrollo de EURATOM, dentro del Proyecto Integrado NURESIM "European Platform for Nuclear Reactor Simulation", contrato No. 516560 (F16O). También es financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España bajo el programa FPU para formación investigadora y docente con la beca doctoral AP2005-0667 (J.J.Herrero); así como por el Consejo de Seguridad Nuclear de España bajo la cátedra "Federico Goded" con otra beca doctoral (J.Jiménez), y por la Universidad Politécnica de Madrid con otra beca de apoyo a proyectos de investigación de la UE (J.A.Lozano).

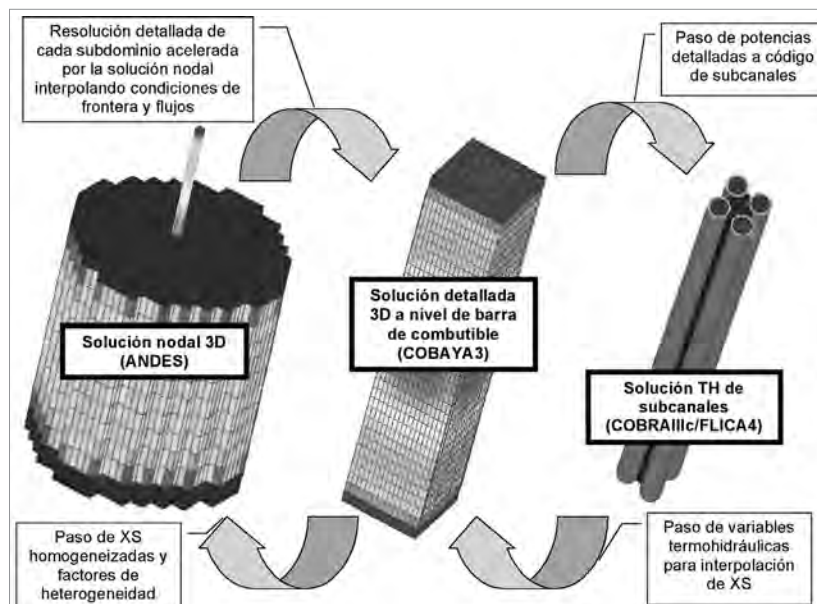


Figura 4: Análisis multiscala y multifísica del núcleo..

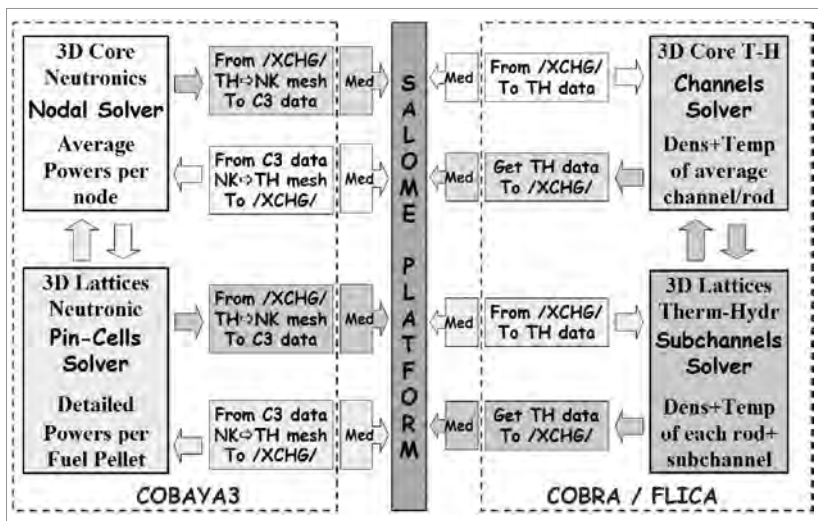


Figura 5: Esquema del acoplamiento neutrónico termo-hidráulico multiescala en COBAYA3.

REFERENCIAS

1. D.G. Cacuci, J.M. Aragonés, D. Bestion, P. Coddington, L. Dada, C. Chauliac, "NURESIM: A European Platform for Nuclear Reactor Simulation", invited paper in FISA 2006 - EU Research and Training in Reactor Systems - EUR 21231, pp. 123-143, European Commission DG for Research Euratom, Luxembourg, ISBN: 92-79-01214-2 (2006).
2. J.M. Aragonés, "Qualification of Core Physics Codes within NURESIM", in Post-FISA Seminar on Qualification of Advanced Numerical Simulation Platforms, FISA 2006 - EU Research and Training in Reactor Systems - EUR 21231, pp. 572-588, European Commission DG for Research Euratom, Luxembourg, ISBN: 92-79-01214-2 (2006).
3. J.M. Aragonés, C. Ahnert, O. Cabellos, N. García-Herranz, V. Aragonés-Ahnert, "Methods and Results for the MSLB NEA Benchmark using SIMTRAN and RELAP-5", Nuclear Technology 146, 29-40 (2004).
4. J.M. Aragonés, C. Ahnert, N. García-Herranz, "The Analytic Coarse-Mesh Finite Difference Method for Multigroup and Multidimensional Diffusion Calculations", Nucl. Sci. Eng. 157, 1-15 (2007).
5. J.A. Lozano, J.M. Aragonés, N. García-Herranz, "Development and Performance of the Analytic Nodal Diffusion Solver ANDES in Multigroups for 3D Rectangular Geometry", in Mathematics & Computations and Supercomputing in Nuclear Applications, M&C/SNA-2007 Monterey CA, T. Rubia, J. Vujic (Eds.), Vol. 4A5, 1-13, American Nuclear Society Ed., La Grange Park, IL-USA, ISBN: 0-89448-059-6 (2007).
6. J.A. Lozano, J.M. Aragonés, N. García-Herranz, "Transient analysis using the 3D nodal kinetics solver ANDES and ANDES/COBRA coupled system", remitido a International Conference on Reactor Physics PHYSOR-2008, Interlaken, Suiza, Septiembre 14-19, 2008.
7. J.J. Herrero, C. Ahnert, J.M. Aragonés, "3D Whole Core Fine Mesh Multigroup Diffusion Calculations by Domain Decomposition through Alternate Dissections", in Mathematics & Computations and Supercomputing in Nuclear Applications, M&C/SNA-2007 Monterey CA, T. Rubia, J. Vujic (Eds.), Vol. 8D9, 1-13, American Nuclear Society Ed., La Grange Park, IL-USA, ISBN: 0-89448-059-6 (2007).
8. D. Cuervo, C. Ahnert, J.M. Aragonés, "Analysis of the Influence of Subchannel Effects on the PWR Average Channel Calculations", in 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11), Hervé Lemmonnier Ed., Paper ID. D5-P396, American Nuclear Society, Avignon, France, 2-6 Octobre (2005).
9. J. Jiménez, D. Cuervo, J.M. Aragonés, "Multiscale and Multiphysics Coupling in COBAYA3", in Nuclear Reactor Thermal-hydraulics, NURETH-12 Pittsburgh PA, 12 pp., Am. Nuc. Soc. Ed., La Grange Park, IL-USA, ISBN: (2007). Seleccionado para publicación en Nucl. Eng. and Design.
10. M. Avramova, J. Jiménez, J.A. Lozano, J.J. Herrero, J.M. Aragonés, D. Cuervo, K. Ivanov, "Comparative Analysis of Neutronics/Thermal-Hydraulics Multi-Scale Coupling for LWR Analysis", remitido a International Conference on Reactor Physics PHYSOR-2008, Interlaken, Suiza, Septiembre 14-19, 2008.
11. J.J. Herrero, A. F. Badea, D. G. Cacuci, "Sensitivity Analysis and Cross Sections Data Adjustment for Multigroup Transport and Diffusion", remitido a International Conference on Reactor Physics PHYSOR-2008, Interlaken, Suiza, Septiembre 14-19, 2008.
12. P. Lederemann, D. Cacuci, C. Ahnert, J.M. Aragonés et al. "The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform: A Vision Report", Special Report EUR 22842, European Commission DG for Research Euratom (Ed.), Bruselas, 36 pp., ISBN: 978-92-79-05591-1, ISSN: 1018-5593 (2007). ■

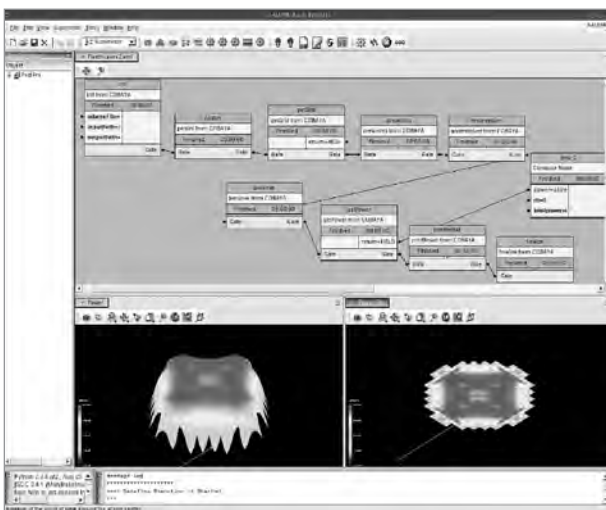


Figura 6: Ejemplo de un grafo de ejecución de COBAYA3 dentro de SALOME.

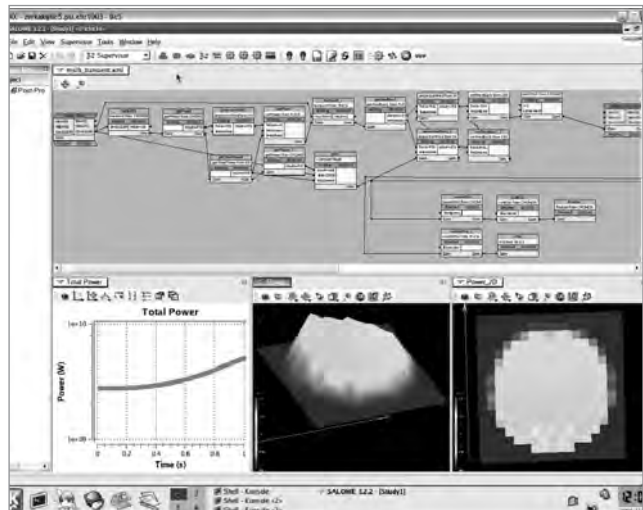


Figura 7: Cálculo transitorio acoplado entre FLICA4 y CRONOS2 para un caso a HZP del MSLB.