



DISEÑO Y SUMINISTRO DE SALAS DE CONTROL PARA EL PROGRAMA NUCLEAR DE CHINA

Tecnatom ha tenido un papel significativo en el ambicioso programa de expansión energético chino, que pretende aportar 150 GWe de producción de energía nuclear en 2030. El alcance ha consistido en el diseño y suministro de diez salas de control de las centrales de Fuqing 1-4, Fangjiashan 1-2, Hainan 1-2 y Yangjiang 5-6.

Este proyecto ha permitido reforzar las capacidades de Tecnatom en materia de ingeniería de factores humanos, diseño de entornos de operación, calificación de equipos, fabricación, pruebas e instalación, en un entorno complejo, internacional y con unos plazos de ejecución muy ajustados, obteniendo unos resultados muy satisfactorios.

EL PAPEL DE TECNATOM EN LA EXPANSIÓN NUCLEAR CHINA

El programa nuclear en la República Popular de China es uno de los proyectos más ambiciosos en cuanto a expansión nuclear en el mundo. De hecho, a finales de los años noventa, China tan sólo disponía de tres reactores en operación, con una potencia eléctrica instalada que apenas superaba los 2 GWe. En la actualidad, hay más de 30 reactores en funcionamiento y veinticuatro plantas en construcción que supondrán un incremento en el aporte nuclear a la energía eléctrica china de 58 GWe en 2020, más de 150 GWe en 2030, y con previsiones de crecimiento exponencial para el 2050.

Teniendo en cuenta este rápido crecimiento es fácil entender que la construcción y puesta en marcha de las instalaciones requiere una celeridad excepcional, construyendo con programas de sesenta meses e incluso de cuarenta y ocho meses, en algunos casos, desde la fecha de la colocación de la "primera piedra" (*First Concrete Date*) hasta la operación comercial. Este escenario tan ilusionante pero a su vez ambicioso y retador, es en el que está inmerso Tecnatom.

Desde hace más de seis años, Tecnatom participa en el programa nuclear de China, concretamente acometiendo actividades en las centrales de Fuqing, unidades 1-4; Fangjiashan 1-2; Changjiang 1-2 (Hainan) y Yangjiang 5-6. (Figura 1).

Los principales productos y servicios suministrados bajo la responsabilidad de Tecnatom han sido:

- Análisis de la Ingeniería de Factores Humanos de las salas de control (principal, panel de parada remota y auxiliar).
- Especificación y análisis de la interfaz hombre-máquina en lo relacionado con la operación de las centrales.
- Realización de las pantallas de operación que cubren:
 - Operación normal y de fallos.
 - Operación en emergencias.
 - Pantallas de alto nivel para apoyo a los procedimientos de operación y mantenimiento.
 - Pantallas de alto nivel y gran tamaño para el conocimiento del estado de la planta.
- Implementación de las pantallas de operación en el sistema de control distribuido.
- Ingeniería de alarmas (filtrado y computarización).



LUIS REJAS

Responsable comercial de la División de Salas de Control y Simulación.

TECNATOM

Ingeniero de Minas por la ETSIM de Madrid.



VÍCTOR MARTÍNEZ

Coordinador Técnico de Proyectos.

TECNATOM

Ingeniero Industrial, especialidad en Automática y Electrónica por la ETSII de Madrid.

DESIGN AND SUPPLY OF MAIN CONTROL ROOMS FOR NUCLEAR PROGRAMME IN CHINA

Tecnatom has played a significant role in the challenging energy development programme in China, which expects to increase the production of nuclear energy in 150 GWe in 2030. Tecnatom scope of work consisted of the design and supply of 10 main control rooms for Fuqing 1-4, Fangjiashan 1-2, Hainan 1-2 and Yangjiang 5-6 nuclear power plants.

These projects have reinforced Tecnatom capabilities on human factors engineering, operation environments design, equipment qualification, fabrication, testing and installation among others, in an international and complex environment, with very tight schedules, achieving very successful results.



Figura 1. Foto de la sala de control de Fangjiashan 1.

- Computarización de los procedimientos de operación.
- Diseño de la sala de control.
- Dedicación y cualificación de los instrumentos comprados como clase comercial.
- Cualificación de los paneles de la sala de control y sala de emergencia.
- Fabricación, ensamblaje, pruebas e instalación en el emplazamiento definitivo.

El diseño de las salas de control de las nuevas centrales nucleares constituye un proyecto de una enorme complejidad técnica y organizativa. En el plano técnico deben analizarse con gran detalle todos los sistemas de la central y sus componentes, teniendo en cuenta su operación y las necesidades de supervisión en todas las posibles condiciones de la planta.

En el plano organizativo es importante la involucración y el trabajo coordinado de las distintas organizaciones de ingeniería que participan en el diseño de los sistemas de la central, así como a los responsables de la operación de la planta, sin olvidar la coordinación de los suministradores. Todo ello debe incluirse dentro de una compleja planificación global de diseño y construcción de la

central, donde la disponibilidad de la documentación de referencia constituye uno de los aspectos más críticos y donde el margen de maniobra para corregir desviaciones es mínimo.

Un factor clave del éxito en el diseño de nuevas salas de control debe conjugar necesariamente dos aspectos fundamentales:

- Las capacidades que ofrece la tecnología utilizada en sistemas digitales de I&C. Estos sistemas, basados en la utilización de la tecnología digital, ofrecen grandes posibilidades para el desarrollo de la nueva Interfaz Hombre-Máquina (IHM) de estas salas de control que es, mayoritariamente, *software*.
- La aplicación de un programa de Ingeniería de Factores Humanos (IFH) que asegure una IHM correctamente diseñada e implantada que aumente la fiabilidad humana y garantice una operación segura de la central. En este sentido, el desarrollo de metodologías que aseguren una adecuada aplicación de la Ingeniería de Factores Humanos es clave para garantizar un óptimo diseño de la IHM, y evitar por tanto inundar a los operadores de excesiva información que, en cualquier caso, puede dificultar el diagnóstico de la condición de la planta.

EL DISEÑO BASADO EN LAS NUEVAS CAPACIDADES DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO: INGENIERÍA DE FACTORES HUMANOS

El diseño de la Interfaz Hombre-Máquina (IHM) de las salas de control comienza con la definición de los objetivos que deberá cumplir atendiendo a las necesidades de operación y a las capacidades del sistema de control distribuido (Figura 2).

En los reactores de la serie a los que pertenecen los proyectos en los que Tecnatom ha participado en China, CPR-600, CPR-1000 y ACPR-1000, el concepto de operación propuesto y desarrollado por Tecnatom se basa en:

- Cuatro puestos de operación, operador del reactor, de turbina, supervisor y, finalmente, un puesto para ser ocupado en caso de emergencia por el ingeniero de seguridad, con una misión de ayudar al equipo de operación en sucesos de emergencia o accidentes severos. Cada puesto de operación cuenta con pantallas de seguridad, donde se acometen y supervisan las tareas relacionadas con la seguridad y pantallas de no seguridad que albergan, además de las pantallas de operación, el sistema de alarmas y el sistema de procedimientos computarizados
- Un panel delantero de respaldo a los puestos de operación basados en *displays*, BUP en sus siglas en inglés (*Back-Up Panel*), cuya misión es poder operar desde un panel con instrumentación convencional cuando se pierde el sistema de control distribuido. Desde este panel es posible mantener la operación durante cuatro horas, llevar el reactor a parada fría y acometer cualquier actuación de emergencia.
- Un panel de emergencia, desde donde se pueden iniciar las acciones de seguridad. El objetivo es tener una redundancia de seguridad, con instrumentación convencional, directamente cableado a las cabinas

Figura 2. Imagen de la realidad virtual del diseño conceptual después de aplicar la IFH.



de actuación, para poder iniciar los sistemas de emergencia de forma rápida y segura.

- Un panel de visualización del estado de planta POP, *Plant Overview Panel* de sus siglas en inglés. Las salas completamente digitales se enfrentan a un nuevo problema no existente en las convencionales, conocer en todo momento es estado de la planta y su evolución. El objetivo de este panel es ayudar al operador en esa tarea.

- Una sala de control de emergencia o control remoto en caso de indisponibilidad de la sala principal, con acceso a control e información semejante a la de las consolas principales.

Todo el diseño de la IHM, tanto la configuración de la sala de control como el diseño de la interfaz gráfica (sistema de alarmas, procedimientos computarizados, y pantallas de operación) se ha realizado mediante el uso de metodologías desarrolladas por Tecnatom que garantizan una adecuada aplicación de la Ingeniería de Factores Humanos. Estas metodologías están basadas en estándares internacionales como la IEC 60964, el NUREG-0800, el NUREG-0711, el NUREG-6393, el NUREG-6400, la IEC-6177, la ISO-9241 y el NUREG-700.

Una vez establecido el programa y por tanto acordado el diseño conceptual, las actividades a llevar a cabo fueron:

- Análisis y diseño.
- Fabricación, cualificación e instalación en planta.

Análisis y diseño:

Durante el diseño, intervienen diferentes disciplinas, tales como los especialistas en IFH, diseño eléctrico, diseño mecánico, especialistas en operación, cualificación, etc. La coordinación de todos los equipos es un aspecto clave para la consecución de los objetivos, jugando un papel integrador los responsables de la IFH tal y como en el NUREG-711, no sólo en la fase de análisis, sino en el diseño, verificado y validado por un equipo independiente. Las tareas terminan cuando, una vez instalada y probada la sala de control, el equipo de IFH realiza la verificación de la implementación.

Según el NUREG-711, y teniendo en cuenta la experiencia operativa que existe en la tecnología específica del tipo del reactor o en las interfaces digitales, Tecnatom comienza estas actividades con un análisis detallado de las

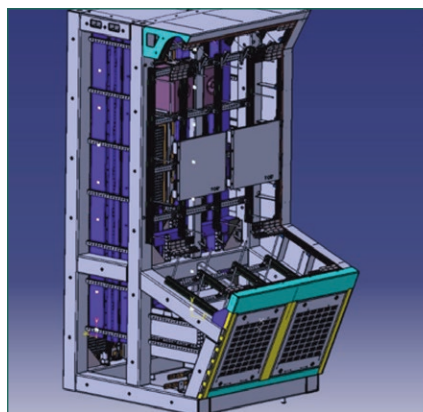


Figura 3. Detalles del diseño mecánico y el análisis de disipación térmica de Yangjiang 5-6.

funciones y su proceso de automatización. Continúa con un análisis de las tareas que tienen que ejecutarse desde la sala de control principal, y por tanto donde se acaba por definir las capacidades de supervisión y control necesarias. Nótese que el alcance de las actividades de análisis, diseño e implementación en los reactores de China estaba exclusivamente centrado en la operación remota (sala de control principal y sala de control de emergencia o remota) y no contemplaba el análisis de las actuaciones locales.

Estos pasos también servirán para definir los requisitos de cualificación del personal de sala de control, y el aporte del diseño de la interfaz hombre máquina al análisis probabilístico de seguridad (APS).

Como consecuencia de los resultados del análisis, Tecnatom desarrolló los siguientes entornos de operación:

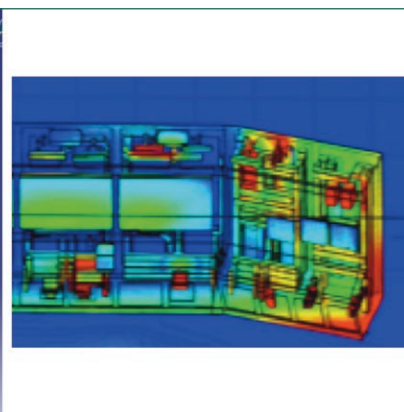
• Sala de control principal

La sala de control principal fue diseñada atendiendo a los conceptos de operación y basada en el diseño conceptual, teniendo en cuenta las diversas normativas aplicables.

Durante la fase de diseño, además de los diseños conceptuales, se realizan otras actividades tales como el diseño mecánico, la cualificación mediante modelos matemáticos que luego se validarían con pruebas reales, diseño eléctrico, análisis de ruido, análisis de disipación de calor, etc. En la Figura 3 se pueden ver algunos ejemplos de los resultados de esta fase.

• Pantallas de operación

Como pantallas de operación se entiende a todas aquellas interfaces de origen *software* que van destinadas para el personal de sala de control principal, sin descartar que puedan



ser usadas por diferente personal de planta.

Tecnatom ha desarrollado todas las pantallas de operación, de las centrales citadas en este artículo, manteniendo la homogeneidad de presentación, sea cual fuere el suministrador del equipo en particular y manteniendo los estándares de Ingeniería de Factores Humanos y de operatividad. Atendiendo a su funcionalidad, las pantallas se pueden agrupar en los siguientes tipos:

– Pantallas de operación normal:

Entendemos como pantallas de operación normal principalmente a las pantallas para ser operadas durante el arranque, la parada, en el mantenimiento y, en definitiva, para actuar todas y cada una de las funciones de un sistema específico. Dentro de este grupo podemos distinguir:

1. Pantallas de operación de sistemas. Contienen toda la información del sistema y de los sistemas periféricos, tales como los lazos de regulación. Estas pantallas están diseñadas de tal forma que, desde las mismas, el operador es capaz de realizar todas las tareas de un sistema específico sin necesidad de navegar a diferentes pantallas. En otras palabras, es posible ejecutar un procedimiento de un sistema específico desde la misma localización, conteniendo toda la información, necesidades de operación y ayudas disponibles (Figura 4).
2. Pantallas de operación de componentes. Para algunos componentes principales, principalmente por mantenimiento, pero también por prevenir fallos tempranos y comprobar el buen funcionamiento de los mismos, es

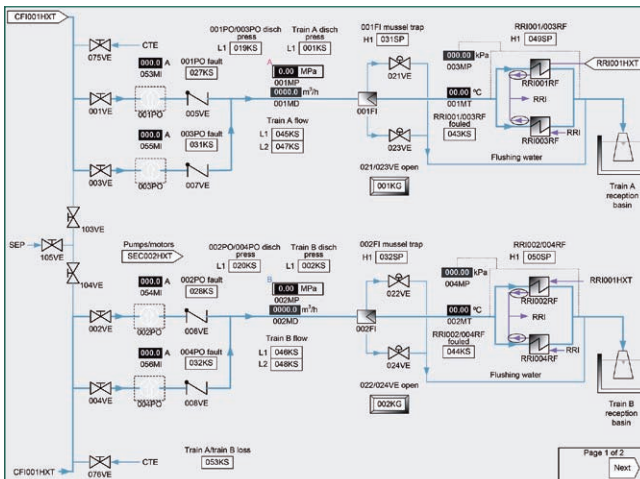


Figura 4. Ejemplo de una pantalla de operación de sistema.

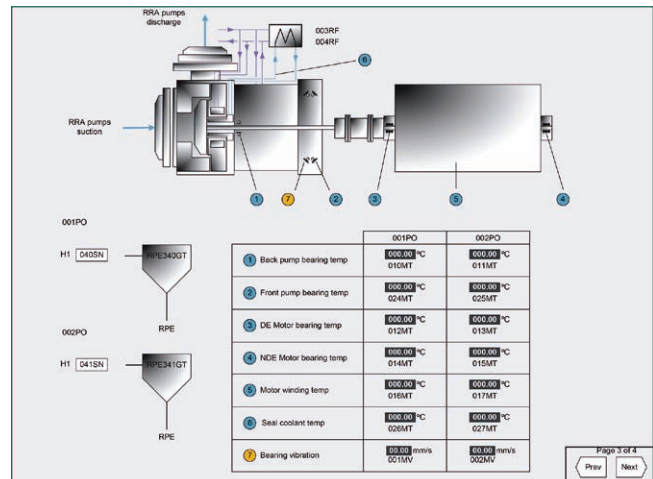


Figura 5. Ejemplo de una pantalla de operación de sistema.

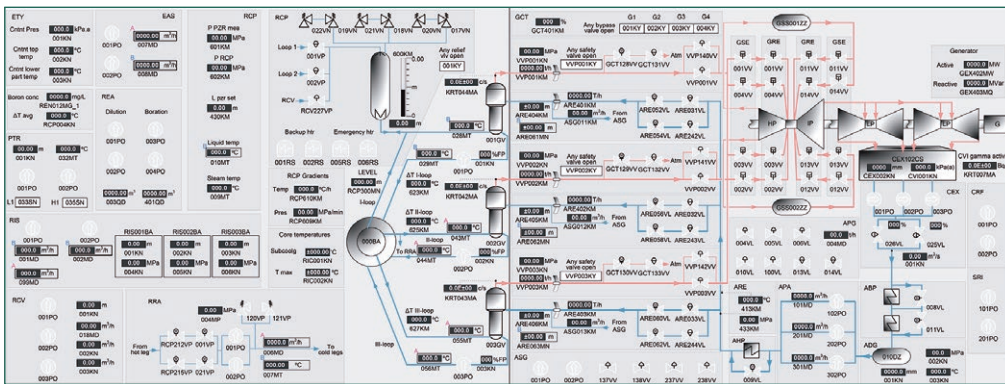


Figura 6. Ejemplo de una pantalla de supervisión general.

necesario crear pantallas dedicadas. Un ejemplo es el de la Figura 5.

3. Pantallas integradas de arranque y parada. El arranque y la parada son operaciones complejas, que requieren actuar y monitorizar sistemas, componentes y parámetros que, durante la operación a potencia no es habitual, por lo tanto, y debido a la configuración digital de la planta es necesario tener pantallas que ayuden a esta operación.
4. Pantallas de monitorización de planta. Estas son pantallas diseñadas expreso para ser mostradas en el POP, o panel principal de monitorización, y que sirven para conocer el estado de la planta en cada situación. Con la nuevas salas de control sin instrumentación convencional, la perspectiva que el operador, de un vistazo, tiene del estado de planta se pierde, de ahí que haya que suplir estas carencias con pantallas de supervisión de nivel general.
5. Pantallas de mantenimiento. Estas son pantallas específicas para

realizar las pruebas periódicas, así como monitorizar, de forma preventiva, cualquier desviación sobre el cumplimiento de las especificaciones de funcionamiento (Figura 6).

– Pantallas de operación en emergencias o fallos:

Estas pantallas están basadas en los procedimientos de fallos, emergencias y de accidentes severos, con la intención de que los operadores puedan ejecutar cada procedimiento específico siguiendo la evolución de sus acciones y disponiendo de la información requerida desde una pantalla. Estas pantallas de operación deben colocarse en el siguiente monitor donde se muestran los procedimientos computarizados. En teoría, el operador podría ejecutar el procedimiento computarizado sin necesidad de acceder a estas pantallas, pero en la práctica, estas pantallas ayudan a conocer de forma más intuitiva, las consecuencias de la evolución del accidente y de la actuaciones realizadas por el operador.

Dentro de las pantallas de operación en emergencias también podríamos distinguir diferentes tipos como son los de monitorización de las fun-

ciones críticas de seguridad o las de diagnóstico además de las propias correspondientes a los procedimientos.

• Sistema computarizado de alarmas

Tecnatom, dentro de su alcance, ha colaborado en el diseño y el desarrollo del sistema computarizado de alarmas, ajustando los

modelos del suministrador del SCADA a las necesidades del cliente y los estándares de Ingeniería de Factores Humanos. Específicamente, Tecnatom en los proyectos de las centrales de China no sólo ha participado en el diseño de la interfaz del sistema, sino que, con su equipo de operación, ha realizado la ingeniería de alarmas. Entendemos como ingeniería de alarmas al análisis de las alarmas de manera individualizada y en conjunto, y en algunos casos, posterior filtrado de las mismas atendiendo a las distintas condiciones de planta, modos de operación, estado de equipos, etc.

Es de sobra conocido que las centrales con un sistema integral de control distribuido, tienen como peligro, inundar de información superflua a los operadores de tal forma que sea difícil entender cada transitorio si no hay detrás una ingeniería de alarmas.

• Sistema de procedimientos computarizados

Como es bien sabido, en la industria nuclear y siguiendo las recomendaciones de EPRI, existen principalmente tres niveles de sistemas computarizados de procedimientos, desde simplemente mostrar en pantalla el formato



Figura 7. Fotos de pruebas de dedicación de instrumentos de y cualificación sísmica de los paneles de Yangjiang (izquierda) y Fuqing (derecha).

IN_2 SMS	IN_5 Close Fault	IN_8 Fault	IN_14 Remote	IN_28 CmdVal Close	IN_32 Invalidity	(level2) Tag on	(level2) Tag inhibit	Status ID	Status Description	Graphic Example
1	0	0	1	0	0	0	0	001	Normal Fully Closed	
0	0	0	1	0	0	0	0	002	Normal Intermediate Position	
X	0	0	1	1	0	0	0	003	Normal Closing	
0	1	1	1	1	0	0	0	004	Failure Intermediate Position	
0	1	1	X	X	0	1	0	004t	Failure Intermediate Position Tag-on	
0	1	1	X	X	0	1	1	004i	Failure Intermediate Position Tag-inhibit	
1	X	X	0	X	0	0	0	005	Local Fully Closed	
1	0	0	X	X	0	1	0	005t	Tag-on Fully Closed	

Figura 8. Ejemplo de una Proción del algoritmo de una válvula solenoide.



Figura 9. BUP de Yangjiang 5 en fábrica antes de empezar las pruebas FAT.

papel, por ejemplo a través de archivos tipo "PDF", hasta que el procedimiento se ejecute por sí solo tomando algunas decisiones sencillas.

La computarización que Tecnatom ha realizado para estos proyectos tiene un alcance de nivel intermedio, es decir, es el operador quién da el visto bueno de la ejecución del paso, y está dis-

ponible en cada paso, la información necesaria para tomar una correcta decisión, pudiéndose incluso actuar algún componente.

Como ya se ha explicado en el epígrafe dedicado al sistema de las pantallas de operación, este sistema de procedimiento computarizado es complementado con pantallas de

operación específicas, tipo canales de flujo, para un mejor entendimiento de la operación.

Fabricación, cualificación e instalación en planta:

Es innegable, que una de las fases más importantes en un proyecto, es la fase de diseño, pues la repercusión de las actividades posteriores está muy estrechamente ligada a ella, y los errores o decisiones no acertadas durante esta fase tienen un papel muy relevante en el devenir del proyecto. Esto cobra mayor relevancia si cabe, en estos proyectos donde los plazos son un factor crítico consiguiendo cumplimentar las fases de fabricación y pruebas en los tiempos establecidos teniendo en cuenta que siempre aparecen pequeñas desviaciones que deben ser asumidas (Figura 7).

El alcance de los trabajos contratados a Tecnatom ha incluido, en la mayor parte de los proyectos, la implementación de sus diseños, tanto *software* como *hardware*, es decir la fabricación e instalación de la sala de control en el sentido más amplio. Para la fabricación y ensamblaje de los paneles, se ha contado con la importante colaboración de la empresa Inabensa, localizándose en sus talleres de Sevilla dichas actividades, siendo por tanto el conjunto, un producto cien por cien nacional.

En el caso del proyecto de Yang-Jiang 5&6 los paneles fueron fabricados por la empresa China CTEC. En este caso, Tecnatom supervisó las actividades propias de fabricación, ensamblaje, pruebas e instalación final.

En cuanto a la implementación del *software* la realizamos en dos fases:

1. Procesamiento de señales, LTCs de sus siglas en inglés, *Logic of Typical Component Status*. Estos



son algoritmos desarrollados por Tecnatom para sincronizar las señales lógicas del sistema de control distribuido con la información necesaria para mostrar en las pantallas de operación. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de una porción del algoritmo, en forma de tabla de verdad, de la lógica de una compuerta neumática.

2. Implementación de las pantallas de operación en el sistema de control distribuido. Una vez definidos los algoritmos de conversión gráfica, Tecnatom incluyó en el sistema todas las pantallas de operación, conectado cada objeto, a las señales específicas de campo.

CONCLUSIONES

Ante las enormes capacidades de los nuevos sistemas de I&C digital, cobra especial relevancia la Ingeniería de Factores Humanos encaminada a diseñar un entorno de operación que minimice el error humano y que suministre la información precisa en el momento adecuado, reduciendo por tanto no sólo la posibilidad de accidentes sino el tiempo de indisponibilidad.

Tecnatom ha participado de forma intensiva en los últimos seis



Figura 10. Fotos de la sala de control de Hainan 1.

años en el ambicioso proyecto de suministro de diez salas de control en centrales nucleares chinas, siendo el escenario perfecto para plasmar la experiencia y conocimiento adquirido durante los muchos años de desempeño profesional.

La experiencia que obtenida en estos proyectos, refuerza enormemente las capacidades en procesos de ingeniería de factores humanos, diseños de entornos de operación, cualificación de equipos, fabricación, pruebas e instalación, y sitúa a Tecnatom como empresa puntera en estas tecnologías.

Estas prácticas, entre otras cosas, vienen a avalar que los análisis realizados durante la fase de diseño, consiguen acortar los tiempos y los costes, manteniendo los estándares de calidad exigidos en un proyecto nuclear.

Sin duda esta experiencia puede y debe ser aprovechada también en los proyectos de modernización de las salas de control de las centrales nucleares españolas consolidando la seguridad, eficiencia y competitividad necesaria para afrontar la operación actual y futura de las centrales, más allá de los cuarenta años (Figura 10). ■