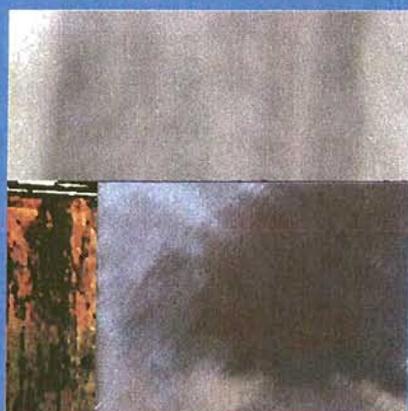


Revista del CSN / Número 17  
IV Trimestre 2000

# Seguridad Nuclear



**La refrigerabilidad del corium  
fuera de la vasija**

**Distribución dosimétrica  
de los trabajadores  
expuestos en 1998**

**Mejora de las especificaciones  
de la central de Trillo**

**Reencuentro de las matemáticas  
con la ingeniería**

**El impacto de Internet  
en la sociedad**

**Seguridad Nuclear**

Revista del CSN  
Año V / Número 17  
IV Trimestre 2000

**Director**

Juan M. Kindelán

**Comité de redacción**

Agustín Alonso  
José A. Azuara  
Aníbal Martín  
Carmen Martínez Ten  
Paloma Sendín  
Luis del Val

**Secretaría de redacción**

Fátima Rojas

**Consejo de**

**Seguridad Nuclear**

Justo Dorado, 11  
28040 Madrid  
Tf. 91 346 02 00  
Fax 91 346 06 66  
www.csn.es

**Coordinación editorial**

RGB Comunicación  
Princesa 3, dpdo.  
28008 Madrid  
Tf. y Fax 91 542 79 56

**Impresión**

Gráficas Naciones  
Río Sil, 3  
28110 Algete (Madrid)  
Tf. 91 629 21 45  
Fax 91 629 22 79

ISSN: 1136-7806

D. Legal: M. 31.281-1996

Portada: Pensando en Torner (José María Cerezo)

Los autores asumen la total responsabilidad de los trabajos que firman. El CSN al publicarlos no pretende expresar su acuerdo con ellos.

1 Editorial

2 La refrigerabilidad del corium fuera de la vasija: los experimentos MACE  
● F. Robledo, M.A. Jiménez, J.M. Martín-Valdepeñas, M.L. González y F. Martín-Fuertes

12 Distribución dosimétrica de los trabajadores profesionalmente expuestos en España en 1998  
● A. Hernández, A. Martín, I. Villanueva, I. Amor y J.L. Butragueño

20 Proceso de mejora de las especificaciones de la central nuclear de Trillo  
● M. Ángeles Martín

26 El reencuentro de las matemáticas con la ingeniería  
● Francisco Michavila y Raimundo Martínez

34 El impacto de Internet en la sociedad  
● Cayetano López

40 Noticias

40 Consejo de Seguridad Nuclear / 43 Información general / 44 Centrales nucleares / 47 Publicaciones

48 Resúmenes

# Editorial



Coincidiendo con la aparición de este número de la revista, el Consejo de Seguridad Nuclear cumple 20 años desde su creación en 1980.

La historia nuclear española podría dividirse en dos grandes capítulos. El primero, entre 1960 y 1980, se caracterizó por el surgimiento y consolidación de la industria nuclear, así como por la puesta en marcha de la mayor parte de las centrales nucleares españolas. El segundo se ha caracterizado por la estabilización del sector. La creación del CSN, en 1980, fue la bisagra entre estos dos grandes periodos.

No ha sido un camino sencillo, ni lo será a partir de ahora. El nuevo marco desregulado del sector eléctrico exige que estemos muy atentos, como institución, para no descuidar la seguridad en los altares de la economía. Pero, al mismo tiempo, no debemos entorpecer la explotación segura con exigencias que no estén justificadas. Además, tenemos que prestar atención a otros campos en los que se manifiesta la presencia de radiaciones ionizantes y en los que hasta ahora no teníamos competencias.

Por otra parte, se acaba de celebrar en Viena la 44ª Conferencia General del OIEA. En el próximo número de *Seguridad Nuclear* incluiremos información sobre este importante encuentro internacional. Queremos, en cualquier caso, resaltar el esfuerzo que se ha realizado en la Conferencia en lo que se refiere a la gestión de residuos radiactivos, tema sobre el que se celebraron dos importantes reuniones, una de ellas presidida por el presidente del CSN. Además, la Asamblea General aprobó una resolución impulsada por España y presentada por la Unión Europea para garantizar el seguimiento de las conclusiones de la Conferencia Internacional sobre Seguridad en la Gestión de Residuos Radiactivos, que se celebró en Córdoba el pasado mes de marzo.

Finalmente, en este número de la revista se incluyen artículos sobre el proceso de mejora de las especificaciones de funcionamiento de la central nuclear de Trillo, la distribución dosimétrica de los trabajadores expuestos en España y los experimentos MACE. También se ofrecen dos artículos de Francisco Michavila y Cayetano López sobre la conexión entre las matemáticas y la ingeniería, en el primer caso, y sobre el impacto de Internet en la sociedad, en el segundo.

● Fernando Robledo, Miguel Ángel Jiménez, Juan Manuel Martín-Valdepeñas, María Luisa González y Francisco Martín-Fuertes\*

# La refrigerabilidad del corium fuera de la vasija: los experimentos MACE

El recinto de contención es la última barrera para evitar la liberación de productos de fisión al exterior en caso de accidente. Este artículo analiza la viabilidad de una estrategia de gestión de accidente severo tendente a evitar

el fallo de la losa de la cavidad del reactor por interacción corium-hormigón. La estrategia consiste en verter agua sobre el corium depositado en la losa, con objeto de enfriarlo y detener la descomposición del hormigón.

## 1. Introducción

Uno de los objetivos más importantes de la investigación en el campo de los accidentes severos es determinar los mecanismos que llevan a un fallo del recinto de contención y encontrar medidas que puedan mitigar y evitar dicho fallo. Un potencial modo de fallo de la contención es el que se produciría por la penetración de la losa de hormigón de la cavidad del reactor como consecuencia de la interacción del núcleo fundido con el hormigón. Este modo de fallo de la contención se produce en caso de accidentes severos con

rotura de la vasija en condiciones de baja presión en el sistema de refrigeración del reactor. En la actualidad no se conoce un mecanis-

● Tabla 1. Organizaciones que participan en el programa internacional MACE.

Organización	País
DOE	EEUU
NRC	EEUU
EPRI	EEUU
British Energy	Reino Unido
GRS	Alemania
IPSN / EDF	Francia
Unesa / CSN	España
Tractebel	Bélgica
VTT	Finlandia
Jaeri	Japón
Forsmark	Suecia
Ontario Hydro	Canadá

mo fiable para frenar la interacción núcleo fundido-hormigón en las centrales de agua ligera. El proyecto internacional MACE (Melt Attack and Coolability Experiments) se inició con el objetivo de averiguar si era posible refrigerar el corium depositado sobre la cavidad del reactor vertiendo agua sobre el mismo. El programa MACE está promovido por el Electric Power Research Institute (EPRI) de EEUU y cuenta con una importante y numerosa participación internacional como muestra la tabla 1.

## 2. Participación española en el programa MACE

La participación española en el proyecto internacional MACE se ha incluido en el Plan Coordinado de Investigación (PCI) CSN-Unesa en materia de seguridad nuclear y protección radiológica. Además, el CSN y Unesa han acordado la selección de la Cátedra de

\* F. Robledo es físico y diplomado en Ingeniería Nuclear, y desde 1983 trabaja en el CSN en el estudio del comportamiento del recinto de contención en caso de accidente. M.A. Jiménez, J.M. Martín-Valdepeñas, M.L. González y F. Martín-Fuertes son integrantes del Grupo de Investigación en Accidentes Severos de la Cátedra de Tecnología Nuclear de la ETS de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Tecnología Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) para facilitar la asimilación y la aplicación de los resultados del programa MACE.

La participación española en el programa MACE tendría los siguientes beneficios:

— Acceso a resultados experimentales.

— Obtención de modelos de cálculo para introducirlos en los códigos de accidentes severos.

— Comprobación de una estrategia de gestión de un hipotético accidente severo.

— Formación de especialistas nacionales.

Los resultados del proyecto se aplicarán fundamentalmente a reducir las incertidumbres en dos áreas:

— La de simulación, mediante la mejora de los modelos de los códigos de cálculo que estudian el comportamiento del corium fundido.

— La de gestión de accidentes severos, mediante el diseño de estrategias que permitan reducir las consecuencias del vertido del corium fundido fuera de la vasija.

### 3. El programa experimental MACE

Los experimentos MACE constituyen una serie de ensayos iniciados en 1989 y realizados en los Laboratorios Nacionales de Argonne (ANL). La tabla 2 [1] muestra las características más relevantes de los experimentos del programa MACE.

El objetivo del programa es la comprobación de la eficacia del vertido de agua por encima del corium fundido para refrigerar y detener la interacción corium-hormigón en la cavidad del reactor. El corium empleado en los experimentos es característico de las centrales de agua ligera con un grado de oxidación del circonio que varía entre el 70% y la oxidación total. Por su parte, el hormigón empleado es del tipo caliza/arena común

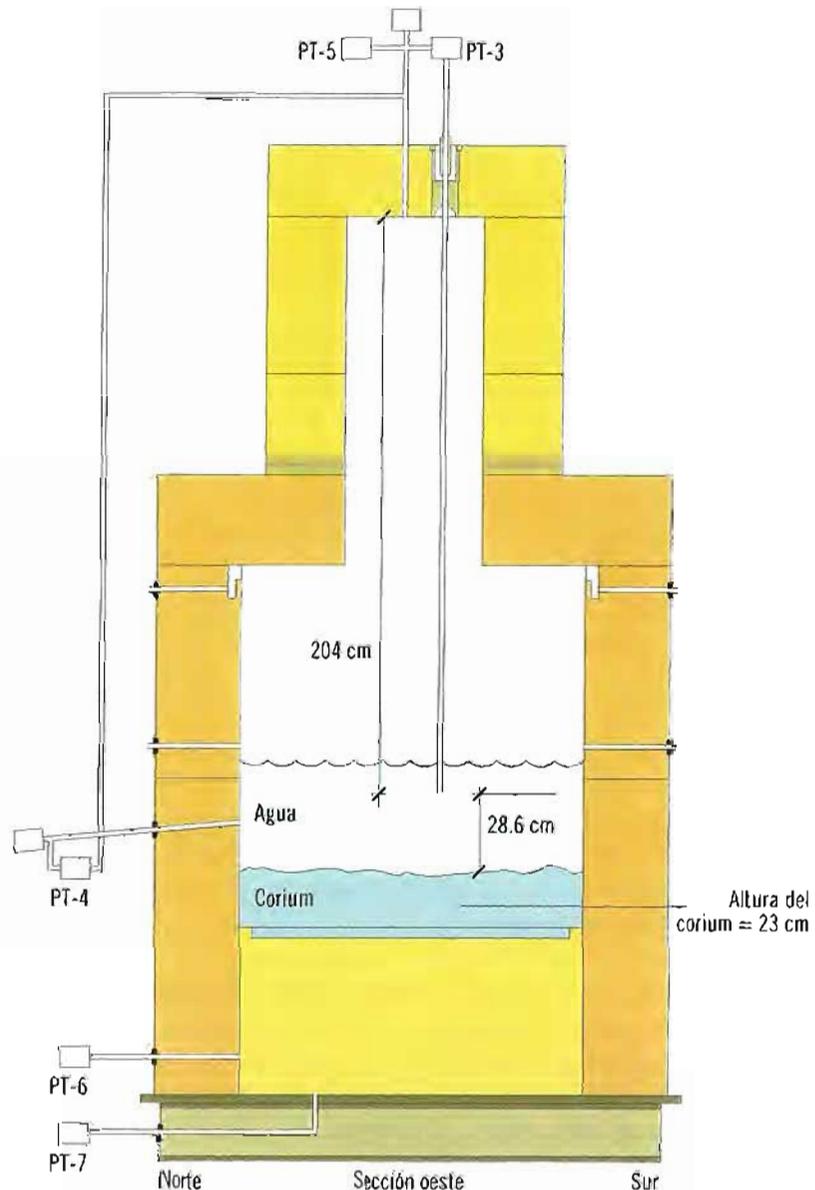


Figura 1. Esquema de la configuración de la celda experimental para el experimento MACE M3b.

(LCS, *limestone/common sand*) o silíceo, como se resume en la tabla 2 de la página siguiente.

La estrategia inicial del programa MACE era decidir la viabilidad del enfriamiento del corium depositado en la cavidad del reactor, vertiendo agua sobre él, mediante la realización de una serie de experimentos integrales. Se comenzó con experimentos a pequeña y media escala, esto es  $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$  y  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ , frente a los  $25 \text{ m}^2$  de una cavidad real, que no pudieron resolver el problema por lo siguiente: se observó en los

experimentos una breve fase de intensa extracción de calor del corium por parte del agua, que finaliza con la formación de una costra de material solidificado sobre el corium. En todos los experimentos se produjo la adherencia de la costra de corium a las paredes de la celda experimental, lo que, a su vez, provocó la pérdida de contacto entre la costra sólida y el corium, que impidió su refrigerabilidad. Los miembros del comité técnico del programa MACE consideraron, y siguen considerándolo así, que la adhe-

► Tabla 2. Experimentos realizados en la serie MACE.

Experimento (fecha)	Tipo de hormigón	Composición corium (profundidad), masa	Dimensiones horizontales	Parámetro a investigar Comentarios relevantes
M0 (24 ago 89)	LCS	Óxidos + 30% Zr (15 cm) 130 kg	30 × 30 cm <sup>2</sup>	Test de prueba Ebullición en masa y erupciones de corium
M1 (25 nov 91)	LCS	Óxidos + 30% Zr (25 cm) 430 kg	50 × 50 cm <sup>2</sup>	Mayor escala. Fallo por costra inicial
M1b (13 abr 92)	LCS	Óxidos + 30% Zr (25 cm) 430 kg	50 × 50 cm <sup>2</sup>	Repetición del M1 Indicios de refrigeración eficaz
M2 (26 ago 92)	Silíceo	Óxidos + 30% Zr (25 cm) 430 kg	50 × 50 cm <sup>2</sup>	Hormigón silíceo Fallo por fusión paredes
M3 (20 mar 95)	LCS	Óxidos + 6% Cr (20 cm) 2000 kg	120 × 120 cm <sup>2</sup>	Mayor escala Generación térmica del corium. Fallo
M3b (29 ene 97)	LCS	Óxidos + 6% Cr (20 cm) 1800 kg	120 × 120 cm <sup>2</sup>	Repetición del M3 Formación de costra anclada
M4 (10 mar 99)	Silíceo	Óxidos + 6% Cr (30 cm) 480 kg	50 × 50 cm <sup>2</sup>	Repetición del M2 Intentos fallidos de rotura de costra

rencia estable de la costra a las paredes de la instalación experimental era debida a la pequeña escala del experimento y que no se produciría en las cavidades de las centrales nucleares. Por tanto, se decidió realizar un experimento integral a gran escala: 1,20×1,20 m<sup>2</sup>. Éste fue el experimento M3b. Sin embargo, el experimento M3b mostró el mismo comportamiento de la costra que los experimentos a pequeña escala. Este resultado ha llevado a los miembros del comité técnico del programa MACE a un replanteamiento de la estrategia a largo plazo del proyecto. En las dos próximas secciones se abordan, respectivamente, los resultados del experimento M3b y la nueva estrategia a largo plazo del proyecto.

### 3.1. El experimento MACE M3b

El experimento M3b ha sido el más importante de todo el programa MACE, por lo que es conveniente dedicarle un estudio detallado. El experimento M3b fue una repetición del experimento M3, que no pudo efectuarse debido a la rotura de la celda experimental producida por sobrepresión durante la reacción de gene-

ración del fundido. El M3b es un experimento a gran escala, cuyo propósito fue intentar evitar la adherencia estable de la costra a las paredes de la instalación experimental, aumentando sus dimensiones horizontales hasta 1,2×1,2 m<sup>2</sup>. Este experimento se realizó en los Laboratorios Nacionales de Argonne los días 29 y 30 de enero de 1997. Un esquema de la instalación experimental se muestra en la figura 1 de la página anterior.

El experimento M3b reviste un interés particular dentro del programa MACE por las siguientes razones:

- Es, hasta ahora, el experimento de mayor escala dentro la serie y, por tanto, el más representativo de la cavidad de una planta real.

- Su carácter integral permitió confirmar la aparición de todos los procesos posibles de transmisión de calor en esta estrategia de gestión de accidente severo.

Las condiciones iniciales del experimento M3b fueron las siguientes [3]:

- Masa de corium: 1.800 kg.
- Composición del corium típica de combustible PWR con

oxidación completa del Zr: UO<sub>2</sub> (57% en peso) / ZrO<sub>2</sub> (29%) / Cr (15,5%) + productos de descomposición del hormigón (21,5%).

- Generación de calor en el corium: por reacciones químicas en termita simulante y calentamiento eléctrico directo (DEH) externo.

- Temperatura inicial del fundido: 2.500° K (esperada) / 2.250° K (obtenida).

- Densidad de potencia: W/m = 300+[50%-0%] W/kg UO<sub>2</sub> (W<sub>total</sub> = 390 kW).

- Losa: hormigón tipo LCS de 55 cm de espesor.

- Altura de la columna de agua sobre el corium: 55±5 cm a 296° K.

La duración total del experimento fue de casi 8 horas (465 minutos). El estado final de la celda experimental se muestra en la figura 2 y los eventos más reseñables durante el transcurso del experimento M3b se esquematizan más adelante en la tabla 3.

El análisis posterior al experimento arrojó los siguientes datos:

- Tasa máxima de ablación: 24,2 mm/min (local); 3,8 mm/min (promedio espacial).

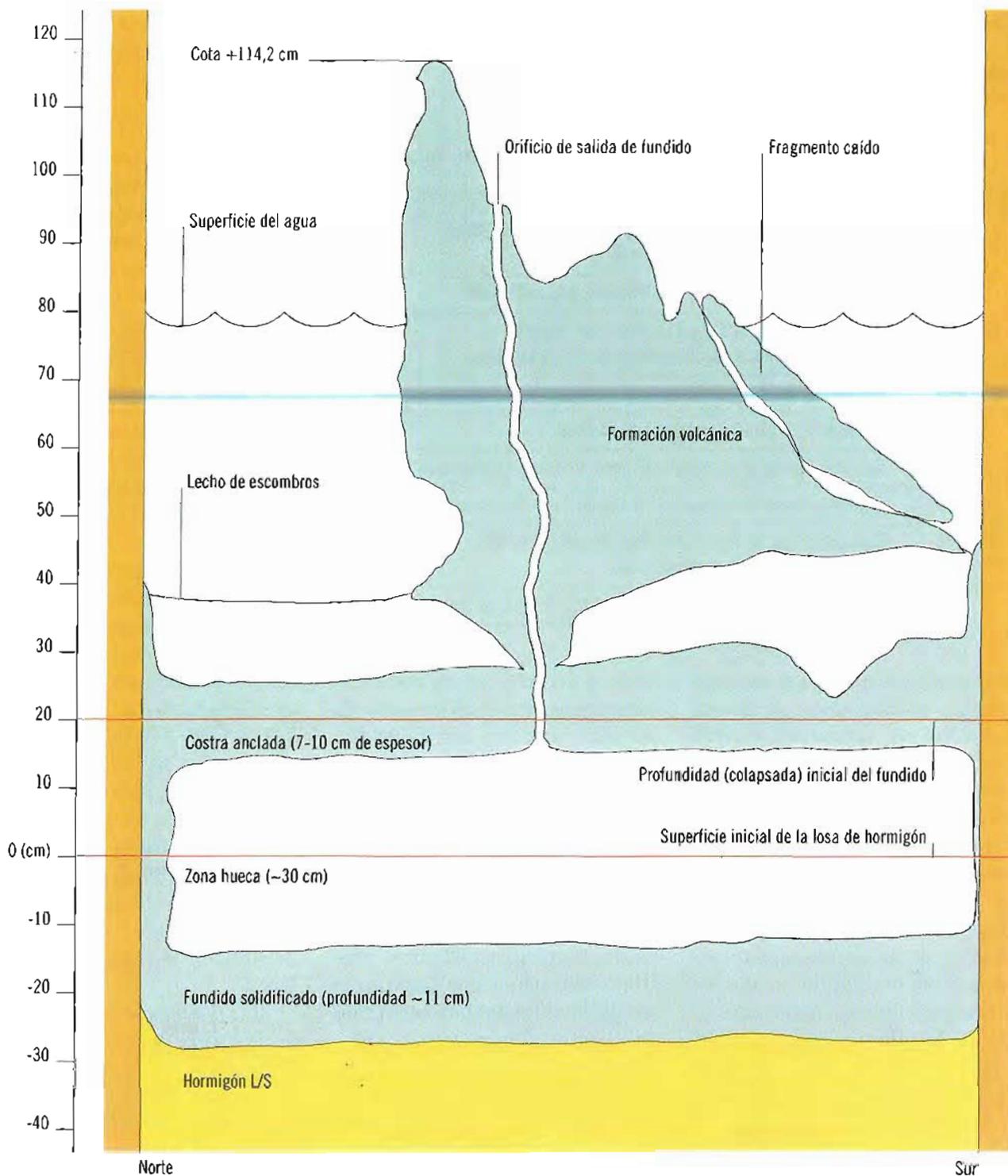


Figura 2. Esquema de la configuración final tras el análisis del experimento MACE M3b (Sección norte-sur. Parte central de la celda).

— Gases generados:  $H_2$ , 860 g (430 moles);  $CO$ , 66,64 kg (2.380 moles);  $CO_2$ , 92,4 kg (2.100 moles).

— Reacciones químicas: 70 kW potencia máxima; 180 MJ energía total.

— Flujo de calor corium/agua:  $3,5 \text{ MW/m}^2$  (máximo);  $200\text{-}300 \text{ kW/m}^2$  (en promedio).

### 3.2. Procesos de transmisión de calor entre el corium fundido y el agua

El experimento M3b mostró todos los posibles regímenes de transmisión de calor que pueden darse en la refrigeración del corium por vertido de agua sobre el mismo. En esta sección se describen brevemente estos regímenes

de transmisión de calor. La referencia 1 incluye más información sobre este aspecto.

#### *Ebullición en masa (bulk cooling)*

El agua en contacto con el corium entra en rápida ebullición durante los primeros momentos, extrayendo calor rápidamente. Se establece así un proceso de intercam-

► Tabla 3. Eventos principales del experimento MACE M3B.

Tiempo (min.)	Evento
0,0	Inicio de la ablación de la losa de hormigón
52,5	Adición de agua (190 l), $T_{\text{corium}}=2.140^{\circ}\text{K}$ , $W/m=300\text{ W/kg UO}_2$ ( $W_{\text{total}}=390\text{ kW}$ )
63-64,67	Destellos intermitentes en el agua, indicativos de procesos eruptivos
73,0	Descenso súbito del flujo de calor por debajo de $600\text{ kW/m}^2$ Incremento de la tasa de ablación de la losa
112,0	Reajuste de $W/m$ de 450 a $300\text{ W/kg UO}_2$ ( $W_{\text{total}}=212\text{ kW}$ )
160-250	Estancamiento de la $T_{\text{corium}}$ y de la tasa de ablación Descenso continuado de la transmisión de calor al agua
252	Incremento de $W_{\text{total}}$ a $390\text{ kW}$ → aumento del flujo de calor
264-290	Sucesión de erupciones intensas de fundido
290	Aparente secado de la celda experimental. Nueva adición de agua
292-296	Enfriamiento del lecho superior de escombros formado en las erupciones
328	Reducción final de $W/m$ a $250\text{ W/kg UO}_2$ ( $W_{\text{total}}=78\text{ kW}$ ) Descenso en la transmisión de calor
465	$T_{\text{corium}} > 1.400^{\circ}\text{K}$ ( $T_{\text{solidus}}$ hormigón) → Apagado final del experimento

bio de energía a través de una película estable de vapor, en intensa agitación por el continuo borboteo de gases procedentes de la interfase. La transmisión de calor se efectúa, sobre todo, por radiación, favorecida por el aumento del área efectiva de contacto corium-agua debido a la agitación. La extracción de calor por este proceso dura hasta que se forma una costra estable por solidificación del corium en toda su superficie superior. Los flujos de extracción de calor observados en los experimentos alcanzan valores de hasta  $3.500\text{ kW/m}^2$ . Se trata, pues, de un mecanismo muy eficiente de extracción del calor, a un ritmo varias veces por encima del nivel de calor residual (de  $300$  a  $1.000\text{ kW/m}^2$  en la configuración de los distintos experimentos MACE), aunque de una duración limitada: unos 8 minutos en el experimento M3b.

#### *Intercambio de calor a través de la costra*

La costra formada actúa de resistencia térmica entre el seno del corium y el agua vertida. No obs-

tante, la costra presenta una naturaleza porosa por su proceso de solidificación: a través de sus grietas, el agua consigue penetrar en cierta medida aumentando el flujo de calor respecto del que se atribuiría a la simple conducción si la costra fuese impermeable. Este mecanismo de penetración se denomina intrusión de agua (*water ingressión*). Algunos científicos consideran que la intrusión de agua podría producirse en cantidad suficiente como para refrigerar el corium, siempre y cuando se mantenga el contacto de la costra con el corium. El flujo de calor en esta fase puede alcanzar los  $600\text{ kW/m}^2$ . La adherencia de la costra a las paredes laterales y su separación del fundido por tiempo prolongado reduce drásticamente la efectividad de la transmisión de calor: valores de unos  $200\text{ kW/m}^2$  son indicativos de que se ha producido la separación entre la costra y el corium.

La extracción de calor del corium por la adición de agua en las fases de *bulk cooling* y a través de la costra fue suficiente para enfriar unos  $1.050\text{ kg}$  de corium

(aproximadamente el 60% de la masa total) durante los primeros 20 minutos del experimento M3b.

#### *Erupciones de material fundido*

El corium por debajo de la costra, en fase líquida, podría atravesarla hacia arriba al ser empujado y arrastrado por los gases de descomposición del hormigón. Se originan así erupciones de material a través de canales u orificios en la costra. La lava solidificaría así en formaciones de tipo volcán o de lechos de partículas por encima de la costra. Este fenómeno de erupción de material fundido fue observado en el experimento M3b [3] (figura 2) justo después de provocarse un nuevo contacto entre la costra y el corium, que hasta entonces permanecían separados. Este mecanismo de refrigeración es bastante efectivo: el flujo de calor alcanza valores de hasta  $1.000\text{--}3.000\text{ kW/m}^2$  durante breves periodos de tiempo. En el caso del experimento M3b, el 30% de la masa de corium pudo ser eyectada y enfriada de esta manera. Además, el material así solidificado presenta una porosidad muy adecuada para mantener la penetración de agua a través del lecho.

La erupción de corium sólo es posible si el fundido está en contacto con la costra para penetrarla. En el experimento M3b se pudieron observar erupciones del material fundido posteriores a la separación de la costra y el corium, porque se calentó eléctricamente el corium, lo que produjo su hinchamiento y su nuevo contacto con la costra. Fue en esta nueva fase cuando se observaron las eyecciones de corium, impulsado por la sobrepresión creada por los gases de descomposición. En el caso de una cavidad a escala real, donde se espera que la costra permanezca flotando sobre el corium hay dudas sobre la capacidad de esta sobrepresión para producir erupciones

significativas. Estas circunstancias explican que no haya consenso en el comité técnico del programa MACE sobre si este fenómeno ocurriría en una cavidad de reactor a escala real, al menos con la eficiencia que se observó en el experimento M3b.

#### *Rotura de la costra*

La rotura de la costra favorecería la refrigerabilidad del corium, porque permitiría que se mantuviera el contacto del agua con el fundido todavía sin refrigerar y volviesen a producirse los mecanismos de transmisión de calor descritos anteriormente. Sin embargo, en los experimentos de la serie MACE realizados hasta la fecha no se ha observado la rotura de la costra, pero los científicos creen que ésta se produciría en caso de accidente real. Las evidencias más sólidas a favor de esta tesis se dieron en el experimento M3b, donde aproximadamente 1/3 de la costra formada se reubicó de esta forma [1], y en el experimento M4, en el que se formó de manera natural un agujero en la costra de unos  $3 \times 10$  cm.

#### **4. La nueva orientación estratégica del programa MACE**

El experimento a gran escala M3b mostró los mismos resultados que los experimentos a pequeña escala, es decir, el corium se adhirió a las paredes de la instalación experimental formando una costra que impidió la refrigeración del corium. Por tanto, el comité técnico del programa MACE, en su reunión de marzo de 1999, encargó un informe a una personalidad científica independiente al proyecto para su reorientación. Se eligió al doctor Salomon Levy, quien elaboró el MACE Long Term Program Plan [5], cuyas principales características se exponen a continuación.

El informe descarta la posibilidad de no continuar con el proyecto y considera que se pueden



► Figuras 3 y 4. Instalaciones de los Laboratorios Nacionales de Argonne en Chicago (arriba) e Idaho Falls.

seguir dos líneas de trabajo en el futuro:

— Realizar experimentos integrales a escala mayor que la del experimento M3b, aproximándose todo lo posible a las cavidades reales de  $5 \times 5$  m<sup>2</sup>. Esta opción presenta considerables inconvenientes: el elevado coste, la indisponibilidad actual de fuentes de energía térmica para realizar el ensayo, la ausencia de una instalación experimental adecuada y las pocas garantías de éxito del experimento. Por tanto, el informe descarta, de momento, esta línea de trabajo.

— Realizar experimentos de efectos separados con materiales reales o simulantes para obtener datos sobre posibles mecanismos de refrigerabilidad del corium y desarrollar modelos analíticos sobre cada uno de estos mecanismos de refrigeración. El informe del doctor Levy se decanta por esta opción.

Siguiendo la segunda línea de actuación, el informe analiza cada uno de los diferentes mecanismos

de refrigerabilidad del corium basándose en los resultados experimentales obtenidos y llega a las siguientes conclusiones:

— No se necesitan ensayos adicionales ni nuevos modelos para analizar el fenómeno de ebullición en masa (*bulk cooling*).

— El comportamiento de la costra de corium dentro de la cavidad es crítico para el tema de la refrigerabilidad del corium fuera de la vasija. Por tanto, se considera que los esfuerzos del proyecto deben centrarse en determinar las propiedades físicas y estructurales de la costra.

— La siguiente prioridad es tener un conocimiento adecuado de los mecanismos de refrigeración del corium denominados intrusión de agua y erupción de corium.

Una vez establecidas estas premisas, el informe del doctor Levy detalla las cuatro tareas que deben de configurar el programa MACE a largo plazo, las cuales se describen a continuación.

#### 4.1. Tarea I: Desarrollo

Esta tarea está dedicada a la realización de evaluaciones, elaboración de modelos y desarrollo de nueva instrumentación para futuros experimentos. Las principales actividades que se desarrollarán en esta tarea son las siguientes:

— Analizar el comportamiento de la costra de corium originada en un accidente severo y decidir si se romperá como consecuencia de las cargas térmicas, mecánicas, etcétera, a que estaría sometida durante un accidente real.

— Desarrollar códigos de cálculo que modelen los siguientes fenómenos: ablación del hormigón, mecanismos de refrigeración del corium, crecimiento, resistencia estructural y adhesión de la costra a las paredes.

— Desarrollo de nueva instrumentación para medir variables importantes en el proceso de refrigeración del corium (por ejemplo, altura del corium fundido y penetración del agua por debajo de la costra) y mejora de la fiabilidad de la instrumentación usada en anteriores experimentos (por ejemplo, los termopares).

#### 4.2. Tarea II: Ensayos con materiales reales

Esta tarea propone la realización de ensayos de efectos separados con materiales reales destinados a comprender mejor el comportamiento estructural de la costra, así como la posible refrigerabilidad del corium a través de las grietas y roturas de la misma. Las principales actividades a desarrollar en esta tarea son las siguientes:

— Construcción de una instalación a pequeña escala para obtener las propiedades de la costra a las temperaturas propias de un accidente severo.

— Realización de, al menos, ocho ensayos de efectos separados con materiales reales en dos años. Estos experimentos deben mejorar los conocimientos sobre el ingreso de agua en las grietas,

erupciones de corium y roturas de la costra, y se diseñarán de forma que permitan el contacto entre el corium y la costra durante el máximo tiempo posible.

#### 4.3. Tarea III: Realización de ensayos de efectos separados con simulantes

Los ensayos a gran escala con materiales simulantes pueden ser necesarios para obtener datos sobre el comportamiento de la costra. No obstante, se necesitan estudios rigurosos de efectos de escala y suficientes garantías de que los resultados pueden ser extrapolados a situaciones reales de planta.

#### 4.4. Tarea IV: Ensayo a gran escala

Aunque la línea de trabajo seguida en el documento se centra en la realización de ensayos de efectos separados a pequeña escala, se deja abierta la posibilidad de realizar un ensayo a gran escala con materiales reales que confirmen los resultados obtenidos en las anteriores subtareas.

El doctor Levy considera que el presupuesto total de este programa sería de unos 3,5 millones de dólares, excluyendo el ensayo de demostración a gran escala, y se prolongaría por un periodo de cuatro años.

### 5. Actividades de la UPM en el proyecto MACE

La Cátedra de Tecnología Nuclear de la ETS de Ingenieros Industriales de la UPM ha sido seleccionada para proporcionar apoyo técnico en la asimilación, comprensión y aplicación de los experimentos de la serie MACE a las centrales españolas. El plan de trabajo es el siguiente:

— Documentación y revisión bibliográfica sobre experimentos y fenomenología asociada a la refrigerabilidad del corium fuera de la vasija.

— Análisis de los procesos de transmisión de calor, por medio de

tres vías: revisión de modelos analíticos aplicables al problema; conocimiento del alcance del código de cálculo CORCON MOD3, apoyados en su validación frente a los experimentos MACE; y aproximación fluidodinámica del problema de ebullición sobre costra porosa.

— Extrapolación de los avances obtenidos a planta.

El desarrollo de estas tareas se detalla en los apartados siguientes.

#### 5.1. Documentación y revisión bibliográfica

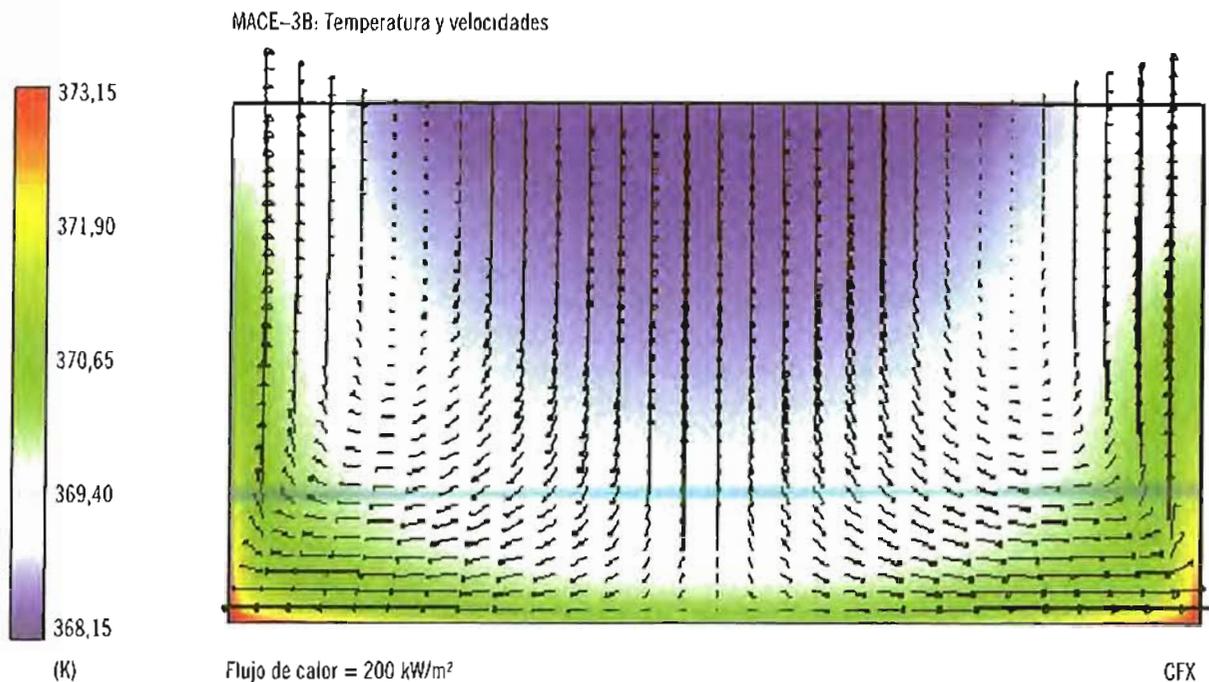
Se ha hecho una revisión de la composición del hormigón de las centrales nucleares españolas que se ha empleado en sus análisis probabilistas de seguridad de nivel 2. Esta revisión ha mostrado que el hormigón tipo LCS empleado en el experimento M3b [3] es muy similar al de la central de Ascó. Los hormigones de las cavidades de José Cabrera, Almaraz, Vandellós II y Trillo I, por este orden, representan sucesivas gradaciones intermedias entre el tipo LCS del experimento M3b y el silíceo del experimento M4 [4].

Se ha recopilado toda la información disponible sobre el proyecto, prestando especial atención a la asimilación de la información obtenida tras la realización de los experimentos MACE, fundamentalmente los experimentos M3b y M4, así como del avance de los trabajos realizados por otras instituciones. Esto ha permitido identificar los principales puntos de incertidumbre de la fenomenología.

Por otro lado, para profundizar en los aspectos técnicos del problema, se han puesto a disposición del CSN y Unesa la experiencia y conocimientos en el manejo y aplicación de códigos de cálculo.

#### 5.2. Análisis de los procesos de transmisión de calor

La refrigerabilidad del corium es, fundamentalmente, un problema de transmisión de calor y de ma-



► Figura 5. Cálculos CFX 4.2. Patrones de movimiento y campo de temperaturas en el seno de una masa de agua en ebullición sobre una placa plana lisa sometida a un flujo de calor de 200 kW/m<sup>2</sup>.

sa, si bien con unas características de los procesos físicos y propiedades de materiales que hacen del análisis completo una tarea compleja. Por ello, se ha puesto un énfasis especial en los procesos de transmisión de calor que suceden en las primeras fases del proceso (ebullición en masa y transmisión a través de la costra sólida), en los que las herramientas analíticas disponibles pueden arrojar alguna luz. Del estudio bibliográfico se desprende que:

— El proceso de ebullición en masa se considera que está adecuadamente descrito de manera analítica [1] con modelos de ebullición favorecida por borboteo continuo de gases, como los de Berenson, Farmer y Duignan [6].

— Existe una gran incertidumbre en el conocimiento en los procesos de enfriamiento a través de la costra sólida, si bien en el campo de los estudios geológicos se encuentran modelos teóricos de interés, como el de Lister [7]. Uno de los problemas es la dificultad de conocer la porosidad real de la costra durante la realización del

experimento (sólo se dispone de evaluaciones post-test), con la consiguiente carencia de datos fiables para el desarrollo y validación de los modelos.

A este respecto, se ha propuesto la simulación de los experimentos MACE M3b y M4 con el código CORCON-MOD3 (integrado en MELCOR 1.8.4, desarrollado por los Laboratorios Sandia para la US-NRC). Un primer análisis de los resultados proporcionados por el código para los procesos fundamentales de transmisión de calor muestra lo siguiente:

— La entrada inicial de agua en la instalación experimental origina una súbita subida del flujo de calor de hasta 400 kW/m<sup>2</sup> en la fase de ebullición en masa, frente al máximo valor medido en el experimento de 3,5 MW/m<sup>2</sup>.

— A partir de ese momento, CORCON muestra que el flujo de calor desciende gradualmente hasta unos valores de unos 150 kW/m<sup>2</sup>, y predice la presencia de una costra de algunos milímetros de espesor.

— A pesar de que el mecanismo de transmisión de calor supuesto por el código (conducción de calor a través de costra sólida en contacto permanente con el fundido) es totalmente distinto del que se sabe que ocurrió realmente en el experimento, la predicción del flujo de calor se aproxima a los datos experimentales.

— Tras la posterior subida de potencia para refundir la costra por contacto con el corium, CORCON predice un mayor flujo de calor, pero sin reflejar el incremento asociado a las erupciones de fundido, ya que CORCON no modela este fenómeno.

Actualmente se está trabajando también en la simulación del experimento M4.

Paralelamente, se plantea el uso del código CFX 4.2 de fluidodinámica computacional (CFD) para la fase de intercambio a través de la costra. El apoyo de esta herramienta al propósito del proyecto se justifica por las siguientes razones:

— El proceso de transmisión de calor a través de la costra po-

rosa presenta un importante vacío de conocimiento.

— Los modelos actuales [7] proceden de otras disciplinas y no parecen directamente aplicables a los reactores de agua ligera.

— Es posible estudiar la configuración del flujo bifásico a través de un lecho poroso que reproduzca la costra.

Con su aplicación, se pretende conseguir lo siguiente:

— Caracterizar el patrón de flujo bifásico en ebullición.

— Estudiar el alcance de la influencia del borboteo de gases de descomposición del hormigón.

— Identificar los procesos de intercambio de masa y energía.

— Cuantificar dichos procesos, para extraer aproximaciones al flujo de calor extraíble desde el corium por el agua.

— Profundizar en la comprensión de los fenómenos de transmisión de calor que aparecen en este problema.

Como muestra, la figura 5 de la página anterior ilustra el resultado de la predicción del código CFX aplicado a la transmisión de calor sobre una placa plana lisa sometida a un flujo de 200 kW/m<sup>2</sup>, característico de la transmisión de calor a través de una costra no porosa. La figura muestra el patrón dominante de velocidades, propio de un proceso convectivo en una masa de agua en régimen de ebullición nucleada. El mapa de temperaturas está asociado al de fracción de huecos, que caracteriza la distribución de las burbujas de vapor que se forman sobre el fondo de la masa de agua.

### 5.3. Aplicaciones a planta

El objetivo final de los análisis anteriores es caracterizar los parámetros fundamentales en la refrigerabilidad del corium fuera de la vasija y obtener correlaciones que, al implantarse en los códigos de accidentes severos, permitan su aplicación a plantas reales y conocer más a fondo la bondad de

esta estrategia de gestión de accidentes severos.

## 6. Conclusiones

El programa experimental MACE tiene como objetivo decidir si es posible refrigerar el corium depositado en la losa de la cavidad del reactor vertiendo agua sobre él. De confirmarse este mecanismo de refrigeración del corium se podría frenar la interacción núcleo fundido-hormigón e impedir un modo de fallo de la contención en caso de accidente severo: la perforación de la losa de hormigón. El programa MACE está liderado por el EPRI y cuenta con la participación de numerosas instituciones y organismos reguladores. España participa en este programa, que se ha incluido en el Plan Coordinado de Investigación CSN-Unesa en materia de seguridad nuclear y protección radiológica. Además se ha seleccionado a la Cátedra de Tecnología Nuclear de la UPM para proporcionar apoyo técnico al proyecto.

Los experimentos del programa MACE comenzaron en 1989 y se ha desarrollado en los Laboratorios Nacionales Argonne de USA. Hasta ahora se han desarrollado experimentos integrales a gran y media escala. El más importante de todos los experimentos ha sido el experimento M3b, que se realizó a escala 1,2x1,2 m<sup>2</sup> frente a los 25 m<sup>2</sup> de superficie típicos de la cavidad de una central de agua ligera.

La primera conclusión de estos experimentos es que no se ha podido demostrar la refrigerabilidad del corium depositado en la cavidad mediante el vertido de agua sobre él. Esto se debe a que en todos los ensayos se ha observado que tras un breve e intenso periodo de transmisión de calor corium/agua se forma una costra en la superficie superior del corium. Esta costra se adhiere a las paredes de la instalación experimental, produciendo la separación en-

tre el corium y la costra, lo que impide la refrigerabilidad del corium.

Como segunda conclusión, indicar que se identificaron tres mecanismos fundamentales de transmisión de calor entre el corium y el agua, existiendo la posibilidad de un cuarto a escala de planta. Estos mecanismos son los siguientes:

— Ebullición en masa o *bulk cooling*. Este mecanismo se produce como consecuencia del contacto inicial del agua con el corium. Es un mecanismo que permite extraer grandes cantidades de calor del corium pero que tiene una duración limitada. En el experimento M3b se midieron flujos de calor de hasta 3,5 MW/m<sup>2</sup> y la duración de esta fase fue de unos 8 minutos.

— Transmisión de calor a través de la costra. La costra de corium es porosa debido a su proceso de solidificación. A través de estas grietas, el agua puede penetrar, aumentando considerablemente la extracción de calor respecto a la conducción. Este mecanismo de extracción de calor se denomina intrusión de agua, y varios científicos creen que este mecanismo, junto con la ebullición en masa, podría ser suficiente para refrigerar el corium siempre que se mantenga el contacto del corium con la costra. En el experimento M3h, estos dos mecanismos sucesivos de transmisión de calor enfriaron el 60% de la masa inicial de corium.

— Erupción de núcleo fundido. Este fenómeno consiste en la penetración de chorros de corium empujados por los gases de descomposición del hormigón a través de los canales u orificios de la costra. Este fenómeno no se ha observado en todos los experimentos de la serie MACE y también precisa del contacto entre el corium y la costra. No hay consenso en la comunidad científica sobre si este fenómeno ocurriría

en una cavidad de reactor a escala real.

— Rotura de la costra. Los científicos consideran que, en caso de accidente real, la costra de corium se rompería como consecuencia de las cargas mecánicas y tensiones térmicas a que se vería sometida, lo que abriría de nuevo vías de acceso para que el agua entrase en contacto directo con el corium, produciéndose nuevos procesos de ebullición en masa, intrusión de agua y erupciones de fundido a cotas inferiores. Los experimentos de la serie MACE no han mostrado la rotura de la costra, quizá debido a un problema de escala.

Como última conclusión, indicar que, a pesar de los resultados experimentales obtenidos hasta el presente, la comunidad científica

no cree que la adherencia de la costra a las paredes se produzca en caso de un accidente real y, por tanto, ha diseñado un plan estratégico para el programa MACE con una duración de unos cuatro años. Los objetivos principales de este programa a largo plazo son:

— Proporcionar argumentos convincentes de que la costra originada en un reactor real se romperá.

— Realizar ensayos de efectos separados con materiales reales, que demuestren la eficacia de los mecanismos denominados intrusión de agua y las erupciones de corium para demostrar la refrigerabilidad del corium.

— Aumentar las garantías de éxito de los ensayos anteriores mejorando la instrumentación y realizando ensayos con materiales simulantes.

— Permitir la realización de ensayos confirmatorios a gran escala con materiales reales si sus posibilidades de éxito son suficientes.

Las principales actividades que la Cátedra de Tecnología Nuclear está desarrollando dentro del programa MACE son las siguientes:

— Asimilación de conocimientos sobre fenomenología del proceso y experimentos.

— Estudio de los modelos y correlaciones de análisis.

— Simulación de los experimentos M3b y M4 con el código CORCON-MOD3 (integrado en MELCOR 1.8.4).

— Uso del código CFX 4.2 de fluidodinámica computacional (CFD) para el análisis detallado de la ebullición durante la fase de intercambio a través de la costra. ☺

#### Referencias

[1] M.T. Farmer, B.W. Spencer, D.J. Kilsdonk: *Summary Description and Rationale for Proposed MACE Separate Effects Tests*. Reactor Engineering Division/ANL. April, 1999.

[2] M.T. Farmer, B.W. Spencer, D.J. Kilsdonk, R.W. Aeschlimann: *Status of Large-Scale MACE Core Coolability Experiments*. Reactor Engineering Division/ANL. OECD

Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability. Karlsruhe, 15-18 November 1999.

[3] M.T. Farmer *et al.*: *MACE Test M3b. Data Report. Volume 1*. ANL/EPRI, MACE-TR-D13, EPRI TR-108806. November, 1997.

[4] M.T. Farmer *et al.*: *MACE Test M4 Data Report*. ANL/EPRI, MACE-TR-D16 (draft). August, 1999.

[5] EPRI: *MACE Long Term Program Plan*. Prepared by Dr. Salomon Levy. Draft. July, 1999.

[6] M. Epstein: *Review of Gas-Flux Enhancement Film Boiling Models*. FAI/EPRI, ACEX-TR-C27. September, 1997.

[7] M. Epstein: *Review of Water Ingression Models*. FAI/EPRI, ACEX-TR-C31. October, 1997.

# Distribución dosimétrica de los trabajadores expuestos en España en 1998

El conocimiento de las dosis recibidas por los trabajadores expuestos constituye un indicador importante para valorar las medidas de protección

radiológica en instalaciones nucleares y radiactivas. En este artículo se analizan y comparan con años anteriores los datos dosimétricos de 1998.

## 1. Introducción

El conocimiento de las dosis recibidas por los trabajadores profesionalmente expuestos a las radiaciones ionizantes (en adelante, trabajadores expuestos) constituye un aspecto fundamental a la hora de valorar la idoneidad de las medidas de protección radiológica adoptadas en las instalaciones nucleares y radiactivas.

Con este objeto, el Consejo de Seguridad Nuclear inició a mediados de los años ochenta el desarrollo del Banco Dosimétrico Nacional, donde se centraliza la información dosimétrica de los trabajadores expuestos en las instalaciones nucleares y radiactivas de nuestro país.

En base a la información disponible en el Banco Dosimétrico Nacional y a los datos suministrados por los servicios de dosimetría autorizados por el CSN, se ha realizado un estudio en el que se analizan las dosis recibidas por los trabajadores profesionalmente

expuestos en España a lo largo del año 1998. Dicho estudio se ha desarrollado bajo una perspectiva sectorial, considerando los distintos tipos de instalaciones existentes en nuestro país.

De acuerdo con la estructura del Banco Dosimétrico Nacional se han considerado cinco tipos de instalaciones o áreas de trabajo:

- Instalaciones radiactivas médicas.
- Instalaciones radiactivas industriales.
- Centrales nucleares.
- Instalaciones del ciclo del combustible.
- Otras instalaciones.

A su vez, en cada una de estas áreas de trabajo se han considerado distintos sectores. Así, en el área de las instalaciones radiactivas médicas se han considerado los sectores de radiodiagnóstico, radioterapia, medicina nuclear y radiodiagnóstico dental; en el área de las instalaciones radiactivas industriales se han considerado los sectores de radiografía industrial, gammagrafía, medidas de espesor y humedad, control de

procesos, y comercialización y asistencia técnica.

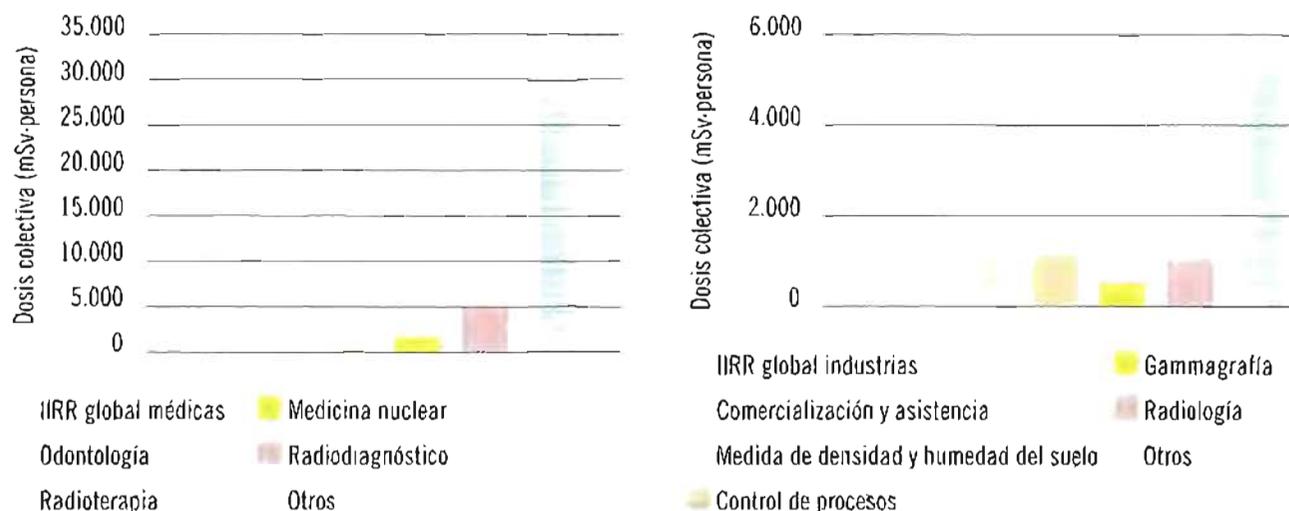
En el área de centrales nucleares no cabe hablar de sectores propiamente dichos, pues éstos están constituidos por cada una de las centrales nucleares, y lo mismo sucede para las instalaciones del ciclo del combustible. En el área de otras instalaciones se engloban sectores no incluidos en los anteriores grupos (centros de investigación y docencia, y entidades de transporte).

Para cada una de estas áreas y sectores de trabajo, el estudio se ha abordado considerando tres elementos básicos de análisis y evaluación:

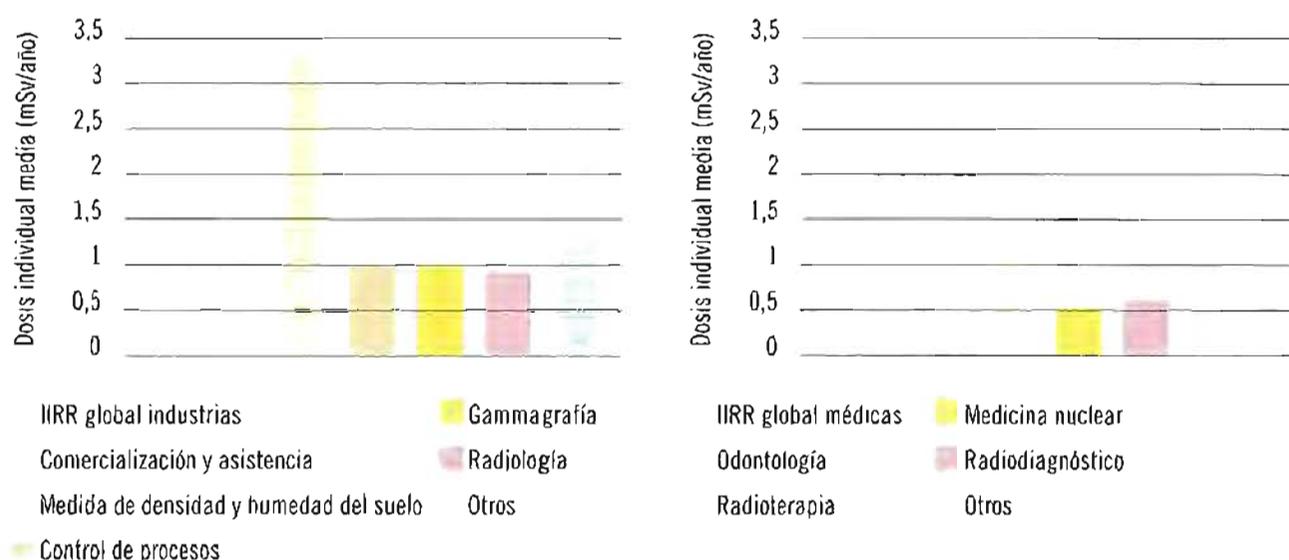
- Número de trabajadores expuestos.
- Dosis colectiva y dosis individual media<sup>1</sup>.
- Número de trabajadores expuestos con dosis inferiores a 5

\* Los autores pertenecen a la Subdirección General de Protección Radiológica del CSN.

<sup>1</sup> En el cómputo de la dosis individual media, únicamente se han considerado los trabajadores expuestos con dosis significativas, es decir, las lecturas dosimétricas superiores al valor de fondo característico del sistema dosimétrico utilizado.



► Figura 1. Dosis colectiva en instalaciones radiactivas médicas e industriales (1998).



► Figura 2. Dosis individual en instalaciones radiactivas médicas e industriales (1998).

mSv/año y con dosis superiores a 20 mSv/año<sup>2</sup>.

## 2. Exposición laboral a radiaciones

### 2.1. Instalaciones radiactivas

En la tabla 1 y en las figuras 1 a 4 se presentan de forma resumida los resultados dosimétricos correspondientes a los trabajadores expuestos

que desarrollan su actividad laboral en el ámbito de las instalaciones radiactivas médicas e industriales.

#### Instalaciones radiactivas médicas

En 1998 se controló dosimétricamente a un total de 65.246 trabajadores expuestos, resultando una dosis colectiva de 29,86 Sv.p y una dosis individual media de 0,56 mSv/año.

Una fracción significativa de estos trabajadores, un 99,38% del total (64.840 personas), recibió dosis inferiores a 5 mSv/año; únicamente 16 trabajadores recibieron dosis comprendidas entre 20 mSv y 50 mSv por año.

Tal y como se pone de manifiesto en las figuras 1 a 4, la mayor con-

tribución a la dosis colectiva corresponde a las instalaciones de radiodiagnóstico (18,67 Sv.p), sector que resulta, asimismo, más representativo en cuanto al número de trabajadores expuestos (42.082 personas).

En lo que se refiere a la dosis individual media, es en el sector de las instalaciones de medicina nuclear donde se da la dosis individual media más alta (1,51 mSv/año).

#### Instalaciones radiactivas industriales

En 1998 se controló dosimétricamente a un total de 5.213 trabajadores expuestos, resultando una dosis colectiva de 5,58 Sv.p y una dosis individual media de 1,33 mSv/año.

<sup>2</sup> Los valores de 5 y 50 mSv/año corresponden a los límites anuales de dosis para miembros del público y trabajadores expuestos, respectivamente, vigentes en la legislación española. El valor de 20 mSv/año corresponde al límite anual de dosis para trabajadores expuestos (promedio de cinco años) establecido en la Directiva 96/29 de Euratom.

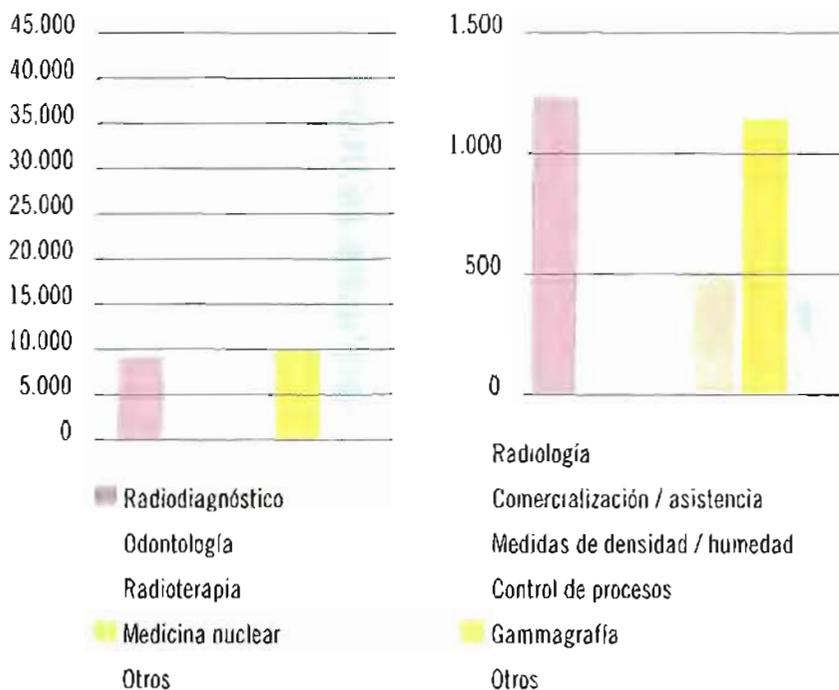


Figura 3. Número de trabajadores en instalaciones radiactivas médicas e industriales (1998).

Una fracción significativa de estos trabajadores, un 96,22% del total (5.016 personas), recibió dosis inferiores a 5 mSv/año; únicamente 19 trabajadores recibieron dosis comprendidas entre 20 mSv y 50 mSv por año.

Tal y como se pone de manifiesto en las figuras 1 a 4, la mayor

contribución a la dosis colectiva corresponde a las instalaciones de gammagrafía industrial (1,29 Sv p), sector que es el menos representativo en cuanto al número de trabajadores expuestos (436 personas). Este hecho se traduce en valores de dosis individual media (3,43 mSv/año) por encima de las

registradas en el resto de los grupos considerados.

En comparación con las instalaciones radiactivas médicas, en general, en las instalaciones radiactivas industriales desarrollan su actividad laboral un menor número de personas que, sin embargo, reciben dosis más altas.

Se observa, asimismo, que el valor de la dosis individual media asociada al total de las instalaciones industriales es del orden de la correspondiente a las centrales nucleares, y significativamente superior al valor obtenido para el total de las instalaciones radiactivas de tipo médico. En las primeras desarrollan su actividad laboral un menor número de personas que, sin embargo, reciben dosis más altas.

2.2. Centrales nucleares<sup>3</sup>

En la tabla 2 y en las figuras 5 a 8 se presentan de forma resumida los resultados dosimétricos correspondientes a los trabajadores expues-

<sup>3</sup> Las diferencias existentes respecto a lo publicado en el documento DOC-07.02 *La dosimetría de los trabajadores profesionalmente expuestos en España durante el año 1998. Estudio sectorial* son debidas a la depuración de los datos.

Tabla 1. Distribución dosimétrica año 1998 (instalaciones radiactivas).

Tipo de instalación	Nº trabajadores (total)	Dosis colectiva (Sv-p)	Dosis media (mSv/año)	Nº trabajadores (20 mSv < D < 50 mSv)
Radiodiagnóstico	42.082	18,67	0,54	14
Radioterapia	1.852	0,87	0,55	1
Medicina nuclear	1.734	2,44	1,51	0
Radiología dental	10.026	4,84	0,63	1
Otros	9.552	3,04	0,40	0
<b>Total medicina</b>	<b>65.246</b>	<b>29,86</b>	<b>0,56</b>	<b>16</b>
Radiografía industrial	486	0,68	1,82	1
Gammagrafía	436	1,29	3,43	9
Control procesos	1.461	1,12	1,04	2
Espesor-humedad	495	0,46	1,05	1
Comercialización	1.132	0,88	0,93	0
Otros	1.203	1,15	1,18	6
<b>Total industria</b>	<b>5.213</b>	<b>5,58</b>	<b>1,33</b>	<b>19</b>

tos que desarrollan su actividad laboral en el ámbito de las centrales nucleares.

En 1998 estaban en funcionamiento dos reactores nucleares de tipo BWR (Garoña y Cofrentes) y siete reactores nucleares de tipo PWR (José Cabrera, Almaraz I y II, Ascó I y II, Vandellós II y Trillo); además, la central nuclear Vandellós I se encontraba en proceso de desmantelamiento.

En este sector se controló dosimétricamente a un total de 6.643 trabajadores expuestos, resultando una dosis colectiva de 4,91 Sv.p y una dosis individual media de 1,71 mSv/año.

Una fracción significativa de estos trabajadores, un 96,96% del total (6.435 personas), recibieron dosis inferiores a 5 mSv/año; por otra parte, 6 trabajadores recibieron dosis superiores a 20 mSv/año.

Tal y como se pone de manifiesto en las figuras 5 a 8, es en la central de Ascó donde se registra la dosis colectiva más elevada (1,36 Sv.p), presentando valores del mismo or-

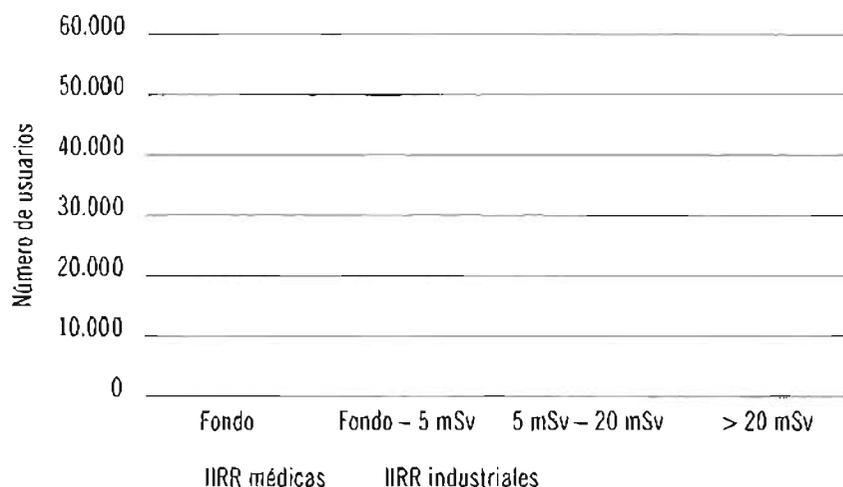


Figura 4. Número de trabajadores por intervalo de dosis en instalaciones radiactivas médicas e industriales (1998).

den la central José Cabrera (1,20 Sv.p) y la de Almaraz (1,18 Sv.p).

La influencia del diseño de la central en las dosis operacionales se pone de manifiesto en el hecho que las centrales de diseño más moderno, Vandellós II y Trillo, presenten valores de dosis colectiva significativamente inferiores a las anteriormente citadas (0,024 y 0,093 Sv.p, respectivamente).

En lo que se refiere a la dosis individual media, la central José Cabrera (2,74 mSv/año) es la que registra valores más altos. También en dosis individuales, las centrales de diseño más moderno registran los valores más bajos, con 0,27 mSv/año en Vandellós II y 0,57 mSv/año en Trillo.

En todas las instalaciones se da la circunstancia de que el personal de

Tabla 2. Distribución dosimétrica año 1998 (centrales nucleares, ciclo combustible, residuos, centrales nucleares en desmantelamiento y otras).

Instalación	Nº trabajadores (total)	Dosis colectiva (Sv.p)	Dosis media (mSv/año)	Nº trabajadores (20 mSv < D < 50 mSv)
José Cabrera	540	1,20	2,74	0
Garoña	953	0,58	1,64	0
Almaraz	1.735	1,18	1,30	0
Ascó	1.902	1,36	1,43	0
Cofrentes	797	0,47	1,78	0
Vandellós II	624	0,024	0,27	0
Trillo	688	0,093	0,57	0
<b>Total centrales nucleares</b>	<b>6.643*</b>	<b>4,91</b>	<b>1,71</b>	<b>6*</b>
Juzbado	477	0,044	0,40	0
Quercus y Lobo-G	269	0,017	0,33	0
Enresa	210	0,037	0,75	0
Vandellós I	276	0,034	0,56	0
<b>Total instalaciones del ciclo</b>	<b>1.232</b>	<b>0,132</b>	<b>0,49</b>	<b>0</b>
Otras	4.744	1,48	0,42	0

\* El valor global no es sumatorio de los correspondientes a cada una de las instalaciones consideradas, debido a que algunos trabajadores de contrata son controlados en varias instalaciones.

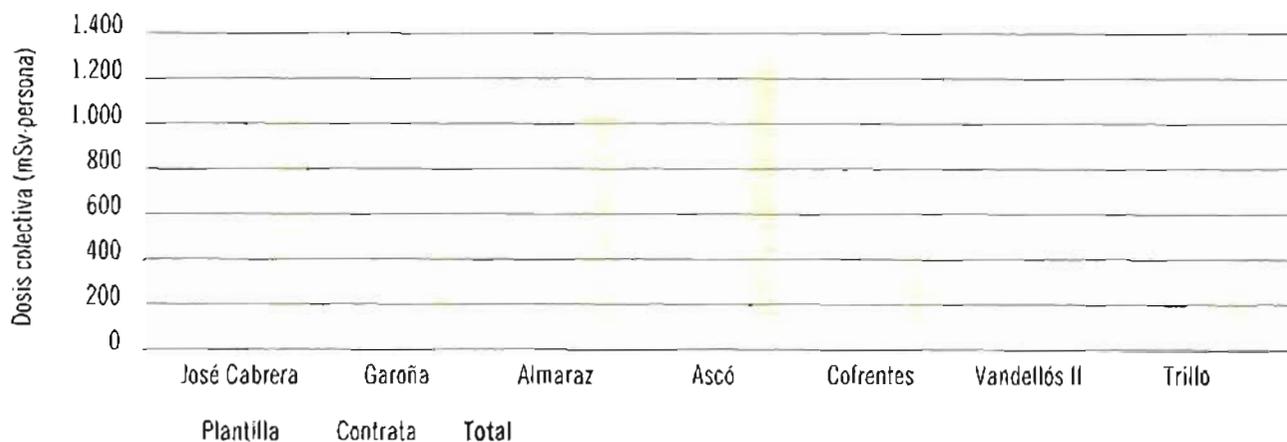


Figura 5. Dosis colectiva de trabajadores en centrales nucleares españolas (1998).

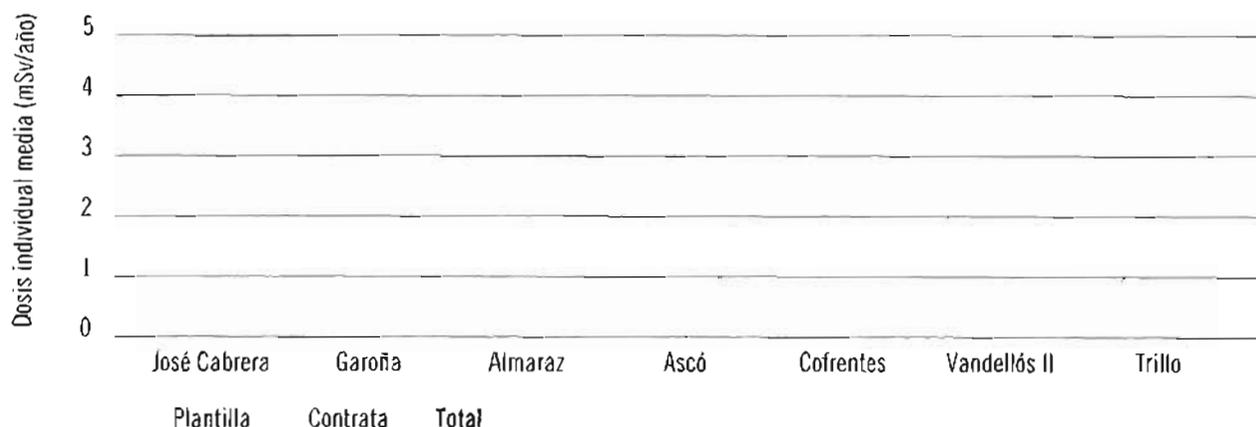


Figura 6. Dosis individual media para trabajadores en centrales nucleares españolas (1998).

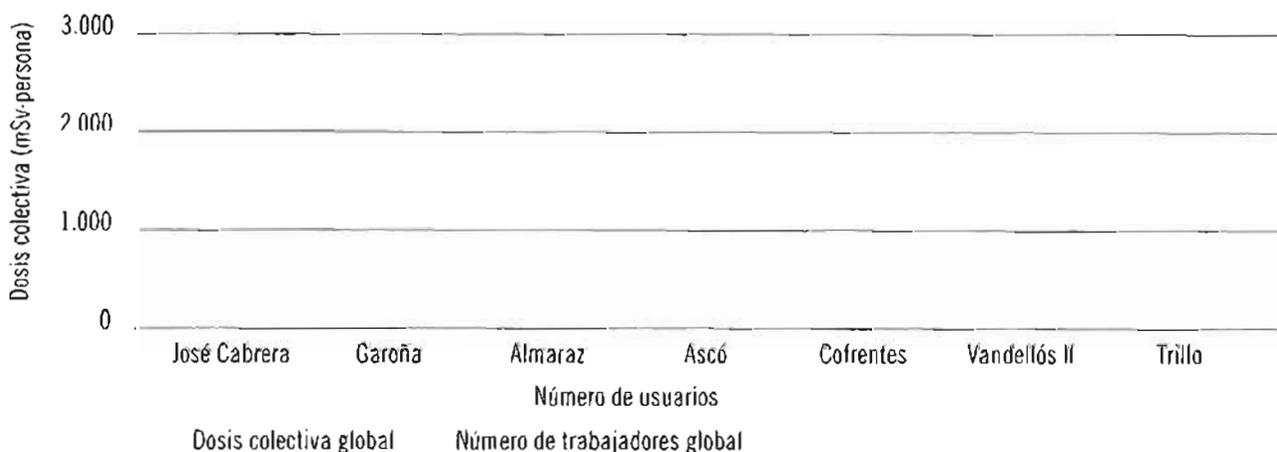


Figura 7. Dosis colectiva y número de trabajadores en centrales nucleares españolas (1998).

contrata recibe dosis superiores al personal de plantilla. Esta tendencia es general en todos los países y resulta lógica si se tiene en cuenta que, habitualmente, la contratación de personal externo a la central se realiza con vistas a la realización de operaciones (mantenimiento, reparación, etcétera) que suelen resultar radiológicamente significativas.

**2.3. Instalaciones del ciclo, residuos y desmantelamiento**  
 Durante 1998, el número de trabajadores expuestos que desarrollaron su actividad en el campo de las instalaciones del ciclo del combustible, residuos y Vandellós I (operaciones de clausura), y que fueron controlados dosimétricamente se cifra en 1.232 personas.

Sus lecturas dosimétricas suponen una dosis colectiva de 0,132 Sv.p y una dosis individual medida de 0,49 mSv/año.

Ninguno de los trabajadores expuestos de este sector registró dosis superiores a 5 mSv/año.

La fábrica de combustible de Juzbado (0,044 Sv.p) es la que contribuye en mayor medida a los va-

lores de dosis colectiva registrados dentro de este sector.

Las instalaciones de residuos son las que presentan valores más representativos en lo referente a la dosis individual media, con 0,75 mSv/año.

### 2.4. Otras instalaciones

En 1998 se controló dosimétricamente a un total de 4.744 trabajadores expuestos, resultando una dosis colectiva de 1,48 Sv.p y una dosis individual media de 0,42 mSv/año.

Una fracción significativa de estos trabajadores, un 99,7% del total (4.130 personas), recibió dosis inferiores a 5 mSv/año; ningún trabajador recibió dosis superiores a 20 mSv por año.

Los centros de investigación y docencia son los que más contribuyen a la dosis colectiva (1,27 Sv.p), siendo también los más representativos en cuanto al número de trabajadores expuestos (4.514 personas).

En lo que se refiere a la dosis individual media, son las entidades de transporte las que registran el valor más elevado (3,31 mSv/año).

## 3. Evolución y tendencias en la exposición laboral a radiaciones

Con objeto de valorar la tendencia en la exposición a radiaciones entre los trabajadores profesionalmente expuestos de nuestro país se ha efectuado un análisis comparativo entre los datos presentados en este informe con los correspondientes al año 1995, por considerar que el periodo de tiempo transcurrido permite una buena definición de dicha tendencia.

En las figuras 9 a 12 se presentan de forma resumida los datos que han servido de base a este análisis comparativo.

### 3.1. Evolución de las dosis en instalaciones radiactivas

Cuando se analiza la evolución de la dosis colectiva en el periodo 1995-1998 en las instalaciones radiactivas médicas se puede obser-

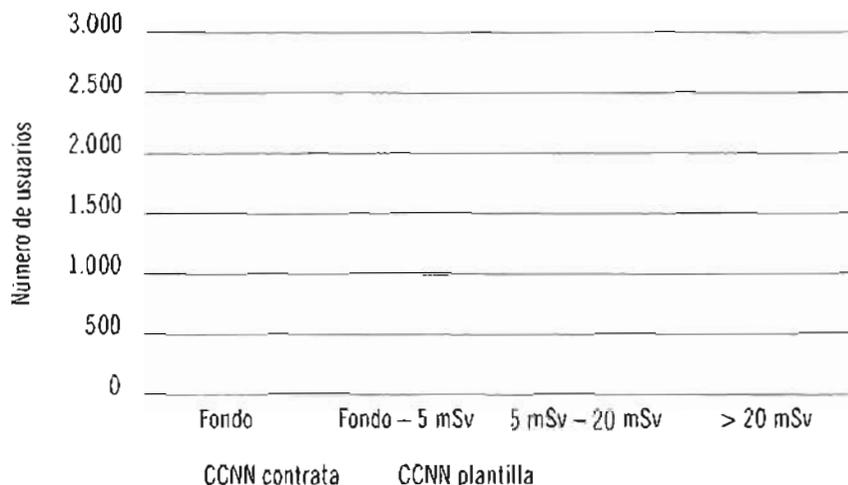


Figura 8. Número de trabajadores por intervalo de dosis en centrales nucleares españolas (1998).

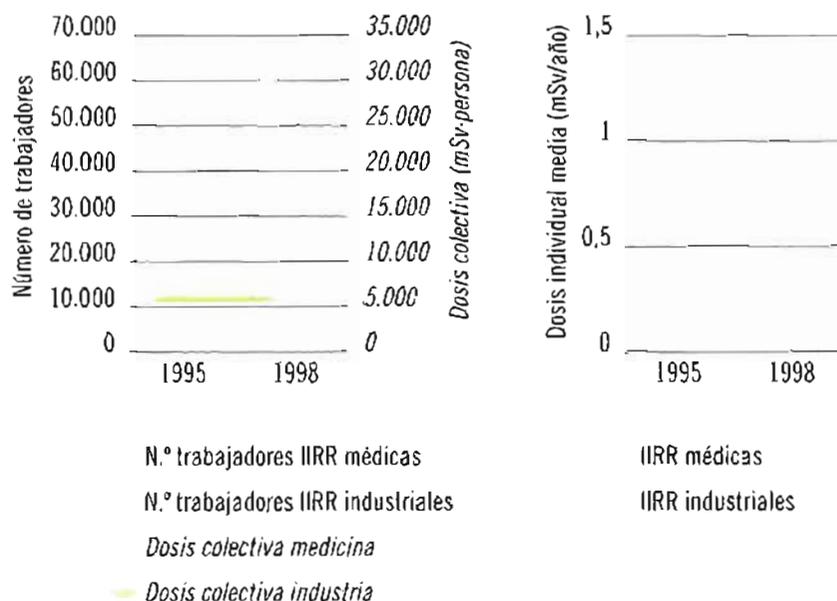


Figura 9. Distribución comparativa de dosis colectiva e individual media en instalaciones radiactivas médicas e industriales (1995 y 1998).

var que, a pesar de que el número de trabajadores expuestos controlados dosimétricamente se incrementa en un 15% (65.246 trabajadores, frente a 56.570), la dosis colectiva aumenta en un 9% (29,86 Sv.p, frente a 27,39 Sv.p).

En lo que se refiere a la dosis individual media, los valores no sufren una variación significativa (0,56 mSv/año en 1998, frente a 0,55 mSv/año en 1995).

Respecto al número de trabajadores con dosis comprendidas entre 20mSv y 50mSv, se observa una disminución del 27% (16 tra-

bajadores, frente a 22 trabajadores).

En lo que se refiere a las instalaciones radiactivas industriales, la evolución de la dosis colectiva en el periodo 1995-1998 muestra un aumento del 0,56% (5,58 Sv.p, frente 5,55 Sv.p), mientras que el número de trabajadores expuestos se incrementó en un 3% (5.213 frente a 5.070 trabajadores). En cuanto a la dosis individual media, aumenta ligeramente, un 2%, en el periodo objeto del estudio (1,33 mSv/año, frente a 1.30 mSv/año). Asimismo, el número

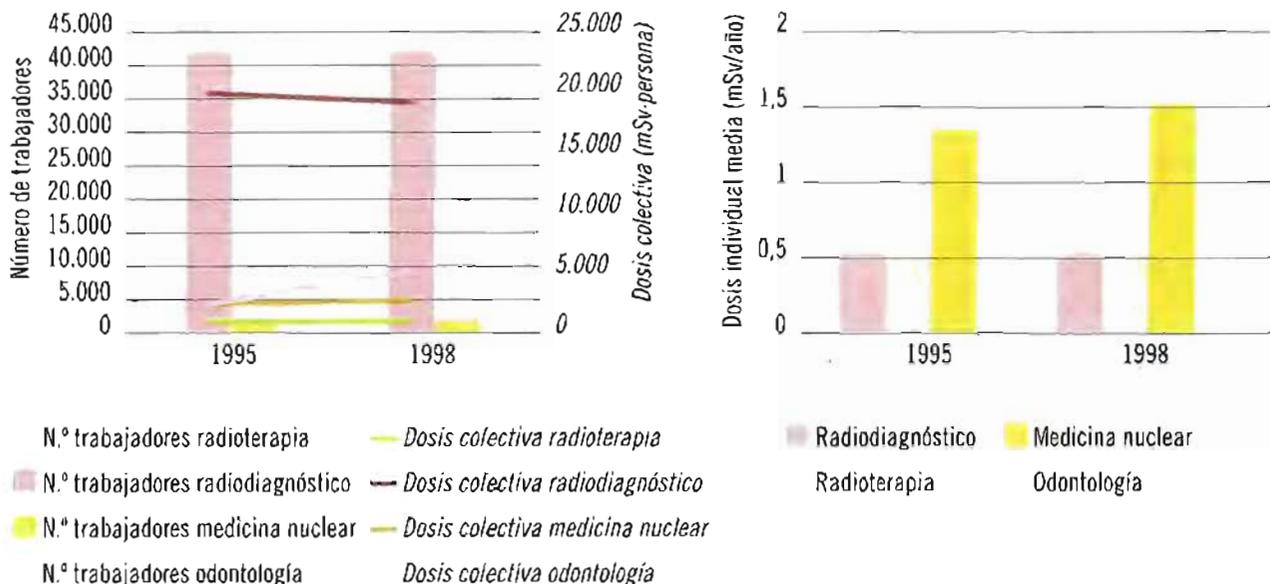


Figura 10. Dosis comparativa de dosis colectiva e individual en instalaciones radiactivas medicas (1995 y 1998).

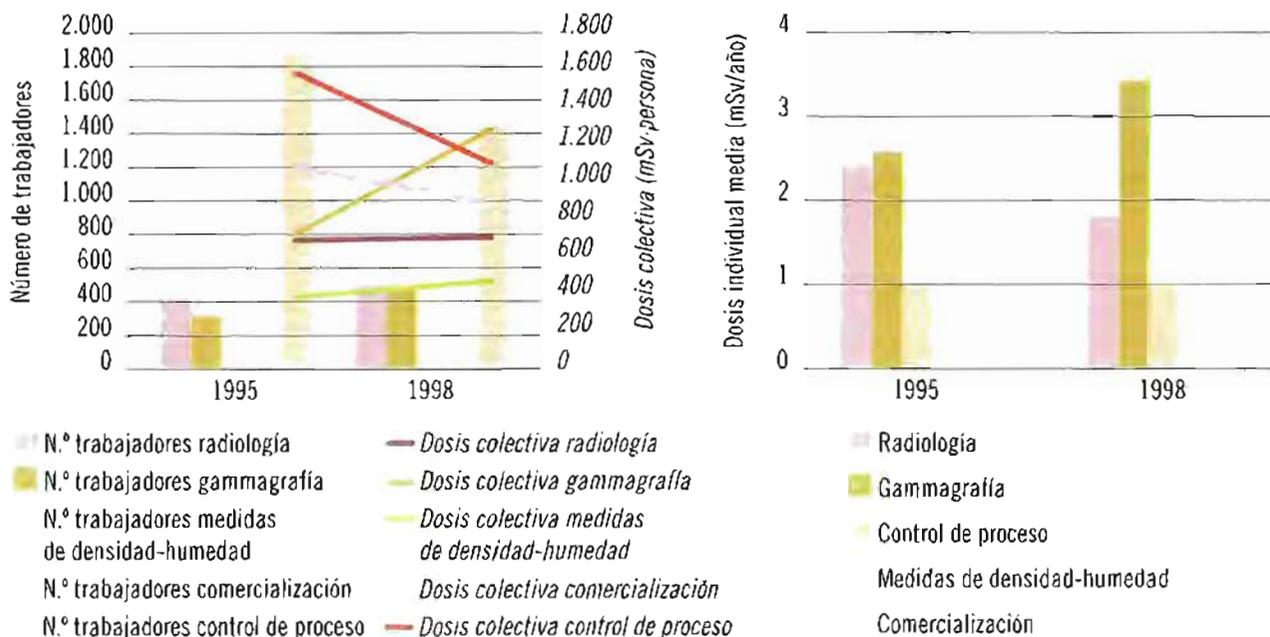


Figura 11. Dosis comparativa de dosis colectiva e individual en instalaciones radiactivas industriales (1995 y 1998).

de trabajadores con dosis comprendidas entre 20 mSv y 50 mSv por año, sufre un incremento de un 46% (19 trabajadores, frente a 13 trabajadores).

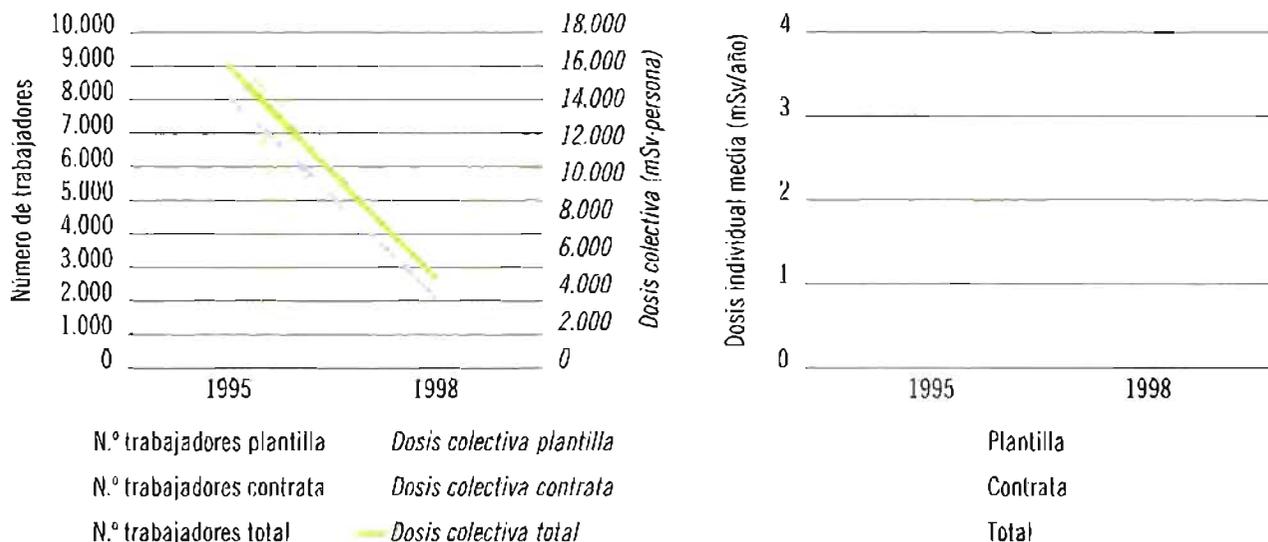
Cabe resaltar que en los resultados obtenidos en este tipo de instalaciones resultan determinantes las dosis registradas en el sector de gammagrafía industrial (dosis individual media de 3,43 mSv/año y 9 trabajadores con dosis entre 20 mSv y 50 mSv en el año 1998).

En lo que se refiere a los valores de dosis colectiva dentro del sector de gammagrafía industrial se observa que han ido aumentando progresivamente desde el año 1995 hasta el año 1998.

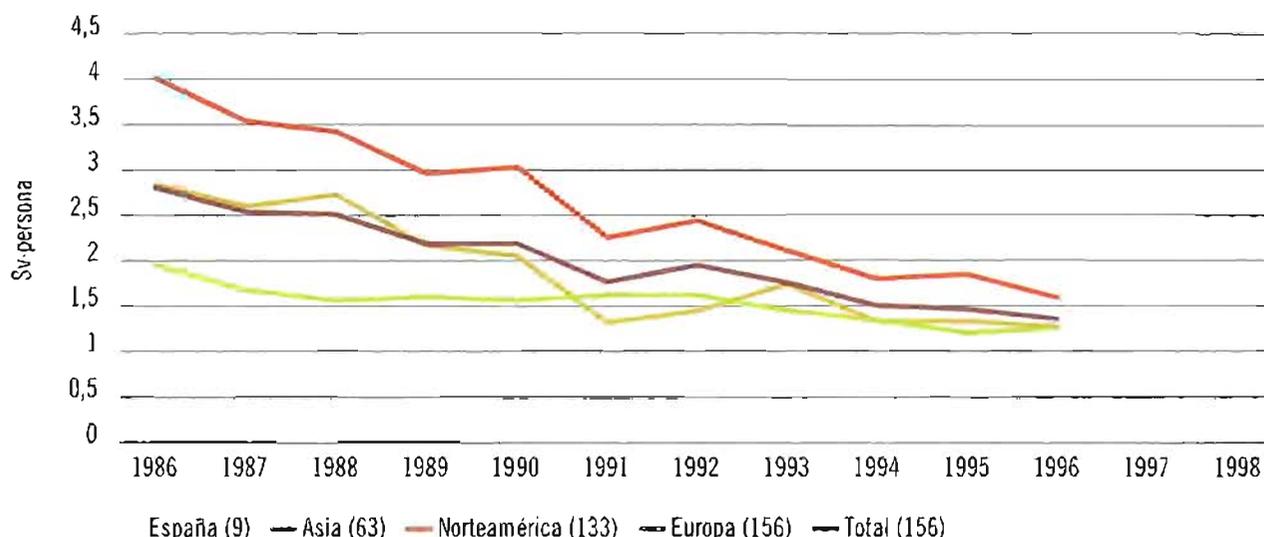
Teniendo en cuenta lo indicado con anterioridad parece evidente que en este sector es donde se deberán realizar mayores esfuerzos con vistas a satisfacer los nuevos límites de dosis de la Directiva 96/29 de Euratom, una vez que se transpongan a la legislación española.

### 3.2. Evolución de las dosis en centrales nucleares

Cuando se analiza la evolución de la dosis colectiva en las centrales nucleares se puede observar que el número de trabajadores expuestos controlados dosimétricamente ha disminuido un 24% en el periodo 1995-1998 (6.643 frente a 8.765 trabajadores) y que la dosis colectiva presenta una tendencia muy favorable, con una disminución de un 69% (4,91 Sv.p. frente a 16,02 Sv.p.).



► Figura 12. Distribución comparativa de dosis colectiva e individual media en centrales nucleares españolas (1995 y 1998).



► Figura 13. Dosis colectiva anual media por reactor en España y por regiones incluidas en ISOE.

La evolución se mantiene favorable en lo que se refiere a la dosis individual media, donde se produce un descenso del 45% (1,71 mSv/año, frente a 3,13 mSv/año).

En lo que se refiere al número de trabajadores con dosis comprendidas entre 20 mSv y 50 mSv por año, se aprecia una disminución del 94% (6 trabajadores frente a 93).

Cabe destacar que la disminución en los valores de dosis registrados es debida, fundamentalmente, a la reducción de las dosis asociadas al personal de contrata.

En la figura 13, donde se muestra la evolución de la dosis

colectiva en las centrales nucleares españolas encuadrada en un contexto internacional, se observa una tendencia global decreciente, que pone de manifiesto el importante esfuerzo desarrollado en este sector en la puesta en práctica del principio de optimización de la protección radiológica.

### 3.3. Evolución global de las dosis

Cuando se analizan los datos del conjunto de los trabajadores expuestos de nuestro país, hay que valorar positivamente que, a pesar de que en el periodo 1995-1998 el número de trabajadores expuestos

controlados dosimétricamente ha aumentado en un 9% (83.078 trabajadores, frente a 75.990 trabajadores), la dosis colectiva ha disminuido en un 19% (41,96 Sv-p, frente a 51,77 Sv-p).

Análoga valoración positiva merece la evolución en el periodo 1995-1998, tanto de la dosis individual media, donde se observa una disminución del 21% (0,65 mSv/año, frente a 0,82 mSv/año), como en el número de trabajadores con dosis comprendidas entre 20 mSv y 50 mSv por año, donde se observa una disminución del 72% (41 trabajadores, frente a 145). ☺

 M. Ángeles Martín\*

# Proceso de mejora de las especificaciones de la central nuclear de Trillo

La central nuclear de Trillo emprendió una revisión de las especificaciones de funcionamiento con el fin de establecer las mejoras necesarias para su mayor comprensión y adaptación a la planta. Tras varios años de profundo estudio, el esfuerzo culminó con la

autorización por la Dirección General de Energía, en febrero de 1999, de la revisión general de las especificaciones de la central. Este artículo trata de explicar los motivos que impulsaron esta revisión, el proceso seguido para llevarla a cabo y algunas de las mejoras incorporadas.

## 1. Marco de referencia

### 1.1. Aspectos básicos

La documentación base de diseño en una central nuclear está soportada por cálculos, planos y especificaciones.

La normativa americana sobre energía nuclear define los documentos constitutivos de las bases de diseño<sup>1</sup> como los documentos que deben comprender "las funciones específicas que deben realizar las estructuras, sistemas y componentes, así como los valores específicos o rango de valores elegidos para controlar los parámetros como referencia obligada de diseño".

Las funciones específicas a realizar están contenidas en el documento *Estudio final de seguridad* y los valores elegidos para controlar parámetros y valores límite se re-

cogen en las especificaciones de funcionamiento.

Trillo fue la primera y única central de agua ligera de tecnología alemana, diseño Siemens-KWU, que se construyó en España.

Es una central de tres lazos y cuatro redundancias o trenes, que no siempre son completamente independientes. Su diseño es una adaptación del de una central Siemens-KWU pre-konvoi de cuatro lazos y cuatro redundancias.

Siendo  $n$  el número de trenes necesario para garantizar el cumplimiento de una función de seguridad, en el diseño de las centrales alemanas normalmente es  $n=2$  y, generalmente, están diseñadas con cuatro redundancias. Gracias a ello disponen de cuatro trenes, de los cuales dos son suficientes para asegurar las funciones de seguridad. Se puede dar, en consecuencia, la circunstancia de que un tren esté en mantenimiento, incluso en el caso de que uno de los tres trenes disponibles falle cuando es requerido a actuar, y

seguir cumpliendo la función de seguridad correspondiente, satisfaciéndose el *criterio de fallo único*.

### 1.2. Especificaciones técnicas de Trillo

La orden ministerial<sup>2</sup> por la que se autorizaba la construcción de Trillo I incluía, entre los documentos a presentar para solicitar el permiso de explotación provisional, los especificados en el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas.

En el citado reglamento se establece que, para obtener la autorización de explotación, el titular de la autorización de construcción deberá presentar, entre otros documentos, la propuesta de especificaciones de funcionamiento. Esta propuesta deberá contener:

— Los valores límite de las variables que afecten a la seguridad.

— Los límites de actuación de los sistemas de protección automática.

\* M.A. Martín es jefe de Proyecto de la central nuclear de Trillo en el CSN.

<sup>1</sup>Code of Federal Regulations 10 CFR 50.2.

<sup>2</sup>Orden ministerial de 25 de agosto de 1978.



► Figura 1. Central nuclear de Trillo.

— Las condiciones mínimas de funcionamiento.

— El programa de revisiones, calibrado e inspecciones periódicas de los sistemas y componentes.

El permiso de explotación provisional (PEP) fue concedido a Trillo I por orden ministerial de 4 de diciembre de 1987. El apartado 9 del anexo 1, que incluye los límites y condiciones, requiere que la explotación se realice de acuerdo, entre otros documentos, a las especificaciones técnicas de funcionamiento (ETF).

Durante el proceso de puesta en marcha, Trillo realizó numerosos cambios en el diseño como consecuencia del propio proceso y de los resultados de las evaluaciones del Consejo de Seguridad Nuclear sobre las modificaciones de los sistemas.

Con el fin de adaptar las ETF a estos cambios, en el propio PEP se requirió a la central que, antes del acercamiento a la criticidad inicial, presentara una nueva redacción de

las ETF que contemplara las modificaciones de diseño introducidas.

## 2. Análisis comparativo con las centrales de origen de Estados Unidos

### 2.1. Aspectos comparativos de diseño

Comparativamente, el diseño de las centrales Siemens-KWU se diferencia del de las centrales de agua a presión equivalentes de diseño originario de Estados Unidos en lo siguiente:

— Las centrales Siemens tienen un alto grado de automatismo, disponiendo, además del sistema de control y el de protección, de un sistema de actuación intermedia, llamado sistema de limitación, que actúa después del de control y antes que el de protección, evitando la activación de este último. En particular, limita los disparos del reactor. Esos automatismos, y en general la lógica de actuación de los sistemas, se configuran físicamente con la utiliza-

ción intensiva de tarjetas electrónicas en lugar de dispositivos electromecánicos, como es común en centrales de diseño estadounidense.

— La gran mayoría de las válvulas, incluidas las de regulación, son motorizadas, en contraposición a la tecnología de origen estadounidense, que utiliza válvulas de actuación neumática. También es característico en la tecnología Siemens-KWU la utilización en diversos sistemas de válvulas pilotadas activadas por el propio medio. Las válvulas de aislamiento, alivio y seguridad de los generadores de vapor son un ejemplo destacable.

— La alimentación eléctrica dispone de cuatro generadores diesel de salvaguardia y cuatro de emergencia, cada uno de ellos del 50% de la capacidad total requerida, frente a los dos de salvaguardia (con el 100% de la capacidad requerida cada uno de ellos) de las centrales de origen norteamericano.

— La alimentación eléctrica de salvaguardia está diseñada para absorber las cargas precisas para afrontar los accidentes base de diseño tales como el accidente con pérdida de refrigerante (LOCA) como en las centrales de EEUU, disponiendo además de la alimentación de emergencia que sirve también a cargas y equipos necesarios para afrontar un accidente base de diseño específico de la normativa alemana: el denominado accidente externo o EVA. Este accidente implica básicamente la indisponibilidad de la sala de control principal y los equipos de salvaguardia, en cuyo caso, tras el abandono de la sala de control principal, la central es llevada a parada segura desde la sala de control de emergencia, situada en un edificio de emergencia específico de centrales Siemens-KWU. En el caso de las centrales de EEUU, la parada segura se realiza desde el panel de parada remota, utilizando los equipos de salvaguardia.

— En las centrales de diseño Siemens-KWU, las señales del sistema de protección del reactor (SPR) son activas, es decir, suponen la transmisión de señal eléctrica, por lo que se necesita continuidad en el circuito para que dichas señales prosperen, frente a las americanas, que son pasivas y actúan si pierden la continuidad del circuito.

## 2.2. Similitudes y diferencias entre las ETF de Siemens-KWU y EEUU

El documento básico de licencia de las centrales alemanas es el manual de operación.<sup>3</sup>

En la práctica, y sin que se atenga a ningún formato estándar, dicho manual contiene toda la documentación básica para la operación de la central, incluyendo los procedimientos de operación de emergencia (POE), instrucciones de

emergencia y fallo, instrucciones particulares (alineamiento, cambios operativos y alarmas), etcétera, de todos los sistemas.

Dentro de esos procedimientos de operación se incluyen las llamadas *especificaciones de seguridad*, que constan tanto de requisitos y actuaciones en emergencia, como de requisitos de disponibilidad de los sistemas de seguridad en condiciones normales, equivalente a las condiciones límite de operación (CLO) y su acción asociada en las ETF tipo EEUU. Asimismo incluye los requisitos de prueba periódica, equivalente a los requisitos de vigilancia (RV) en las ETF tipo EEUU.

Esas especificaciones de seguridad no aparecen como documento aparte dentro del manual, sino dentro de él, en apartados tales como procedimientos de operación de emergencia, instrucciones de sistemas, etcétera, identificadas de alguna manera sencilla, por ejemplo con hojas de otro color, sin que se siga un formato homogéneo de unas centrales a otras que pueda servir de modelo.

En los países europeos no es práctica común la transparencia que caracteriza a EEUU en cuanto a acceso a normativa, regulaciones o documentación en centrales nucleares, circunstancia que, en el proceso de puesta en marcha de otras centrales españolas de tecnología norteamericana, se ha mostrado de gran utilidad. Trillo encontró la dificultad añadida de que los requisitos del manual de operación pueden variar de unos *länder* a otros en función del criterio de los diferentes TÜV (organizaciones de expertos contratadas por las autoridades).

Uno de los criterios básicos que soportó el requisito incluido en el PEP sobre la elaboración de las ETF fue, por un lado, la necesidad de disponer de un conjunto de especificaciones como documento específico de operación y, por otro, y en cuanto a la forma, que su con-

tenido se redactara en los términos de un formato establecido y conocido.

En este punto se consideró que el formato estándar americano podría adaptarse a una central Siemens-KWU, contando con la colaboración y asesoramiento del TÜV, de forma que se consiguiera un producto similar a las especificaciones estandarizadas y utilizadas en el resto de las centrales de agua a presión ya autorizadas.

En realidad, las diferencias entre las centrales americanas y Trillo no son tanto de diseño como de normativa. Así, un BWR-General Electric es muy distinta a una PWR-Westinghouse, pero el formato de las ETF es casi idéntico.

Sin embargo, el estándar americano no se corresponde con la central nuclear de Trillo porque la normativa en ambos países es distinta. Así sucede con los tiempos de actuación de salvaguardias que son requeridos en las centrales americanas, pero no en Trillo, con los temas relativos al manual de inspección en servicio (MISI), etcétera.

El proceso de puesta en marcha de Trillo siguió su curso y se elaboraron las nuevas especificaciones dando cumplimiento al PEP. La central empezó a operar con las ETF autorizadas, que se mostraron de difícil aplicación, a pesar de que parte de los problemas que iban surgiendo se fueron parcialmente corrigiendo en sucesivas revisiones.

## 2.3. Deficiencias más significativas identificadas en las ETF de Trillo

Las deficiencias de redacción o contenido detectadas en las ETF fueron identificándose, aplicando en cada caso las medidas pertinentes para su corrección y adaptación al documento final.

Así, se identificó cierta ambigüedad en las condiciones límite de operación (CLO), las cuales estaban redactadas con frases imprecisas, en negativo, es decir alcanzando la CLO cuando ya existe una condición degradada, cir-

<sup>3</sup>Los requisitos de este manual están recogidos en la KTA 1201, versión de 12/85 con revisión de 6/98, y las especificaciones son únicamente mencionadas en el apartado 4.7.

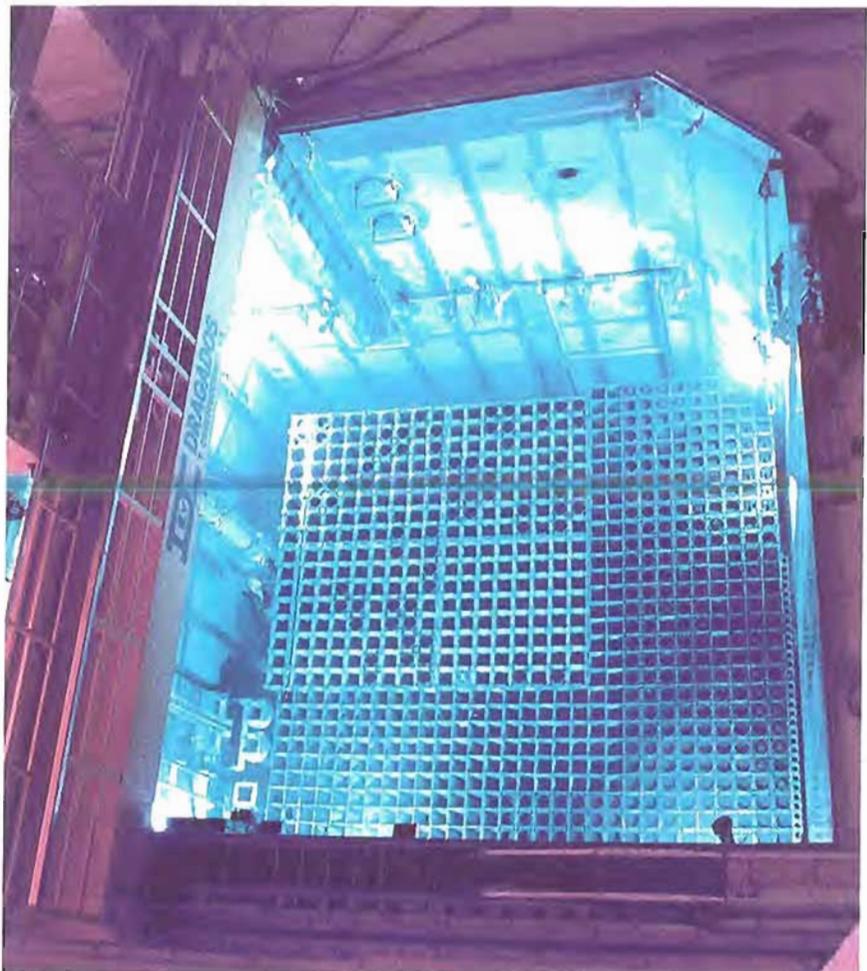
cunstancia que dificulta su interpretación y aplicación. El caso del SPR fue un ejemplo claro de ambigüedad.

Por otro lado, el propio contenido de las CLO, es decir, la razón por la que se establecía la operabilidad de unos ciertos equipos era, en ciertas ocasiones, desconocida y no existía justificación que la soportara. Las propias acciones que se indicaban eran muchas veces ambiguas, dificultando también su aplicación.

En cuanto a las pruebas periódicas, no estaba establecida una vinculación directa entre las condiciones límite de operación y las pruebas periódicas similar a la prevista en el capítulo 3/4 de las ETF de centrales nucleares de diseño americano. Existían muchos requisitos de CLO no recogidos en ninguna prueba periódica y viceversa. Su propia definición era totalmente ambigua en cuanto al alcance de la prueba y criterios de aceptación. En general se identifican notables carencias en su alcance, ya que no se incluían aspectos de notable relevancia en el funcionamiento de la central, como son la calibración de la instrumentación nuclear, algunos parámetros de circuitos de cálculo del sistema de protección del reactor, requisitos de operabilidad de la instrumentación intranuclear, fugas por asiento en válvulas y especificaciones aplicables a operaciones de recarga (movimiento de combustible), entre otras.

El tratamiento de la cuarta redundancia no estaba recogido adecuadamente, ya que no se consideraba que en muchos casos y por su propia configuración esa redundancia no era capaz de sustituir totalmente a alguna de las otras tres, sin requerir acciones adicionales.

En algunos sistemas no estaba claramente definido si su diseño era  $n+2$  o  $n+1$  y, en especial, si el criterio era diferente según la función que hubiera de cumplir.



► Figura 2. Piscina de combustible de la central nuclear de Trillo.

Asimismo, no estaba claramente definida la relación de operabilidad de los sistemas soporte frente al soportado.

Para resolver definitivamente los problemas se consideró necesario realizar una revisión de las ETF en profundidad, con el fin de adaptarlas a las necesidades reales de la planta.

### 3. Proceso de licenciamiento. Acciones emprendidas por Trillo

El CSN solicitó en noviembre de 1991 la realización de una revisión general de especificaciones que quedó plasmada en la condición 14 del anexo I de límites y condiciones de la resolución de la Dirección General de la Energía de 27 de noviembre de 1991 (segunda prórroga del permiso de explotación provisional a Trillo), requiriéndose la realización en el plazo de dos años. Este plazo fue prorrogado hasta fi-

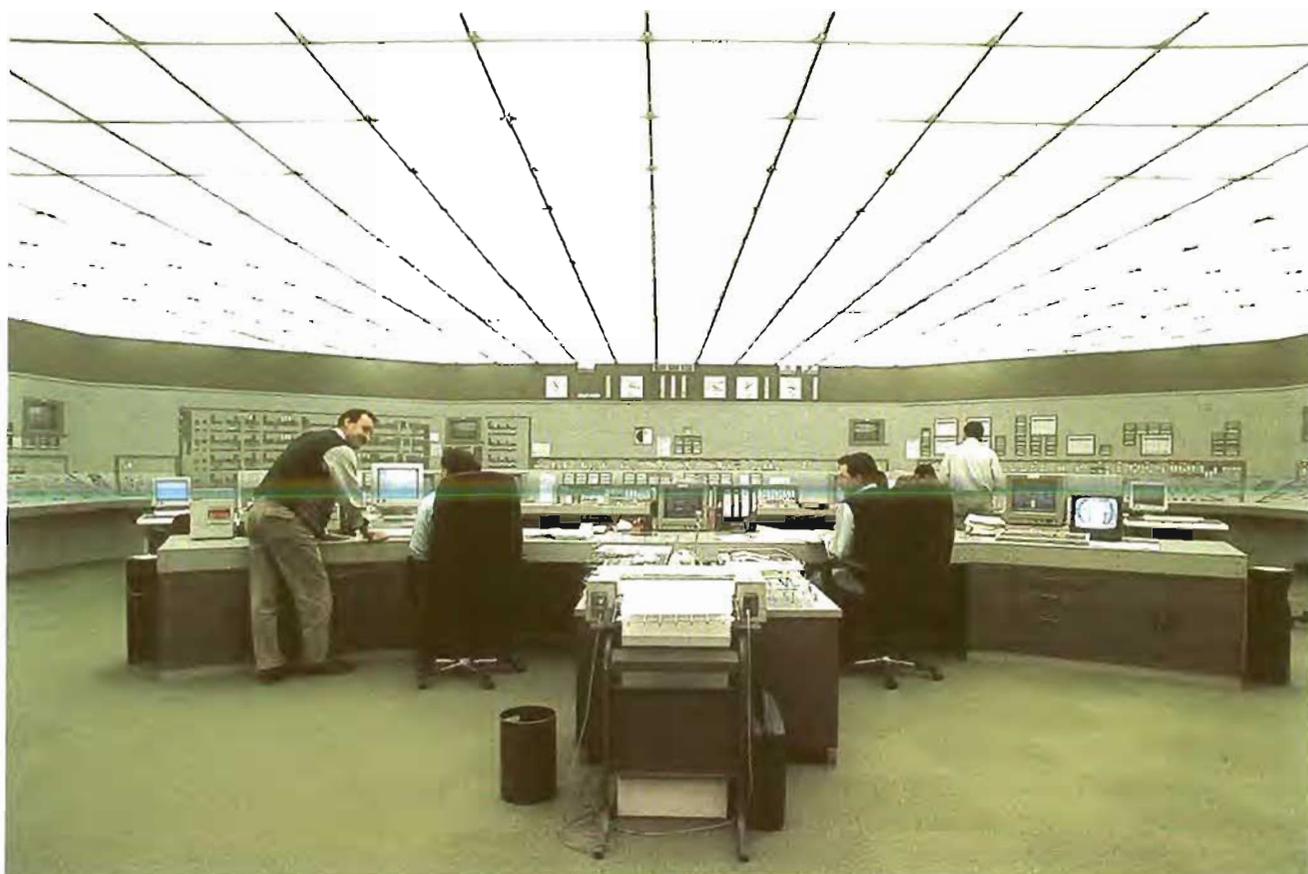
nales de 1994, coincidiendo con el descubrimiento de algunas deficiencias en la planta.

La propuesta de revisión presentada al CSN en abril de 1993 fue redactada según una revisión de las especificaciones entonces vigentes y su comparación con los NUREG 452 y 1431<sup>4</sup>, este último en versión borrador.

La propuesta fue evaluada por el CSN y considerada insuficiente.

Trillo analizó la revisión 0 del NUREG 1431, publicada por la NRC en septiembre de 1992, considerándola como principal referencia para la elaboración de la revisión general en borrador, adjuntando una comparación entre el borrador y la revisión 0 del NUREG 1431. Este documento fue considerado como modelo a seguir

<sup>4</sup>Westinghouse Standard Technical Specifications.



► Figura 3. Sala de control de la central nuclear de Trillo.

tanto en formato como en contenido en lo que fuera de aplicación, pero, dadas las características de esta central, no todas las ETF se correspondían con una equivalente americana.

En paralelo, en el año 1995 Trillo emprendió un programa de revisión profunda de la central, denominado programa AEOS<sup>5</sup>. Durante este proceso se fueron descubriendo algunos errores en el diseño que obligaron a realizar numerosas modificaciones de diseño y, asimismo, al rediseño de tres importantes sistemas: el sistema eléctrico de salvaguardia y emergencia, el sistema de ventilación del edificio de emergencia y el sistema de agua de refrigeración esencial.

Durante la ejecución del programa AEOS, y con objeto de compensar las incertidumbres que se trataban de resolver, se estable-

cieron unas restricciones operativas consistentes en limitaciones a la operación de los sistemas, más exigentes que las definidas en las ETF vigentes.

Estas restricciones operativas se consideraron de aplicación hasta la finalización de la realización del programa AEOS, ya cumplida, y la entrada en vigor de la revisión general de las especificaciones técnicas.

Dentro de los trabajos previstos en el programa AEOS, Trillo había propuesto la realización de un análisis sistemático de las dependencias combinadas entre sistemas frontales y soporte que, partiendo de la definición de las funciones de seguridad para los sucesos base de diseño, comprobara el cumplimiento con los criterios básicos de diseño (fallo único y mantenimiento), así como la consistencia de los tiempos de operabilidad permitidos.

El objeto de este documento fue analizar las dependencias

combinadas entre los sistemas de seguridad encargados de hacer frente a las distintas secuencias de accidente (sistemas frontales) y sus sistemas soporte, con el fin de verificar el cumplimiento de los criterios básicos de seguridad (cumplimiento con fallo único durante periodos de mantenimiento) y, en consecuencia, analizar la consistencia de los tiempos de inoperabilidad de estos sistemas permitidos por las especificaciones de funcionamiento.

Para la realización de este estudio se tomó como punto de partida el documento de KWU NDS6-95-E2033<sup>6</sup>, analizando las funciones de sistema clasificadas en el mencionado documento bajo los conceptos K1 o L1:

— K1: actuaciones automáticas requeridas a corto plazo (menos de 30 minutos) para el control del accidente.

<sup>5</sup>Análisis de Experiencia Operativa y Sistemas.

<sup>6</sup>*Revision of Safety Relevant Systems Item 1 (Triangle).*

— L1: actuaciones (generalmente de tipo manual) requeridas a más largo plazo (más de 30 minutos) para el control del accidente.

Esta tarea se plasmó en un documento<sup>7</sup>, básico para la elaboración de las ETF.

Este análisis supuso revisar las modificaciones de ETF y las afectadas por los cambios para adaptarlos al diseño final y permitió esclarecer las dependencias entre sistemas, de lo que se derivaron numerosos cambios en CLO y acciones de las ETF.

Finalmente, en agosto de 1993, la central de Trillo presentó la revisión 0 de la revisión general, que aportó notables variaciones en el contenido en algunos aspectos al borrador, lo que requirió una nueva revisión en edición "a".

El proceso de evaluación consistió, en resumen, en el envío por parte de Trillo de las ETF en edición "a" evaluada por el CSN y cuyos comentarios fueron recogidos y enviados de nuevo a Trillo en un formato preestablecido, para que fueran estudiados y respondidos por el titular.

Las respuestas a los comentarios del CSN eran remitidas al CSN en esos mismos formatos. Tras su análisis se convocaba una reunión entre Trillo y el CSN, en la que se trataban los temas pendientes o en desacuerdo, cuyo resumen se incorporaba en una nueva edición, la "b", que elaboraba la central.

Por último, los acuerdos alcanzados, así como los resultados obtenidos del programa AEOS, fueron incorporados a las ETF y dieron lugar a una nueva edición la "c", la cual, una vez comentada por el CSN, fue remitida por el titular a la Dirección General de Energía del Ministerio de Industria y Energía para su autorización.

#### 4. Mejoras conseguidas en la revisión general

La revisión general de las ETF de Trillo fue aprobada por resolución de la Dirección General de la Energía de fecha 19 de enero de 1999, estableciéndose un plazo de 18 meses para su entrada en vigor, prorrogado posteriormente por un plazo de 3 meses por resolución de la Dirección General de Política Energética y Minas, en julio de 2000. En este plazo se deben desarrollar la formación del personal en el contenido y manejo de este documento, así como preparar todos los procedimientos de las pruebas periódicas.

El contenido de esta revisión general corrige la mayor parte de las deficiencias identificadas en la versión anterior, algunas de ellas mencionadas en este artículo.

Entre los requisitos de la resolución se plantea que, después de un año de aplicación de estas ETF, Trillo envíe un informe al CSN en el que se recoja la experiencia adquirida a lo largo del año de su aplicación.

Las mejoras de las ETF han permitido:

— Identificar claramente cuáles y para qué funciones los sistemas están diseñados con criterio  $n+2$ , cuáles con criterio  $n+1$  y cuáles con  $n$ .

— Clarificar la operabilidad de los sistemas soporte necesarios para garantizar la de los sistemas soportados y, en su defecto, establecimiento de la obligatoriedad de ir a parada.

— En relación a la cuarta redundancia, clarificar su tratamiento y establecer las precauciones adicionales que contemplan sus diferencias con las otras tres y, por lo tanto, su no completa intercambiabilidad, así como adoptar un criterio básico para los tiempos de reparación de esta redundancia.

— Identificar los subsistemas del sistema de limitación con función de seguridad, así como los valores límite implicados. También se aclaran los criterios para susti-

tuir instrumentación del sistema de limitación con fallo por otra instrumentación operativa. Las anteriores ETF eran particularmente confusas sobre todos estos aspectos.

— Clarificar las acciones ante la inoperabilidad de los diversos canales analógicos del SPR y la limitación, expresamente, de la existencia de inoperabilidades simultáneas en canales que intervienen en lógicas de distintas señales.

— Clarificar los requisitos de operabilidad de trenes piloto en el sistema de vapor principal, incluyendo la operabilidad de algunas válvulas piloto.

— Incorporar requisitos de vigilancia adicionales que comprueban la transferencia del área 1 (sala de control principal) al área 2 (sala de control del edificio de emergencia) de las válvulas y componentes que tienen cambio de área por enclavamiento importante para la seguridad o por señal de cambio de área, después de accidente externo.

— En relación al sistema de puesta a tierra de la central, incorporar la vigilancia de la interconexión de masas entre las diversas redundancias de corriente continua y su conexión a tierra, garantizándose así la continuidad de las señales del SPR.

#### 5. Conclusión

Tras un largo proceso de evaluación, consultas y entrenamiento, la revisión general de las ETF entrará en vigor a finales del año 2000.

En su redacción se ha pretendido resolver los problemas que se habían detectado durante la explotación de los últimos años.

Las experiencias que aportará a la central su aplicación serán recogidas en un informe que será enviado a la Dirección General de la Energía y al CSN, y se espera sea de gran utilidad para el resto de las centrales que están involucradas en procesos similares de mejora de sus especificaciones técnicas de funcionamiento. 

<sup>7</sup>18-E2-V071 *Análisis de Relaciones Funcionales entre Sistemas. Aplicación a las Especificaciones de Funcionamiento.*

Francisco Michavila y Raimundo Martínez\*

# El reencuentro de las matemáticas con la ingeniería

Los autores explican cómo y por qué se produce la conexión de ambas disciplinas, así como la importancia de dicho fenómeno para el progreso de la

humanidad. Los apasionantes retos del futuro pasan, como se explica en el artículo, por avanzar en todos los campos del saber.

## 1. Planteamiento

Quizás sea Arquímedes el primer ingeniero matemático de la Historia. Fue él quien para la resolución de problemas reales introdujo, por primera vez, su formulación matemática.

Cuentan que Hierón II, rey de Siracusa desde 270 al 216 a.C., encargó un día a un orfebre la elaboración de una corona de oro. Cuando el rey recibió la obra tuvo dudas sobre si el artesano le había engañado reemplazando parte del oro por plata y cobre que son, además de menos costosos, más ligeros. Entonces el rey encargó a Arquímedes que resolviese su duda. Al cabo de un tiempo, estando en unos baños públicos, a Arquímedes se le ocurrió la solución —a la vez que exclamó su famoso “¡Eureka!”— al comprender que debía emplear la relación del peso con el volumen de los metales. Hizo otra corona con oro puro, de igual peso que la original, y vio cómo la nueva desplazaba menos volumen que la anterior. El avance científico tuvo una

consecuencia trágica: el rey mandó ejecutar al orfebre.

También, Arquímedes ayudó a que Siracusa resistiese el asedio de los romanos durante años, mediante el diseño de armas defensivas basadas en aplicaciones de sus conocimientos matemáticos. Hacia el año 211 a.C., cuando por fin los romanos saquearon Siracusa, un soldado se acercó a Arquímedes para detenerle. Al aproximarse, Arquímedes le espetó: “No estropeéis mis círculos”. Fue su fin, pues acto seguido el soldado lo mató.

Este ilustre matemático dio a lo largo de su vida diversos ejemplos de las posibles relaciones entre la ciencia y la vida cotidiana: el empleo de la palanca para ahorrar esfuerzos al hombre, el uso de un principio físico como en el caso narrado de la corona, etcétera. Con sus iniciativas, Arquímedes se movía en una línea de encuentro conveniente de las matemáticas con la ingeniería, que no es otra que contribuir a mejorar las condiciones de vida de la humanidad, en cualquier rincón de la Tierra.

El reencuentro de las matemáticas con la ingeniería que se analiza en el presente texto se orienta hacia las cuestiones fundamentales de las matemáticas aplicadas, del análisis numérico, del cálculo

científico, de la modelización y la simulación.

La relación de la ingeniería con las matemáticas se ha manifestado muchas veces en la historia, como prueban los trabajos y la vida de grandes matemáticos como Monge, Lagrange, Poisson, Fourier o Cauchy, que fueron profesores de la *École Polytechnique* fundada en 1794, y que en sus enseñanzas e investigaciones buscaron ese encuentro y esa identificación: una vinculación entre los planteamientos matemáticos y los de la ingeniería.

¿Por qué “el reencuentro de la matemática y la ingeniería”?

Decía Jacques Ozanam en 1691 que “la matemática es la ciencia de todo aquello que se puede medir o contar”, siguiendo así una tradición de muchos siglos que data ya del siglo III a.C., cuando en los postulados de los *Elementos* de Euclides se establece este alcance en los campos de la aritmética y la geometría. Con posterioridad al momento en que Ozanam afirma lo anterior, es cuando empieza a distinguirse entre matemáticas puras y mixtas —como se decía en aquella época— entendiéndose por mixtas las que actualmente denominamos aplicadas.

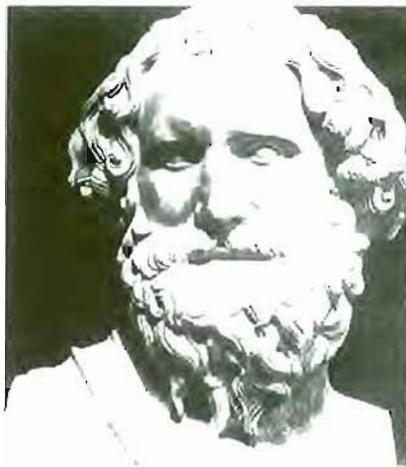
Hubo una visión diferenciada entre ambos tipos de matemáticas, hasta fechas posteriores a 1800,

\* F. Michavila es catedrático de Matemática Aplicada y director de la Cátedra UNESCO de Gestión y Política Universitaria de la UPM. R. Martínez es colaborador del Departamento de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos, y de la Cátedra UNESCO de la UPM.

pudiéndose decir que es en el siglo XIX cuando se produce el predominio de la matemática formal. Hardy afirma "los matemáticos trabajan en unas ideas científicas que no saben para qué se pueden aplicar ni les interesa conocerlo". También Boole, en 1854, decía "no es mi cometido como matemático ocuparme de las ideas de número y de cantidad". Coincide esta visión con la incorporación de la lógica al dominio de las matemáticas.

Consecuente con esa línea David Hilbert, en el 2º Congreso Internacional de Matemáticas celebrado en París en 1900, formuló 23 problemas abiertos, muy relacionados con dichos planteamientos formales de las matemáticas.

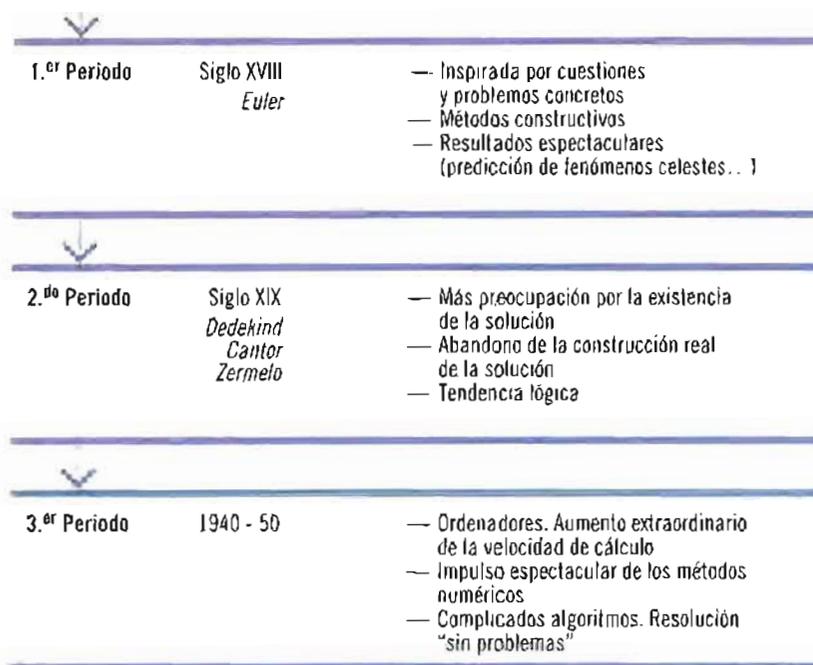
Henri Lebesgue, sucesor de Jordan en la Academia de Ciencias francesa y cuyas concepciones revolucionarias sobre la teoría de la medida y la integración han sido decisivas en el estado actual del pensamiento matemático, decía hace casi cincuenta años que "las matemáticas han sido creadas por los hombres para sus necesidades". Ciertamente, el momento actual de esta ciencia se caracteriza por su conexión íntima y fecunda con lo que podríamos denominar el arte del ingeniero en su sentido más digno y presente, con la investigación en cualquier otra ciencia y, en definitiva, en toda clase de aplicaciones. Se trata de una real simbiosis entre los métodos matemáticos y las ciencias aplicadas. Formulado un problema concreto por estas últimas, las matemáticas modelizan el fenómeno con sus correspondientes hipótesis simplificadoras si ha lugar, y obtienen unos resultados concretos que "devuelven" a la ciencia en cuestión para su interpretación. Paso a paso, a veces lentamente pero de un modo inexorable, las matemáticas han ido invadiendo campos reservados a la mecánica de medios continuos, a la astronomía, la geología, la química, la economía, la biología, etcétera.



Figuras 1 a 4. De arriba abajo, Arquímedes, D'Alembert, Euler y Babbage.

En la actualidad, el desarrollo de las matemáticas no tiene fundamentalmente su motivación en abstractos planteamientos ajenos al mundo externo o experimental, en aquello que venía a denominarse matemática pura. La aplicación de las matemáticas al estudio de los acontecimientos del mundo exterior se basa en el hecho de que estos fenómenos están regidos por leyes cuantitativas y que, por tanto, se pueden expresar con la ayuda de ecuaciones o inecuaciones que permitan un tratamiento numérico, y así obtener la solución necesaria en los diversos casos de la vida práctica. Por ello decía Darmonis, en 1954, en el Congreso Internacional de Matemáticas celebrado en Amsterdam, que "las matemáticas han sido el instrumento empleado por los hombres para promover, al mismo tiempo que el entendimiento del mundo concreto, la construcción de modelos que representen convenientemente extensas parcelas de la realidad".

Si se da una rápida ojeada a la historia de las matemáticas, se puede comprobar que hubo un periodo inicial en el cual la mayor parte del trabajo efectuado no sólo era inspirado por cuestiones y problemas concretos, sino que su finalidad era la de resolver tales casos de un modo constructivo; a este periodo corresponden espectaculares resultados tales como la predicción de fenómenos celestes. El punto culminante de dicha época viene marcado por los trabajos de Euler. Posteriormente, al crecer en generalidad los problemas abordados, los matemáticos se preocuparon más de cuestiones concernientes a la existencia de la solución que a su construcción misma. Poco a poco, se fue abandonando la tendencia de la construcción real de la solución. A partir de la segunda mitad del siglo XIX, los trabajos de Dedekind, Cantor y Zermelo dieron un extra-



► Figura 5. Historia de las matemáticas.

ordinario impulso a los planteamientos lógicos en contraposición a los constructivos, y se puede afirmar que a finales de la primera mitad del presente siglo esta tendencia dominaba de un modo absoluto.

La aparición de los ordenadores, y el consiguiente aumento en la velocidad de cálculo, originan el impulso espectacular de los métodos numéricos de estos últimos años, donde las matemáticas aplicadas se encuentran casi en todo lugar (especial mención merece el método de los elementos finitos). Ello es debido a que desde sus comienzos hasta la década 1940-50 la velocidad en los cálculos numéricos había aumentado sólo en un factor mil, aproximadamente, debido a la invención de diversos artefactos calculatorios (ábacos, sumadoras mecánicas de Pascal, regla de cálculo, sistema electromecánico de Hollerith, etcétera); por el contrario, en estos últimos cincuenta años dicha velocidad ha aumentado del orden de  $10^9$  veces con la aparición de los ordenadores. Hoy en día no presenta ninguna dificultad la resolución de los más complicados algoritmos y, por tanto, su demanda ha crecido enormemente.

## 2. Evolución de la capacidad de cálculo

En 1746, por iniciativa de Leonard Euler, la Academia de Ciencias de Berlín convocó un concurso titulado "¿Cuál es la causa general de los vientos en nuestro planeta Tierra?". Es D'Alembert quien lo gana, y en 1747 publica una memoria en la que establece las ecuaciones principales del movimiento del aire. Sin embargo, se ve obligado a introducir importantes simplificaciones en su modelo para poder resolverlo. Éstas son debidas a dos razones: la falta de datos, y la complicación de los cálculos inabordable en aquel momento con los medios que tenía a su alcance para realizarlos.

La resolución numérica de problemas complicados puede analizarse mediante una revisión, en dos etapas, de cómo ha evolucionado la capacidad de cálculo de la humanidad en los últimos cuatro siglos.

### 2.1. Evolución de la capacidad de cálculo

Desde 1623, en que Wilhem Schickard construyó su reloj de cálculo, hasta 1940 el aumento de la velocidad de cálculo se puede cifrar entre 500 y 1.000 veces.

Schickard fue quien dio el primer paso: construyó una máquina capaz de ejecutar las cuatro operaciones según un procedimiento mecánico para la adición y sustracción, y que con la ayuda de varias intervenciones de un operador efectuaba la multiplicación y la división. Sin embargo, este aparato no tuvo ninguna repercusión histórica y fue destruido por un incendio.

Poco después, en 1642, Blaise Pascal construyó una máquina, conocida como "la Pascalina", para simplificar los arduos trabajos aritméticos que le encomendaba su padre. La principal característica de la máquina era la transmisión automática de los resultados parciales, cuyo fundamento estaba basado en un dispositivo mecánico compuesto de una serie de ruedas dentadas numeradas del 0 a 9, y unidas de tal manera que la rotación completa de una de ellas hacía adelantar un paso a la siguiente. Con esta máquina, Pascal podía realizar 10 operaciones sencillas por minuto. Pascal intentaba avanzar en la liberación del hombre de todo cálculo fastidioso, y sustituirlo por otro que tuviese la fiabilidad necesaria.

En 1671, Leibniz construyó la primera máquina calculadora capaz de ejecutar todas las operaciones aritméticas elementales mediante medios exclusivamente mecánicos. No obstante hay que decir que el invento de Leibniz nunca funcionó correctamente.

Es en el siglo XVIII cuando se empieza a emplear la electricidad en el cálculo, con el fin de aumentar la velocidad. Se trata de un paso importante, pues sirve de agente motor en todas las manipulaciones que necesitan un cierto esfuerzo por parte del operador, como por ejemplo la inscripción de datos.

En el año 1833, el matemático Charles Babbage construye la primera máquina analítica. Puede considerarse como el antepasado

del ordenador; con el tiempo cabe afirmar que el sueño de Babbage se ha hecho realidad.

**2.2. Segunda etapa 1940-2000**

Es a partir de 1940 cuando la historia del cálculo científico se *dispara*: desde entonces hasta hoy, 60 años más tarde, la velocidad de cálculo ha aumentado unos 1.000 millones de veces, pues es posible disponer de instrumentos que realizan más de  $10^8$  operaciones por segundo. En estas seis décadas la capacidad de cálculo ha avanzado 5 millones de veces más rápida que durante los tres siglos precedentes<sup>1</sup>; ¡Es la aceleración de la historia!

A raíz de la II Guerra Mundial, Howard Hathaway Aiken construyó una máquina enteramente financiada por IBM, que se llamaba IBM ASCC (calculadora automática de funciones secuenciales) y que fue destinada a la Marina de los EEUU fundamentalmente, y también a las Fuerzas Armadas, de donde habían surgido las principales necesidades de cálculo. Es la primera calculadora analítica de la historia.

En 1945, John Presper y John William Mauchly concibieron la ENIAC, cuyas siglas significan Electronic Numerical Integrator and Computer, que permitía ejecutar una importante cantidad de operaciones. La ENIAC ofrecía resultados notables, realizados con una velocidad y rapidez jamás igualada hasta esos momentos.

También se debe citar a Von Neumann, puesto que fue el primero que hizo una ordenación sistemática de las diferentes etapas y bloques que debían constituir un ordenador. Von Neumann demostró de forma matemática que, grabando un programa en la memoria de una calculadora analítica concebida estructuralmente para ejecutar una amplia categoría de operacio-

nes, se obtenía una de un tipo nuevo por completo que poseía las propiedades de la máquina universal ideal de Turing. No es casualidad que se designe a los ordenadores con el nombre de máquinas de Von Neumann.

Luego comienzan a sucederse las llamadas generaciones de ordenadores, con una progresión tecnológica creciente. La primera generación empleaba válvulas de vacío, la segunda generación transistores, la tercera generación circuitos integrados. A partir de 1982 los japoneses lanzaron un modelo de ordenador llamado de quinta generación, etcétera.

Así se llega al momento actual en el que se habla de 1 billón de operaciones por segundo, en lo que se ha venido a llamar los teraordenadores.

Pero no sólo es el aumento de la velocidad de cálculo lo que tiene un peso decisivo en el reencuentro de las matemáticas y la ingeniería, hay otros dos condicionantes esenciales en ese reencuentro: el análisis y la lógica.

**3. Análisis**

En el análisis hay que citar los trabajos de Euler y D'Alembert que significaron avances importantes en la modelización mediante ecua-

ciones de fenómenos físicos o técnicos. También Newton y Leibniz aportaron resultados esenciales en la disciplina que luego se ha conocido como cálculo diferencial.

En la primera mitad del siglo XX se producen avances sustanciales en el análisis matemático para la aproximación de magnitudes físicas. Son esenciales las contribuciones de Stefan Banach, con la formulación de unos espacios sencillos y eficaces para la aproximación, o de Sobolev, que introduce y desarrolla un tipo particular de espacios de Banach fundamentales para el análisis, o de Jean Leray y Kolmogorov, que trabajan en hacer progresar los fundamentos del análisis necesarios para abordar problemas de dinámica de fluidos y de la modelización de la turbulencia.

**4. Lógica**

Al crecimiento de la velocidad de cálculo y a los nuevos resultados del análisis, hay que sumar una tercera componente fundamental: la lógica matemática. Sus espectaculares resultados deben relacionarse en gran medida con la figura de Alan Turing, que desarrolló la conocida como "máquina universal de Turing": un dispositivo matemático capaz de leer y escribir informaciones unitarias en una cinta potencialmente infinita, estableciendo las bases de la futura informática. También se relaciona con este ilustre matemático y lógico británico la definición rigurosa de algoritmo: una sucesión finita de reglas elemen-



◉ Figura 6. Blaise Pascal y su máquina de calcular.

<sup>1</sup> J.L. Lions, *La vie des sciences 1991 (De Blaise Pascal à l'Ordinateur)*.

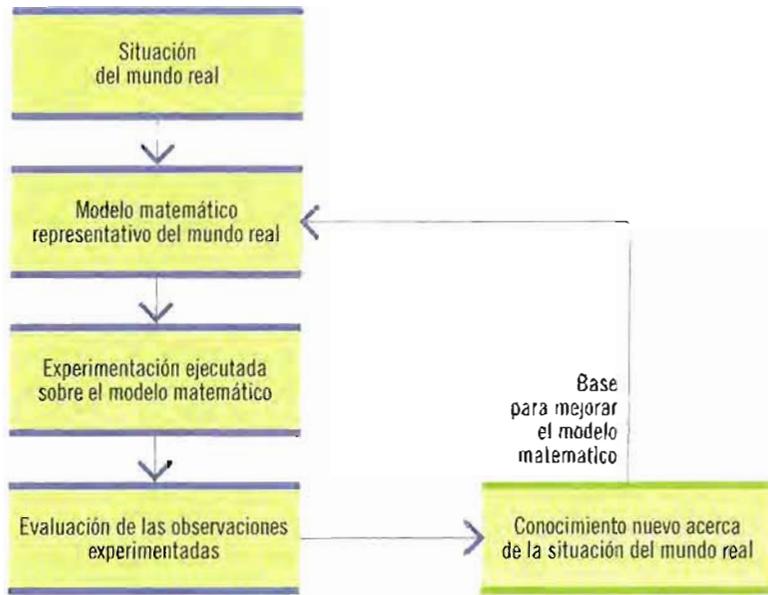


Figura 7. El modelo matemático.

tales, regidas por una prescripción precisa y uniforme<sup>2</sup>.

Con la revisión histórica de estos avances científicos y tecnológicos se puede entender mejor el significado de la simulación numérica de los problemas del mundo real. Ante un problema concreto, el mo-

delo matemático intenta representarlo; a continuación, la experimentación sobre ese modelo y la evaluación de las observaciones permiten un nuevo conocimiento para mejorar dicho modelo.

### 5. Simulación numérica

El proceso de la simulación numérica de un problema real se puede descomponer, siguiendo el esque-

<sup>2</sup> A. de Hoyos. *Historia de las Matemáticas*. Trabajo del curso 1999-2000.

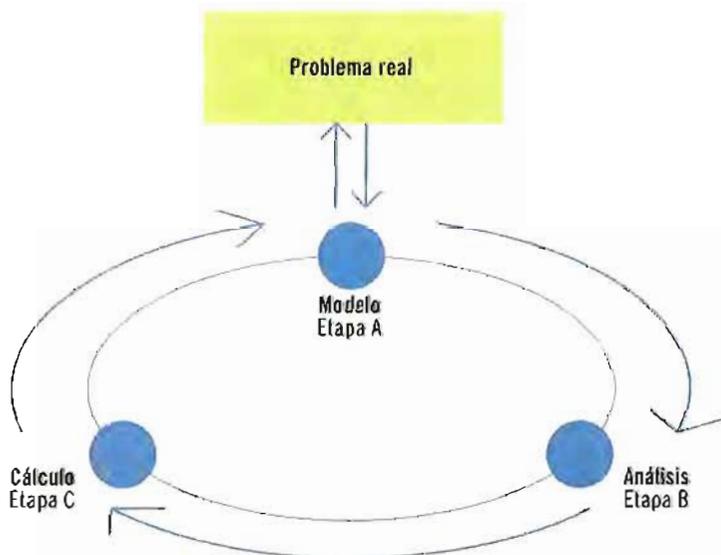


Figura 8. Etapas en un estudio de simulación.

ma que establece J.L. Lions, en tres etapas: la elaboración del modelo, el análisis del mismo y el cálculo de los resultados numéricos correspondientes.

#### 5.1. Etapa A: Modelo

La construcción o elaboración del modelo suele conducir normalmente a un sistema complejo de ecuaciones en derivadas parciales o sistemas con muchas ecuaciones diferenciales. Las cuestiones que se plantean al respecto son: ¿cómo puede establecerse ese modelo?, ¿hay datos o parámetros desconocidos en el modelo? y ¿cómo abordar ciertas cuestiones estocásticas ligadas a la modelización del problema real?

Respecto a cómo establecer el modelo, suelen ser las leyes generales de la física, la química, la economía, etcétera, las que dan los cauces adecuados para su formulación mediante ecuaciones. Ejemplos de modelos complejos se hallan en la turbulencia, las experiencias de microgravedad, la combustión, etcétera. Al definir el modelo, se debe considerar otra cuestión fundamental que lo condiciona: los propios límites de los conocimientos físicos, químicos, etcétera de la realidad. Es aquí donde las matemáticas se relacionan con otras ciencias —y no sólo en sus disciplinas más clásicas como son el álgebra, el cálculo, la estadística sino también en el análisis numérico— que le aportan principios, leyes o comportamientos.

Un segundo aspecto es la ausencia de datos conocidos sobre ciertos parámetros, condiciones o características del modelo. Así, por ejemplo, conocida la estructura general de los problemas de tipo elástico o de propagación de ondas puede ocurrir que todos los datos necesarios no se conozcan: el dominio de definición o los coeficientes de las ecuaciones. Esto ocurre en aplicaciones propias de la sísmica, la petrología o el diseño óptimo. Otra forma de plantear esta

misma dificultad surge en la definición de las características del dominio para que la solución sea la deseada: ejemplos se encuentran en la industria aeronáutica, en la automovilística, etcétera, al buscar diseños óptimos que permitan un menor consumo de combustible o unas condiciones de estabilidad.

La tercera cuestión aludida hace referencia a los métodos estocásticos utilizados en modelos determinísticos; se encuentran ejemplos en la gestión de *stocks*, la gestión hidráulica, en particular la programación dinámica que emplea, o la gestión de recursos naturales. A veces, tiene que ver con problemas ligados a la necesidad de acoplar formulaciones provenientes de ciencias diversas, tal es el caso de la meteorología y la hidráulica, de tanta importancia en la vida actual.

**5.2. Etapa B: Análisis**

Una vez establecido el modelo se precisa la utilización de todos los recursos disponibles del análisis matemático y la ayuda de los sistemas expertos, es decir la inteligencia artificial. La complejidad del modelo está originada por razones como la propia estructura geométrica, la gran variación de los coeficientes, las inestabilidades. Son precisos métodos sofisticados de análisis para estudiar los "nuevos problemas". Un primer ejemplo de éstos son los materiales compuestos, de gran importancia en la industria aeronáutica, para las nuevas estructuras, el aislamiento térmico y la insonorización.

Otro ejemplo de complejidades geométricas a analizar son las grandes estructuras tridimensionales, donde coexisten componentes con magnitudes geométricas muy diferentes: unas partes de la estructura se pueden modelizar adecuadamente en una dimensión, otras en dos dimensiones y otras requieren las tres dimensiones.

No son las geométricas las únicas complejidades que aparecen en

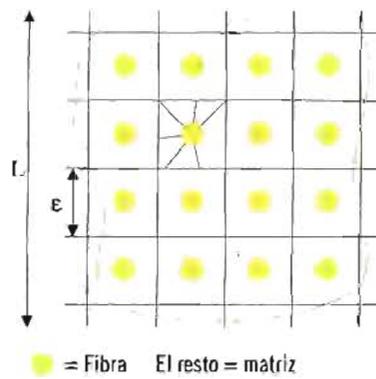


Figura 9. Materiales compuestos.

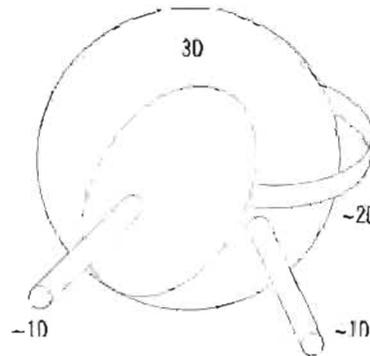


Figura 10. Grandes estructuras en el espacio.

los modelos. Otras son los fenómenos de inestabilidad de las catástrofes, o de las reacciones enzimáticas en bioquímica. Un ejemplo de fenómeno físico-técnico que requiere un análisis matemático sofisticado del modelo se encuentra en el diseño de semiconductores que precisan nuevos métodos asintóticos de aparición reciente.

Todo problema de la física matemática conduce a la resolución de una o varias ecuaciones funcionales de la forma:

$$A \cdot u = f \quad (1)$$

donde  $A$  es un operador de un espacio  $X$  en otro  $Y$ ,  $f$  está dado en  $Y$ , y  $u$  es la incógnita a definir en  $X$ ,

$$A : X \rightarrow Y \\ u \in X, f \in Y$$

Como ejemplos clásicos están las ecuaciones en derivadas parciales, las ecuaciones diferenciales or-

dinarias o las ecuaciones integrales.

En general, la solución de la expresión (1) es imposible de determinar explícitamente, o bien su forma explícita es tan complicada que la hace inútil, y en consecuencia interesa su resolución aproximada. La idea es reemplazar los espacios  $X$  y  $Y$  por espacios más sencillos  $X_h$  e  $Y_h$  y asociar a (1) la ecuación aproximada  $(1)_h$ :

$$A_h \cdot u_h = f_h \quad (1)_h$$

donde  $A_h$  aproxima a  $A$ ,  $u_h$  aproxima a  $u$  y  $f_h$  aproxima a  $f$ , de modo que:

$$A_h : X_h \rightarrow Y_h \\ u_h \in X_h, f_h \in Y_h$$

Los problemas que se plantean al sustituir (1) por  $(1)_h$  son:

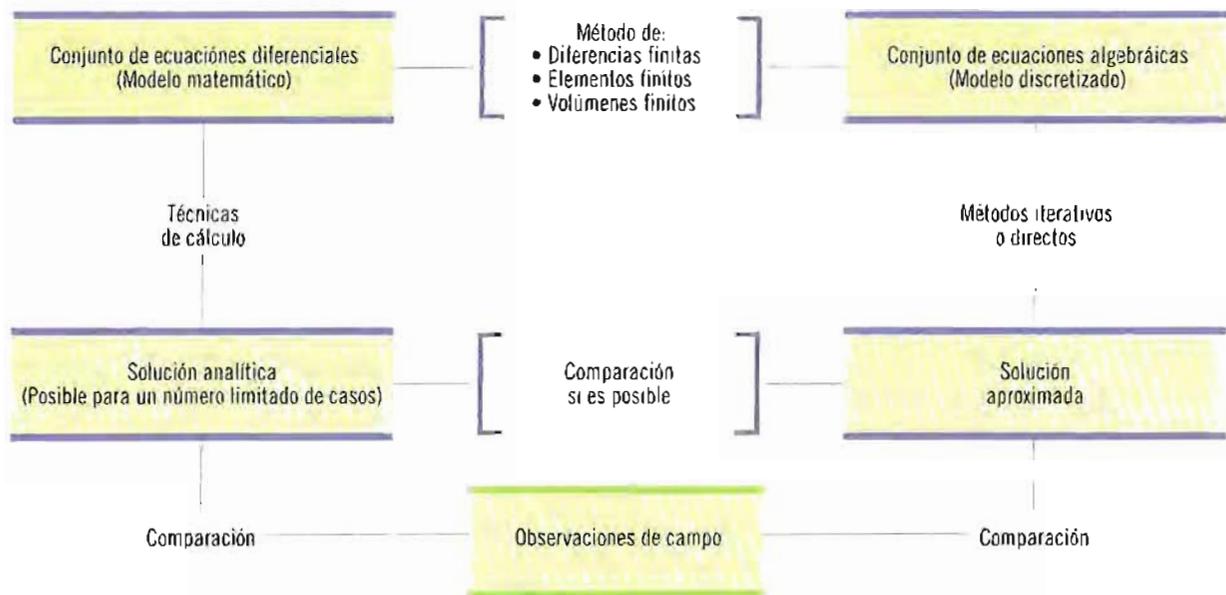
— *Estudio de la ecuación exacta:* existencia y unicidad de la solución de dicha ecuación.

— *Estudio de la ecuación aproximada:* análisis de la existencia y unicidad de la solución  $u_h$  de  $(1)_h$  y, a continuación, elaboración del algoritmo de resolución, lo cual suele conducir a la realización de cálculos auxiliares (resolución de sistemas algebraicos lineales o no lineales, integración numérica, etcétera)

— *Estudio de la estabilidad y de la convergencia:* se trata de asegurar que  $u_h$  permanece (en función de  $h$ ) acotada en un cierto sentido para la estabilidad y que los valores de  $u_h$  tienden a los de  $u$  para la convergencia.

— *Otros problemas:* es preciso realizar los cálculos necesarios para la acotación del error y, asimismo, diversos problemas prácticos de la misma importancia pero ligados a los aspectos informáticos del cálculo: tiempo de máquina, cantidad de memoria necesaria, etcétera.

Entre los métodos que utilizan los matemáticos ingenieros preocupados por la modelización de los problemas reales, se deben men-



► Figura 11. Simulación numérica.

cionar las diferencias finitas, los elementos finitos, los volúmenes finitos. También existen otros métodos muy útiles en casos concretos, como son el método de Montecarlo, la descomposición de dominios, la paralelización, etcétera.

En definitiva, se pretende sustituir un conjunto de ecuaciones diferenciales, que es el modelo matemático, por un conjunto de ecuaciones algebraicas, que es el modelo discretizado, mediante el empleo, en general, de un método de diferencias finitas, un método de elementos finitos o de volúmenes finitos. Hay que hacer notar que sólo es posible encontrar una solución analítica del conjunto de ecuaciones diferenciales que constituyen el modelo matemático, mediante técnicas de cálculo, en un número limitado de casos. Por el contrario, los métodos de resolución de grandes sistemas de ecuaciones algebraicas, iterativos o directos, permiten hallar la solución aproximada del conjunto de ecuaciones algebraicas que constituye el modelo discretizado.

Es muy interesante comparar la solución analítica y la solución aproximada si es posible; se puede

utilizar a veces la propia experimentación, en lo que se denomina observación empírica.

### 5.3. Etapa C: Cálculo

La tercera etapa hace referencia al cálculo, y precisa el tratamiento informático, que plantea una serie de cuestiones relacionadas con el lugar de trabajo, la red a través de la cual se puede acceder para realizar dichos cálculos, el acceso a códigos sofisticados y la disponibilidad de superordenadores.

La resolución numérica de los modelos de problemas complejos tiene elevadas necesidades de cálculo, como por ejemplo los fenómenos representados por las ecuaciones de Navier Stokes en tres dimensiones. Los modelos físicos sofisticados necesitan un elevado número de operaciones, varias horas de cálculo en ordenador; los cálculos pueden durar incluso días en problemas de oceanografía o de inteligencia artificial.

No hay campo de la ciencia y de la técnica donde no llegue la simulación numérica y los métodos numéricos de aproximación de las soluciones. Ejemplos del *atrevimiento científico*, impensable hace unos

años, son la simulación con ordenador de la cirugía del ojo, o la arqueología<sup>3</sup>, donde los satélites para la observación de la tierra (SPOT) han permitido observar la Muralla China y conocer donde estaban originariamente las viviendas y los campamentos que han quedado sumergidos en la arena.

En una obra publicada hace dos años titulada *Mathematical Problems for the Next Century*<sup>4</sup>, Steve Smale planteaba un conjunto de 18 problemas, teóricos o aplicados, que las matemáticas deben abordar en el nuevo siglo. Entre ellos hemos extraído tres significativos que pueden relacionarse de forma sencilla con todo lo que se ha venido exponiendo hasta aquí.

Un primer problema es el relativo a las ecuaciones de Navier-Stokes, ya aludidas anteriormente, donde la cuestión a plantear sería: ¿tienen las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones solución única para todo valor del tiem-

<sup>3</sup>J.L.Lions. *La vie des sciences 1993 (Le temps du contrôle)*.

<sup>4</sup>Steve Smale, Department of Mathematics, City University of Hong Kong. *Mathematical Intelligence*, Vol 20 (1998).

po? Es quizás el problema más importante de las ecuaciones en derivadas parciales, cuya solución es fundamental para los problemas de turbulencia.

Un segundo problema es la introducción de *modelos dinámicos en teoría económica*, con cuestiones abiertas como: ¿se puede extender el modelo de la teoría general de equilibrio para incluir la evolución de los precios? Con varios mercados la situación es muy compleja, siendo uno de los asuntos principales de la teoría económica.

Y finalmente, un tercer problema que haría referencia a *los límites de la inteligencia*, o dicho de otra forma: ¿cuáles son los límites de la inteligencia, artificial y humana? Las coincidencias y diferencias entre la inteligencia artificial y humana ocupan a muchos investigadores en la actualidad. Las teorías relacionadas con el aprendizaje, su conexión con las teorías de juegos, tienen un interés extremo en estos momentos.

O sea que los intereses compartidos de la matemática y la ingeniería no parece que vayan a decaer. ¡Bien al contrario!

## 6. Conclusiones

El reencuentro de las matemáticas con la ingeniería constituye uno de los progresos más importantes de

los tiempos modernos de la historia de la humanidad. Puede decirse que hoy en día ante cualquier problema real (industrial, técnico o científico) el ingeniero-matemático o el matemático-ingeniero dispone de datos, dispone de medios de acceso y dispone de métodos de tratamiento, que eran las cuestiones que preocupaban a D'Alembert cuando formuló las ecuaciones que presentó al concurso de la Academia de Berlín.

La electrónica y la informática juegan un papel esencial para disponer de todos estos medios y datos. Con el tiempo se necesitará más potencia de cálculo, los modelos que aproximarán más la realidad serán no lineales y las decisiones deberán ser adoptadas en tiempo real. Jacques-Louis Lions<sup>5</sup> afirma con clarividencia que la matemática vive actualmente la "era del control".

Para responder a estos desafíos son necesarios los esfuerzos coordinados de científicos y técnicos en el tratamiento de datos —un tratamiento local tan inteligente como sea posible—, para el desarrollo de programas y de *software* cada vez más complejos, para el avance del análisis matemático, del análisis

<sup>5</sup>J.L.Lions. *La vie des sciences 1993 (Le temps du contrôle)*.

numérico, de la modelización y del cálculo científico.

Es necesaria la formación de jóvenes ingenieros e investigadores en estos campos.

En este momento, si hiciésemos un cálculo muy elemental llegaríamos a la conclusión de que se están efectuando en todo el planeta del orden de 1.000 billones de operaciones por segundo, lo cual equivale que por cada habitante se realiza más de 100.000 operaciones por segundo. Es sorprendente, fantástico, y parece haber sobrepasado cualquier límite de la ciencia-ficción. Sin embargo, si miramos hacia el futuro, es previsible que en el año 2010 todos estos cálculos puedan ser realizados con un único extraordinario superordenador, propio de las obras de Julio Verne.

Para que estos progresos decisivos para la humanidad sean viables es necesario que continúe el ritmo acelerado de la investigación en el análisis matemático y el análisis numérico, de sus aplicaciones en la ingeniería y también en la cultura. Todos ellos son factores fundamentales, componentes esenciales, de este esplendor científico que vivimos y que hemos intentado simbolizar con la frase "el reencuentro de la ingeniería y las matemáticas". ☞

# El impacto de Internet en la sociedad\*\*

El artículo repasa el papel de las nuevas tecnologías en diversos campos: desde el académico al científico, pasando por el resto de actividades sociales. Concluye

destacando su inmenso potencial en un futuro inmediato, ya que modificará pautas de comportamiento, el mundo de la información y el del comercio.

Internet es un fenómeno reciente del que es difícil sacar consecuencias seguras. A pesar de que forma ya parte de la vida cotidiana, en realidad es muy joven y lo que conocemos hoy por Internet es todavía una herramienta muy rudimentaria en comparación con lo que con toda seguridad se convertirá dentro de pocos años.

Hoy utiliza las redes telefónicas, que son redes pensadas para otro fin aunque aprovechadas por este medio de comunicación, pero todavía con una escasa capacidad para transmitir información.

En cierto modo, a pesar de que sus prestaciones puedan impresionarnos bastante, hoy estamos al mismo nivel que cuando el teléfono sufría ruidos e interferencias. En ese sentido me gustaría, en primer lugar, enfatizar que Internet va a afectar a todos los ámbitos de la vida humana, a la información, a la educación, al entretenimiento, a las relaciones privadas entre personas,

aunque se encuentra todavía en un estadio muy precoz.

Algunos autores, como Umberto Eco, han comparado la invención de Internet con la de la imprenta y piensan que el impacto que puede tener sobre la vida social será similar. Hay quien ha afirmado, incluso, que la invención de Internet sólo puede compararse con la del fuego. Eso me parece una exageración, pero es verdad que la aparición de Internet sigue pautas que se parecen a algunas grandes invenciones próximas en el tiempo, como la aparición de la electricidad como forma de transmisión de energía y el descubrimiento de la estructura del ADN, que después dio lugar a la ingeniería genética.

Hace unos 150 años, Faraday hacía experimentos con imanes. Quería averiguar cuál era la relación entre electricidad y magnetismo. Descubrió, junto a otros investigadores, que la electricidad y el magnetismo eran manifestaciones de la misma fuerza, de la misma dinámica, y que, por lo tanto, podía transformar energía eléctrica en energía magnética y cualquiera de las dos en energía mecánica. Esto

dio lugar a la aparición de los motores eléctricos y de las dinamos, y a que posteriormente se generalizase la electricidad como forma de transporte. Durante mucho tiempo pasó desapercibido y recibió duras críticas de quienes en su época pensaban que era ridículo y absurdo financiar los juegos a que conducía su curiosidad por los imanes y los circuitos eléctricos. Hoy el mundo sin electricidad es impensable, con sus ventajas y sus inconvenientes.

El ADN tiene una historia similar. Sus orígenes tampoco dejaban vislumbrar las aplicaciones a que iba a dar lugar. Actualmente se ha convertido en el instrumento básico en una serie de áreas como agricultura, nutrición y sanidad, en las cuales se producirán cambios radicales en el próximo milenio.

La historia de Internet tiene unos orígenes oscuros que se remontan a los años sesenta. En principio trataba esencialmente de inventar un sistema de comunicación entre ordenadores primitivos del Departamento de Defensa de EEUU y de unas pocas Universidades. La idea era aprovechar las líneas telefónicas de un modo distin-

\* Catedrático de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.

\*\* El presente artículo es transcripción de la conferencia ofrecida por el autor en el CSN, el 26 de mayo de 2000.



► Figura 1. Cayetano López, durante su conferencia en el CSN.

to a como se venía haciendo. Así nació la transmisión por paquetes de información: sustituyendo a la conmutación de líneas, que era un método bastante ineficaz.

Durante décadas fue un fenómeno que afectó únicamente al mundo académico. Por ejemplo, en 1983 se conectó a una de las redes académicas que existía entonces en Europa, la European Academy Research Network (EARN), conectada, a su vez, con otra red académica de EEUU, que se llamaba Bitnet. En aquel año, todas esas redes adoptaron un protocolo de comunicaciones universal: el TCP/IP, que es el protocolo de Internet. Este tipo de conexiones se mantuvo en el ámbito académico y sólo lo conocían los científicos y los ingenieros que transmitían información utilizando las redes telefónicas.

En 1989, en el CERN, se inventó el lenguaje *html*, que sirve para marcar las direcciones donde hay páginas de Internet y el protocolo de transmisiones *http*. Así nació lo que hoy llamamos *la web* o *el web*.

En 1993 se inventó el primer *browser* o navegador, que tenía un aspecto amigable y era accesible al público en general; se llamaba *Mo-*

*saic*. Este fue el momento en el que este fenómeno, que había tenido un largo periodo de latencia, saltó al público. Han transcurrido siete años desde el despegue de Internet y, sin embargo, la velocidad a que se ha diseminado y el impacto que está teniendo son muy superiores a los de otros medios que tienen que ver con la comunicación. En cuatro años y medio, Internet llegó a 50 millones de usuarios. Llegar a 50 millones de usuarios le costó a la radio 38 años, y a la televisión 13 años.

Las cifras más recientes<sup>1</sup> indican que en el mundo hay aproximadamente unos 360 millones de personas que tienen acceso a Internet de los que el 40% está en EEUU, es decir, que casi la mitad de la población de EEUU puede conectarse a Internet. En Europa hay unos 95 millones de personas que tienen acceso a Internet, y en España cuatro o cinco millones.

¿Cuáles son los motivos de la expansión tan rápida de Internet?

En primer lugar, la generalización y el abaratamiento de los precios. La invención del ordenador

personal (PC) fue fundamental. El descenso del precio de los ordenadores, de la memoria y del disco duro, también fue fundamental. En 1988, un megabyte de capacidad de disco duro costaba más de 11 dólares y hoy esa capacidad cuesta dos centavos de dólar —en aproximadamente 12 años se ha reducido en un factor de más de 500—. La extensión del uso de los ordenadores en los hogares y empresas ha sido una condición necesaria. Ahora es Internet quien contribuye a difundir los ordenadores en los hogares. En muchos hogares hay PC justamente para tener Internet y estar conectado.

El segundo factor de su expansión es un factor generacional. Las generaciones más jóvenes tienen una relación con el ordenador y con las comunicaciones que no tiene nada que ver con las anteriores, en las que esa relación era penosa, áspera y distante.

Y, por último, nos encontramos con el fenómeno de la interactividad. Internet no solamente permite adquirir información, sino también emitir información, al amigo de al lado y a multitud de personas desconocidas, en principio, pero que se pueden llegar a conocer.

Además del mundo académico, donde sigue siendo fundamental, Internet es hoy imprescindible para el desarrollo de los grandes experimentos científicos —que son internacionales—, en los que participan equipos muy amplios. Las comunicaciones a través de Internet son tan fundamentales que se está diseñando incluso una especie de Internet de banda ancha reservado, en parte, a la comunidad científica y académica.

Dejando a un lado el ámbito académico, el primer lugar de la actividad social en el que Internet irrumpió con mucha fuerza fue en el campo de la información, ya sea de la información general, económica, para el entretenimiento o para la vida profesional. Los medios

<sup>1</sup> En septiembre de 2000.

de comunicación se dieron cuenta de las posibilidades que ofrecía Internet para proporcionar más información de la que contiene un periódico, para presentarla de manera distinta e inmediata, enriqueciéndola, además, con elementos multimedia —sonidos e imágenes—.

Hubo un momento crucial que sirvió para demostrar la potencia de Internet en los medios de comunicación. En septiembre de 1998 la Cámara de Representantes de EEUU decidió hacer público el *Informe Star* sobre las relaciones entre Bill Clinton y Monica Lewinski. Se trataba de un informe de 500 páginas, muy complicado y muy atrevido desde el punto de vista de las costumbres americanas. Aquel día de septiembre de 1998 se publicó íntegramente en la red, de forma que todo el mundo, decenas de millones de personas, tuvieron acceso a esa información al mismo tiempo que los periódicos, no después de que los periodistas filtraran o editorializaran esa información. Los periódicos nunca la habrían ofrecido íntegra. Habrían publicado extractos, la habrían elaborado. Sin embargo, se vieron obligados a entregarla en bruto.

Internet está modificando el modo de hacer y de entender el periodismo. Esto no significa que los periódicos vayan a desaparecer, pero tienen que evolucionar y esa evolución está empezando a percibirse especialmente en EEUU, donde el periodismo digital tiene ya características especiales, como el avance de la noticia. Lo que puede ocurrir con los medios de comunicación convencionales y con los periódicos es algo parecido a lo que ya sucedió con la aparición de la radio. La primera emisión de radio convencional tuvo lugar en EEUU con motivo de las elecciones presidenciales de 1920, que escucharon pocos cientos de personas. Las emisoras de radio estaban financiadas, entonces, por los fabricantes de aparatos de ra-

dio porque el negocio estaba en la fabricación de esos aparatos. Lo mismo empezó a ocurrir con los fabricantes de ordenadores. Hoy, los ordenadores son una parte secundaria y se pueden obtener gratis con la condición de suscribirse a un determinado servicio de Internet.

En 1927, la revista *Editor & Publisher* publicó un editorial pronosticando que los periódicos desaparecerían en un plazo muy breve, porque... ¿quién iba a comprar un periódico si ya podía escuchar gratis las noticias en la radio?



Los periódicos no han desaparecido, pero sí tuvieron que evolucionar y modificar la carga de opinión editorial y la presentación de esa información. La televisión y la radio también se verán influenciadas en gran medida por la irrupción de Internet.

Otra ventaja de la información en Internet es que ya no es monopolio de unas pocas grandes cabezas. Poner en marcha un periódico es una empresa complicada y muy cara. Más aún poner en marcha una emisora de televisión. Sin embargo, lanzar una página de información en Internet es algo bastante sencillo y de hecho ahora emite información una pléyade enorme de medios, algunos nacidos para Internet y otros procedentes de los medios tradicionales. No es posible discriminar lo correcto de lo incorrecto, lo fiable de lo no fiable. Parecen tener la misma importancia personas o empresas cu-

yo grado de fiabilidad es nulo, que otras que se sabe que contrastan sus fuentes. Es un fenómeno típico de la infancia de un medio, aunque se está empezando a discriminar y ya se sabe que hay lugares en la red donde la información es fiable y otros lugares donde no lo es. La idea de que es imposible la discriminación en Internet está relacionada con el hecho de que es un medio muy reciente.

La segunda parcela donde Internet está teniendo un impacto importante es en el comercio. Comprar o vender algo en la red requiere una actitud más activa que la simple búsqueda de información. El comercio ha entrado a gran velocidad y es impresionante el crecimiento de las operaciones y transacciones que se hacen a través de Internet. En toda operación de compraventa, la información sobre quién compra, sobre el medio de pago y sobre dónde hay que llevar el producto se puede obtener sin tocar el producto físico ni ver al vendedor.

Todas las personas que han comprado algo en Internet se dan cuenta de hasta qué punto la cantidad de información que pueden manejar antes de comprar un producto es muy superior a la que pueden manejar visitando un comercio tradicional. Pero hay que entregar el producto y eso es algo que puede estar fuera de Internet. Existen productos que son pura información, como el *software*, la música, los juegos, etcétera, que se traducen en bits y no requieren ninguna transacción física; éstos son los sectores donde es más fácil comprar. Los que requieren un intercambio físico han producido un efecto curioso y es el renacimiento de una parcela de la vieja economía: la entrega, la logística y el almacenamiento. Comprar en Internet ha demostrado ser tan rápido y tan seguro como fuera de la red, a pesar de que países como el nuestro no tienen mucha tradición de venta por catálogo.

De los 360 millones de usuarios que hay ahora en Internet, más de la mitad ha obtenido información con valor comercial de la red, es decir, han visto precios de productos, catálogos o dónde podían comprar. De esta cifra inicial, el 40% ya ha hecho alguna compra en la red. En España el porcentaje —sobre los que tienen acceso a la red— es del orden del 30%. En estas transacciones se incluyen los libros, juegos, música, etcétera, que es lo que se conoce como ventas a consumidores individuales.

Otro sector, más oculto, lo constituyen las transacciones entre empresas. Suponen del orden de las tres cuartas partes del total de todas las transacciones y pasan desapercibidas porque no se realizan entre empresa y consumidor. Por ejemplo, una empresa de construcción que necesita que le suministren ladrillos, cables o sensores, encuentra en Internet un

modo mejor de conocer quiénes le ofrecen las mejores condiciones en precio, tiempo y calidad, que consultando catálogos en papel que no se pueden actualizar y que pertenecen a un menor espectro de proveedores.

El comercio electrónico supone hoy entre un 1% y un 2% de todo el comercio al por menor. Este 1% o 2% supone una cantidad pequeña en términos relativos, pero gigantesca en términos absolutos y con la particularidad de crecer con un ritmo del 100% al año, mientras que el comercio general mundial crece a un ritmo del 7% al 8%. Parece asombroso que un invento tan oscuro y especial como Internet tenga esos efectos económicos.

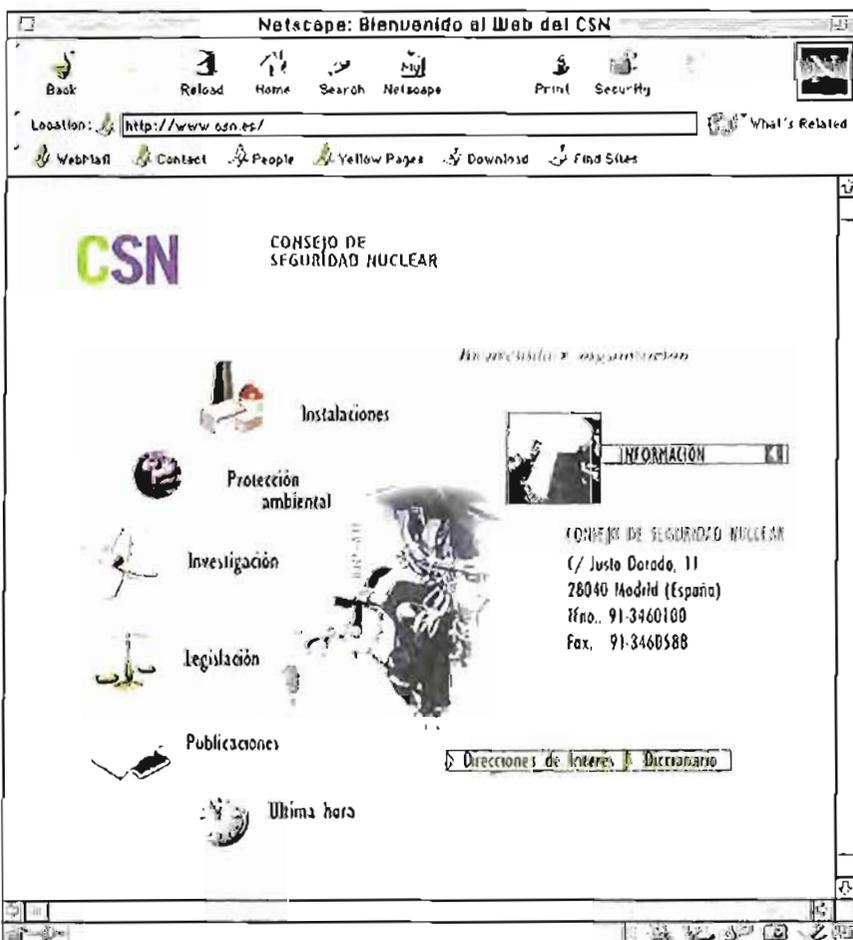
Han surgido dudas sobre la seguridad de las operaciones en Internet y, sin embargo, el riesgo no es mayor que el de pagar con una tarjeta de crédito. Lo que sucede en los ordenadores es bastante opaco

y alejado de lo que conocen y pueden dominar los consumidores. Les da más miedo operar con su tarjeta de crédito, que entregársela a un camarero, aunque la posibilidad de filtración de los datos sea la misma en un caso que en otro. Es una cuestión de mentalidad. Las redes son bastante vulnerables, pero también bastante seguras por lo enorme y lo dispersas que son.

Según algunas encuestas, el 90% de las personas que han realizado alguna compra en Internet se declara extremadamente satisfecho y volverá a repetir.

Otro campo que requiere un grado mayor de sofisticación en su acercamiento a la red, y en el que por lo tanto el impacto de Internet será más lento, es el de la educación. La implantación de ordenadores en las escuelas hoy por hoy supone una modificación muy superficial de la enseñanza reglada. Pero, sin duda, donde puede tener un impacto importante es en la formación no curricular. Fuera de las escuelas o incluso de las universidades, esa actividad que crece enormemente y que se denomina educación informal, tiene lugar a lo largo de toda la vida. La red está provocando un crecimiento de los cursos a distancia y permite hacer abstracción de factores tan importantes como el dónde o el cuándo. Se puede aprender sin necesidad de tener a un profesor en un momento determinado y en un lugar determinado, y además permite combinarlo con otras actividades humanas. El momento de la educación no está completamente separado del momento de la información, de la compra o del entretenimiento. Los jóvenes, por ejemplo, están acostumbrados a trabajar constantemente con esta herramienta, y para ellos esos momentos se confunden.

Aunque Internet tenga un gran impacto, no creo que altere la esencia de la escuela, o como dicen algunos gurús, que desaparezca y con ella los profesores. Este pronóstico demuestra una compren-



► Figura 2. Página web del Consejo de Seguridad Nuclear.

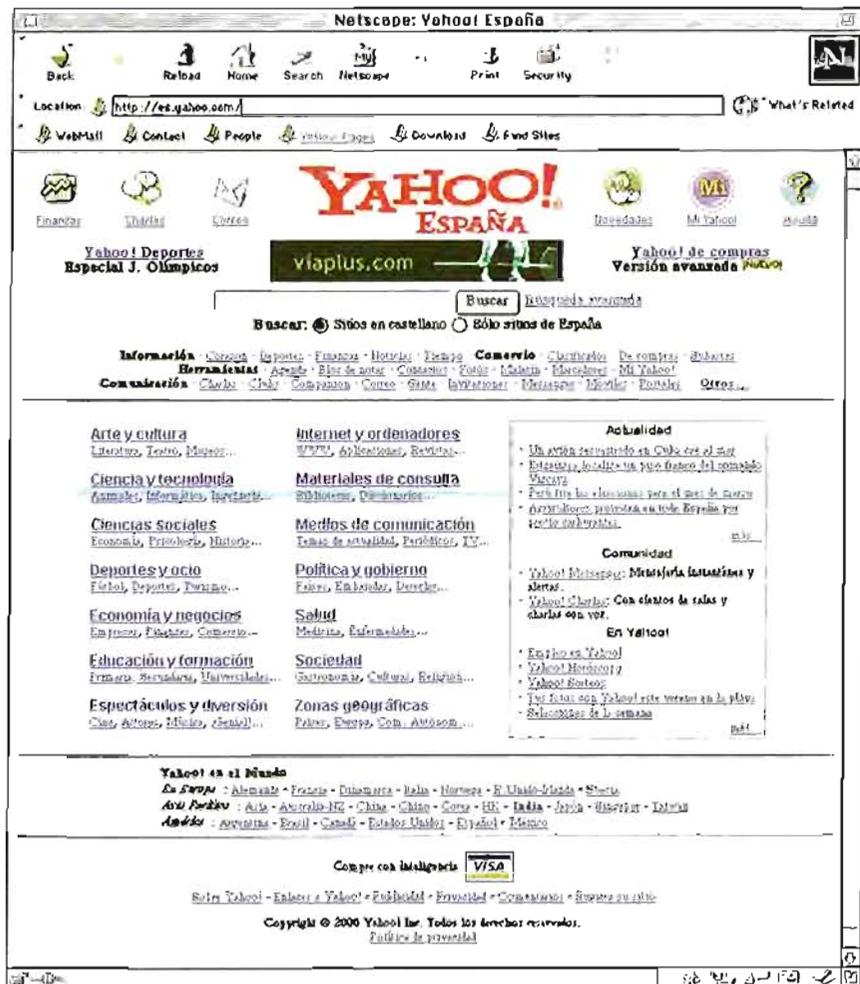


Figura 3. Página de Yahoo en Internet.

sión muy superficial de lo que es el trabajo en la escuela y de lo que es la educación, sobre todo en la fase infantil y juvenil). Además, la educación no es sólo transmitir conocimiento, sino integrar al individuo dentro de la sociedad.

Tampoco la red contribuye a aumentar la desigualdad entre pobres y ricos. Esta desigualdad es anterior a la aparición de Internet y, aunque es verdad que todo desarrollo que afecte a una parte de la sociedad aumenta las diferencias con respecto a la parte que no participa en él, esto no ocurre sólo con Internet. La desigualdad en la cultura también es patente si lo medimos como acceso a la lectura de libros o manuales. Si en un país se produce un desarrollo importante en la educación o se consigue que su población lea más libros, no nos parecerá mal, y, sin embargo, estamos aumentando la

desigualdad con países que no tienen acceso a los libros y a la educación. Internet es una herramienta importante en el mundo del comercio, de la educación, de la información, que subraya e indica que existe ese problema de desigualdad básica, aunque en algunos casos puede contribuir a paliarla. Profesores que han viajado a África cuentan que allí no esperan tener una biblioteca comparable a la de una universidad europea; sin embargo, es posible que lleguen a tener un ordenador y una línea telefónica que les comunique con una biblioteca o con un centro de información, y así poder disponer de esos artículos que no podrían obtener por no estar suscritos a las revistas especializadas (que son caras). En ese sentido, la facilidad de acceso y el bajo coste de Internet pueden facilitar el acercamiento al conocimiento.

¿Qué está ocurriendo en las grandes empresas de Internet? ¿Dónde radica el interés de las personas que están arriesgando miles de millones en este tema y cuál es la pugna de estas grandes empresas? Se supone que Internet es o será algo omnipresente en el futuro. Las personas que utilizan la red para efectuar una transacción tienen tendencia a volver a utilizarla por su comodidad, facilidad y bajo coste, y como además es necesario facilitar sus datos personales, la tendencia es volver a comprar en el mismo lugar para no tener que dar los datos personales nuevamente, además de la incomodidad que supondría cambiar de correo electrónico.

Quienes invierten en Internet han pensado que lo fundamental era captar usuarios que registraran sus datos personales o su correo electrónico. De ahí que se haya producido esa especie de locura por ofrecer acceso gratuito. Pero el acceso a la red es caro. Cuando una persona accede a Internet y carga la página de un buscador, por ejemplo de *Yahoo*, en esa fracción de segundo confluyen una serie de procesos muy complejos: se produce una transmisión de información desde su teléfono local a un punto de su ciudad, desde ese punto a una red nacional, de esa red nacional a un tronco de salida de Internet, ese tronco de Internet —normalmente— atraviesa el Atlántico hasta EEUU que distribuye la señal hasta encontrar el servidor de *Yahoo* que es el que busca. Entonces *Yahoo* responde y recorre a la inversa el camino anterior. Hay que pagar la infraestructura y habitualmente paga el proveedor de acceso, excepto la llamada local (desde el teléfono hasta el nodo local), que paga el usuario a Telefónica.

¿Por qué se ha producido este interés por ofrecer el acceso gratuito? Probablemente porque se supone que en el futuro será importante disponer de una base de datos de

usuarios que sean relativamente fieles, que busquen información, compren y se comuniquen con otros a través de ese medio. Por este motivo se invierte tanto dinero, con el fin de facilitarles y regalarles un servicio que es costoso. Pero como se está viendo ahora, esta dinámica no se puede mantener mucho tiempo.

Es posible que el límite, por lo menos para muchos inversores, esté próximo y de ahí que se estén produciendo catástrofes como la retirada de recursos de muchas empresas cuando lo que se busca son los ingresos como promesa de futuro. Existe la opinión generalizada de que a largo plazo, salvo en nichos de actividad muy específica, de información a profesionales, de juegos, o de transacciones, el acceso a los servicios de Internet va a estar en manos de unas pocas grandes empresas. De ahí esa fiebre de fusiones y compras, que hace que al final, a pesar de que cualquiera puede ser emisor de contenidos y tener su página en Internet, habrá un proceso de concentración donde

unos pocos serán capaces de ofrecer todos los servicios a los usuarios. Y así como al principio lo más importante era la posibilidad de conectarse con otros, de crear comunidades virtuales, hoy poco a poco empieza a verse claro que quien va a dominar este mundo, quien va a atraer a más gente será quien ofrezca los mejores contenidos, no la mejor conectividad ni la mejor tecnología, éstas se dan por supuestas. Esto explica algunas de las fusiones u operaciones comerciales más espectaculares que se están produciendo.

Otro ámbito donde hoy hay un gran movimiento es el de la llamada banda ancha. Internet, por ahora, se basa en un sistema de comunicaciones que se está aprovechando de la red telefónica que es un canal bastante estrecho. La potencialidad de este medio de comunicación se multiplicará cuando esté disponible la banda ancha y se puedan transmitir rápidamente archivos que ahora son muy lentos, vídeo, audio de calidad, etcétera. Éste es el próximo

capítulo de Internet. Hoy ya hay una pugna por ocupar la banda ancha, los sistemas DSL y la televisión por cable, que a la larga puede ser un canal para transmitir contenidos de Internet. Las compañías de telecomunicaciones están buscando la manera de dominar el futuro de la banda ancha, por un lado, y, por otro, los terminales de Internet, que ahora son los ordenadores y que, a la larga, serán otros muchos.

La cuestión es que una invención de orígenes oscuros, con una previsible repercusión muy pequeña, se está convirtiendo en una herramienta imprescindible para muchos seres humanos. 360 millones son ya muchos, y el ritmo de crecimiento en el próximo futuro hace pensar que va a afectar absolutamente a todo. No creo que modifique nuestra visión del mundo nuestros puntos de vista o nuestros modelos de sociedad, pero va a modificar gran cantidad de pautas de comportamiento, el mundo de la información y el del comercio. ☺

# Noticias

- Consejo de Seguridad Nuclear ..... 40
- Información general ..... 43

- Centrales nucleares ..... 44
- Publicaciones ..... 47

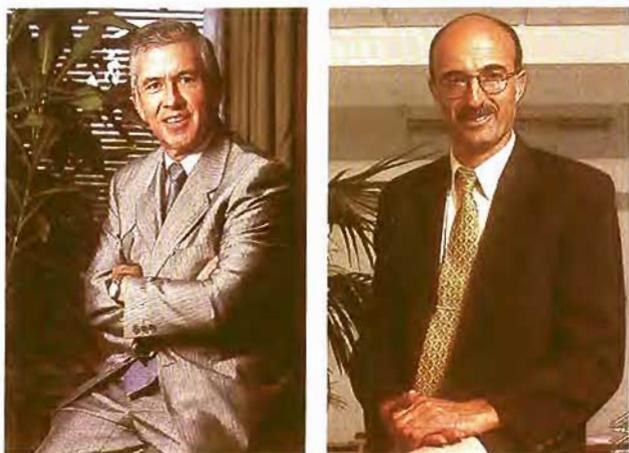
## ● CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

### Nuevos directores técnicos del CSN

El día 20 de julio, el BOE publicó los nombramientos de Antonio Gea como director técnico de Seguridad Nuclear y de Ignacio Lequerica como director técnico de Protección Radiológica. Estos nombramientos se enmarcan dentro de la nueva la estructura organizativa del CSN aprobada recientemente.

Antonio Gea es ingeniero industrial y diplomado en ingeniería nuclear. Tras varios años de trabajo en la Junta de Energía Nuclear llegó al CSN en 1982, desempeñando diversos puestos. En 1993 fue nombrado director técnico del CSN, cargo que ha ocupado hasta la aprobación de la nueva estructura del organismo, que contempla el desdoblamiento de la Dirección Técnica. Es miembro de la Sociedad Nuclear Española y del Comité de Regulación Nuclear de la OCDE.

José Ignacio Lequerica, es ingeniero aeronáutico y diplomado en ciencias económicas. Participó en la puesta en marcha de las dos unidades de la central nuclear de Almaraz y fue asesor del Ministerio de Defensa durante los años 1988-1989. Lequerica ingresó en el CSN en el año 1983 y ha sido, desde 1993, subdirector de Centrales Nucleares. Es miembro del Comité Asesor de Normas de Seguridad Nuclear del Organismo Internacional de la Energía Atómica.



Antonio Gea e Ignacio Lequerica.

### Participación del CSN en la evaluación del concepto sueco de AGP

Un representante del CSN ha participado en el grupo de expertos seleccionado por la Agencia de Energía Nuclear (NEA-OCDE) para evaluar el informe de resultados del estudio de seguridad SR 97 realizado por SKB, la agencia sueca para la gestión de los residuos radiactivos, sobre el concepto sueco de almacenamiento geológico profundo (AGP) de combustible irradiado. El informe del grupo de expertos fue publicado por la NEA el pasado mes de julio.

El programa sueco para el AGP se ha venido desarrollando desde hace más de 25 años siguiendo un proceso de toma de decisiones por etapas. El concepto KBS-3 para el AGP de combustible irradiado, en cápsulas de cobre y pozos verticales, fue aprobado por el gobierno sueco en 1984, con el requerimiento de realizar una evaluación actualizada de la seguridad del mismo. Esta evaluación se denomina SR 97 y se aplica a las condiciones de tres emplazamientos representativos. A finales de 1999, los organismos reguladores suecos, SKI y SSI, solicitaron a la NEA que, en paralelo a su propia evaluación, desarrollara otra realizada por un grupo internacional de expertos, que se ha desarrollado entre diciembre de 1999 y mayo de 2000. El informe final, disponible en la página *web* de la NEA ([www.nea.fr](http://www.nea.fr)), reconoce la solidez del trabajo realizado por SKB y recoge una serie de recomendaciones encaminadas a incrementar la transparencia de la metodología de análisis y de su aplicación.

### Segundas jornadas sobre calidad interna del CSN

El pasado 7 de julio se celebró en el CSN, por segundo año consecutivo, la Jornada de la Calidad en la que se repasó el plan de calidad interna aprobado por el organismo regulador en 1996. En ella se presentaron las conclusiones de los cinco grupos de mejora que finalizaron su trabajo en junio de 2000: orientación al cliente, comunicación, orientación a los procesos, planificación de inspecciones y organización matricial. Estos grupos hicieron una serie de propuestas de futuro que están siendo analizadas por el comité de calidad. También se dio a conocer la composición de los nuevos grupos de mejora, que trabajarán en las áreas de proceso de evaluación de instalaciones nucleares, actuaciones en emergencia, protección del

medio ambiente, planificación de actividades y contratación (2ª fase).

La jornada fue inaugurada por el presidente del CSN, Juan Manuel Kindelán, y clausurada por el vicepresidente del organismo, Aníbal Martín, interviniendo también, además de los grupos de mejora, Luis del Val, secretario general, y Antonio Gea, director técnico.

### Conferencias en el CSN



Ignaci Carrió (izquierda) junto a Juan Manuel Kindelán.

El pasado 29 de junio, Ignaci Carrió, catedrático de Radiología y Medicina Nuclear de la Universidad Autónoma de Barcelona ofreció una conferencia en el CSN con el título *Futuro de la radiología y de la medicina nuclear*. Durante su exposición, el ponente resaltó la contribución de la radiología al diagnóstico médico y al progreso en ciencias de la salud, especialmente por el desarrollo de las técnicas tomográficas y de las intervencionistas, así como de la resonancia magnética, y más recientemente de la PET (tomografía por emisión de positrones), a la que señaló como el avance más importante en el terreno de la medicina nuclear. Carrió destacó la "notable contribución de la medicina nuclear al diagnóstico cardiológico" y aseguró que la radiología seguirá siendo, en el futuro próximo, una herramienta esencial tanto en el diagnóstico como en el tratamiento de enfermedades. Por eso, concluyó, "los profesionales de la radiología deberán mostrar la eficacia de estos métodos —diagnósticos y terapéuticos—, a un coste socialmente aceptable".

### Visita a la Dirección General del Ambiente de Portugal

Durante la reunión de la Asociación de Reguladores Nucleares de Europa Occidental (WENRA), celebrada en Bruselas del 15 al 16 de junio, se acordó contactar de forma bilateral con los miembros de la Unión Europea que no son miembros de la misma, al carecer de centrales nucleares, para explicarles las actividades de este grupo.

España se comprometió a contactar con Portugal y

por ello se mantuvo una reunión en Lisboa con el Director General del Ambiente y el presidente del Instituto Tecnológico Nuclear el pasado 4 de julio, para presentarles las principales conclusiones del informe en curso sobre los países candidatos e informarles de las actividades de WENRA en general. Aunque las autoridades portuguesas están debatiendo internamente la asignación de las diferentes responsabilidades reguladoras, se comprometieron a participar en la próxima reunión de WENRA, prevista para octubre de este año en París.

### Reunión del Foro de Reguladores Iberoamericanos

La quinta reunión del Foro de Reguladores Iberoamericanos tuvo lugar del 17 al 20 de julio en La Habana. La delegación del CSN estuvo compuesta por el presidente y el director técnico de seguridad nuclear. La reunión comenzó con una visita a la central nuclear de Juraguá, de diseño soviético, que se encuentra paralizada desde el inicio de los 90 con un 60% del proyecto realizado.

Entre los principales acuerdos alcanzados en la reunión del Foro destaca la decisión de continuar con el apoyo del CSN al organismo regulador brasileño para el arranque de la central nuclear de Angra 2, y la transferencia de la experiencia obtenida por el CSN en la central nuclear de Trillo; el intercambio de la experiencia obtenida en el almacenamiento temporal de combustible irradiado y la organización de un intercambio de visitas de inspectores con Argentina, siguiendo el modelo aplicado con México.

Con ocasión de la reunión se mantuvo un encuentro bilateral para analizar el avance de los proyectos de cooperación entre el CSN y el CNSN (Centro Nacional de Seguridad Nuclear de Cuba). La próxima reunión corresponde organizarla al CSN, habiéndose propuesto como fecha preferente la segunda semana de marzo de 2001.

### Reunión de la INRA

Del 6 al 8 de septiembre tuvo lugar en Edimburgo una reunión de la INRA (Asociación Internacional de Reguladores Nucleares), en la que el CSN estuvo representado por el presidente y el responsable de relaciones internacionales. Entre otros temas se debatió la necesidad de actuaciones del regulador para anticiparse a las degradaciones de la seguridad, el uso de APS (análisis probabilístico de seguridad) frente a los criterios deterministas y de defensa en profundidad, y el papel del regulador en la protección física de las instalaciones nucleares. A propuesta del CSN se trató también el seguimiento de las conclusiones de la Conferencia de Córdoba y la propuesta de resolución realizada ante la Conferencia General del OIEA. La reunión finalizó con una visita a la central nuclear de Torness.

## PRINCIPALES ACUERDOS DEL CSN

*Los acuerdos específicos de cada central se resumen en el apartado de centrales nucleares.*

### **Emergencias nucleares y radiológicas**

El CSN aprobó, durante el pasado mes de junio, los elementos básicos de planificación para la elaboración de una directriz básica de emergencias radiológicas, en la que participan varios organismos, junto al Consejo. El objetivo es regular las situaciones de emergencia que puedan producirse en instalaciones distintas a las centrales nucleares o como consecuencia de accidentes originados en instalaciones de otros países.

Por otra parte, el Ministerio del Interior, con el apoyo y colaboración del CSN, está procediendo a la elaboración de una actualización del Plan Básico de Emergencia Nuclear (Plaben), teniendo en cuenta los nuevos criterios de protección radiológica aplicables y la experiencia obtenida en los simulacros de emergencia nacionales e internacionales que se llevan a cabo de forma sistemática.

### **Campañas de intercomparación para servicios de dosimetría personal**

Durante el pasado mes de junio, el Consejo aprobó la puesta en

marcha de la tercera campaña de intercomparación de dosimetría externa, en la que participarán los 22 servicios actualmente autorizados, así como el centro de Protección e Higiene contra las radiaciones de Cuba, en virtud de su acuerdo de colaboración con el CSN. La nueva campaña costará unos 12 millones de pesetas y está previsto que se lleve a cabo entre los últimos meses del año 2000 y los primeros de 2001.

El objetivo de estas campañas de intercomparación es comprobar la calidad y homogeneidad de las mediciones efectuadas por las entidades mencionadas, tanto en relación con la dosimetría externa como con la interna. Durante los años 1987 y 1995 se llevaron a cabo dos campañas de dosimetría personal externa y en 1999 una de dosimetría personal interna. Además, el Consejo acordó publicar los resultados obtenidos en esta última, en la que participaron los servicios de dosimetría de las centrales nucleares, de Unesa y del Ciemat.

### **Anteproyecto de presupuesto para el año 2001**

El Consejo de Seguridad Nuclear ha aprobado, para su remisión al Gobierno, el anteproyecto de su presupuesto para el próximo ejercicio. La partida

asciende a un total de 5.572 millones de pesetas, lo que supone un incremento del 1,8% con respecto al aprobado para este año.

En él se contempla la adecuación de los gastos de personal a la nueva estructura organizativa del Consejo, la reducción de los gastos corrientes de funcionamiento en un 8,9%, por ajuste en las asignaciones destinadas a comunicaciones, suministros y material de oficina, y el incremento en un 16,5% en la cuantía destinada a contratación de estudios y trabajos técnicos, a fin de cubrir adecuadamente las necesidades en esta materia para las nuevas funciones del organismo.

El presupuesto será financiado, casi en su totalidad, por los ingresos correspondientes a tasas y precios públicos. Como ya hiciera para el presupuesto del 2000, el CSN ha solicitado a la Administración del Estado una transferencia que permita cubrir aquellos gastos no relacionados directamente con alguna instalación y que, por tanto, no puedan sufragarse con cargo a las tasas. Como tales se consideran los gastos de la vigilancia radiológica ambiental en todo el territorio nacional, así como los que se generen como consecuencia de las nuevas competencias del CSN en materia de emergencias.

### **44ª Conferencia General del OIEA**

La 44ª Conferencia General del OIEA tuvo lugar en Viena del 18 al 22 de septiembre. Como viene siendo práctica habitual se habían programado dos reuniones en paralelo con la Conferencia General: una relacionada con la seguridad nuclear en la que participaron reguladores de alto nivel, y un foro de debate sobre la gestión de los residuos radiactivos.

El presidente del CSN presidió la sesión que debatió

la seguridad en la gestión de residuos y que incluyó un resumen de las conclusiones de la Conferencia de Córdoba. Por otra parte, el consejero Agustín Alonso presentó una ponencia en la reunión de reguladores de alto nivel. Finalmente, se procedió a la firma de la prórroga del acuerdo bilateral de cooperación con la NRC (Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos) y una reunión ampliada del Foro de Reguladores Iberoamericanos.

### Instalaciones radiactivas en el ámbito universitario

El Consejo ha refrendado la actuación del inspector que desarrolla las actividades de encomienda de funciones del CSN al Gobierno vasco, quien ordenó parar las actividades de una instalación radiactiva situada en la Facultad de Medicina y Odontología de la Universidad del País Vasco, ante el número y tipo de deficiencias encontradas en la misma.

El presidente del CSN ha enviado un escrito a los rectores de todas las universidades del país, manifestándoles la importancia de que todas las instalaciones radiactivas bajo su control estén adecuadamente licenciadas.

### Actuación del Consejo ante accidentes severos

El Consejo ha aprobado un documento que contiene sus líneas de actuación en materia de accidentes severos, entendiendo como tales aquellos que puedan ir más allá que los empleados en la base de diseño de las centrales nucleares.

Entre las actuaciones aprobadas destacan la de continuar acompañando el desarrollo de los requisitos de las centrales nucleares, por adopción de los que se vayan incorporando en el país de origen de la tecnología de cada central, mantener la exigencia a los titulares de que realicen los análisis individualizados de planta (IPE) y eva-

luar las medidas preventivas y mitigadoras que propongan los titulares a partir de sus resultados. Además se ha aprobado desarrollar un procedimiento que defina el alcance y contenido de las guías de actuación de accidentes severos en las centrales nucleares españolas y una guía de evaluación del CSN de las mismas.

Por otro lado, se prevé también fomentar las actividades relacionadas con estos sucesos en el Plan de Investigación del CSN, y el desarrollo y uso de códigos de cálculo de accidentes severos en España. Además, se aprecia favorablemente el plan que está llevando a cabo Unesa en esta materia y se propone potenciar el tratamiento sistemático de los aspectos relacionados con accidentes severos en el seno del grupo mixto de trabajo sobre análisis probabilista de accidentes del comité de enlace CSN-Unesa.

### Protección de la población española en relación con el submarino nuclear 'Tireless'

El Consejo de Seguridad Nuclear ha aprobado las bases radiológicas aplicables a un plan especial de protección de la población en el entorno del puerto de Gibraltar, con motivo de la estancia y reparación del submarino nuclear británico *Tireless* en el puerto de Gibraltar. Dichas bases radiológicas han sido remitidas a la Dirección General

de Protección Civil, del Ministerio de Interior, y constituyen la aportación del Consejo para la elaboración del correspondiente plan de actuación.

El plan indica que el Campo de Gibraltar se encuentra en la zona II (zona de medidas protectoras a largo plazo de acuerdo con la terminología del Plan Básico de Emergencia Nuclear de España), donde no es preciso la consideración de medidas protectoras urgentes, por lo que no se requiere ninguna preparación de respuesta a emergencias, salvo la previsión sobre la vigilancia radiológica de las vías de exposición de la población que pudieran tener como origen la deposición de material radiactivo en los suelos y alimentos.

También señala que el análisis de las condiciones en que se va a efectuar la reparación del submarino nuclear indica que no se ve incrementada la probabilidad de accidente con respecto a las condiciones de arribada normal al puerto e, incluso, es más reducida en términos globales, por lo que la probabilidad de un accidente que pudiera requerir la activación del Plan de Emergencia de Gibraltar es extremadamente baja. No obstante, el CSN tiene previsto efectuar un seguimiento de la reparación y va a reforzar el programa de vigilancia radiológica ambiental en el entorno del puerto de Gibraltar.

## ► INFORMACIÓN GENERAL

### Acuerdo entre el Gobierno alemán y las eléctricas para el cierre de las centrales nucleares

Tras una larga negociación, el Gobierno federal alemán y las empresas eléctricas del país alcanzaron el pasado 14 de junio un acuerdo para el abandono gra-

dual de la energía nuclear. El acuerdo, suscrito por las compañías VEBA, VIAG, RWE y Energie Baden-Württemberg, fija un plazo para la utilización de las centrales nucleares existentes, garantiza el mantenimiento de un alto nivel de seguridad durante su vida residual, regula la gestión de residuos y prohíbe la construcción de nuevas centrales nucleares.

La autorización de explotación de cada central expirará al alcanzar una cifra máxima de producción eléc-

trica desde el 1 de enero de 2000, calculada sobre la base de un período de referencia de 32 años desde el inicio de la operación comercial, autorizándose la posibilidad de transferencia de derechos de producción entre centrales. La central de Obrigheim, la más antigua del parque nuclear alemán, cerrará a finales de 2002.

Por otra parte, el acuerdo estipula el mantenimiento de los estándares de seguridad alcanzados en las centrales alemanas y la continuación de las revisiones de seguridad decenales. El Gobierno, por su parte, no adoptará unilateralmente iniciativas que discriminen la utilización de la energía nuclear, incluido el ámbito fiscal. La provisión para cobertura de riesgos ascenderá a 5.000 millones de marcos.

La gestión de los residuos radiactivos de las centrales nucleares se restringirá al almacenamiento definitivo a partir del 1 de julio de 2005. Hasta esa fecha se admitirán transportes para reproceso. Las empresas deberán construir, a la mayor brevedad, almacenamientos temporales individualizados en cada central o sus proximidades, para disponer de los mismos en cinco años. Las actividades en el emplazamiento de Gorleben se paralizarán entre tres y diez años, hasta aclarar cuestiones conceptuales y tecnológicas de seguridad.

## CENTRALES NUCLEARES

*La información correspondiente a cada una de las centrales nucleares se refiere a los meses de junio, julio y agosto de 2000.*

### José Cabrera

Entre los días 27 de julio y 1 de septiembre tuvo lugar una parada para recarga. La central funcionó en este periodo sin más incidencias destacables que la parada automática que se indica a continuación.

Estando la planta operando de forma estable al 95% de potencia, se produjo parada automática del reactor por inserción de las barras de control. Las barras se insertaron al perder su alimentación eléctrica, debido al fallo de un contacto auxiliar de un interruptor durante una prueba de vigilancia rutinaria. Corregida la anomalía, se arrancó de nuevo la central.

El día 11 de julio el Consejo de Seguridad Nuclear analizó el programa de mejora de la seguridad presentado por el titular el 15 de abril de 2000, en cumplimiento de lo requerido en la renovación de la autorización de explotación, concedida por Orden Ministerial del Ministerio de Industria y Energía de 17 de octubre de 1999, y sobre el que debía pronunciarse el CSN en el plazo de tres meses desde su presentación, según lo establecido en dicha autorización. Las mejoras del programa deberán implantarse dentro del periodo de tres años por el que se concedió la autorización. Las medidas propuestas incluyen mejoras en la

sala de control y otros sistemas, en la fiabilidad de sistemas de seguridad, en los procedimientos de operación y en los medios para la formación del personal. El CSN aceptó el programa propuesto por el titular, requiriendo mejoras adicionales respecto a la sala de control y otros sistemas. Estas mejoras adicionales deberán ser presentadas al CSN en el plazo de seis meses, y éste deberá pronunciarse sobre las mismas en los tres meses siguientes. También se han establecido nuevas instrucciones complementarias para el mejor cumplimiento del resto de los requisitos.

El CSN autorizó unas maniobras de movimiento de cargas pesadas por encima de la piscina de almacenamiento de combustible, dentro de las operaciones previstas para introducir mejoras en los bastidores de almacenamiento de combustible nuevo. Asimismo, el CSN informó favorablemente la revisión de las especificaciones técnicas en los apartados correspondientes a las válvulas de aislamiento de la contención, a las fuentes de corriente alterna, al programa del punto de tarado de las válvulas de alivio del presionador y a los límites térmicos del núcleo. También autorizó una exención temporal a las especificaciones técnicas en lo relativo a las fuentes de alimentación eléctrica que debían tener disponibles los sistemas de seguridad durante la parada de recarga. Esta exención era meramente formal, ya que la situación autorizada a la central nuclear José Cabrera es la misma que tienen autorizadas todas las demás centrales españolas. Sin embargo, la redacción que tenían las especificaciones de esta central podía interpretarse en sentido diferente, por lo que, para clarificar la situación, se autorizó una exención temporal para esta parada de recarga y se cambiará el texto vigente para el futuro.

El CSN estableció instrucciones complementarias a la autorización de explotación de la central, para que los cambios que puedan realizarse en el futuro en la organización y en la disponibilidad de personal sean analizados y documentados para garantizar que no afectan negativamente a las actividades relacionadas con la seguridad. Estas instrucciones han sido establecidas para todas las centrales nucleares españolas.



Central nuclear José Cabrera.

El 27 de junio tuvo lugar en la central la primera reunión del Comité de Información, establecido en el nuevo Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas, en la que participaron representantes de la Dirección General de Política Energética y Minas, del Consejo de Seguridad Nuclear, de la central y de los alcaldes de la zona.

Durante este periodo, el CSN realizó cinco inspecciones a la central.

### Santa María de Garoña

La central funcionó durante este periodo sin incidencias destacables.

El CSN informó favorablemente la revisión 42 de las especificaciones de funcionamiento en los apartados correspondientes a los límites de presión y temperatura del primario, a las válvulas de aislamiento de la contención, a los puntos de tarado del sistema de protección del reactor y a las normas administrativas. Asimismo, el CSN autorizó las operaciones de acondicionamiento de las resinas del sistema de purificación de agua del reactor, para su almacenamiento y posterior traslado a El Cabril.

El CSN estableció instrucciones complementarias a la autorización de explotación de la central, para que los cambios que puedan realizarse en el futuro en la organización y en la disponibilidad de personal sean analizados y documentados para garantizar que no afectan negativamente a las actividades relacionadas con la seguridad. Estas instrucciones han sido establecidas para todas las centrales nucleares españolas.

El 28 de julio tuvo lugar en la central la primera reunión del Comité de Información, establecido en el nuevo Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas, en la que participaron representantes de la Dirección General de Política Energética y Minas, del CSN, de la central y de los alcaldes de la zona.

Durante este periodo, el CSN realizó tres inspecciones a la central.

### Almaraz

Las dos unidades de Almaraz funcionaron durante este periodo sin más incidencias destacables que la parada automática de la unidad II que se indica a continuación. El día 31 de mayo finalizó la parada para recarga de la unidad II.

Estando la unidad II al 61% de potencia durante el arranque posterior a la duodécima recarga, se produjo disparo de turbina por bajo vacío en el condensador, lo que dio lugar a una parada automática del reactor. El bajo vacío del condensador se debió a que se rompió el disco de ruptura de descarga de la turbobomba de agua de alimentación principal mientras se estaban realizando unas operaciones de mantenimiento sobre la misma.

El CSN informó favorablemente la revisión del reglamento de funcionamiento, en la que se incluyen



Central nuclear de Almaraz.

las modificaciones derivadas de la unificación de la gestión de esta central y la de Trillo. El CSN había realizado con anterioridad una inspección sobre este tema a cada una de las plantas y a las oficinas centrales que prestan servicio a ambas. El informe favorable del CSN requiere que el titular realice análisis de los cambios que puedan introducirse en el futuro en la organización y en la disponibilidad de personal, para garantizar que dichos cambios no afectan negativamente a las actividades relacionadas con la seguridad.

Durante este periodo, el CSN realizó cuatro inspecciones a la central.

### Ascó

Las dos unidades funcionaron durante estos meses sin más incidencias destacables que las paradas que se indican a continuación.

Estando la unidad I operando de forma estable a plena potencia, se descubrió que había una junta de expansión entre la turbina de baja presión y el separador de humedad-recalentador muy dilatada. Se inició una bajada de carga para reparar, y finalmente se decidió desacoplar la turbina para mayor comodidad en la intervención. Una vez reparada se acopló de nuevo la turbina y se subió carga hasta recuperar la plena potencia.

Con la unidad II operando de forma estable al 100% de potencia fallaron unos transmisores de presión a la descarga de una turbobomba de agua de alimentación, por lo que ésta disparó y en el transitorio subsiguiente se produjo bajo nivel en generadores de vapor y parada automática del reactor.

El CSN informó favorablemente una modificación de la condición de la autorización de explotación de la central, relativa al proceso de autorización de los cambios en los documentos oficiales de explotación, para homogeneizarla con la del resto de las centrales nucleares españolas.

El CSN estableció instrucciones complementarias a la autorización de explotación de la central para que los cambios que puedan realizarse en el futu-

ro en la organización y en la disponibilidad de personal sean analizados y documentados para garantizar que no afectan negativamente a las actividades relacionadas con la seguridad. Estas instrucciones han sido establecidas para todas las centrales nucleares españolas.

Asimismo, el CSN comunicó a la central un apercibimiento por incumplimiento de lo establecido en el plan de emergencia interior, en lo relativo a la disponibilidad de un ayudante del supervisor de turno, que se había suprimido en algunos turnos de operación.

Durante este periodo, el CSN realizó dos inspecciones a la central.

### Cofrentes

La central funcionó durante este periodo sin incidencias destacables. El día 28 de agosto se inició una parada para recarga.

El CSN informó favorablemente una modificación de la condición de la autorización de explotación de la central, relativa al proceso de autorización de los cambios en los documentos oficiales de explotación, para homogeneizarla con la del resto de las centrales nucleares españolas. Asimismo, el CSN informó favorablemente una revisión del reglamento de funcionamiento, requerida por el propio CSN, en la que se establece que la responsabilidad de la definición de los criterios de protección radiológica aplicables en el diseño de las modificaciones de la central recae en la organización de explotación.

También se informó favorablemente la revisión 28 de las especificaciones técnicas, en la que se modifican los apartados correspondientes al programa de prueba de los generadores diesel, la instrumentación del sistema de aislamiento, las pruebas del sistema de emergencia de inyección del núcleo a baja presión, los puntos de tarado de las válvulas de alivio/seguridad de la vasija, la operabilidad de los sensores del tubo de transferencia del combustible, los ensayos de los filtros de carbón activo de los sistemas de ventilación y los límites térmicos del núcleo.

El CSN informó favorablemente el almacén para los haces tubulares del condensador, que iban a ser sustituidos durante la parada de recarga, y una exención temporal a las especificaciones técnicas relativa al plazo de presentación del estudio de seguridad de la recarga.

El CSN estableció instrucciones complementarias a la autorización de explotación de la central para que los cambios que puedan realizarse en el futuro en la organización y en la disponibilidad de personal sean analizados y documentados para garantizar que no afectan negativamente a las actividades relacionadas con la seguridad. Estas instrucciones han sido establecidas para todas las centrales nucleares españolas.

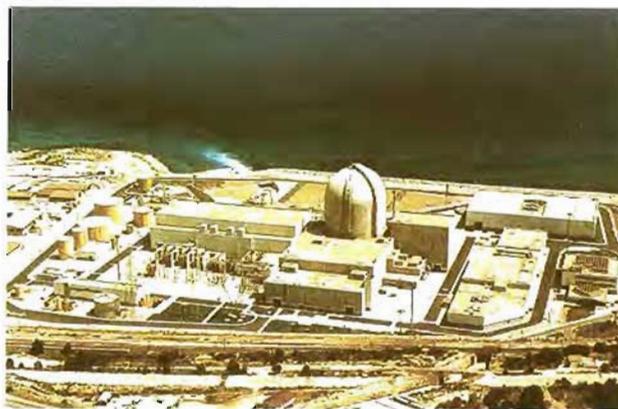
Durante este periodo, el CSN realizó 16 inspecciones a la central.

### Vandellós II

La central funcionó durante estos meses sin incidencias destacables.

El 22 de junio el CSN emitió un dictamen favorable para la renovación de la autorización de explotación por un periodo de diez años, estableciendo las condiciones correspondientes a dicha autorización. Para la emisión de este dictamen se tuvo en cuenta la revisión periódica de la seguridad presentada por el titular en julio de 1999.

El CSN informó favorablemente la revisión 35 de las especificaciones técnicas en los apartados correspondientes al enriquecimiento de los elementos combustibles que pueden almacenarse en la piscina de combustible irradiado, a la concentración de boro en dicha piscina, a los requisitos de vigilancia de los tubos de los generadores de vapor, al sistema de extracción de aire de las salas de baterías de seguridad y a la frecuencia de pruebas de los relés auxiliares de actuación de las salvaguardias tecnológicas.



Central nuclear Vandellós II.

El CSN estableció instrucciones complementarias a la autorización de explotación de la central para que los cambios que puedan realizarse en el futuro en la organización y en la disponibilidad de personal sean analizados y documentados para garantizar que no afectan negativamente a las actividades relacionadas con la seguridad. Estas instrucciones han sido establecidas para todas las centrales nucleares españolas.

Durante este periodo, el CSN realizó seis inspecciones a la central.

### Trillo

Durante estos meses la central funcionó sin incidencias destacables.

El CSN informó favorablemente una actualización de la revisión general de las especificaciones técnicas antes de su entrada en vigor. En esta actualización se incluyen cambios debidos a modificaciones de diseño introducidos en la central desde la aprobación de esta revisión general el 19 de febrero de 1999. Asimismo, el CSN informó favorablemente la extensión por tres meses del plazo establecido para la entrada en vigor

de dicha revisión general de las especificaciones técnicas, solicitada por el titular para terminar de adaptar los procedimientos a la nueva revisión.

El CSN informó favorablemente la revisión del reglamento de funcionamiento en la que se incluyen las modificaciones derivadas de la unificación de la gestión de esta central y la de Almaraz. El CSN había realizado con anterioridad una inspección sobre este tema a cada una de las plantas y a las oficinas centrales que prestan servicio a ambas. El informe favorable del CSN requiere que el titular realice análisis de los cambios que puedan introducirse en el futuro en la organización y en la disponibilidad de personal, para garantizar que dichos cambios no afectan negativamente a las actividades relacionadas con la seguridad.

Asimismo, el CSN informó favorablemente una modificación del plan de emergencia interior de la central para incluir los cambios en la organización producidos tras la unificación de la gestión con la central nuclear de Almaraz.

Durante este periodo, el CSN realizó cuatro inspecciones a la central.

## ► PUBLICACIONES

### El desmantelamiento de las instalaciones nucleares. Contexto y bazas técnico-económicas en Francia, Alemania y Estados Unidos

Sophie Rémont, Roland Masson y Jérôme Gosset. París, 1998.

El libro recoge el estudio elaborado por los autores, ingenieros de minas, quienes analizan la influencia del contexto, así como las bazas técnicas y económicas en el desmantelamiento de las instalaciones nucleares. El prólogo del libro ha sido escrito por Christian Bataille, diputado de la Asamblea francesa y ponente de la Ley sobre Residuos Radiactivos del 30 de diciembre de 1991, así como del informe previo a su elaboración, miembro permanente de la comisión parlamentaria de evaluación de las opciones científicas y tecnológicas, y mediador ante los representantes políticos de las poblaciones afectadas.

Por su interés, *Seguridad Nuclear* ha considerado interesante reproducir íntegramente este prólogo:

*"En 1990, es decir hace casi diez años, los miembros de la Comisión Parlamentaria de Evaluación de las Opciones Científicas y Tecnológicas me pidieron que realizara un estudio sobre la gestión de los residuos nucleares. Por aquella época, las instituciones parlamentarias*

*se habían preocupado muy poco por un tema que incumbía al Ejecutivo y a las grandes direcciones técnicas. Sin embargo, los problemas de las fases preliminares del ciclo nuclear me apasionaron enseguida, y desde entonces no he dejado de interesarme activamente por ellos.*

*Estoy íntimamente convencido de que, dado el estado actual de los conocimientos, la nuclear sigue siendo una fuente de energía imprescindible para el desarrollo económico, el crecimiento y el equilibrio ecológico del planeta. El argumento que esgrimen con mayor frecuencia quienes se oponen a esta forma de energía es que los problemas que plantean las fases preliminares del ciclo, así como el desmantelamiento de las instalaciones caducas y la gestión de los residuos, deberían llevarnos a 'salir de lo nuclear' cuanto antes y a abandonar esa energía.*

*Por todo el planeta, y desde hace poco en nuestro país, campañas hábilmente conducidas intentan convencernos de que los problemas pendientes de resolver hasta la fecha son insolubles hasta el fin de los tiempos, cuando tenemos que tomar en cuenta el progreso continuo de los conocimientos.*

*El mérito del presente estudio consiste en demostrarnos de forma seria y metódica, sin entrar en polémicas vanas, que el desmantelamiento de las instalaciones obsoletas es realizable desde el punto de vista técnico y económico, y que hay que abordar el problema sin demora, al igual que para los residuos.*

*Los sucesivos informes que he redactado, así como mis intervenciones en el Parlamento y en numerosos congresos, me han permitido subrayar en numerosas ocasiones que es nuestra generación la que tiene que resolver los problemas que ella misma ha creado, y que sería una cobardía transmitir a la siguiente generación situaciones que, con el paso de los años, no pueden sino agravarse, como ha quedado tan bien demostrado en este estudio. No cabe duda de que tenemos la responsabilidad de resolver ahora el problema de los residuos que hemos generado para satisfacer nuestras propias necesidades, en vez de contentarnos con transmitírselo a las generaciones futuras.*

*En la actualidad, los problemas de las fases preliminares del ciclo son ante todo psicológicos, sociológicos y políticos. Ante estos obstáculos que no entienden del todo, a veces algunos científicos y técnicos sienten la tentación de apartar la vista y dedicarse a otros temas. Por ello, resulta especialmente reconfortante que tres jóvenes ingenieros de minas dediquen su proyecto de fin de carrera al estudio de un tema tan polémico como es el desmantelamiento de las instalaciones nucleares.*

*Al afirmar públicamente que las fases preliminares del ciclo constituyen un reto que la inteligencia humana sólo podrá afrontar y resolver si la ataca seriamente desde ahora mismo, a menudo me he sentido aislado. Por ello celebro que ingenieros de minas adopten la misma actitud, y afirmen resueltamente su confianza en el progreso de las ciencias y las técnicas".* ☺



## Resúmenes

(Page 2)

### The possibility of cooling corium outside the vessel: MACE experiments

● F. Robledo, M.A. Jiménez, J.M. Martín-Valdepeñas, M.L. González, F. Martín-Fuertes

The container enclosure is the last barrier to prevent the release of fission products to the outside in the event of an accident. This article analyzes the feasibility of severe accident management strategy to prevent the reactor's cavity slab failing through a corium/concrete interaction. The strategy consists in pouring water onto the corium deposited on the slab with the purpose of cooling it down and stopping the concrete from decomposing.

(Page 12)

### Dosimetric distribution of exposed workers in Spain in 1998

● A. Hernández, A. Martín, I. Villanueva, I. Amor, J.L. Butragueño

Knowing the doses received by exposed workers is an important indicator for appraising radiological

protection measures in nuclear and radioactive facilities. This article analyses the 1998 dosimetric data and compares them with previous years.

(Page 20)

### Process for improving the Trillo plant's specifications

● M. Ángeles Martín

The Trillo nuclear power plant undertook a revision of the operating specifications with the purpose of establishing the improvements necessary for their better understanding and adaptation to the plant. After several years of in-depth study, the enterprise culminated an authorization from the Directorate General for Energy, in February 1999, for a general revision of the plant's specifications. This article endeavours to explain the reasons which drove this revision forward,

the process used to implement it and some of the improvements incorporated.

(Page 26)

### The reunion of mathematics with engineering

● Francisco Michavila, Raimundo Martínez

The authors explain how and why both disciplines connect, as well as the importance of such phenomenon for the progress of mankind. The future's exciting challenges involve advancing in all fields of knowledge, as is explained in the article.

(Page 34)

### Internet's impact on society

● Gayetano López

The article reviews the role of new technologies in several fields: from the academic to the scientific, whilst touching on the remaining social activities. It concludes by stressing its immense potential in the immediate future, since it will change behaviour patterns, the world of information and trading.

## Seguridad Nuclear Boletín de suscripción

Institución/Empresa

Nombre

Tel.

Fax

Dirección

CP

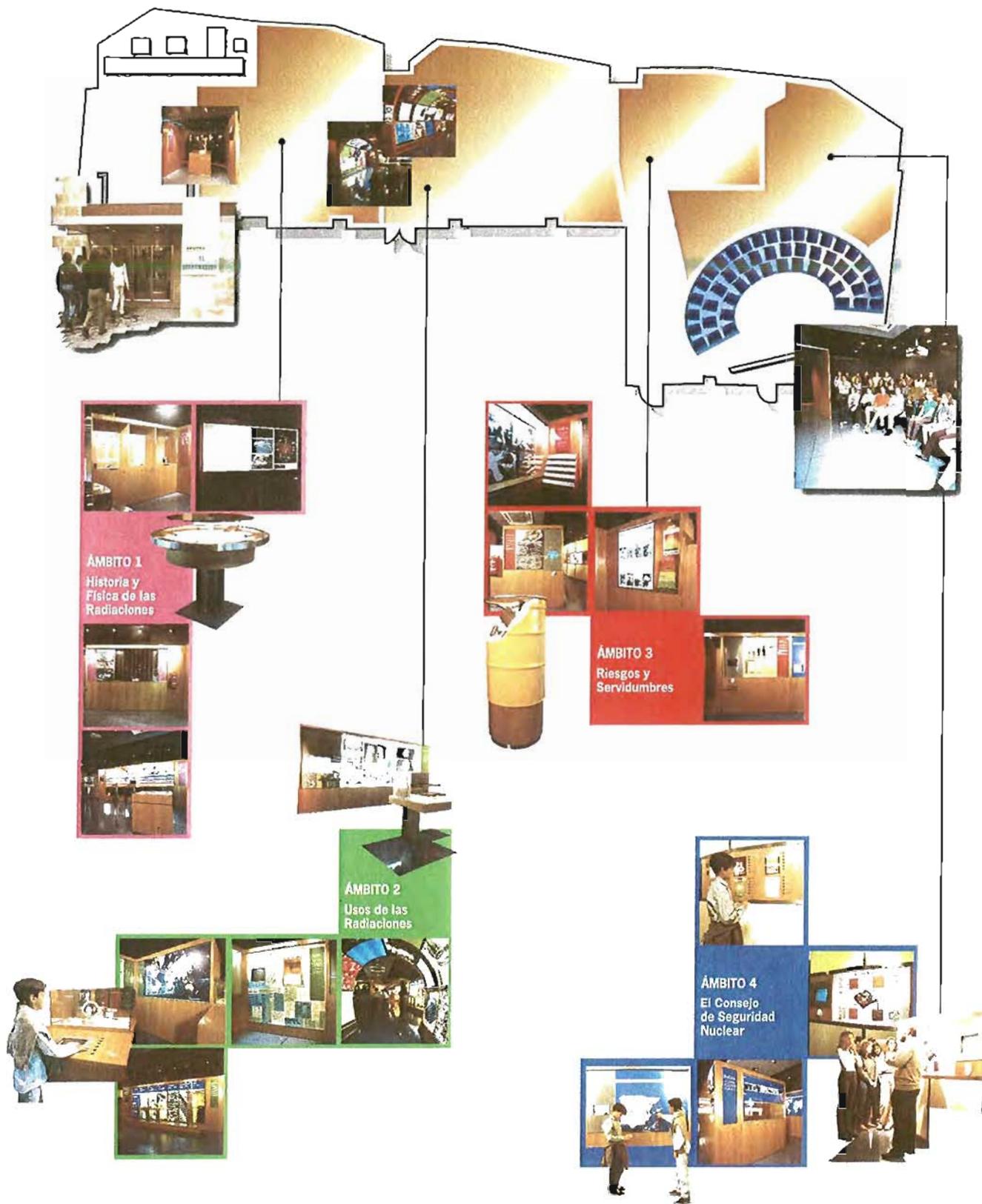
Localidad

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.



El centro de información del CSN pretende, a través de 29 módulos interactivos distribuidos en cuatro ámbitos, acercar a los jóvenes al conocimiento de las radiaciones y sus usos, y explicar los mecanismos establecidos para controlar sus riesgos.



Justo Dorado 11  
28040 Madrid  
[www.csn.es](http://www.csn.es)