



Enrique UGEDO GUDIN es Doctor Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid. En la actualidad es Subdirector de TECNATOM, S. A., en el Área de Formación y Estructura.

PRECISION, ALCANCE, VERSATILIDAD

SIMULADORES ESPAÑOLES PARA LA DECADA DE LOS 90

E. UGEDO

La década recién iniciada es reconocida en amplios sectores de la actividad económica como la década de los factores humanos, significando con ello que las prioridades estratégicas en la investigación y aplicación de tecnologías avanzadas se orientarán al estudio del comportamiento humano y los diversos factores que le vinculan con la máquina y el proceso productivo, buscando siempre mejores índices de productividad y seguridad.

La industria eléctrica a nivel global, a través de sus empresas, organismos e instituciones, está canalizando importantes recursos hacia el desarrollo de métodos y herramientas que faciliten la supervisión y el control de las instalaciones generadoras de energía eléctrica. Tópicos tan relevantes como el grado de automatización del control de la instalación y el consiguiente reparto de competencias entre el hombre y la máquina, los sistemas de detección precoz de averías, la gestión optimizada de alarmas en sala

de control, la implantación de terminales gráficos en tiempo real como interfase operador-proceso, la mecanización de los procedimientos de operación y algunos otros están siendo objeto de amplio debate en conferencias y seminarios, al tiempo que se desarrolla metodología y se construyen prototipos en las empresas e institutos de investigación.

Al considerar la temática asociada a los factores humanos, es obligado referirse con cierto detenimiento a los medios que contribuyen a la formación y el adiestramiento del personal de explotación de centrales de generación eléctrica.

Desde su implantación a finales de los años sesenta, el simulador de adiestramiento ha venido mostrando su eficacia como vehículo de transferencia de conocimientos y laboratorio de adquisición de experiencia en la formación de técnicos de elevada cualificación tecnológica. La industria aeronáutica y la de generación nucleoelectrónica, donde los factores seguridad y disponibilidad reclaman cotas

significativas de destreza profesional, utilizan con profusión los simuladores de adiestramiento en sus diversas acepciones. En el presente artículo se describe el papel que desempeña el simulador en el proceso de capacitación profesional de los operadores de centrales eléctricas, y la evolución experimentada por aquél hasta nuestros días.

La permanente atención que el sector eléctrico español presta a los temas de capacitación profesional, concretada en la aplicación de múltiples esfuerzos y recursos en métodos y medios de adiestramiento ha propiciado que, al iniciarse la década de los 90, el centro de formación de Tecnatom haya consolidado un destacado patrimonio tecnológico al servicio de los hombres que velan por la eficacia y seguridad en la explotación de las centrales de generación eléctrica.

INTRODUCCION

La cualificación profesional del personal de explotación de instalaciones industriales complejas implica, a grandes rasgos, un profundo conocimiento de los principios físicos que sustentan el proceso industrial (formación teórica), una detallada familiarización con las características de diseño y procedimientos técnico-administrativos de la instalación (formación tecnológica), así como la experiencia profesional suficiente y necesaria para la supervisión y control de la instalación bajo cualquier escenario operacional posible (destreza profesional). Además de estas cualidades, eminentemente técnicas, el profesional de explotación debe reunir otra serie de atributos, de carácter psicosomático, tales como estabilidad emocional e idoneidad física, que maximicen los factores seguridad y eficacia del conjunto hombre-máquina.

La cualificación de carácter técnico se plantea en términos de conocimientos y habilidades que un determinado profesional debe reunir para desempeñar eficazmente las funciones inherentes al puesto de trabajo. Agrupados por materias homogéneas y secuenciados racionalmente, el conjunto de conocimientos y habilidades darán lugar a una serie de objetivos de enseñanza, cuantificables y medibles, que permitirán diseñar, desarrollar y comprobar los programas de adiestramiento correspondientes.

Una parte de los conocimientos del programa, generalmente de índole científica y tecnológica, son adquiridos en las escuelas y facultades técnicas oficiales del país, mientras que los más específicos se encomiendan a centros de adiestramiento especializados, bien sea formando parte de la estructura orgánica de la compañía propietaria de la instalación o bien como organización independiente. Como ejemplos representativos pueden citarse la industria aeronáutica, donde

las grandes aerolíneas, bien individualmente o consorciadas, poseen centros de adiestramiento para la tripulación de cabina y otros especialistas, así como la industria de generación nucleoelectrónica, promotora de sus propios centros de formación.

LA CAPACITACION DE PERSONAL EN EL DESARROLLO NUCLEAR ESPAÑOL

Los positivos resultados de la primera generación de centrales nucleares españolas y la conyuntura energética de primeros de los setenta determinan el inicio del cambio de configuración de la estructura de generación eléctrica, con la participación creciente de materiales energéticos fisionables en detrimento de combustibles líquidos derivados del petróleo. La envergadura del programa de instalaciones que se inicia implica la creación en unos casos, y la consolidación en otros, de la infraestructura industrial necesaria para que las empresas españolas adquieran un protagonismo creciente en las diferentes actividades asociadas al diseño, construcción, montaje, puesta en marcha y explotación de centrales.

Entre las capacidades a desarrollar se encuentra la relacionada con la formación integral del personal de explotación, tanto en las disciplinas de carácter teórico y tecnológico como en la experimentación práctica, esto es, el adiestramiento en un medio que permita al futuro operador la adquisición de experiencia individual, y a la tripulación de sala de control la coordinación necesaria del trabajo en equipo para afrontar con éxito la casuística operacional de la instalación.

Cuando las compañías eléctricas españolas encaran el plan de construcción de centrales de segunda generación deciden centralizar en Tecnatom los servicios de inspección de componentes y adiestramiento de personal, persiguiendo objetivos de economía de escala, amplia disponibilidad, máxima eficacia y desarrollo de tecnología propia.

EL PAPEL DEL SIMULADOR EN LA FORMACION PROFESIONAL

Hasta la aparición del simulador, el adiestramiento de los operadores se efectuaba un poco "al modo cirujano", es decir, observando por encima del hombro de un compañero, o bien manipulando los controles de centrales de escasa potencia dedicadas a actividades de investigación; tal era el caso de la central de Saxton, en Pensylvania, dotada con un reactor de 5 MW, donde se entrenaron las primeras tripulaciones de

la central nuclear José Cabrera, allá por el año 1966.

En ninguno de los casos citados era posible la práctica operativa en escenarios anormales o emergencias.

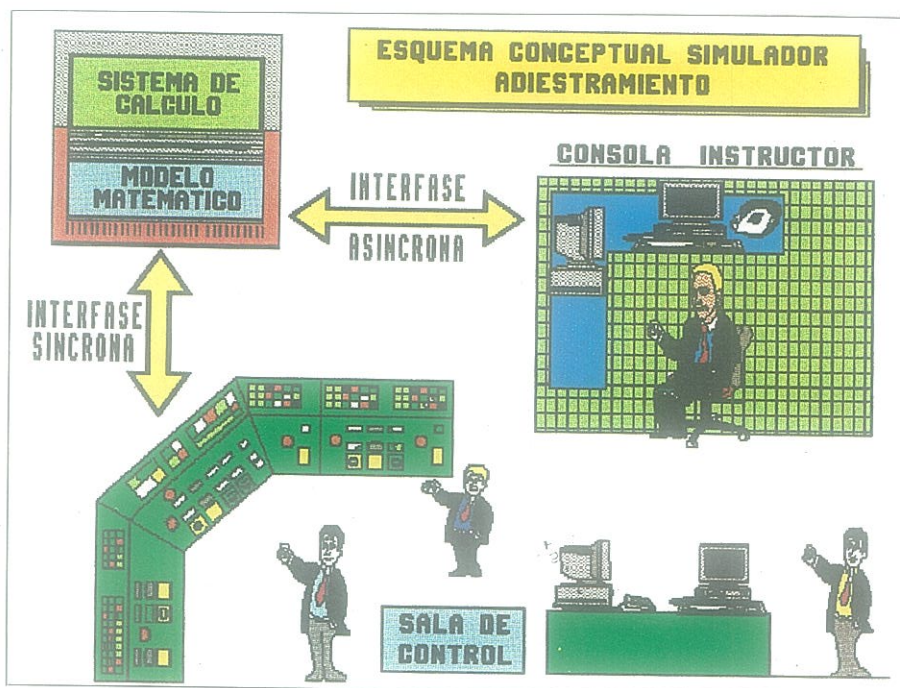
A finales de los sesenta y comienzo de los setenta los cuatro principales suministradores norteamericanos de sistemas nucleares de generación de vapor introducen en sus programas de capacitación los simuladores de adiestramiento. La creación de modelos matemáticos expresados en lenguaje de ordenador, capaces de reproducir, en tiempo real, la dinámica de procesos físicos asociados a instalaciones de generación eléctrica, permitiendo la interacción hombre-proceso mediante una interfase similar a la del mundo real, vino a resolver las carencias enunciadas anteriormente. En efecto, el nuevo ingenio proporcionaba el entorno ambiental y los escenarios operacionales para la práctica individual y en equipo de las maniobras contempladas en los procedimientos de operación de la instalación real, tanto en condiciones normales como incidentales, sin riesgo para los componentes ni merma en la disponibilidad de aquélla. Los simuladores destinados a fines formativos se componen de cuatro elementos básicos, según se ilustra esquemáticamente en la figura 1

- Modelos matemáticos.
- Sistema de cálculo.
- Intefase del operador.
- Consola del instructor.

Los **modelos matemáticos** representan las relaciones lógicas y dinámicas entre las variables de los procesos físicos simulados. La **fidelidad** de la simulación dependerá en gran medida de la precisión de los modelos utilizados, así como de la exactitud de los datos obtenidos de la central de referencia (parámetros geométricos de sistemas, coeficientes de fricción y de transmisión de calor, características dinámicas de elementos de bombeo, etc.).

El número de sistemas y componentes modelados determinará el **alcance** de la simulación. Así el denominado simulador de **alcance total** contempla todos los sistemas necesarios para poder ejecutar los procedimientos de operación de la central de referencia, tanto en condiciones normales (se excluyen operaciones de recarga de combustible) como en anomalías y emergencias. En contraposición, el simulador de **tarefas parciales** incluye uno o unos pocos sistemas en el modelo matemático.

El **sistema de cálculo** comprende el ordenador con sus unidades de memoria, equipo auxiliar, unidades de entrada/salida y el software de base asociado. Su función es ejecutar en tiempo real los modelos matemáticos programados, respondiendo a las señales de control procedentes tanto de la interfase del



F I Esquema conceptual simulador. Adiestramiento.

operador como de la consola del instructor, generando valores calculados de variables que actualizan la instrumentación informativa (indicadores, registros y luces de estado) accesible al operador o al instructor. Es claro que la potencia del sistema vendrá determinada tanto por la fidelidad como por el alcance de los modelos.

La **interfase del operador** es el medio de comunicación del operador con el

modelo para el control del proceso. Permite a aquél modificar el estado funcional de componentes dinámicos (válvulas, bombas, interruptores) y recibir la información actualizada sobre la evolución de las variables controladas; en los simuladores denominados **específicos** la interfase del operador es un duplicado de la sala de control de la instalación simulada, tanto en lo que respecta a la instrumentación de control

T I

Técnicos aspirantes a Licencia de Operación

Centrales extranjeras	123
Angra I (Brasil)	
Caorso (Italia)	
Dó (Bélgica)	
Laguna Verde (Méjico)	
Leibstadt (Suiza)	
Qin Shan (República Popular China)	
Trino (Italia)	
Centrales españolas	245
Total	368

(Este colectivo se recalifica sistemáticamente, en base anual)

Técnicos de asignaciones diversas procedentes de empresas eléctricas, ingenierías, organismos reguladores y varios

Extranjeros	667
Españoles	2.662
Total	3.329

como a los aspectos arquitectónicos del entorno ambiental.

Finalmente, la **consola del instructor**, que constituye el centro neurálgico de la instalación de simulación, juega un doble papel: de un lado permite al instructor alterar la dinámica del proceso en curso mediante la activación de señales que representan anomalías en componentes, cambios en el estado funcional de componentes cuyo control no es accesible al operador y modificación de variables externas al proceso (temperatura del sumidero de calor, frecuencia o tensión de la red, etc.); de otra parte faculta al instructor para ejercer las funciones pedagógicas de la simulación, tales como la supervisión y registro de las actuaciones del equipo de operación.

A partir del año 1975, la industria de los simuladores para adiestramiento de operadores de centrales nucleares inicia un período de consolidación con la aparición de la primera normativa americana, ANS-3.5, que define formalmente las características funcionales que debe reunir este medio formativo y que permite a las compañías usuarias especificar con precisión el producto deseado.

Se producen los primeros pedidos a cargo de compañías eléctricas, que encabeza Con. Edison (Indian Point), Duke Power (Mc Guire), Tennessee Valley Authority (Browns Ferry y Sequoyah) y VEPCO (North Anna), en Estados Unidos; el consorcio alemán KWS (Biblis A y Brunsbüttel), el consorcio sueco AKU (Ringhals y Oskarshamn), Electricité de France (Bugey), VTT de Finlandia (Lo-viisa) y Tecnatom (Cofrentes y Lemóniz) en Europa. También Canadá y los países asiáticos con centrales nucleares incorporan simuladores en sus sistemas de adiestramiento durante esta época. La creciente utilización del simulador revela su elevada eficacia tanto en la transferencia de conocimientos como en el fomento de la destreza profesional.

LOS SIMULADORES DEL CENTRO ESPAÑOL DE ADIESTRAMIENTO

Los simuladores de Tecnatom se encuadran en la categoría de **alcance total y específico**, y tipifican los dos conceptos de centrales de agua ligera que representan el equipamiento de segunda generación. El suministrador principal, bajo contrato tipo llave en mano, fue la compañía norteamericana Singer-Link, tras la adjudicación del correspondiente concurso abierto.

La asignación de un equipo de Tecnatom (especialistas en operación, ingenieros de modelación y técnicos de hardware) a las instalaciones del fabricante, durante todo el período de construcción de los simuladores, permitió no sólo un control exhaustivo de la calidad del producto, sino la adquisición de una experiencia

notable, de ulterior aplicación al mantenimiento y mejora de las máquinas en el período de explotación.

La autosuficiencia tecnológica en este campo de actividad reviste una gran importancia si se tiene en cuenta la complejidad de los modelos y la necesidad de modificaciones y mejoras en régimen casi diario. Esto viene motivado por las siguientes causas:

- El carácter específico del simulador, que obliga a incorporar cuantas modificaciones se produzcan en la central de referencia, y que afecten al comportamiento operacional del simulador. Como es notorio, los cambios de diseño en las instalaciones nucleares son bien frecuentes, especialmente tras el suceso en TMI, en marzo del 79.
- La experiencia operativa aportada por las centrales de diseño similar que revela nuevos escenarios incidentales, y que obliga a modelar con precisión la fenomenología asociada.
- Las discrepancias funcionales que se detectan en el simulador a medida que se contrasta su comportamiento con los datos operacionales generados por la central de referencia.

Todo ello implica la necesidad de un soporte estructural muy cualificado que incide sensiblemente en los costes de explotación, pero que permite el mantenimiento de unas elevadas cotas de calidad acordes con la importancia de los servicios que prestan los simuladores.

A lo largo de los 12 años transcurridos desde su implantación los simuladores han venido utilizándose a razón de 2.650 horas/año el PWR y 1.324 horas/año el BWR, en promedio. Las aplicaciones más frecuentes han sido los cursos de prácticas de licencia de operador y supervisor, los seminarios de preparación de examen de licencia y los cursos periódicos de recalificación de titulares de licencia. Además se han desarrollado más de una veintena de aplicaciones, no sólo de tipo formativo, sino de carácter analítico destinadas a la valoración cualitativa de posibles modificaciones al diseño de sistemas de las centrales de referencia.

La tabla I muestra el número de alumnos que han pasado al menos una vez por el centro de adiestramiento de Tecnatom durante el período 1979-1990.

CODIGOS DE INGENIERIA PARA EL SIMULADOR DE ADIESTRAMIENTO DE ALCANCE TOTAL

La tecnología de los simuladores de adiestramiento ha venido experimentando una continua evolución tratando de ampliar el campo de validez de los modelos utilizados y, de esta forma, enriquecer en número y complejidad la gama de esce-

narios accidentales planteados a la tripulación de operación. Esto ha sido posible por la concurrencia de dos factores esenciales:

- Disponibilidad de códigos termohidráulicos y neutrónicos, de los cuales se derivan los modelos, suficientemente validados, que reproducen con la fidelidad requerida escenarios de alta complejidad fenomenológica.
- Disponibilidad de una configuración informática que, técnica y económicamente, proporciona la capacidad de cálculo necesaria para ejecutar los modelos anteriores.

Ambas circunstancias estaban presentes en la segunda mitad de la década anterior, por lo que Tecnatom se planteó, al igual que la gran mayoría de los centros de simulación, la renovación, en profundidad, de sus modelos de simulación y, consiguientemente, de la plataforma informática de soporte.

Ante un proceso de renovación, los centros de simulación consideran tres estrategias posibles, comentadas en orden de menor a mayor complejidad y coste:

Actualización

Consiste en la mejora puntual y continuada de los modelos ya existentes para conseguir un comportamiento más realista ante determinados fenómenos; eventualmente podría incluir la adición de más potencia de cálculo en caso de saturación de la máquina existente. En realidad, todos los centros de simulación, desde el comienzo de su actividad formativa, efectúan un mantenimiento correctivo para resolver discrepancias funcionales de los modelos, hasta que los avances tecnológicos en el área de códigos y en los equipos informáticos propician una revisión en profundidad como la que se contempla en las dos alternativas siguientes.

Reconstrucción

Consiste en mantener la interfase actual del operador (sala de control), generando modelos mucho más precisos y de mayor alcance en los sistemas de generación de vapor; el incremento asociado en potencia de cálculo determina el cambio de la plataforma informática hacia configuraciones más potentes. Durante el desarrollo de los nuevos modelos se mantiene la configuración antigua para seguir prestando los servicios de adiestramiento hasta que se produce la sustitución, tras una breve interrupción del servicio. Esta alternativa plantea problemas logísticos al tener que coexistir dos configuraciones que se disputan la interfase única del operador. Sólo es viable cuando la carga de adiestramiento no es demasiado elevada y pueden compartir

la interfase del operador tanto la configuración antigua como la moderna. Las ventajas económicas de esta solución sólo son apreciables cuando la organización propietaria del simulador gestiona con recursos propios las actividades de adiestramiento y las de remodelación.

Reposición

Consiste en la construcción íntegra de un nuevo simulador, mientras se mantiene la configuración antigua a efectos de adiestramiento; al no existir elementos comunes, se eliminan las interferencias recíprocas entre las actividades de construcción (nuevo simulador) y las de adiestramiento (antiguo simulador); el período de construcción es menor que en la alternativa b) aún cuando los costes son más elevados.

Sopesando los factores coste y disponibilidad cada centro de adiestramiento ha adoptado su estrategia particular. La estrategia **reposición** sólo ha sido adoptada por varios centros de Estados Unidos, mientras que en Europa la reconstrucción y la actualización son las predominantes.

RECONSTRUCCION DE LOS SIMULADORES DE TECNATOM: EL PROYECTO MAS

Tecnatom, en base a la experiencia acumulada durante siete años de explotación y actualización de sus simuladores, se decide por la vía de la **reconstrucción**.

Como primera medida se fijaron objetivos de comportamiento dinámico concreto como exigencia de los nuevos modelos para resolver las limitaciones intrínsecas del modelo primitivo. La tabla II recoge los fenómenos más característicos incluidos en la especificación del nuevo modelo, al tiempo que muestra cómo resuelve las limitaciones inherentes al modelo original. El objetivo global que se persigue con la inclusión de estos fenómenos es el de dotar a los simuladores de la capacidad de reproducción de cualquier escenario incidental, permitiendo al operador la completa utilización de los procedimientos de operación de emergencia orientados a síntomas, hasta llevar la central a una condición estable y segura. La única limitación de contorno que se postula es el mantenimiento de la integridad geométrica del núcleo del reactor.

La consecución de estos objetivos pasa necesariamente por la selección de un código de ingeniería, de carácter predictivo, suficientemente validado por contrastación con datos experimentales, bien procedentes de centrales o de instalaciones de ensayo (LOFT, por ejemplo). Esta es la filosofía que preside el proyecto de I + D lanzado por Tecnatom en 1986,

T II

CUADRO COMPARATIVO CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES SIMULADORES DE TECNATOM

	Configuración inicial Años 1978/1979	Configuración inicial Año 1991
Modelo	Cinética puntual. Calor residual: 2 grupos de neutrones diferidos. Sin realimentación por huecos (PWR). Flujo monofásico/equilibrio termodinámico agua-vapor. Flujos sónicos no considerados. Circulación natural ajustada a un valor constante (sólo cuando no hay flujo forzado). — — Modelo de nivel en 1 fase. — — Cálculo de transferencia de calor por conducción. Coeficientes constantes de transferencia de calor. — Modelo de vasija con 5 volúmenes de control en los que se resuelven ecuaciones de balance de masa para el líquido y vapor, y la de la energía total. Contención: modelo simplificado para un MARK III. Concentración homogénea de boro. — — —	Cinética tridimensional: 1.450 nodos (BWR), 628 nodos (PWR). Calor residual: 6 grupos de neutrones diferidos. Flujo bifásico (no homogéneo/desequilibrio termodinámico). Flujo sónico en roturas y válvulas de alivio: líquido subenfriado, bifásico, vapor. Circulación natural. Caudales contracorriente. Reacción metal/agua. Generación y Transporte de H ₂ hasta la contención. Fallo de vainas de combustible. Liberación de productos de fisión. Seguimiento de nivel en 2 fases. Presencia de incondensables en arranques/accidentes. Efectos sobre el nivel de las variaciones bruscas de presión en vasija/generador: hinchamiento y colapsamiento de huecos ("swoll-ing"/"shrinking"). Transferencia de calor por conducción/convección/radiación. Regímenes diversos de transferencia de calor: ebullición subenfriada, ebullición en película, etc. Arrastre de líquido y vapor ("carry under/carry over") en separadores de vapor. Modelo de 7 ecuaciones (conservación de masa, energía y momento para líquido y vapor, y conservación de la masa para el aire) resuelto en 79/126 (BWR/PWR) nodos o volúmenes de control. Contención: modelo en saturación que predice satisfactoriamente el comportamiento de un MARK III: Modelo de transporte de boro. Inestabilidad de flujo neutrónico en condiciones de alta potencia y bajo caudal del núcleo. Descubrimiento núcleo: flujo calorífico crítico (CHF/DNB). Limitación por flujo contracorriente/"Breakdown" (CCFL). Remojado. Reinundación. Flujo reverso en bombas de chorro.

Sistema de cálculo

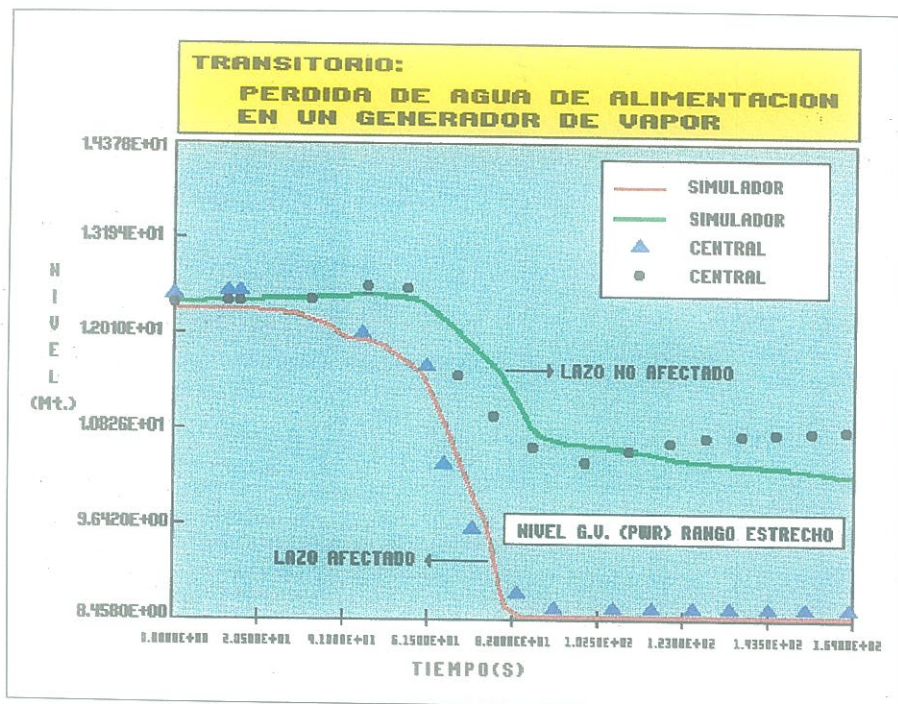
Ordenador	2 SEL 32/55	CRAY X-MP/14SE + ENCORE 32/67
Potencia de cálculo	1,5 MIPS	200 MIPS 5 MIPS
Longitud palabra	32 bits	64 bits 32 bits
Memoria central	1 MB	32 MB 8 MB
Sistema operativo	RTM	UNICOS MPX

con importante apoyo financiero de OCIDE, en el marco del Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico Electrotécnico (PIE), gestionado por UNESA. El proyecto recibe la denominación de **Modelos Avanzados de Simulación (MAS)**, siendo sus actividades más representativas las siguientes:

- Prospección y selección del código de ingeniería.
- Obtención del modelo de referencia y validación (benchmark) del mismo.
- Optimización del modelo de referencia validado para generar el modelo de simulación.
- Generación de modelos adicionales para la simulación de fenómenos asociados a escenarios incidentales (oxidación y fisuras en vainas del combustible, acumulación y transporte de H₂ y no condensables, etc.).
- Integración de los modelos avanzados que afectan a los sistemas incluidos en la isla nuclear con los remanentes del simulador anterior, que representan los sistemas secundarios y auxiliares de la central.
- Determinación de la potencia de cálculo requerida. Selección y acopio de la plataforma informática.
- Pruebas funcionales y aceptación del simulador.

La selección del código de referencia para el BWR recae en el **TRACG**, desarrollado por General Electric para análisis operacionales en una amplia gama de transitorios, desde disparo de bombas hasta incidentes severos tales como los de pérdida de refrigerante (LOCA) y sucesos con inhibición del disparo del reactor (ATWS). Mediante un acuerdo de colaboración entre General Electric y Tecnatom se plantea un programa de mejoras y adiciones al código de referencia para aumentar su eficacia y reducir los tiempos de cálculo sin merma en la fidelidad del mismo. Entre las mejoras aportadas pueden citarse las siguientes:

- Formulación implícita para la resolución numérica de las ecuaciones de masa y energía, lo que permite balances energéticos más precisos y soluciones más exactas para pasos de tiempo relativamente largos (250 milisegundos).
- Sustitución de las correlaciones existente en TRACG (que por tratarse de complejas expresiones algebraicas consumen cantidades sustanciales de tiempo de ordenador) por tablas de interpolación de propiedades termodinámicas, de materiales, etc.
- Diversas modificaciones orientadas a reducir el número de nodos, tal como la eliminación de celdas para las uniones en T.



F II Pérdida de agua de alimentación en un generador de vapor.

- Modificaciones en el esquema de iteración para evitar la repetición del proceso iterativo en aquellos cálculos que ya han satisfecho los criterios de convergencia.
- Optimización de rutinas que realizan masivos movimientos de datos en memoria.

Entre las adiciones al código original se pueden citar:

- Modelos de generación de hidrógeno y escape de productos de fisión, que toman en consideración las reacciones metal-agua y fallos en las vainas de combustible.
- Modelo de inestabilidades de flujo neutrónico a elevados niveles de potencia y bajo régimen de caudal a través del núcleo.
- Modelo representativo de los motores de inducción.

Tanto el código de ingeniería, TRACG, como el modelo que se deriva del anterior con las modificaciones y adiciones pertinentes, y que se denomina TRACS, han sido extensamente cualificados. El primero mediante un proceso secuenciado de tres etapas, en el que se comprueban, sucesivamente, la respuesta del código frente a fenómenos individualizados, el comportamiento de componentes dinámicos y la interacción de los diferentes modelos en pruebas de efectos integrados. El segundo, TRACS, mediante la contrastación de los resultados obtenidos en la ejecución de escenarios operacionales que generan un "barrido" de la fenomenología más com-

pleja con los datos aportados por centrales en operación, o por un código patrón (benchmark). Las figuras II, III y IV muestran evoluciones superpuestas del simulador y de las centrales de referencia en transitorios operacionales. En paralelo con el desarrollo del TRACS

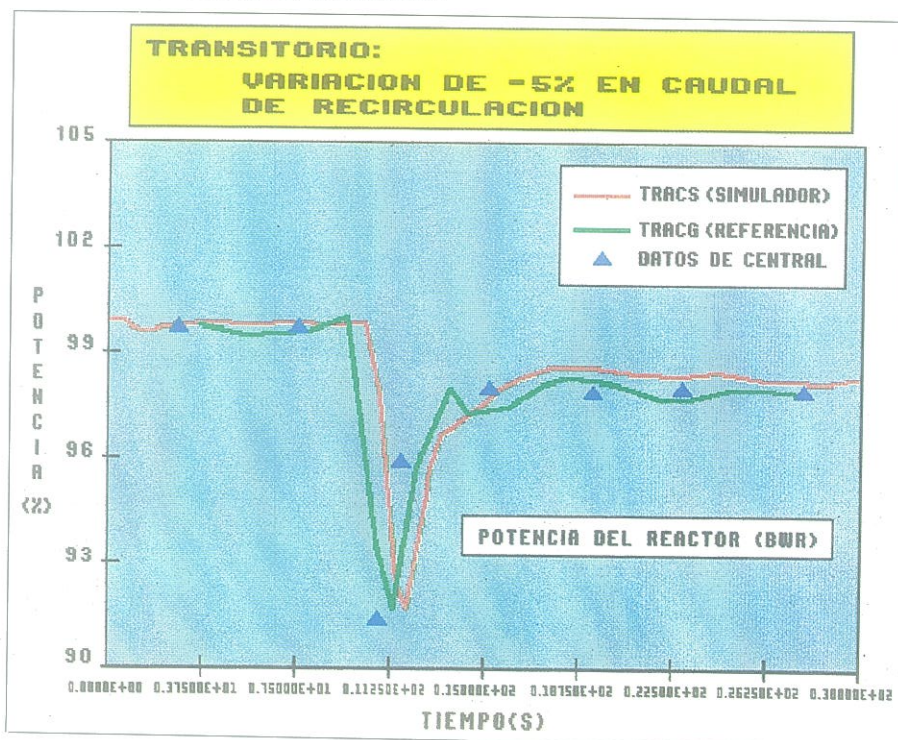
para el simulador BWR, Tecnatom empuñó, en solitario, el proyecto de reconstrucción del simulador de agua a presión, partiendo del código TRAC, que fue sometido a un proceso similar al descrito anteriormente, dando lugar al modelo de simulación bautizado como TRAC-PWR.

Una vez obtenidos ambos modelos se estimó la potencia de cálculo necesaria para su ejecución, procediéndose a una evaluación sistemática del mercado de ordenadores; tras un laborioso proceso de descartes sucesivos —se preseleccionaron cinco máquinas— a lo largo de todo un año se definió, en 1988, la plataforma informática que muestra la figura IV parte superior.

El ordenador vectorial **CRAY X-MP/14SE** ejecutaría simultáneamente los modelos avanzados, termohidráulicos y neutrónicos, recientemente desarrollados, mientras que sendos ordenadores **ENCORE 32-67** procesarían, independientemente, los modelos remanentes del sistema anterior, que engloban los sistemas secundarios y auxiliares de la central. Las características del superordenador principal propician la vectorización automática del código, lo que redundará en un ahorro sustancial de tiempo de cálculo. La tabla II permite apreciar el importante incremento de potencia de cálculo respecto a la plataforma inicial compuesta por dos ordenadores SEL 32/55, por simulador.

Con la plataforma informática disponible y los modelos del sistema de generación

F III Variación de -5% en caudal de recirculación.



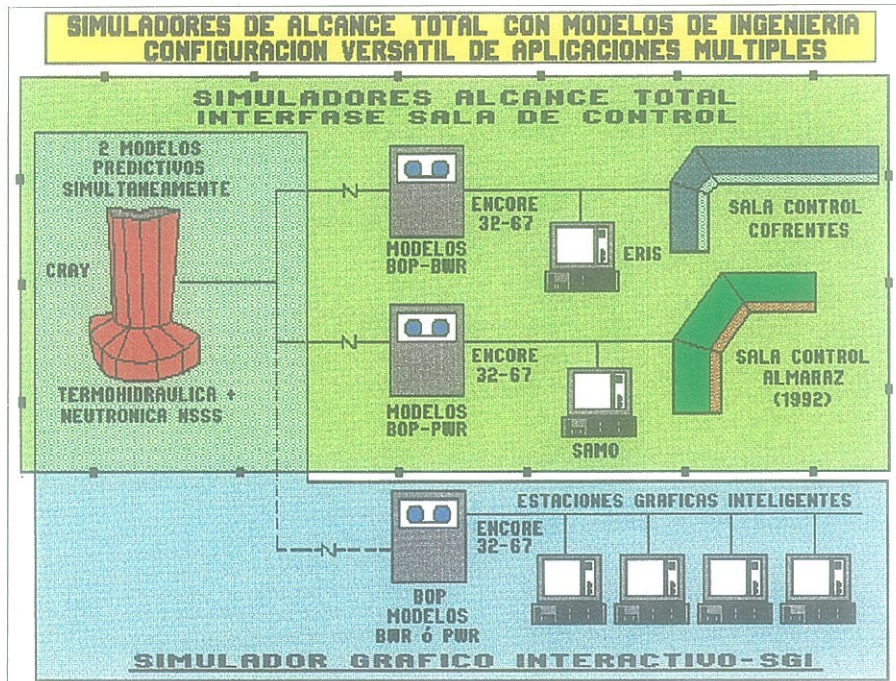


FIG IV Simuladores de alcance total con modelos de Ingeniería. Configuración versátil de aplicaciones múltiples.

de vapor a punto se procedió a la integración de éstos con los modelos de los sistemas auxiliares y, posteriormente, a la conexión con la interfase del operador (sala de control) y la consola del instructor. Completadas las configuraciones de ambos simuladores, los equipos de proyecto efectuaron la transferencia de éstos a los respectivos equipos de prueba —instructores de Tecnatom expertos en operación— para ejecutar los protocolos de aceptación. La utilización de los procedimientos de operación de la central simulada en todo el espectro operativo —condiciones normales, transitorios y accidentes— constituye la base protocolaria, y los datos funcionales recopilados durante la vida de las centrales de agua ligera constituyen el marco de referencia para determinar la idoneidad del simulador.

El proceso se dilató más de lo previsto, a lo largo de todo el año 1990, entre otras razones por la baja disponibilidad de los simuladores a efectos de pruebas, ya que la dedicación de éstos para impartición de cursos fue inusualmente alta. El simulador avanzado PWR es dado de alta para el servicio de diciembre del año pasado, y ese mismo mes se utiliza en un curso de recalificación para operadores experimentados, que son los jueces más cualificados para sentenciar sobre la bondad del producto; apreciado favorablemente por este primer equipo español, se incorpora rutinariamente a los cursos impartidos desde entonces. "Los operadores tienen confianza en el simulador" constituye una manifestación verbal del coordinador de una central es-

pañola tras presenciar durante varias semanas las evoluciones del simulador, lanzado por los tortuosos escenarios operacionales que se postulan en los cursos de recalificación, y que ponen a prueba la pericia del equipo de operación para diagnosticar con precisión las causas del problema y aplicar puntualmente las contramedidas contempladas en los procedimientos de operación.

El simulador BWR, por su parte, ha completado el protocolo de pruebas y, a mediados de marzo de 1991, justo en el momento en que se redactan estas líneas, está recibiendo los últimos ajustes a los modelos. El alta definitiva aún debe esperar un rodaje más prolongado hasta conocer la realimentación de los usuarios.

Los datos globales relativos a recursos consumidos por ambos proyectos se cifran en 76 hombres-año de mano de obra totalmente propia y unos gastos generados en el exterior de 300 millones de pesetas, básicamente empleados en el complejo de cálculo e instalaciones auxiliares. Una inversión significativa que se justifica por la elevada calidad del adiestramiento demandado por las centrales españolas, conscientes de que las capacidades aportadas por el proyecto MAS servirán de estímulo a las tripulaciones de operación, incrementando su motivación y el desarrollo de actitudes positivas hacia la formación.

Antes de concluir este epígrafe, y con objeto de introducir un elemento referencial con países punteros en tecnología de simulación se debe citar el proyecto SIPA de Electricité de France, dotado

del modelo CATHARE-SIMU, que se deriva del código avanzado de ingeniería CATHARE y está soportado por un CRAY X-MP/28. El simulador guarda notables analogías con el PWR de Tecnatom en cuanto a sus características funcionales y responde a objetivos de adiestramiento y análisis de diseño. Su puesta en servicio está programada para el presente ejercicio de 1991.

EL SIMULADOR GRAFICO INTERACTIVO: POTENCIA + FLEXIBILIDAD + VERSATILIDAD

Además del considerable esfuerzo desplegado en el desarrollo de los modelos avanzados de simulación durante la segunda década de los 80, Tecnatom ha intervenido asiduamente en un gran número de actividades orientadas a la optimización de la interfase hombre-máquina en el entorno del operador en sala de control. La revisión ergonómica del diseño de paneles e instrumentos, la adaptación y validación de los procedimientos de operación de emergencia y la implantación de sistemas mecanizados de apoyo a la operación (SAMO) constituyen ejemplos representativos de esta intervención.

Como quiera que todas las modificaciones que tienen lugar en las centrales de referencia, y que afectan al operador, han de transferirse a los simuladores correspondientes para conservar la fidelidad del entorno, los especialistas de Tecnatom en informática técnica han tenido que desarrollar diversos protocolos de comunicaciones entre la plataforma informática que da vida a la simulación y las estaciones gráficas que se han incorporado a las salas de control de los simuladores para proporcionar al operador las funciones del ERIS (sistema de información y respuesta a emergencia en el BWR) y del SAMO (PWR).

Conseguido el acceso a las variables del proceso simulado, a través de los terminales gráficos del SAMO/ERIS, se planteó como un objetivo adicional el de dotar de interactividad a los citados terminales, es decir, la capacidad de modificar el estado operativo de los componentes dinámicos simulados. Así se materializó la configuración denominada **Simulador Gráfico Interactivo, SGI**, representada en la parte inferior de la figura IV, donde se aprecia que la única diferencia con los llamados "simuladores de alcance total" reside en la interfase del operador. La plataforma informática que soporta el complejo de simulación permite el servicio simultáneo de cualquier combinación dos de tres.

Con objeto de establecer un análisis comparativo en cuanto a las prestaciones del simulador de alcance total y el SGI es preciso referirse al elemento diferenciador que es la interfase del operador.

SGI - APLICACIONES

Modelos Simples
ENCORE 32-67
PRECISION MEDIA

Modelos Ingeniería
ENCORE 32-67
ALTA PRECISION

Plataforma Informática:
DOS OPCIONES

SGI

PAQUETES PEDAGOGICOS
A MEDIDA DEL PUESTO

INTERFASE GRAFICA INTERACTIVA

Operacion
PROT. RAD.
MANTENIMIENTO
INGENIERIA
QUIMICA

APLICACIONES
TIEMPO FORMAL

PRINCIPIOS BASICOS
ALGUNOS SISTEMAS
TODA LA CENTRAL

ALCANCE VARIABLE
ADAPTADO AL OBJETIVO DE APRENDIZAJE

CRITERIOS OCUPACIONALES COLECTIVOS PROFESIONALES

La existencia de una sala de control en el primero permite la familiarización con el hábitat del operador y el ejercicio de las facultades psicomotrices, así como la práctica del trabajo en equipo; la libertad que otorga la interfase gráfica del SGI para presentar al alumno paquetes pedagógicos elaborados a la medida, en función de criterios ocupacionales y para cubrir objetivos de adiestramiento concretos, le dotan de una mayor versatilidad y un campo de aplicación más extenso. En la figura V se muestra la interfase gráfica del operador con las opciones disponibles que le proporcionan una flexibilidad prácticamente ilimitada. Además de poder seleccionar el paquete pedagógico diseñado para impartir una cierta disciplina, se puede optar por diversas plataformas informáticas dimensionadas en función de los requisitos de alcance y precisión asociados al objetivo de enseñanza prefijado.

La figura VI muestra la sección del panel del PWR que alberga los indicadores y mandos de las barras de control de población neutrónica (bancos de control); la figura VII representa el diagrama de flujo (parcial) del sistema de control químico y volumétrico donde puede apreciarse la carátula de la estación controladora de una válvula automática invocada por el operador para modificar su posición.

utilizarlo en las sesiones de adiestramiento. En algunos aspectos las capacidades de esta herramienta proporcionan oportunidades formativas que no pueden encontrarse en el simulador de alcance total. El hecho de poder acceder y observar la evolución de las variables

USUARIO: JAVIER IZQUIERDO FECHA: 22 Mar 91 HORA: 08:55:17 ESTADO: EN MARCHA ALARMA: SIN ALARMA

IDPB Y CONTROL BARRAS

PARAMETROS DEFINIDOS

50% 10% 5%
 30% 10% 5%
 10% 5% 2%
 10% 5% 2%

VALORES ASIGNADOS

10% 5% 2%
 10% 5% 2%

VARIABLES GRAFICACION

1W	3W	6W	9W	12W
BANCO A	BANCO B	BANCO C	BANCO D	
219	228	228	229	228
216	216	218	215	216
192	192	192	192	192
169	169	169	169	169
144	144	144	144	144
120	120	120	120	120
96	96	96	96	96
72	72	72	72	72
48	48	48	48	48
24	24	24	24	24
RS	RS	RS	RS	RS

K P P B R K K F K P P B R K K F K P P B R K K F K P P B R K K F
 2 2 5 6 1 1 0 1 4 1 4 4 4 6 6 1 0 1 0 2 1 2 4 4 6 6 8 1 0 1 2 1 2 2 6 5 8 8 1 0 1 0 1 4

F33 BANDOS (PASOS EXT)

GRUPO 1 GRUPO 2
 SBA 229 229
 SBB 229 229
 SBA 229 229
 SBB 229 229
 SBB 229 229
 SBB 229 229

REP35
 CONTAD

REP35
 ALARMA URGENTE

DISPARO
 REACTOR

PALANCA
 MOV BARRAS

CONTROL
 VELOC BARRAS

0.0 pasos/min

TEMP REP
 306.4 °C 51

TEMP RE2
 306.1 °C 192

DISPARO
 REP35 REACTOR

INDICE DE FUNCIONES

DETENER

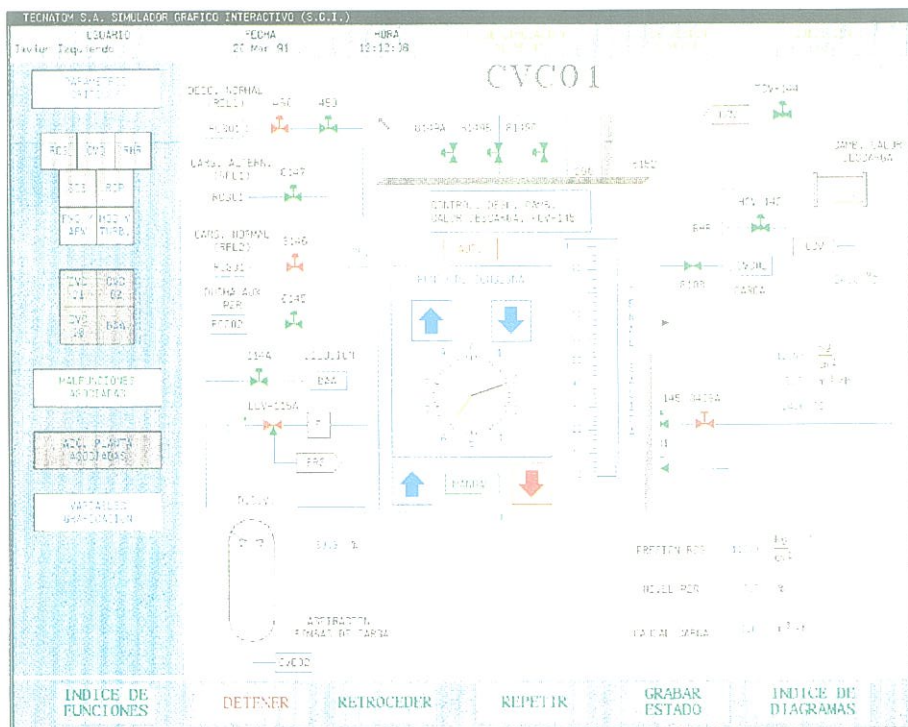
RETROCEDER

REPETIR

GRABAR ESTADO

INDICE DE DIAGRAMAS

Como ya se ha apuntado anteriormente, la eficacia de un simulador de adiestramiento para transferir conocimientos y destreza profesional radica en la fidelidad con la que el modelo reproduce el comportamiento dinámico de la instalación real. El acceso a los datos actuales de diseño que proporcionan una definición precisa, completa y pormenorizada de la instalación simulada es, por tanto, requisito necesario previo para la pretendida modelización; por otra parte, el acceso a los datos de comportamiento de la instalación simulada (o instalaciones similares) que permitan someter el modelo a un riguroso proceso de validación, constituye, asimismo, un requisito posterior. Pues bien, tanto los datos de diseño como los de comportamiento han sido facilitados diligentemente por las nueve unidades españolas de agua ligera, permitiendo que los modelos de los simuladores hayan sido contrastados reiteradamente en una amplia gama de transitorios operacionales procedentes de los archivos históricos de explotación; es más, los especialistas en operación de las centrales han aportado sinestimable



F VII CVC01

juicio crítico allí donde se carece de información registrada y, finalmente, el acceso de los ingenieros de modelación de Tecnatom a las instalaciones han estado expedito en todo instante, a fin de observar "in situ" evoluciones operacionales específicas. El trabajo en equipo ha sido una de las claves del logro de los objetivos marcados.

De cara a los próximos años, Tecnatom seguirá perfilando los modelos de simulación a medida que la experiencia operativa proporcione nuevos comportamientos referenciales; se pretende ensanchar los actuales límites de simulación para entrar en la dinámica de los llamados **accidentes severos** una vez que los códigos aplicables hayan sido suficientemente validados en instalaciones experimentales; la plataforma informática actual irá evolucionando hacia sistemas operativos abiertos de bajo coste y fácil portabilidad; se proseguirá elaborando paquetes pedagógicos en el SGI para satisfacer necesidades concretas de adiestramiento de nuevos colectivos y, finalmente, se intentará mantener la estructura organizativa y tecnológica que permita hacer frente a las necesidades de formación asociadas a la próxima generación de instalaciones productivas.



PRODUCTOS ESPECIALES, S. L.

Radioprotección, Material de Seguridad, Aparatos Médicos

Agente en exclusiva para España de:

Saphymo - Phy
Groupe b e f i c

FLEXIDOSE

Sistema dosimétrico que permite el seguimiento, en tiempo real, de las informaciones procedentes de los dosímetros por medio de lectores automáticos conectados a una unidad informática central del tipo PC.



La nueva generación de dosímetros electrónicos. DOX SI 2G

- Ligero, hermético y resistente.
- Medida e indicación del equivalente de dosis y de la tasa de equivalente de dosis.
- Alarmas programables.
- Memorización de la tasa máxima y del histórico del equivalente de dosis integrada.
- Gran autonomía.
- Posibilidad de conexión en micro-ordenador.

