

El uso de códigos *best estimate* y de entornos diseñados para mejorar su productividad en simulación en tiempo real

Norberto Rivero, Jose Antonio Esteban y Guillermo Lenhardt

Por códigos “best estimate”, o de estimación óptima, se entiende la tecnología de simulación diseñada para proporcionar una respuesta más aproximada a la realidad del comportamiento de la planta, según el estado actual del conocimiento y la tecnología. Los códigos “best estimate” han tenido, y tienen, un uso intensivo en la industria nuclear, en múltiples dominios de aplicación. Tecnatom, en el comienzo de la década de los noventa, incorporó este tipo de códigos a sus simuladores de entrenamiento, para así mejorar significativamente su fidelidad.

En la actualidad, Tecnatom ha adaptado a los requisitos de entrenamiento el código de licenciamiento del combustible: PANAC11, propiedad de Global Nuclear Fuel, y está trabajando en la adaptación del código termohidráulico TRACG04 propiedad de General Electric. Ambos proyectos transforman los simuladores de entrenamiento en auténticas plataformas de ingeniería, dotadas de una representación global de la planta en la cual validar y analizar anticipadamente cualquier modificación a la misma.

Para optimizar los procesos relacionados con el ciclo de vida de los modelos basados en estos códigos, se ha desarrollado un entorno visual gráfico. Su utilización permitirá, en gran medida, simplificar las tareas relacionadas con su desarrollo y mantenimiento.

Best estimate codes are assumed to be the technology solution providing the most realistic and accurate response. Best estimate technology provides a complementary solution to the conservative simulation technology usually applied to determine plant safety margins and perform security related studies.

Tecnatom in the early 90's, within the MAS project, pioneered the initiative to implement best estimate code in its training simulators. Result of this project was the implementation of the first six-equations thermal hydraulic code worldwide (TRAC_RT), running in a training environment. To meet real time and other specific training requirements, it was necessary to overcome important difficulties.

Tecnatom has just adapted the Global Nuclear Fuel Core design code: PANAC11, and is about to complete the General Electric TRACG04 thermal hydraulic code adaptation. This technology features a unique solution for nuclear plants aiming at providing the highest fidelity in simulation, enabling to consider the simulator as a multipurpose: engineering and training, simulation platform.

Besides, a visual environment designed to optimize the models life cycle, covering both pre and post-processing activities, is in its late development phase.

INTRODUCCIÓN

Los códigos termohidráulicos *best estimate* representan el estado del arte de la aplicación de la mecánica de fluidos de carácter bifásico a modelos de centrales nucleares, simulando los distintos fenómenos con la máxima precisión que permite el grado de conocimiento actual teórico y experimental.

Las aplicaciones de códigos *best estimate*, o de estimación óptima, han sido, y continúan siendo, muy variadas. En la actualidad, podemos afirmar que es una tecnología de uso común en la industria nuclear, su ingeniería, universidades y organismos reguladores.

Los dominios de aplicación más frecuentes son: análisis de recarga, apoyo a los procesos de licencia, verificación de las bases de diseño con hipótesis realistas y evaluación y análisis de modificaciones al diseño de las plantas. Ha sido también frecuente su aplicación en la revisión y mejora de la seguridad, en análisis probabilísticos de seguridad y en análisis de incidentes. Otras áreas habituales de aplicación son la validación de procedimientos de operación, y la capacitación en general.

Hay que destacar el papel que estos códigos están jugando en el licenciamiento de los nuevos diseños de reactores nucleares, por ejemplo el código TRACG04

en el reactor ESBWR (*Economic Simplified Boiling Water Reactor*).

Es en el aspecto de entrenamiento en donde se centrará este artículo, dada la importancia que estos códigos tienen en los simuladores de entrenamiento en tiempo real y la experiencia acumulada en estos últimos años.

CÓDIGOS “BEST ESTIMATE” EN SIMULADORES DE ENTRENAMIENTO

Tecnatom al principio de la década de los 90 finalizó el proyecto MAS: Modelos Avanzados de Simulación, cuyo objetivo básico era sustituir los modelos más complejos de sus simuladores, corres-

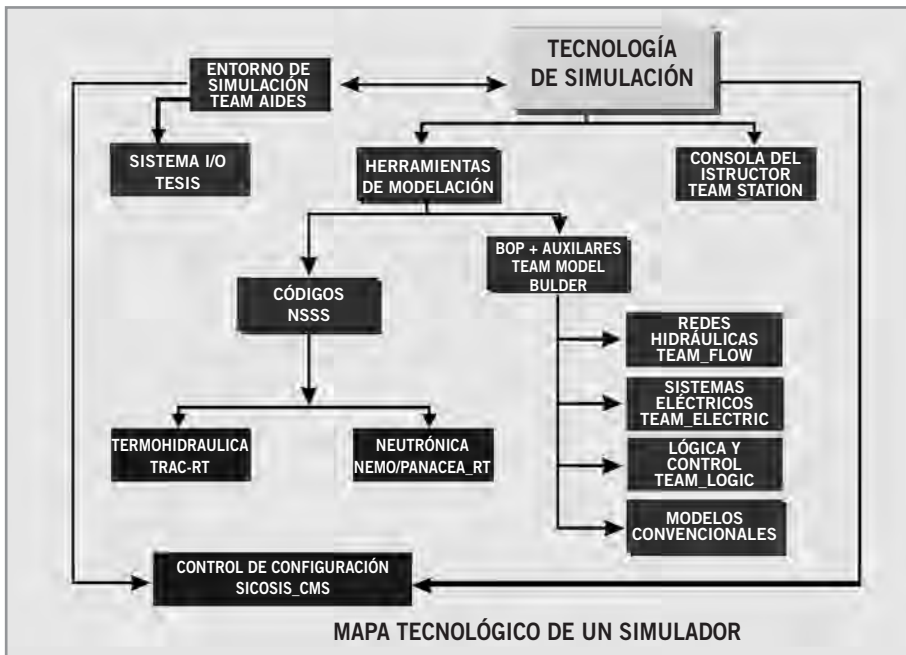


Figura 1. Entorno de tecnología de simulación en tiempo real de Tecnatom.

pondientes a la isla nuclear, por modelos basados en principios físicos de la más alta fidelidad.

Para ello se decidió adaptar el código termohidráulico de General Electric: TRACG a los requisitos de simulación para entrenamiento. Entre estos requisitos, destacar la exigencia de tiempo real, de interactividad, de respuesta en todos los rangos de operación normal, transitorios y en emergencias, de capacidades de control en la ejecución del código como: activar, desactivar, retroceder, repetir, inicializar, etc.

La naturaleza y magnitud de este proyecto, hizo requerir en ese momento, adicionalmente a un intensivo esfuerzo de aceleración del código, de un superordenador CRAY-XP con el objetivo de dar respuesta a una ejecución de los modelos en tiempo real.

Este proyecto, único en su época, permitió demostrar la viabilidad de la aplicación de esta tecnología en simuladores de entrenamiento. En años posteriores, se han ido incorporado versiones en tiempo real de otros códigos como, por ejemplo, Cathare, Relap5, Retran, Thor.

La tendencia de la normativa a exigir gradualmente mayores cotas de fidelidad en los simuladores de entrenamiento ha incentivado esta opción tecnológica.

Los simuladores concebidos inicialmente como herramientas sofisticadas de entrenamiento integradas en planes de capacitación, se transforman, con la incorporación de estos códigos, en auténticas plataformas de ingeniería, dotadas de una representación global de la planta en la cual validar y analizar anticipadamente cualquier modificación a la misma.

PROYECTOS DE ACTUALIZACIÓN TECNOLÓGICA EN TECNATOM

Para poder competir con éxito en el mercado internacional de venta de simuladores, cada suministrador debe disponer de un entorno de tecnología de simulación completo y actualizado.

En su estrategia de permanente actualización, Tecnatom establece planes tecnológicos de simulación. En el correspondiente al año 2006, se identificaron como objetivos de mejora la incorporación de nuevos códigos *best estimate* y la actualización de los existentes.

Para ello, se han establecido acuerdos con General Electric y Global Nuclear Fuel de acceso a sus códigos TRACG04 y PANACEA11 respectivamente. Códigos que, una vez adaptados, se identifican comercialmente como: TRACG04_RT y PANACEA_RT.

En paralelo, conscientes de la debilidad que arrastra esta tecnología desde sus orígenes, fundamentada en una interfaz de usuario antigua y de baja productividad, se ha planteado el desarrollo de un entorno visual de carácter gráfico. De esta manera se pretende no solo incorporar la tecnología de simulación más precisa a los simuladores en la actualidad, sino optimizar el coste que conlleva el desarrollo y la explotación de sus modelos.

LOS CÓDIGOS "BEST ESTIMATE": TRACG04 Y PANACEA11. SU ADAPTACIÓN A REQUISITOS DE ENTRENAMIENTO

Utilizar un código de ingeniería en un simulador de entrenamiento exige el cumplimiento de unos atributos de: interactividad, ejecución en tiempo real,

integración en un entorno de simulación, funcionamiento en todo el rango de operación normal, en transitorios y en situaciones de emergencia.

Para incorporar estos atributos ha sido necesario llevar a cabo una adaptación de los códigos, en la que se ha establecido como criterio básico el preservar la tecnología, es decir no alterar las ecuaciones que soportan los principios físicos del código ni su esquema temporal de resolución numérica. La validación intensiva de los resultados obtenidos, a través de su aplicación a diversos casos de prueba, garantiza la cualificación de los códigos.

Adaptación del código termohidráulico TRACG04

TRACG04 es la última versión de la serie TRACG de códigos termohidráulicos *best estimate*, desarrollada y mantenida por General Electric (GE) para su tecnología BWR.

La adaptación del código se ha organizado en base a tres fases diferenciadas:

1. Integración del código termohidráulico TRACG04 en la plataforma AIDES de simulación en tiempo real

El objetivo básico de esta etapa consiste en proporcionar al código las capacidades que tienen los entornos de ejecución típicos de los simuladores de entrenamiento. Esta capacidad podría subdividirse en tres aspectos: interactividad en la ejecución, manejo de ficheros de inicialización y visualización de resultados.

El primer aspecto hace referencia a la posibilidad de poder avanzar y detener su ejecución en cualquier momento, mediante un entorno visual interactivo.

El manejo de ficheros de inicialización se corresponde con la capacidad de los entornos de entrenamiento de gestionar un conjunto de condiciones iniciales, tan completo como se quiera, cada una de las cuales puede ser utilizada en cualquier momento como fichero de *input* de datos para el código. Además existe la opción *backtrack*, consistente en la posibilidad de retroceder en la ejecución del código hasta instantes anteriores, con el fin de poder recuperar cualquier situación previa de interés, repetir transitorios, etc.

Por último, el análisis de resultados *on-line* se lleva a cabo mediante la capacidad de visualización de variables de la herramienta. Ésta permite tanto la visualización numérica como de gráficas de tendencia, en tiempo de ejecución, de cualquier tipo de variable termohidráulica, de control o bloque *TRIP*, mediante el acceso directo a los datos en memoria, lo que hace que la velocidad del proceso no se vea penalizada.

Dado que esta primera etapa no supone ninguna modificación en la física del código, el resultado sería el código de

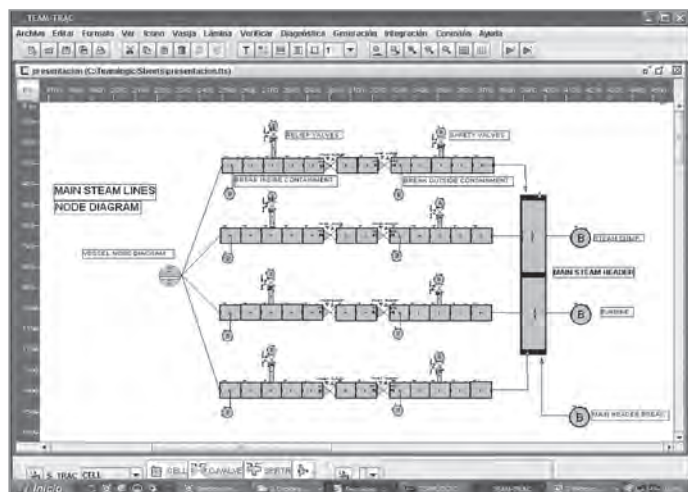


Figura 2. Ejemplo de interfaz gráfica del entorno visual *team_codes* (fase de pre-proceso).

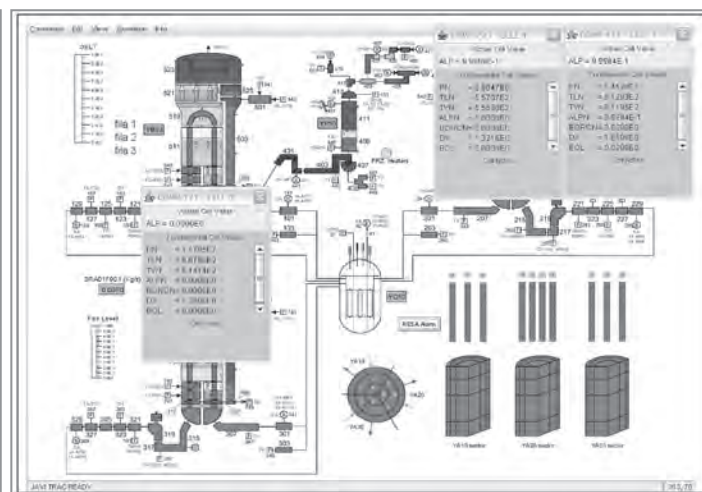


Figura 3. Ejemplo de interfaz gráfica del entorno *team_codes*. Módulo *Javi* (fase de post-proceso).

partida, con la misma cualificación *best estimate*, embebido en un entorno de simulación gráfico, potente y flexible, que supone un salto cualitativo en la tradicional manera de trabajar con estos códigos.

2. Adaptación a un simulador real.

El código, ya integrado en un entorno de simulación, se aplicará en esta fase a un simulador real.

La adaptación a un simulador real permite superar la limitación de los modelos utilizados típicamente en ingeniería. Estos adolecen de unas condiciones de contorno precisas que permitan asegurar un funcionamiento correcto en cualquier condición operativa, sin tener que hacer una gran labor de adaptación de los ficheros de *input*.

De esta manera se obtendrá un modelo real basado en el código de ingeniería TRACG04, integrado en un entorno de simulación, con la fiabilidad de los modelos frontera de un simulador de entrenamiento, de forma que la ejecución de cualquier transitorio en cualquier rango de operación de la planta, sea un proceso sencillo fiable y eficaz.

En esta fase se llevará a cabo una exhaustiva validación del código en el entorno de simulador, lo que servirá como patrón de referencia para la fase final de aceleración del código.

3. Aceleración del código a tiempo real

La última fase consiste en la aceleración del código de ingeniería para obtener una versión válida para entrenamiento en tiempo real. Se pretende conseguir este objetivo con el mínimo impacto en los aspectos físico-numéricos respecto del código original. Preservar la fidelidad de la versión en tiempo real del código es el objetivo prioritario.

Las hipótesis de partida y criterios de diseño globales del proyecto han sido:

- Versión del código de partida: TRACG04P (versión Windows) suministrada por GE.

- Se respetarán las capacidades del código original: esto aplica a la funcionalidad de usuario (opciones *restart*, *extract*, *graficación*, etc.).

- Los cambios realizados en cada fase serán los mínimos necesarios para llevar a cabo dicha fase, siempre con la premisa de preservar la fidelidad del código en cuanto a ecuaciones físicas, correlaciones y numéricas.

Adaptación del código neutrónico PANAC11

Antes de comenzar el proyecto de incorporación de PANAC11 se anticipaba una potencial dificultad en su ejecución dinámica en tiempo real, en especial durante transitorios de disparo del reactor (transitorio más severo desde el punto de vista neutrónico). Estas limitaciones se deben, como es regla general en otros códigos, a que el código resuelve las ecuaciones de flujo neutrónico usando un método iterativo que, eventualmente, puede requerir muchas iteraciones para converger y a que, durante el proceso de convergencia, el código puede reducir su paso de tiempo de integración.

A la luz de estas limitaciones se diseñó una actividad específica de aceleración del código, que ha contemplado los siguientes aspectos: análisis de las opciones de compilación, influencia del paso de tiempo máximo de TRACG04 al cual está acoplado íntimamente PANAC11, análisis de la influencia de la estructura del código, recuperación del paso de tiempo y optimización del criterio de convergencia. Todo lo anterior obedece a una estrategia sistemática de optimización del tiempo de ordenador requerido por el código en su ejecución.

En la actualidad PANACEA_RT, versión de simulación de entrenamiento de PANAC11, está ya disponible, respondiendo positivamente a todos los requisitos previamente exigidos. Este código que se

está aplicando en el proyecto de modernización del simulador de C.N. Garoña, proporcionará no solamente la misma fidelidad que su código nativo (PANAC11), sino que permitirá, exclusivamente a través de la lectura de los ficheros de *wrap up* (secciones eficaces, condiciones iniciales, etc) de cada ciclo de combustible, la actualización automática del modelo del simulador a las características específicas del mencionado ciclo.

UN ENTORNO VISUAL PARA EL CICLO DE VIDA DE LOS MODELOS BASADOS EN CÓDIGOS *BEST ESTIMATE*

Las limitaciones de las actuales interfaces de usuario de los códigos *best estimate* aconsejaron a Tecnatom el desarrollo de un entorno visual propio, que tuviera por objetivo la simplificación de las actividades relacionadas con el desarrollo y la explotación de un modelo. Por lo que, a pesar de la existencia de otras iniciativas internacionales de mejora de la Interfaz de usuario de los códigos *best estimate* (p.ej., herramienta SNAP de la USNRC), se decidió el desarrollo de un entorno visual basado en criterios y requisitos propios y diseñado para optimizar la productividad.

El entorno visual contempla un primer módulo, denominado de pre-proceso (JADE: *Java Designer*), orientado al diseño gráfico de los modelos y la generación automática del fichero de entrada de datos del código.

El módulo JADE se basa en la selección, inserción y conexión de los diferentes componentes que integran el modelo, introducción de valores en las tablas de datos y conexión automática con el entorno de simulación para una integración en el mismo, depuración, visualización de parámetros, análisis, etc. Las operaciones anteriores se realizan en un entorno completamente gráfico que minimiza la introducción de errores al eliminar la parte de editor de texto y es apto tanto

para ingenieros no expertos, como para aquellos experimentados que desean entornos y herramientas más intuitivas.

Las principales características de JADE son:

- Elimina trabajo de editor.
- Completamente visual.
- Permite el desarrollo de modelos a escala.
- Basado en JAVA.
- Completo juego de criterios de verificación que permiten la depuración de errores en tiempo de diseño.
- Incluye el diseño gráfico de la interfaz con otros modelos de la simulación.
- Conexión *on-line* con el entorno de simulación.
- Generación de modelos a partir de la lectura de ficheros de datos existentes.

Un segundo módulo identificado como JAVI (Java Visualizador), permite una supervisión dinámica de los resultados del modelo, para su depuración y ajuste. Esto se lleva a cabo mediante una representación del modelo, en la que cada celda de cálculo puede ser visualizada de forma dinámica con todos sus parámetros calculados, previa selección de un rango de colores. Asimismo, el usuario puede añadir interactivamente información de carácter dinámica (alarmas, indicadores,...) para así adaptar cada pantalla a sus necesidades del trabajo. La primera instalación del módulo JAVI ha sido en el simulador de la central nuclear alemana de Grafenrheinfeld (centro de entrenamiento de KSG).

El entorno visual acoplado a modelos basados en estos códigos, proporciona una herramienta flexible y potente de uso en diferentes perfiles de trabajo: ingeniería de diseño, ingeniería de modelación, formación en conceptos termohidráulicos, apoyo *on-line* a sesiones de entrenamiento en simulador, etc.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La experiencia de Tecnatom en estos últimos quince años de aplicación de códigos *best estimate* en simuladores de entrenamiento, ha sido muy positiva. En la actualidad, la tendencia mundial en estos simuladores, basada en alcanzar la mayor fidelidad mediante estos códigos, ha confirmado nuestra iniciativa de incorporar esta tecnología.

Tecnatom decidió acometer en el año 2006, a fin de mejorar su entorno de simulación, un proyecto de adaptación de los códigos termohidráulico TRACG04 y neutrónico PANAC11. Este último, ya adaptado a los requisitos de simulación en tiempo real, se está aplicando al proyecto de modernización del simulador de C.N. Garoña.

Una debilidad tradicional en estos códigos ha sido disponer de una interfaz de usuario primitiva e ineficaz, que penalizaba el desarrollo, ajuste, validación y mantenimiento de los modelos. Para resolver esta dificultad, se ha desarrollado un amplio entorno visual (TEAM_Codes), diseñado para optimizar estas tareas.

En la actualidad, los simuladores de entrenamiento, diseñados inicialmente de forma exclusiva para la cualificación del personal de operación, se han convertido en plataformas de simulación aptas para su utilización en necesidades diversas de la ingeniería. La incorporación de códigos *best estimate* y de modelos de simulación rigurosos en el resto de sistemas de la planta, así como la experiencia, ya demostrada en proyectos nacionales e internacionales, consolida este planteamiento.



Norberto Rivero. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (Hidráulica y Energética, Politécnica de Madrid) y PDD (IESE), ha trabajado en Tecnatom desde el año 1983 en diferentes puestos y responsabilidades. Entre éstas, como responsable del área de negocio de simulación durante 18 años. En la actualidad coordina las actuaciones tecnológicas de esta área y promociona nuevos desarrollos en el mercado exterior.



Jose Antonio Esteban. Ingeniero Industrial (Politécnica de Madrid), Técnico de Códigos y miembro del grupo de Explotación de Simuladores desde el año 1995. Ha trabajado principalmente con códigos termohidráulicos, tanto en tecnología PWR como BWR y ABWR. Actualmente es el responsable técnico del proyecto de adaptación y aceleración de TRACG04.



Guillermo Lenhardt. Ingeniero Industrial (Técnicas Energéticas, Politécnica de Cataluña), ha trabajado en Tecnatom desde el año 1987 en el área de simulación y códigos (TRAC, RELAP, MAAP), preferentemente en temas relacionados con neutrónica (NEMO, PANACEA). Actualmente, trabaja en la actualización del simulador de C.N. Garoña y en la adaptación a tiempo real de TRACG04/PANAC11.

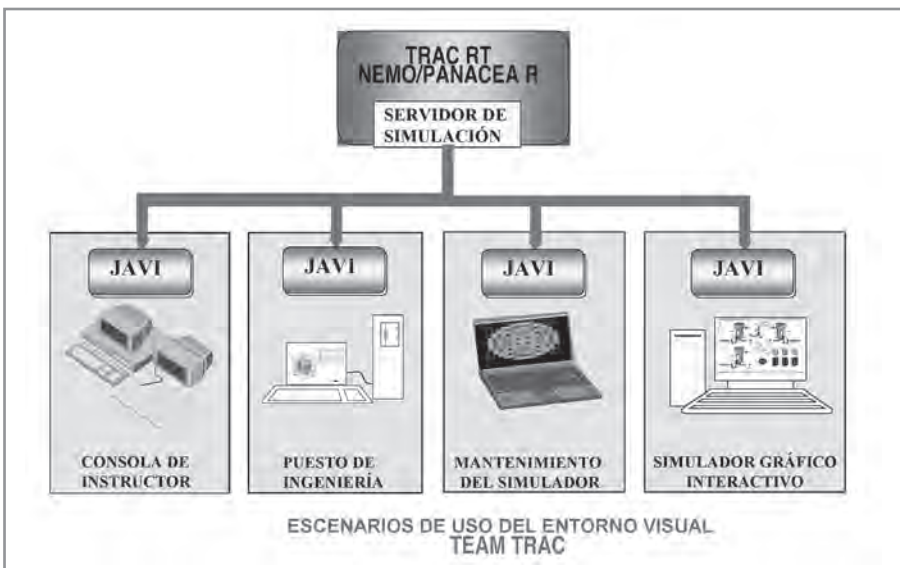


Figura 3. Ejemplo de interfaz gráfica del entorno team_codes. Módulo Javi (fase de post-proceso).