

Desarrollo de un simulador de los lazos de experimentos para el reactor Jules Horowitz (EXSIMU-JHR)

F.J. López Zazo y P. Barreira

El reactor de experimentos Jules Horowitz (JHR), en fase de construcción en Cadarache-Francia, tiene entre sus objetivos principales el estudio del comportamiento de combustible bajo irradiación.

El proyecto EXSIMU proporcionará un simulador de los lazos experimentales móviles para el JHR. Este simulador, que será utilizado en el diseño y la validación de los experimentos, consta de un modelo termohidráulico que calcula variables de estado (presiones, temperaturas, caudales, etc.), un modelo neutrónico que calcula las potencias generadas tanto por fisiones como por interacciones gamma y de una interfaz gráfica.

The Jules Horowitz experimental reactor (JHR) is being built at Cadarache- France. One of its main goals is the study of the behaviour under irradiation of structural materials and fuels of present and future nuclear reactors.

EXSIMU project will provide an experimental mobile loops simulator for JHR. This simulator, designed for the definition and validation of experiments, includes a thermal hydraulic model to calculate state variables (pressures, temperatures, mass flows, etc); a neutronic model, to calculate the power distribution generated by fissions and gamma heating; and a Human Machine Interface.



FRANCISCO JAVIER LÓPEZ ZAZO

Es licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Valladolid. Se incorporó a Tecnatom en 1988 dentro del área de simulación y códigos. Ha trabajado tanto en el diseño e integración de modelos de simulación en diversos proyectos y países (Alemania, USA, México, Finlandia), como en el desarrollo software de comunicaciones entre procesos. En la actualidad realiza tareas de gestión de proyectos relacionados con la simulación de procesos industriales principalmente relacionados con la producción de energía.

INTRODUCCIÓN

El reactor de experimentos de materiales Jules Horowitz (JHR) está siendo construido por un consorcio liderado por CEA (Comisariat a l'Energie Atomique) en Cadarache-Francia (figura 1), para ser usado por la comunidad internacional en la investigación de nuevos materiales y combustibles para reactores actuales, de GEN III y IV y sistemas transmutadores, así como para la producción de radio isótopos con fines médicos [1], [4].

El JHR es un reactor de investigación en piscina, con una potencia máxima de 100 MW térmicos y cuyo núcleo principal se encuentra rodeado de un deflector modular de Berilio refrigerado por la propia piscina. El reactor posee posiciones experimentales de irradiación tanto en el interior del núcleo, fijas, como en el deflector de Berilio, fijas y móviles. Las posiciones de irradiación móviles permiten desplazar los dispositivos experimentales a lo largo de canales de agua de 30 cm. abiertos en el deflector (figura 2), permitiendo así la reproducción de rampas de potencia en las muestras de combustible.

El proyecto de desarrollo de un simulador de los lazos móviles de experimentos (EXSIMU) se encuadra dentro de

la contribución española al proyecto de construcción y explotación del JHR.

El objetivo principal del EXSIMU es facilitar el diseño de los protocolos de los experimentos, ayudando en la verificación de los mismos y asegurando que los principales parámetros permanecen dentro de los límites de diseño. Así mismo este simulador contribuirá a una mejor comprensión de los resultados obtenidos en los ensayos que se lleven a cabo.

Este proyecto, por su alto carácter de innovación, está considerado como un primer paso o prototipo hacia un producto industrial.

En el desarrollo del EXSIMU participan las siguientes empresas y organismos:

- Ciemat: Director del proyecto y soporte a los modelos neutrónicos
- Tecnatom, S.A.: Coordinador general del proyecto, desarrollador del modelo termohidráulico, del software del entorno de simulación, de las funciones de control y responsable de integración.
- Socoin: Desarrollador de los modelos neutrónicos y de deposición gamma sobre las estructuras metálicas y de la interfaz gráfica (HMI).



PILAR BARREIRA PEREIRA

es licenciada en Física por la Universidad de Santiago de Compostela. Máster en Ingeniería Nuclear por la Universidad Autónoma de Madrid y el Ciemat. Se incorporó a la Dirección Nuclear de SOCOIN en 1997. Ha dado apoyo a la C.N. José Cabrera en las Áreas de Ingeniería, Seguridad, Operación y Licencia, siendo responsable de diversos proyectos de modelación y simulación. En la actualidad es directora de proyectos relacionados con modelos de ingeniería, simulación y códigos.

- CEA: Proporciona el paquete de datos así como, en su papel de usuario final, responsable de la aceptación tanto de los modelos individuales como del simulador global.

El desarrollo del EXSIMU ha sido dividido en los siguientes módulos:

— *Entorno de simulación y funciones de control*

Proporciona el entorno software necesario para el desarrollo y la ejecución de los modelos, suministrando mecanismos para el intercambio de información entre los mismos. El entorno de simulación utilizado se denomina AIDES y ha sido desarrollado y utilizado por Tecnatom en sus simuladores.

La conexión del HMI con los modelos de simulación, tanto para obtener la información que será presentada al usuario final así como para el envío de órdenes de control, se llevará a cabo mediante el desarrollo de servicios Web. Aunque la arquitectura inicialmente prevista para el simulador no hará necesaria una ejecución distribuida de los modelos y del HMI, esta estrategia de desarrollo posibilitaría en un futuro la ejecución remota del simulador.

— *Modelo termohidráulico*

Este modelo representa el lazo de experimentos desde el punto de vista termohidráulico y será el responsable del cálculo dinámico de las principales variables de estado teniendo en cuenta la operación que se esté realizando a través del posicionamiento de equipos (válvulas, bombas) y de las potencias generadas tanto en la muestra de combustible como en los materiales por interacciones gamma y neutrónicas. Estos cálculos se realizan mediante la resolución del sistema de ecuaciones generado al aplicar las leyes de conservación en las celdas en las que ha sido dividido el modelo.

El modelo termohidráulico está siendo desarrollado con el código de seis ecuaciones TRAC-RT propiedad de Tecnatom.

— *Modelo neutrónico y gamma*

El modelo neutrónico calcula la potencia nuclear generada en la muestra

de combustible irradiado en función de las características de éste y teniendo en cuenta el estado del JHR, el canal de experimentación y la distancia a la que se está llevando a cabo el experimento.

Por otra parte, realiza el cálculo de la energía depositada en las diferentes estructuras de los componentes del lazo de experimentos debido a las interacciones gamma y neutrónica. En algunos escenarios experimentales esta potencia es superior a la generada por fisiones en la muestra.

Los resultados de potencia del modelo neutrónico y gamma son enviados al modelo termohidráulico para su realimentación.

— *Human Machine Interface*

Es la interfaz que será presentada al usuario final para la realización de todas las funciones establecidas en el diseño del experimento a simular, la ejecución y control de la simulación mediante la información de las variables del proceso, así como en la fase de postproceso de resultados, donde además se permitirá la recuperación y comparación con simulaciones previas.

ARQUITECTURA DEL SIMULADOR

Desde el punto de vista de la plataforma de cómputo, el simulador solo requerirá de un ordenador bajo sistema operativo Windows (los nuevos desarrollos también tienen en cuenta la posibilidad de una ejecución bajo LINUX).

El entorno de simulación AIDES (Ambiente Integrado de Desarrollo y Ejecución de las Simulación) asegura la sincronización en la ejecución de los diferentes modelos de simulación, proporcionando herramientas de depuración para los ingenieros de modelación.

A grandes rasgos AIDES está compuesto por un módulo ejecutivo que permite configurar y ejecutar los modelos de simulación según un patrón temporal definido. Esta ejecución de modelos puede hacerse con o sin la restricción de tiempo real. Dado que el EXIMU será usado principalmente desde un punto de vista de ingeniería no será requerida la ejecución sincronizada con tiempo real.

La principal herramienta proporcionada por AIDES para el ingeniero de modelación es el depurador simbólico (DESI), mediante el cual se puede controlar la ejecución de la simulación incluso a nivel de un único paso temporal, permitiendo adicionalmente la visualización y modificación de cualquier variable de la base de datos de simulación. DESI también dispone de una interfaz gráfica desde donde se puede seguir la evolución temporal de las variables seleccionadas.

Adicionalmente DESI dispone de los comandos necesarios para inicializar y guardar el estado de la simulación en un instante dado, así como la configuración de la opción de salvado periódico del estado de la simulación.

Otra herramienta incluida en AIDES es el supervisor de la simulación (SPV), con la cual se puede visualizar el estado de la ejecución de la simulación, el tiempo de CPU que está consumiendo cada modelo así como la posibilidad de modificar *on-line* el patrón de ejecución.

Cuando se crea una simulación nueva, especialmente cuando se realiza la integración de un modelo desarrollado con TRAC-RT con otros sistemas, como es el caso del EXSIMU, es necesaria la herramienta de configuración de la base de datos de la simulación (ABAD). Con esta herramienta se gestionan las variables de los diversos modelos que integran la simulación permitiendo que otras herramientas (DESI) y los propios programas de simulación puedan acceder a ellas.

Para completar las herramientas base que serán utilizadas en el EXSIMU se encuentran los WEB Services desarrollados para permitir el acceso a diversas funciones del módulo ejecutivo vía WEB. Consiste en un conjunto de API desarrolladas bajo C#.NET que serán utilizadas por la interfaz gráfica para el acceso a la información de la simulación tanto desde el punto de vista de datos como de comandos.

MODELO TERMOHIDRÁULICO

Alcance

El lazo experimental a simular desde el punto de vista termohidráulico consta de las siguientes partes:

- *Dispositivo experimental*

Es la parte principal del lazo, equivalente a la vasija en un reactor convencional, y por tanto el encargado de contener la muestra de combustible a ensayar, así como los canales de refrigeración. Se debe tener presente la diferencia de escala de este sistema respecto a un sistema convencional ya que el combustible (muestra) consta, en el ejemplo de demostración de EXSIMU, únicamente de una varilla cuya dimensión activa máxima es de 60 cm con un diámetro de 9,5 mm. El dispositivo experimental tiene un diámetro exterior de unos 65 mm y una altura 4250 mm. La figura 3 muestra el esquema del dispositivo en el que pueden distinguirse los principales componentes como son el sistema de jet-pumps, los canales de refrigeración descendente y ascendente (con un volumen conjunto de unos 6 dm³) así como el portamuestras que contiene el combustible a ensayar.



Figura 1. Maqueta del reactor Jules Horowitz.

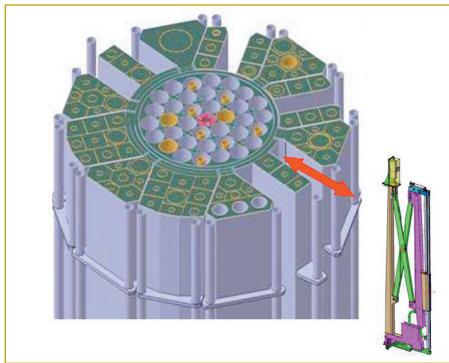


Figura 2. Configuración JHR y Dispositivos Móviles.

• Circuito inductor

Este circuito está acoplado al dispositivo experimental proporcionando la entrada y retorno del refrigerante. Sus elementos principales son un calentador eléctrico que constituye un elemento regulador de la temperatura de fluido a la entrada de la muestra, un intercambiador regenerativo que realiza una transferencia de calor entre la entrada y la salida del dispositivo, el intercambiador principal que constituye la mayor fuente de extracción de energía del circuito hacia la piscina del JHR y un conjunto de dos bombas montadas en paralelo encargadas de mantener un caudal de circulación (140 gr/s en condiciones normales).

• Circuito de depuración

Este circuito, desde el punto de vista termohidráulico, mantiene la presión del circuito inductor al cual está conectado. Consta básicamente de un orificio restrictor para reducir la presión del fluido proveniente del circuito inductor, un cambiador de calor para reducir la temperatura del fluido, un tanque de almacenamiento, un conjunto de bombas y el presionador.

Metodología

El alcance del modelo descrito anteriormente (figura 4) ha sido desarrollado mediante la utilización del código TRAC-RT [2], en el cual los elementos del sistema son asignados a componentes del código y estos a su vez son divididos en celdas y nodos de cálculo creando así la nodalización del sistema. Como ejemplo de este proceso la figura 5 muestra la nodalización empleada para el circuito inductor.

Los datos geométricos y curvas de las bombas del sistema han sido obtenidos del modelo proporcionado por CEA para los estudios de seguridad desarrollado con el código CATHARE.

El modelo desarrollado no solo tiene en cuenta la operación normal del siste-

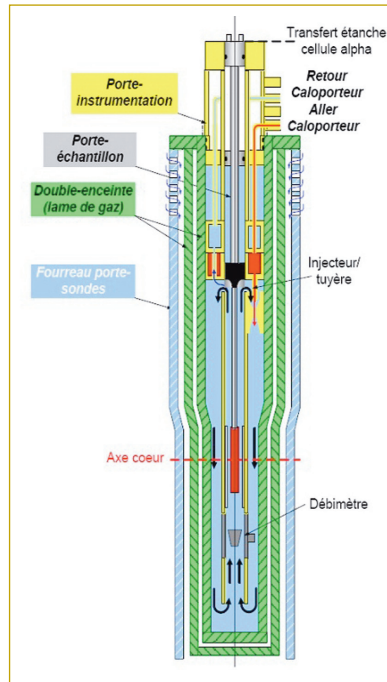


Figura 3. Esquema del Dispositivo Experimental.

ma sino que incorpora un conjunto de malfunciones que permiten investigar su comportamiento antes diversos fallos. Estas malfunciones se dividen en las categorías:

• Malfunciones genéricas

Aplican de forma general a todos los equipos modelados (válvulas, bombas) e implican el fallo de actuación de estos dispositivos como puede ser la apertura espurea de una válvula de seguridad.

• Malfunciones específicas

Estas malfunciones deben ser tenidas en cuenta desde el momento del diseño del modelo ya que afectan a su nodalización para permitir la simulación de una rotura en un determinado punto predefinido del circuito.

Validación

Desde el punto de vista de validación del modelo, teniendo en cuenta que el sistema real aun no está en servicio, se ha realizado una comparación de resultados frente a los proporcionados por CATHARE tanto en estados estacionarios de operación como en la evolución de las principales variables en un escenario de pérdida de refrigerante (LOCA).

Las figuras 6 y 7 muestran, como ejemplo, la comparación de la evolución de la presión en el dispositivo y la masa de líquido que contiene para un LOCA considerando un área de rotura equivalente a un círculo de 3 mm de diámetro en el circuito inductor a la entrada al dispositivo.

En este transitorio se ha realizado la hipótesis de disparo del JHR a los 0,77 s de iniciarse el LOCA en el lazo de experimentos y por tanto con un decaimiento en la potencia generada en la muestra y la debida a interacciones gamma y neutrónicas en los materiales del lazo. Dado que el modelo termohidráulico aun no se encuentra integrado con el modelo neutrónico esta variación de potencia ha sido proporcionada mediante una tabla en función del tiempo de acuerdo a las indicaciones de CEA.

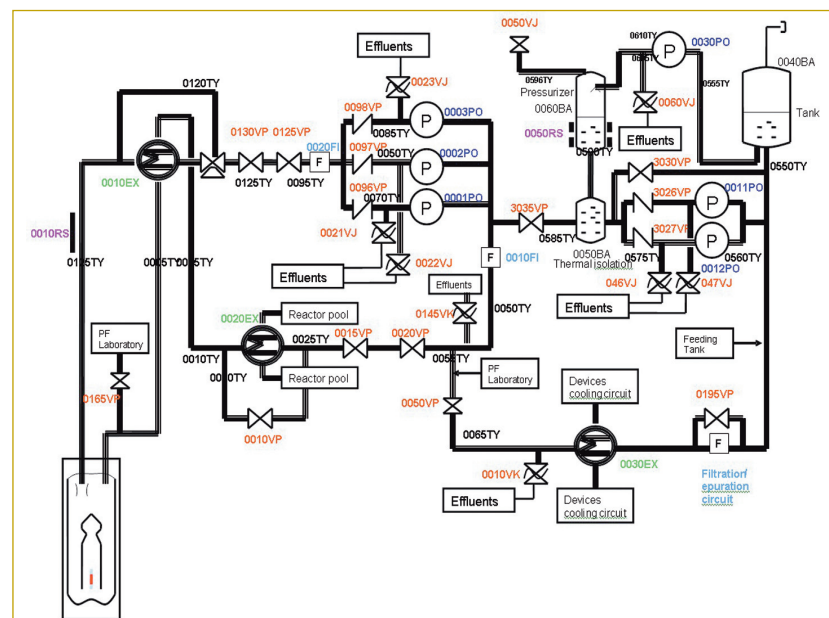


Figura 4. Alcance Modelo Termohidráulico.

MODELO NEUTRÓNICO Y GAMMA

Alcance

El modelo neutrónico y gamma del simulador tiene como objetivo reproducir el comportamiento de los dispositivos experimentales móviles del JHR (figura 3) estando sometidos al campo de irradiación externo generado por el núcleo principal del reactor. Este módulo proporciona durante la simulación de los experimentos:

1. La generación de potencia nuclear en la varilla de combustible introducida en los dispositivos experimentales móviles, debido a la irradiación de flujo neutrónico externo procedente del núcleo del reactor.
2. El calentamiento gamma y neutrónico en los materiales estructurales del dispositivo, debido al flujo procedente del núcleo del reactor y al producido en el propio dispositivo durante el experimento de irradiación.

Los resultados de simulación proporcionados por el modelo neutrónico y gamma serán utilizados por el simulador como fuentes de calor del lazo, siendo introducidos como parámetros de entrada al modelo termohidráulico.

El campo de irradiación al que estarán sometidos los dispositivos y que será variable durante el desarrollo de los experimentos, dependerá de la configuración del núcleo principal del JHR, que representa una condición de contorno al entorno de simulación. La variación de la fuente de irradiación de los dispositivos vendrá dada en función de la distancia entre éstos y el núcleo principal del reactor, debido al desplazamiento del lazo a lo largo del canal de experimentación.

El módulo neutrónico y gamma simula en todo momento del experimento la potencia de fisión y de irradiación gamma y neutrónica bajo cualquier posible combinación de las siguientes condiciones iniciales y de contorno:

- Configuración y estado del núcleo principal del reactor JHR.
- Canal Experimental: 6 canales de experimentación para dispositivos móviles.
- Distancia del dispositivo al núcleo del reactor: 0 a 30 cm.
- Longitud activa de la muestra de combustible del dispositivo: 20 a 60 cm.
- Composición del combustible: UO_2 y MOx .
- Enriquecimiento inicial del combustible.
- Grado de quemado del combustible: hasta 120 GWd/tU.
- Temperatura del moderador.
- Temperatura del combustible.

El modelo neutrónico y el modelo

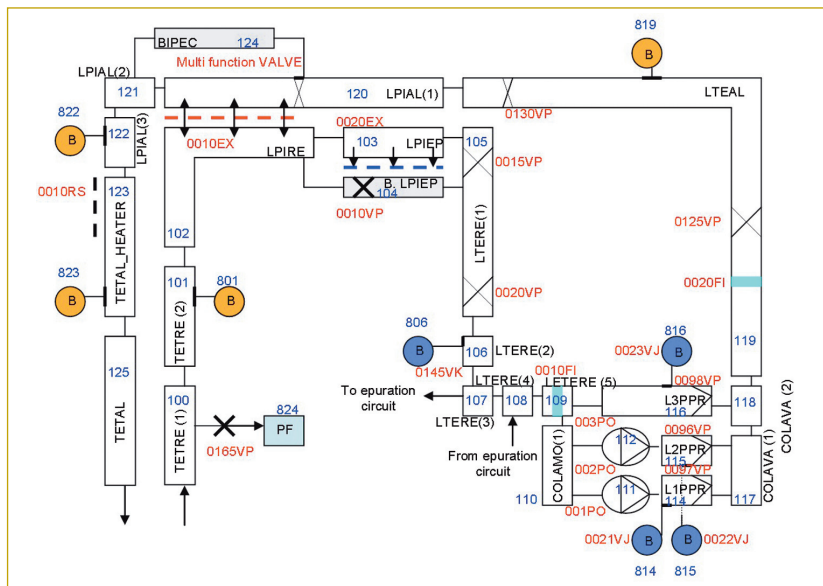


Figura 5. Nodalización para el Circuito Inductor.

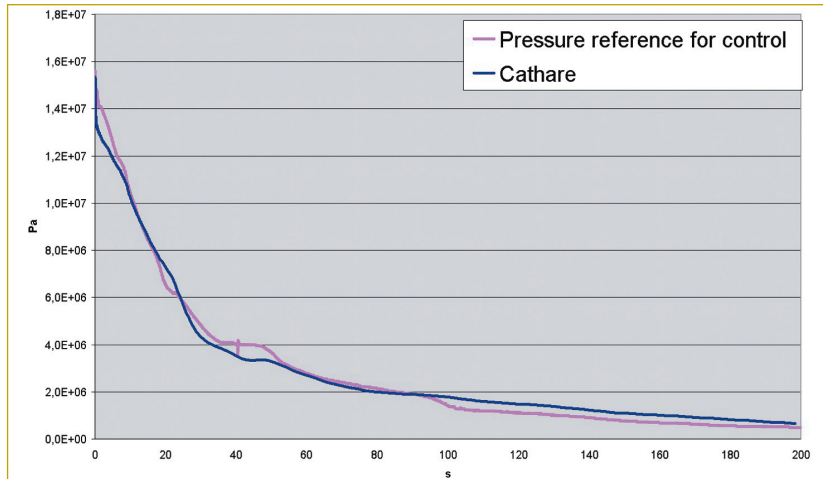


Figura 6. Comparación Evolución de la Presión en el Dispositivo.

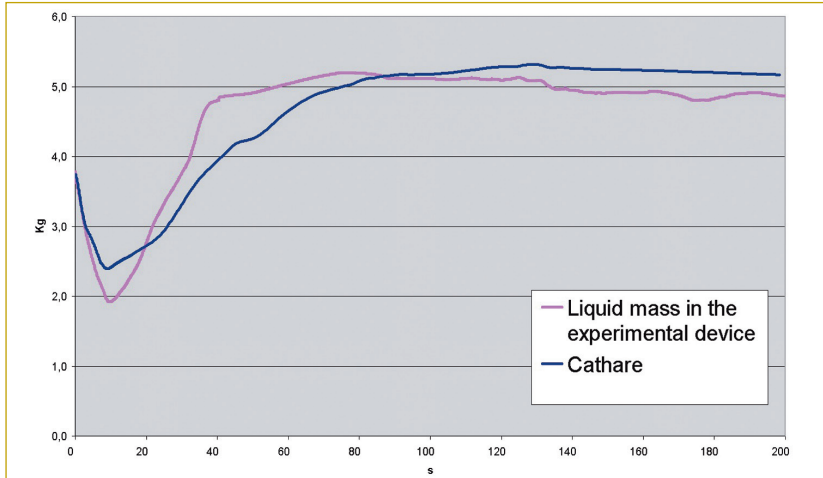


Figura 7. Comparación Evolución de la Masa de Líquido contenida en el Dispositivo.

termohidráulico estarán óptimamente acoplados con el objetivo de que las potencias simuladas de fisión e irradiación del dispositivo puedan reproducir las

realimentaciones que producen las condiciones termohidráulicas del lazo, así como las debidas a la temperatura del combustible.

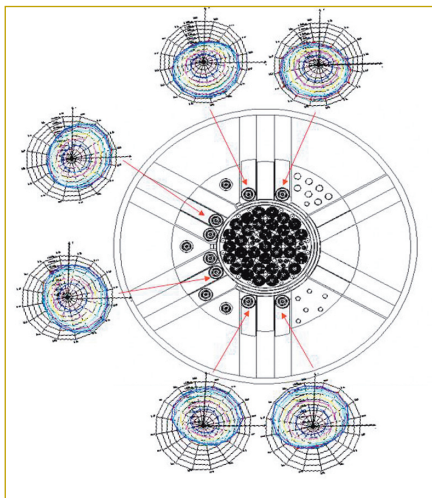


Figura 8. Campo de Irradiación de los Dispositivos Móviles.

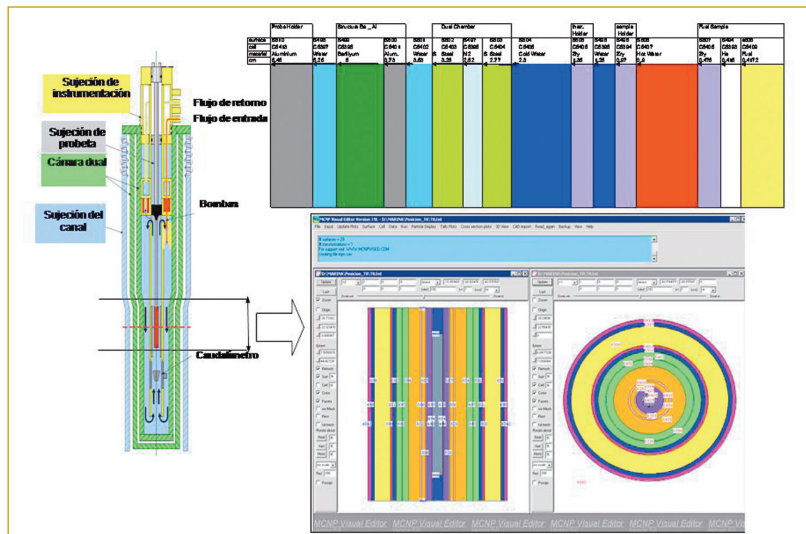


Figura 9. Modelo de MCNP del Dispositivo.

Metodología

El desarrollo del modelo neutrónico y gamma se lleva a cabo mediante simulaciones con el código estadístico de Montecarlo MCNP [3], así como con software de desarrollo propio. El código MCNP, que simula la generación y transporte de partículas de radiación, permite representar simetrías complejas 3D y realizar cálculos en espectros continuos de energía, por lo que resulta adecuado para la solución de problemas complejos como el del modelo neutrónico y gamma de los dispositivos experimentales móviles del JHR.

La metodología de cálculo se divide en las siguientes fases:

- Cálculo de la Fuente de Irradiación de los Dispositivos (figura 8): Éste es un cálculo de criticidad de MCNP que se realiza con un modelo completo del reactor JHR (núcleo principal, reflector, posiciones experimentales móviles y fijas, etc).
- Cálculo de la Potencia de Fisión y Calentamiento de los Dispositivos (figuras 9, 10 y 11): Éste es un cálculo de MCNP con fuente externa de irradiación (calculada en la fase anterior) que permite evaluar la respuesta de los dispositivos en función de todas las posibles condiciones iniciales y de contorno (tipos de combustible, distancia, temperaturas, etc).
- Desarrollo de una Herramienta de Software de Interpolación: Esta utilidad permite obtener resultados de simulación en continuo bajo cualquier combinación de parámetros de entrada al modelo, a partir de los estados estacionarios calculados con MCNP en la fase previa.
- Acoplamiento del Comportamiento Neutrónico y Termohidráulico del Dispositivo.

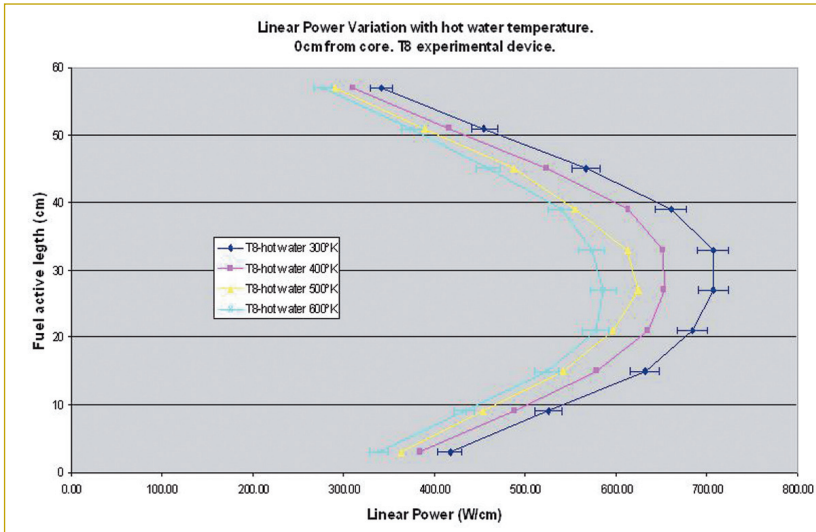


Figura 10. Perfil de Potencia Lineal.

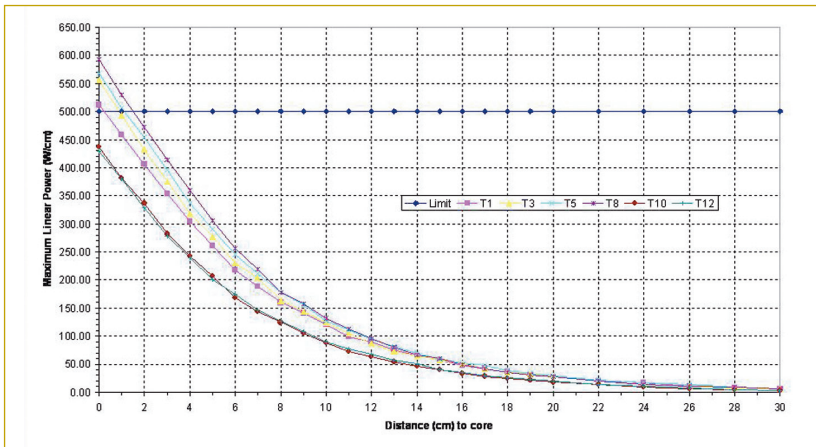


Figura 11. Variación de la Potencia con la Distancia al Núcleo.

HMI

La interfase gráfica del EXSIMU (HMI) permite al usuario del simulador interactuar y comunicarse con el entorno de simulación. Esta herramienta

de software proporciona todas las utilidades y recursos necesarios para gestionar los modelos de simulación, facilitando el diseño y definición de escenarios experimentales, la operación y control

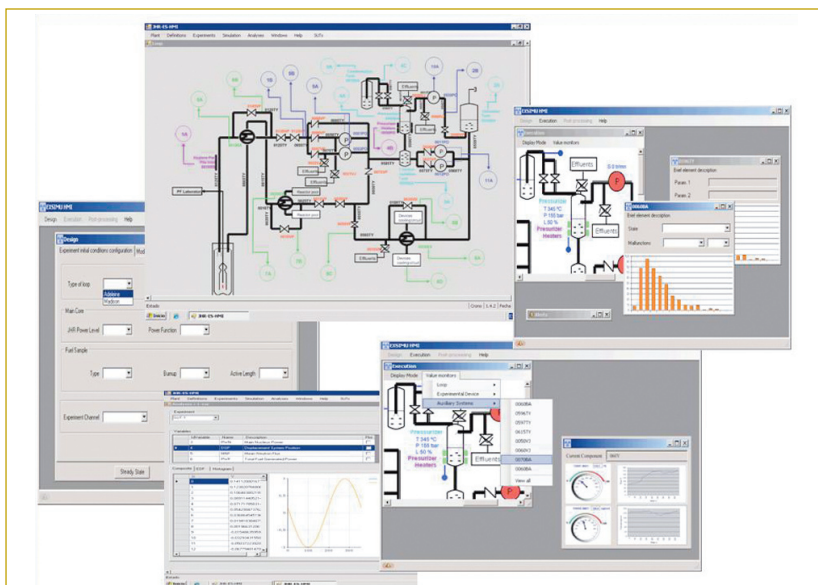


Figura 11. Pantallas de la Interfase Gráfica.

de las simulaciones de los experimentos, el seguimiento on-line de su evolución y el post-proceso final de resultados.

La estructura de la interfase gráfica está integrada, de forma general, por tres módulos. Cada uno de ellos, está desarrollado por una serie de pantallas interactivas (figura 11) que permiten a los usuarios gestionar y ejecutar todas las funcionalidades ofrecidas por la herramienta, programada en entornos .NET, JAVA y con desarrollos propios de software. La interacción entre el usuario del EXSIMU y los modelos de simulación emplea servicios Web como canal de comunicación para el intercambio de datos.

Los módulos que integran la interfase gráfica del EXSIMU son los siguientes:

Módulo de Diseño

Este módulo permite al usuario diseñar el experimento, definir las condiciones iniciales de los componentes de los modelos de simulación y configurar los principales parámetros intrínsecos

de la simulación. Asimismo, permitirá grabar el estado inicial de un determinado escenario experimental, permitiendo recuperar en todo momento diferentes configuraciones de diseño de los experimentos.

Módulo de Ejecución

Este módulo permite al usuario gestionar, operar y controlar on-line la simulación de los experimentos. Sus diferentes funcionalidades se organizan en los siguientes tres modos: Modo de Operador, que permitirá al usuario simular acciones de operador, ejecutar acciones automáticas según una secuencia predefinida con anterioridad, hacer un seguimiento *on-line* de los principales parámetros de proceso y de los estados de los componentes del lazo; Modo de Malfunciones, que permite activar malfunciones de componentes; y Modo de Funciones de Control, que facilita la gestión y activación de las diferentes funciones de control del simulador: arrancar, parar, congelar, repetir, etc.

Módulo de Análisis de Datos

Este módulo de la interfase permitirá a los usuarios analizar los resultados de la simulación de escenarios una vez finalizada. El post-proceso de datos incluye la visualización gráfica de variables del experimento, la comparación de resultados entre diferentes simulaciones de experimentos y el análisis matemático de los resultados de la simulación (tendencias, regresiones, etc.).

Estado del proyecto y conclusiones

En el momento actual el proyecto se encuentra en la fase de integración de modelos, lo cual consiste en hacer interaccionar, bajo AIDES, los modelos desarrollados termohidráulico y neutrónico realizándose el intercambio de variables de interfaz para obtener un estado estacionario del conjunto. Posteriormente se realizará la integración de la interfaz gráfica y finalmente las pruebas en fábrica al simulador completo. El simulador será objeto de un conjunto final de pruebas en las instalaciones de CEA, cuya finalización está prevista en diciembre del presente año. En 2011 el simulador podrá empezar a ser utilizado para el soporte al diseño de experimentos en el JHR obteniéndose la realimentación necesaria para proceder a su mejora antes de que empiecen los experimentos reales en el JHR previstos para 2014.

REFERENCIAS

- [1] JHR web page <http://www-cadarache.cea.fr/rjh/index.html>
- [2] Manual de usuario del código termohidráulico TRAC-RT. Tecnatom S.A.
- [3] Manual de usuario del código Monte Carlo de transporte NCNP. Los Alamos National Laboratory
- [4] Jules Horowitz Reactor experimental capabilities. TRTR-2005 / IGORR-10 joint meeting. September 2005, Maryland, USA. ■

RENFE colaborará con la SNE aportando sus medios y ofreciendo las máximas facilidades de viaje a todos los asistentes y acompañantes a la 36ª Reunión Anual de la SNE.

Estas facilidades de viaje se podrán obtener en trenes de Alta Velocidad-Larga Distancia, Alta Velocidad-Media Distancia, Media Distancia Convencional y Cercanías, mediante la presentación en los puntos de venta (estaciones, agencias de viaje y oficinas de ventas) de los "documentos de asistencia" elaborados al efecto.

Los descuentos pueden obtenerse mediante la impresión del documento PDF ubicado en la página web de la Reunión Anual (www.reunionanualsne.es). El acceso a este PDF deberá hacerse mediante preacreditación de los participantes a través de dicha página web y posterior personalización del mismo por parte del asistente al evento.