



MX0500001

Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR/International Joint Meeting Cancun 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR
XV Congreso Anual de la SNM y XXII Reunión Anual de la SMSR/XV SNM Annual Meeting and XXII SMSR Annual Meeting
Cancún, Q.R., México, 11-14 de Julio, 2004/Cancún, Q.R., Mexico, July 11-14, 2004

Desarrollo del Módulo de Accidentes Severos de una Central Nucleoeléctrica Basado en el Código Nuclear MELCOR y su Incorporación al Simulador de Aula

**Francisco Samuel Cortés Martell, Juan Carlos Ramos Pablos, Pamela Nelson Edelstein,
Carlos Chávez Mercado**

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería Eléctrica

Grupo de Ingeniería Nuclear

Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, México D.F.

*samueltcortes@correo.unam.mx; jc_ramosp@hotmail.com; pnelson@lairn.fi-p.unam.mx
chavez2@cableonline.com.mx*

Resumen

Este trabajo describe el desarrollo del Módulo de Accidentes Severos (MAS) basado en el Código MELCOR y su incorporación al Simulador de Aula del Grupo de Ingeniería Nuclear de la Facultad de Ingeniería (GrINFI) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El Módulo de Accidentes Severos tiene la finalidad de contar con capacidad instalada y operacional para la simulación de secuencias de accidente con propósitos de capacitación, entrenamiento, análisis y diseño. Se presenta una descripción somera de SimAula, y se discuten la filosofía empleada para obtener la versión interactiva de MELCOR, así como su implementación en el ambiente de SimAula. Finalmente, después de confirmar el correcto funcionamiento del desarrollo de la herramienta, se discuten algunos tópicos posibles para aplicaciones específicas del MAS.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la operación normal de las centrales nucleares, no hay liberación de radioactividad significativa, por lo que cualquier amenaza para la salud de los trabajadores y del público sólo podría tener lugar bajo condiciones de un accidente severo. Un accidente severo implica un fuerte daño al núcleo. La posibilidad de un accidente severo es muy remota, sin embargo dada la magnitud de las consecuencias posibles, los reglamentos y las medidas de seguridad nucleares contemplan su análisis para instrumentar las medidas adecuadas para su mitigación. Los objetivos de seguridad nuclear, basados en el principio de prevención, se han venido reforzando progresivamente, y las lecciones aprendidas de los dos accidentes que han afectado a la industria nuclear (Three Mile Island en 1979, en E.U., y Chernobil en 1986, en Ucrania) han dado lugar a importantísimas mejoras en la seguridad y a un esfuerzo sin precedentes en la prevención de accidentes. Los peligros que entraña cualquier accidente nuclear y la probabilidad de que estos se produzcan se pueden reducir aún más con la introducción de modificaciones tecnológicas, con

una mejor capacitación y formación de personal, con medidas de gestión de accidentes y con una mayor efectividad de las medidas reguladoras. La intención del presente trabajo es contribuir precisamente al desarrollo de herramientas tecnológicas y a su aplicación en el ámbito de la seguridad nuclear, tanto para la capacitación y entrenamiento del personal de operación, como para el estudio, análisis y diseño de equipos y estrategias de operación.

En el Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares (LAIRN) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM se desarrolla el proyecto del Simulador de Aula. El sistema tiene como finalidad apoyar tanto a la investigación como a la capacitación en la operación de una Central Nucleoeléctrica, permitiendo al usuario efectuar un análisis fenomenológico y con ello, lograr una mejor comprensión de la dinámica de los procesos simulados y de sus interacciones.

El Simulador de Aula (SimAula) consta de modelos del reactor, sus sistemas asociados y del balance de planta de la central nucleoelectrica. Los modelos han sido desarrollados con RELAP/SCDAP, programa de análisis con reconocida capacidad para este tipo de estudios. En este trabajo se describe la incorporación del programa MELCOR al simulador de aula, así como el desarrollo e implementación de herramientas de visualización y control que permitan incrementar la capacidad del actual simulador para efectuar Análisis de Seguridad Nuclear.

2. SIMULADOR DE AULA

El Simulador de Aula prototipo [1,2] se ha implementado como un sistema con múltiples computadoras controlado por medio de una interfaz gráfica avanzada. El sistema permite la representación virtual y emulación de paneles de control e instrumentación asociada, así como la exhibición de diversos despliegues gráficos de información, diagramas mímicos y pictoriales bajo una arquitectura de simulación distribuida. El simulador de Aula prototipo puede configurarse para acceder a diversos modelos de sistemas nucleares con propósitos de entrenamiento en operación normal, o bien, acceder a múltiples códigos nucleares especializados para el análisis de eventos transitorios y accidentes severos.

Uno de los aspectos más importantes del proyecto, ha sido la implementación de la Interfaz Hombre - Máquina (IHM) con la cual el usuario del sistema prototipo interacciona vía manipulación directa con los objetos gráficos que representan fielmente la instrumentación de monitoreo y control. Asimismo, la IHM permite al usuario navegar a través de los diversos despliegues involucrados de una forma sencilla, interactiva y amigable. Adicionalmente, un conjunto de despliegues gráficos representando la vasija del reactor, contención, sistemas de emergencia y de control, así como la línea de vapor y la turbina principal han sido implementados para animación de transitorios y accidentes severos vía interacción con programas nucleares especializados. Finalmente, se cuenta con una serie de despliegues gráficos interactivos para la representación de los principales sistemas y componentes de la central denominados despliegues de balance de planta o del BOP.

Las características del sistema mencionadas, proporcionan un ambiente gráfico de simulación excepcional que lo convierte en una poderosa herramienta analítica, con capacidad para ejecutar una amplia gama de escenarios operacionales bajo diferentes modos funcionales y regímenes de adquisición de datos en un modo interactivo.

El Simulador de Aula prototipo, utilizado como plataforma experimental, facilita la incorporación e integración de interfaces hombre-máquina y programas computacionales para el análisis de la seguridad como se describe a continuación para MELCOR.

3. DESARROLLO DEL MÓDULO DE ACCIDENTES SEVEROS (MAS)

Para el desarrollo del Módulo de Accidentes Severos, se ha partido del programa de la versión de MELCOR 1.8.3 proporcionada por el Organismo Internacional de Energía Atómica para compilación en computadora personal, que fue recompilado con las modificaciones necesarias bajo el sistema UNIX. El cambio de plataforma se hizo necesario ya que para el desarrollo de los despliegues de monitoreo y control se utiliza el paquete gráfico avanzado de software llamado DataViews bajo el sistema operativo UNIX. Este software permite crear y manipular objetos gráficos con dinámicas complejas establecidas por las propias librerías y funciones de DataViews, así como la adquisición de datos en tiempo real.

En esta fase de instalación del código, se verificó su correcta ejecución comparando los resultados de MELCOR en sus versiones de computadora personal y del sistema operativo UNIX. Para ello se empleó un modelo de MELCOR para la CNLV proporcionado por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). El modelo funciona con resultados muy similares en las dos versiones, con variaciones menores atribuibles a la diferente precisión entre máquinas de 32 y 64 bits.

Una vez adquirido un conocimiento adecuado de la estructura programática del Código MELCOR para identificar las rutinas, funciones y estructuras de las bases de datos internas, se efectuaron las modificaciones indicadas para lograr la interactividad (acciones del usuario, visualización de variables, comunicación y actualización de información entre segmentos de memoria compartida, etc.) entre el sistema gráfico base de SIMAULA y MELCOR.

3.1. MELCOR Interactivo.

El programa MELCOR [3,4] ha sido desarrollado para modelar un amplio rango de fenómenos físicos incluyendo los termohidráulicos; la transferencia de calor; el comportamiento los aerosoles; calentamiento, degradación, y reubicación del núcleo de reactor y descarga y transporte de productos de fisión. Fue desarrollado para modelar el progreso de accidentes severos en centrales nucleares de agua ligera.

MELCOR se ejecuta en dos partes. En la primera, se corre el programa MELGEN, en cuyo archivo de datos de entrada se especifica la mayor parte de la información de entrada al programa. Ésta se procesa y verifica extensivamente en esta etapa. Una vez que la información de entrada ha sido verificada, se escribe un archivo de reinicio (*restart file*) con las condiciones iniciales del cálculo. La segunda parte es el programa MELCOR propiamente dicho, en el que se avanza el problema como función del tiempo con base en los datos de entrada de MELGEN y los datos que se proporcionen como entrada a MELCOR. El programa corre normalmente sin permitir interacción con el usuario (sólo se permite crear el archivo STOP, que al ser detectado por MELCOR causa la terminación de la corrida).

El análisis de accidentes con MELCOR normalmente se efectúa en procesos por lotes, en los que se extrae la información del archivo de reinicio. Al tiempo cero, se toma el archivo de reinicio de MELGEN, y posteriormente MELCOR escribe en intervalos de tiempo preestablecidos los datos necesarios para reiniciar la corrida en ese tiempo si así se deseara. Típicamente, si al analizar los datos de salida se desea incluir una acción en algún punto, se selecciona el tiempo más cercano para el que se tiene un registro de reinicio, y se ejecuta MELCOR a partir de ahí con un archivo de entrada que incluya las modificaciones deseadas. Normalmente, los cambios se efectúan redefiniendo alguna función de control constante cuyo valor se utiliza en el modelo para efectuar alguna acción.

Para mantener la misma filosofía, se decidió utilizar las funciones de control manejadas por el Paquete CF de MELCOR. De esta forma, el manejo del programa permanece invariable y los archivos de entrada utilizados anteriormente pueden utilizarse sin modificaciones substanciales.

Al ejecutarse MELCOR con las modificaciones para interactividad después de un reinicio, el programa verifica la existencia de dos archivos, *despl.dat* y *contint.dat*. Si los archivos no existen en el directorio de trabajo, MELCOR prosigue su modo común de ejecución. Si los archivos existen (uno o ambos), MELCOR interactúa con la memoria compartida de acuerdo a la Figura 1. El archivo *despl.dat* contiene dos vectores, en el primero se especifican las funciones de control cuyo valor se enviará a la localidad de memoria compartida que se indica en el segundo vector. En *contint.dat* se incluyen como primer vector las funciones de control cuyo valor se leerá durante la ejecución de MELCOR de localidad de memoria compartida indicada en el segundo vector. En ambos casos las funciones de control deberán ser *reales* y para el caso de la interactividad en *contint.dat*, además deberán ser del tipo *equals* (el valor del argumento de la función deberá ser cero, y la constante a utilizar será la de la constante aditiva de la función, por lo que la constante multiplicadora deberá ser la unidad). Así, si las variables que se desea desplegar, o con las que se desea efectuar alguna acción de control ya se encuentran en el archivo de entrada utilizado, sólo deberán crearse los archivos *.dat*; de lo contrario, será necesario definir las funciones de control y la lógica adecuada para su utilización en el archivo de entrada de MELGEN, para su posterior utilización en el modo interactivo (o por lotes) de MELCOR.

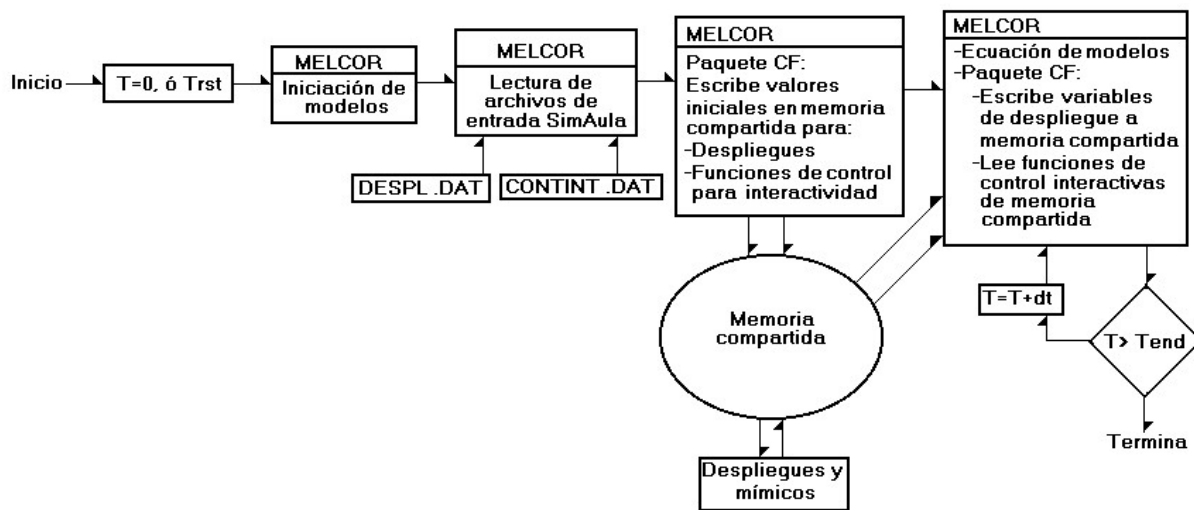


Figura 1. MELCOR interactivo

3.2. Despliegues y Mímicos Simplificados para Pruebas

En esta fase inicial del desarrollo se emplean mímicos y gráficas de tendencia (Figuras 2 y 3). En ellas se despliegan temperaturas, flujos y presiones típicas que permiten el análisis de los eventos simulados.

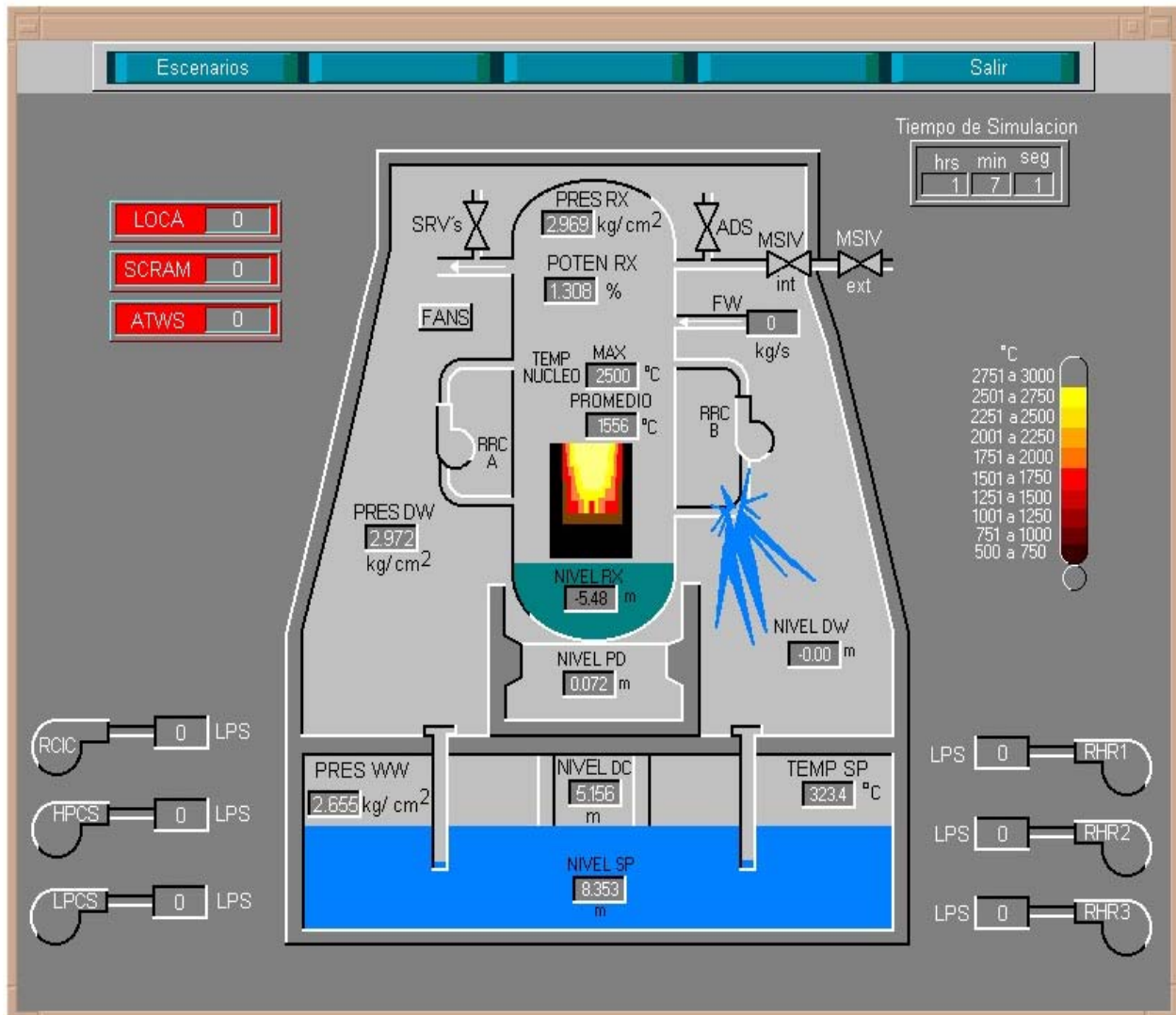


Figura 2. Despliegue de la contención primaria y reactor

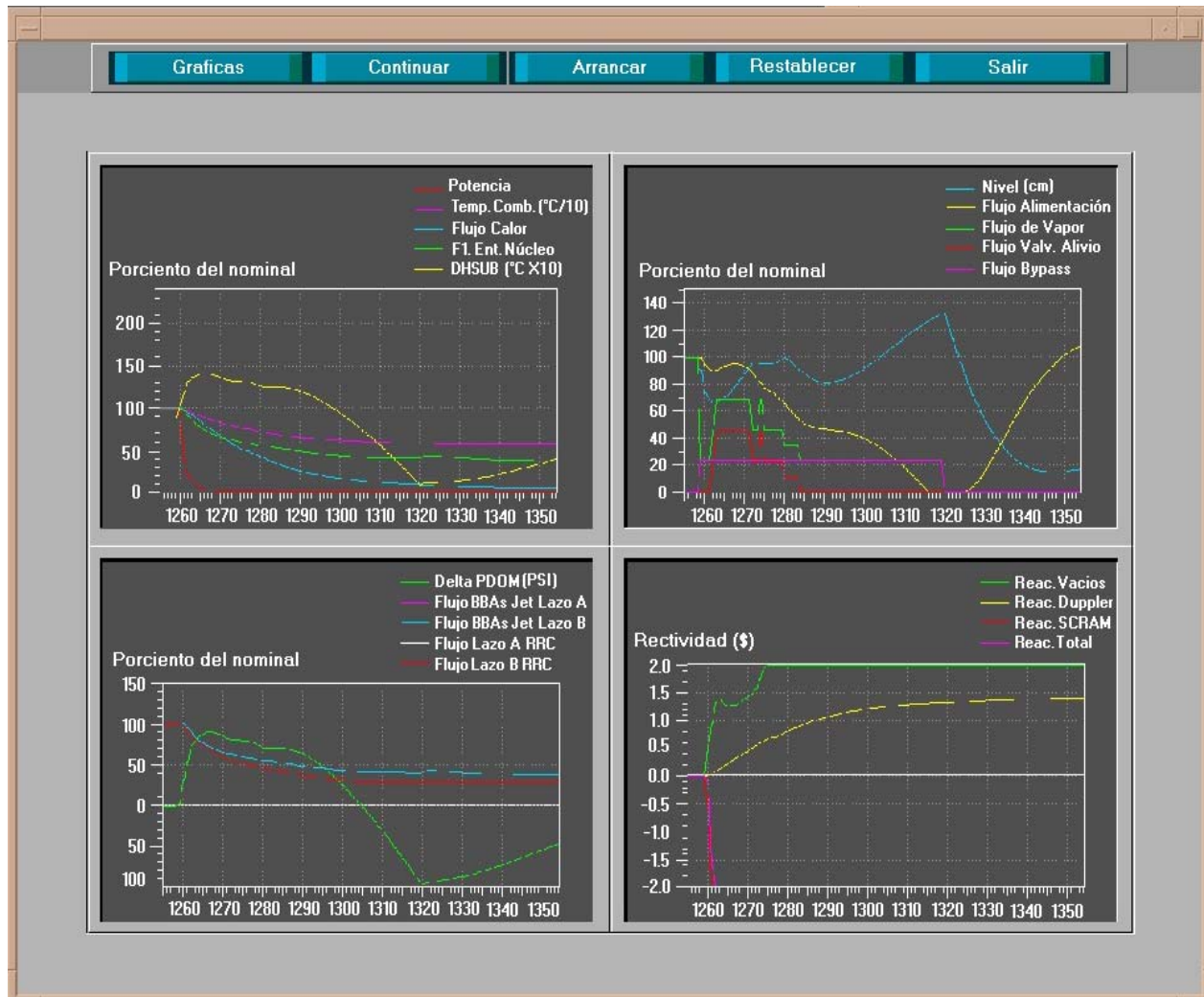


Figura 3. Gráficas de tendencia.

3.3. Pruebas de Conectividad

Se efectuaron pruebas de conectividad entre los despliegues gráficos simplificados indicados en la sección anterior y el Código MELCOR Interactivo, obteniéndose una comunicación sin problemas entre los módulos. Las funciones de control definidas para despliegues de salida y las deseadas para la ejecución de acciones desde los monitores sensibles al tacto funcionan continuamente durante la ejecución de MELCOR. La Figura 4 muestra un diagrama esquemático de la arquitectura general deseada para el módulo de accidentes severos.

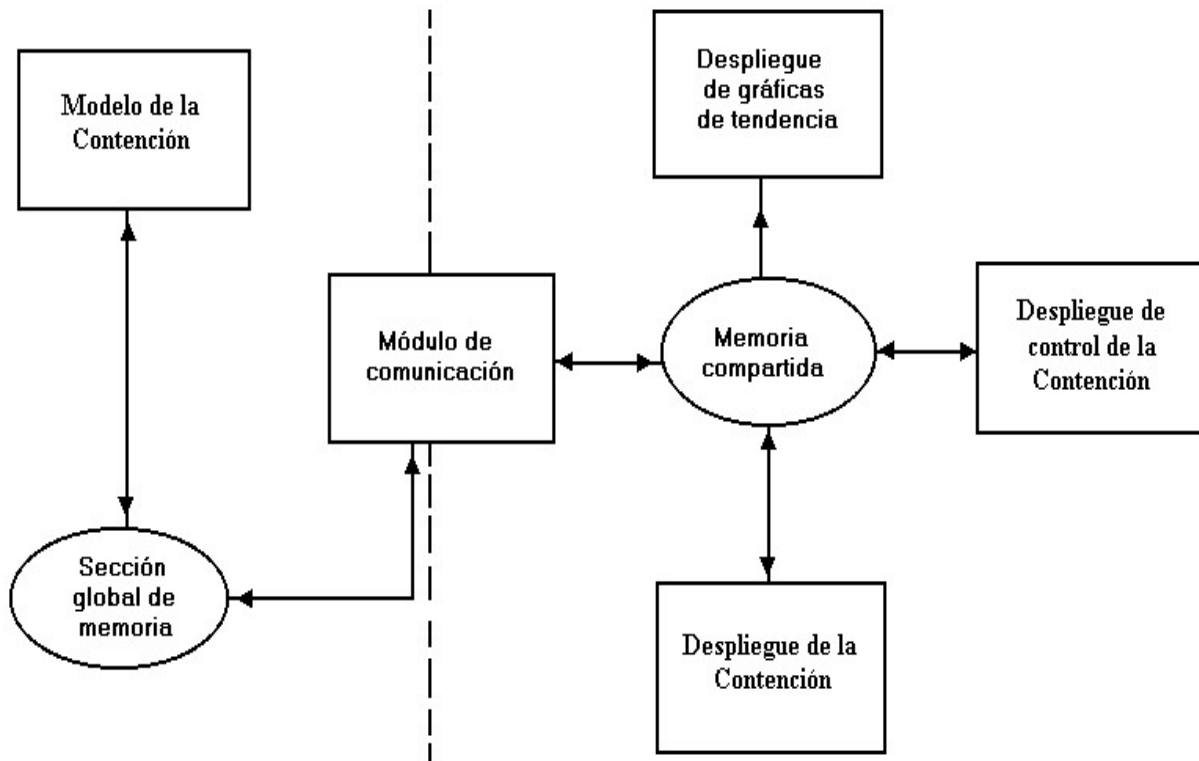


Figura 4. Arquitectura para el módulo de accidentes severos

Como se aprecia en la Figura 4, una vez probada la conectividad es posible desarrollar diversos despliegues para el modelo de la contención, los procesos de control y simulación que permitan cumplir con objetivos específicos de entrenamiento o análisis.

4. ÁREAS DE APLICACIÓN ESPECÍFICA PARA EL MAS

La utilización del Módulo de Accidentes Severos basado en MELCOR como herramienta de simulación y análisis, puede ser de gran utilidad en diversas áreas. Los temas de más actualidad para el ámbito nuclear mexicano podrían ser:

- Simular la evolución de las secuencias de accidente del APS Nivel 2 [5], en un modo interactivo.
- Evaluación de alternativas de mitigación para la preparación de procedimientos de accidente severo.
- Entrenamiento en secuencias dominantes del APS en todas las etapas del escenario, posibilitando con esto no solo la capacitación de los operadores del cuarto de control, sino también la del personal de respuesta a emergencias dentro y fuera de la planta (PEI y PERE).

4.1. Simular las Secuencias de Accidente del APS Nivel 2, en un Modo Interactivo.

Esta actividad puede ayudar a la comprensión de la secuencia de eventos con la utilización de un buen despliegue de la contención en 3 dimensiones animado y acoplado a las corridas de MELCOR con el fin de mostrar el comportamiento de la contención y las trayectorias de los productos de fisión, la relocalización del núcleo fundido, etc.

4.2. Preparación de Procedimientos de Accidentes Severos

Las Guías de Procedimientos de Emergencia y de Accidente Severo (EPGs/SAGs) del Grupo de Propietarios de BWRs proporcionan dirección genérica de tipo sintomático para la respuesta a emergencias y la mitigación de accidentes severos en reactores BWRs. Éstas fueron desarrolladas por el Grupo de Propietarios de BWRs en respuesta al Punto I.C.1 del NUREG-0737 “Lineamientos para Evaluación y Desarrollo de Procedimientos para Transitorios y Accidentes.

Las EPGs/SAGs se dividen en Guías de Procedimientos de Emergencia (EPGs) y Guías de Accidente Severo (SAGs). Las EPGs definen estrategias para respuesta a emergencias y accidentes que puedan degradarse hasta una emergencia hasta el punto donde se requiera la inundación de la contención primaria. Sin embargo, estas guías deben personalizarse para reflejar las características individuales de cada planta, para que las acciones propuestas ayuden con certeza a mitigar las consecuencias de los eventos en los que éstas se apliquen.

4.3. Entrenamiento en Secuencias Dominantes

Los escenarios de accidentes para ejercicios de emergencias de una planta nuclear requieren de un accidente presentado de manera real que incluye varios aspectos: el proceso de la planta, radiactividad, radiación, clima y población. La experiencia en la preparación de los ejercicios muestra que la preparación de los escenarios de accidente aún para ejercicios relativamente cortos es tedioso. Por lo tanto, se puede aprovechar el SimAula para generar los escenarios de emergencia y así incrementar la efectividad de la planeación de los ejercicios. El entrenamiento en secuencias dominantes del APS en todas las etapas del escenario posibilita no solo la capacitación de los operadores del cuarto de control, sino también la del personal de respuesta a emergencias dentro y fuera de la planta (PEI y PERE).

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado el desarrollo del Módulo de Accidentes Severos para el SimAula del Grupo de Ingeniería Nuclear de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El desarrollo se ha llevado en esta etapa inicial a la prueba de la correcta funcionalidad del Módulo basado en una versión interactiva de MELCOR 1.8.3 con interfaces gráficas simplificadas. Se presentan áreas específicas de aplicación para las que se están desarrollando las interfaces y estrategias de operación con base en el MAS de SimAula.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) por su apoyo técnico ó financiero que hicieron posible la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

1. C. Chávez-Mercado, "An Advanced Graphical Human-Machine Interface for a Classroom Analysis Simulator of Nuclear Processes." *Proceedings of the IERE Workshop on Human Factors in Nuclear Power Plants*. Operation Session (2) Interface. TEPCO R & D Centers, Tokio, Japan. May (1996).
2. C. Chávez-Mercado, "A Classroom Analysis Simulator for the Laguna Verde Nuclear Power Plant." *Proceedings of the ANS International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies*. The Pennsylvania State University, PA. May 6-9, **Vol. I**, pp 445-450 (1996).
3. NUREG/CR-6119. *MELCOR Computer Code Manuals, Volume 1: Primer and Users' Guides*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, September (1994).
4. NUREG/CR-6119. *MELCOR Computer Code Manuals, Volume 2: Reference Manuals*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, September (1994).
5. "Examen Individual de Planta Nivel 2 Central Laguna Verde-Unidad 1.", *Unidad de Resultados de Energía Nuclear*. Instituto de Investigaciones Eléctricas (1995).