

# **USO DE SIMULADORES DE ALCANCE TOTAL DE CENTRALES NUCLEARES PARA LA ENSEÑANZA DE FÍSICA DE REACTORES**

**Murúa, C.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> CUTeN, CNEA-UNC, Argentina

## **RESUMEN**

Los Simuladores de Alcance Total (FSS : Full Scope Simulators) de Centrales Nucleares se han utilizado desde hace décadas, y se siguen utilizando en forma intensiva, para el entrenamiento del personal de operación de dichas instalaciones.

Desde el año 2015, en cursos dictados por el CUTeN para personal de las centrales nucleares de la Argentina, se han utilizado los FSS de la Central Nuclear Embalse y la Central Nuclear Atucha II para la enseñanza de la Física de Reactores Nucleares a miembros del staff de dichas centrales nucleares.

En el presente trabajo se describen en primera instancia las tareas previas a las prácticas llevadas a cabo en conjunto por los trabajadores de los simuladores y los docentes del CUTeN.

Se detallan los objetivos de la utilización del FSS para la enseñanza de la Física de Reactores, y la lista de prácticos realizados en cada instalación en función de alcanzar esos objetivos. Se muestra además el material didáctico preparado ad-hoc para cada una de las prácticas, y los resultados físicos obtenidos en cada una de ellas.

Se realiza también un análisis relativo a los resultados educativos obtenidos de estas prácticas para, finalmente, proponer mejoras a la utilización de esta metodología, con el fin de incrementar su utilidad pedagógica.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Desde el año 2011, el CUTeN dicta diversos cursos de formación para personal de las centrales nucleares Embalse, Atucha I y Atucha II.

En varios de esos cursos una de las materias desarrolladas es “Física de Reactores Nucleares”. En dicha materia se describe el funcionamiento y operación de los reactores nucleares, resaltando que el funcionamiento de un reactor puede pensarse como “un permanente balance de reactividades”, y analizando por tanto el efecto de los diversos mecanismos de control (barras, venenos, nivel de moderador, etc.) y de realimentación (temperatura, vacío, Xe-135, Sm-149 y quemado de combustible) sobre dicha variable (la reactividad del núcleo).

Como parte del mismo curso, los alumnos realizan prácticas de Física de Reactores en el Reactor Nuclear RA-0, en el caso de la CNE en forma presencial y los casos de la CNA en forma remota vía Internet. En estas prácticas se opera el reactor RA-0 monitoreando y midiendo el aporte de reactividad de los mecanismos de control (posición de barras de control y nivel de moderador) y el efecto de la variación de temperatura del moderador sobre la reactividad, calentando para ello el moderador (agua liviana) del R.N.RA-0 mediante la utilización de resistencias calefactoras y observando el comportamiento del flujo neutrónico a medida que aumenta la temperatura del moderador.

---

<sup>1</sup> E-mail del primer autor: [murua@cnea.gov.ar](mailto:murua@cnea.gov.ar) – [carlos.murua@unc.edu.ar](mailto:carlos.murua@unc.edu.ar)

Sin embargo, en ese tipo de reactores (facilidades críticas con una potencia de 1 W), es imposible medir la influencia sobre la reactividad de otro tipo de realimentaciones como Xe-135 o la aparición de vacío (burbujas) en el refrigerante.

Ante esta limitación, y el hecho de que ambas locaciones (Embalse y Atucha) cuentan con Simuladores de Alcance Total (Full Scope Simulator), es que se pensó en utilizar dichos simuladores para la enseñanza de la Física de Reactores, en particular, para la “visualización” de aquellos mecanismos de realimentación que no se manifiestan en un reactor de menor potencia.

## **2. OBJETIVOS**

Se persiguieron dos objetivos al trabajar con los Simuladores de Alcance Total para enseñar Física de Reactores :

- Poder cuantificar el aporte a la reactividad del núcleo de algunos mecanismos de realimentación no observables en reactores nucleares de poca potencia (Xe-135 o Vacío en el refrigerante por ejemplo)
- Poder correlacionar las variables físicas definidas durante el dictado de la materia (reactividad, período asintótico por ej.) con variables o parámetros operativos observables en la Consola de Operación de cada instalación.

## **3. EL TRABAJO PREVIO**

Teniendo en cuenta que los FSS son diseñados y utilizados primariamente con el objetivo de entrenar operadores para cada instalación, hubo de realizarse un intenso trabajo previo a la realización de los prácticos, entre el docente de la materia y el personal de cada simulador, con el fin de :

- Familiarizar al docente con las características y las potencialidades de cada simulador.
- Transmitir al personal de cada simulador las necesidades pedagógicas del docente.
- Determinar las variables posibles de visualizar y analizar en el FSS.
- Analizar las maniobras operativas necesarias (y su factibilidad de realización) para la visualización de las variables definidas con anterioridad.
- Definir los prácticos a realizar.
- Realizar los prácticos y registrar las variables de interés con el fin de afinar los detalles necesarios.
- Elaborar una Guía de Trabajos Prácticos para entregar a los alumnos.

### **3.1. Los Simuladores**

El FSS de la Central Nuclear Embalse (CNE) fue desarrollado por la empresa canadiense L-3 MAPPS, y se encuentra en servicio en la locación de la Central desde el año 2013.

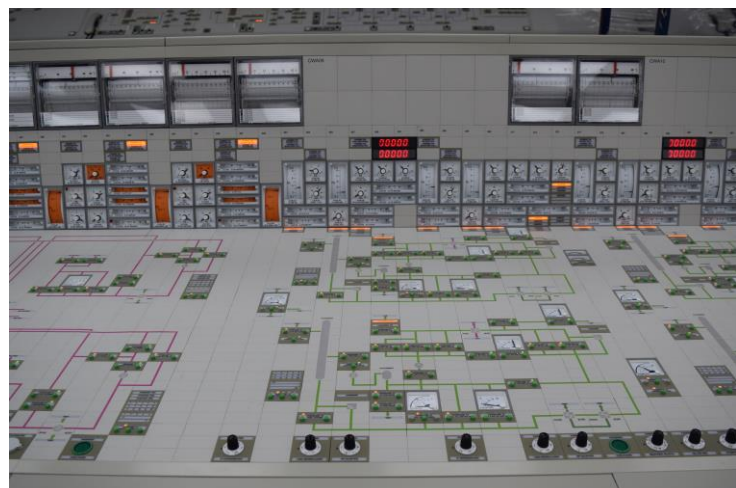


**Fig. 1 - SIMULADOR DE ALCANCE TOTAL DE LA CENTRAL NUCLEAR EMBALSE**

El FSS de la Central Nuclear Atucha II (CNA II) en tanto, fue desarrollado por la empresa española Tecnatom, y se encuentra en servicio en España desde el año 2013, habiéndose trasladado posteriormente al sitio de la Central.



**Fig. 2 - SIMULADOR DE ALCANCE TOTAL DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA II**



**Fig. 3 - SIMULADOR DE ALCANCE TOTAL DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA II**

### **3.2. Los Prácticos**

En el caso de la CNE se decidió realizar tres prácticos, todos ellos destinados a observar la reactividad aportada por el Xe-135 a posteriori de un cambio de potencia :

- Reducción de potencia del 100 % PP a 90 % PP
- Reducción de potencia del 100 % PP a 80 % PP
- Incremento de potencia del 80 % PP a 100 % PP

El objetivo al realizar dos prácticos similares pero con distintos valores de potencia final era el de poder observar la dependencia con el escalón de potencia de la duración del transitorio y del valor máximo del pico de reactividad negativa aportada por el Xe-135.

En el simulador de Atucha, en tanto, se realizaron los siguientes prácticos :

- Reducción de potencia del 100 % PP a 60 % PP
- Variación de la temperatura del moderador
- Disminución de la presión del Sistema Primario de Transporte de Calor

En el primero de los casos, para evaluar el aporte de reactividad debido al Xe-135 ante un cambio de potencia.

En el segundo de los prácticos, a través del sistema de control de temperatura del moderador se varió este parámetro y se analizó el aporte de reactividad, monitoreándose los cambios en la posición de las barras de control al variar la temperatura del moderador.

En el último de los prácticos mencionados, el objetivo era poder apreciar el signo positivo del coeficiente de reactividad por vacío, en este tipo de centrales. Para simular el vacío se utilizó una de las funcionalidades de este FSS : la posibilidad de generar una falla total o parcial en un componente. Para este caso la falla generada consistió en el cierre defectuoso de la válvula de alivio de presión del presurizador del SPTC del reactor. En concreto se generó una falla parcial de dicha válvula (cierre al 50 % en vez de total).

### **3.3. Simulaciones Previas**

Una vez elegidos los prácticos a desarrollarse, se procedió a correr simulaciones de cada uno de ellos con el fin de verificar que las variables que se había elegido monitorear en cada práctico eran las necesarias y suficientes para permitir analizar el balance de reactividades en cada transitorio.

Además de ello se establecieron los tiempos óptimos de cada simulación, y se trabajó con los archivos de datos generados para familiarizarse con su formato.

### **3.4. Las Guías de Trabajos Prácticos**

Una vez concluidas todas las tareas previas, se generó una “Guía de Trabajos Prácticos” por cada instalación, con información sobre cada reactor (relevante para los prácticos), los

prácticos que se llevarían a cabo, las variables que debían monitorearse y el contenido del informe que debía presentar cada estudiante.



**Fig. 4 – LAS GUÍAS DE TRABAJOS PRÁCTICOS**

#### **4. LA REALIZACIÓN DE LOS PRÁCTICOS**

Una vez en el simulador, las prácticas fueron coordinadas y guiadas por el personal de cada simulador de acuerdo a lo organizado previamente con el docente de Física de Reactores.

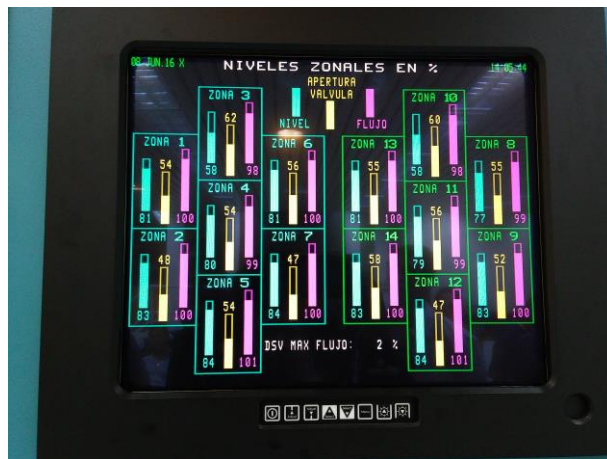
La primera etapa consistió en una descripción de los mecanismos de control a ser utilizados para cada medición, como así también de los indicadores donde debían monitorearse cada una de las variables, teniendo en cuenta que si bien los estudiantes formaban parte del plantel de la Central, prácticamente ninguno de ellos pertenecía al sector Operación, y por ende desconocían la consola de comando a partir de la cual se debía trabajar.

Posteriormente se llevaron a cabo cada una de las mediciones, constatando los estudiantes que el comportamiento del “Reactor” era coherente con lo que había sido discutido en los contenidos teóricos.

Una vez realizados los prácticos preparados, se procedió a realizar algunas prácticas adicionales, demostrativas de la versatilidad e importancia del simulador como herramienta. Una de las situaciones simuladas por ejemplo fue la ocurrencia de un “blackout” en la instalación.



**Fig. 5 – ESTUDIANTES DE LA CNE REALIZANDO PRÁCTICOS EN EL SIMULADOR**



**Fig. 6 – NIVEL DE LAS UCZL DURANTE UN CAMBIO DE POTENCIA**



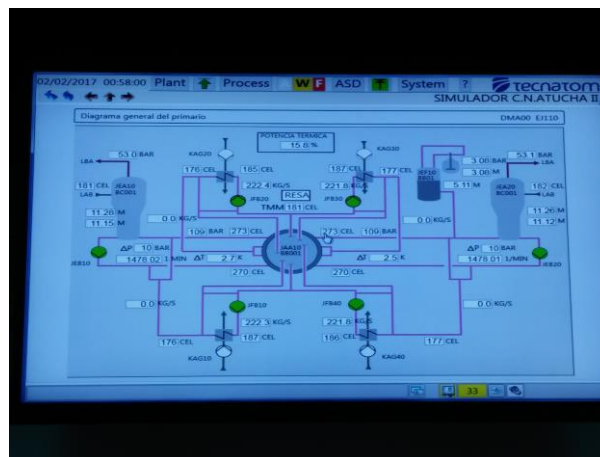
**Fig. 7 – POSICIÓN DE LAS BARRAS DE SEGURIDAD**



**Fig. 8 – ESTUDIANTES DE LA CNA REALIZANDO PRÁCTICOS EN EL SIMULADOR**

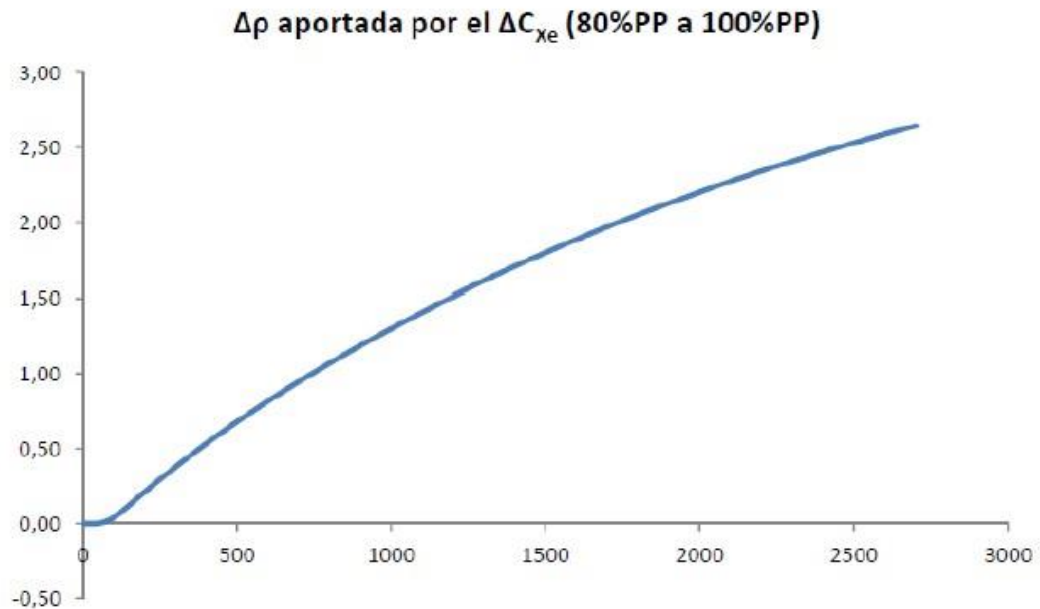


**Fig. 9 – MONITOREO DE LA TEMPERATURA DEL MODERADOR**

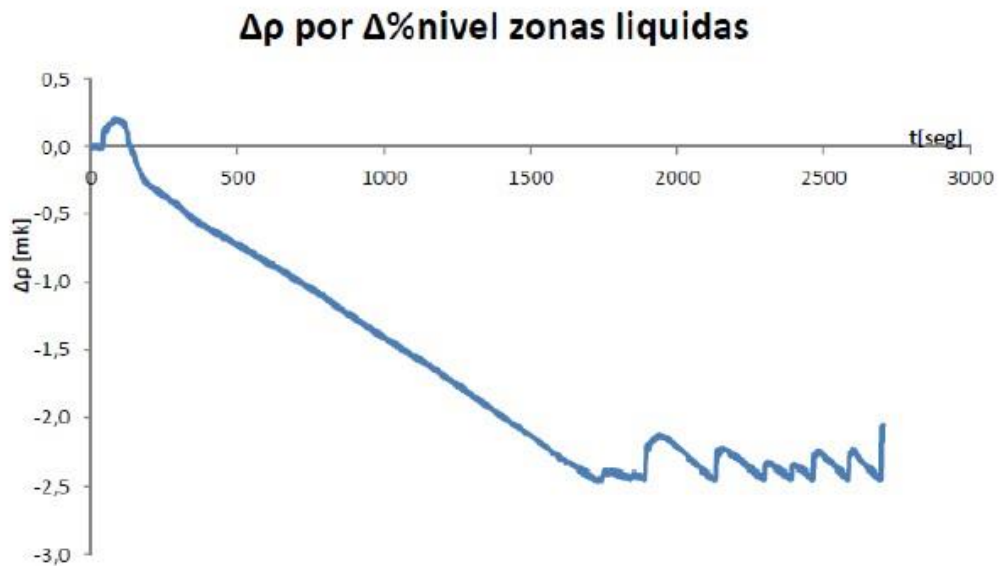


**Fig. 10 – PRÁCTICO DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL MODERADOR**

Con posterioridad a la realización de los prácticos en el simulador los estudiantes debieron elaborar informes analizando, para cada maniobra operativa realizada, la contribución sobre la reactividad del núcleo de todos los mecanismos de control y de realimentación intervinientes.



Variación de reactividad aportada por el Xe debido a la suba de potencia de 80%PP a 100%PP ( $\Delta \rho = \rho_{80\%} - \rho_{100\%}$ )



Variación de reactividad aportada por el nivel de zonas liquidas debido a la suba de potencia de 80%PP a 100%PP ( $\Delta \rho = \rho_{10\%} - \rho_{100\%}$ )

**Fig. 11 – PRÁCTICO INCREMENTO DE POTENCIA (CNE)**



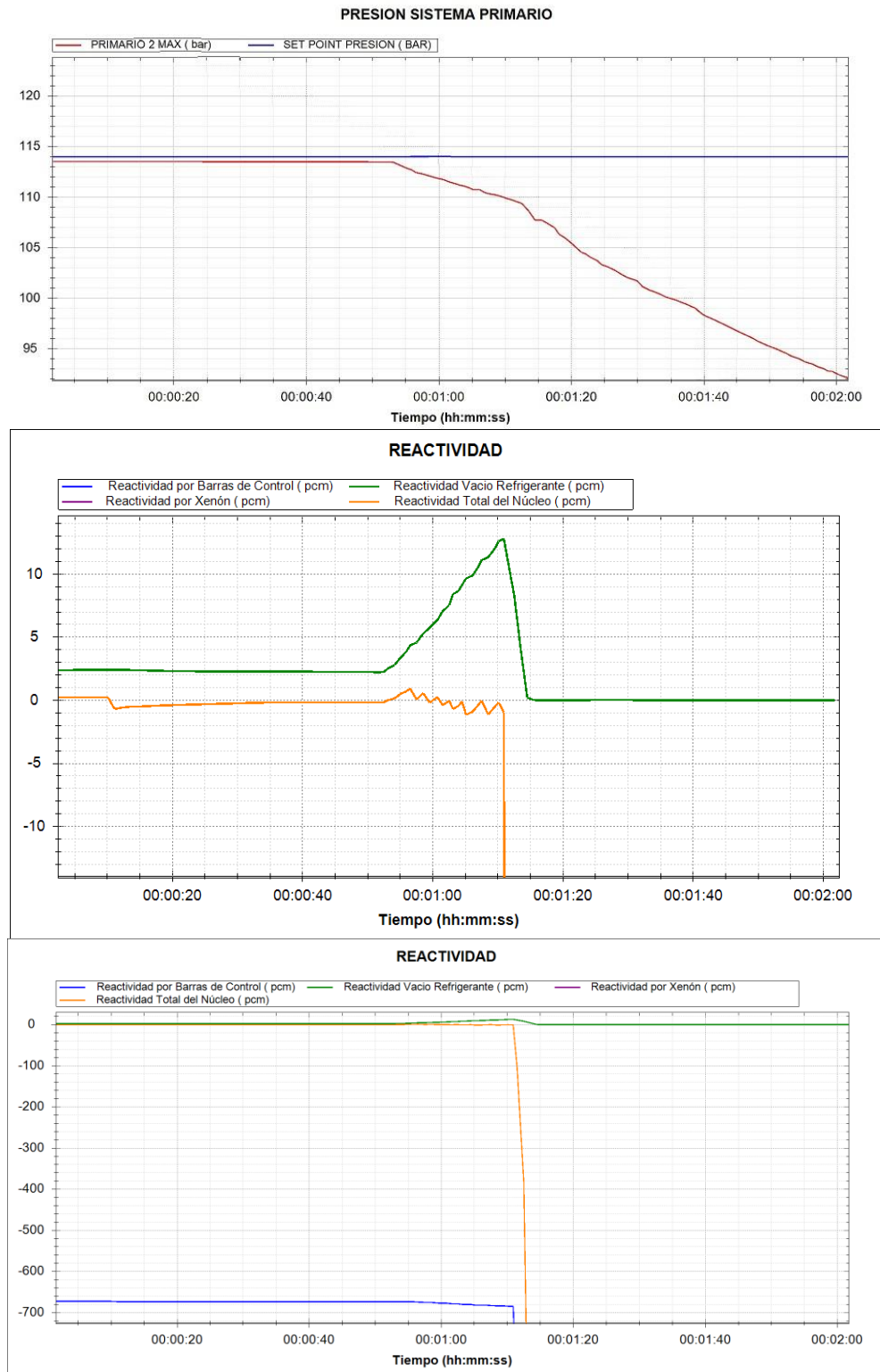


Fig. 12 – INFORME PRÁCTICO DE REACTIVIDAD POR VACÍO (CNA)

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La utilización de los simuladores de alcance total expuesta anteriormente constituye una poderosa herramienta didáctica para la enseñanza de la Física de Reactores dado que :

- La posibilidad de poder acceder a la “Sala de Control” de la instalación para poder “manejar el Reactor” funciona como una eficaz atracción para el estudiante, predisponiéndolo a aprender de una forma distinta y más amena que en el aula tradicional.
- Se pueden relacionar los parámetros físicos estudiados durante la formación teórica con los parámetros de campo monitoreados en la Sala de Control de una central nuclear.
- Permite analizar la reactividad aportada por algunos de los mecanismos de realimentación, y la actuación consiguiente de los sistemas de control, de forma de poder observar que “el funcionamiento de un reactor es un permanente balance de reactividades”
- Permite observar claramente que la evolución de variables físicas por encima de ciertos límites produce la actuación de los sistemas de parada, relacionando de tal forma la Física de Reactores con la Seguridad Nuclear.
- Didácticamente, es una manera sumamente eficaz de fijar los conceptos más importantes de la Física de Reactores desarrollados durante la formación teórica.

Por todo lo expuesto, se recomienda la utilización de los Simuladores de Alcance Total no sólo para entrenamiento del personal de operación, sino para la enseñanza de la Física de Reactores Nucleares.

Sería útil extender estas prácticas a instalaciones con otras tecnologías, para poder hacer análisis comparativos del comportamiento del Reactor desde el punto de vista de la Física de Reactores.

Sería sumamente provechoso, y estamos trabajando en ello, poder generar material audiovisual a partir de la realización de estas experiencias, de forma de que puedan aprovecharla estudiantes que no tengan acceso a este tipo de instalaciones (sumamente costosas y escasas).