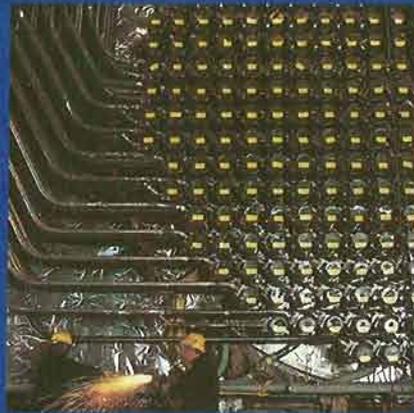


Revista del CSN / Año I / Número 1
IV Trimestre 1996

Seguridad Nuclear



**Gestión de vida remanente
en centrales nucleares**

**Presente y futuro
de la robótica nuclear**

**Sustitución de
generadores de vapor**

**Combustible nuclear
de alto grado de quemado**

**La educación científica
y los nuevos museos interactivos**

Seguridad Nuclear

Revista del CSN
Año 1 / Número 1
IV Trimestre 1996

Director

Rafael Caro

Comité de redacción

Agustín Alonso, Alfonso
Arias, José A. Azuara, Aníbal
Martín, Juan M. Kinde-
lán, Carmen Martínez Ten

Noticias

Directora

Matilde Roperó

Comité

A. Esteban Naudín, G. López
Ortiz, M. Rodríguez
Martí, M. F. Sánchez Ojan-
guren, M. A. Villar Castejón

Secretaría de redacción

Fátima Rojas

**Consejo de
Seguridad Nuclear**

Justo Dorado, 11
28040 Madrid
Tf. 346 03 11
Fax. 346 06 68

Diseño y maquetación

ACK Comunicación
Avenida de Burgos, 48. 3ºE
28036 Madrid
Tf. 383 28 33
Fax. 383 29 01

Impresión

Closas-Orcoyen, S.L.
Paracuellos del Jarama

ISSN: 1136-7806

D. Legal: M. 31.281-1996

Portada: Trabajos en el sis-
tema de refrigeración de un
reactor. Foto TIB.

Los autores asumen la total
responsabilidad de los traba-
jos que firman. El CSN al pu-
blicarlos no pretende expresar
su acuerdo con ellos.

1 Editorial

2 Gestión de vida remanente en centrales
nucleares
● Rafael Caro
CSN

11 Presente y futuro de la robótica nuclear
● Comités de Dirección y Técnico
del Proyecto SRT

22 Sustitución de generadores de vapor
● José Ignacio Lequerica
CSN

31 Combustible nuclear de alto grado de
quemado. Proyecto de barras segmentadas
● Alfredo Llorente
ENUSA

38 La educación científica y los nuevos
museos interactivos
● Manuel Toharia
Museo Acciona

48 Noticias

48 Información general / 51 Instalaciones nuclea-
res y radiactivas / 53 Ciclo del combustible
y gestión de residuos / 54 Protección radiológica /
55 Publicaciones / 55 Cursos y conferencias

56 Abstracts

Editorial

El Consejo de Seguridad Nuclear, cuyo nuevo Pleno tomó posesión hace más de año y medio, ha culminado la definición de sus líneas estratégicas para adaptar el funcionamiento del organismo a las necesidades actuales que plantea la seguridad nuclear de nuestro país.

Con este esfuerzo hemos intentado subrayar los principios en los que debe basarse la actuación del CSN para cumplir los objetivos que le son propios: velar por la seguridad nuclear y la protección radiológica, optimizando al máximo la eficacia de la institución en la acción de cada día, con la mayor transparencia posible en la comunicación con los ciudadanos y con los responsables políticos del país.

En las actividades de información y comunicación del CSN se pueden distinguir varias facetas. Por una parte, se trata de informar a la sociedad, que teme los efectos nocivos que pueda producir la radiactividad y que debe conocer los controles institucionales a los que está sometido su uso. Para cumplir ese objetivo el CSN ha incrementado su contacto con los medios de comunicación, que transmiten información a la opinión pública, y con las organizaciones ecologistas, que cumplen un papel de vigilancia de toda actividad que pudiera tener consecuencias en el medio ambiente. Asimismo, este organismo mantiene estrecho contacto con los responsables políticos del país, a quienes informa sistemáticamente a través de los documentos sobre sus actividades que son remitidos cada seis meses al Congreso de los Diputados y al Senado.

Por otra parte, existe otra clase de información, de mayor grado técnico y especialización, que se orienta más hacia los responsables de la gestión y del uso de los materiales radiactivos, y a los técnicos y científicos relacionados con la materia. En general se refiere a la problemática técnica de la seguridad nuclear, así como a las actividades diversas, notificaciones genéricas, decisiones y planteamientos del CSN, y la evolución de la normativa que se aplica a escala internacional.

Siguiendo el ejemplo de otros organismos reguladores de la seguridad nuclear y la protección radiológica de diversos países, y en el ánimo de contribuir con nuestra aportación a las numerosas publicaciones que sobre este asunto existen en el mundo, emprendemos hoy la edición de una revista trimestral. Su objetivo será servir de soporte de las ideas de expertos españoles y extranjeros sobre temas relacionados con la seguridad nuclear y reflejar la situación nacional e internacional de los ámbitos que son competencia del CSN.

En este primer número ofrecemos artículos técnicos sobre temas de máximo interés en las centrales nucleares, como el cambio de los generadores de vapor y la gestión de la vida remanente, y otros relativos al combustible de alto grado de quemado y a la robótica nuclear. Asimismo, nos ha parecido oportuno incluir un artículo de carácter no específicamente técnico, que en este número dedicamos a los nuevos museos interactivos de la ciencia. Es nuestro deseo que, a través de esta revista, se abra un nuevo canal de comunicación para el organismo y que la publicación constituya un punto de encuentro de ideas, proyectos e información que a todos nos afecta.

 Rafael Caro*

Gestión de vida remanente en centrales nucleares

El desgaste que las centrales nucleares, como cualquier otra instalación industrial, sufren con el paso del tiempo requiere una adecuada gestión de la vida remanente, cuya garantía reside

en el binomio seguridad-economía y en un soporte normativo flexible que debería permitir el funcionamiento de aquellas instalaciones que demuestren estar globalmente en condiciones de explotación.

1. Introducción

Toda sociedad necesita de forma ineludible energía para su desarrollo y, según los índices de diagnóstico habituales, el consumo es tanto mayor cuanto más elevado sea su nivel de vida. Esta es la razón por la que todo país preocupado por este tema quiera disminuir el riesgo de restricciones de energía, aunque sean coyunturales, a base de diversificar las fuentes de aprovisionamiento para disponer de un *mix* que se apoye, como explícitamente reconoce el *Libro blanco de la energía* de la Unión Europea, en los tres pilares básicos de seguridad de aprovisionamiento, impacto medioambiental mínimo y condiciones económicas adecuadas. La razón de cada una de estas tres patas es autoexplicativa. Obviamente, lo comentado trae de la mano, de forma inevitable, la gestión de la vida remanente de las instalaciones productoras

de energía, en general, y de las centrales nucleares, en particular.

En los últimos 20 o 25 años ha tenido lugar en todo el mundo un movimiento de rechazo frente a la industria nuclear. No es este el momento de analizar las causas de esta actitud; quizá la histórica –léase Hiroshima y Nagasaki– sea la más importante, aunque haya otras, y su análisis lleva de forma automática, con demasiada frecuencia, a un diagnóstico basado en la visceralidad. Sea como fuere, “esos son los bueyes con los que tenemos que arar”; que significa que de momento sería ilusorio pensar en incrementar el porcentaje nuclear en el *mix* mencionado anteriormente, y que a lo sumo hay que conformarse con mantener lo que se tiene; *si es que merece la pena*.

Ciertamente, una instalación, no ya vieja sino simplemente *madura*, inevitablemente adolece de algunas características poco deseables en virtud del proceso, ciertamente entrópico, que llamamos de forma genérica envejecimiento. Por supuesto, hay diletantes, en realidad no del todo desencaminados, que afirman que el envejecimiento se inicia en el mismo momento de nacer, es decir, en el ca-

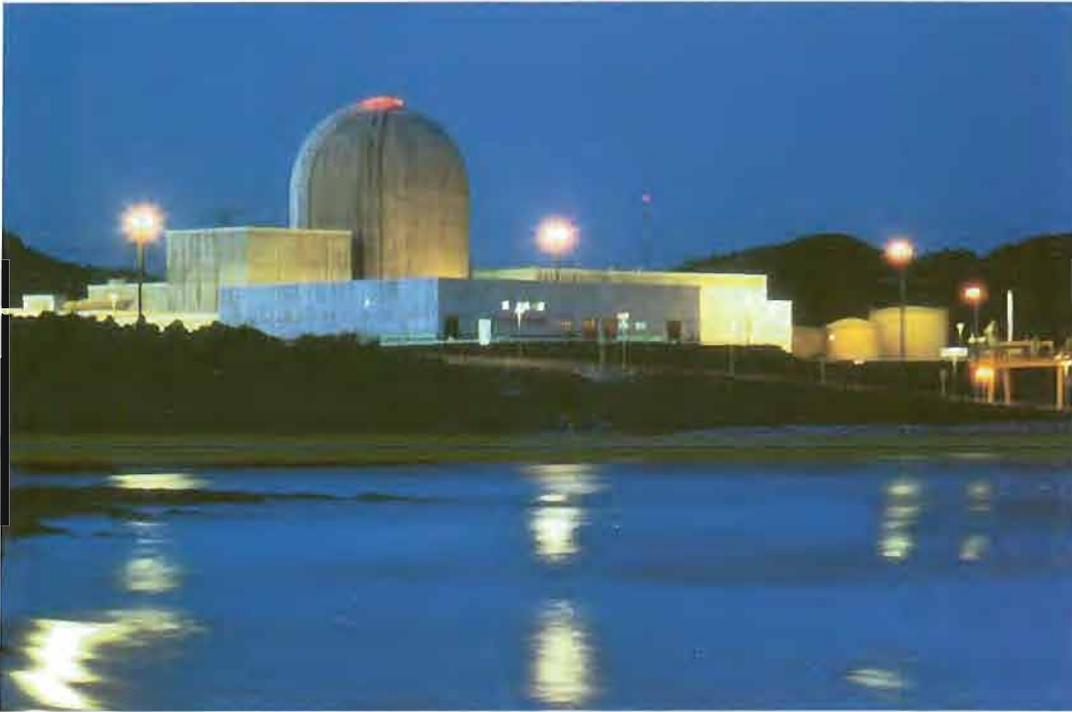
so que consideramos, en la puesta en marcha de la instalación. Sea como fuere, las actividades de mantenimiento, sustitución de componentes y sistemas, modernización parcial, investigación de la fenomenología del envejecimiento, etcétera, parece que han de ser actividades indisolublemente ligadas a la vida de la central mientras esta dure.

Este conjunto de problemas, cada vez más acuciante por cuanto el tiempo transcurre de modo irreversible, afecta a todos los países que tienen en su parque energético alguna central nuclear. Seguridad y economía son las piedras angulares de este edificio que, junto con un soporte normativo adecuado, van a proporcionar la garantía de una correcta gestión de la vida remanente.

2. La vida de la central nuclear

La problemática planteada en este artículo comenzó a contemplarse hace ya algunos años bajo la denominación genérica de Plant Life Extension promocionados por Nuclear Engineering International, que incluso prestó su nombre. PLEX, a una serie de seminarios internacio-

* Doctor en Física por la Universidad Complutense de Madrid, ex-presidente de la European Nuclear Society y de la Internacional Nuclear Energy Academy. Miembro del cuerpo de expertos del OIEA, OCDE y UE. Ex-catedrático interino en la Universidad Politécnica de Madrid. En la actualidad es consejero del CSN.



● **Figura 1.** Central nuclear Vandellós II. Su autorización de construcción procede de 1980. Es una PWR de diseño original de Westinghouse y una de las centrales elegidas como planta piloto de investigación de vida remanente.

nales. Sin embargo, este nombre a la sazón adolecía de inoportuno, por cuanto se servía en bandeja a los profesionales del antinuclearismo un tema perfecto para “poner el grito en el cielo”. En efecto, el alumno más bisoño en el arte de la dialéctica descubriría de inmediato la potencialidad de crítica a la industria nuclear apoyándose en el argumento de “si quieren aumentarles la vida es porque ya son viejas”.

Sea como fuere, desde hace aproximadamente una docena de años, muchas de las centrales nucleares en funcionamiento habían empezado a sufrir modificaciones —grandes y pequeñas— y estaban en trance de sufrir otras. Parte de sus equipos habían sido —y siguen siendo— sustituidos por otros más modernos —piénsese por ejemplo en las salas de control—; otro ejemplo lo proporciona el I+D, que nunca había dejado de actuar en modo de presente en la industria nuclear, y que, a cuenta de un mayor conocimiento de los mecanismos de fragilización del acero de las vasijas, había sugerido una redistribución de los elementos combustibles a fin de disminuir la fluencia. También estaban surgiendo nuevos procedimientos de operación en estado estaciona-

rio y en transitorios, que inevitablemente afectan a la vida de la central. Asimismo, una mejor práctica de mantenimiento estaba significando inevitablemente, en razón de diagnósticos precoces, una vida en mejores condiciones y, por lo tanto, más larga.

La propia potencia nuclear del sistema, piénsese en el caso sueco, se había incrementado significativamente; y, cómo no, la normativa y la formación del personal también estaban cambiando. De modo que hablar de la vida de la central ya no era una tarea banal. En esta circunstancia, el análisis cuidadoso del concepto lleva a distinguir entre *vida económica*, *vida útil* y *vida de diseño*. La primera obviamente tiene que ver con el periodo de tiempo mínimo necesario para recuperar el capital invertido. Y aún esta definición, evidente *per se*, en la práctica no es, ni mucho menos, tan clara. Ciertamente depende de la evolución económica, tan cambiante en general, de los *marcos legales* en vigor, de la contribución de otras fuentes energéticas, etcétera. En España, en particular, según la legislación vigente está establecida en 25 años.

La *vida útil* es un concepto que depende del binomio seguri-

dad/economía; y que viene a ser el periodo de tiempo a partir del cual el precio de la energía producida, manteniendo a nivel adecuado las condiciones de seguridad/contaminación, sigue mereciendo la pena la explotación de la central. Nuevamente, es un concepto no definible cuantitativamente *a priori*, por cuanto depende de decisiones del organismo regulador, y de la composición del *mix*, que a su vez depende en cierta medida de las condiciones político-económicas de países ajenos al propio. Y finalmente la *vida de diseño*, que el fabricante establece en función de consideraciones técnicas, también reviste una cierta ambigüedad, al depender de vicisitudes de la historia de la central —transitorios y sustituciones diferenciales, fundamentalmente—, imposibles de predecir al principio de la vida. Obviamente, el conservadurismo del fabricante, que no quiere ser pillado en flagrante delito de autocomplacencia, influye también como causa decisiva en esta ambigüedad.

Por otra parte, el envejecimiento que tiene lugar a lo largo de sus años de vida se debe de un lado a las condiciones ambientales en que funciona la máquina —humedad, alta temperatura, entorno químico

ácido, irradiación, etcétera—, y de otro lado, a las condiciones de servicio —cargas, diferencias de presión, tensiones cíclicas, fatigas, vibraciones, etcétera—. Todo esto se traduce en actividades que son los capítulos de la historia global de la gestión del envejecimiento de las centrales nucleares. Son los siguientes:

- Sustitución de componentes.
- Investigación y desarrollo.
- Nuevas redundancias.
- Modernización de sistemas y componentes.
- Clausura y desmantelamiento de centrales.
- Puesta al día de regulaciones y normativas.

Estos capítulos que, por supuesto, en cierta medida se solapan, merecen un análisis individual.

2.1. Sustitución de componentes

Glosar la sustitución de componentes en una central nuclear equivale inevitablemente, aunque no solamente, a referirse a los generadores de vapor de los PWR. Estos componentes siempre mostraron cierta propensión al deterioro de sus tubos. Se han identificado varios mecanismos de deterioro —corrosión intergranular, *fretting*, fatiga, erosión-corrosión, *denting*, etcétera—. Para todos estos fallos se han encontrado soluciones, que solían terminar en el taponamiento del tubo deteriorado. Un largo proceso de investigación ha tenido lugar, que se ha traducido en exigencias más o menos rigurosas según el tamaño de la grieta. Se han desarrollado nuevas herramientas, criterios y técnicas, como las Eddie-Current, ultrasonidos, análisis de ruidos, etcétera.

Por supuesto, el taponamiento de tubos significa en mayor o menor medida la infrautilización de la central; y un análisis económico llevaría indefectiblemente a la sustitución global del generador de vapor. Además, hay que considerar el efecto sobre la seguridad, ciertamente pequeño, que la rotura de un tubo

lleva consigo; en realidad, es como un LOCA¹ minúsculo, y temiendo un posible efecto *dominó*, los organismos reguladores y las propias empresas propietarias han de ser conservadores al respecto.

Naturalmente, no es éste el único sistema a sustituir en una central que llega a la madurez. Muchos otros lo han sido, y otros lo serán —válvulas, bombas, tuberías, etcétera—. Hay un caso que llama poderosamente la atención; se trata de la sustitución de la vasija del reactor. Los ciclados térmicos, la irradiación neutrónica, las altas presiones y temperaturas... son agentes que dañan el material de la vasija, perturbando su estructura cristalina, siendo las áreas críticas las toberas, las penetraciones de instrumentación, el *beltline*, etcétera. Por supuesto, la rotura catastrófica es la pregunta clave. Como en todos los demás temas, la investigación ha sido exhaustiva: evaluaciones en cada recarga, recocidos, seguimiento en continuo, pruebas en laboratorio, modificación del núcleo, etcétera, son los temas más tratados en este capítulo. La táctica más simple para disminuir la fragilización de la vasija, teniendo en cuenta que se produce fundamentalmente a cuenta del bombardeo con los neutrones rápidos del núcleo del reactor, consiste en disminuir el flujo neutrónico incidente, o bien a base de pantallas, o bien eliminando la última fila de elementos combustibles, o bien recurriendo a una distribución de éstos en el núcleo que produzcan un flujo tal que su valor al incidir sobre la vasija o en zonas críticas de ésta —por ejemplo, soldaduras— sea lo más bajo posible.

Obviamente, lo ideal sería conocer la relación entre la fluencia y la fragilización, de modo tal que se pudiera prever, a partir de qué valor de aquélla —léase tiempo de explotación de la central—, la vasija podría fragilizarse hasta el extremo

de la rotura de forma catastrófica. Sin embargo, en este tema no se dispone de correlaciones fiables entre la fluencia y la fragilización que produce. La razón está en la no linealidad del fenómeno.

El recocido es quizá el método más usado de recuperación de las propiedades originales del material. En particular, se ha aplicado con cierta frecuencia en las centrales del modelo soviético VVER-440, aunque el acero utilizado (15Ch2MFA) es menos susceptible a la fragilización que sus homólogos occidentales. Sin embargo, existen problemas en este dominio debido a la geometría de la vasija y a la aceleración de fragilización después del recocido, que no están adecuadamente resueltos.

Existe, desde luego, la posibilidad teórica de cambiar la vasija. Problema éste muy complicado porque entre otras cosas afecta a la propia estructura del edificio del reactor, al diseño mecánico de la NSSS², a las dificultades correspondientes al entorno altamente radiactivo con sus exigencias de protección radiológica, etcétera; ciertamente parece que la envergadura de la operación conduciría a una razón costo/beneficio disuasoria. De hecho, aunque sea un proceso alguna vez mencionado como posible, nunca se ha llevado a la práctica.

También habría que mencionar en este apartado de sustituciones las tuberías de refrigerante y los soportes de la vasija.

2.2. Investigación

Seguramente la condición necesaria, aunque no suficiente, para llevar a feliz término la gestión de la vida remanente sea mediante un programa adecuado de investigación, para implementarlo después en la central.

En el I+D en este entorno hay que distinguir entre antes y después de Three Miles Island (TMI). Sin

¹ LOCA, Loss of Coolant Accident.

² NSSS, Nuclear Steam Supply System, o isla nuclear.



Figura 2. Sede del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en Viena.

hacer mención a los tiempos iniciales en que, por definición, prácticamente todo era investigación en el dominio nuclear, siempre ha habido una fuerte componente de esta disciplina, fundamentalmente en neutrónica —experimentos Cabrí, Borax, Spert, etcétera—, en termohidráulica y ciencia de materiales. Sin embargo, en 1979, con el accidente de TMI se comprobó que quedaban muchas cosas por investigar, fundamentalmente en el campo de la termohidráulica en condiciones de transitorio y de accidente en la ergonomía de la sala de control, en el del comportamiento de los materiales —por ejemplo, no se sabe bien por qué no se desprendió el fondo de la vasija bajo el peso de 20 toneladas de corium, es decir, de núcleo fundido, que además la atacaban físico-químicamente—. Se concluyó también la idoneidad del PSA³ como evaluador global de la seguridad. Ha sido un proceso largo y complejo; experimentos como Loft, Lace, Phebus, Demona, Betsy, Falcon, Halden, etcétera, lo atestiguan.

La gestión de vida remanente como catalizador ciertamente ha logrado resultados notables. Hay que empezar necesariamente citando el mejor conocimiento de la fe-

nomenología de la central sobre todo en condiciones de transitorios y accidentes; los operadores y supervisores actuales son más capaces de gestionar la central que antes de TMI; las salas de control son más lógicas y ergonómicas, y las *ayudas al operador* en forma, en general, de SPDS⁴, antes inexistentes, son de gran importancia en el tema que nos ocupa. Las redundancias son de priorización más racional, los materiales y los diseños de algunos componentes sustitutorios son claramente mejores —caso de los generadores de vapor—, etcétera.

En el I+D relativo al envejecimiento, ha habido programas a nivel nacional e internacional en Francia, Estados Unidos, Alemania, Japón y Canadá; y desde luego, España. El más antiguo de todos ellos es el americano NPARP de NRC (Nuclear Plant Aging Research Program), que se ocupa del envejecimiento de componentes mecánicos y eléctricos, sistemas de seguridad y soportes y estructuras civiles. Se han desarrollado dos programas piloto en las centrales de Monticello (BWR) y Surry (PWR). En Alemania el programa consiste en gran medida en la toma y análisis de datos de funcionamiento correspondientes al menos a 15 años antes de

empezar la extensión de vida propiamente dicha. Canadá pone énfasis especial en el mantenimiento; y Francia, además de implementar un proceso de mantenimiento e inspección en servicio muy detallado, está investigando la influencia de los parámetros de operación en el envejecimiento.

El OIEA naturalmente también se ha interesado en este tema, a través de su departamento Nuclear Energy and Safety, dedicando su atención a los siguientes temas: explotación de alta disponibilidad; mantenimiento; componentes críticas (reparaciones y mejoras); y técnicas de modernización, reparación y sustitución. También la Nuclear Energy Agency (OECD) ha comenzado un programa de investigación sobre este tema (PLIM, Plant Life Management), aunque de acuerdo con el OIEA, dedicándose fundamentalmente al aspecto económico.

2.3. Modernización de componentes y nuevas redundancias

Obviamente, la seguridad afecta globalmente a la central nuclear, de modo que cualquier mejora procedente de consideraciones relativas a esta disciplina general afectará no solamente a las características de este entorno, sino también a todas las demás, como por ejemplo la gestión de la vida remanente y la explotación económica. Viene esto a cuenta de que los cambios y mejoras debidos, por ejemplo, el análisis del accidente de TMI, apoyados fundamentalmente en consideraciones de seguridad, están sirviendo como valiosísimos elementos de soporte en las estrategias de extensión de vida. Es pertinente mencionar que después de este accidente, las autoridades reguladoras americanas exigieron más de mil nuevos requisitos. Un caso típico son las técnicas de PSA, y particularmente las del PSA vivo, cada vez más utilizadas para evaluar cuantitativamente la seguridad de la central y, por lo tanto, para actuar

³ PSA, Evaluación Probabilística de Riesgo.

⁴ SPDS, Safety Parameters Display Systems.

priorizadamente en la implementación de redundancias de seguridad. Casos típicos son la incorporación de nuevos motores Diesel de apoyo, redundancia de líneas eléctricas de independencia asegurada, nuevos depósitos de agua de refrigeración de emergencia, etcétera. Un caso típico de aplicación del PSA a la gestión de vida lo constituye Santa Mª de Garoña (BWR, Mark I), central a la que el CSN pidió un PSA de nivel 1 en 1983, que de forma complementaria y paralela con el Programa de Evaluación de Sistemas (SEP) que ya estaba llevando a cabo, sirvió para poner a la central en las condiciones de seguridad que, según el análisis del accidente de TMI, eran necesarias a la sazón. Cerca de 30 cambios se incorporaron a la central, de los que podrían citarse mejoras de las válvulas de alivio y seguridad, protección contra incendios, habitabilidad y ergonomía de la sala de control, alimentación eléctrica, sistema de protección del reactor, protección contra inundaciones interiores, etcétera. Un caso muy representativo de nuevas redundancias es la incorporación de sistemas de *venteo* en algunas contenciones, que aseguran una nueva redundancia de hermeticidad frente a la emisión de gases radiactivos en el caso de un accidente grave, a base de un sistema de filtros y válvulas que se abren cuando la presión sobrepasa un nivel de rotura previamente establecido.

Un problema que puso claramente de manifiesto el análisis de TMI fue que en las salas de control había demasiados medidores de importancia no priorizada –luces de colores, registradores gráficos, alarmas sonoras, círculos graduados, etcétera–, dando información simultánea de variables críticas y no tan críticas, lo que dificultaba, de hecho, comprender con claridad la situación real de la central, y lo que podía estar fallando. Se concluye que en algunos casos hay que dotarse de salas de control más ra-

cionales, con priorización de información según la criticidad de las variables que muestran, y con pantallas SPDS que, a golpe de tecla, pueden mostrar el estado de la central de forma integrada o por secciones.

El paso del tiempo, es decir el envejecimiento, tiene como contrapartida positiva el desarrollo experimentado por la tecnología –electrónica, informática, ciencia de materiales...–, lo que se traduce inevitablemente en que al producirse el cambio de algún componente, no sólo hay un proceso de sustitución, sino también de mejora por modernización. Y ésto se puede aplicar a cualquier parte de la central, desde válvulas de funcionamiento más seguro a paneles de vigilancia y control con electrónica más fiable. Incluso los equipos accesorios, como megafonía o defensa contra incendios, son en la actualidad más fiables que en la misma central hace veinte años.

Por supuesto, también el entorno propio de la explotación admite modernización –o *backfitting*–. De hecho, la investigación sobre el accidente severo y sobre termohidráulica, junto con la disponibilidad de sistemas informáticos más avanzados –*software* y *hardware*–, ha permitido llevar a cabo procesos de reentrenamiento del personal de operación de la planta, que ahora están en mejores condiciones de explotarla que al principio de su explotación.

2.4. Clausura de centrales nucleares

Algunas centrales nucleares han sido cerradas por razones relacionadas de forma directa o indirecta con su edad. En este capítulo hay algunos casos muy representativos, como Yankee Rowe (PWR), en Pensilvania, que no disponía de información adecuada correspondiente a los últimos años sobre la fragilización y deterioro de su vasija, a cuenta del desprendimiento de la estructura de soporte de las muestras que allí se fijaban para su



► Figura 3. Equipo de inspección por ultrasonidos de las penetraciones de la tapa de la vasija (PETAVA) de reactores PWR. Ha sido desarrollado por la empresa española Tecnatom, S. A.

análisis mecánico y metalúrgico después de cada carga, a fin de evaluar su integridad. El programa de investigación que el organismo regulador americano exigía como alternativa desaconsejaba, desde el punto de vista económico, seguir con el funcionamiento de la central. La compañía propietaria decidió cerrarla a pesar de su magnífico comportamiento durante toda su vida. Las autoridades francesas también decidieron clausurar sus centrales de uranio natural-grafito. Eran centrales antiguas, de bajo rendimiento termodinámico y ya amortizadas desde hacía tiempo. Sin embargo, necesitaban de un cuidado muy distinto del requerido por el resto del numeroso parque francés, todo él constituido por centrales de agua ligera. Nuevamente las razones de la clausura fueron económicas.

En España, también existe una central en fase de desmantelamiento, la de Vandellós I, de la familia francesa de gas-grafito-ura-



► Figura 4. Equipo de inspección por ultrasonidos del interior de las vasijas de reactores de agua ligera. Este equipo de Tecnatom, S. A. ha sido utilizado con profusión en España.

nio natural, que después de un incendio provocado por la rotura de un álabe de la turbina, el 19 de octubre de 1989, se decidió que fuera desmantelada, porque las modificaciones a incorporar después del incidente hacían el proyecto inviable desde el punto de vista económico. En realidad, la presión social fue muy importante para que la empresa propietaria tomara la decisión de clausurarla.

Las centrales VVER de Greifswald (Alemania Oriental) también fueron cerradas por decisión del organismo regulador de la Alemania unificada. Las razones –inseguridad en el diseño, construcción y explotación– son aplicables en mayor o menor medida a todos los reactores nucleares de origen soviético. Pero esto ciertamente hay que incluirlo en otro análisis.

2.5. Regulaciones y normativa

Los organismos reguladores de todos los países que disponen de centrales nucleares conocen bien la

problemática mencionada. Saben que el licenciamiento supone una atención continua a la explotación y un análisis de fallos y desviaciones, con las investigaciones correspondientes, para llegar a las causas raíces. El conjunto de regulaciones y normas aplicable a cada central es consecuencia en gran medida de su estructura y naturaleza; y un buen cumplimiento de todo ello requiere la existencia de una especie de

acuerdo entre el organismo regulador y la central –las famosas Especificaciones Técnicas de Funcionamiento– que establece las reglas de juego para la explotación. Dentro del conjunto legal mencionado, las consideraciones temporales juegan un papel muy importante, por cuanto, por ejemplo, el tiempo de vida podría ser un parámetro establecido al inicio de la explotación, aunque desde luego esté condicionado por su historia. Por supuesto, las normas mencionadas cambian de país a país, aunque básicamente sean de la misma naturaleza. Significa esto, en el tema que nos ocupa que, por ejemplo, la autorización de funcionamiento, o vida de diseño, en Estados Unidos se fijó en 40 años en 1954 en la Atomic Energy Act. Sin embargo, este número, casi absolutamente arbitrario, se tomó prestado a la Communications Act de 1934 que concedía autorizaciones a estaciones radio, y 40 años era el tiempo tradicional de autorización; sin embargo, en nin-

gún país europeo, en general, se hace mención explícita a este tiempo de vida. Lo mismo puede decirse de las revisiones periódicas, de las que pueden surgir ciertos condicionados, aplicables a la operación normal y la gestión de la vida remanente.

Nuevamente, en este punto hay que considerar el papel importante del PSA como técnica de evaluación cuantitativa de la seguridad y, en consecuencia, la normativa, por ejemplo a través de especificaciones técnicas, ha de ser en cierta medida una simple traducción de las características de seguridad de la central y, por lo tanto, de la forma de gestionar su vida.

Naturalmente, cada país deberá decidir sobre este problema, y disponer de la normativa correspondiente pero en todo caso el mantenimiento, *back-fitting* y seguimiento del envejecimiento deberán estar documentados con la garantía de calidad necesaria.

3. La gestión de la vida remanente en el mundo

Estados Unidos, con su centenar largo de centrales nucleares en funcionamiento, es seguramente el país por el que está revisión tiene que empezar. Al tema, naturalmente, se le venía prestando atención desde hacía ya muchos años y, después de una larga espera, a principios de 1992 la NRC emitió su Regla de Renovación de Autorizaciones. Sin embargo, y debido a algunas inconsistencias que pronto se pusieron de manifiesto –la más notable de todas era que no tenía en cuenta adecuadamente la Regla de Mantenimiento–, fue modificada en 1995. Esta nueva regulación permitirá extensiones adicionales de 20 años sobre los 40 de referencia, y se enfoca más específicamente a los efectos del envejecimiento. En el entorno electronuclear americano se ha aceptado esta nueva regulación como mucho más razonable que la anterior, y los grupos de propietarios de PWR y de BWR es-

tán cada vez más implicados en planes de gestión de la vida remanente de sus centrales.

Por otra parte, en el programa del EPRI (Electric Power Research Institute de Estados Unidos) se explicita como opción una vida de 60 años, en la que de forma genérica se prevé alguna modificación en el mantenimiento, inspección y gestión del envejecimiento, que de forma estándar las centrales ya venían llevando a cabo. Naturalmente, el hecho de ser un instituto de las empresas privadas pone un énfasis especial en el rendimiento económico y, de hecho, entre las empresas del sector eléctrico americano la nueva regulación de renovación de autorizaciones de centrales nucleares ha proporcionado una cierta atmósfera de optimismo. Sigue habiendo, inevitablemente, alguna leve arista con el organismo regulador debido a la referencia de 40 años como vida de las centrales. Las empresas eléctricas entienden que el número 40 no ofrece nada mágico, que igual podría ser 60 y que, en todo caso, la vigilancia y control continuos a que en cualquier caso han de estar sometidas todas las centrales resta importancia al número fijado como tiempo de vida.

La postura en Japón es muy coherente desde el punto de vista técnico; como explicaba el profesor Mishima de la Universidad de Tokyo en la conferencia PLEX-95, no se trata en Japón de disponer de una nueva regulación que extienda el periodo de vigencia de la licencia, sino más bien decidir el mantenimiento y vigilancia óptimos de las centrales cuya edad esté más allá de 20 ó 30 años.

En el banco de datos que sobre este asunto se comenzó en Kansay Electric —una de las más importantes compañías eléctricas niponas— hace unos diez años todavía no figura ningún evento de consideración en el capítulo de modos de degradación que puedan limitar la vida de las centrales. En todo caso se ha seleccionado Mihama I, PWR

de 26 años de edad, para hacer de planta piloto en un programa de gestión de tiempo de vida. Este programa estará puesto a punto en 1997. También piensan en 60 años como posible tiempo de referencia, con vigilancia y mantenimiento muy cuidadoso en todos los temas tópicos de envejecimiento, como fragilización del acero de vasija, corrosión bajo presión, deterioro del aislamiento de cables, etcétera.

En el Reino Unido, que tiene la población de centrales nucleares

ponentes de las barreras de presión, cables, estructuras, etcétera. A tal fin, las correspondientes guías y procedimientos, que están siendo desarrollados en el OIEA, están siendo contemplados con el máximo interés. De momento, el objetivo más próximo es conseguir los 50 años de funcionamiento en Chapel Cross y en Calder Hall.

El sector eléctrico francés, con un parque de 54 reactores en operación cuyo único propietario-representante es EdF, tiene un plan



► Figura 5. Almacenamiento del generador de vapor nuevo de Almaraz en la propia central.

más viejas del mundo —las cuatro unidades de Calder Hall, de tipo Magnox, cumplen 40 años en 1996—, el interés inevitable en estos temas ha llevado a que este tópico sea “el mayor reto al que los organismos reguladores y los explotadores han de enfrentarse en la actualidad”. Tal como se entiende el problema en el Reino Unido en la actualidad, los sistemas, estructuras y componentes que más rápidamente sufren el paso del tiempo ya son mantenidos rutinariamente según los procedimientos actuales; mientras que el nuevo sistema de gestión de vida habrá de enfocarse mediante revisiones periódicas de seguridad en los sistemas más longevos intrínsecamente, como com-

de gestión de la vida remanente desde 1987, y según su experiencia corroborada en las revisiones decenales, de las que ya han realizado en dos de sus 34 unidades de 900 MWe, no habrá ninguna dificultad de *hardware* en llegar a los 40 o 50 años de funcionamiento. Como consecuencia, ya están planificando la incorporación de las mejores correspondientes en las próximas revisiones.

Posturas análogas en este entorno de extensión de vida mantienen países como Canadá, Bélgica, Alemania, Suecia, etcétera. En general, todos ellos han incorporado, o están incorporando, revisiones decenales de seguridad. Por otra parte, según la Guía de Seguridad 50-

SG-012 del OIEA, uno de los once factores de seguridad contemplados se refiere a envejecimiento. El mantenimiento, que no tiene tal carácter en la mencionada guía, es aludido indirectamente en la mayor parte de los demás factores de seguridad.

En cuanto a las centrales nucleares de factura soviética, -VVER y RBMK-, tienen una problemática bien conocida que a primera vista parece solaparse con la de gestión de la vida remanente de las centra-

parque español, comparado con el de la OCDE, es relativamente joven.

En el tema del envejecimiento el sector electronuclear en España, a través de UNESA, está siguiendo básicamente la misma tónica que los demás países occidentales, es decir, vigilancia y control de magnitudes consideradas críticas para el envejecimiento, con la preparación de la documentación y archivo correspondientes. Se entiende que la vida de diseño, aceptada en 40 años como en el resto del mun-

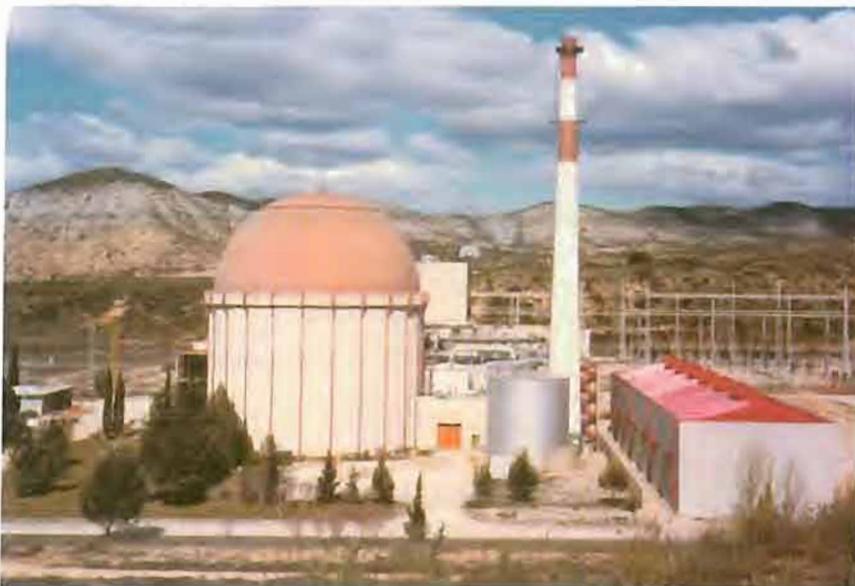
seguridad, de todas las centrales del parque, independientemente de cuál sea su edad.

El programa que las empresas electronucleares han puesto en marcha hace ya varios años incluye el desarrollo metodológico y herramientas adecuadas para vigilar los fenómenos de degradación por envejecimiento en sistemas, componentes y estructuras. Se han designado dos centrales nucleares de referencia, Santa M^a de Garoña (BWR de 460 MWe de GE) y Vandellós II (PWR de 1.000 MWe de Westinghouse); las empresas que realizaron el trabajo inicial son Empresarios Agrupados, Initec, Framatome Ibérica y CIEMAT.

En dicho programa se trata de desarrollar un sistema modular de evaluación que proporcione como producto primario estrategias de mantenimiento, modificaciones de diseño, tratamiento de las degradaciones, sustitución de componentes y cambios de modo de operación. Es decir, de forma más específica: la identificación y causas de fenómenos de deterioro por envejecimiento; el mantenimiento y modos de operación necesarios para la mitigación de tales efectos; la identificación de los parámetros medibles representativos de dichos procesos previamente identificados; y el desarrollo de un sistema de adquisición y tratamiento de los datos obtenidos.

Las acciones correspondientes a todas estas actividades y, en general, la descripción detallada del plan han sido objeto de varias publicaciones y presentaciones dentro y fuera de España, por eso no es pertinente describirlas con detalle en este artículo; baste decir que van en paralelo con planes similares del resto de los países con industria nuclear.

Sería pertinente comentar en este epígrafe que, aparte del programa mencionado, todas las centrales nucleares españolas han seguido, en una medida o en otra, programas de modernización, me-



► **Figura 6.** Central nuclear José Cabrera (PWR). Situada en Zorita de los Canes, es la primera de las españolas; se hizo crítica en junio de 1968 y su explotación comenzó en febrero de 1969. Es una instalación idónea para la evaluación de la *gestión de la vida remanente*.

les del entorno occidental, pero que esencialmente tiene otra naturaleza. Sin embargo, es éste un entorno de máxima solidaridad internacional, que es algo obviamente imprescindible como componente de la inevitable y necesaria armonización de requerimientos y normativas a nivel internacional en el tema de la gestión de la vida remanente.

4. Situación en España

En el parque nuclear español hay dos centrales cuya edad pasa de 25 años, otras dos que rondan la decena sin llegar, y cinco más que la sobrepasan, aunque por poco. Es decir, el

do, con un programa adecuado de gestión de vida, es decir vigilancia, control, mantenimiento, e investigación, puede extenderse fácilmente a 60 años. El organismo regulador, el Consejo de Seguridad Nuclear, todavía no se ha pronunciado mediante ningún documento legal sobre este tema, aunque las presentaciones y discusiones públicas han sido frecuentes e indican la existencia de criterios básicamente coincidentes en los temas técnicos, por cuanto parece entenderse que la misión del organismo regulador ha de ser garantizar el funcionamiento, en condiciones de

jas de mantenimiento, sustitución de componentes, etcétera. El caso citado de Santa M^a de Garoña es un buen ejemplo. También habría que incluir aquí la política de cambios de generadores de vapor y tapas de vasijas en las centrales nucleares de Almaraz, Ascó y Vandellós II. Un caso que merece una mención especial fue el de la central nuclear de Zorita, la más antigua de todas las españolas, puesto que su autorización de puesta en marcha fue concedida en el año 1968. En ella, y como consecuencia del requerimiento del CSN para la realización de un Programa de Evaluación Sistemático (análogo al SEP exigido por la US Nuclear Regulatory Commission a las centrales nucleares americanas más antiguas), se realizaron a lo largo de los años 1982-83, y luego en 1985, una serie de reformas y mejoras muy profundas que afectaron entre otras áreas al sistema de refrigeración de emergencia, a la sala de control, al sistema de ali-

mentación eléctrica exterior (incluyendo un grupo diesel adicional), procedimientos de inspección de la vasija, y otros cambios de menor alcance.

5. Conclusiones

Como resumen de todo lo dicho, parece que queda claro que las centrales nucleares, como cualquier otra instalación industrial en funcionamiento, sufren un desgaste con el tiempo al que hay que prestar atención. Parece también claro que si de la vigilancia y control establecido —que ha de ser todo lo riguroso que sea necesario— se desprende que la central está en buenas condiciones, no sería razonable atenerse a un frío número normativo, por más que disponga de todas las bendiciones legales, para no seguir disponiendo de la capacidad de la central. O dicho de otra manera, sería muy conveniente disponer de una normativa lo suficientemente flexible como para permitir el funcionamiento

de las instalaciones que demuestren estar en condiciones de seguridad; y por supuesto la existencia de una directiva del organismo regulador, del estilo de la Licence Renewal Rule emitida por la NRC de USA en 1995, siempre parece aconsejable.

Hace falta, no obstante, proceder con gran cautela, ya que por más que se cuide una instalación, como reza el viejo dicho, “el tiempo no pasa en balde”, siempre cabe la posibilidad de un *unexpected phenomenon*, como lo llaman nuestros colegas anglosajones. ¿Podríamos citar como ejemplo, tomado en préstamo de otro capítulo, las 173 grietas *no esperadas* de la tapa de la vasija de Zorita? Es muy difícil, por no decir imposible, prever todo tipo de posibilidades de fallos hijos del tiempo; pero existe un recurso que nunca falla: la excelencia en la formación de los equipos humanos de explotación de la central. ☞

Presente y futuro de la robótica nuclear

La aplicación de la robótica en el sector nuclear ha llevado al desarrollo de tres generaciones de robots, progresivamente más complejos, utilizables para la vigilancia e inspección, así

como para el mantenimiento de las instalaciones nucleares. En este artículo se detallan los trabajos en proceso de realización en España y el alcance de cada uno de ellos.

1. Introducción

Antes de considerar los aspectos específicos de la robótica nuclear parece razonable detenerse brevemente en los conceptos básicos de la robótica. No existe una definición de robot aceptada universalmente. El RIA (Robot Institute of America) lo define como: "Manipulador multifuncional programable diseñado para mover materiales, componentes o herramientas especiales, siguiendo movimientos variables programados, para realizar una variedad de tareas".

Esta definición es restrictiva y hace referencia a la robótica industrial. De hecho, algunos autores han llegado a proponer que la robótica sea considerada como parte de las tecnologías de la fabricación, ya que sectores tales como los del automóvil, transformados metálicos, componentes y sistemas electrónicos, productos químicos e industria del plástico, etcétera, han incorporado a sus procesos el uso de robots industriales de forma extensiva. De los más de 4.500 robots instalados en

España, los dos primeros sectores citados –automóviles y transformados metálicos– representan más del 80% del total de las instalaciones robotizadas, y la situación es análoga en el resto de los países desarrollados.

Sin embargo, los últimos desarrollos y aplicaciones de la robótica están dando lugar a una concepción de los robots que va más allá de los procesos de fabricación. Así McKerrow (1986) considera que "un robot es una máquina que puede ser programada para realizar una variedad de trabajos, de la misma forma que un ordenador es un circuito electrónico que puede ser programado para hacer una variedad de cálculos". Esta definición, con tal de utilizar los términos programabilidad y variedad de trabajos en un sentido amplio, puede ser aplicada a un gran conjunto de sistemas, desde el clásico manipulador industrial hasta los robots móviles, pasando por los más sofisticados equipos de teleoperación.

En esencia, un robot está integrado por el siguiente conjunto de sistemas:

– *Sistema mecánico*. Responsable de la interacción con el entorno y de realizar la tarea específica; está constituido por subsistemas tales como vehículo, brazos y articulaciones, muñecas y herramientas, sistema de transmisión de potencia, etcétera.

– *Sistema eléctrico*. Para el robot tradicional, lo integran los actuadores eléctricos, el ordenador de control, las interfases y las fuentes de alimentación. En el caso de actuadores hidráulicos o neumáticos, éstos son controlados mediante válvulas electrónicas.

– *Sistema de control*. En este sistema los comandos de alto nivel, que representan las órdenes a ejecutar por el robot, son transformados en referencias para los actuadores. Estas referencias permiten estabilizar el movimiento, utilizando para ello los oportunos algoritmos de control.

– *Sistema sensorial*. Se responsabiliza de monitorizar el estado del

* Miguel Bielza Díaz-Caneja (Endesa); Pío Carmena Serveri (AMYS); Jesús Gómez Santamaría (Iberdrola); Julio González Fernández (Nuclenor); José Antonio Izquierdo Mendoza (C.N. Cofrentes); Fernando Linares Pintos (ENSA); Alfonso Martínez González (CASA); Alfredo Muntión Ruesgas (C.N. Sta. María de Garoña); Miguel Ángel Serna Oliveira (CEIT).

robot, dependiendo de la aplicación y del entorno. Incluye, por tanto, sensores internos para medidas de posición, velocidad, fuerza, etcétera; y sensores externos que abarcan visión, sonido, tacto, temperatura, etcétera.

La complejidad del robot puede incrementarse incorporando sistemas de planificación y definición de procesos, dando lugar a lo que es conocido por *robótica inteligente*. Aparecen así conceptos como fusión sensorial, que busca la interpretación *inteligente* de la información sensorial redundante; modelización, tanto en lo referente al mundo del robot como a la tarea a realizar; planificación de trayectorias, incluyendo los procesos de agarre de objetos y tratamiento de colisiones, etcétera.

Son estos desarrollos los que han permitido a la robótica introducirse en el campo de los servicios. De esta forma, junto a las aplicaciones industriales tradicionales de los robots, la robótica ofrece hoy día, o intenta ofrecer, soluciones en sectores tan variados como: agricultura, medicina,

construcción, minería, energía, defensa, etcétera.

El campo nuclear no ha sido ajeno a estos desarrollos. Más aún, el uso de sistemas mecánicos operados remotamente para realizar tareas tales como corte de tuberías, soldadura, inspección y reparación de tubos en generadores de vapor, inspección de tuberías mediante ultrasonidos para la detección de grietas, etcétera, ha sido frecuente desde los años 70. Sin embargo, han sido fundamentalmente los accidentes de Three Miles Island (TMI) y Chernóbil los que han llevado a planteamientos de uso más extensivo de los sistemas robóticos modernos.

El incidente de la central de TMI en 1979 representó una oportunidad única para el desarrollo y ensayo de diferentes sistemas robóticos. El más conocido es quizás el Rover 1 (figura 1), un robot móvil diseñado por William Whitaker en la Universidad de Carnegie-Mellon, que fue utilizado para la obtención de fotografías y lectura de niveles de radiación, así

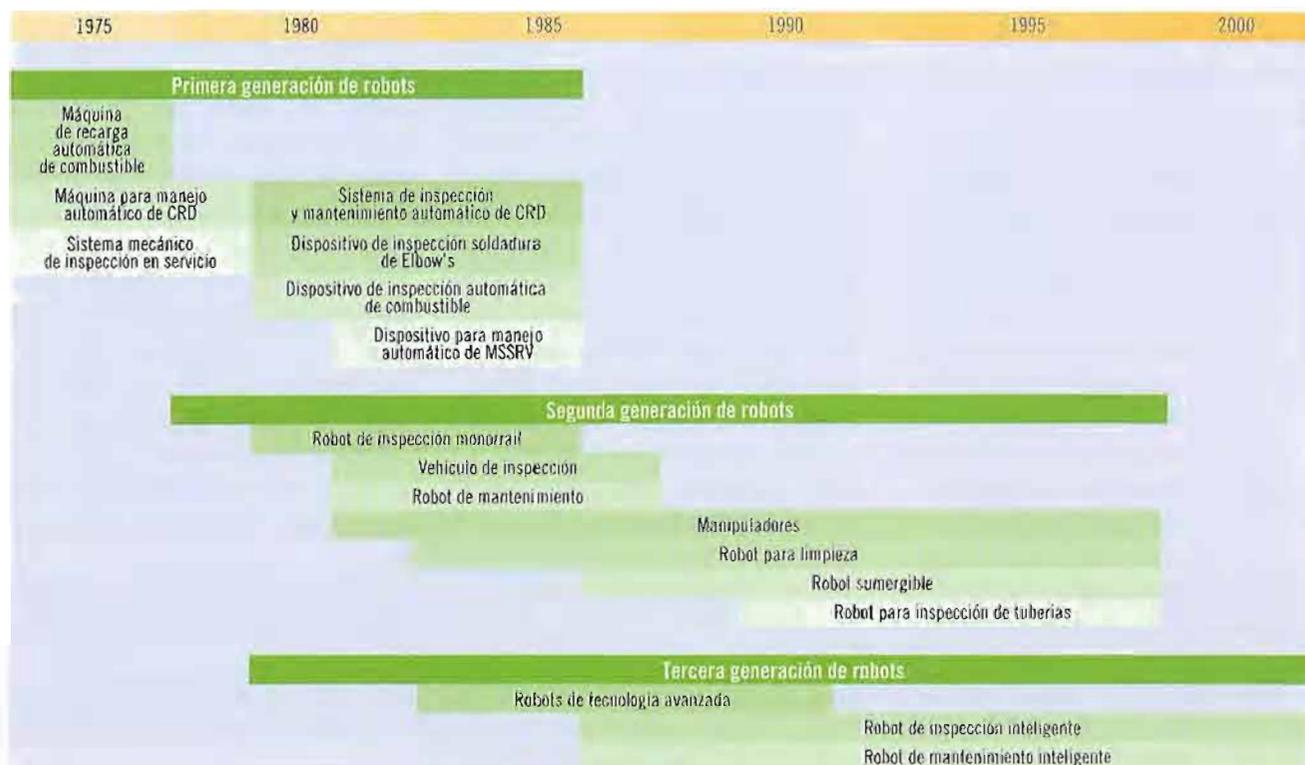
como para la realización de determinadas tareas de limpieza.

La incorporación de robots en el entorno nuclear precisa una metodología específica, aunque en parte sea común con otras aplicaciones. La experiencia indica que en primer lugar deben analizarse las necesidades específicas de las instalaciones y su posible robotización; ello con independencia de la existencia o no en el mercado del robot específico necesario.

Definidas las tareas objeto de una posible robotización, se inicia la fase de definición de los requisitos y especificaciones técnicas que debe satisfacer el robot. Deben darse respuestas a cuestiones que afectan, sin ser exhaustivas, a:

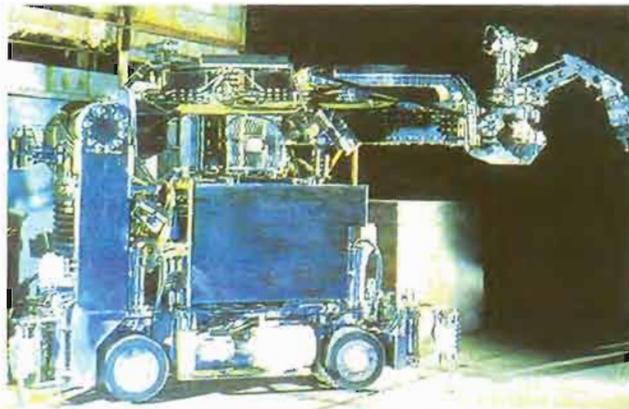
- *Sistema mecánico.*
 - Robot móvil: dimensiones, peso, características de las zonas de acceso.
 - Manipulador y herramientas: necesidad, pesos a manipular, complejidad de la tarea.
- *Sensores.*
 - Entorno ambiental: medidas a obtener, precisión necesaria, etcétera.

► Tabla 1. Generaciones de la robótica nuclear





► Figura 1. Rover I, vehículo de inspección remota utilizado en la siniestrada central nuclear de TMI-II.



► Figura 2. Telemanipulador ROSA de Westinghouse.



► Figura 3. Detalle de uno de los brazos del robot ROSA de Westinghouse.

- Telemanipulación: visión 3-D, control de fuerza, sensores de proximidad.
- Ámbito de operación: niveles de radiación, temperatura, humedad.
- Control y consola de operación.
 - Autonomía y teleoperación: nivel de inteligencia de los sistemas, distribución del procesamiento.
 - Comunicaciones: tipo de enlace, anchuras de banda, soporte físico, posibilidad de utilizar radio.
 - Transferencia de datos: velocidad necesaria, información procesada localmente, información a procesar por el operador.

Finalmente se ha de realizar el análisis coste-beneficio de la solución robotizada. Dicho análisis, aunque responde a criterios que varían con el tiempo y las circunstancias, ha de tener en cuenta los be-

neficios económicos derivados del robot, por un lado, y los costes inducidos. En este sentido, se puede apuntar el siguiente esquema:

- Beneficios.
 - Reducción de dosis individuales y colectivas.
 - Aumento de la disponibilidad de las instalaciones.
 - Repetitibilidad en la calidad del trabajo.
 - Reducción de residuos.
- Costes.
 - Precio de compra o desarrollo del robot.
 - Mantenimiento.
 - Entrenamiento de operarios.
 - Gastos de descontaminación del robot.
 - Personal de soporte.

En este sentido, la empresa norteamericana PSE&G (Public Service Electric and Gas Company) ha proporcionado algunos datos de interés (Roman, 1991). Desde

1987 ha realizado un uso extensivo de sistemas robóticos en sus centrales nucleares Salem (2-PWR) y Hope Creek (1-BWR), llegando a la conclusión de que por cada dólar invertido en robótica el ahorro obtenido se aproxima a los tres dólares.

A continuación se presentan los desarrollos robóticos más importantes, tanto en los países pioneros en su diseño y utilización, es decir Japón y EEUU, como en España. Se concluye con una referencia a las aplicaciones futuras de la robótica.

2. Desarrollos realizados y áreas de aplicación

Desde una perspectiva histórica (tabla 1), puede observarse que en los primeros años los robots desarrollados para las instalaciones nucleares eran monofuncionales. Es el caso de los equipos de recarga

► Tabla 2. Categorías y aplicaciones de la robótica nuclear

Categoría	Ejemplos de aplicación
Monitorizado	Niveles de radiación, temperatura y humedad relativa, ruido, estado de equipos (fugas, vibración).
Vigilancia	Seguridad, observación de operarios en zonas controladas, estudios de tendencia.
Inspección	Situación de válvulas, inspección por ultrasonidos, soldaduras.
Manipulación	Intervenciones en válvulas, cambio de filtros, transporte de equipos y herramientas, pintura, limpieza de depósitos y piscinas, soldadura, retirada de calorífugados.
Respuesta a accidentes	Lucha contra el fuego, limpieza de vertidos, recuperación de objetos extraños.

automática y manipulación de barras de combustible, o de inspección de componentes. Constituyen los robots denominados de primera generación. Su desarrollo sigue presente con la incorporación de las innovaciones derivadas de los avances tecnológicos.

Desde mediados de los 70, junto con el desarrollo promovido por las nuevas tecnologías en campos tales como la electrónica y los ordenadores, surgen los robots multifuncionales o de segunda generación. Ejemplos de esta familia son los robots de inspección móviles o basados en monorraíl, los manipuladores teleoperados, los sistemas de inspección de tuberías, los robots sumergibles, etcétera.

La tercera generación de robots, cuyo nacimiento puede situarse a finales de los 80, nace con el avance de la microelectrónica, cuyos más significativos desarrollos vienen representados por los microprocesadores y los sensores basados en la tecnología del silicio. La posibilidad de embarcar una gran capacidad sensorial y de procesamiento, concentrada o distribuida, ha dado lugar a lo que puede denominarse la robótica inteligente. La palabra clave es autonomía, referida principalmente a la toma de de-

cisiones, en base a la información sensorial.

Por lo que se refiere a las aplicaciones, los robots utilizados en las instalaciones nucleares pueden agruparse en dos grandes familias: robots de vigilancia/inspección y robots de mantenimiento. Los primeros tendrían como misión exclusiva la de transportar instrumentos, tales como sensores o cámaras de visión, a lugares en los que es aconsejable evitar la presencia de seres humanos, bien por la dificultad material y razones ambientales, bien por objetivos de reducción de dosis.

Por su parte, los robots de mantenimiento actúan sobre el entorno, realizando funciones tales como limpieza, soldadura, manipulación, corte, etcétera. Están basados en algún tipo de manipulador que simula las funciones de los brazos y manos del ser humano, aportando una mayor rigidez, fuerza y precisión.

F.E. Gelhaus y

H.T. Roman (1990) hacen una clasificación basada en aplicaciones reales que se recoge en la tabla 2. En las tres primeras categorías la actitud del robot frente al entorno es pasiva, mientras que en las dos últimas el robot interactúa con la instalación.

A continuación, de forma esquemática y sin pretender recoger todos los desarrollos disponibles en el mercado, se presentan algunos de los robots nucleares más conocidos. Las figuras 1, 2 y 3, de la página anterior, corresponden a telemanipuladores, la figura 4 a un robot submarino, la 5 a uno móvil y la 6 a un robot de raíl.

Existen otros robots con aplicaciones en instalaciones nucleares a los que se hace referencia en la literatura: Cecil (Paula, 1992; Roman, 1991), Scavenger (Paula, 1992; Roman, 1991), Roger (Paula, 1992), Navmaster (Paula, 1992), Robin (Robotic Insect) (Byrd and DeVries, 1990), Mavis (Magnetically Attached Vessel Inspection System) (Kochan, 1992), Faust (Kochan, 1992), OAO-150 (Fogle, 1992), RMI-3 (Fogle, 1992).

3. Proyectos de I+D españoles

Durante los últimos años, el sector nuclear español ha planteado y abordado el desarrollo de sistemas robóticos con vistas a su utiliza-



► Figura 4. Robot submarino MiniRover MKII.

ción en las centrales. De forma esquemática, los trabajos en marcha pueden agruparse en tres grandes proyectos:

- Aplicaciones automáticas al mantenimiento nuclear para la reducción de dosis.
- Manipuladores subacuáticos para inspección y reparación de vasija e internos.
- Sistemas teleoperados de inspección y mantenimiento para instalaciones nucleares y radiactivas.

A continuación se presenta una descripción detallada del alcance de los desarrollos en proceso de realización.

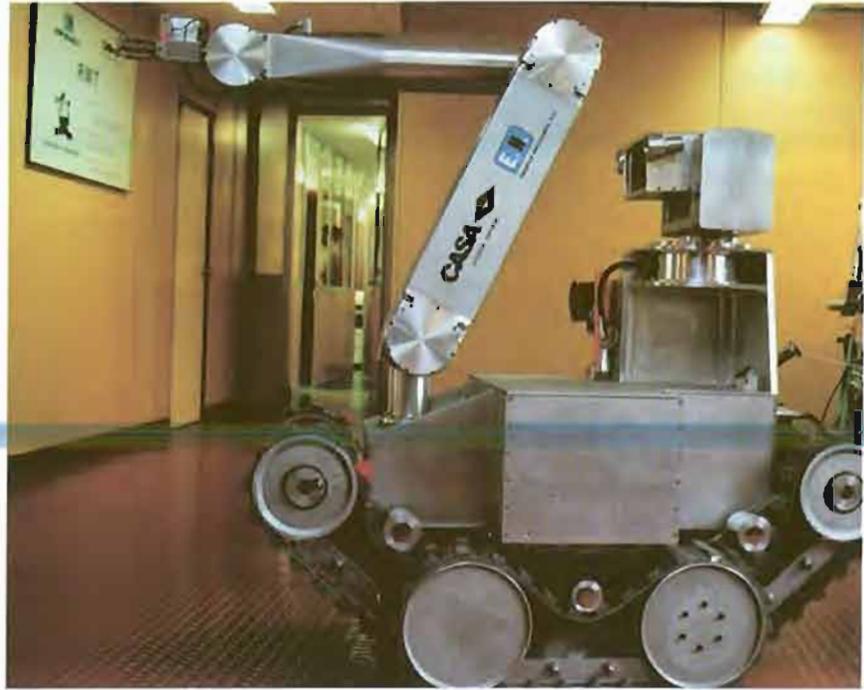
3.1. Aplicaciones automáticas al mantenimiento nuclear

El objetivo principal de este proyecto¹ consiste en la automatización selectiva de operaciones de mantenimiento en centrales nucleares.

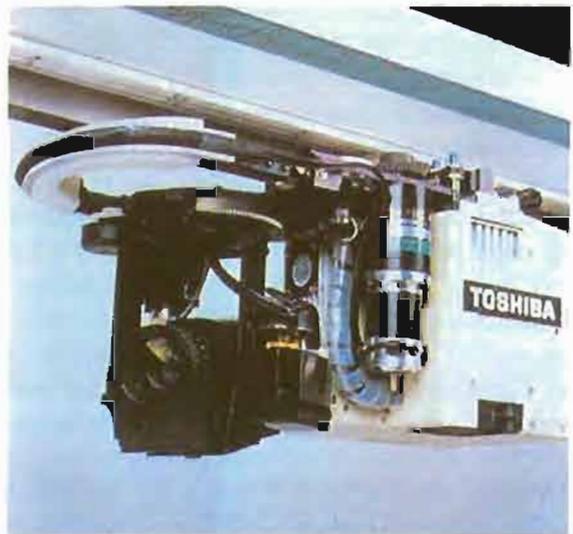
Los sistemas a desarrollar se dividen en dos grupos. El primero hace referencia a un conjunto de herramientas y equipos que se adaptarán a un robot comercial utilizado en operaciones en las cajas de agua de los generadores de vapor. El segundo grupo comprende una serie de sistemas autónomos que se utilizarán en otras zonas relacionadas también con el circuito primario.

En el primer grupo se encuentran los siguientes sistemas:

- *Equipo para colocación/desmontaje de obturadores (nozzledams).* El proyecto contempla el desarrollo de una herramienta que se acopla automáticamente a las tapas y permite el montaje y fijación de las mismas.
- *Equipo para la realización de ensayos no destructivos (corrientes inducidas).* Se pretende adaptar la manipulación de sondas de ECT y UT y los sistemas de adquisición



► Figura 5. Robot móvil Proyecto RMT.



► Figura 6. Robot de raíl para inspección (Mark II).

de datos correspondientes al robot comercial de forma que tanto el posicionamiento como la adquisición de datos se haga desde una misma estación de operación.

- *Equipos para operaciones especiales.* Pretende adaptar al robot comercial un cabezal de electrode-sintegración (MDM) para suprimir restos de herramientas y permitir reanudar la operación mecánica que estuviera en curso.

Los sistemas del segundo grupo son los siguientes:

- *Equipo para inspección y recuperación de objetos caídos al circuito.* Tiene por finalidad desarro-

llar un equipo para la recuperación de objetos metálicos y no metálicos caídos al circuito, actuando desde las plataformas de acceso a las cajas de agua. El equipo consistirá en una lanza flexible dotada en su extremo de sistemas mecánicos y magnéticos para recuperar diferentes tipos de objetos, así como de cámaras y focos con los accionamientos correspondientes.

- *Equipos para cambios de CRDs en vasijas BWR.* La extracción de CRDs en vasijas BWR y su traslado desde el fondo de la vasija (pozo seco) al taller de descontaminación conlleva una serie de opera-

¹ Aplicaciones automáticas al mantenimiento nuclear para la reducción de dosis (Proyecto PIE No. 041049, participan DTN, centrales nucleares y Enwesa).

ciones que reportan una dosis relevante. La actividad que se pretende desarrollar abordará los siguientes temas:

- Mecanismos automatizados de soporte y extracción de cartelas.
 - Mecanismos automatizados de aflojado-apretado de tornillos.
 - Automatización de las maniobras de extracción y volteo del CRD.
- *Equipos para soldadura de tapones a tubos de los generadores de vapor.* Esta actividad contempla la colocación automática de tapones soldados en los tubos del haz tubular de los generadores de vapor. La operación será realizada empleando un robot comercial. El robot será introducido y posicionado en la caja de aguas (figura 7) del generador de vapor, contemplándose los siguientes desarrollos:
- Máquina y herramienta para el escariado del alojamiento de los tapones.
 - Máquina de soldar tapones.
- *Equipo de limpieza de la cubeta en la piscina del reactor.* Con este equipo se trata de disponer de un mecanismo automático de limpieza, capaz de ser maniobrado desde el piso de recarga, el cual una vez emplazado en su lugar, sin que sea preciso introducirse en la poceta, proceda al barrido sistemático del suelo y a la absorción de posibles partículas.
- *Sistema de corte y soldadura de calentadores del presionador.* Pretende el desarrollo de un brazo polar que fijado a la tubería accede a las tres circunferencias de resistencias situadas en la parte inferior del presionador. En este posicionador se pretende colocar equipos de corte y soldadura para realizar el cambio de calentadores.

3.2. Manipuladores y sistemas subacuáticos para inspección y reparación de vasija, internos y piscinas de combustible

Desde hace años el sector nuclear español ha abordado el desarrollo de equipos robotizados



► Figura 7. Proyecto de aplicaciones automáticas al mantenimiento nuclear. Inspección de la caja de aguas de un generador de vapor.

para su utilización en vasija, internos y piscinas de combustible.

Entre las realizaciones ya operativas caben destacar las siguientes:

– *Sistema de inspección de elementos combustibles (SICOM)*² (figura 8). Los elementos combustibles de las centrales nucleares sufren una evolución durante su tiempo de vida en operación. Esta evolución se manifiesta por variaciones dimensionales, tanto en su estructura como en las barras que componen cada elemento, y por la aparición de óxido en la superficie externa de las barras.

El SICOM permite la inspección de elementos combustibles bajo agua y a control remoto. Las medidas dimensionales se obtienen a través de inspección visual mediante una cámara de televisión y empleando técnicas de visión artificial. El espesor de la capa de óxido se mide mediante técnicas de corrientes inducidas.

El equipo mecánico de SICOM está formado por un mástil, por el que se desplazan independientemente los dos módulos de inspección, y por una base giratoria don-

de se apoya el elemento combustible para poder examinar todas sus caras.

– *Equipo de inspección de tuberías (SUIT)*³. Las tuberías del circuito primario de las centrales nucleares requieren ser examinadas por ultrasonidos. Con este objetivo se ha desarrollado un equipo que aporta una serie de innovaciones con respecto a los existentes en el mercado. El equipo mecánico se sujeta a las tuberías a inspeccionar mediante cuatro ruedas magnéticas. Presenta la ventaja de permitir el giro independiente y alrededor de su propio eje de cada uno de los palpadores de ultrasonidos que monta.

Básicamente, el equipo está compuesto por tres subconjuntos: carro principal, brazo transversal y módulos de inspección. El carro principal está formado por un bastidor y por cuatro ruedas magnéticas motorizadas que permiten el giro de todo el equipo alrededor de la tubería. En el caso de tuberías de acero inoxidable es necesario montar un cincho de acero al carbono en la tubería para que se pueda sujetar el equipo.

² Proyecto desarrollado por Iberdrola, Enea y Tecnatom.

³ Proyecto desarrollado por Tecnatom.



► Figura 8. Proyecto SICOM. Sistema de inspección de elementos combustibles.

El brazo transversal se monta en la parte delantera del carro y permite el desplazamiento en sentido perpendicular a la soldadura a inspeccionar de los módulos de inspección. Pueden montarse hasta cuatro módulos de inspección, tres de ellos giratorios.

– *Brazo robotizado multipropósito para la inspección, mantenimiento y reparación de componentes críticos*⁴. El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un brazo robotizado sumergible, escalable y teleoperable para uso en operaciones de inspección y mantenimiento de componentes nucleares sometidos a condiciones ambientales agresivas, como la alta radiación, humedad, disposición subacuática, etcétera.

Actualmente, las tareas de inspección por ensayos no destructivos

(END) se realizan con máquinas automatizadas de un diseño específico para cada aplicación. Un brazo robotizado podría cubrir las aplicaciones actuales mejorando los tiempos de instalación, gastos de transporte, mantenimiento y descontaminación, ya que serían necesarios menos módulos e instrumentos para una inspección. Por otra parte, el modo teleoperado abre aplicaciones en la que los sistemas automáticos no son viables; es el caso

de recogida de herramientas, posicionamiento en zonas de difícil acceso, desensamblado de equipos, ayuda a otros sistemas mediante el posicionado apropiado de cámaras de visión, etcétera.

El robot deberá contemplar modos de operación tanto programables como teleoperados. El primero permitirá la inspección volumétrica por END mediante trayectorias repetibles para la creación de un barrido de inspección. El modo teleoperado suministrará las capacidades de intercambio de herramientas, inspección visual, instalación y desmantelamiento de otros equipos, y una respuesta rápida ante inspecciones o ensayos no previstos.

3.3. Robots móviles teleoperados para inspección y mantenimiento

Equipos Nucleares (ENSA) y la División de Espacio de Construcciones Aeronáuticas (CASA) que

habían venido participando en diversos programas de robótica, en sus respectivas áreas nuclear y espacial, decidieron acometer conjuntamente, a mediados de 1992, el desarrollo de un robot móvil de inspección y mantenimiento para centrales nucleares y otras industrias con entornos considerados de riesgo. Surgió así el proyecto RMT (Robot Móvil Teleoperado).

Complementariamente, Iberdrola y Nuclenor, contando con la colaboración del Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa (CEIT), iniciaron contactos con las centrales nucleares para determinar las necesidades y especificaciones en materia de robótica nuclear. Surgió así el desarrollo de un primer prototipo de laboratorio de robot neumático, Robicen I, capaz de moverse por superficies verticales.

Con los antecedentes descritos, Iberdrola y Endesa, contando con la colaboración de AMYS, decidieron iniciar el desarrollo de un proyecto de gran alcance (SRT-Sistemas Robóticos Teleoperados), que integrara la experiencia de los dos prototipos anteriores. Se constituyó para ello un grupo de investigación y desarrollo formado por las empresas ENSA y CASA, y los centros de investigación CEIT y CIEMAT. El grupo, que cuenta con el asesoramiento de diferentes departamentos universitarios, ha abordado, en primer lugar, el diseño y construcción de dos prototipos: un robot móvil de carril para tareas de vigilancia e inspección, y un robot neumático de muy pequeñas dimensiones (Robicen II), con los mismos propósitos pero diferentes campos de actuación.

A continuación se describen brevemente los robots mencionados, así como los objetivos y realizaciones del proyecto SRT en fase de realización.

– *RMT (Robot Móvil Teleoperado)*. El cometido fundamental del RMT es asistir a los operadores en

⁴ Propuesta de Proyecto BRJTE de Tecnam y otros socios.

labores de inspección y apoyo en ambientes hostiles para reducir así las dosis de radiación del personal profesionalmente expuesto y, consecuentemente, mejorar la calidad del servicio. Las tareas para las que ha sido diseñado son: preparación de operaciones; asistencia remota a operadores; inspección remota; desmantelamiento de equipos; limpieza y descontaminación; recogida y almacenamiento de residuos; apantallamientos; y manipulación con la ayuda de elementos auxiliares. Para cumplir las funciones descritas, RMT está constituido por tres subsistemas: estación de teleoperación, robot móvil de orugas desplegables, y subsistema de comunicaciones.

– *Robicen 1* (Briones et al, 1994). Es un robot móvil de inspección cuyo diseño está marcado por la especificación de ser capaz de subir paredes. Su configuración motriz está basada en actuadores neumáticos, que presentan una excelente relación potencia/peso, y ventosas de vacío. La cabeza sensora, que integra visión estereoscópica, sensores de temperatura y humedad, y micrófonos, está montada sobre un sistema elevación-acimut con un diseño que permite su conexión mecánico-eléctrica a la plataforma móvil en forma muy sencilla.

– *SRT (Sistemas Robóticos Teleoperados)* (figura 9). El objetivo principal del proyecto SRT, iniciado en 1995, es el desarrollo de sistemas robóticos teleoperados para apoyo en las operaciones de inspección, vigilancia y mantenimiento de instalaciones nucleares y radiactivas. Frente a los robots de inspección o manipulación existentes en el mercado, en los que se dan combinaciones rígidas de instrumentación, manipulación y sistema motriz, en este proyecto se busca un diseño modular y flexible, con un nivel alto de telepresencia, resistencia a agentes externos y fácilmente descontaminable.

Para la definición de especificaciones se ha seguido un doble camino. En primer lugar se han analizado los trabajos que se llevan a cabo

en las instalaciones nucleares y que implican la mayor parte de las dosis colectivas de los trabajadores profesionalmente expuestos. En esencia existen dos tipos de trabajos:

- Trabajos puntuales en zonas de alta tasa de dosis, que suponen altas dosis individuales tanto en la realización como en la preparación y control del trabajo.
- Trabajos repetitivos en zonas de nivel bajo-medio de tasa de radiación, que suponen contribuciones importantes de las dosis colectivas.

En segundo lugar, los responsables del proyecto elaboraron un cuestionario dirigido a las centrales nucleares y que fue presentado y rellenado individualmente con cada una de ellas.

Como resultado de las acciones anteriores, se han abordado en una primera fase del proyecto los desarrollos de dos sistemas robóticos teleoperados:

Robot de Carril

Las centrales manifestaron su interés por el desarrollo de un sistema robótico que moviéndose por un carril permitiera inspeccionar zonas y cubículos normalmente no accesibles a los trabajadores durante operación.

El sistema, ya desarrollado y en fase experimental en la central nuclear de Cofrentes, consiste en un vehículo de tracción eléctrica –unidad motriz– que se mueve por un carril y que transporta diversos tipos de sensores y cámaras albergados en una estructura –cabeza multisensora–. La cabeza multisensora es fácilmente desmontable, pudiendo la unidad motriz transportar diferentes tipos de cargas útiles –manipulador ligero, otras configuraciones de sensores, etcétera–. El robot móvil es controlado a distancia desde la estación de teleoperación por un operador.

La función principal que realizará el robot en su configura-

ción inicial será la de inspección visual, acústica, medición de la temperatura, humedad y radiación del área de la central nuclear por donde discurra el carril.

El sistema global está formado por cuatro subsistemas:

– *Carril*. Tiene cuatro funciones: vía para el movimiento del robot móvil; soporte del robot móvil; transmisión de la potencia eléctrica; y enlace de comunicaciones. En este último campo, la solución dada presenta una innovación tecnológica relevante, ya que todas las comunicaciones entre el robot y la estación de teleoperación están basadas en una guía de onda de alta frecuencia.

– *Unidad motriz*. Es la responsable de soportar, mover y suministrar potencia eléctrica a la cabeza multisensora; y proporciona su conexión al enlace de comunicaciones con la estación de teleoperación.

– *Cabeza multisensora*. Basada en un sistema con movimientos de elevación y acimut, lleva los siguientes sensores: cámaras de visión, sensor de radiación direccional, dosímetro ambiental, sensores de temperatura y humedad, e inclinómetro. Adicionalmente se ha desarrollado un sistema de análisis espectral de sonido y ultrasonido, que será integrado en la cabeza una vez que se haya procedido a su calibración (la central nuclear de Santa María de Garoña tiene instalado en tres cubículos de la central un prototipo de este sistema para su validación).

– *Estación de teleoperación*. Sus funciones son: controlar el funcionamiento completo del robot; mostrar al operador el estado de funcionamiento del conjunto; presentar al operador las imágenes y mediciones de los sensores; almacenar datos; y análisis de tendencias.

El robot está especialmente diseñado para ser totalmente



► Figura 9. Sistema robótico teleoperado.

modular. Así, tanto la unidad motriz respecto del carril como la cabeza sensora respecto de la unidad motriz, pueden ser acopladas y desacopladas con gran facilidad, permitiendo la utilización del robot en distintas zonas de la central. La estructura del carril, que también es modular y puede instalarse durante las paradas, permanece fija sobre las zonas de interés. Llegado el momento de la inspección, el robot, que habitualmente se encontrará en zonas apantalladas o desmontado, accede por el carril y realiza el recorrido, bien siguiendo las órdenes del operador, bien de forma predefinida. De esta forma, un mismo sistema robótico puede dar servicio a varios cubículos y la cabeza sensora puede dotarse de más o menos instrumentación según los objetivos de la inspección y los niveles de radiación de la zona a inspeccionar.

Robot Neumático para Inspección por Ultrasonidos (Robicen II)

Con la experiencia desarrollada en la construcción de Robicen I, el proyecto SRT contempla el diseño de un sistema móvil de pe-

queñas dimensiones para la inspección de depósitos por ultrasonidos. El sistema estará integrado por dos elementos auxiliares y por el robot neumático de inspección propiamente dicho.

Los elementos auxiliares tienen por objeto el transporte y colocación del robot neumático de inspección adosado al depósito. En el diseño conceptual se prevé la utilización de un robot móvil de orugas de pequeñas dimensiones en conjunción con un mecanismo de aproximación basado en estructuras despleables.

Por su parte, el robot neumático de inspección, al igual que el resto de los sistemas teleoperados, estará integrado por el sistema motriz, el cabezal de inspección y el sistema de control remoto. En el momento presente se cuenta ya con el desarrollo de un prototipo de laboratorio del sistema motriz, habiéndose obtenido unos resultados satisfactorios.

Robot básico de inspección

Junto a los robots de raíl y neumático, el proyecto SRT contempla el desarrollo de un robot básico de inspección. Concep-

tualmente, dicho robot estará constituido por una estación de teleoperación y un robot móvil basado en orugas, interconectados mediante un único enlace bidireccional formado por una sola fibra óptica multimodo.

La unidad de teleoperación tendrá unas características, en lo que a *hardware* y concepción se refiere, similares a las del robot de raíl, facilitando de esta forma su aprendizaje por los operarios. Únicamente los aspectos relativos al guiado del robot deberán ser cambiados. En este sentido, se contempla que la estación de teleoperación informe al operario, mediante la apropiada representación gráfica y numérica, de la situación del robot. Asimismo, el proyecto abordará el desarrollo de técnicas de navegación avanzada, basadas en telemetría láser y visión artificial, dotando al operador de sistemas de ubicación y guiado automáticos; para ello el sistema contempla la utilización de información sensorial *on line* en combinación con una base de datos con información geométrica de los cubículos y zonas de la central.

Por su parte, el diseño conceptual del robot móvil contempla una estructura modular, integrada por plataforma móvil, cabeza multisensora y enlace de comunicaciones. La plataforma contará con un sistema de locomoción basado en cuatro orugas orientables, con gran capacidad de adaptación a los diferentes entornos y posibilidades para salvar obstáculos tales como escaleras, tuberías, etcétera.

Por la propia concepción del proyecto SRT, la cabeza multisensora del robot básico de inspección será la desarrollada para el robot de raíl fundamentalmente. Con el objeto de facilitar el guiado del robot móvil, la cabeza contempla la posibilidad de incorporar sistemas de visión estereoscópica y telemetría.

Finalmente, el enlace de telecomunicaciones está previsto para 5 canales de vídeo de 10 MHz, 2 canales de audio de 20 KHz y 8 canales bidireccionales de datos. Contempla un soporte físico por medio de fibra óptica multimodo y un carrito transportado por el robot con mecanismo de enrollamiento automático, basado en una junta rotativa óptica.

Sistema de telemanipulación

Durante los últimos años, la telemanipulación se ha visto enriquecida con nuevos conceptos tales como telepresencia o tele-existencia. Se trata de dotar al operador de una mayor sensación real de presencia en el entorno que está siendo manipulado. Para ello, los robots remotos son equipados con una gran variedad de sistemas sensoriales que permiten no sólo recibir información de tipo visual o auditiva, sino hacer que el operador sienta los brazos del robot remoto como si fueran sus propios brazos. El objetivo ideal, de obtener una reflexión perfecta de fuerza y posición en cualquier circunstancia, con independencia del objeto manipulado, es físicamente inalcanzable. La investigación permanece abierta, tanto desde el punto de vista teórico como experimental, y siguen apareciendo trabajos que presentan nuevos procedimientos para mejorar el tradicional control bilateral de los sistemas *master-slave*.

El proyecto SRT se ha planteado un objetivo concreto y ambicioso en el campo de la telemanipulación: el diseño de un sistema *master-slave* de bajo peso, con reflexión de fuerza, orientado a los trabajos de mantenimiento en operación. En su concepción básica, el sistema de telemanipulación a desarrollar consta de:

- Sistema *master* con estructura mecánica de plataforma Stewart (robot paralelo).
- Robot *slave* con estructura mecánica articulada, de materiales de bajo peso.
- Estación de teleoperación dotada de imagen estereoscópica de enfoque variable.

Evidentemente, el manipulador *slave* deberá estar dotado de los útiles y herramientas precisos para las tareas a realizar. Los primeros estudios de necesidades dan prioridad a los temas relacionados con reparaciones en tuberías y válvulas, y confirman la necesidad de soluciones de bajo peso y modulares.

4. Aplicaciones futuras

Aunque la robótica, en todas sus manifestaciones, tiene una larga historia en la industria nuclear, su incorporación a las instalaciones está creciendo de forma acelerada en los últimos años. Es evidente que tanto en Japón como en Estados Unidos y Europa las grandes empresas e instituciones del sector han apostado por una utilización masiva de equipos robotizados y han puesto en marcha programas y proyectos de gran alcance.

Así, la empresa Toshiba⁵ considera que "los robots son indispensables para el futuro de las instalaciones nucleares" y manifiesta "estar trabajando en el desarrollo en nuevas tecnologías como inteligencia artificial, mecanismos flexibles, y sistemas de telepresencia, todos ellos requeridos para los futuros robots". Fruto de esta decisión estratégica, la empresa ha iniciado el desarrollo de sistemas robóticos para su utilización en los siguientes entornos o áreas de trabajo:

- Centrales nucleares.
- Reactores de fusión.
- Desmantelamiento de reactores.
- Plantas de procesamiento.

H.B. Meieran (1993), vicepresidente

⁵ Toshiba, *Robotics for Nuclear Facilities*, Documento Informativo.

sidente de PHD Technologies, informa de los programas puestos en marcha recientemente y financiados en EEUU por ER&WM (Environmental Restoration and Waste Magement). Con un presupuesto total previsto de cientos de miles de millones de pesetas y cubriendo un periodo 25 años, ER&WM se propone desarrollar las herramientas que permitan descontaminar y desmantelar cientos de instalaciones y edificios obsoletos.

En Europa, el programa Telesman de la Comisión Europea se ha propuesto en los últimos años el desarrollo de sistemas avanzados de teleoperación para responder a las necesidades de la industria nuclear, tanto a nivel de fabricante como de usuario. El programa, que fue lanzado en 1989, ha contado con un presupuesto de unos 3.000 millones de pesetas. Los países y empresas que han liderado la mayor parte de la actividad de Telesman han sido Reino Unido-AEA Harwell, Francia-EDF-CEA, y Alemania-Interatom-KFK. En España, CIEMAT lideró el desarrollo de un sistema inteligente de visión de radiación y Equipos Nucleares ha tenido participación en varios proyectos.

En la actualidad, la mayor parte de los robots están diseñados para realizar trabajos muy específicos. La integración de las técnicas propias de la inteligencia artificial —sistemas expertos, redes neuronales, visión artificial, etcétera— en el campo de la robótica dará lugar a lo que ya se ha definido como tercera generación. No es un escenario lejano aquél en el que un robot de inspección, capaz de moverse autónomamente por diferentes cubículos de la planta y dotado del *software* pertinente para la toma de decisiones, basándose en la información sensorial obtenida, decida las tareas a realizar y envíe las órdenes oportunas a los robots de mantenimiento. Este escenario choca actualmente con el diseño de las centrales en servicio,

que dificulta el acceso de los robots móviles a las distintas zonas.

Junto a las posibilidades de la robótica inteligente, que dará lugar a un incremento cualitativo y cuantitativo de los robots en las instalaciones, el diseño de las nuevas centrales nucleares representará un factor clave en el uso de la robótica. Las nuevas plantas serán concebidas buscando la optimización de su operación y mantenimiento, sabiendo que, en todo

ello, los robots jugarán un papel de primer orden. Así, por ejemplo, los accesos a las diferentes zonas se diseñarán tratando de evitar las escaleras; éstas, que son muy adecuadas para los seres humanos, pero presentan grandes dificultades para un robot, serán sustituidas por rampas o elevadores operables por el robot. Asimismo, los sistemas y componentes de las centrales deberán ser susceptibles de aceptar la intervención roboti-

zada. Como ha indicado H.T. Roman, uno de los pioneros de la robótica nuclear, "ahora, cuando las demandas de nuevas plantas son bajas, es el momento oportuno para pensar en el futuro y prepararle el camino apropiado. Diseños de planta basados en la modularidad y en la estandarización pueden enfatizar la integración de robots y técnicas de la inteligencia artificial con el diseño de implantación básica de la planta".

Referencias

□ Briones, L., Bustamante, P. and Serna, M.A., 1994, *Robicen: A Wall-Climbing Pneumatic Robot for Inspection in Nuclear Power Plants*, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol 11, No. 4, pp. 287-292.

□ Byrd, J.S. and DeVries, K.R., 1990, *A Six-Legged Telerobot for Nuclear Applications Development*, The International Journal of Robotic Research, Vol. 9, No. 2, pp. 43-52.

□ Fogle, R.F., 1992, *The Use of Teleoperators in Hostile Environment Applications*, 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp. 61-66.

□ Gelhaus, F.E. and Roman H.T. (1990). *Robot Applications in Nuclear Power Plants. Progress in Nuclear Energy*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-33.

□ Kochan, A., 1992, *Robots in the Nuclear Industry. Conference Report*, Industrial Robot, Vol. 19, No. 2, pp. 15-17.

□ McKerrow, P.J. (1986). *Robotics, An Academic Discipline?*. Robotics, 2, 3, pp. 267-274.

□ Meieran, H.B. (1993), *Robots Accelerate Into New Roles*. Nuclear Engineering International, March, pp. 16-17.

□ Nakayama, R., Kubo, K., Sato, K. and Taguchi, I., 1983, *Development of Nuclear Power Plant Automated Remote Patrol System*, IFAC Real Time Digital Control Applications, Guadalajara, México, pp. 101-106.

□ Paula, G., 1989, *Robotics: Growing Maintenance Option for Utilities*, Electrical World, May 1989, pp. 65-72.

□ Roman, H. T., 1991, *Robots Cut Risks and Costs in Nuclear Power Plants*, IEEE Computer Applications in Power, July 1991, pp. 11- 15.

□ Roman, H.T. (1991). *Robots Cut Risks and Costs in Nuclear Power Plants*. IEEE Computer Applications in Power, July, pp. 11-15.

□ Schilling, R., 1992, *Telerobots in the Nuclear Industry: A Manufacturer's View*, Industrial Robot, Vol. 19, No. 2, pp. 3-4.

□ Schlüssel, K. (1983). *Robotics and Artificial Intelligence Across the Atlantic and Pacific*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. IE-30, 3, pp. 244-251.

□ Sosoka, G.V. (1985). *Third Generation Robots: Their Definition, Characteristics, and Applications*. Robotics Age, 7, 5, pp. 14-16.

□ Stone, H.W. and Edmonds, G., 1992, *Hazbot: A Hazardous Material Emergency Response Mobile Robot*, 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp. 67-73.

□ Toshiba, *Robotics for Nuclear Facilities*, Documento Informativo.

□ Watanabe, A. and Kubo, K., 1988, *Development of an Automatic Inspection Robot for Nuclear Power Plants*, 1988 IAFA International Conference on Man-Machine in the Nuclear Industry, pp. 553-558.

□ Yamamoto, S., 1992, *Development of Inspection Robot for Nuclear Power Plant*, 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, May 1992, pp. 1559-1566.

Sustitución de generadores de vapor

Los problemas de degradación de tubos en los generadores de vapor en diversas centrales nucleares con reactores de agua a presión han llevado a la sustitución de estos

equipos. En este artículo se describe la labor de evaluación y licenciamiento llevada a cabo por el CSN para controlar el proceso de cambio en Ascó y Almaraz.

1. Introducción

Diversas centrales nucleares equipadas con reactores de agua a presión, instaladas en España y en todo el mundo, han presentado desde el inicio de su operación comercial problemas de degradación de los tubos de sus generadores de vapor.

Estos problemas se han detectado en las diferentes inspecciones programadas realizadas a los tubos y como consecuencia de fugas en los mismos. Para evitar la rotura de tubos afectados más allá de unos tamaños preestablecidos de los defectos durante la operación de la central, dichos tubos se han puesto fuera de servicio mediante taponado o se han reparado mediante la instalación de manguitos.

Los criterios para taponar o reparar un tubo han variado a lo largo de la operación de las centrales españolas afectadas, siendo inicialmente los exigidos en el país origen del proyecto –basados en el espesor de pared afectado– y

modificados posteriormente para su aplicación a tipos específicos de defectos (defectos dentro de la placa de tubos y aplicación del criterio de *fuga antes de rotura* o LBB).

La aplicación del criterio de fuga antes de rotura (LBB), que permite dejar en operación tubos con defectos que exceden el criterio de profundidad pero que tienen características de orientación axial y una longitud máxima establecida, llevó asociada la necesidad de mejorar cualitativamente la capacidad de detección de fugas primario-secundario, por medio de la instalación de nuevos sistemas de detección en las unidades que lo estaban aplicando, las centrales nucleares de Ascó y Almaraz. Estos sistemas, que están basados en la detección del nitrógeno-16, isótopo de corta vida presente en el primario, permiten medir de forma continua y con gran precisión muy pequeñas fugas. Los límites de fugas fijados en las especificaciones de funcionamiento fueron bajados en las centrales citadas desde 78,9 litros/hora hasta valores que han oscilado a lo largo del tiempo y según la central entre 5 y 15 l/h, contemplándose asimismo como si-

tuación que requiere la parada de la central una subida rápida de la lectura de 3 l/h.

En las centrales nucleares de Ascó I y Almaraz I se aplicaron a escala reducida técnicas de reparación de los defectos, consistentes en instalar un manguito interior a los tubos para evitar su taponado. Una gran parte de estos tubos ha debido ser taponada en las recargas siguientes como consecuencia de defectos en la unión de los manguitos.

Los problemas de degradación de tubos que se han presentado desde el comienzo de la operación de estos equipos han sido de muchos tipos, entre los que se encuentran los debidos a corrosión bajo tensiones en el lado primario, en el lado secundario, *fretting* en la zona de las barras antivibratorias o en los precalentadores y *denting*. Esto ha llevado al aumento del número de tubos taponados en cada recarga y a la superación de los límites iniciales de taponado –10% de los tubos– en alguno de los generadores de vapor. El aumento de las degradaciones llevó a las centrales nucleares de Ascó y Almaraz a solicitar un aumento del límite de taponado al 18%, lo que fue autorizado en 1992.

* Ingeniero aeronáutico y diplomado en Ciencias Económicas, ha trabajado en Empresarios Agrupados e Inypsa, como asesor del Ministerio de Defensa en programas de I+D. Perteneció al CSN desde 1983, siendo en la actualidad subdirector de Centrales Nucleares.



► Figura 1. Transporte de uno de los generadores de vapor de la central nuclear de Ascó I.

En la tabla 1 se muestran las características de los generadores de vapor de todas las centrales PWR españolas. En la tabla 2 de la página siguiente se muestra el estado a fecha de octubre de 1995 de los generadores con indicación del número de tubos ta-

ponados para cada tipo de degradación.

Debido a los continuos problemas de degradación surgidos en estos generadores, que pueden llevar a tener que operar a potencias por debajo de la nominal a causa del número de tubos taponados, y a los

problemas de seguridad derivados de las posibles roturas de tubos degradados, ya que la velocidad de crecimiento de las degradaciones (grietas) muchas veces no es suficientemente conocida, en particular en el caso de los defectos circunferenciales y debido al hecho de que

► Tabla 1. Características de los generadores de vapor

	J. Cabrera	Ascó I/II	Almaraz I/II	Vandellós II	Trillo I
Modelo	24 (W)	D3 (W)*	D3 (W)*	F (W)	KWU
Nº de generadores	1	3	3	3	3
Arranque de la central	1968	1983/85	1981/83	1988	1988
Tubos por generador	2.064	4.674*	4.674*	5.626	4.086
Material	Inconel 600	Inconel 600 MA*	Inconel 600 MA*	Inconel 600 TT	Incoloy 800
Expansionado	Parcial	Total mecánico*	Total mecánico*	Total hidráulico	Parcial mecánico
Pre calentador	No	Si*	Si *	No	Si
Entrada de agua de alimentación	Superior	Fondo*	Fondo *	Superior	Superior
Química del secundario	Fosfatos	AVT	AVT	AVT	AVT fondo

(*) Modificados con la sustitución de los generadores de vapor.

► Tabla 2. Degradación en los generadores de vapor. Número de tubos taponados

Planta	Generadores de vapor	Thinning	Fretting barras antivibr.	Fretting precalentador	ID-OD SCC Placa de tubos	OD-SCC Placas separadoras	IGA	Otras	Total
J.Cabrera W-24	1	19	21	0	77	12	0	26	155 (5,95%)
Almaraz I W-D3	1	0	17	46	125	138	0	26	352 (7,50%)
	2	0	15	1	200	218	0	68	502(10,70%)
	3	0	10	20	154	143	0	26	353 (7,50%)
Almaraz II W-D3	1	0	2	24	201	335	0	11	574(12,30%)
	2	0	6	1	180	75	0	2	264 (5,60%)
	3	0	0	30	46	60	1	3	140 (3,00%)
Ascó I* W-D3	1	0	1	18	158	547	0	18	742(15,90%)
	2	0	20	12	153	278	0	5	468(10,00%)
	3	0	14	0	65	565	0	10	656(14,00%)
Ascó II W-D3	1	0	6	0	22	463	0	14	505(10,80%)
	2	0	2	0	55	264	0	16	337 (7,21%)
	3	0	3	0	105	384	0	4	496(10,60%)
Vandellós II W-F	1	0	97	0	0	0	0	3	100 (1,78%)
	2	0	63	0	0	0	0	7	70 (1,24%)
	3	0	42	0	0	0	0	5	47 (0,84%)
Trillo KWU	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	12	12
	3	0	0	0	0	0	0	2	2

* Datos de los generadores de vapor retirados en julio-septiembre de 1995.

Ningún tubo taponado por *dentigo* o *pitting*.

Todos los datos corresponden a fecha octubre de 1995.

las técnicas de reparación intentadas como el enmanguitado de tubos no habían demostrado ser efectivas, las centrales nucleares de Ascó y Almaraz decidieron la sustitución de sus generadores de vapor.

Como se puede apreciar en la tabla 2, la situación del único generador de vapor de la central nuclear José Cabrera es mucho más favorable que la de los mismos equipos en las centrales nucleares de Ascó y Almaraz, pese a su mayor tiempo de operación. En las tablas 3 y 4 se presenta la relación de centrales en todo el mundo que han sustituido o tienen previsto sustituir sus generadores de vapor.

El suministro de los nuevos generadores para las centrales nucleares de Ascó y Almaraz –un total de 12 equipos– fue adjudicado al consorcio entre Siemens y Framatome,

y la fabricación fue adjudicada a Equipos Nucleares, S.A., que solicitó y recibió la necesaria autorización de fabricación según el Título VII del Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas.

El programa establecido para la fabricación y sustitución de los generadores de vapor en las cuatro unidades es el siguiente:

- Ascó I: ya terminada la sustitución.
- Almaraz I: terminada en septiembre de 1996.
- Ascó II: terminación prevista en octubre de 1996.
- Almaraz II: a partir de abril de 1997.

Para la sustitución de los generadores de vapor se estableció la necesidad de una autorización de puesta en marcha del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo,

previo dictamen del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y, con objeto de facilitar el proceso de licenciamiento, se consideró conveniente que el Pleno del CSN apreciara favorablemente una serie de hitos relacionados con el mismo antes y después de la autorización de puesta en marcha, única autorización requerida por la legislación vigente.

Se requiere asimismo una autorización del edificio para almacenar temporalmente los generadores de vapor sustituidos. Estos equipos permanecerán en dicho edificio hasta que se establezca su destino final, junto con el resto de equipos de la central, dentro del Programa de Desmantelamiento y Clausura de la misma.

Las actividades relacionadas con la sustitución son muy comple-

► **Tabla 3. Sustituciones de generadores de vapor efectuadas hasta octubre de 1994**

Central	Número generadores	Suministrador	Material tubos	Fecha operación comercial	Fecha sustituc.	Años de operación	Años equival. a plena potencia	Duración sustituc. (días)	Dosis colectiva (rem. persona)
Surry 2 (USA)	3	W	I-600TT	05.73	09.80	7	3,6	260	2.141
Surry 1 (USA)	3	W	I-600TT	12.72	07.81	8	4,4	200	1.759
Turkey Point 3 (USA)	3	W	I-600TT	12.72	04.82	10	5,2	217	2.152
Turkey Point 4 (USA)	3	W	I-600TT	09.73	05.83	9	5,9	150	1.305
Obrigheim (Alemania)	2	KWU	I-800	03.69	09.83	14	11,2	72	690
Point Beach 1 (USA)	2	W	I-600TT	12.70	03.84	13	9,2	118	575
HB Robinson (USA)	3	W	I-600TT	03.71	10.84	13	8,5	130	1.207
DC Cook 2 (USA)	4	W	I-690TT	06.78	03.89	11	6,6	175	561
Indian PT (USA)	4	W	I-690TT	08.76	06.89	13	6,4	140	541
Ringhals 2 (Suecia)	3	KWU	I-690TT	05.76	08.89	14	8,1	72	290
Dampierre 1 (Francia)	3	FRA	I-690TT	09.80	06.90	10	6,7	70	220
Palisades (USA)	2	GE	I-600MA	12.71	03.91	19	8,3	121	487
Millstone 2 (USA)	2	BWC	I-690TT	12.75	01.93	17	10,9	192	697
Bugey 5 (Francia)	3	FRA	I-600TT	01.80	02.94	13	9,8	75	150
Doel 3 (Bélgica)	3	S-F	I-800	10.82	06.93	11	10	44	196
Nort Anna 1 (USA)	3	W	I-690TT	06.78	04.93	15	9,6	96	240
Beznau 1 (Suiza)	2	FRA	I-690TT	12.69	04.93	24	19,5	44	110
Mihama 2 (Japón)	2	MHI	I-690TT	07.72	08.94	18	11,5	—	—

jas, ya que afectan a muchos aspectos de la central. Para facilitar la labor de evaluación del CSN se elaboró una Guía de Evaluación, que establece de forma sistemática el alcance de las actividades del Consejo en relación con el proceso de sustitución de los generadores.

2. Proceso de licenciamiento

El Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas establece que las modificaciones de las condiciones de explotación de una central que, a juicio de la Dirección General de la Energía, puedan implicar una variación en su régimen de funcionamiento, requerirán una autorización de puesta en marcha (Art. 35). El Reglamento requiere también autorización para la fabricación de los generadores (Art. 82), que fue solicitada por Equipos Nucleares (ENSA) y apreciada

favorablemente por el CSN con fecha 17 de junio de 1993.

Para la autorización de puesta en marcha, la central debe presentar los análisis de seguridad y protección radiológica necesarios para demostrar que el funcionamiento de la instalación se mantiene dentro de los límites establecidos, tanto en condiciones normales como de accidente, así como una propuesta de revisión del Estudio Final de Seguridad y de las Especificaciones Técnicas, y una propuesta sobre el programa de pruebas de arranque, que garantice que la modificación introducida se ajusta a lo previsto en el diseño.

Asimismo, y dado que para el cambio de los generadores de vapor se deben realizar intervenciones importantes en los sistemas primario, secundario, sistemas auxiliares, contención, etcétera, y que

las operaciones tienen un impacto radiológico significativo, se ha considerado necesario que, antes del comienzo de la parada de recarga en la que se haga el cambio, se emita por parte del CSN una apreciación favorable de las actividades a realizar en la planta para el cambio de los generadores.

En ella se incluyen los análisis de riesgo de accidentes que pueden ocurrir durante el proceso de cambio —y las medidas adoptadas para evitarlos o mitigar sus consecuencias—, los procedimientos de actuación para minimizar las dosis al personal que participe en las operaciones, las medidas adicionales de seguridad física que deban adoptarse, y todas aquellas otras actividades del montaje que se estimen convenientes.

La autorización de puesta en marcha se emite tras el montaje de

► Tabla 4. Sustituciones de generadores de vapor previstas (órdenes de compra hasta 1994)

Central	Número de generadores	Potencia neta	Suministrador	Material tubos	Fecha prevista
Takahama 2 (Japón)	3	780	MHI	I-690TT	1993/94 (*)
Gravelines 1 (Francia)	3	910	FRA	I-690TT	1994
Genkai 1 (Japón)	2	529	MHI	I-690TT	1994
Summer (USA)	3	895	W	I-690TT	1994 (*)
Ohí 1 (Japón)	4	1.120	MHI	I-690TT	1994/95 (*)
Tihange 1 (Bélgica)	3	870	MHI	I-690TT	1995
Ringhals 3 (Suecia)	3	915	S-F	I-690TT	1995 (*)
Dampierre 3 (Francia)	3	900	FRA	I-690TT	1995
St. Laurent B1 (Francia)	3	900	FRA	I-690TT	1995
Ascó I y II (España)	6	887	S-F	I-800	1995/96 (*)
Mihama 1 (Japón)	2	320	W	I-690TT	1995/96
Takahama 1 (Japón)	3	780	MHI	I-690TT	1995/96
Doel 4 (Bélgica)	3	1.010	S-F	I-690TT	1996
Mihama 3 (Japón)	3	780	MHI	I-690TT	1996
North Anna 2 (USA)	3	887	W	I-690TT	1996 (*)
Ginna (USA)	2	470	BWC	I-690TT	1996
Almaraz I y II (España)	6	900	S-F	I-800	1996/97
Catawba 1 (USA)	4	1.129	BWC	I-690TT	1996/97
Mc Guire 1 (USA)	4	1.129	BWC	I-690TT	1996/97
Mc Guire 2 (USA)	4	1.129	BWC	I-690TT	1996/97
Point Beach 2 (USA)	2	497	W	I-690TT	1996/97
Ohí 2 (Japón)	4	1.120	MHI	I-690TT	1996/97
St. Lucie 1 (USA)	2	839	BWC	I-690TT	1997
Zión 1 (USA)	4	1.040	BWC	I-690TT	1998
Farley 2 (USA)	3	872	W	I-690TT	2005
Farley 1 (USA)	3	873	W	I-690TT	Después del 2005

(*) Sustituciones efectuadas durante 1995.



► Figura 2. Extracción de muro biológico en la central nuclear de Ascó I para poder proceder a la sustitución de generadores de vapor.

los nuevos generadores y la realización de las pruebas post-montaje pertinentes. En ella se incluyen los límites y condiciones que se consideran necesarios, entre los que figura una condición relativa a la apreciación favorable por parte del CSN de los resultados del programa de pruebas durante el proceso de arranque tras la parada.

Se ha establecido otra etapa de licenciamiento adicional y previa a las anteriormente mencionadas, aunque no sea requerida por la reglamentación vigente. Su objetivo

es fijar la normativa a utilizar en las distintas actividades del proyecto, la organización específica con la que se van a llevar a cabo, el plan de garantía de calidad, el diseño básico de los nuevos generadores y los análisis que deben realizarse para demostrar la compatibilidad de los mismos con el resto de la planta y garantizar que se mantienen los niveles de seguridad actualmente establecidos. Tras la evaluación de los aspectos mencionados se emite por parte del CSN una apreciación favorable de las bases del proyecto con los límites y condiciones que se estimen necesarios.

Esta apreciación favorable debe concederse en un plazo aproximado de unos seis meses tras la presentación de la solicitud de autorización de la modificación por parte de las centrales al Ministerio de Industria y Energía.

Adicionalmente a estas actividades que afectan globalmente a todo el proceso de cambio, son necesarias autorizaciones específicas para el nuevo edificio que albergará temporalmente a los generadores actuales y para el nuevo edificio de descontaminación y taller caliente, necesario en el caso de Ascó para complementar las capacidades de descontaminación durante las actividades de sustitución.

Tras la finalización de la instalación de los nuevos generadores de vapor y el programa de pruebas asociado, debe presentarse al CSN, en el plazo de tres meses, un informe sobre la sustitución, incluyendo, entre otros contenidos, los resultados del programa de pruebas y las dosis recibidas en las operaciones de montaje.

El licenciamiento de la sustitución de los generadores de vapor en la unidad I de Ascó culminó con la concesión de la Autorización de Puesta en Marcha el 10 de octubre de 1995 y la apreciación favorable del CSN para la criticidad emitida el 17 de octubre de 1995. Previamente, en junio de 1995, se había concedido la Autorización de

► Figura 3. Vista general del interior de la contención de la central nuclear de Ascó I.



► Figura 4. Extracción del generador de vapor viejo en la central nuclear de Ascó I.



Puesta en Marcha del edificio de almacenamiento temporal (ATGV) y del taller de descontaminación. En la figura 5 se representan los principales hitos y actividades, indicando las fechas de cada uno de ellos. Los procesos correspondientes a la unidad II de Ascó y a las dos unidades de Almaraz se desarrollarán de forma similar.

Del esfuerzo realizado por el CSN en el licenciamiento de la sustitución de los generadores de Ascó I dan idea los siguientes datos:

- Número de inspecciones/auditorías realizadas en todo el proceso: 43 –incluyendo una auditoría a Westinghouse-Pittsburg sobre los análisis de los componentes principales y dos a Westinghouse-Bruselas sobre los análisis de accidentes–.
- Número de informes internos realizados: 78.
- Número de reuniones mantenidas con la central nuclear de Ascó: 12.

- Número de documentos remitidos por la central nuclear de Ascó: 160.
- Visitas a otras plantas en proceso de sustitución de sus generadores de vapor: 4 –Bugey (Francia), Doël (Bélgica), Nort Anna (USA) y Ringhals (Suecia)–.

Dentro de este proceso, y en paralelo con la preparación y evaluación del denominado *Informe de Licenciamiento para la Sustitución de los Generadores de Vapor*, se ha realizado por la central nuclear de Ascó una revisión en profundidad del Estudio de Seguridad y de las Especificaciones de Funcionamiento, y las correspondientes evaluaciones de dichos documentos por el CSN, que los ha informado favorablemente.

Es de destacar la revisión que se ha hecho de todos los análisis de accidentes, así como de los informes de tensiones de los componentes principales y de los lazos del primario.

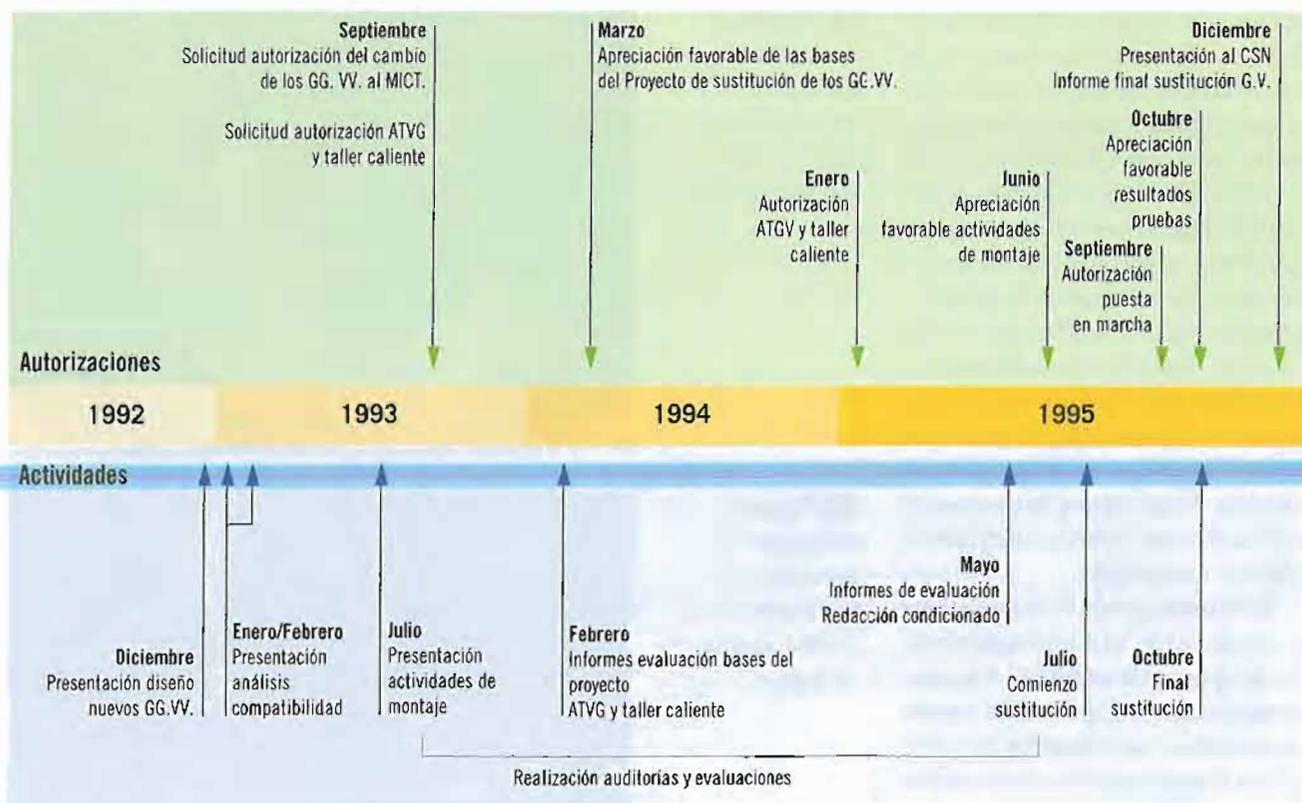


Figura 5. Sustitución de generadores de vapor en la central nuclear de Ascó I.

Los apartados principales del Informe de Licenciamiento para la sustitución de los generadores de la central nuclear de Ascó I, sobre los que se han centrado las actividades de evaluación del CSN son los siguientes:

- Diseño de los nuevos generadores de vapor: descripción general y comparación paramétrica con los existentes, aplicaciones de códigos de diseño y de fabricación, materiales de los generadores de vapor, mejoras de diseño en los componentes, diferencias de funcionamiento con los nuevos generadores de vapor, inspecciones y pruebas en fábrica, sistemas de tratamiento de agua y control químico.

- Efectos de la sustitución de los generadores de vapor en los componentes, equipos y en los sistemas conectados (estudios de compatibilidad): sistema de refrigerante del reactor y sistemas conectados, sistema de vapor principal, sistema de agua de alimentación, sistema de agua de alimentación auxiliar, sistema de purga, sistema de toma de

Tabla 5. Comparación de datos de operación a plena potencia

		Generador		
		actual	Generador nuevo	
			Temp. alta	Temp. baja
Potencia térmica 3 generadores	MW	2.696	2.696	2.696
Precalentador		Si	No	No
Condiciones del generador:				
Nivel de taponado	%	0	0	0
Factor de ensuciamiento	10 ⁻⁵ M ² K/W	0,88	0,88	0,88
Lado primario:				
Caudal volumétrico	M ³ /S	5,93	5.867	5.867
Temperatura rama caliente	°C	326,6	327,4	321,9
Temperatura rama fría	°C	291,3	291,9	285,7
Temperatura media	°C	309,0	309,7	303,8
Presión	MPa	15,51	15,51	15,51
Pérdida de carga del generador	kPa	221	204	207
Lado secundario:				
Presión en la cúpula	MPa	6,81*	6,93	6,31
Temperatura agua alimentación	°C	223,9	223,9	223,9
Caudal de vapor	kg/s	496,4	496,5	494,5
Arrastre de humedad	%	0,25	0,1	0,1

* Aguas abajo del limitador de caudal.

muestras, instrumentación del control de nivel de los generadores de vapor, compatibilidad del sistema de control de partes sueltas y tuberías de *by pass* de las RTDs.

- Programa de sustitución: consideraciones de instalación, eliminación y sustitución de equipos y materiales, tuberías, hormigón y acero estructural, protecciones superficiales, corte y reconexión de tuberías, protección contra incendios y programa de garantía de calidad.

- Almacenamiento de los generadores de vapor actuales: edificio de almacenamiento temporal de los generadores de vapor actuales.

- Programa de Protección Radiológica: consideraciones generales ALARA, requisitos de vigilancia del personal, programa de vigilancia de la radiación y contaminación, control de material radiactivo en el aire y superficies contaminadas, lavandería, gestión de desechos, descargas radiactivas y valoración de dosis y evaluación de exposición (Man-Rem).

- Pruebas de retorno a la operación normal de Planta.

- Evaluación de seguridad: evaluaciones del Estudio Final de Seguridad (EFS), LOCA (Gran y Pequeña Rotura), rotura de tubos del generador de vapor, accidentes NO-LOCA, análisis de la contención y de los subcompartimentos, análisis de consecuencias radiológicas de accidentes, calificación ambiental de los equipos, manejo de cargas pesadas, otros análisis de riesgos e impacto en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento.

En los sucesivos informes del CSN que han servido de base para las apreciaciones favorables y para el dictamen sobre la solicitud de Autorización de Puesta en Marcha, se han valorado los distintos aspectos contemplados en el Informe de Licenciamiento.

Durante los aproximadamente tres meses de trabajos en la central se ha realizado un seguimiento de la ejecución de las principales actividades asociadas a esta fase,

con el fin de verificar que ésta se ha ajustado adecuadamente a las condiciones de licenciamiento previstas.

El seguimiento se ha desarrollado mediante la realización de inspecciones y auditorías a las siguientes actividades:

- Operaciones de corte y reconstrucción de los muros de los generadores de vapor.

- Manipulación de cargas pesadas.
- Generación de proyectiles de componentes a presión.

- Operaciones en los lazos del primario: corte, soportado/posicionado y soldadura.

- Ensayos no destructivos de las soldaduras de los nuevos generadores de vapor y de los lazos del primario.

- Aplicación del criterio ALARA y protección radiológica ocupacional.

- Realización de la prueba hidrostática del primario.

- Realización de las pruebas de arranque hasta llegar al 100% de potencia.

El seguimiento realizado permitió comprobar que todas las actividades inspeccionadas y auditadas se han desarrollado de acuerdo con lo previsto en el licenciamiento de la fase de sustitución de los generadores de vapor, y que los resultados de las pruebas han satisfecho los criterios de aceptación establecidos.

En particular, en el seguimiento de las condiciones de protección radiológica se ha realizado un total de cuatro inspecciones, que han cubierto las siguientes actividades:

- Actuación de las unidades ALARA de Asociación Nuclear de Ascó (ANA).

- Seguimiento de la evolución de la dosis por tarea.

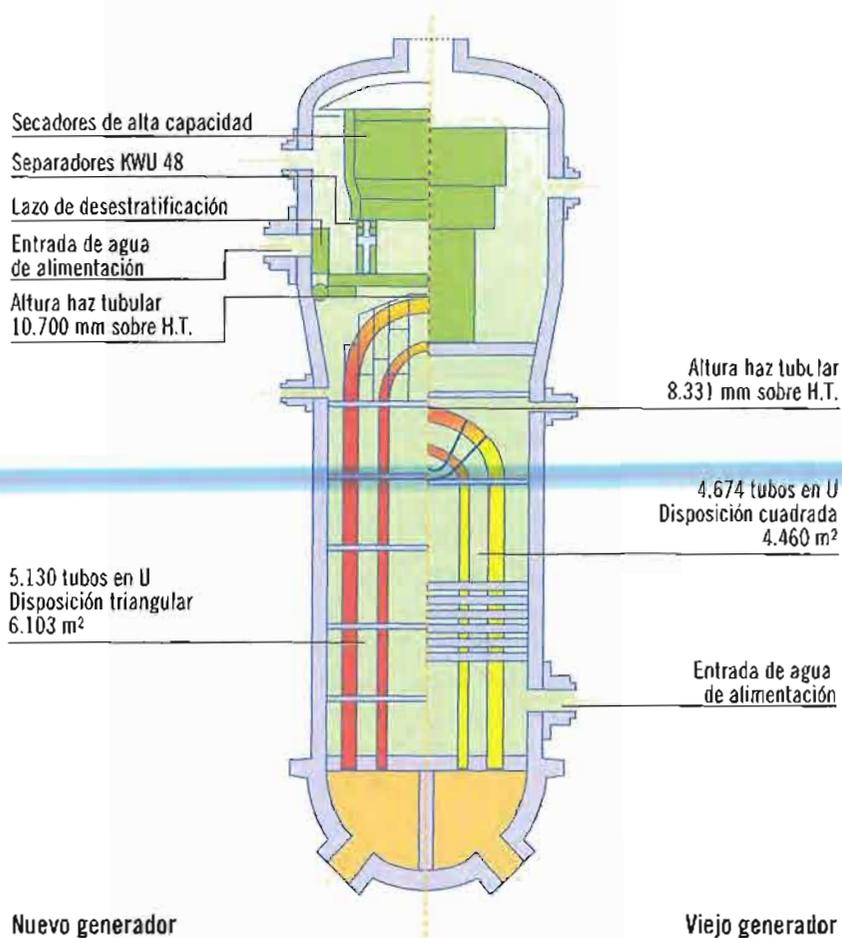
- Aplicación del plan de entrenamiento ALARA en maqueta.

- Aplicación de las medidas y técnicas de reducción de dosis en diversas operaciones con las tuberías del primario.

- Otras actividades: control de accesos, nuevo taller de descontaminación y nueva lavandería.

► Tabla 6. Comparación de datos geométricos y de inventario

	Generador actual	Generador nuevo		
		Temp. alta	Temp. baja	
Haz tubular:				
Superficie intercambio de calor	m ²	4.460	6.103	6.103
Número de tubos		4.674	5.130	5.130
Disposición de tubos		Cuadr.	Triang.	Triang.
Distancia entre tubos	mm	26,99	26,194	26,194
Diámetro del haz tubular	mm	3.110	2.902	2.902
Máximo radio de doblado	mm	1.353	1.440,7	1.440,7
Mínimo radio de doblado	mm	57,2	91,7	91,7
Altura del haz tubular	mm	8.331	10.700	10.700
Inventarios/Pesos:				
Volumen neto del lado secundario	m ³	168,4	153,9	153,9
Volumen neto del lado primario	m ³	26,5	32,9	32,9
Nivel de agua	m	12,29	12,3	12,3
Ratio de recirculación		2,3	3,6	3,6
Masa del secundario	Mg	43	41,7	40,9
Peso total seco	Mg	308	332	332



► **Figura 6. Comparación de datos geométricos de los generadores nuevo y viejo.**

Como puntos más destacables de la valoración realizada cabe citar la efectividad de las medidas y técnicas de reducción de dosis aplicadas, que han supuesto un ahorro importante en dosis, más de 3.400 mSv. persona y unos valores de dosis reales por tarea, en general, inferiores a los estimados, lo que hace que el valor de la dosis global (2.442 mSv.persona a 17-10-95) cumpla las previsiones iniciales

(valor de dosis objetivo 2.650 mSv.persona).

En las sustituciones de generadores de vapor en las centrales nucleares de Almaraz I, Ascó II y Almaraz II que se realizarán durante 1996 y 1997, se seguirá un esquema de licenciamiento similar al de la central nuclear de Ascó I y se contará con una gran experiencia acumulada por la industria y por el CSN. Como novedad, en el caso de

la sustitución en las dos unidades de la central nuclear de Almaraz, es necesario cortar el edificio de contención debido a que las esclusas de equipos no permiten la entrada y salida de los generadores. Tras la restitución del edificio de contención, éste será sometido a pruebas de integridad y hermeticidad equivalentes a las realizadas durante las pruebas prenucleares de la central.

3. Los nuevos generadores de vapor de Almaraz y Ascó

Las principales características de los nuevos generadores de vapor modelo 61WD3 son:

- Tubos de Incoloy 800M en lugar de Inconel 600.
 - Barrera de presión forjada en lugar de chapas.
 - Anillo de agua de alimentación en lugar de precalentador.
 - Interfase placa tubo con expansionado hidráulico y mecánico superpuesto en los extremos frente a un expansionado mecánico.
 - Rejillas de acero inoxidable frente a placas taladradas de acero al carbono.
 - Sistema de separación de humedad diseñado para conseguir un 0,1% de arrastre de humedad frente a un 0,25% del actual.
- Los detalles se pueden ver en las tablas 5 y 6, comparando con las características de los antiguos generadores de vapor.
- En la figura 6 se muestra una comparación de datos geométricos entre los nuevos y los antiguos generadores de vapor. ☺

Combustible nuclear de alto grado de quemado. Proyecto de barras segmentadas

Mejorar el comportamiento del combustible en el reactor nuclear es el objetivo que pretende el proyecto de barras segmentadas que Enusa desarrolla dentro de sus actividades de investigación

y desarrollo, en colaboración con diversas organizaciones. En este artículo se detallan las tres fases del proyecto, que incluyen diseño, fabricación, irradiación y experimentación de los elementos.

1. Introducción

En el ámbito de I+D los esfuerzos de ENUSA se han dirigido, entre otros objetivos, a encontrar nuevas soluciones para mejorar el comportamiento del combustible en el reactor nuclear con la vista puesta tanto en mejorar su fiabilidad como sus prestaciones. La mayor parte de estas actividades son llevadas a cabo por la organización de Ingeniería y Tecnología del Combustible, en la que intervienen más de 70 titulados superiores, dedicados tanto a tareas de producción como a proyectos de I+D. Entre estos últimos destaca el Proyecto de Diseño, Fabricación, Irradiación y Experimentación de Barras Segmentadas, cuyo objetivo es contribuir, de modo sustancial, al desarrollo de nuevos materiales del combustible del tipo PWR (vainas y pastillas), para

mejorar el comportamiento del mismo a quemados más altos y ante transitorios de operación.

El Proyecto de Barras Segmentadas es un programa de colaboración entre organizaciones japonesas (NUPEC, Kansai Electric Power Co., en representación de otras empresas eléctricas niponas, y Mitsubishi Heavy Industries) y organizaciones españolas (ENDESA, A.N., Vandellós II y ENUSA), con la participación de Westinghouse.

2. Alcance del proyecto

El Proyecto de Irradiación de Barras Segmentadas consta de tres fases fundamentales. La primera abarca el diseño, licenciamiento, fabricación y caracterización de los elementos combustibles que contienen las barras segmentadas. Esta fase se desarrolló entre 1991 y 1994. En la figura 2 de la página siguiente se muestra un croquis de una barra segmentada, así como la sección transversal de un elemento combustible en la que se indican

las situaciones de las barras segmentadas y los diferentes materiales utilizados.

La segunda fase comprende la irradiación de los elementos combustibles en la central nuclear Vandellós II y la inspección *in situ* de los mismos. Está previsto que la irradiación dure cuatro ciclos hasta alcanzar un quemado de descarga objetivo, por elemento, de 55 GWd/t. Esta fase, que es la que se desarrolla actualmente, comenzó en 1994 con el ciclo 7 de la central y está previsto que dure hasta 1999, en su ciclo 10.

Y finalmente en la tercera fase, que se desarrollará entre 1996 y 2002, se efectuarán los ensayos en rampa y la inspección en celdas calientes de algunas barras seleccionadas.

En la figura 3 y en la tabla 1 se muestran, respectivamente, el programa general de actividades del proyecto y la asignación de responsabilidades técnicas entre los distintos participantes en el mismo.

* Ingeniero industrial, presidente de ENUSA desde 1991. Ha sido profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid y del Instituto de Estudios Nucleares de la Junta de Energía Nuclear.

3. Fabricación de la barra segmentada (fase I)

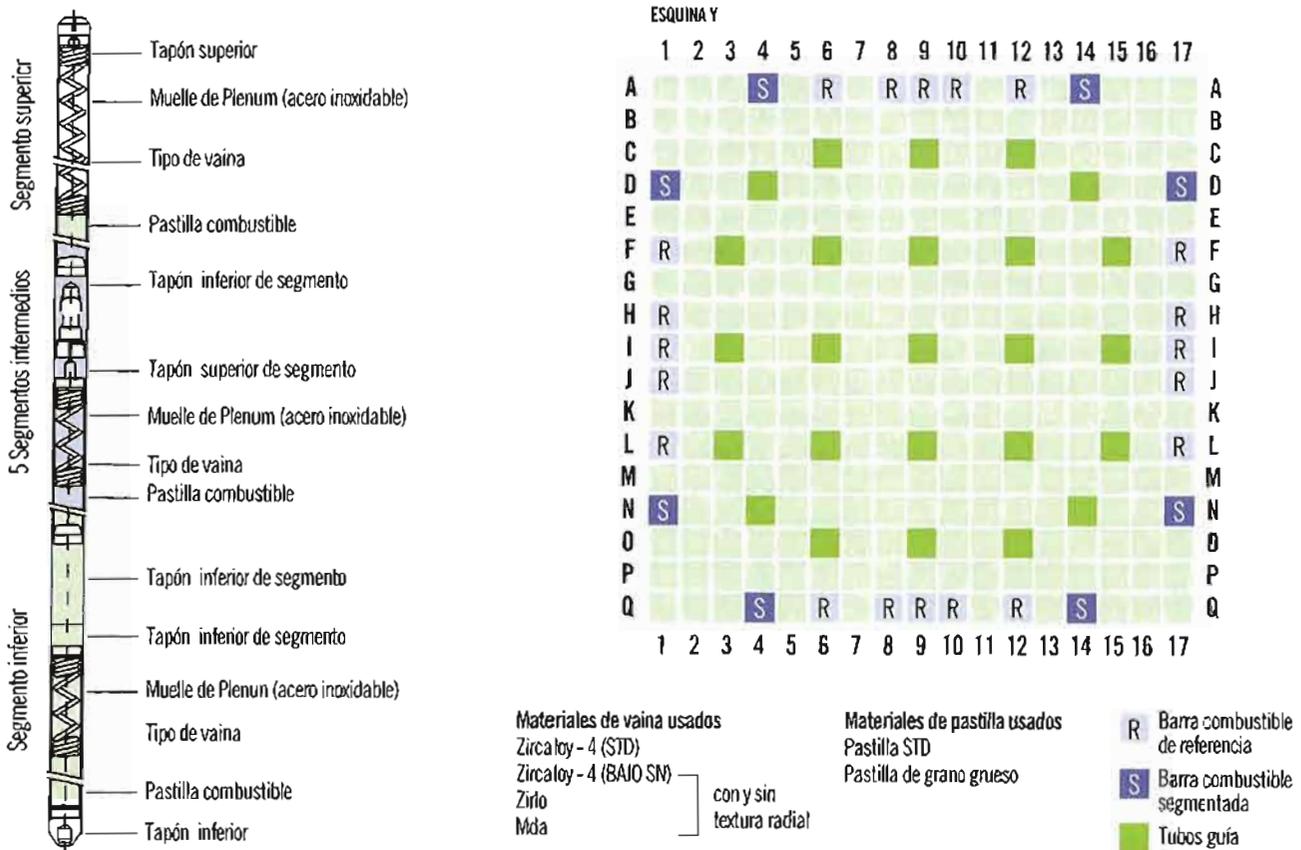
El desarrollo de la fase I del programa tuvo lugar entre 1991 y 1994, y consistió en el diseño, fabricación y caracterización de los elementos combustibles que contienen las barras segmentadas objeto de este proyecto. En el diseño intervinieron equipos especializados en diseño mecánico, termomecánico, nuclear y termohidráulico, y se efectuaron, asimismo, los correspondientes análisis de seguridad.

En lo que respecta a la fabricación y caracterización, el proceso se inició con la construcción de los siete segmentos que constituyen la barra segmentada. Estos segmentos tienen las mismas características que una barra combustible convencional, exceptuando su longitud, ya que son más cortos. A continuación estos segmentos se ensamblan y sueldan para completar la barra segmentada combustible que debe mantener las mismas característi-

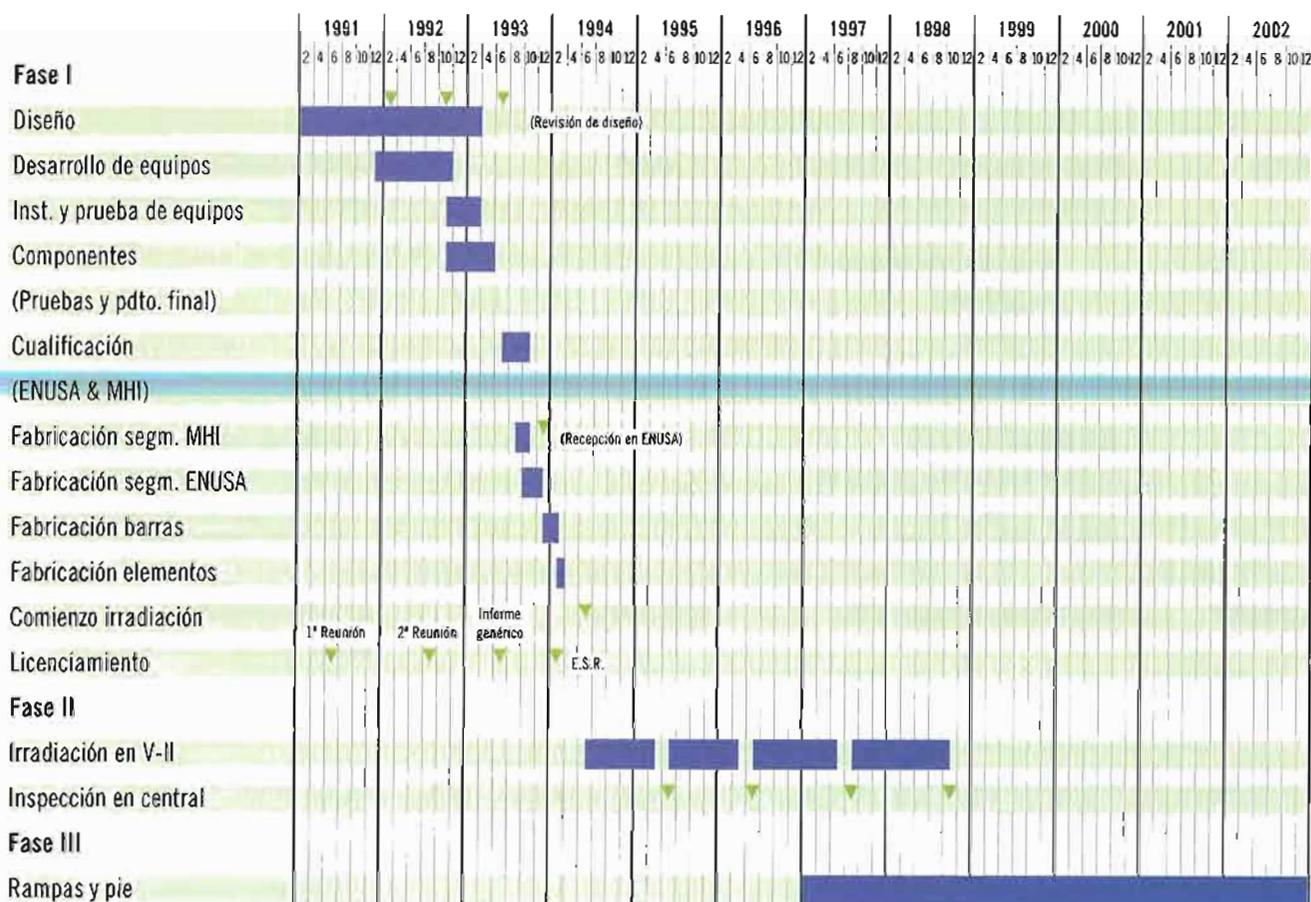
► Figura 1. Elemento combustible PWR con barras segmentadas cargado en la central nuclear de Vandellós II.



► Figura 2. Croquis de una barra segmentada y sección transversal de un elemento combustible



► Figura 3. Cronología del Programa de barras segmentadas



► Tabla 1. Proyecto de irradiación de barras segmentadas: asignación de responsabilidades técnicas

	ENUSA	MHI	Vandellos II	W
Fase I				
Fabricación y caracterización	P	S		S
• Uranio			P	
• Segmentos y barras	P	P		S
• Elementos	P			
Licenciamiento	P	S	P	S
Fase II				
Irradiación			P	
Inspección en central	P	S	S	S
Evaluación	P	S		S
Fase III				
Retirada de barras y reconstrucción	P	S	S	S
Rampas	S	P		S
Examen en celdas calientes	S	P		S

P = Responsabilidad principal / S = Apoyo

cas y exigencias que las aplicables al resto del elemento combustible.

Con estas premisas se realizó un ensayo de pruebas de fabricabilidad de estas barras en la Fábrica de Juzbado, basándose en una experiencia anterior, para confirmar la viabilidad de la fabricación con los requisitos del combustible estándar y, al mismo tiempo, introducir la experiencia de los años de fabricación de combustible. Para la realización de estas pruebas y la fabricación de las barras segmentadas fue necesario el diseño de un nuevo equipo de soldadura circular y de una nueva estación de taponado, pero el resto de los equipos utilizados fue idéntico a los existentes en las líneas de producción normales.

El objeto del ensayo era demostrar la fabricabilidad de las barras segmentadas, cumpliendo los requisitos exigidos al combustible,

► Tabla 2. Inspecciones sobre elementos combustibles con barras segmentadas a la finalización del primer ciclo de irradiación (Ciclo 7 de la central)

Inspección	Características	Equipos	Alcance
Visual	Integridad conjunto combustible Grabación en cintas vídeo Inspección visual de: <ul style="list-style-type: none"> • Barras periféricas • Cabezales • Rejillas 	SICOM	Cuatro conjuntos combustibles Cuatro caras por conjunto
Dimensional	a) Longitud total C/C b) Distancia barras-cabezales c) Longitud barras d) Espaciado de canales	SICOM	Cuatro conjuntos combustibles a) Medida centro cada cara b) 100% barras periféricas c) 100% barras periféricas d) 100% barras periféricas
Corrosión	Medida espesor capa óxido	SICOM	30 barras periféricas de cuatro conjuntos combustibles: <ul style="list-style-type: none"> • 16 barras segmentadas • 14 barras referencia
Perfilometría	Medida del perfil de las barras	Equipos de perfilometría y equipo de reparación	30 barras periféricas de dos conjuntos combustibles: <ul style="list-style-type: none"> • 16 barras segmentadas • 14 barras referencia
Ultrasonidos	Integridad de los segmentos combustibles	Equipo AFIS (Westinghouse)	Cuatro conjuntos combustible Siete tramos inter-rejillas

como paso previo a la posterior cualificación formal y fabricación de las barras. La realización del ensayo de fabricabilidad puede dividirse en las siguientes fases:

– *Definición de la geometría de los tapones de unión de segmentos.*

El paso inicial del ensayo se enfocó a diseñar y optimizar los tapones de unión de los segmentos, teniendo como consideración primordial la rectitud de la barra segmentada, la calidad de taponado y la soldabilidad de la unión.

– *Ensayo de alineación de segmentos.* Una vez definida la geometría de los tapones de unión de segmentos se fabricó una serie de barras completas, prestando especial atención en la rectitud de ellas sin olvidar el resto de requisitos aplicables.

– *Ensayo de estabilidad térmica.*

Con parte de las barras segmentadas realizadas en el ensayo anterior se llevó a cabo esta prueba para comprobar que las tensiones residuales generadas durante los procesos de montaje y soldadura no provocarían deformaciones permanentes inaceptables debidas a la relajación del material provocadas por los ciclos térmicos durante la operación en el reactor.

– *Ensayo de carga de barras en esqueleto.* Con el resto de las barras segmentadas fabricadas en el ensayo se procedió a la operación de cargarlas en un esqueleto, colocando los sensores adecuados, en un ensayo tendente a estudiar la influencia que este tipo de barra, con uniones múltiples, podía tener durante la carga.

4. Irradiación de los elementos e inspección *in situ* (fase II)

La segunda fase del proyecto, que es la que se está desarrollando en los momentos actuales, se inició en 1994 (ciclo 7 de la central nuclear Vandellós II), con la inclusión en el núcleo del reactor de cuatro elementos combustibles, del tipo 17 x 17 AEF, con ocho barras segmentadas por elemento y 20 barras especialmente caracterizadas, denominadas barras de referencia. Esta fase está previsto que finalice en 1999, y en ella se quiere verificar el comportamiento del combustible, que se ha sometido a irradiación en un reactor comercial y bajo condiciones normales de operación. Esta inspección se efectúa, *in situ*, al finalizar cada uno de los cuatro ciclos de la central contem-

plados en el programa, cuyo plan de inspecciones cubre los siguientes aspectos (tabla 2):

- La completa inspección *visual* de los cuatro elementos para analizar su integridad física, con especial atención de las barras segmentadas y las soldaduras entre segmentos.

- La inspección *dimensional* acorde a lo previamente caracterizado en la Fábrica de Juzbado, para poder comparar los resultados y poder tener una referencia sobre el comportamiento de los nuevos materiales después de un ciclo de irradiación.

- La inspección por *ultrasonidos* para detectar la presencia de posibles fugas. Esta inspección se realiza en todos los tramos entre rejillas con el fin de evaluar todos los segmentos combustibles (partes integrantes de las barras segmentadas).

- La inspección por *corrientes inducidas* de diversas barras de combustible para determinar el espesor de la capa de óxido.

- La inspección *perfilométrica* de 30 barras, para determinar la fluencia de los nuevos materiales de vaina. Esta inspección se realiza únicamente al finalizar el primer ciclo de irradiación.

Por otra parte, las inspecciones que se tenía previsto realizar al finalizar el primer ciclo de irradiación (ciclo 7 de Vandellós II) fue necesario prepararlas y coordinarlas con sumo detalle ya que se iban a efectuar durante la parada de recarga y en línea con la misma, sin poderse retrasar las fechas de carga del nú-

PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE

Dentro de la industria nuclear española, la Empresa Nacional del Uranio S.A. (ENUSA) viene desempeñando, desde su creación en 1972, un importante papel tanto en su vertiente de productora de concentrados de

contenido energético, a unos 180 millones de tec.

Desde hace algunos años ENUSA, con el mercado español estabilizado como consecuencia de las centrales sometidas a moratoria y posterior paralización definitiva, está respondiendo al reto de competir en los mercados europeos. Durante este año, ya un 32% de sus suministros de elementos combustibles está teniendo como destino el mercado exterior, cifra que en el periodo 1996-2000 se espera incrementar a más del 40%. En el momento actual los suministros de combustible de ENUSA representan una cuota del mercado europeo próxima al 8%, participación que resulta significativa si se tiene en cuenta la dimensión de nuestros competidores y el notable exceso de oferta que registra el mercado.

Ha sido posible alcanzar esta posición porque ENUSA ha considerado siempre vital para su actividad, junto a disponer de excelentes tecnologías como las de Westinghouse, para combustibles del tipo PWR, y General Electric, para combustible del tipo BWR, situarse en condiciones adecuadas de competitividad, mediante la consecución de mejores índices productivos, la plena asunción de las crecientes exigencias en materia de calidad y la dedicación de importantes recursos económicos a actividades de investigación y desarrollo. 



 **Figura 4.** Vista general de la Fábrica de Elementos Combustibles de Juzbado (Salamanca).

uranio a partir de los minerales uraníferos presentes en el territorio nacional, como en el diseño, fabricación y suministro de elementos combustibles para centrales nucleares LWR.

En los diez años transcurridos desde la entrada en operación de su Fábrica de Elementos Combustibles de Juzbado (Salamanca), ENUSA ha suministrado a ocho de los nueve grupos nucleares con que cuenta España y a cinco centrales de otros países europeos más de 4.700 elementos combustibles con un contenido de uranio enriquecido equivalente, desde el punto de vista de

cleo y de arranque del ciclo 8. Las inspecciones han sido realizadas sobre elementos combustibles que posteriormente se han introducido de nuevo para su segundo ciclo de irradiación. Han resultado necesarios cuatro equipos diferentes que han involucrado a cuatro empresas

distintas, lo cual ha supuesto una dificultad añadida desde el punto de vista de la coordinación del Plan de Inspecciones.

La coordinación y colaboración se ha logrado mediante las frecuentes reuniones que se han mantenido desde un año antes de la parada del

reactor, entre el personal de Vandellós II, las empresas de servicios ENWESA, Tecnatom, la AIE ENUSA-ENWESA y los responsables de ENUSA.

Partiendo del Programa preliminar de Actividades de la séptima recarga de Vandellós II, y de acuerdo con las empresas de servicios, ENUSA y la misma central desarrollaron un plan detallado de inspecciones que cubría desde el montaje de los equipos hasta su salida de la central. Las sucesivas revisiones del programa de la séptima recarga, que reflejaban cambios en las fechas de descarga y carga del núcleo, han llevado a revisar el Plan de Inspecciones elaborado por ENUSA, con cambios que fueron, desde la modificación de los días de montaje de los equipos, hasta los cambios de turno de día a turno de noche en la actividad de Tecnatom. La sincronización de las actividades llegó a ser de tal precisión que pequeños cambios de horas de las actividades de descarga programadas por Vandellós II obligaron a complejas modificaciones en el programa final de inspecciones.

Las inspecciones que se han realizado sobre los cuatro elementos con barras segmentadas, que se resumen en la tabla 2, se describen a continuación en lo que sigue.

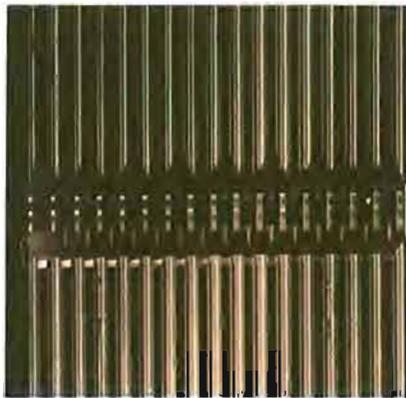
Se ha programado y realizado la inspección visual en las cuatro caras del conjunto combustible, y con ello se ha comprobado el estado general de todos los componentes y barras periféricas, entre las que se encuentran las barras segmentadas. Esta inspección se ha realizado con el equipo Sicom, desarrollado por la DTN, Tecnatom y ENUSA y operado por Tecnatom.

La inspección por ultrasonidos se ha realizado para verificar la integridad de todos los segmentos que forman parte de las barras segmentadas, así como del resto de barras que forman parte de dichos conjuntos combustibles.

Esta inspección se ha efectuado en los cuatro elementos y entre to-

dos los tramos entre rejillas. Esto último representa una diferencia con respecto al método habitual, y es debido a la existencia de las barras segmentadas, que se componen de varios segmentos unidos entre sí por soldadura, y que requiere garantizar la estanqueidad de todos y cada uno de los segmentos.

Esta inspección se ha realizado con el equipo AFIS, de Westinghouse, operado por ENWESA/Westinghouse.



► Figura 5. Detalle de un elemento combustible con barras segmentadas en el que se aprecian las uniones de los segmentos.

Por otra parte, se efectuó la inspección dimensional de los siguientes parámetros:

- Longitud total del elemento en sus cuatro caras.
- Distancia existente entre todas las barras periféricas y el cabezal superior.
- Distancia existente entre todas las barras periféricas y el cabezal inferior.
- Longitud de todas las barras periféricas.
- Espaciado de canales entre barras periféricas (en centro de vanos entre rejillas).

Es necesario resaltar que todas las medidas requeridas han sido previamente caracterizadas, sobre los elementos frescos durante la fabricación de los mismos en la Fábrica de Juzbado en lo que fue la fase I del programa, por lo que se

puede comprobar cómo ha sido el comportamiento de los elementos tras su irradiación. Todas las inspecciones dimensionales se realizan con el equipo Sicom, módulo de inspección dimensional, operado por Tecnatom.

El comportamiento de los nuevos materiales respecto a la corrosión se ha comprobado mediante corrientes inducidas, midiendo la capa de óxido de las vainas existente al final del ciclo. Con esta técnica se ha realizado la inspección de 30 barras periféricas, repartidas en 16 barras segmentadas y 14 barras normales previamente caracterizadas, de modo que se analizaran todas las combinaciones de material existentes, y que se han seleccionado en función del grado de quemado esperado a final del ciclo.

La inspección por corrientes inducidas se efectúa con el equipo Sicom, módulo de corrientes inducidas, operado por Tecnatom.

La Inspección perfilométrica consiste en la medida de los diámetros exteriores de las barras de combustible en toda su longitud. Esta inspección se realiza sólo al final del primer ciclo de irradiación de las barras segmentadas, para verificar el comportamiento en cuanto a fluencia del material de vaina bajo las condiciones reales de irradiación en un reactor comercial de potencia. La selección de las barras se hizo eligiendo aquellas cuyo quemado esperado a final del ciclo permitía estimar que no se había producido el contacto entre vaina y pastilla, momento a partir del cual la deformación de la vaina queda condicionada por la que sufre la pastilla.

Para ello se han medido los diámetros exteriores de 30 barras periféricas, repartidas en 16 barras segmentadas y 14 barras de referencia, de modo que se puedan analizar todas las combinaciones de material existentes, obteniendo el perfil de la barra inspeccionada. La particularidad de esta inspección es que para llevarla a cabo hubo que extraer la barra del conjunto combustible, por

lo que resultó necesaria la utilización del equipo MFRS de la AIE ENUSA-ENWESA, operado por ENWESA-Westinghouse. La medida de estos diámetros se realizó con el equipo de perfilometría de Westinghouse, operado por ENWESA-Westinghouse.

Se puede concluir, una vez realizadas las operaciones de inspección, y habiendo sido efectuada la recarga del núcleo, que ya opera en el ciclo 8, que el reto que representaba realizar las inspecciones programadas durante la parada de recarga sin afectar a los plazos de la misma ha sido un éxito completo.

Las razones de este éxito han sido, aparte de la capacidad técnica de cada una de las personas integrantes de los equipos de inspección, la coordinación previa a la campaña, la magnífica colaboración demostrada por el personal de la central nuclear Vandellós II, y la gran flexibilidad de las empresas de servicios, las cuales siempre estuvieron dispuestas a cambiar lo previamente programado con el solo objetivo del buen desarrollo del plan de inspecciones.

5. Ensayos en rampa e inspección en celdas calientes (fase III)

Esta tercera fase, cuya realización está prevista entre 1996 y 2002, comenzará con la retirada de algunas

barras segmentadas de los elementos al finalizar los ciclos 2, 3 y 4 del programa, y de algunas no segmentadas al finalizar el cuarto ciclo, las cuales serán enviadas a continuación a una instalación experimental, en principio, los laboratorios de Studsvik en Suecia. Las barras retiradas se sustituirán por barras de acero inoxidable en aquellos casos en los que haya que continuar la irradiación de los elementos combustibles. En Studsvik, los segmentos de las barras retiradas se separarán en una celda caliente, y algunos de ellos serán sometidos a rampas de potencia en un reactor experimental para ser examinados posteriormente. Las barras no segmentadas retiradas serán sometidas a ensayos no destructivos en celdas calientes.

Los ensayos en rampas de potencia tendrán como finalidad evaluar el comportamiento frente a transitorios de potencia de los nuevos materiales, así como su resistencia frente a los fenómenos de interacción pastilla-vaina (PCI).

El programa experimental finalizará con la inspección en celdas calientes que se realizará sobre dos tipos de barras:

- Barras extraídas de los elementos retirados de la central.
- Segmentos sometidos a los ensayos en rampa y segmentos *hermanos* no sometidos a rampa.

En el primer caso se realizarán inspecciones visuales e inspecciones dimensionales y perfilométricas. En el segundo caso, la inspección consistirá en un examen visual, dimensional y perfilométrico, análisis de los gases de fisión, metalografía y ceramografía de pastillas, ensayos de tracción y fatiga sobre vainas, análisis de hidrógeno, etcétera.

Por último, debe destacarse que en paralelo con la realización del programa experimental (fases II y III), el proyecto contempla llevar a cabo un importante número de actividades de ingeniería de apoyo al mismo –seguimiento de la irradiación, vigilancia de la química y radioquímica del refrigerante, etcétera– y de evaluación de resultados –determinación de historias de potencia, de fluencia neutrónica y de quemado de las barras, contraste con las predicciones de los modelos analíticos, actualización de las bases de datos de comportamiento del combustible, etcétera–. Todas estas actividades deben proporcionar un conocimiento más profundo del comportamiento de los nuevos materiales de vaina y pastilla, especialmente a altos grados de quemados y ante transitorios, lo que redundará en una mayor fiabilidad y rendimiento del combustible fabricado por esta empresa. 

La educación científica y los nuevos museos interactivos

Los centros interactivos de ciencia, que han alcanzado muy pronto cotas de popularidad insólitamente elevadas en todo el mundo, se han convertido ya en una herramienta complementaria,

pero indispensable, de la enseñanza más tradicional.

En ellos se ofrece la posibilidad de aprender ciencia a través de todos los sentidos, e incluso, como forma de diversión para todas las edades.

COMENZARON A PROLIFERAR hace dos o tres decenios en el mundo anglosajón y, posteriormente, llegaron a la mayoría de los países europeos. No son museos propiamente dichos —por ejemplo, no hay en ellos objetos de valor—, pero conservan al menos dos de las tres características esenciales de los museos, ya que en ellos se enseña y se expone, aunque no se conserve.

En la actualidad tenemos en España seis centros de estas características: Museo de la Ciencia, en Barcelona; dos en La Coruña: Casa de las Ciencias y Domus; Acciona, en Alcobendas (Madrid); Museo de la Ciencia y el Cosmos, en Santa Cruz de Tenerife, y Parque de las Ciencias, en Granada.

Los museos eran, en la Antigüedad, las casas de las Musas. El Museo, por excelencia, fue el fundado por Tolomeo Filadelfo en Alejandría, inicialmente dedicado a las

Musas y, por tanto, a las actividades artísticas. Mucho más tarde, durante el Renacimiento se reinventó el término para designar las colecciones de arte pictórico y escultórico de los Médici, en Florencia, agrupadas por Vasari en un edificio construido con ese exclusivo fin, la Galería de los Uffizi. Y a partir de entonces, la palabra museo va unida al coleccionismo de objetos valiosos, básicamente artísticos, con fines inicialmente conservadores que luego, poco a poco, fueron haciéndose pedagógicos e incluso meramente divulgativos y recreativos.

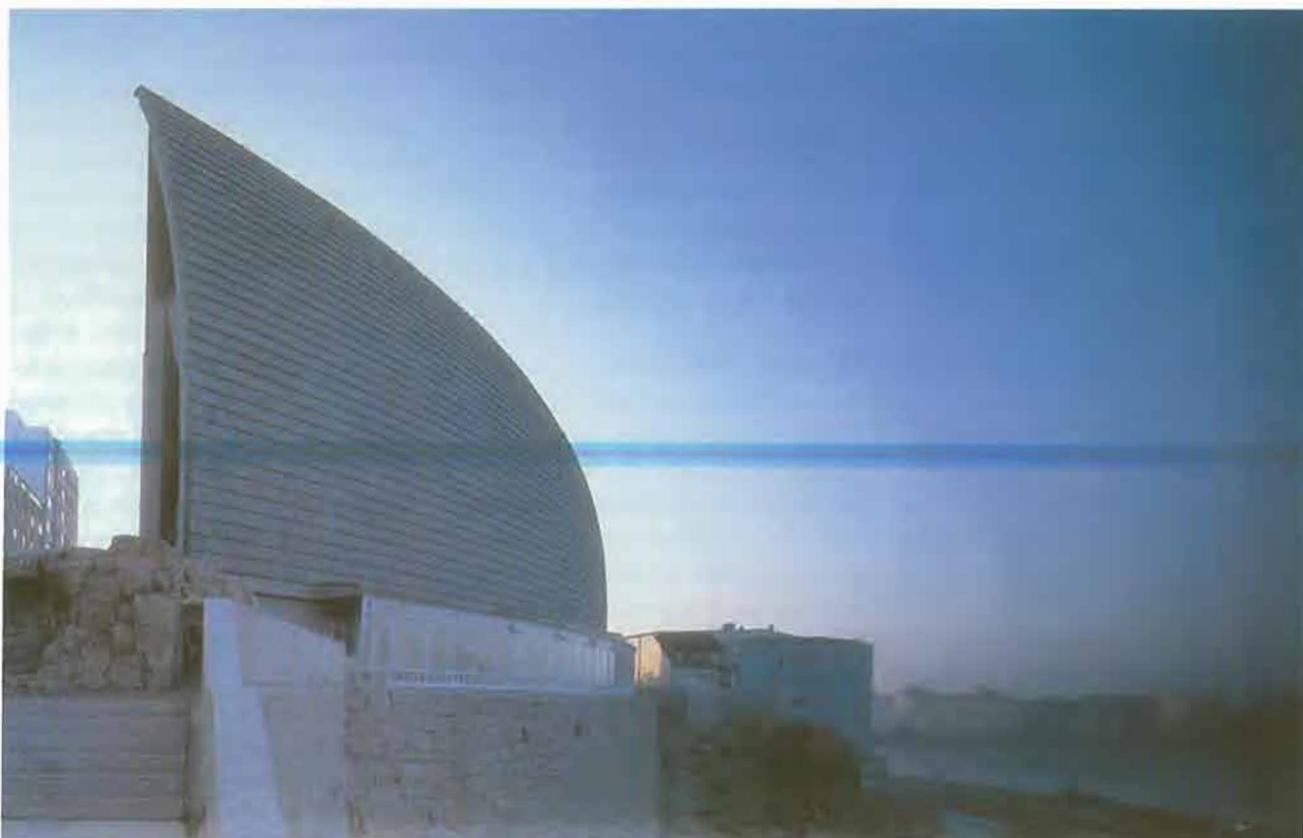
En la actualidad, coexisten numerosas definiciones de la palabra museo, pero todas ellas incluyen, explícita o implícitamente, dos conceptos esenciales —el estudio y la cultura— y tres temáticas principales objeto de ese estudio y ese bagaje cultural —las ciencias, las letras y las artes—.

Los nuevos museos interactivos de ciencia, aunque carecen de elementos valiosos que conservar, son pues, indudablemente, centros de difusión cultural en los que, además, se puede estudiar cuanto tiene

que ver con los procesos y fenómenos expuestos. Museos, en suma, que conservan ideas, no elementos materiales; y además lo hacen de manera tal que el público visitante, consumidor final de esos elementos de estudio ofertados, pueda incluso divertirse al hacerlo, participando activamente en el proceso transmisor de cultura. Esta interactividad, muy eficaz en estos centros y habitualmente pasiva en los museos de arte tradicionales, se plasma en un lema que se ha convertido en un clásico: en lugar de la tradicional recomendación de *no tocar* propia de los museos normales, aquí lo que se proclama es todo lo contrario, *prohibido no tocar*.

El lema se ha hecho popular y el público lo ha acogido con interés: el Museo de la Ciencia de Barcelona recibe al año casi medio millón de visitantes, los mismos que visitaron, entre abril de 1995 y marzo de 1996, los dos centros coruñeses. Acciona, en las afueras de Madrid, ha acogido en tres años a cerca de 600.000 personas, y el museo de Granada tiene asimismo del orden de 200.000 visitantes al año (ver tabla I en página 40).

* Físico, escritor y periodista, vicepresidente de la Asociación Española de Periodismo Científico, autor de 18 libros de divulgación sobre temas de ciencia, tecnología y medio ambiente. Director científico de Acciona.



HISAO SUZUKI

► Figura 1. En muchos casos los nuevos museos interactivos se han instalado en edificios singulares construidos especialmente para ellos. En la imagen, sede de Domus en la Coruña, obra del arquitecto japonés Arata Isozaki.

Son cifras que mueven a la reflexión. Estos museos son muy baratos; el más reciente, Domus de La Coruña, ha costado 1.000 millones, incluidos el diseño y la construcción de un edificio singular creado por el famoso arquitecto japonés Arata Isozaki. Compárese con el precio –quizá el arte no tenga precio, pero es obvio que las pinacotecas cuestan mucho dinero– de los muchos y buenos museos de arte moderno que tenemos en España; por no citar la famosa colección Thyssen, por la que las arcas del Estado tuvieron que desembolsar decenas de miles de millones.

¿Por qué tienen tanto éxito, en España y en todos los demás países, estos museos de nuevo cuño?

Desde luego, en ellos el valor de lo que se expone no obedece a su rareza o a un interés artístico explícito sino a otras cualidades didácticas y culturales habitualmente inéditas en el mundo de la museística.

Por ejemplo, la posibilidad de aprender no sólo observando sino sobre todo manipulando, incluso jugando. O bien, el hecho de poder comprender, quizá por primera vez, una determinada ley de la naturaleza hasta entonces sólo intuitiva muy lejanamente, incluso ignorada.

Detrás de ese éxito de la nueva museística interactiva de las ciencias late una profunda curiosidad del gran público por temas que uno podría considerar aburridos o superados por la enseñanza escolar recibida, y además un interés cierto por los nuevos acontecimientos que el devenir de la ciencia nos ofrece casi a diario.

Interés por la Ciencia

La revista *Política Científica*, que edita la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, publicaba en 1994 los resultados de una encuesta sobre las actitudes sociales hacia la ciencia en nuestro país, realizada por el Centro de Investi-

gaciones sobre la Realidad Social (CIRES), bajo la dirección del profesor Juan Díez Nicolás. El estudio no tiene desperdicio y revela de forma casi irrecusable el interés de nuestros conciudadanos por numerosos temas de la ciencia y la tecnología actuales.

Los españoles se interesan más por los descubrimientos médicos, los inventos, las nuevas tecnologías y los descubrimientos científicos recientes –en este orden– que, por ejemplo, por la actualidad deportiva –incluidos los triunfos, desde luego admirables, del ídolo Induráin– y no digamos por la política del país.

¡La ciencia le interesa más a la gente que la política, e incluso que los deportes! Y no es la afirmación de un fanático de la divulgación científica sino la conclusión que se desprende de un estudio sociológico irreprochable de ámbito nacional realizado hace apenas dos años.

El estudio anterior ofrece, en contrapartida, una imagen lamentable de la cultura científica de los españoles. A pesar de nuestro declarado interés por la ciencia, los españoles seguimos siendo bastante ignorantes en temas de esta índole. Por ejemplo, a la hora de citar algún científico eminente español, del pasado o del presente, sólo un 22% nombra a Severo Ochoa y un 16% a Ramón y Cajal. Fuera de los dos Nobel de la medicina hispana sólo son citados por un 1% de españoles otros científicos y técnicos como Isaac Peral, Grande Covián, de la Cierva, Oró, Marañón, Miguel Serret, Barraquer y Puigvert.

Y es que parece como si la ciencia en nuestro país estuviera, desde hace muchos decenios, reñida con la cultura. Ciencia y cultura son dos vocablos que expresan demasiadas cosas —nada fáciles de definir, por otra parte—, que muchos se han empeñado en disociar, aunque obviamente resultan indivisibles.

La cultura viene siendo entendida, tradicionalmente, sobre todo en España, como el conjunto de saberes y habilidades que el ser humano es capaz de desplegar, acumular y transmitir en los campos esencial-

mente literarios y artísticos. Los conocimientos relacionados con la ciencia, tanto básica como aplicada, parecen excluidos de ese ámbito cultural tan típicamente *de letras*. Cabe preguntarse si la cultura es únicamente *de letras*. O, dicho de otro modo, ¿tiene la ciencia algo que ver con la cultura?

El saber cotidiano

Antes de seguir adelante convendría aclarar que no estamos hablando solamente de la gran ciencia, esos conocimientos especializados de altísimo nivel mediante los cuales unas pocas personas investigan, de modo incomprensible para el resto de la humanidad, los últimos entresijos del mundo que nos rodea. Nos referimos sobre todo a una ciencia mucho más modesta, más básica también, que tiene mucho que ver con el mundo de todos los días, con las cosas consuetudinarias, no por más domésticas menos misteriosas, que son capaces de inquietar al personal más de la cuenta. Desde el supuesto riesgo de los hornos de microondas hasta los no menos supuestos apocalípticos peligros del agujero de ozono, pasando por el ABS de los coches o la absoluta estulticia de las homeo-

patías, astrologías, tarots y demás mancias al uso.

Bien, pues esa ciencia, compuesta de unos conocimientos básicos que no han de ser en ningún caso superiores a los que se imparten en los colegios (suponiendo que en los colegios se estuviera al día respecto a los avances científicos y tecnológicos más corrientes, lo que no es evidente), forma parte ineludiblemente de la cultura del hombre de hoy, con tanto o más derecho que los mismos conocimientos básicos de literatura, música o pintura que nos permiten comprender y gozar, de forma básica, las obras de los genios más ilustres. Uno puede encandilarse escuchando un nocturno de Chopin sin tener por ello que conocer las teorías más complejas del contrapunto o la armonía, lo mismo que uno puede deleitarse leyendo *Los pilares de la Tierra* de Ken Follet sin que ello requiera un doctorado en historia medieval o en filología inglesa.

De todos modos, la imagen de la ciencia en la sociedad actual es, globalmente considerada, bastante positiva. No cabe duda de que son mayoría los españoles que piensan que los científicos y, en general, la acti-

► Tabla 1. Promedio anual de visitantes a los principales museos de ciencia interactivos y comparación con los museos españoles más visitados (Fuente: Domus)



vidad investigadora suponen un gran bien para la Humanidad. Aunque existen asombrosas excepciones; por ejemplo, la preeminencia en los cómics y en las novelas de ficción del clásico sabio loco y malvado, cuando no despistado e inútil.

Esa imagen globalmente buena de la ciencia no se debe, no obstante, a lo que en la escuela hayamos podido aprender. La enseñanza de las disciplinas científicas —matemáticas, física, química, ciencias naturales— ha venido presentando tradicionalmente deficiencias notables que han conseguido, como logro indiscutible a la par que lamentable, que sean muchos los adultos que opinen que de matemáticas no entienden nada y que la física y la química se reducen a poco menos que unas cuantas fórmulas memorizadas y sin sentido práctico alguno.

Sea cual sea el talento de los divulgadores y la pertinencia de los múltiples medios de difusión del conocimiento —en la prensa diaria, en las revistas, en la televisión, en la radio, en los museos de ciencia, etcétera—, lo cierto es que todavía son muchos los españoles que declaran, a veces incluso con suficiencia, que ellos son unos negados para la matemática y la física, y que, además, eso no les preocupa nada. Porque la *cultura* no necesita de cuestiones tan abstrusas y porque, al final, lo que cuenta es el dinero y la forma de manejarlo mucho más que las grandes o pequeñas ideas que han hecho avanzar al mundo.

Ciencia y cultura

El problema es más grave de lo que parece. Algunas sociedades cometen el terrible error de pensar que los valores de tinte monetario son los más importantes; así asistimos, no poco inquietos, al nacimiento de toda una *cultura de tenderos*, dicho sea con todos los respetos hacia el comercio minorista. Un mundo en el que lo que cuenta es lo que se paga por una cosa, y en el que no hay más valor que la cuantificación meramente económica de un deter-

► **Figura 2.** Un estudiante comprueba cómo se puede obtener cualquier color a partir de los tres colores primarios en el módulo de óptica del Museo de la Ciencia de Barcelona.



MUSEO DE LA CIENCIA

minado bien. Un mundo donde el coste de un bien es más importante que el valor intrínseco de ese mismo bien.

En cuanto a la que pretende ignorar a la ciencia y se refugia en los arcanos literario-artísticos como única fuente de superior conocimiento, poco hay que decir sino que se trata de una limitación mental de personas cuyo cerebro quizá no haya podido dar más de sí.

Claro que lo más probable es que esas personas sí dispongan de un cerebro ágil y capaz; lo que les ocurrió de jóvenes fue que, simplemente, tuvieron malos profesores de ciencias. Una reciente encuesta francesa, cuyos resultados quizá sean trasladables sin demasiado error a nuestro país, muestra que a los 15 años la física y la química son las asignaturas que menos interesan a los alumnos; y este interés disminuye con la edad: un 40% de alumnos de 12 años dice interesarse por la física contra sólo un 27% a los 16 años. Lo que

no impide declarar al 85% de estos jóvenes de 12 a 16 años que “los científicos son personas abnegadas que trabajan para el bien de la Humanidad”. Algo falla en estos datos...

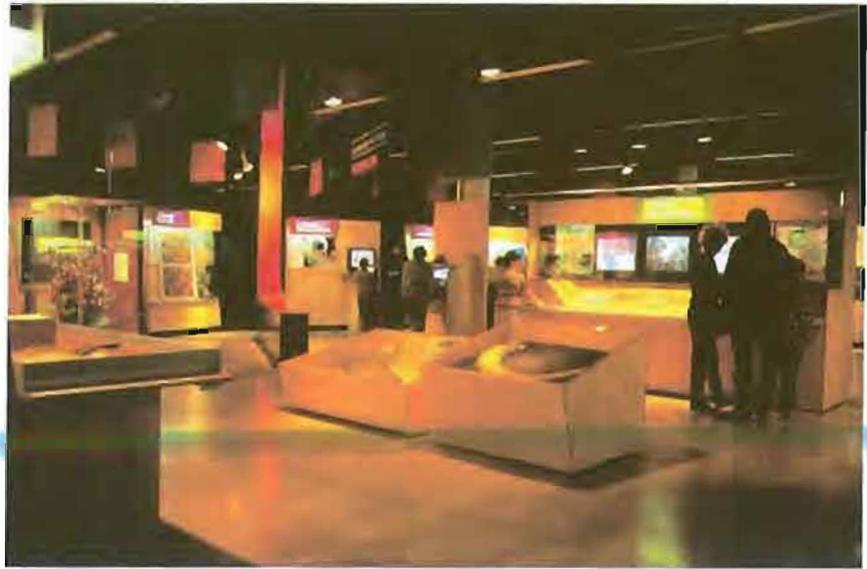
Curiosamente, las matemáticas son mejor valoradas que la física, la química o las ciencias naturales. En la encuesta francesa aludida, un 57% de los padres exigen de sus hijos que sean buenos alumnos en lengua, un 45% en matemáticas y un 36% en el resto de las ciencias (física, química, biología, geología). Por sexos, un 52% de los chicos declara su interés inicial por las matemáticas contra sólo un 37% de las chicas. Pero este interés matemático se ve rápidamente defraudado a causa de los programas escolares —juizados demasiados abstractos y complejos por la mayoría— y de los malos profesores —en la encuesta, sólo uno de cada diez profesores es capaz de promover en sus alumnos el interés por la matemática pura—.

Nadie puede negar que hoy día la ciencia influye de manera determinante en las ideas que tenemos sobre nosotros mismos, la naturaleza, la vida y la sociedad. Por su parte, el conocimiento tecnológico ha sido siempre, y lo es ahora cada vez en mayor medida, un factor fundamental de producción y de cambio social. Se puede afirmar que la tecnología siempre nace, sea cual sea su mecanismo de desarrollo, para dar respuesta a necesidades de la persona o de la economía.

Son muchos ya los sociólogos que afirman la existencia de unas condiciones especialmente singulares, que algunos engloban en la llamada sociedad postindustrial o sociedad de la información. Estos serían algunos de sus rasgos:

- La tecnología se ha hecho cada vez más científica -ya no se descubre por intuición ni por ensayo y error-. A su vez, la ciencia depende cada vez más de la tecnología -microscopios electrónicos, láseres, anticuerpos monoclonales, espectrómetros de masas de alta resolución...-.
- El hombre inventa recursos -por ejemplo, el silicio en los chips, la ingeniería genética, los nuevos materiales-.
- Los recursos son cada vez menos *materiales* -un kilo de uranio frente a 12 toneladas de petróleo, 25 kilos de fibra de vidrio frente a una tonelada de hilo de cobre-, lo que nos lleva hacia un descenso de los precios de las materias primas.
- El poder está más en el conocimiento que en la mano de obra: el tráfico de mercancías reales se ha visto ya superado por el de mercancías *virtuales* -básicamente, la información en sus múltiples facetas-.

Paradójicamente, esta situación nueva ha originado un distanciamiento creciente entre la cultura y las necesidades sociales. Desde comienzos de este siglo, el conocimiento científico ha crecido de manera exponencial. No en vano hoy viven, investigan y están produciendo ciencia el 90% de todos los



Jesús GÓMEZ

► Figura 3. Sala de la Biosfera del Parque de las Ciencias de Granada.

científicos que han existido a lo largo de la historia. Pero ese conocimiento no es universal, y queda reservado a élites muy concretas, a su vez ignorantes unas de lo que otras hacen y saben.

Por añadidura, la validez de las teorías científicas se revisa cada vez con mayor celeridad: las ideas de Aristóteles tuvieron una vigencia de dos milenios, el paradigma de Newton permaneció intocable tres siglos, pero hoy vemos revisar continuamente los modelos científicos, y cada vez más aceleradamente.

Conocimiento y sociedad

La consecuencia global es que los conocimientos en ciencia y tecnología de una persona poco tiempo después de salir de la escuela son hoy muy inferiores proporcionalmente a lo que han sido nunca a lo largo de la historia. El pueblo, destinatario y origen de la ciencia, está más alejado que nunca de la elaboración científica.

Este distanciamiento creciente entre ciencia y sociedad en el mundo de hoy sólo puede ser reajustado mediante la educación. Pero no un tipo de educación heredado de tiempos pasados, sino adaptado a lo que está ocurriendo hoy en el mundo, a la acelerada

velocidad de los cambios actuales en el mundo del conocimiento científico.

El logro más inmediato de una educación básica en el área de la ciencia y la tecnología debería poder conseguir que la persona se encuentre cómoda, es decir, en equilibrio con su entorno, tanto natural como tecnológico. Esto significa por una parte que nadie tenga temor, que no se sienta dominado ni víctima de las máquinas ni de los descubrimientos científicos; y ello implica conocerlos lo suficiente como para generar un sentimiento de control y seguridad. Lamentablemente, múltiples ejemplos -el ya citado temor a los microondas domésticos es ilustrativo al respecto- demuestran que no es así.

Por otra parte, el conocimiento del medio natural debería permitir apreciar mejor los pros y los contras de cada actuación individual y colectiva sobre nuestro entorno, con la finalidad última de mantenerlo de manera duradera; los ejemplos de los incendios forestales o de los vertederos incontrolados demuestran que tampoco aquí se cumple esa premisa ideal.

Sin embargo, los logros de la ciencia en la historia de la humanidad han sido impresionantes, espe-

cialmente en estos últimos tiempos; desde haber prolongado la vida del hombre, ayudado a combatir el hambre y aumentado las posibilidades de una vida mejor para la descendencia, hasta la obtención de respuestas de toda índole a múltiples necesidades humanas, económicas y culturales, repercutiendo positivamente en lo que se ha dado en llamar globalmente calidad de vida.

Con todo, el impacto de la ciencia y la tecnología sobre la sociedad y sobre la naturaleza representa una modificación del entorno que implica una contrapartida: para conservar el equilibrio con el medio el hombre ha de conocer mejor los mecanismos generales y las ideas fundamentales que sirven para interpretar el funcionamiento de todo el sistema. Y para ello, ha-

brá necesariamente de mejorar su cultura científica.

Esta educación en las ciencias debería influir en la calidad de vida mediante la creación de unos sentimientos, que podríamos expresar como necesidades de *seguridad, responsabilidad, participación, satisfacción y preparación para la producción.*

En cuanto a la *seguridad*, ante todo, el hombre no debiera sentirse agredido por el entorno tecnológico. A comienzos de este siglo la gente vivía mucho más cerca de la naturaleza y sus enemigos básicos eran las catástrofes naturales —tormentas, inundaciones, pestes...—, amén de sus propios congéneres en guerra. Pero hoy, las ciudades y el desarrollo industrial están sometidos a una nueva ecología urbana. El hombre es consciente de que, al

mismo tiempo que la sociedad se beneficia de las nuevas tecnologías, se van creando numerosas y nuevas dependencias. Por ejemplo, la falta de electricidad o de gasolina pueden suponer el colapso absoluto de toda una ciudad. Nuestro entorno se compone de toda clase de máquinas que forman una especie de selva en cuyo interior resulta difícil encontrarse cómodos; pero tenemos que aprender a vivir en esa selva.

Este sentimiento de seguridad es antitético al antiguo *cientifismo* que se derivaba en muchas ocasiones de la educación en la escuela y que partía de las premisas de la objetividad, infalibilidad y bondad absoluta de la ciencia y sus derivaciones.

En cuanto a la necesidad de *responsabilidad*, es necesario asumir individual y colectivamente nues-

► Figuras 4 y 5. Dos aproximaciones al estudio del rostro humano en el museo Domus de La Coruña. A la derecha, imagen de la Gioconda hecha con miles de fotos de carnet; abajo, estudio de simetrías.



LUIS CARRE



ACCIONA



LUIS CARRE



ACCIONA

► Figuras 6 y 7. Arriba, experimentación de distintos tipos de olores. Abajo, unos niños juegan en Acciona con un aparato diseñado para comprobar la propagación del sonido.

tro compromiso con el entorno natural y con el futuro de la humanidad. Este ejercicio de la responsabilidad se efectúa tomando decisiones o influyendo en la toma de decisiones, pero siempre desde una perspectiva crítica, que solamente es posible a partir de la cultura científica.

La necesidad de *participación* deriva del ejercicio de una democracia auténtica e implica una postura crítica ante las posibles manipulaciones en temas relacionados con los avances de la ciencia y la tecnología. Conviene no olvidar que la ciencia y la tecnología afectan a casi todos los aspectos de nuestra vida: economía, trabajo, bienestar, tiempo libre, incluyendo asimismo los componentes estéticos y éticos.

Es evidente que con un mejor conocimiento científico se pueden abordar mejor las soluciones a problemas como los relacionados con las fuentes de energía, el control de la población, la salud, la bioingeniería o la calidad del medio ambiente natural.

La necesidad de *satisfacción* se obtiene cuando se entiende la creación científica y cuando se crea ciencia. Comprender el funcionamiento de un aparato doméstico, lo mismo que aplicar a una situación de la vida corriente el segundo principio de la termodinámica, son procesos que tienen, al menos en potencia, tanta capacidad de satisfacción como la lectura de una obra literaria o la contemplación de una obra de arte.

Tradición y educación

Por último, necesitamos *prepararnos para la producción*. Y eso es lo que pretende, al menos en teoría, la educación: una formación adecuada para que sea posible el ejercicio de las actividades profesionales con el mayor grado de eficacia y satisfacción, tanto personal como social. Necesario es constatar que, en este campo, España sigue teniendo un alto déficit de profesionales

científico-técnicos a todos los niveles. Quizá estemos padeciendo también aquí nuestra tradición de *país literario y humanista*, de espaldas a la ciencia. Intentar cambiar el ambiente social hacia las actividades científicas resulta también clave en este punto.

El panorama se complementa con una observación no muy optimista: resulta forzoso reconocer la insuficiencia del actual sistema educativo vigente en España. Algunas de las razones de esta situación insatisfactoria están sin duda relacionadas con los errores de nuestra tradición cultural, del propio planteamiento escolar, de la concepción de la enseñanza de las ciencias e incluso de la percepción que se tiene del progreso del conocimiento.

Precisamente a la tradición cultural española habría que pedirle responsabilidades, tanto al fervor por la escolástica y al olvido de Francis Bacon, por ejemplo, como a determinadas frases brillantes, por ejemplo, de Unamuno, que han sido coreadas por unos y otros sin entender la gravedad de lo que en ellas se afirma.

La ausencia de tradición de un pensamiento científico y técnico en España se ha traducido en una debilidad congénita de los aspectos científicos en el diseño educativo. Y habría que añadir, además, que en la tradición occidental se ha presentado siempre el estudio de la ciencia separado de sus implicaciones sociales, de su interacción con la historia de las ideas y con las demás facetas de la cultura del hombre, lo que ha servido para alejarla del ciudadano y para, en cierto sentido, deshumanizarla.

Por lo que respecta a los niveles de educación formal no puede seguir manteniéndose el mismo esquema de curriculum que cuando era útil y posible condensar todo el saber del pasado. En la escuela han de sentarse las bases para un conocimiento del conocimiento, para el ejercicio de procesos científicos, para aprender a aprender.

Pero en la escuela y en la sociedad se desprecian los matices subjetivos y creativos de la ciencia y de los procesos científicos. La ciencia se presenta como una verdad construida y objetiva que hay que aceptar (pasamos de la autoridad de Aristóteles a la de Newton, sin cuestionar siquiera mínimamente ese concepto de autoridad). Al niño se le invita en la escuela a redactar y a pintar (sin importar que su redacción jamás vaya a ser publicada ni su pintura pase a ningún museo), pero nunca se le pide que formule una hipótesis, identifique las variables en un proceso o elabore una teoría, por peregrinas que pudieran resultar. Y así resulta que la persona no puede tener el sentimiento de que la ciencia es una creación humana, que todos podemos entender y hacer ciencia.

Claridad en los mensajes

Desde luego, hay otras dificultades añadidas; por ejemplo, las que tienen su origen en la ciencia misma: velocidad de los cambios; extensión, profundidad y variedad de los temas; dificultad de comprensión por excesos de abstracción; metalingüajes no siempre asequibles... Los mismos científicos contribuyen a la opacidad de sus mensajes: falta de claridad en su comunicación con los *profanos*, ausencia de amenidad, excesiva precisión, no siempre imprescindible...

Antes de seguir adelante, se impone una reflexión: tal como está planificada nuestra sociedad, la educación formal se recibe exclusivamente en los primeros años de la vida. Lo que quiere decir que una persona entra en la madurez con unos esquemas de conocimiento establecidos *para siempre*, lo que en materia de ciencia supone que acaben siendo muy pronto obsoletos, pero que funcionan sociológicamente como si fueran caracteres tan innatos como el sexo o el color de la piel.

Pero el mundo cambia, y sigue haciéndolo, de forma tan rápida

que invalida nuestros mecanismos de equilibrio. Y por eso seguimos necesitando educación. El fruto más popularizable de la comunicación de la ciencia, la llamada divulgación científica, es en realidad una forma de educación permanente que puede adquirir los matices, las formas y los medios más diversos.

El papel de una educación no escolar de carácter continuado no resulta fácil de definir. En cuanto a sus contenidos, parece fundamental la idea de que la cultura científica implica el conocimiento de unos conceptos básicos, la práctica de unos procesos y la vivencia de unas actitudes.

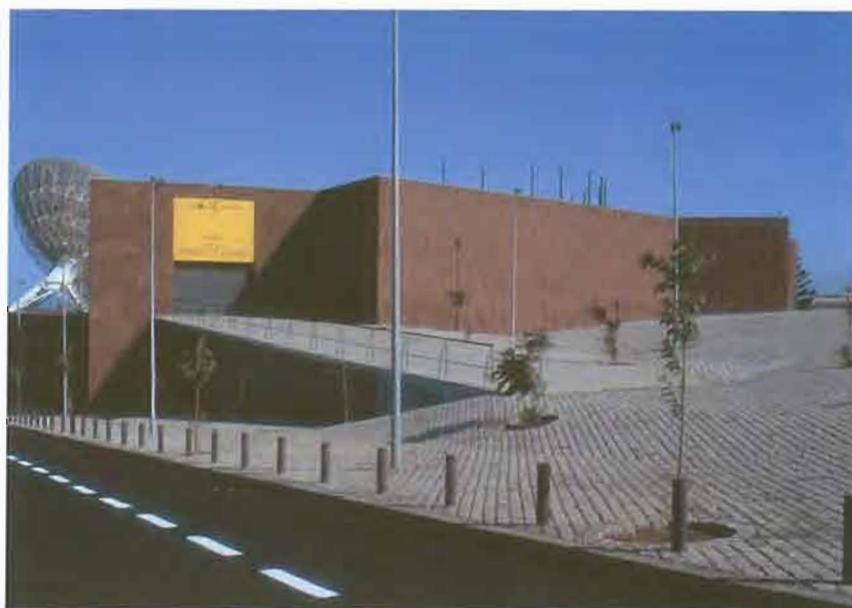
Conceptos e ideas básicas de la ciencia son, por ejemplo, organismo, objeto material, interacción, sistema, variable, medio ambiente, ciclos de la vida, teoría, modelo, fuente de energía. Procesos directamente implicados en el método científico podrían ser observar, describir, trazar gráficos, identificar variables, formular hipótesis, predecir, interpolar, proponer modelos, clasificar... Finalmente, actitudes científicas son, sin duda, la curiosidad, la constancia, la creatividad, el sentido crítico, el respeto a la lógica.

La educación permanente no escolar puede utilizar múltiples recursos para potenciar todos estos mecanismos. Entre ellos, y de manera preeminente, se encuentran desde luego los museos o centros de ciencia interactivos, y muchos de sus derivados: planetarios, acuarios, jardines botánicos, cine y vídeo científico, centros de información de organismos o instalaciones industriales, conferencias en torno a cuestiones de ciencia, tecnología y medio ambiente (cada vez más frecuentes en España), etcétera.

Este aprendizaje de las ciencias fuera del aula posibilita un ritmo individual, que es necesario porque cada uno tiene su propia secuencia para ver y aprehender. Cada uno se detiene donde quiere y corre cuan-



JESÚS GÓMEZ



MUSEO DE TENERIFE

► Figuras 8 y 9. Arriba, sede del Parque de las Ciencias de Granada. Abajo, vista exterior del Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife.

do quiere. Los lentos no se agobian y los rápidos no se aburren. Además, se puede compartir la experiencia con los demás, contrastando las ideas que se van forjando al contacto con la experiencia, comentando con otras personas las cosas que se ven, las ideas que se nos ocurren. El aprendizaje activo casi nunca se genera de forma individual.

Por otra parte, los temas tienen relación directa con el medio, están necesariamente en el entorno, tanto físico (nuevos materiales, nuevos

fenómenos) como natural (especies amenazadas de extinción, riesgos ambientales ligados a la contaminación o los residuos) o tecnológico (nuevas máquinas, inventos inicialmente incomprensibles).

Todo ello fomenta la curiosidad, porque se trata de cuestiones que interesan a todo el mundo. La vistosidad, la espectacularidad, la sorpresa, la participación en un fenómeno son ingredientes clave para iniciar el proceso de formulación de preguntas, imprescindible en todo aprendizaje.

En el aprendizaje continuado se admite y convalida la divergencia, casi de manera obligada. Esto significa ver y pensar cosas diferentes ante los mismos estímulos, llegando muchas veces a preguntas y respuestas diferentes. Es el *lateral thinking*, el *pensamiento divergente* sin el cual el avance de la ciencia sería probablemente imposible.

Todo lo anteriormente expuesto nos lleva a una realidad cambiante —que hoy día ya se vislumbra pero que será patente dentro de pocos años—, a un cambio profundo con respecto a la educación de jóvenes y adultos. Es la ruptura del enciclopedismo y, en cierto sentido, la vuelta a esquemas medievales pre-renacentistas, pero con métodos de comunicación e interconexión casi omnipresentes, propios de la nueva sociedad de la información.

El cambio estaría definido por muchas, quizá la mayoría, de las tendencias siguientes:

1. De aprender en la escuela pasaremos a hacerlo en todos los sitios, sobre todo a través de los medios de comunicación y las autopistas de la información.
2. De aprender cosas consideradas tradicionalmente como fundamentales pasaremos a aprender cosas que sobre todo están de actualidad.
3. Trasladaremos la autoridad de los libros a la autoridad del periódico, de las redes, de los medios de comunicación en su sentido más amplio.
4. Del maestro como docente pasaremos al periodista y a los profesionales de cada área como fuentes de información.
5. Un currículum cerrado, necesario e igual para todos, se irá convirtiendo cada vez más en un aprendizaje basado en la curiosidad de cada uno, y por tanto diferente, por ser individual, a la medida.
6. Convertiremos el aprendizaje exclusivo de la infancia y la juventud en otro que dure toda la vida.
7. Nuestros conocimientos supuestamente duraderos y estables

pasarán a ser cada vez más cambiantes y provisionales.

8. La enseñanza dividida en disciplinas académicas dará paso a enfoques interdisciplinares y cada vez más abiertos.

En los centros interactivos de ciencia queda patente, de manera arquetípica, esa necesidad de educación continua de las sociedades actuales. Ya hemos visto que tienen una finalidad eminentemente educativa y divulgativa. Se basan en la *interactividad*, desde luego, pero también en abordar una *temática contemporánea*, presentando un *ambiente festivo y lúdico* y otras características que, en conjunto, han merecido la atención de los públicos de todas las edades en muy poco tiempo.

Se defiende en ellos la idea de que, para contribuir eficazmente a la educación científica de los ciudadanos, es más importante atender al desarrollo de determinadas actitudes, tratando de crear ambientes y sensaciones, que pretender facilitar informaciones concretas y exhaustivas al mejor estilo académico.

Jugar a la ciencia

Como ejemplo de esas actitudes que se pretende potenciar se pueden considerar la curiosidad, el espíritu crítico, la creatividad... Además, los centros de ciencia interactivos más modernos son polivalentes, participativos, con especial énfasis en la conceptualización. El visitante no se acerca reverentemente a un objeto expuesto sino que puede manipularlo, examinarlo, jugar con él... Puede, en suma, jugar a hacer ciencia.

Es muy probable que por todas esas razones, y algunas otras que quizá se nos escapen, los centros de ciencia interactivos comiencen a calar hondo en la sociedad española. Y lo hacen de la mano de dos bazas de inconmensurable valor: el apoyo directo a la enseñanza de las ciencias de nuestros jóvenes —buena parte de sus visitantes son

escolares—, y el éxito resonante de público de todas las edades, que descubre algo que podría parecer insólito hace unos años: en esencia, la ciencia puede llegar a ser divertida.

El éxito de los pioneros, el Museo de la Ciencia de Barcelona y la Casa de las Ciencias de La Coruña, ha sido reconocido en otros lugares de España. Y así, en estos últimos años han aparecido más centros interactivos —Museo Interactivo de la Ciencia Acciona, de Alcobendas (Madrid), Parque de las Ciencias de Granada, Museo de la Ciencia y del Cosmos de Santa Cruz de Tenerife, Domus de La Coruña—. Además, se han ido transformando otros de gran solera —Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid— y se han proyectado algunos más, entre otros el Museo de la Ciencia de Cuenca, Ciudad de la Ciencia de Valencia, Museo de la Ciencia de Málaga, Museo de la Ciencia de Murcia, Museo de la Ciencia y la Tecnología de Las Palmas.

La presencia de tan atípicos museos, en los que la habitual reverencia con que se contemplan cuadros o esculturas es sustituida por una algazara y unas actitudes más propias de un lugar de diversión —¿quién iba a decirnos hace unos lustros que el principio de Arquímedes o las Leyes de Newton podrían ser objeto de diversión!—, viene a coincidir en España con la eclosión de las revistas y otros medios de divulgar ciencia. Una coincidencia casi simultánea, también, con la llegada de la democracia al país: las dictaduras no son muy amigas de la cultura...

Los demócratas profundos, sean del signo político que sean, saben que las mayores cotas de libertad las adquiere un pueblo con la cultura. Y no sólo la tradicional cultura literario-artística —llamada erróneamente *de letras*—, sino la cultura integral de la persona, que incluye inexorablemente los aspectos básicos del conocimiento científico-técnico.

Un centro de ciencia interactivo es, precisamente, un centro cultural en el que se estimula la participación, se aprende a jugar con la ciencia, se considera el conocimiento como una fascinante aventura sin fronteras... La ciencia pierde su carácter absurdamente sacralizado y se convierte en un juego abierto en el que las respuestas tienen quizá menos importancia que el hecho de plantearse una o varias preguntas, en el que no importa tanto el saber como el hecho de aprender a acercarse al saber y a disfrutar de él.

El éxito de público, fuera de España y ahora en nuestro país, confirma la excelencia de estos planteamientos. Las cifras de visitantes a los escasos centros interactivos que hay en el país mueven a la reflexión. Sólo los grandes centros de arte de nivel internacional —el Museo del Prado, el Centro de Arte Contemporáneo Reina Sofía de Madrid, y el Museo Picasso de Barcelona—, los superan en número de visitantes, y por poco.

Los museos de ciencia interactivos están jugando un papel cada vez más importante, en el sentido



ACCIONA

► Figura 10. Actividades de la Piscina de la Ciencia en Acciona. Un ejemplo claro de que en los museos de ciencia caben la educación y la diversión.

de contribuir a satisfacer, a menudo sin ni siquiera pretenderlo *a priori*, las necesidades educativas de la sociedad en materia científica. Mientras los museos tradicionales subrayan el coleccionismo y la investigación por parte de una élite científica o muy informada, los nuevos centros de ciencia están dedicados fundamentalmente a fomentar el acercamiento a la ciencia y la tecnología y la afición

por el conocimiento científico mediante elementos de exposición activos e informales, utilizando además una enorme variedad de técnicas y actividades.

En conjunto, los centros interactivos son unos museos extraños, en los que cabe la educación pero también la mera diversión. Son centros educativos, museos y lugares de diversión; todo a la vez. No hay convergencias —al menos, no de forma aparente, aunque sí puede haberlas en el diseño previo de algunos de los elementos expuestos— sino incitaciones a la divergencia, a la posibilidad de autosatisfacción, a la búsqueda de respuestas para las inquietudes de los visitantes.

Pero, por encima de todas las cosas, son lugares en los que el visitante pasa el rato de manera agradable, aprendiendo de nuevo a jugar como cuando era un niño pequeño, dirigiéndose a los temas que más le interesan y deteniéndose sólo en aquello que desea manipular o leer... Y, precisamente por ello, aprendiendo con la máxima eficacia cuestiones que de otro modo quizá seguiría ignorando para siempre. ☺

Noticias

● Información general.....	48	● Protección radiológica.....	54
● Instalaciones nucleares y radiactivas.....	51	● Publicaciones.....	55
● Ciclo del combustible y gestión de residuos... 53		● Cursos y conferencias.....	55

● INFORMACIÓN GENERAL

Jornadas sobre Ética y Tecnología Nuclear



De izquierda a derecha, José Alejandro Pina, presidente de ENRESA, Juan Manuel Kindelán, presidente del CSN, y José Luis González, presidente de la SNE.

El día 5 de marzo de 1996, en el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, tuvieron lugar las I Jornadas sobre Ética y Tecnología Nuclear, en las que participaron Juan Manuel Kindelán, presidente del CSN, y los consejeros Agustín Alonso y Aníbal Martín, junto con otros representantes del Ministerio de Industria y Energía, de la Sociedad Nuclear Española, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y de ENRESA, así como numerosos profesionales relacionados con el sector nuclear.

Durante la reunión se discutieron ampliamente los aspectos éticos y sociales implicados en el uso de la energía nuclear y sus repercusiones sobre el medio ambiente, la responsabilidad que los técnicos tienen en hacer llegar a la sociedad sus conocimientos sobre estos temas y sobre los mediadores que permiten seguir el grado de asimilación por los ciudadanos de los avances científicos y tecnológicos.

Las jornadas resultaron de gran interés, no sólo por la importancia de los temas tratados, sino por ser la primera vez que especialistas nucleares y de otros campos del desarrollo científico y social discutieron públicamente los aspectos éticos de cuestiones que producen intranquilidad social y que son frecuente tema de debate en diferentes medios de comunicación.

Presentación del Proyecto Halden

El Proyecto Halden es un proyecto internacional patrocinado por la OCDE en el que participan más de 15 países a tra-

vés de laboratorios nacionales, organismos reguladores, suministradores principales y empresas o consorcios eléctricos. En total cooperan más de 100 organizaciones.

España ha participado en dicho proyecto desde 1991, mediante la constitución de un consorcio nacional integrado por Ciemat, CSN, DTN, Enusa y Tecnatom. El programa actual corresponde al periodo 1994-1996.

Las áreas de trabajo son, básicamente, combustible, materiales e interacción hombre-máquina. Sobre este último tema, el 18 de abril de 1996 tuvo lugar en Madrid, en el salón de actos de Tecnatom, una presentación de las actividades desarrolladas en España.

Las ponencias presentadas en la reunión se agruparon en cuatro sesiones dedicadas, respectivamente, a:

- Sistemas computerizados de apoyo al operador.
- Conceptos avanzados de salas de control.
- Actuación del operador en la sala de control.
- Perspectivas de futuro.

Plan Quinquenal de Investigación del CSN

Entre las actividades incluidas en el *Plan de Orientación Estratégica*, aprobado por el CSN en septiembre de 1995, está el impulso al programa de investigación y a la política tecnológica del organismo.

Según la ley de creación del CSN, una de sus misiones es fomentar la investigación por parte de instituciones y organismos nacionales, así como participar y mantenerse informado de los avances en este campo, a nivel nacional e internacional. Dicho fomento lleva implícito, en todo caso, el seguimiento y aprovechamiento de las actividades de investigación y su financiación parcial.

El Pleno del CSN aprobó el 8 de febrero de 1996 el *Plan Quinquenal de Investigación 1996-2000*, que no pretende ser rígido ni exhaustivo, y que representa un esfuerzo de continuidad con el primer Plan de I+D del CSN, publicado en 1987.

El Plan se agrupa en tres líneas de investigación:

- Explotación de instalaciones nucleares. Comprende las áreas de investigación de termohidráulica y neutrónica; accidentes severos; análisis del riesgo (fiabilidad y factores humanos), integridad de componentes y estructuras y envejecimiento de materiales.
- Protección radiológica. Comprende las áreas de investigación de efectos radiológicos en el hombre y los seres vivos; epidemiología; protección radiológica operacional; consecuencias radiológicas de los accidentes severos (gestión de las

emergencias y recuperación ambiental) y, finalmente, impacto radiológico ambiental de las instalaciones nucleares.

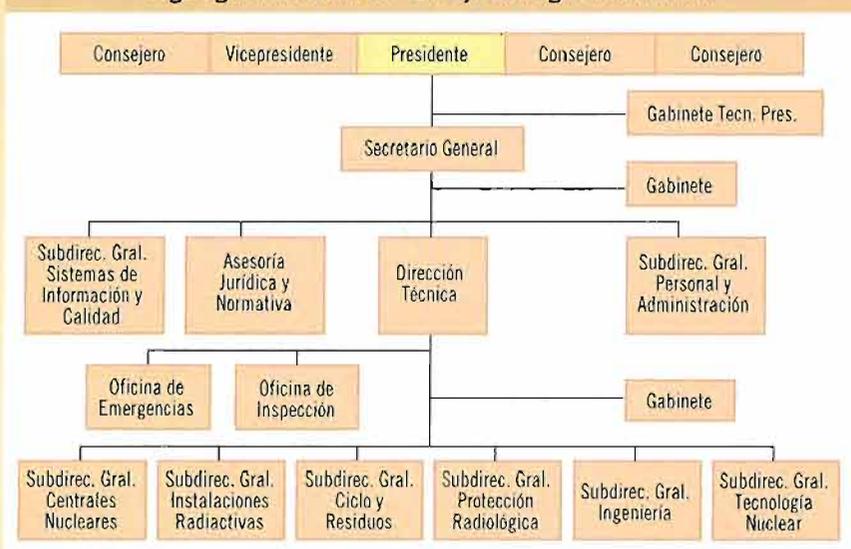
☐ Emplazamientos y radioecología. Comprende las áreas de investigación en la geosfera y la biosfera.

El CSN presentó el plan a los sectores interesados en una reunión que tuvo lugar el 11 de marzo de 1996. Previamente se había llevado a cabo una presentación interna para los propios expertos del organismo. El Plan Quinquenal puede solicitarse en el Servicio de Publicaciones del CSN.

Nueva estructura del CSN

La estructura del CSN, en su estatuto de 1982, se concibió como una organización matricial, con una parte dedicada a la gestión de los correspondientes proyectos y otra como apoyo técnico. Esta característica se ha mantenido desde entonces ya que, aunque plantea una coordinación más compleja, ha resultado eficaz, permitiendo una correcta utilización de los recursos de personal.

Organigrama actual del Consejo de Seguridad Nuclear



Tras la incorporación del nuevo Pleno del CSN se abordó el desarrollo de un *Plan de Orientación Estratégica 1995-2000* que se aprobó en septiembre de 1995; para el mejor desarrollo de dicho plan, se constituyó una Comisión con el objetivo de proponer al Pleno una estructura organizativa concordante con las líneas estratégicas aprobadas.

La nueva estructura, aprobada por el CSN a finales de 1995, incluye la creación de una Subdirección General de Sistemas de Información y Calidad, dependiente de la Secretaría General, para hacerse cargo de las tareas de gestión documental y archivo, desarrollo de sistemas de información y mejora de la organización y garantía de calidad interna.

De la Secretaría General depende, además, la Dirección Técnica, una Subdirección General de Personal y Administración, que gestiona los recursos humanos y financieros del organismo, y una Subdirección General de Asesoría Jurídica y Normativa.

De la Dirección Técnica dependen:

☐ Una Oficina de Inspección encargada de reforzar la coordinación, el desarrollo de procedimientos, la homogenei-

zación de criterios, la implantación de acciones correctoras y la aplicación de las prácticas internacionales en los programas de inspección y auditorías que lleva a cabo el CSN.

☐ Una Oficina de Emergencias, a la que se adscriben los efectivos de la antigua Unidad de Emergencias, que coordina la actuación del CSN en el ámbito de sus competencias, mejorando la capacidad de respuesta en lo que se refiere a procedimientos de actuación, colaboración con instituciones externas y desarrollo de la segunda y tercera fase de las emergencias.

☐ La Subdirección General de Centrales Nucleares, que agrupa las actividades de evaluación e inspección y seguimiento de la operación con las de gestión de licencias de personal de estas instalaciones y la garantía de calidad externa.

☐ La Subdirección General de Instalaciones Radiactivas, que agrupa las actividades de evaluación e inspección y seguimiento de la operación de este tipo de instalaciones con la gestión de licencias de personal, la autorización de

los servicios y unidades técnicas de protección radiológica relacionados, y la autorización de las empresas de venta y asistencia técnica para instalaciones de radiodiagnóstico.

☐ La Subdirección General de Ciclo y Residuos, que reúne las actividades de licenciamiento y seguimiento de la operación de las instalaciones del ciclo del combustible y refuerza las tareas que deben ser desarrolladas por el CSN en relación con los residuos radiactivos de alta actividad.

☐ La Subdirección General de Protección Radiológica, que realiza las actividades de protección radiológica de los trabajadores profesionalmente expuestos, de los miembros

del público y del medio ambiente, la autorización de los servicios de dosimetría personal, y la evaluación e inspección de los servicios médicos especializados en la vigilancia de los trabajadores profesionalmente expuestos.

☐ La Subdirección General de Ingeniería, que refuerza sus tareas de evaluación técnica en ingeniería convencional –mecánica y estructural, mantenimiento y sistemas auxiliares, eléctrica y de instrumentación y control, y sistemas nucleares–.

☐ La Subdirección General de Tecnología Nuclear, que engloba funciones de evaluación técnica en temas específicamente nucleares –física del reactor, análisis probabilista de seguridad y factores humanos– con otros que estaban siendo evaluados por la extinta Subdirección de Emplazamientos y Programas Tecnológicos –ciencias de la tierra, modelización y simulación y coordinación de programas de investigación y desarrollo–. El objetivo fundamental es reforzar la coordinación de los programas de investigación y crear un soporte técnico de expertos en tecnologías específicamente nucleares.

Acuerdo de colaboración KINS-CSN



Firma del acuerdo de colaboración KINS-CSN.

El pasado 13 de abril se firmó un acuerdo de cooperación técnica entre el KINS (Korea Institute of Nuclear Safety) y el CSN. El organismo regulador coreano depende del Ministerio de Ciencia y Tecnología, cuyo titular es el profesor KunMo Chung. El acto tuvo lugar en la sede del KINS, en Taejon, firmando, por parte de Corea, el presidente del organismo regulador coreano, Se-Jong Kim, y el consejero del CSN, Rafael Caro, en representación del presidente.

La misión española desplazada a Seúl para asistir a esta firma y a otros actos de estrechamiento de relaciones y colaboración

entre los dos países estuvo formada, además del consejero del CSN, por Luis Echávarri, director general del Foro de la Industria Nuclear Española, Manuel Acero, director del DTN, y Mariano Cereceda, director de Investigación y Desarrollo de Tecnatom, S.A.



Dr. Chong (presidente de Hanwha, Japón), Prof. KunMo Chung (ministro de Ciencia y Tecnología) y Dr. Caro (CSN), en una recepción ofrecida por la Sociedad Nuclear Coreana.

Presentaciones en el CSN a cargo de diversos especialistas

□ Profesor Maurice Tubiana, miembro de las Academias de Ciencias y Medicina de Francia y presidente del Centro Antoine Becquerel de París, el 8 de marzo de 1996: *Reflections on the Scientific Bases Supporting the International System for Radiation Protection.*

□ Doctor Lennart Sjöberg, director del Centro de Investigación del Riesgo de la Escuela de Economía de Estocolmo y Coordinador del Programa de Investigación del Riesgo de la OIEA, el 9 de mayo de 1996: *Radiological Risk Perception. Impact of the Tchernobyl Accident.*

□ Profesor Patrick Reyners, director del Servicio Jurídico de la NEA, el 28 de mayo de 1996: *Modernisation of the Nuclear Civil Liability Regime.*

□ Profesor Enno N. Hicken, director del Instituto de Investigación sobre Seguridad y Tecnología Nuclear del Centro

Alemán de Investigación de Jülich, el 17 de junio de 1996: *New Licensing Requirements for PWR's and its Appreciation to the EPR.*

□ Profesor Fernando Rodríguez Artalejo, catedrático de Medicina Preventiva y Salud Pública de la Universidad Autónoma de Madrid, el 26 de junio de 1996: *La epidemiología y los efectos sobre la salud de las bajas dosis de radiaciones ionizantes.*

□ Profesor Miguel Bajo, catedrático de Derecho Penal de la Universidad Autónoma de Madrid, el 12 de julio de 1996: *Responsabilidad penal de los funcionarios públicos.*

Cooperación entre las autoridades reguladoras de China y España

En el marco del Convenio de Cooperación entre el CSN y la autoridad reguladora nuclear china, que data de 1991, han viajado a China el presidente del CSN, Juan Manuel Kindelán, el director técnico, Antonio Gea, y la jefa del Gabinete Técnico de la Presidencia, Carmen Martínez Ten, del 17 al 25 de mayo de 1996. La delegación del CSN tuvo ocasión de discutir aspectos concretos de colaboración entre los dos organismos reguladores, programando una visita a España de la presidencia del National Nuclear Safety Administration para finales de 1996, con el fin de firmar una prolongación del acuerdo vigente. Los responsables del CSN visitaron las dos centrales nucleares chinas en operación y los centros de investigación en temas nucleares de las universidades de Tsing-Hua y Xi'an Jiaotong. Las perspectivas de desarrollo en los próximos años del sector nucleoelectrónico chino son muy importantes y se prevé pasar de los 2,6 MW instalados a unos 10 MW en el próximo decenio.



La delegación del CSN durante su visita a la central nuclear de Daya Bay.

La delegación española pudo constatar la eficiencia del funcionamiento de las centrales chinas, la importancia de la planificación prevista en el desarrollo de este sector, así como el cambio espectacular que se observa en el nivel de vida y el desarrollo industrial y urbano del país en los ocho años transcurridos desde la anterior visita del presidente del CSN.

Comparecencia del CSN en el Congreso de los Diputados

El presidente del CSN compareció, el pasado 25 de junio, ante la Ponencia de la Comisión de Industria del Congreso

de los Diputados encargada de estudiar los informes semestrales del organismo, para exponer las actuaciones desarrolladas durante 1995. Juan Manuel Kindelán repasó los hechos más importantes ocurridos en las centrales nucleares españolas (como la finalización de las reparaciones de la tapa de la vasija de José Cabrera, la sustitución de los generadores de vapor de Ascó I y las deficiencias de diseño de Trillo), la situación de las demás instalaciones nucleares y radiactivas, y la protección del personal profesionalmente expuesto y del medio ambiente.

Asimismo, el presidente del CSN explicó los objetivos del *Plan de Orientación Estratégica 1995-2000*, la nueva estructura organizativa y los esfuerzos que en el área de investigación y desarrollo está realizando el organismo.

Nils Díaz, nuevo "commissioner" de la US-NRC

El pasado 24 de julio, la Comisión del Senado de Estados Unidos de Medio Ambiente y Obras Públicas celebró la comparecencia de confirmación de los dos candidatos nominados por el presidente Clinton para la Nuclear Regulatory Commission (NRC): Nils Díaz, profesor de la Universidad de Florida, y Edward McGaffigan, asesor del senador demócrata por Nuevo Méjico, Jeff Birgamann. En la comparecencia, ambas personalidades contestaron a numerosas preguntas planteadas por miembros de la Comisión que, básicamente, trataron del envejecimiento de centrales nucleares, los residuos radiactivos de alta actividad y el desarrollo de estructuras reguladoras a nivel internacional. Ambos candidatos fueron felicitados por los miembros de la Comisión. A dichas felicitaciones queremos añadir las nuestras, especialmente a Nils J. Díaz, antiguo amigo y colaborador del CSN.

Convenio de colaboración CIEMAT-CSN

El Secretario de Estado de Energía y Recursos Minerales, Nemesio Fernández-Cuesta, y el presidente del CSN, Juan Manuel Kindelán, firmaron, el pasado mes de julio, un convenio de colaboración entre el CIEMAT y el CSN que servirá como marco general para el aprovechamiento mutuo de la experiencia tecnológica acumulada por ambos organismos.

El convenio, que tiene una duración prevista de cinco años, se centrará en las áreas de seguridad nuclear y protección radiológica, además de la formación de técnicos. En el área de seguridad nuclear se trabajará en el análisis de la experiencia operativa de las centrales nucleares españolas, evaluación independiente de fenómenos de degradación de materiales, revisión de aspectos termomecánicos de comportamiento de combustible nuclear y actividades de ingeniería de factores humanos, participando en la elaboración de guías y realización de evaluaciones. En cuanto a protección radiológica, se trabajará sobre dosimetría externa de los trabajadores del CSN profesionalmente expuestos, análisis de muestras ambientales y calibración de los equipos de los inspectores del CSN para instalaciones radiactivas.

Con respecto a la formación, se prevé el desarrollo de actividades en temas de seguridad nuclear y protección ra-



Firma del Convenio CIEMAT-CSN. De izquierda a derecha, A. Arias, R. Caro, J.M. Kindelán, N. Fernández-Cuesta, A. Martín, J. A. Azuara y F. Ynduráin.

diológica para los trabajadores del CSN y desarrollos conjuntos que permitan alcanzar objetivos del organismo regulador a través de la actividad docente del CIEMAT, como mejora de programas, diseño de material didáctico, diseño de actividades de armonización, etcétera.

INSTALACIONES NUCLEARES Y RADIATIVAS

Sustitución de generadores de vapor en la central de Ginna

La central nuclear de Ginna (USA) –PWR Westinghouse, propiedad de Gas & Electric– procedió en los meses de abril y mayo a la sustitución de los generadores de vapor. El proyecto de sustitución ha sido ampliamente utilizado como referencia para la sustitución de los generadores de vapor de la central nuclear de Almaraz I.

En el mes de mayo, técnicos del CSN visitaron esta central a fin de obtener información de utilidad para la evaluación del proyecto de sustitución de generadores de vapor de Almaraz. La visita fue completada con una reunión en las oficinas de la NRC en Washington. España cuenta ya con la experiencia obtenida en la sustitución de los generadores de vapor de la central nuclear de Ascó I, que se llevó a cabo durante el verano de 1995.

Deficiencias en la central de Millstone

La NRC ha identificado recientemente ciertas deficiencias en la central de Millstone –BWR de diseño Mark I de General Electric, propiedad de Northeast Utilities– que estaban relacionadas con inconsistencias entre los análisis del estudio final de seguridad y las prácticas adoptadas por el titular para las operaciones de recarga, que comprometían la capacidad de refrigeración de la piscina de almacenamiento de combustible irradiado.

La NRC, a raíz de este suceso, ha emprendido un programa de revisión de la central y de otras centrales propiedad de la misma compañía. Asimismo, ha abordado un proceso de revisión interna para tratar de determinar las causas por las que los hechos ahora publicados no fueron subsanados anteriormente, pese a que eran conocidos por personal técnico de la NRC.

Problemas en las barras de control de centrales Westinghouse

Recientemente se han producido problemas en la inserción de barras de control de las centrales del tipo PWR de Westinghouse de Wolf Creek y South Texas I. El tema ha sido objeto de atención por la NRC, que publicó el Bulletin 96-1 en el que solicita a las centrales Westinghouse el envío de un informe demostrando la operabilidad de las barras de control.

Las primeras investigaciones apuntan a que la causa de los problemas está relacionada con el alto grado de quemado de los combustibles en los que se han producido. Westinghouse ha emprendido un amplio programa de investigación.

Licenciamiento del contenedor de combustible irradiado

ENRESA ha desarrollado un contenedor metálico de doble propósito, para almacenamiento y transporte de combustible nuclear gastado de reactores PWR, con el asesoramiento de la empresa norteamericana Nuclear Assurance Corporation (NAC) y con la colaboración de la empresa española Equipos Nucleares, S.A. (ENSA), como método alternativo al almacenamiento en piscinas del combustible y para disponer de un sistema de transporte hasta su almacenamiento.



Contenedor NAC-STC, que ha servido de referencia para el ENSA-DPT.

El diseño básico ha sido el mismo que el del contenedor NAC-STC, que ya ha obtenido las correspondientes licencias de la NRC.

El Estudio Genérico de Seguridad del Contenedor ENSA-DPT español presenta algunas diferencias en relación con el tomado como referencia, es decir, el NAC-STC, lo que exigió una evaluación completa por parte del CSN. En efecto, se ha considerado como combustible base de diseño el combustible de la central nuclear de Trillo, es decir tipo PWR, 16X16-20 Kraftwerk Union (KWU).

En la primera etapa se evaluó como almacenamiento, con la normativa americana (10CFR72). El alcance de dicho estudio fue la revisión de las áreas siguientes: térmica-estructural, materiales, confinamiento, procedimientos de operación, mantenimiento, criterios de aceptación de prue-

bas, límites y condiciones de operación, blindajes, protección radiológica y criticidad, todas ellas tanto en condiciones de operación normal como de accidente. A continuación, el 13 de julio de 1995, el CSN informó favorablemente sobre el diseño del contenedor ENSA-DPT, para su uso como almacenamiento.

En la segunda etapa, actualmente muy avanzada, se está realizando la revisión de los criterios exigidos por la normativa de transporte, fundamentalmente el Reglamento Nacional de Transporte por Carretera de Mercancías Peligrosas (TPC), la Guía de Seguridad nº 6 del OIEA y el 10FCR71.

Con el informe favorable de esta segunda etapa, el contenedor continuaría su proceso de licenciamiento, que es la autorización de construcción. Una vez construido y sometido a las pruebas de aceptación podría ser utilizado, previa autorización, por el titular de la instalación.

Revisión de la Guía 6 del OIEA sobre transporte de materiales radiactivos

En 1991, el OIEA comenzó una nueva revisión de la Guía de Seguridad nº 6, *Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos*, cuya aprobación se pretende llevar a cabo antes de que finalice 1996.

La primera versión de esta guía fue publicada en 1961, siendo su ámbito de aplicación cualquier medio de transporte, a nivel nacional o internacional. Después se han realizado otras revisiones en los años 1964, 1969, 1973 y 1985, teniendo en cuenta las opiniones de los diferentes estados miembros y de las organizaciones internacionales.

Una vez aprobada la revisión en 1964, se autorizó su aplicación en la reglamentación desarrollada por el propio organismo y se recomendó a los países miembros y a las organizaciones internacionales su utilización como base de sus reglamentaciones específicas. La adopción de la misma, de manera generalizada, no se produjo hasta 1969, momento a partir del cual se dispone de unas normas de seguridad adecuadas.

En las revisiones en curso, el objetivo básico planteado por el OIEA ha sido la consideración de la experiencia operativa en la reglamentación.

Instalaciones de Rayos X

El Real Decreto 1891/1991 de 30 de diciembre sobre instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico y, posteriormente, el Real Decreto 445/1994 de 11 de marzo, fijaron un plazo que finalizó el día 3 de enero de 1996 para proceder a la declaración y registro de las instalaciones que estuvieran en funcionamiento sin haber solicitado su legalización. Con anterioridad a este real decreto se venía aplicando el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas (Real Decreto 2689/1972 de 21 de julio).

Actualmente son muchas las instalaciones que se encuentran en funcionamiento sin haber efectuado su declaración y registro, las cuales, una vez pasado un plazo de cortesía, pueden ser objeto de sanción administrativa por el

ejecutivo. El número total de instalaciones inscritas en el Registro a 5 de septiembre de 1996 ascendía a 12.292.

Sustitución de generadores de vapor en Almaraz

Tras la finalización en octubre de 1995 de la sustitución de los generadores de vapor en la unidad I de la central nuclear de Ascó, y siguiendo con el programa establecido, el pasado 15 de junio comenzó la parada de la unidad I de Almaraz para proceder a la misma operación. La duración estimada de la parada es de 82 días (desde la desconexión hasta la reconexión a la red). Con anterioridad al inicio de la parada, el Pleno del CSN emitió dos apreciaciones favorables sobre el conjunto de las actividades de Almaraz: *apreciación favorable de las bases del proyecto de sustitución de los generadores de vapor*, el 8 de mayo de 1995, y *apreciación favorable de las actividades de montaje de los nuevos generadores de vapor*, el 14 de junio de 1996.

El CSN ha dedicado durante los dos últimos años una parte importante de sus recursos a la evaluación de la documentación presentada por la central nuclear de Almaraz sobre los nuevos equipos y sobre la compatibilidad de los mismos con el resto de la central, y a la inspección de las actividades de fabricación, ingeniería y montaje en relación con el proceso de la sustitución. La cuantificación de las actividades, del CSN asociadas a este programa es la siguiente :

- Inspecciones hasta el momento de inicio de las pruebas: 40.
- Informes internos realizados: 60.
- Reuniones técnicas mantenidas: 12.
- Documentos remitidos por la central nuclear de Almaraz: 80.
- Visitas a centrales de otros países en proceso de sustitución de generadores de vapor: 5.

El personal técnico del CSN ha dispuesto de la valiosa experiencia adquirida en el desarrollo del programa equivalente para la unidad I de la central nuclear de Ascó. La principal diferencia del programa de Almaraz ha sido la necesidad en esta central de abrir un hueco en la pared del edificio de contención para la extracción e inserción de los equipos, que no caben por la esclusa de equipos. Las técnicas empleadas para la apertura y posterior cierre del hueco de contención, la seguridad estructural del edificio y las pruebas posteriores a su restitución han sido objeto de un especial seguimiento por el CSN. Con fecha 21 de agosto de 1996 se terminaron con resultados satisfactorios las pruebas de hermeticidad e integridad del edificio de contención una vez finalizada su restitución. Con fecha 22 de agosto de 1996 el Ministerio de Industria y Energía emitió la autorización de puesta en marcha de la central nuclear de Almaraz I con los nuevos generadores de vapor, con el informe preceptivo del CSN. A partir de ese momento se inició el programa de pruebas de la central, dentro del cual se incluyen pruebas precríticas, la criticidad del reactor (que requiere una nueva apreciación favorable previa del CSN), pruebas a baja potencia y la ascensión de potencia hasta llegar al 100%.

► CICLO DEL COMBUSTIBLE Y GESTIÓN DE RESIDUOS

Almacenamiento de residuos en Canadá

Canadá ha presentado a información pública su concepto de almacenamiento definitivo de residuos radiactivos de alta actividad.

El sistema consiste en colocar los residuos en bóvedas a 500-1.000 metros de profundidad; el medio hospedante sería la barrera rocosa canadiense y, además, estarían protegidos con barreras de ingeniería combinadas con el medio natural.

La información pública abarcará tres fases: discusión sobre las implicaciones sociales de la gestión a largo plazo del combustible gastado; aspectos de seguridad desde los puntos de vista científicos y técnicos; y, por último, una panorámica de la seguridad y aceptabilidad del concepto de almacenamiento propuesto.

Gestión de residuos radiactivos en Italia

Italia recibirá para su almacenamiento al menos 7.000 m³ de sus propios residuos radiactivos enviados a Inglaterra en los años sesenta, según la Agencia Nacional para el Medio Ambiente (AMPA). De acuerdo con la portavoz de la Agencia, Renata Montesanti, Italia ha comenzado el diseño de un programa de construcción de contenedores para residuos. Los residuos hasta ahora almacenados en Inglaterra no son más que la punta del iceberg, según un reciente estudio del AMPA, en el que se recomienda la creación de un gabinete, dependiente del Gobierno central, y el desarrollo de una normativa nacional para coordinar la gestión de los residuos radiactivos.

Residuos mixtos de difícil tratamiento

El Departamento de Energía (DOE) de EEUU está estudiando el tratamiento de los residuos comerciales con bajo contenido en material radiactivo. A tal efecto se ha concluido un estudio para la gestión de las 56 corrientes de residuos comerciales mixtos difíciles de tratar, con bajo contenido en material radiactivo, que representan alrededor del 5% del total de este tipo de residuos.

Cuatro de estas 56 corrientes pueden almacenarse durante el tiempo necesario para que su actividad desaparezca, por lo que fueron reclasificadas como gestionables en el estudio citado. Las 52 restantes fueron reagrupadas como *cercanas* o *no cercanas* al criterio técnico de aceptación establecido por el DOE.

De ellas, 46 fueron clasificadas *cercanas* al criterio de aceptación del DOE con respecto a las instalaciones candidatas a recibirlos, aunque precisarían algunas barreras administrativas tales como restricciones de uso y acceso.

De las 44 instalaciones candidatas examinadas por el DOE, 16 parecen ser técnicamente capaces de aceptar residuos mixtos de bajo nivel radiactivo.

Se han identificado 6 corrientes de residuos como *no cercanas* al nivel de aceptación establecido por el DOE:

- Barras gastadas de control de reactores.
- Residuos inflamables de uranio, contaminados con cromo.
- Fuentes de berilio sólidas.
- Residuos líquidos contaminados con C-14.
- Restos evaporados de pesticidas, etcétera.
- Barras de control de reactores almacenadas.

El estudio contiene el listado y la descripción de las 52 corrientes de residuos difíciles de gestionar, la lista de las 16 instalaciones consideradas adecuadas por el DOE, las 46 corrientes consideradas como abordables y las 6 excluidas, así como las instalaciones candidatas consideradas para cada una.

Curso sobre gestión de residuos radiactivos



Curso sobre gestión de residuos radiactivos en la UIMP.

A finales del pasado mes de agosto tuvo lugar en la Universidad Internacional Menéndez Pelayo de Santander el seminario *Gestión de residuos radiactivos: un reto tecnológico y de comunicación*, patrocinado por ENRESA, durante el cual se pasó revista a la situación técnica y a las perspectivas de desarrollo de los principales sistemas de gestión de los residuos, además a las dificultades que encuentran estas tareas para lograr aceptación social. En el curso, que contó en su apertura con la presencia del presidente del CSN, participaron numerosas personalidades del mundo de la ciencia y de la comunicación, además de las organizaciones ecologistas, destacando la ponencia presentada por el premio Nobel de Física, Carlo Rubbia, quien expuso los trabajos que desarrolla el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) sobre obtención de energía utilizando torio como elemento combustible en lugar de uranio. Las jornadas se completaron con la intervención de diversos parlamentarios, que explicaron la posición de sus formaciones políticas sobre la gestión de residuos.

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Instrumentación de medida de radón/torón en hogares

El conocimiento de la concentración de actividad en hogares de gases nobles radiactivos que, junto con sus descendientes, proceden de elementos radiactivos naturales como el radio y

el torio, requiere el uso cada vez más amplio de sistemas de detección y medida que abarcan, fundamentalmente, plásticos de centelleo de SZn (Ag), cámaras de ionización, detectores de barrera de Si, diodos de Si, cristales orgánicos de centelleo de INa (TL) y semiconductores de Ge.

El análisis de todos ellos, desde un punto de vista de métodos de medida, principios de detección, ventajas y desventajas, se ha publicado en un estudio del laboratorio de medidas ambientales del DOE (EEUU) en el número de abril de 1996 de la revista *Health Physics*.

Internet y la protección radiológica

La Health Physic Society da la oportunidad en el World Wide Web (WWW) de una comunicación interactiva que permite a los usuarios acceder a archivos, buscar en bases de datos, completar su entrenamiento, dejar comentarios o proponer cuestiones. Esta comunicación lleva operativa desde hace algo más de un año y ha tenido más de 40.000 visitantes procedentes de 75 países.

Estudio comparativo de historiales dosimétricos

En un reciente trabajo llevado a cabo por Colen R. Muirhead, John D. Boice Jr, Charleen T. Raddatz y Craig Yoder de la National Radiological Protection Board (Reino Unido), National Cancer Institute (Rockville, EEUU), Nuclear Regulatory Commission (EEUU) y Landauer Inc. (EEUU), respectivamente, se ha realizado un estudio comparativo de historiales dosimétricos de trabajadores de centrales nucleares norteamericanas proporcionados por las bases de datos de la NRC y una gran compañía de servicios dosimétricos.

El análisis muestra la existencia de diferencias notables entre las dos bases de datos; no obstante, ambas serán de gran valor en posibles estudios epidemiológicos.

El estudio ha sido llevado a cabo sobre 99 trabajadores, ya clasificados como profesionalmente expuestos a comienzos del año inicial del estudio (1978) y que, hasta 1980, fin del periodo considerado, han acumulado alguna vez dosis por encima de los 50 mSv. Esta problemática ya ha sido considerada en el programa IARC de las Naciones Unidas, para el cual se han solicitado a los diversos países y organismos participantes, entre los que se encuentra el CSN, los correspondientes parámetros, asociados a los datos dosimétricos de los trabajadores profesionalmente expuestos, que han de formar la cohorte de la población de estudio.

Adopción de las recomendaciones de la ICRP-60

El Consejo Europeo ha adoptado las nuevas recomendaciones de la ICRP, en su publicación nº 60, siguiendo una recomendación de los embajadores de los estados miembros para adoptar la versión definitiva de un primer texto propuesto por la Comisión Europea en 1993.

Entre las nuevas recomendaciones de la ICRP del año 1990 se encuentra la de bajar los límites de dosis para los trabajadores profesionalmente expuestos a las radiaciones ionizantes, de 50 mSv anuales a 20 mSv, en el mismo

intervalo, promediados sobre 5 años y sin sobrepasar, en ningún año, el valor de 50 mSv; para el público se recomienda reducir a 1 mSv el límite actual de 5 mSv.

Consideraciones coste-beneficio de la dosis colectiva

La NRC de Estados Unidos ha completado el análisis y revisión de su política de asignación del coste económico asociado a la dosis colectiva, pasando de una valoración de 1.000 a 2.000 dólares rem por persona, un valor que tendrá que ser incorporado a los estudios de optimización y consecuencias. La política de cambio del factor de conversión ha sido incorporada al documento *Regulatory Analysis Guidelines* (NUREG/BR-0058 rev 2). Las consideraciones coste-beneficio y los resultados obtenidos se recogen en el documento *Cost-benefit considerations on regulatory analysis* (NUREG/CR-6349).

Mapa sobre la contaminación de Chernóbil

Como resultado de los estudios financiados por la Unión Europea ha sido posible la confección de un atlas de contaminación debida a Cs-137 en Europa como consecuencia del accidente de Chernóbil, después de salvar las dificultades que ha supuesto la multiplicidad de procedimientos de medida empleados en su determinación. El mapa cubre más de 20 países y comprende del orden de medio millón de puntos de medida.

cinco volúmenes que consideran aspectos relativos a los avances tecnológicos, reactores avanzados, seguridad y fiabilidad, ciclo de combustible nuclear, envejecimiento, residuos, etcétera.

Editado por Atam S. Rao (GE Nuclear Energy), Romney B. Duffey (Brookhaven, N.L.), David Elias (Commonwealth Edison), ASME-JSME.

Proceedings of the Workshop on Nuclear Reactors (Physics Design and Safety)

International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italia. (11 de abril a 13 de mayo de 1994)

El seminario celebrado bajo los auspicios del ICTP y organizado en colaboración del Comitato Nazionale dell'Energia Nucleare de Energie Alternative (ENEA) y la Nuclear Data Section, Division of Physical and Chemical Sciences del OIEA (Viena, Austria) tuvo lugar en Trieste y Bolonia para tratar de los reactores nucleares desde los puntos de vista de su física, diseño y seguridad. Con un total de 25 países participantes se dieron conferencias y se realizaron ejercicios prácticos de ordenador con el fin de familiarizar a los países en desarrollo en los modernos métodos de cálculo y análisis de los reactores nucleares.

Todo el material presentado en el seminario se recoge en esta publicación de World Scientific que tiene por editores a los profesores A. Gandini (ENEA), S. Ganesam (OIEA) y J.J. Schmidt (OIEA).

● PUBLICACIONES

Atoms, Radiation, and Radiation Protection (second edition)

Este libro (segunda edición) ofrece a profesionales y estudiantes avanzados amplios fundamentos sobre los conceptos de radiación y protección radiológica, ilustrando los principios básicos con ejemplos, problemas numéricos y aplicaciones reales. La puesta al día de la segunda edición incluye el tratamiento de los efectos biológicos, radón, evaluación del riesgo y estadística.

Su autor es James E. Turner y está editado por Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc.

Proceedings of the 4th ASME. ISME International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 4)

Esta publicación contiene comunicaciones completas y resúmenes seleccionados presentados el pasado mes de marzo, en Nueva Orleans, a la IV Conferencia Internacional sobre Ingeniería Nuclear, bajo los auspicios de ASME (American Society of Mechanical Engineers).

Las 400 contribuciones, que proceden de 20 países, tratan los diferentes temas de la ingeniería nuclear desde sus más diversas aplicaciones: estructuras, diseños, materiales, componentes, operaciones, etcétera, todo ello organizado en

● CURSOS Y CONFERENCIAS

El Instituto de Estudios de la Energía está llevando a cabo los cursos monográficos siguientes:

□ **Máster en Energía Nuclear** (enero/diciembre 1996). Como en años anteriores, se está desarrollando el Máster en Energía Nuclear, dirigido a posgraduados en áreas científicas y técnicas, patrocinado por el CSN, Unesa, ENSA, Enresa, Iberdrola, Tecnatom, ENUSA y Endesa.

□ **Radiation in International Radiology**
El curso está organizado en colaboración con la Unión Europea DG XII y la European Radiation Protection Education and Training y va dirigido a aquellas personas que deseen adquirir conocimientos en los principales métodos de optimización en radiología intervencionista, tanto en lo que se refiere a la protección de los trabajadores profesionalmente expuestos como a los propios pacientes.

□ **Medida de radiactividad en muestras ambientales (9-20 septiembre 1996)**

Organizado conjuntamente entre el CIEMAT y el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación), va dirigido a técnicos cuyo trabajo esté relacionado con la medida de actividad de radionucleidos en muestras ambientales.

(Page 2)

Nuclear Power Plant Life Management

by **Rafael Caro**

A general presentation of the Nuclear Power Plant Life Extension problem is made. The difference between Economic Life, Useful Life and Design Life is established; and the different chapters affecting the Life Management are briefly analyzed. These chapters are: 1) Components replacements; 2) New redundancies; 3) Updating and Upgrading of components; 4) R&D; 5) Decommissioning issues; 6) Regulations.

An international overview of this issue is included with a certain emphasis on the U. S., Japan, France and U.K. panorama. The Spanish scenario is as well briefly described.

(Page 11)

Present and Future of Nuclear Robotics

by **SRT Project Technical Management Committee**

New technologies have increased the use of robotic systems in fields other than Industry. As a result, researchers and developers are focusing their interest in concepts like Intelligent Robotics and Robotics

in Services. This paper describes the use of Robotics in Nuclear facilities, where robots can be used to protect workers in high radiation areas, to reduce total worker exposure and to minimise downtime. First, the structure of robot systems is introduced and the benefits of nuclear robots is presented. Next, the paper describes some specific nuclear applications and the families of nuclear robots present in the market. After that, a section is devoted to Nuclear Robotics in Spain, with emphasis in some of the developments being carried out at present. Finally, some reflections about the future of robots in Nuclear Industry are offered.

(Page 22)

Steam Generators Replacement

by **José Ignacio Lequerica**

The article describes the general problems associated with the integrity of the PWR Steam Generator (SG) Tubes, the characteristics of the SG in the Spanish NPPs and the present situation of their tubes, along as the remedial measures taken finally leading to the SG replacement in four 3-loop Westinghouse plants. A description of the licensing process for the SG replacement, and the scope of the evaluations made

and the effort applied to the licensing of the first SG replacement in Asco 1 NPP during the third quarter of 1995, are also included.

(Page 31)

High Burnup Nuclear Fuel. Segmented Rods Project

by **Alfredo Llorente**

The purpose of the Project is to contribute to developing new PWR fuel materials in order to improve the performance at higher burnups and to operating transients. This is a cooperation programme between Japanese (Nupec, Kansai Electric Power Co. and Mitsubishi Heavy Industries) and Spanish (Endesa, A. N. Vandellós II and ENUSA) organizations with Westinghouse participation.

(Page 38)

Scientific Education and the New Interactive Museums

by **Manuel Toharia**

Interactive science centres which very soon achieved unprecedentedly high worldwide popularity levels, have now become a complementary, but indispensable tool, for more traditional education. They offer the chance to learn science through all the senses and even as a form of entertainment for all ages.

Seguridad Nuclear Boletín de suscripción

Institución/Empresa

Nombre

Tel.

Fax

Dirección

CP

Localidad

Provincia

Fecha

Firma

Enviar a Consejo de Seguridad Nuclear, Servicio de Publicaciones, c/ Justo Dorado, 11. 28040 Madrid. Número de fax: (91) 346 05 58.

ULTIMAS PUBLICACIONES EDITADAS POR EL CSN

● Publicaciones Unitarias

Colección Guías de Seguridad

"Revisiones periódicas de la seguridad de las centrales nucleares"

GS. 1.10 ISBN 84-87275-60-5

"Simulacros y ejercicios de emergencia en centrales nucleares"

GS. 1.9 ISBN 84-87275-65-6

Informes Técnicos

"La seguridad de las centrales nucleares españolas"

"Las centrales nucleares españolas"

Informes internos del CSN

"Plan Quinquenal de Investigación del CSN"
(1996-2000)

"Plan de Orientación Estratégica del CSN" (1995-2000)

Publicaciones conjuntas con otras instituciones

"RADÓN. Un gas radiactivo de origen natural en su casa"

Coeditado con la Universidad de Cantabria.

● Publicaciones Periódicas

Colección Informes Semestrales

Informes al Congreso de los Diputados y al Senado:

IS 28/96 1º Semestre de 1995

IS 29/96 2º Semestre de 1995

Reports to the Congress and Senate 1994

Colección Memorias

"Memoria de actividades del CSN. 1995".
(Edición en castellano e inglés).

● Otras Publicaciones

Folletos divulgativos

"REVIRA: Red de Vigilancia Radiológica Ambiental."

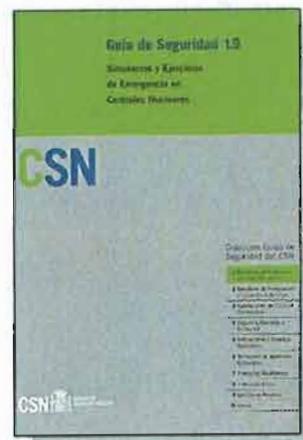
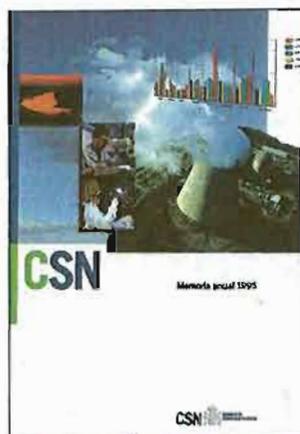
"Organización del Consejo de Seguridad Nuclear ante emergencias."

● Medios Audiovisuales

"La Escala Internacional de Sucesos Nucleares".
OIEA. Traducido y editado por el CSN.

"La seguridad en el transporte de materiales radiactivos."
OIEA. Traducido y editado por el CSN.

NOVEDADES





CONSEJO DE
SEGURIDAD NUCLEAR

Justo Dorado 11
28040 Madrid