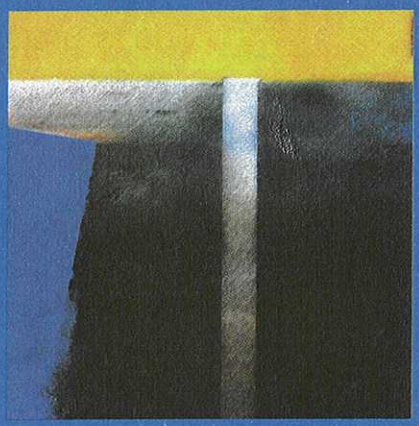
Revista del CSN / Número 15
II Trimestre 2000

Seguridad Nuclear



El programa AEOS
de la central de Trillo

Cien años de protección
radiológica

Futura reglamentación
de transporte
de material radiactivo

Simulacro de emergencia
nuclear en Guadalajara

Noticia breve
de los conjuntos borrosos

Seguridad Nuclear
Revista del CSN
Año IV / Número 15
II Trimestre 2000

Director
Rafael Caro

Comité de redacción
Agustín Alonso, José A. Azuara, Juan M. Kindelán, Aníbal Martín, Carmen Martínez Ten, Luis del Val
Secretaria de redacción
Fátima Rojas

Noticias
Directora
Matilde Ropero
Comité
A. Esteban Naudín, G. López Ortiz, Javier Reig, M. Rodríguez Martí, M. F. Sánchez Ojanguren, M. A. Villar Castejón

Consejo de Seguridad Nuclear
Justo Dorado, 11
28040 Madrid
Tf. 91 346 02 00
Fax 91 346 06 66
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: Pintura 0300 (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.

S U M A R I O

1 Editorial

2 El programa AEOS de la central nuclear de Trillo
Ignacio Lequerica

9 Historia de los primeros cien años de la protección radiológica
Bo Lindell

25 Futura reglamentación de transporte de material radiactivo
Fernando Zamora, Sofía Suárez, Engracia Rubio y Carlos Enríquez

32 Simulacro general del Plan de Emergencia Nuclear de Guadalajara
Sonia Serrano

36 Noticia breve de los conjuntos borrosos
Enric Trillas

42 Noticias

42 Consejo de Seguridad Nuclear / **43** Principales acuerdos del CSN / **43** Centrales nucleares / **44** Conferencia Internacional sobre la Seguridad en la Gestión de los Residuos Radiactivos / **47** Información general / **48** Medio ambiente / **48** Investigación y desarrollo / **48** Tecnología

49 Resúmenes

Editorial

El Consejo de Seguridad Nuclear ha renovado a dos de sus miembros. El pasado 2 de marzo dos consejeros tomaron posesión de su cargo, tras ser nombrados por acuerdo del Consejo de Ministros del 18 de febrero: José Ángel Azuara, que renueva en el cargo, y Paloma Sendín, que era hasta entonces directora general de Minas en el Ministerio de Industria y Energía y que sustituye a Rafael Caro. Desde estas páginas de la revista damos la bienvenida a los recién llegados y despedimos con agradecimiento al que ha sido director e impulsor de esta publicación desde su creación, en 1996.

Con vocación de continuidad, *Seguridad Nuclear* seguirá intentando servir de soporte a ideas y aportaciones de expertos, tanto españoles como extranjeros, relacionados con la seguridad nuclear y la protección frente a las radiaciones. En este número recogemos diversos artículos sobre el programa de revisión de los sistemas de seguridad de la central nuclear de Trillo, la historia de la protección radiológica, la reglamentación sobre el transporte, el simulacro de emergencia de la central José Cabrera y las bases de la llamada *lógica borrosa.*

España acogió el pasado mes de marzo una conferencia internacional coordinada por el CSN sobre la seguridad en la gestión de los residuos radiactivos. Celebrada en Córdoba, y organizada por el OIEA junto con la OCDE y la Comisión Europea, contó con una activa participación del Consejo y representó un éxito, en parte por la cualificada participación de los máximos responsables de organizaciones internacionales, autoridades reguladoras y agencias de gestión de residuos, pero fundamentalmente por las importantes conclusiones alcanzadas en los debates.

Sin duda, esta conferencia va a suponer un hito importante en la búsqueda del consenso internacional, que es un elemento clave para la aceptación, por parte de los responsables políticos y de la sociedad, de las opciones para resolver este tema tan complejo. Entre las conclusiones cabe destacar la voluntad firme de la comunidad científica internacional por evitar transmitir cargas indebidas a las generaciones futuras, ofreciendo opciones técnicas viables y seguras para que los poderes públicos puedan adoptar las decisiones políticas necesarias. La conferencia resaltó la necesidad de involucrar a todas las partes interesadas en este asunto, no sólo desde el punto de vista técnico sino social y político, y esto es sin duda un avance importante hacia la solución definitiva de un tema crucial para la seguridad del público y del medio ambiente.

Ignacio Lequerica*

El programa AEOS de la central nuclear de Trillo

El programa de Análisis de Experiencia Operativa y Sistemas (AEOS), puesto en marcha por la central nuclear de Trillo, ha supuesto la revisión de los sistemas de seguridad de la planta y la introducción de las mejoras de diseño necesarias para su actualización. En este artículo, el autor repasa tanto las tareas desarrolladas por la central como la supervisión y control de las mismas llevada a cabo por el CSN.

1. Introducción

El permiso de explotación provisional de la central nuclear de Trillo (Guadalajara) fue concedido por Orden del Ministerio de Industria y Energía de fecha 4 de diciembre de 1987, tras haberse completado la evaluación del proyecto de la central por el Consejo de Seguridad Nuclear y haberse desarrollado satisfactoriamente el programa de pruebas prenucleares de la misma. A continuación se desarrolló, de forma también satisfactoria, el programa de pruebas nucleares, realizándose el primer acoplamiento a la red el 23 de mayo de 1988 e iniciándose la operación comercial al 100% de potencia el 6 de agosto de 1988.

Desde enero de 1992 hasta octubre de 1994, se fueron descubriendo en la central de Trillo una serie de deficiencias en aspectos de montaje y diseño que fueron analizados por el titular y por el CSN, de acuerdo con la sistemática establecida para el análisis de la experiencia operativa de la central. Aunque la importancia de esos sucesos desde el punto de vista de seguridad fue variable, su acumulación y secuencia de ocurrencia originó, entre los responsables de la central y del CSN, la preocupación de que existiese un origen común a todos ellos y que no pudiera descartarse totalmente la posibilidad de que continuasen apareciendo nuevas deficiencias, a pesar de que, tras las revisiones parciales realizadas a consecuencia de algunos de los incidentes aislados, no se hubiese descubierto ninguna otra deficiencia similar.

Como consecuencia del análisis efectuado, algunos de estos descubrimientos fueron clasificados por el CSN, utilizando la Escala Internacional de Sucesos Nucleares (INES)[1], con nivel superior a 0 (sucesos sin trascendencia para la seguridad). En concreto, en el periodo mencionado se clasificaron cinco de estos sucesos como nivel 1 (anomalía) y uno como nivel 2 (incidente).

En los análisis de experiencia operativa realizados sobre algunos de los sucesos ocurridos, se encontró que las deficiencias se habían originado en la fase previa al comienzo de la explotación comercial de la central y presentaban algunas características comunes.

En este contexto, la central nuclear de Trillo, como ampliación de la actividad de análisis de la experiencia propia y ajena, consideró conveniente desarrollar un programa adicional de análisis de experiencia operativa.

En el transcurso de una inspección realizada a la central en mayo de 1994, el jefe de central informó a los representantes del CSN que el ti-

* Ingeniero aeronáutico y diplomado en Ciencias Económicas, pertenece al CSN desde 1983. En la actualidad es subdirector de Centrales Nucleares.

[1] La Escala Internacional de Sucesos Nucleares, propuesta por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), fue adoptada por el CSN el 1 de octubre de 1990. De acuerdo con esta escala, los sucesos se clasifican, según su gravedad, en siete niveles. Los menores niveles, del uno al tres, son llamados incidentes y los más altos, niveles del cuatro al siete, accidentes. Los sucesos que no tienen trascendencia para la seguridad son clasificados por debajo de la escala o nivel cero. Esta escala considera también sucesos denominados sin iniciador, consistentes en el hallazgo de alguna dificultad en la situación de la central sin que se haya producido, de hecho, ninguna alteración en el funcionamiento normal de la instalación.

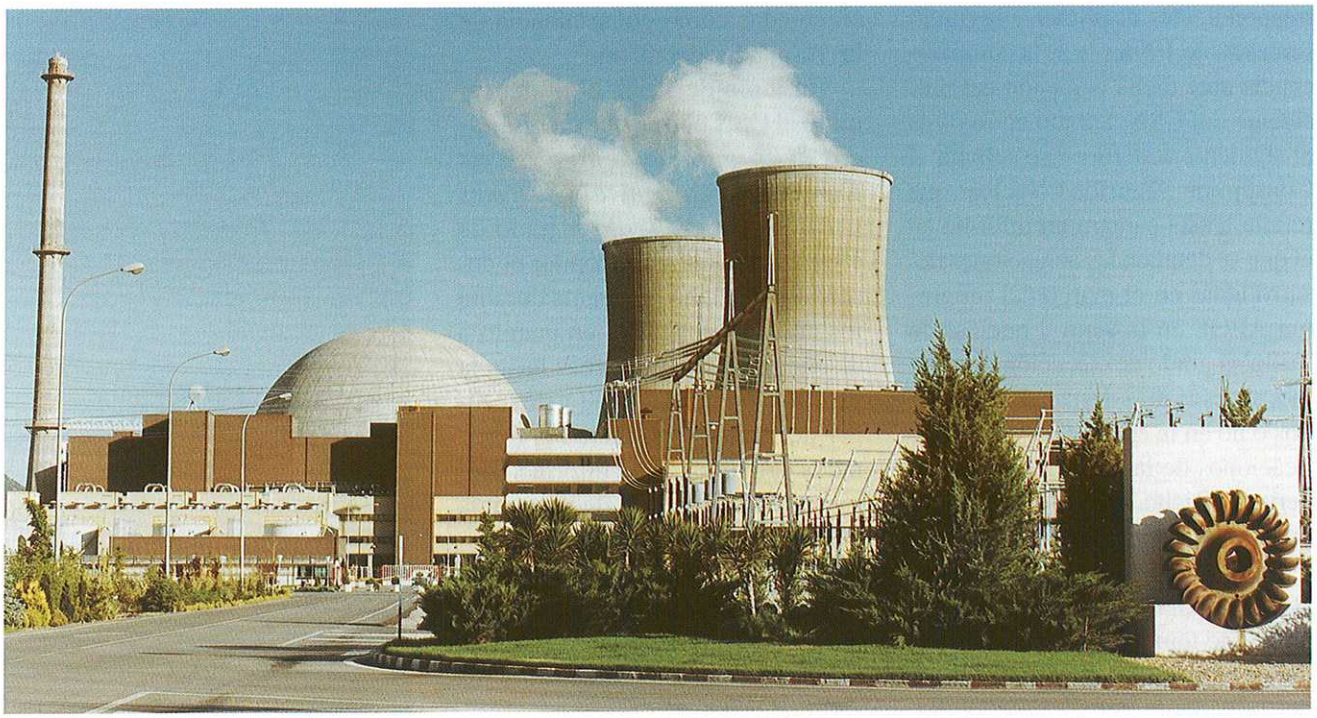


Figura 1. Central nuclear de Trillo.

tular estaba tratando de definir algún programa sistemático de revisión de sistemas que permitiese asegurar razonablemente que no existían nuevas deficiencias análogas a las detectadas previamente, que pudiesen afectar a la seguridad de la central.

En una primera definición, la central nuclear de Trillo encargó a Siemens-KWU una revisión completa del sistema de protección del reactor, debido a la importancia para la seguridad de este sistema y al hecho de que afectaba a alguno de los sucesos detectados.

El suceso relativo a la detección de deficiencias de diseño en el sistema de ±24 V de corriente continua activó el lanzamiento de un programa de revisión de sistemas de seguridad de la central.

En reunión celebrada el día 7 de noviembre de 1994, la central nuclear de Trillo presentó al CSN las líneas generales de este programa de revisión.

En una nueva reunión, celebrada el día 31 de enero de 1995, la central de Trillo presentó al CSN un programa desarrollado para la realización de esta revisión general de sistemas de seguridad bajo la denominación de Análisis de Experiencia Operativa y Sistemas (AEOS). El objetivo de este análisis era confirmar que los diferentes sistemas, componentes y estructuras de la central cumplían las funciones de seguridad para las que han sido diseñados, e introducir aquellas modificaciones en el diseño necesarias para actualizar los sistemas de seguridad, adaptándolos a las experiencias más recientes. En su alcance se han tenido en cuenta todos aquellos sistemas considerados de seguridad e incluidos en las especificaciones de funcionamiento.

En el programa han participado, bajo la dirección y responsabilidad del titular, el suministrador principal (Siemens-KWU) y la ingeniería española principal (Empresarios Agrupados).

El programa AEOS ha sido favorablemente apreciado por el CSN, que ha seguido su desarrollo en detalle a través de su organización técnica, con la supervisión directa ejercida por los dos inspectores residentes. El CSN cuenta con el asesoramiento de una entidad alemana independiente (TÜV-Sudwest), encargada del asesoramiento a las autoridades reguladoras alemanas.

Todas las actividades relacionadas con el programa, iniciado en enero de 1995, están reguladas por el procedimiento general, Procedimiento de Análisis de Experiencia Operativa y Sistemas. Para cada una de las actividades la central de Trillo elaboró un procedimiento o guía que facilitó su seguimiento.

En mayo de 1995, el Congreso de los Diputados solicitó al CSN un informe sobre los sucesos ocurridos en la central de Trillo. En septiembre de 1995, el Consejo remitió el informe requerido en el que se describían dichos sucesos y se exponían las líneas de actuación del programa AEOS emprendido por la central.

Con fecha 25 de marzo de 1997, el CSN remitió un informe a la Comisión de Industria, Energía y Turismo (en respuesta a su resolución séptima aprobada el 18 de febrero del mismo año), en el que se detallaban las actividades llevadas a cabo por Trillo dentro del programa AEOS y haciendo notar que el informe final de evaluación del programa se concluiría posteriormente.

El día 31 de marzo de 1998, la citada comisión parlamentaria, recibidos los informes semestrales del Consejo de Seguridad Nuclear co-

rrespondientes al primer y segundo semestre de 1996, y tras la comparecencia ante dicha comisión del presidente del CSN, adoptó entre otros el siguiente acuerdo: "Se solicita al Consejo de Seguridad Nuclear que remita a esta cámara un informe en el que se detallen las actuaciones desarrolladas en el marco del programa AEOS en la central nuclear de Trillo, el grado de ejecución del mismo, sucesos más destacados (incluidos o no en la escala INES) y modificaciones de la planta que de él se deriven. Dicho informe será remitido una vez concluido el AEOS".

Asimismo, la comisión, en su sesión del día 10 de marzo de 1999, habiendo tenido lugar, en su día, la correspondiente comparecencia del presidente del Consejo de Seguridad Nuclear, aprobó por unanimidad doce resoluciones. La primera y la quinta dicen lo siguiente:

— "Primera: Se solicita al Consejo de Seguridad Nuclear que remita a esta Cámara un informe en el que se detallen las actuaciones desarrolladas como consecuencia del programa AEOS en la central nuclear de Trillo, el grado de ejecución de las mismas, sucesos más destacados y grado de implantación de las modificaciones que de él se derivan".

— "Quinta: La Comisión constata que en 1998, tras más de dos años de trabajo, se ha finalizado la ejecución del programa AEOS, puesto en marcha con el fin de detectar y corregir posibles deficiencias de diseño en la central nuclear de Trillo. Asimismo, la Comisión toma nota de que en la parada de recarga de 1999 se implantarán las modificaciones necesarias para adecuar la situación de algunos sistemas de la planta a las modificaciones de diseño. Teniendo en cuenta lo anterior, la Comisión solicita al Consejo de Seguridad Nuclear que remita a esta Cámara un informe en el que se expliciten las actuaciones desarrolladas en el marco del programa AEOS, así como las modificaciones efectuadas como consecuencia de los resultados del mismo".

En junio de 1998, el titular remitió al CSN el *Informe de resultados del programa de Análisis de Experiencia Operativa y Sistemas (AEOS) de C.N. Trillo I* (junio de 1998), que trata de recopilar el desarrollo de dicho programa durante los años 1995 a 1997 en cuanto a diseño, montaje y pruebas hasta la explotación de la central y de recoger de manera resumida los resultados obtenidos. Este informe, junto con la información del programa transmitida al CSN durante el mismo y la obtenida en las inspecciones realizadas, ha servido de base para las evaluaciones realizadas por la Dirección Técnica sobre los resultados del AEOS.

Durante la parada para la recarga de 1999, además de implantarse las modificaciones de diseño de mayor envergadura (rediseños de los sistemas UV3, VE y REDECA, que se describen más adelante), se cerraron numerosas hojas de incidencia con la implantación de modificaciones de diseño. Puede decirse que las actuaciones derivadas del programa AEOS están finalizadas en un porcentaje muy elevado, quedando tan sólo pendiente la implantación de algunas modificaciones de diseño y la realización de algunas comprobaciones.

2. El programa AEOS

2.1. Actividades realizadas por la central nuclear de Trillo

La sistemática seguida por la central nuclear de Trillo para abordar y ejecutar el programa ha sido la siguiente: se formaron grupos de trabajo en la central asignados a cada una de las áreas de análisis del programa. Cada una de las áreas establecidas tenía una unidad organizativa responsable de su ejecución. Los trabajos de cada área se han realizado según los correspondientes procedimientos o guías desarrollados por la unidad responsable, siguiendo las pautas marcadas por el procedimiento general.



La coordinación general y el control del programa han sido realizados por el grupo de seguimiento liderado por el subdirector técnico y del que formaban parte el subdirector de Garantía y Control de Calidad, así como los jefes de las unidades siguientes: Seguridad y Licencia, Ingeniería, Producción, Mantenimiento, Garantía de Calidad en Explotación, y Oficina Técnica y Configuración.

Los trabajos han sido desarrollados por personal de la central con los apoyos externos necesarios; estos apoyos pertenecen a las organizaciones de Siemens-KWU (suministrador del NSSS), Preussen Elektra (operador de centrales nucleares alemanas), Empresarios Agrupados (ingeniería principal), Iberdrola y UFISA.

Cuando los grupos de trabajo detectaban una deficiencia, se abría una hoja de incidencia que se presentaba en una reunión semanal del grupo de seguimiento, quien evaluaba y asignaba el responsable de la evaluación definitiva y definición de acciones correctoras, estableciendo las fechas de compromiso para su implantación. Asimismo, se realizaba un análisis de operabilidad de los componentes afectados,

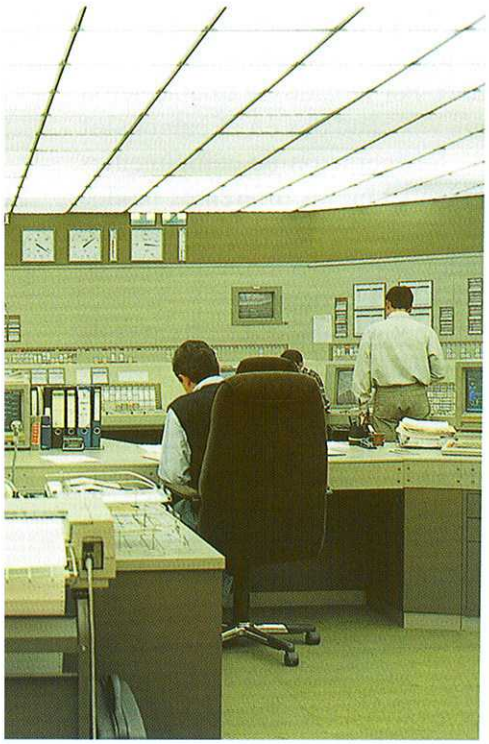


Figura 2. Sala de control de la central nuclear de Trillo.

para verificar el cumplimiento de las especificaciones de funcionamiento y la ocasional implantación de restricciones operativas.

La documentación soporte de la ejecución de acciones correctoras se presentaba en el grupo de seguimiento para su cierre definitivo.

Con el fin de conocer el grado de avance de las diferentes actividades se emitían informes mensuales, que se enviaban al CSN.

Las actividades que la central de Trillo emprendió fueron clasificadas en las grandes áreas de revisión que se describen a continuación.

— *Revisión de bases de diseño de los sistemas de seguridad de la central*, consistente en comprobar que las bases de diseño de los sistemas de seguridad de la central se encuentran correctamente definidas y adecuadamente incorporadas en todos los aspectos y en la documentación de diseño de los sistemas.

— *Revisión de dossieres de pruebas de puesta en marcha y paso a explotación*, consistente en revisar los dossieres de pruebas de los sistemas para comprobar que, durante las mismas, se midieron los parámetros especificados en los procedimientos y que éstos fueron definidos de forma que, mediante las pruebas, se verificara adecuadamente el cumplimiento de los componentes y sistemas con sus requisitos funcionales de seguridad.

— *Revisión del sistema de protección del reactor*, consistente en la revisión completa de todos los aspectos del sistema. Fue realizada por Siemens-KWU con apoyo del personal de mantenimiento de la central.

— *Análisis de experiencia operativa y aspectos peculiares del diseño*, consistente en la revisión de los informes de experiencia operativa interna y externa, condiciones de no conformidad e informes especiales para la detección de posibles áreas que debían ser consideradas en el análisis como posibles causas inductoras de aparición de incidencias en los sistemas de seguridad.

— *Revisión de bancos históricos de temas pendientes*, consistente en la revisión de los bancos de asuntos pendientes generados durante las fases de construcción, pruebas y puesta en marcha para comprobar que fueron adecuadamente cerrados y no dieron lugar a ninguna incidencia relacionada con el cumplimiento de las funciones de seguridad.

— *Revisión del proceso de cambios modificadores*, consistente en la revisión de las modificaciones de diseño implantadas durante las fases de pruebas, puesta en marcha y explotación de la central y del proceso seguido en cada momento para control de estas modificaciones, al objeto de detectar posibles deficiencias, en aspectos relacionados con la seguridad, introducidas con estos cambios.

Como acciones derivadas del programa AEOS se identificó la necesidad de hacer un rediseño de los sistemas de distribución de corriente alterna, de refrigeración esencial y de ventilación del edificio de emergencia, así como la revisión y modificación del sistema de protección del reactor en lo que se ha visto afectado por los rediseños. Estos rediseños han implicado modificaciones importantes en los sistemas correspondientes, lo que ha llevado a la revisión de las especificaciones de funcionamiento asociadas. Los rediseños fueron implantados, probados y puestos en marcha durante la recarga de 1999.

Durante el año 1996, se efectuó un programa de pruebas complementarias como consecuencia de la revisión de los dossieres de puesta en marcha y paso a explotación, que, como se ha señalado anteriormente, es una de las áreas del programa AEOS. Esta revisión se realizó comparando con un programa de pruebas tipo definido por el suministrador principal, en base a la experiencia adquirida en las sucesivas puestas en marcha de centrales y a la normativa actual. La mayor parte de las pruebas se realizaron en octubre del mismo año, durante la parada para recarga.

Durante el periodo de desarrollo y ejecución del programa, y con el fin de disponer de un margen para garantizar suficientemente la seguridad de la central frente a potenciales nuevos hallazgos, se decidió mantener mediante limitaciones operacionales unas restricciones operativas, como la reducción en los tiempos de inoperabilidad permitidos en las especificaciones de funcionamiento. Estas limitaciones se han mantenido, o se mantendrán, unas hasta la implantación de los rediseños y otras hasta la entrada en vigor de la nueva edición de las especificaciones de funcionamiento. Esta medida introdujo un margen de seguridad considerable, estimándose suficiente para que el programa AEOS pudiera realizarse sin interrumpir la operación a potencia de la central.

En el transcurso del programa, surgieron numerosos temas que fueron abordados abriendo 19 áreas de estudio.

Entre las mejoras introducidas en el conocimiento del estado de la central se encuentra poder disponer

de dossieres de los sistemas de seguridad, lo que constituye uno de los resultados finales del AEOS de mayor importancia.

2.2. Actividades del CSN en relación con el seguimiento del programa

Debido a la envergadura de las actividades a realizar, previo a la iniciación del AEOS, la Subdirección de Centrales Nucleares emitió la guía de evaluación *Propuesta de actividades a realizar por el CSN en relación con el Análisis de Experiencia Operativa y Sistemas (AEOS) de la central nuclear de Trillo*, en la que se organizan las tareas de las Áreas de la Dirección Técnica y se establecen propuestas de fechas de inicio y fin de aquéllas.

El CSN ha realizado un trabajo continuo de seguimiento del programa AEOS, además de la vigilancia y control de la operación similar a la que realiza con otras centrales.

El seguimiento del programa AEOS se ha llevado a cabo de las siguientes formas:

— Seguimiento directo del desarrollo del programa por la inspección residente en la central de Trillo (dos personas). La inspección residente, que realiza su trabajo diario en la central, es la más idónea para este seguimiento, por su conocimiento detallado y directo de la central y su cercanía a los problemas que puedan surgir. Después de la reunión semanal del grupo de seguimiento de la central, un responsable del mismo comunicaba a la inspección residente todas las incidencias detectadas, de modo que ésta pudiera tomar las acciones que considerara oportunas según afectara o no a la seguridad o a la continuación de la operación. La inspección residente comunicaba diariamente a la Dirección Técnica del CSN el estado de las actividades y los asuntos que consideraba más relevantes.

— En paralelo a esto, la central enviaba al CSN mensualmente un informe sobre el desarrollo del programa AEOS, que inicialmente incluía las hojas de incidencias detectadas. Posteriormente, estas hojas pasaron a enviarse semanalmente, separadas del informe mensual para ser evaluadas por el CSN. El seguimiento por parte del CSN de estas deficiencias se ha hecho de forma general mediante revisión de los informes mensuales y de las hojas de incidencias, y mediante inspecciones que se reflejan en las correspondientes actas, en las cuales se ha revisado la documentación generada en el proceso y se han analizado una por una las deficiencias para verificar la idoneidad del análisis de seguridad realizado previamente por la central. Muchas de las deficiencias fueron de carácter documental, debiéndose a discrepancias entre documentos de detalle.

— Desde 1996 se han realizado más de 20 inspecciones al desarrollo del programa AEOS, levantando otras tantas actas de inspección, además de numerosas auditorías a la realización de pruebas, o cálculos de diseño, derivados del propio programa. Se han elaborado más de 30 informes internos y mantenido numerosas reuniones con la central para agilizar el proceso y esclarecer alguna situación con información inmediata. Las deficiencias detectadas de mayor trascendencia fueron evaluadas en profundidad por los especialistas del CSN, reflejándose en los correspondientes informes.

3. Modificaciones más importantes implantadas en la central: rediseños

Se describen a continuación las modificaciones de mayor envergadura que se han implantado en la central como consecuencia de la revisión efectuada en el marco del programa AEOS.

3.1. Rediseño del sistema de refrigeración esencial (VE)

El sistema VE fue rediseñado con el fin de adaptarlo a las necesidades de la planta y a los requisitos del diseño original.

Las principales modificaciones se tradujeron en dos tipos de cambios. Por un lado, se establecieron nuevos caudales en el cambiador de refrigeración de componentes (TF/VE) en los diferentes modos de operación postulables. Por otro lado, se establecieron mejoras de diseño tales como:

— Sustitución de válvulas de retención.

— Control automático de la línea de recirculación de la bomba de la redundancia cuarta del sistema.

— Control por temperatura de los ventiladores de las torres de refrigeración.

— Instalación de líneas de *by-pass* a las torres de refrigeración con válvulas de aislamiento motorizadas.

— Instalación de bridas aisladoras en la descarga de las bombas.

— Montaje de conexiones de vaciado de las piscinas.

— Instalación de compuertas de aislamiento entre piscinas.

— Instalación de un enclavamiento para las bombas VE50/70.

— Motorización de las válvulas de interconexión de los lazos.

— Inspecciones y pruebas en el sistema de limpieza de los cambiadores (VL50).

— Montaje de venteos y drenajes en el sistema.

— Eliminación del agua de refrigeración del VE a las unidades de ventilación UV41/43.

— Protección contra heladas de determinados tramos de tubería.

Las pruebas de puesta en marcha del sistema rediseñado fueron seguidas por inspectores del CSN y validaron los cambios efectuados.

3.2. Rediseño del sistema de aire acondicionado del edificio de emergencias (UV3)

Debido a las deficiencias detectadas en este sistema y con objeto de adecuarlo a la norma KTA 3601, en su edición 06/90, la central de Trillo realizó cuatro modificaciones en el sistema UV-3.

En primer lugar, se incorporaron nuevas máquinas enfriadoras para las unidades de ventilación de emergencia UV31/32/33/34-B del edificio ZX, que incluye:

— Instalación de máquinas enfriadoras en los equipos de refrigeración de aire para accidente (unidades B).

— Las tuberías de suministro y retorno de agua de refrigeración del sistema RS se conectaron a los condensadores de las máquinas enfriadoras. Las máquinas enfriadoras arrancan mediante subgrupo funcional por alta temperatura en las salas de electrónica del edificio, al igual que los ventiladores de las unidades B y las bombas de recirculación del sistema RS.

— Para el objetivo anterior, se sustituyeron los serpentines existentes por máquinas enfriadoras en las unidades B del sistema de ventilación UV-3 que son refrigeradas por el sistema RS. La clasificación eléctrica y sísmica de los componentes necesarios para el funcionamiento de las máquinas garantiza el mismo en todas las situaciones operacionales.

En segundo lugar, se introdujeron mejoras en la ventilación de los armarios GT/GU/GV/GW-01/02, LM-11/42 y en las salas de los diesel de emergencia. Esta modificación de diseño incluye:

— Instalación de toberas de largo alcance en los tramos de los conductos de impulsión de las unidades B de emergencia que discurren por las salas diesel, en las proximidades de los armarios GT/GU/GV/GW-02.

— Interconexión del conducto de suministro de la unidad B con el ramal del conducto de suministro de la unidad A en cada sala del diesel.

— Cambio de posición de la actual compuerta de regulación del ramal de suministro a la sala diesel de la unidad A al correspondiente conducto de suministro de la unidad B.

— Las cinco rejillas existentes en este ramal de suministro de la unidad A fueron desmontadas y/o tapadas. En su lugar se instalaron cinco toberas de largo alcance sin compuerta de regulación individual.



Figura 3. El programa AEOS ha permitido revisar todos los aspectos básicos de la seguridad de la central de Trillo.

— En cada conducto de retorno de la unidad B en las salas del diesel se instalaron nuevas rejillas de retorno para aumentar el caudal de retorno en el modo de emergencia.

— Instalación de doce silenciadores de celdillas en los conductos de suministro y retorno de la sala de control de emergencia.

En tercer lugar, se modificaron las compuertas cortafuegos de los plenums de hormigón del sistema UV3, que incluye:

— Instalación en las cuatro redundancias de dos puertas de acceso en los conductos de impulsión y retorno respectivamente.

— Modificación en las seis compuertas cortafuegos situadas en los colectores de impulsión y retorno.

En cuarto lugar, se realizaron cambios en los motores de los ventiladores y se modificó la carcasa en las unidades B.

El rediseño fue validado con los resultados obtenidos tras la realización de las pruebas durante la parada para recarga.

Las pruebas de puesta en marcha del sistema rediseñado fueron seguidas por inspectores del CSN.

3.3. Rediseño del sistema de corriente alterna de salvaguardia y emergencia (REDECA)

Las modificaciones realizadas en el sistema de corriente alterna han sido de gran envergadura, afectando, por redundancia y en resumen, a lo siguiente:

— Se han incorporado nuevos transformadores de 10 kV a 660 V y 380 V adicionales en paralelo a los existentes.

— Se han instalado barras de distribución de 660 V y 380 V nuevas, adicionales a las existentes.

— Se ha redistribuido la carga entre las barras nuevas y existentes.

— Se ha mejorado el cableado para garantizar las tensiones mínimas requeridas por las cargas.

— Se ha modificado el punto de medida de inicio de la transferencia a la red de reserva (132 V) pasándolo de 27 kV a las barras de 10 kV.

— Se ha establecido separación del control de los reguladores de tensión de los transformadores auxiliares (BT01 y BT02).

— Se ha aumentado la capacidad de barras de distribución del sistema de emergencia.

En lo relativo a la instrumentación y control, las modificaciones emprendidas en el ámbito del rediseño del sistema eléctrico de corriente alterna se encaminan a evitar el arranque de grupos de motores cuya suma de potencia sea excesiva. Para ello, fue necesario introducir modificaciones de diseño dirigidas a evitar el arranque simultáneo de accionamientos activados por el sistema de protección del reactor en caso de accidente. El programa de cargas se completó con enclavamientos adicionales que afectan a accionamientos activados operacionalmente cuyos criterios de arranque se alcanzan, bien como consecuencia del accidente o independientemente de él, y con la desconexión de algunos accionamientos grandes que funcionan en operación normal sin ser necesarios para dominar el accidente, afectando a:

— La sección lógica del sistema de protección del reactor.

— El nivel de mando de prioridad.

— El mando operacional.

Estas modificaciones tuvieron como fin establecer las nuevas señales del sistema de protección del reactor, así como los enclavamientos necesarios para cumplir los fines en relación, por una parte, al programa de cargas para accidentes con pérdida de refrigerante (LOCA) y con alimentación eléctrica exterior, y por otra al programa de cargas en la operación con corriente de emergencia (pérdida de energía exterior).

Asimismo, se han establecido las modificaciones necesarias para posibilitar la realización de las pruebas periódicas correspondientes.

Los resultados de la prueba realizada durante la parada para recarga validaron el rediseño.

Las pruebas de puesta en marcha del sistema rediseñado fueron seguidas por inspectores del CSN.

Los rediseños descritos de los sistemas VE, UV3 y REDECA fueron aprobados por el CSN con la apreciación favorable del resultado de las pruebas de puesta en marcha, mediante carta de referencia CNTRI-TRI-99-24, fechada el 16 de abril de 1999.

4. Resumen y conclusiones

Tras la evaluación final realizada, se considera que se han cumplido los objetivos del programa, aunque quedan algunos aspectos que se deben completar. Así se lo ha indicado la Dirección Técnica del CSN a la central de Trillo.

Las deficiencias detectadas durante el AEOS han sido subsanadas de forma definitiva durante la parada para recarga que tuvo lugar en febrero de 1999, a excepción de modificaciones menores que se finalizarán en las próximas recargas.

Se han abordado seis grandes áreas de revisión, así como 19 áreas de estudio sobre temas específicos; se han abierto 377 hojas de incidencias (incluyendo las cuatro redundancias); y se han realizado 153 modificaciones de diseño y revisado la totalidad de los soportes de los sistemas de seguridad.

El cierre de las hojas de incidencia, ya evaluadas y en las que se ha identificado la necesidad de la implantación de modificaciones de diseño, se realizará una vez implantadas éstas, lo cual se ha previsto ir realizando en las tres próximas recargas de 2000, 2001 y 2002, tal y como sigue: para la recarga del año 2000 está previsto el cierre de 23 hojas de incidencia con la realización de 20 modificaciones de diseño; para las recargas de 2001 y 2002, se prevé el cierre de tres hojas de incidencia con la realización de tres modificaciones de diseño.

Adicionalmente, están pendientes de implantación otras tres modificaciones ligadas al AEOS, pero no asociadas a hoja de incidencia.

Los resultados obtenidos se pueden resumir de la siguiente forma:

— Se han revisado todos los aspectos básicos de la seguridad de la central, incluyendo: criterios generales de seguridad, el diseño propio de cada sistema de seguridad, cierre de pendientes de la construcción de la central, pruebas y puesta en marcha de la misma, y aspectos relevantes de la explotación, incluyendo la experiencia operativa.

— Se han efectuado los rediseños de los sistemas UV3, VE y del sistema eléctrico de salvaguardia y emergencia, corrigiéndose las deficiencias detectadas en los mismos, con modificaciones de diseño de gran envergadura.

— Se ha adecuado el concepto de redundancia por sustitución de la cuarta redundancia por fallos de las otras tres.

— Se han identificado y corregido numerosas discrepancias documentales.

— Se han revisado y recopilado las bases de diseño de los sistemas de seguridad en unos informes completos y contrastados, que han servido para la elaboración de la revisión general de las especificaciones de funcionamiento de la central nuclear de Trillo (aprobada por resolución de la Dirección General de la Energía de 19 de febrero de 1999), así como para el programa de revisión general del Estudio Final de Seguridad, en proceso de licenciamiento.

— Ha mejorado el conocimiento del diseño de la central, por el personal de la organización de Trillo mediante la participación directa en todos los trabajos del AEOS.

Bo Lindell*

Historia de los primeros cien años de la protección radiológica

El autor de este artículo, prestigioso experto de la protección radiológica, expone a lo largo de estas páginas los principales hitos de la historia de la radioprotección, desde 1895 hasta cien años después. Un periodo, plagado de descubrimientos, en el que se fueron gestando los principios internacionales de protección frente a los efectos de las radiaciones ionizantes.

1. Introducción

Antes del año 1895, nadie sabía de la existencia de las radiaciones ionizantes y de las sustancias radiactivas. Sin embargo, las propiedades nocivas de las sustancias radiactivas se habían dejado entrever mucho antes de que Becquerel descubriera la radiactividad. Esto sucedió ya en el siglo XV en Erzgebirge, donde se extraía plata de las minas, y posteriormente el uranio, en lo que hoy es la frontera entre la República Checa y Alemania. A los mineros les azotaba una enfermedad pulmonar que conocían como *Bergsucht*. A principios del siglo XVI, fue nombrado jefe médico un joven alemán, Georg Bauer (1494-1555), que se hizo conocer por la versión latina de su nombre, Agricola. En su magno tratado *De re metallica* Bauer describía las condiciones de trabajo en las minas de plata. Inventó unos métodos de ventilación de las minas mediante ingeniosos fuelles accionados por caballos o por la fuerza del agua. También animaba a las mujeres de los mineros a hacer filtros respiratorios de finas gasas para sus maridos [3]. Dado que ahora sabemos que la *Bergsucht* era el cáncer del pulmón, provocado por la inhalación de los descendientes del radón, Agricola parece haber sido el primero en abordar el tema de la protección radiológica.

Al descubrimiento de los rayos X por Röntgen lo siguieron el descubrimiento de la radiactividad por Becquerel, el descubrimiento del polonio por Marie Curie, el descubrimiento del radio por Marie y Pierre Curie, la teoría de los fotones de luz de Planck, la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico, el descubrimiento de las radiaciones alfa, beta y gamma, el descubrimiento de los aspectos más importantes de las radiaciones naturales, incluidos los rayos cósmicos, el descubrimiento por Rutherford del núcleo del átomo y el modelo atómico de Bohr. En un periodo de veinte años cambió radicalmente nuestra visión de las leyes físicas.

Los rayos X rápidamente comenzaron a utilizarse ampliamente porque costaba poco experimentar con ellos. El radio, por el contrario, era muy costoso, lo que limitaba su uso a los grandes hospitales. Un ejemplo de la rápida propagación de los equipos de rayos X nos lo proporciona el joven Winston Churchill [4]. En el verano de 1897, sólo año y medio después del descubrimiento de Röntgen, Churchill participaba como corresponsal de guerra en una expedición británica enviada para castigar a unas tribus que se habían sublevado en la parte noroccidental de la India, próxima a la frontera con Afganistán. Un teniente coronel llamado Lamb había sufrido un balazo en una pierna. Se mandó traer una unidad móvil de rayos X para localizar la bala antes de proceder a su extracción; desafortunadamente, el equipo se dañó en el transporte y no pudo utilizarse.

Este episodio lo narra Churchill en su primer libro, *La historia de la fuerza expedicionaria de Malakand*, que escribió en la India antes de las navidades del año 1897. Parece haber considerado la presencia de una unidad móvil de rayos X en esa aislada región, tan poco tiempo después del descubrimiento de

* Swedish Radiation Protection Institute.

Röntgen, como la cosa más natural del mundo, y no dejó constancia de haberse impresionado por este nuevo y excepcional invento [4].

2. Primeros pasos en protección

En los primeros años, y hasta más o menos 1950, todos los efectos nocivos de las radiaciones se suponían deterministas y, por tanto, se asociaban con dosis superiores a un valor de umbral. Las primeras fuentes de radiaciones tenían un bajo poder de penetración o resultaban peligrosas principalmente a distancias cortas, como era el caso del radio. Así, el primer efecto nocivo se observó en la piel, con daños que podían ser graves y requerir la amputación de las manos o brazos. La otra condición grave que se observó durante esta primera etapa fue la aparición de daños en los órganos generadores de la sangre, lo que también constituía una amenaza para la vida.

Las precauciones básicas a tomar para protegerse se reconocieron en poco tiempo. El ejemplar de la revista americana *Western Journal* del día 12 de diciembre de 1896 contenía un artículo de Wolfram Fuchs, quien ofrecía a sus lectores algunas sencillas recomendaciones sobre cómo evitar daños por las radiaciones, a saber: procurar que la exposición sea lo más breve posible; no colocar el tubo de rayos X a una distancia inferior a 30 centímetros del cuerpo; aplicar vaselina en la piel, dejando una película en la parte expuesta.

El uso descuidado e ignorante de los rayos X en diagnósticos causaba lesiones debidas a las radiaciones a médicos y enfermeras, que metían sus manos y brazos en el haz primario y que también se exponían a las radiaciones dispersas procedentes del paciente. En 1913 se ofrecieron unas recomendaciones bastante ambiciosas sobre la protección radiológica, publicadas por el *Deutsche Röntgen Gesselschaft*. De haberse seguido, aquellas recomendaciones habrían evitado numerosas lesiones y muertes. El número de heridas llegó a un nivel máximo durante la guerra, cuando se desplegó una cantidad importante de equipos de campo primitivos.

En Inglaterra, estos hechos inquietantes llevaron a la British Röntgen Society a publicar en 1915 una declaración sobre las precauciones a tomar. En 1921, la misma sociedad creó el Comité de Protección contra los Rayos X y el Radio, presidido por sir Humphrey Rolleston. Ese comité publicó un primer informe en julio de 1921 y un segundo memorándum en diciembre del mismo año [42][48].

A principios de los años veinte se prepararon directrices sobre la protección radiológica en varios países. En 1922, se creó en Noruega un grupo de trabajo para elaborar unos requisitos en la materia. En Italia y en la Unión Soviética se publicaron códigos de protección en 1925, y en Alemania y Estados Unidos varios grupos trabajaban en la elaboración de recomendaciones en materia de protección radiológica. Dinamarca había comenzado muy temprano: en 1907 ya se requería una licencia para manejar los equipos de rayos X y en 1930 el país disponía de una ley que regulaba su uso [48].

3. Creación y actuaciones iniciales de la ICRP

El tema que dominaba el Primer Congreso Internacional sobre Radiología, celebrado en Londres en 1925, fueron las medidas y las unidades. Por este motivo, el congreso estableció el organismo que se conoce hoy como la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (ICRU), aunque en aquel momento se bautizó con el nombre de Comité Internacional de Unidades de Rayos X. Su homólogo, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), que nació tres años más tarde, también se concibió durante el congreso de Londres.

Cuando nació la ICRP en 1928, en Estocolmo, se le puso el nombre de Comité Internacional para la Protección contra los Rayos X y el Radio. Su nacimiento suscitó menos interés que las actividades realizadas por la comisión de unidades, que ya recomendaba el uso de una unidad de la *cantidad de rayos X*, basada en la ionización del aire. Esta unidad se bautizó con el nombre de *röntgen* y, en aquel entonces, se denotaba con la letra *r*, en minúscula. Era más una medida del concepto poco preciso de la *cantidad* de radiaciones incidentes que una medida de lo que ahora conocemos por *dosis*. Por ese motivo, todavía tenemos el problema educacional del uso del término dosis para referirnos a una cantidad significativa.

La primera ICRU tenía 24 miembros, lo que ilustra el interés que suscitaban las medidas y unidades. La primera ICRP se componía de tan sólo siete miembros. La fuerza motriz de esta Comisión era el doctor G.W.C. Kaye, del Laboratorio Nacional Británico de Física. Kaye había sido clave en la organización del congreso de Londres, y aunque se nombró presidente a Rolf Sievert, de 32 años, en honor al país anfitrión, fue Kaye quien realmente dirigió la reunión en calidad de secretario honorífico. Un tercer miembro, que estaba destinado a convertirse en uno de los protagonistas de mayor influencia en el futuro, fue el joven Lauriston Taylor, de la Oficina Estadounidense de Normas [47].

Las recomendaciones emitidas por la ICRP a raíz del congreso de Estocolmo, como consecuencia de una propuesta británica, identificaban el daño en potencia contra el cual había que protegerse en los siguientes términos: "Los efectos conocidos contra los cuales se deberá proporcionar una protección son: (a) lesiones en los tejidos superficiales, (b) trastornos en los órganos internos y cambios en la sangre" [39].

Las recomendaciones no incluían ningún límite de dosis, y se referían a la restricción de las horas

de trabajo y a la necesidad de descansos prolongados. Había también recomendaciones en materia de barreras protectoras y manejo seguro de las instalaciones de rayos X, así como sobre la protección contra el radio mediante el blindaje y el manejo remoto.

El uso incorrecto del radio se había convertido en algo cada vez más extendido. Se utilizaban compuestos luminosos que contenían radio en las pinturas empleadas para las esferas de los instrumentos y para las miras de los rifles, sobre todo durante la guerra. Una empresa americana, la US Radium Corporation de Nueva Jersey, empleaba a cientos de mujeres que aplicaban estas pinturas luminosas. Tenían la costumbre de chupar sus pinceles para sacarles punta, ingiriendo pequeñas cantidades de radio cada vez que lo hacían. Con el tiempo, las grandes cargas de radio acumuladas provocaron en estas mujeres sarcomas óseos y otros efectos mortales. Cuando se conocieron estos hechos, el destino de las pintoras de esferas se convirtió en un tema de gran repercusión.

El radio se consideró primero fuente de salud y de curación, hecho éste que dio lugar a un uso extendido e incorrecto de productos de consumo comercializados bajo falsas premisas. Uno de los peores ejemplos fue la pócima de curandero *Radithor*, una solución del radio de la que se llegaron a vender 400.000 frascos entre 1925 y 1930. Se decía que este producto curaba unos 150 trastornos, incluidos problemas de estómago, impotencia y alta presión sanguínea [29]. La experiencia del uso incorrecto del radio facilitó información suficiente para el establecimiento de unos límites de incorporación. A partir de esta información, Robley Evans desarrolló su recomendación, publicada en el *Manual 27* de la Oficina Estadounidense de Normas en 1941: una carga corporal de radio-226 superior a los 0,1 microgramos debería considerarse nociva [54].

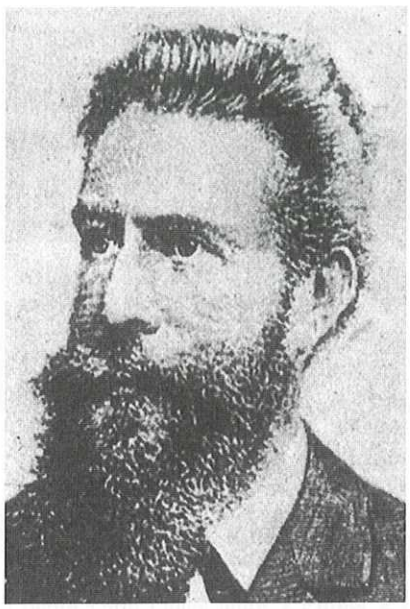


Figura 1. Wilhelm Conrad Röntgen.

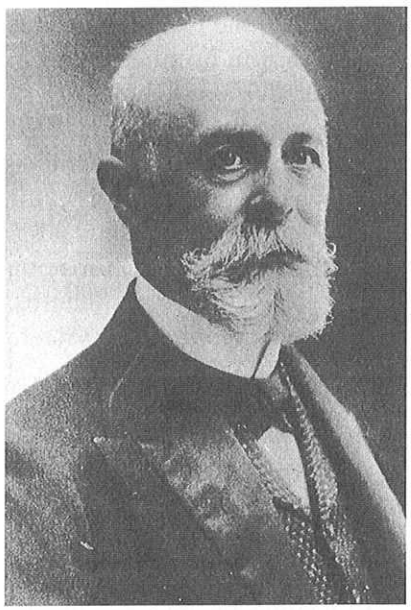


Figura 2. Henri Becquerel.

Durante los años 20 se propusieron varios límites de dosis, aunque el concepto mismo de dosis aún no estaba maduro. Un valor de referencia era la *dosis de eritema dermatológico*, es decir, la dosis de rayos X que provocaría el eritema de la piel. En 1924, el físico americano Arthur Mutscheller había propuesto una *dosis de tolerancia* para los que trabajaban con los rayos X, expresándola en términos de la dosis de eritema dermatológico y en 1925 Sievert sugirió, de forma independiente, más o menos esta misma dosis. Tras el acuerdo internacional sobre la unidad de exposición *r* en 1928, se realizaron esfuerzos por traducir la dosis de eritema dermatológico en medida de la ionización. Varios autores sugirieron que una dosis de eritema dermatológico debería corresponder a unos 600 r. Estos supuestos formaron la base del límite de 0,1 r/día, que recomendó en 1934 el Comité Asesor Estadounidense para la Protección contra los Rayos X y el Radio, establecido en 1929 [49].

4. La década de los treinta

La ICRP se reunió en París en 1930 y en Zürich, en 1934. Durante esta última reunión se recomendó una dosis de tolerancia de 0,2 r/día, la primera limitación de dosis cuantitativa sugerida por la Comisión. En términos actuales, esto corresponde a 500 mSv en un año, que se puede comparar con el límite actualmente establecido por la Comisión, de 20 mSv al año. La ICRP se reunió una vez más antes de la II Guerra Mundial, en Chicago en el año 1937. La Comisión no realizaba actividad alguna entre reuniones, que siempre se celebraban con ocasión del Congreso Internacional sobre Radiología [48].

Existe un documento muy significativo elaborado durante los años treinta, que ya prácticamente ha pasado al olvido. En 1931, la Liga de Naciones creó un comité para estudiar los riesgos para la salud del uso de fuentes de radiaciones. Este comité solicitó a dos radiólogos alemanes, Hermann Wintz y Walter Rump, la elaboración de un informe sobre el tema. Ese informe se publicó en 1931 en inglés, como documento de la Liga de Naciones (CH-1054) con el título *Medidas protectoras contra los peligros del uso del radio, el röntgen y los rayos ultravioletas*. Se adelantaba mucho a su tiempo y aún hoy constituye una excelente revisión con muchos buenos consejos [55].

Durante los años comprendidos entre 1932 y 1939 hubo una nueva ola de descubrimientos científicos que cambiaron el desarrollo del

sector, incluso más que los realizados por Röntgen, Becquerel y la primera generación de los Curie. Tras el descubrimiento del neutrón por James Chadwick, en 1932, Frédérick Joliot e Iréne Curie lo utilizaron en 1934 para crear la radiactividad artificial, mediante la producción del fósforo radiactivo. Al igual que Enrico Fermi en Roma, buscaban la posibilidad de crear elementos transuránidos al agregar neutrones al uranio. Sin darse cuenta, todos ellos provocaron la fisión nuclear, conclusión que sacó la química alemana Isa Noddack, sin que nadie la creyera. Fueron necesarias la destreza y larga experiencia química de Otto Hahn en Berlín para que él se convenciera, en 1938, de que los misteriosos productos con las propiedades químicas del bario que había encontrado tras haber irradiado el uranio con neutrones eran de hecho bario. La interpretación física de este descubrimiento, la fisión nuclear, fue ofrecida por su antigua compañera de trabajo Lise Meitner, que trabajaba entonces en Suecia, y su sobrino Otto Robert Frisch. La humanidad había llegado a la era nuclear con importantes requisitos en materia de protección radiológica.

El 19 de enero de 1939, el físico danés Niels Bohr llegó a Nueva York, entusiasmado por la noticia del descubrimiento de la fisión nuclear por Otto Hahn. La noticia se extendió con gran rapidez, emocionando, pero también preocupando, a los físicos americanos, algunos de los cuales eran inmigrantes procedentes de Europa, refugiados de las dictaduras alemana e italiana. Fermi, de Italia; Szilard, Teller y Wigner, de Hungría; y Rabi, de Polonia, estaban tan entusiasmados como Bohr, pero también preocupados porque se habían dado cuenta de algo que aquél ni siquiera quería considerar. Si la fisión nuclear producía un mayor número de neutrones que el necesario para provocarla, es decir, una multiplicación neutrónica, se produciría una reacción en cadena incontrolada y una enorme explosión. Cabía pensar en una bomba atómica. ¿Qué sucedería si los científicos alemanes, capitaneados por Werner Heisenberg, llegaran a producir tal bomba para Adolf Hitler? [38].



Figura 3. Irene Joliot Curie y Albert Einstein, en Princeton en 1948.

Tanto Fermi como Szilard pronto encontraron la multiplicación neutrónica en sus experimentos, pero querían mantener en secreto los resultados. Sin embargo, en el número de la revista *Nature* del 22 de abril, Frédérick Joliot y sus colaboradores en París informaron del grado de multiplicación neutrónica: por término medio 3,5 neutrones por fisión.

El temor a los intereses alemanes no era infundado. Dos jóvenes científicos alemanes de Hamburgo, Paul Harteck y Wilhelm Groth, leyeron el artículo de Joliot, y el día 22 de abril de 1939 escribieron al Ministerio de la Guerra alemán, advirtiendo de la posibilidad de desarrollar un arma nuclear. El mismo día el conocido físico alemán Georg Joos también escribió al Ministerio de la Educación, informando del artículo de Joliot.

En Estados Unidos, Szilard y Wigner persuadieron a Albert Einstein para que escribiera su famosa carta al presidente Roosevelt, advirtiéndole de la posibilidad de una bomba atómica alemana. La carta no tuvo ningún efecto inmediato, pero sí provocó una avalancha que daría lugar a la creación del Distrito de Ingeniería de Manhattan (conocido normalmente como el Proyecto Manhattan), el nombre en código del enorme complejo industrial diseñado para producir armas nucleares antes que los alemanes. Como parte de este esfuerzo, se construyeron y operaron reactores productores de plutonio en Hanford y se construyeron grandes plantas de separación de isótopos en el emplazamiento Clinton (ahora Oak Ridge), con el fin de producir uranio-235 de calidad armamentística. Los trabajos realizados anteriormente por los británicos, bajo el nombre en código de *aleaciones de tubos*, animaron a los americanos, y pronto se integraron en un esfuerzo conjunto [38].

En Alemania, las investigaciones nucleares ya estaban bajo control militar en octubre de 1939, pero por distintos motivos avanzaron lentamente y no llevaron a ningún reactor en operación ni a la producción de cantidades significativas de uranio-235 separado [37]. Tanto en Alemania como en Estados Unidos, los científicos eran muy conscientes de los riesgos que suponía el manejo de los productos de fisión y del plutonio, y tomaron medidas poco usuales para proteger a los trabaja-

dores, recordando el destino trágico de las pintoras de esferas y de otros expuestos internamente al radio.

En el marco del Proyecto Manhattan se estableció una División Sanitaria dirigida por el radiólogo de San Francisco Robert Stone. Esta organización contaba con secciones de supervisión médica, investigaciones biológicas y protección radiológica, esta última conocida por el nombre de física sanitaria ya que, a diferencia de las otras dos, implicaba la realización de mediciones y evaluaciones físicas. El hombre que estaba a cargo de estos trabajos en Oak Ridge era Karl Z. Morgan. Entre el personal clave de los otros emplazamientos se encontraba el físico británico Herbert Parker, en Hanford, y Louis Hempelmann, en Los Alamos.

La normativa de la que se disponía en aquellos tiempos consistía en la recomendación de 1934 del Comité Asesor Estadounidense, de una dosis de tolerancia de 0,1 r/día para exposiciones externas, y en una recomendación emitida en 1941 por un grupo de trabajo de la Oficina Nacional de Normas, que consideraba insegura una cantidad superior a 0,1 microgramos de radio en el organismo. Se suponía que la correspondiente actividad alfa también podría indicar el nivel de inseguridad para el plutonio. Stone no creía que la dosis de tolerancia concediera un gran margen de seguridad y cambió la terminología acuñando el término *dosis máxima permisible*, insinuando así que una dosis inferior podría ser mejor.

5. Cambios tras la II Guerra Mundial

Las bombas que se produjeron para afrontar la amenaza alemana se lanzaron finalmente sobre Hiroshima y Nagasaki, poniendo fin a la guerra. Aquellos acontecimientos catastróficos, con el inmenso sufrimiento humano que causaron y con la demostración de su poder destructivo, han tenido posteriormente una gran influencia en la actitud pública ante las radiaciones ionizantes. Es consuelo baldío el que el destino de los supervivientes de las dos ciudades nos haya proporcionado la información más fiable de los efectos cancerígenos de las radiaciones.

Para la protección radiológica no iba a haber ninguna vuelta a la normalidad tras la guerra. Antes de la contienda, la tarea de la protección radiológica era proteger a los médicos, enfermeras y pacientes de los efectos nocivos de los rayos X y del radio. Los comités creados para ese propósito se componían de médicos y físicos experimentados en el uso médico de las fuentes de radiaciones. Después de la guerra, y ya a principios de una guerra fría, había otros nuevos interesados con recursos más poderosos. Estaban involucrados los organismos gubernamentales y también una nueva industria armamentística. Se restringió la difusión de la información.

En Estados Unidos se creó una nueva organización estatal, la Comisión de la Energía Atómica (AEC), para cubrir todos los aspectos de las actividades nucleares, pero ante todo para desarrollar nuevas armas nucleares. En 1946, el antiguo Comité Asesor Estadounidense se volvió a configurar, ya bajo las siglas NCRP (su nombre actual es Consejo Nacional de Protección y Mediciones Radiológicas), bajo la presidencia de Lauriston Taylor.

El NCRP ha tenido, y sigue teniendo, varios subcomités. El físico Gioacchino Failla, del New York Memorial Hospital, presidía el dedicado a los límites de la exposición externa, mientras que Karl Morgan presidía el de exposiciones internas. El subcomité de Failla decidió reducir la dosis máxima permisible recomendada para los trabajadores de 0,1 a 0,05 r/día laboral, y expresarla en términos de 0,3 r/semana. Uno de los motivos de esta reducción fue la creciente evidencia de que las radiaciones también podían causar daños hereditarios.

El subcomité de Morgan desarrolló unas recomendaciones sobre límites derivados para su aplicación a las concentraciones máximas permisibles de sustancias radiactivas en el aire y el agua. Estos trabajos continuaron durante muchos años y no se completaron hasta 1953.

En 1949 expertos de Estados Unidos, el Reino Unido y Canadá se reunieron con ocasión de la Primera Conferencia Tripartita, en Chalk River, para discutir la limitación de las dosis y, por primera vez, de las dosis públicas. A esta conferencia la siguieron dos más, en Harwell en 1950 y en Harriman, Nueva York, en 1953. En esta última, se acordó el límite de 1,5 r/año para los miembros individuales del público, y un límite de exposición al radón en las minas de 100 pCi/l, correspondiente a 12 WLM/año (el límite recomendado actualmente por la ICRP es un valor medio de 4 WLM/año en cinco años y un valor máximo de 10 WLM en cualquier año).

Inmediatamente después de la guerra, el Consejo de Investigaciones Médicas del Reino Unido creó un comité de protección radiológica, que en 1946 estableció un Panel de Dosis de Tolerancia, presidido por el catedrático W.V. Mayneord. Esto tuvo una influencia sobre las deliberaciones durante el sexto Congreso Internacional sobre la Radiología, que tuvo lugar en Londres en 1959 con Ralston Paterson como presidente. Durante ese congreso se esperaba la presentación de un informe del presidente del congreso anterior (celebrado en Chicago en 1937), Arthur Christie. En 1947 Christie había contactado con Lauriston Taylor, solicitando un informe sobre el trabajo de la ICRP y de la ICRU. Al ser informado de que los únicos supervivientes de la primera y del comité ejecutivo de la segunda eran Taylor y Rolf Sievert, Christie les aconsejó y solicitó la reconstitución de los dos organismos. Paterson actuó en consecuencia y solicitó a Mayneord que trabajara con Taylor en la organización de las dos comisiones, que volvieron a nacer en su

forma actual. El primer presidente de la nueva ICRP fue Ernest Rock-Carling, con Lauriston Taylor como secretario [48].

Durante este periodo la guerra fría dio lugar a inquietudes entre el público por las pruebas a gran escala de armas en la atmósfera. La comunidad de la protección radiológica se dio cuenta de la necesidad conferir un nuevo enfoque a la protección radiológica.

6. La década de los cincuenta

Cuando se reunió la nueva ICRP en Londres en 1950, surgió la propuesta esperada de una dosis máxima permisible semanal de 0,3 r, en lugar de la antigua dosis de tolerancia de 0,2 r/día, que databa de 1934. Esta propuesta fue aceptada, pero las recomendaciones que surgieron de la reunión de Londres no encontraron una amplia difusión. En aquel entonces, la Comisión seguía reuniéndose para un único día de trabajo. Lauriston Taylor, que actuó cono secretario tanto de la ICRP como de la ICTU en Londres, continuó en su puesto de secretario de ICRU, pero cedió su cargo como secretario de la ICRP a Walter Binks inmediatamente después del congreso.

En Suecia, Rolf Sievert se iba interesando cada vez más por la radiación natural. Consideraba que sería difícil establecer un límite de exposición para el público en general sin conocer las dosis anuales que todo el mundo recibía de fuentes naturales. En estrecha colaboración con F.W. Spiers de Leeds, medía las radiaciones gamma procedentes del organismo humano, así como del suelo y de los materiales de construcción [40][44]. Un tema de disputa en aquellos tiempos era el contenido natural de radio en el cuerpo. Había dos evaluaciones que entraban en conflicto, una de John Hursh y A.A. Gates, de Rochester, y la otra de A. Krebs, del Institut für Biophysik Kaiser Wilhelm de Frankfurt am Main. Los valores de Krebs eran unas cien veces superiores a los de Hursh y Gates [45]. Las mediciones de cuerpo entero realizadas por Sievert demostraron que la principal fuente de las radiaciones gamma del organismo humano la constituía el potasio-40 y no los descendientes del radio, y que las estimaciones de Hursh y Gates eran correctas.

En 1952, Sievert, junto con George de Hevesy, inició una reunión conjunta de ICRP, ICRU y el Comité Conjunto de Radiobiología de la Unesco en Estocolmo [8]. Se trataba de una reunión singular, a la que asistieron prácticamente todas las figuras de importancia en el mundo de la protección radiológica. Hay una famosa fotografía de los participantes en la que se ve hombro con hombro a Harold Gray y Rolf Sievert, que dieron nombre a las posteriores unidades. Los principales temas de discusión fueron las dosis permisibles desde el punto de vista genético y la utilidad del recuento sanguíneo bajo condiciones normales de trabajo. El genetista Hermann Muller recomendó una limitación para la dosis *per cápita* en las gónadas menor a un total de 20 r durante los años reproductivos.

El siguiente Congreso Internacional sobre Radiología se celebró en Copenhague en 1953. Las recomendaciones de la ICRP de aquel periodo se revisaron en 1954, publicándose en 1955 como el *Suplemento nº 6* del *British Journal of Radiology*, un documento de 92 páginas que fue la primera *Publicación* real de la ICRP, pero que no estaba incluida en la posterior colección de publicaciones [20]. Este documento contenía recomendaciones de la Comisión e informes de los subcomités. La nueva terminología exigía la siguiente definición de *dosis permisible*: "Aquella dosis de radiaciones ionizantes que, a la vista de los conocimientos actuales, no se espera provoque daños corporales apreciables en la persona en ningún momento de la vida de ésta". El informe del subcomité I, presidido por el doctor Failla, incluía recomendaciones sobre dosis permisibles para varios órganos, correspondiendo los valores más bajos (0,3 rem/semana) a las gónadas y los órganos productores de la sangre. En la introducción de la Comisión, sin embargo, se leía que "habida cuenta de las evidencias incompletas en que se basan los valores, y el conocimiento de que determinados efectos de la radiación son irreversibles y acumulativos, se recomienda encarecidamente hacer todo lo posible por reducir al más bajo nivel posible las exposiciones a todos los tipos de radiaciones ionizantes". El informe del Subcomité II, presidido por Karl Morgan, presentó unas tablas con valores de corrientes máximas permisibles para unos 90 radionucleidos, resultado final del trabajo del subcomité de Morgan de la NCRP.

Durante el periodo 1950-56, Estados Unidos principalmente, pero también el Reino Unido y la URSS, llevaron a cabo una serie de explosiones de ensayo de dispositivos nucleares. La mayoría de estas explosiones eran pequeñas en comparación con lo que vendría más tarde, pero la serie de ensayos de EEUU de 1954, la Operación Castillo realizada en las proximidades del atolón de Bikini, fue excepcional. El 1 de marzo de 1954 esta serie se inició con la detonación —llamada Bravo— de una bomba de fusión reforzada con la fisión del uranio, que liberó cantidades de productos de fisión superiores en órdenes de magnitud a las de explosiones anteriores. Fue éste el ensayo que contaminó el buque atunero japonés *Dragón de la Suerte*, además de los habitantes de la pequeña isla de Rongelap.

Los residuos radiactivos de aquella explosión se pudieron medir en todo el mundo, y crearon una enorme ansiedad pública que tuvo consecuencias políticas. Tanto la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos [52] como el Consejo de Investigaciones Médicas

británico [50] publicaron sendos informes confirmando los riesgos de la radiación. La Asamblea General de las Naciones Unidas creó su comité científico UNSCEAR (Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas). En 1956, C.E. Miller y L. Marinelli pudieron medir el cesio-137 en el organismo humano, hecho que impresionó a todos los relacionados con la protección radiológica.

Además de su valioso texto principal, el informe del MRC (Consejo de Investigaciones Médicas), *Los peligros para el hombre de las radiaciones nucleares y asociadas*, contenía unos anexos particularmente importantes [50]. W.M. Court Brown y Richard Doll escribieron sobre el riesgo de la leucemia, tal como se podía evaluar de observaciones en los supervivientes japoneses y de estudios de pacientes tratados con rayos X para la espondilitis anquilosémica. F.W Spiera revisaba el conocimiento de las dosis procedentes de las fuentes naturales de radiaciones. S.B. Osborn y E.E. Smith daban los primeros informes sobre dosis genéticamente significativas procedentes de exposiciones médicas y profesionales.

La primera Conferencia de la ONU sobre el uso pacífico de la energía nuclear (Átomos para la Paz) se celebró en Ginebra en 1955. Esta conferencia marcó el nacimiento de la industria nucleoeléctrica. Informaciones anteriormente clasificadas ya estaban libremente disponibles. En Estados Unidos, los enérgicos esfuerzos del almirante Rickover por conseguir submarinos nucleares constituyeron los cimientos del desarrollo de reactores de agua ligera comerciales para la generación eléctrica, una vez se dispuso de uranio enriquecido [2]. Fuera de Estados Unidos, las dificultades en obtener uranio enriquecido habían obligado a muchos países a desarrollar reactores que funcionaban con uranio natural, utilizándose el grafito o el agua pesada como moderador.



Figura 4. Walter Binks.

En Suecia, se publicó en 1956 el estudio de Bengt Hultqvist sobre las radiaciones en las viviendas [9], que revelaba tanto unas tasas de dosis inesperadamente altas de radiaciones gamma como concentraciones bastante altas de radón. Sin embargo, todavía no había una base para la evaluación de los riesgos.

En 1956, la ICRP celebró una reunión en Ginebra, recomendando la décima parte de la dosis profesional máxima permisible para personas no profesionalmente expuestas. Con el fin de guiar los cálculos de los valores revisados de corrientes máximas permisibles, se decidió que éstos deberían basarse en una dosis máxima semanal de 0,3 rem, salvo en el caso de las gónadas, donde la base sería de 0,1 rem por semana. La Comisión advertía que estas recomendaciones eran tentativas, y que se esperaba un conjunto más elaborado de recomendaciones para el año 1958 [21].

Tras la reunión de Ginebra, Rolf Sievert tomó el relevo de sir Ernest Rock-Carling como presidente de la ICRP, con G. Failla como vicepresidente. Walter Binks se despidió de su cargo de secretario por motivos de salud, y E.E. Smith ocupó el puesto como suplente hasta 1957, cuando Bo Lindell le sucedió como secretario provisional, hasta su nombramiento como secretario en 1959. Lauriston Taylor era presidente de la ICRU y Harold Wyckoff su secretario en aquella época, y había una estrecha cooperación entre las dos comisiones.

UNSCEAR comenzó su trabajo en 1956 empleando un número de secretarios científicos a plena dedicación cuyos esfuerzos culminarían en su primer informe. Uno de éstos, el japonés Eizo Tajima, desarrolló la primera fórmula para la evaluación de la *dosis genéticamente significativa* anual, que definió como "la dosis que, recibida por cada componente de la población, provocaría previsiblemente el mismo daño total a la población que las dosis reales recibidas por sus distintos componentes individuales".

El uso de la dosis genéticamente significativa supuso la primera desviación de una política de protección basada en efectos deterministas y en dosis de umbral. Los efectos hereditarios se suponían estocásticos, sin valor de umbral. No obstante, era todavía demasiado temprano para suponer que los riesgos del cáncer, por ejemplo la probabilidad de leucemia, se debían tratar de forma similar. Dicho esto, la observación por Alice Stewart de un mayor riesgo de leucemia entre niños expuestos *in útero* durante exámenes por rayos X de sus madres [46] suponía una indicación en este sentido. Sus resultados se recibieron con escepticismo, hasta que fueron confirmados por Brian McMahon en 1962 [46].

En noviembre de 1956 UNSCEAR invitó a la ICRP y a ICTU a elaborar un informe sobre cómo evaluar y registrar las dosis recibidas por los pacientes en el uso médico de las radiaciones. Se estableció un grupo conjunto de estudio, con E.E. Smith como secretario. El informe de las dos comisiones se presentó en 1957 y se publicó en *Physics in Medicine and Biology* (octubre de 1957) [23]. Una de las conclusiones importantes del estudio era que no se podía recomendar el seguimien-

to y registro sistemáticos de la dosis de radiación recibida por cada persona. El informe también contenía una propuesta de clasificación de los exámenes radiológicos basada en el tipo anatómico.

En 1957 se produjeron dos grandes accidentes nucleares. Uno consistió en un incendio en el reactor productor de plutonio moderado por grafito nº 1 de Windscale. Éste provocó la liberación de varios productos de fisión y una contaminación significativa de la leche por yodo-131 en una zona de unos 500 km^2. Se pudo detectar yodo-131 en el aire en toda Europa. Mucho más seria fue la explosión de un depósito de almacenamiento de residuos de alta actividad en el complejo químico de Mayak, cerca de Chelyabinsk y de Kyshtym, en los Urales, que dio lugar a una severa contaminación por estroncio-90, obligando a evacuar a cientos de miles de personas. Además, la operación normal de Mayak había provocado una alta contaminación debido a descargas al río Techa, dando lugar a grandes dosis de radiaciones [10]. Durante los años cincuenta, sin embargo, no hubo información pública sobre estos sucesos.

En 1957 se fundó el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA), con sede en Viena. Desde entonces, las actividades de este organismo en materia de protección radiológica, en el marco de su división de Seguridad Nuclear, han constituido en muchos sentidos un vínculo importante entre las recomendaciones de la ICRP y su aplicación en la práctica. Aquel mismo año comenzó un periodo de gran actividad en el secretariado de UNSCEAR en Nueva York, liderado por el canadiense Raymond Appleyard, cuando se publicó el borrador de informe del comité para 1958. Durante ese periodo se desarrolló el concepto del *compromiso de dosis* como herramienta para la evaluación de futuras dosis anuales, en caso de que alguna práctica (como los ensayos de armas

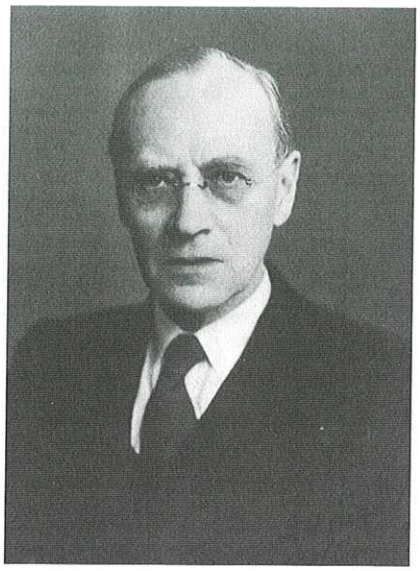


Figura 5. Ernest Rock-Carling.

nucleares) continuara durante un periodo de muchos años [26]. También se establecieron las bases para la posterior práctica de UNSCEAR de emplear coeficientes de transferencia medioambiental en las evaluaciones radioecológicas. Su primer informe se publicó en 1958 y desde entonces el comité ha publicado cada pocos años informes completos (algunos de más de 700 páginas) revisando los niveles de radiación y los conocimientos actuales de los efectos de las radiaciones.

En paralelo con los trabajos del secretariado de UNSCEAR, un grupo editorial de la ICRP elaboraba el borrador de las nuevas recomendaciones de la Comisión. Este grupo fue presidido por el profesor Failla. El informe fue adoptado por la Comisión en 1958, y publicado como el primer informe de tapas marrones en la serie emitida por Pergamon Press para la ICRP. El informe no llevaba número alguno, pero puede llamarse la *Publicación nº 1,* toda vez que el siguiente se identificaba como la *Publicación nº 2.* En esta *Publicación nº 1,* la ICRP discutía por primera vez los umbrales de dosis frente a las relaciones lineales entre dosis y respuesta, sin umbrales: "La aproximación más conservadora sería suponer que no existe umbral ni recuperación, en cuyo caso incluso bajas dosis acumuladas inducirían la leucemia en algunos individuos susceptibles y la incidencia de ésta podría ser proporcional a la dosis acumulada".

Dado que ya no se podía dar por sentado que había dosis de radiación completamente seguras, por debajo de una dosis de umbral, la redacción incluía un criterio de precaución: "Se subraya que las dosis máximas permisibles que se recomiendan en este apartado son valores *máximos*; la Comisión recomienda mantener todas las dosis tan bajo como sea posible en la práctica y que se eviten las exposiciones innecesarias".

Con su *Publicación nº 1*, la ICRP abandonaba el límite semanal y relacionaba la dosis máxima permisible al periodo de un año. La dosis anterior de 0,3 rem/semana correspondía a una dosis anual de 15 rem. Pero había dudas en cuanto a que esto fuera lo suficientemente seguro, teniendo en cuenta también los efectos hereditarios y la posibilidad de ausencia de un umbral para la leucemia. Por consiguiente, la ICRP adoptó una propuesta estadounidense de una fórmula de edad prorrateada $D = 5\,(N - 18)$ como límite de dosis D (en rem) acumulada hasta una edad de N (años) en las gónadas y los órganos productores de la sangre. Esta fórmula estaba complementada por el requisito de una dosis máxima permitida de 3 rem en cualquier periodo de 13 semanas consecutivas. Para otros órganos internos que no fueran las gónadas o los generadores de la sangre, se seguía sugiriendo una dosis semanal de 0,3 rem como base para los cálculos de valores de concentraciones máximas permisibles.

Para los miembros individuales del público, la ICRP ya recomendaba una dosis máxima permisible anual de 0,5 rem. Se recomendaba asimismo que los valores de concentraciones máximas permisibles se dividieran entre 10 para su aplicabilidad a las exposiciones públicas, consejo que no se valoraba positivamente, toda vez que la dosis por uni-

dad aportada no es la misma para los adultos que para los niños. La Comisión también sugería una dosis genética máxima permisible de 5 rem, adicional a la dosis de fondo natural, y la menor contribución posible de las exposiciones médicas.

Las recomendaciones de la Comisión fueron seguidas poco después por un informe del comité de Karl Morgan sobre valores revisados de concentraciones máximas permisibles (*Publicación nº 2* de la ICRP). Cuando la Comisión se reunió en Munich en 1959, Failla dimitió y E.E. Pochin del Reino Unido le sucedió como vicepresidente, iniciando una etapa de gran actividad para la ICRP. Durante la reunión de Munich, la Comisión recibió por primera vez una solicitud de un observador, en este caso el doctor Hussein Daw del OIEA. Ya se habían establecido relaciones oficiales con la Organización Mundial de la Salud (OMS).

7. Los años sesenta

En 1959 y 1960 la Organización Internacional del Trabajo (OIT) celebró reuniones tripartitas en Ginebra (entre representantes de los trabajadores, las empresas y los gobiernos) bajo la presidencia de Henri Jammet, con el fin de preparar una convención sobre la protección de los trabajadores contra las radiaciones ionizantes. La convención de la OIT identifica dos tipos de trabajadores en lo referente a las radiaciones, los que participan directamente en trabajos con radiaciones y aquellos otros que se ven expuestos sin participar directamente en tales trabajos [24].

La correspondiente distinción en las recomendaciones de la ICRP se hacía por medio del concepto de la *zona controlada*, es decir una zona en la cual la exposición a las radiaciones está bajo la supervisión de un jefe de protección radiológica. Según la *Publicación nº 1* de la ICRP, se deberá establecer una zona controlada en todos aquellos lugares en los que las personas *podrían* recibir más de 1,5 rem/año (el 30% de la DMP). Así, la categoría "participan directamente" de la OIT correspondía a los trabajadores que prestan sus servicios dentro de zonas controladas. Para ellos, la convención de la OIT exigía exámenes médicos especiales y la monitorización personal. Esta convención no solicitaba, sin embargo, un horario especial ni descansos prolongados.

En 1961, el italiano Francesco Sella sucedió a Raymond Appleyard como secretario de UNSCEAR, para un mandato que iba a durar trece años.

En 1961 y 1962, la URSS detonó los mayores dispositivos nucleares conocidos hasta la fecha en Novaya Zemla, haciendo que los niveles del poso radiactivo llegaran a valores máximos en todo el mundo. Este suceso también hizo que la inquietud pública alcanzara valores máximos, y en 1963 se firmó un acuerdo entre Estados Unidos, Reino Unido y la Unión Soviética para el abandono de las pruebas atmosféricas. La posibilidad de una fuerte contaminación radiactiva como consecuencia de los ensayos con armas nucleares llevó a numerosas autoridades nacionales a emitir o revisar recomendaciones sobre los niveles para la iniciación de medidas en caso de contaminación de los alimentos, en particular de la leche fresca. Muchos laboratorios comenzaron estudios sobre la transferencia de radionucleidos a través de las cadenas alimenticias y nació una nueva ciencia, la radioecología. Un primer intercambio de información en este campo se produjo durante el transcurso de una conferencia internacional sobre procesos de concentración radioecológicos, organizada por Rolf Sievert en Estocolmo en 1966 [24]. Fue la primera vez que científicos soviéticos participaban en una conferencia internacional no organizada por la ONU. Se trataron algunas cadenas alimenticias vulnerables, en particular la de líquenes-renos-lapones.

En 1962 la ICRP creó un nuevo Comité 4 con Henri Jammet como presidente. Este nuevo comité se formó para aconsejar sobre la aplicabilidad de las recomendaciones de la Comisión. Ese mismo año, E.E. Pochin sucedió a Rolf Sievert como presidente de la ICRP y Bo Lindell pasó el testigo de secretario a David Sowby.

En 1964 se concibió la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA) en París, a iniciativa de Karl Morgan, quien en 1955 ya había contribuido materialmente a la fundación de la Sociedad de Física Sanitaria (SFS). Desde 1958 la SFS había publicado la revista *Health Physics*, y se había producido un creciente interés en crear sociedades de protección radiológica en otros países. La IRPA ha sido un vínculo importante entre las distintas sociedades nacionales y regionales, que ya son numerosas y muchas de las cuales han llegado a ser bastante grandes y activas; por ejemplo la citada Sociedad de Física Sanitaria y la Fachverband für Strahlenschutz y los congresos regulares de la IRPA han atraído en gran medida el interés de la comunidad de protección radiológica, limitado anteriormente a los congresos internacionales sobre la radiología.

La *Publicación nº 1* de la ICRP había sufrido numerosas enmiendas, por lo que la Comisión emitió una versión revisada que las incorporaba. Este documento fue la *Publicación nº 6* de la ICRP. No obstante, pronto llegó la hora de unas revisiones más sustanciales, y se nombró un nuevo grupo editorial presidido por el Dr. Pochin. Este grupo elaboró un borrador que fue adoptado por la Comisión en septiembre de 1965, editándose como *Publicación nº 9*.

Aparece de nuevo una llamada de precaución (ahora en el párrafo 52), que decía lo siguiente: "Habida cuenta de que cualquier exposición puede implicar algún riesgo, la Comisión recomienda evitar las exposiciones innecesarias y que to-

das las dosis se mantengan lo más bajo como sea razonablemente posible teniendo en cuenta las consecuencias económicas y sociales".

Aún no se ofrecía ninguna información orientativa sobre cómo aplicar esta recomendación. Por otra parte, la Comisión tenía crecientes dudas sobre la existencia de una dosis de umbral referida a la incidencia del cáncer. El párrafo 7 establecía: "... la Comisión no ve ninguna alternativa práctica, para los propósitos de la protección radiológica, a la suposición de que existe una relación lineal entre dosis y efecto y que las dosis actúan de forma acumulativa. La Comisión es consciente de que los supuestos de ningún umbral y de la completa aditividad de todas las dosis pueden ser incorrectos, pero está satisfecha en cuanto a la improbabilidad de que conduzcan a una subestimación de los riesgos".

La *Publicación nº 9* de la ICRP renovó sustancialmente la filosofía de la protección radiológica al cambiar de los efectos deterministas a los estocásticos. Hacía una distinción entre las *operaciones normales* y los accidentes donde la exposición "se puede limitar sólo mediante acciones correctoras, si es que se puede limitar". La fórmula de edad prorrateada se abandonó y la DMP para las gónadas y los órganos productores de la sangre se expresaba ya en términos de una dosis anual de 5 rem (es decir, 50 mSv). El término *límite de dosis* se introdujo para el límite anual de 0,5 rem recomendado para las exposiciones de los miembros del público.

Siendo ya el daño estocástico la principal preocupación, el concepto de *riesgo* entró en escena. El término riesgo tiene muchos significados, pero se concibe normalmente como un concepto de varios componentes que trata tanto la probabilidad de que se produzca un suceso dañino como las consecuencias si en efecto se produce. En cuanto al riesgo del cáncer, la ICRP se preocupaba principalmente por las consecuencias fatales, por lo que durante algún tiempo dejó que riesgo fuera sinónimo de la probabilidad de la muerte. Esto condujo a un interés en los riesgos mortales en otras áreas, y en 1965 David Sowby escribió un informe pionero, *Las radiaciones y otros riesgos*, que se publicó en la revista *Health Physics* [43].

A partir de mediados de los años sesenta el principal campo de interés fue la creciente industria nuclear. La filosofía de protección quedó definitivamente formada por el supuesto de una relación lineal entre dosis y respuesta, sin umbral de dosis. UNSCEAR se mostró particularmente productivo, emitiendo informes en 1966, 1969, 1972 y 1977. Habían mejorado sus métodos para la evaluación de dosis causadas por el poso radiactivo.

En 1965, el OIEA, la OMS y la Agencia de la Energía Nuclear Europea de la OCDE (AEN) iniciaron un estudio sobre productos de consumo radiactivos con compuestos luminosos, que parecían constituir un problema cada vez más importante. Se llevó a cabo una revisión de la situación en unos 40 países por Richard Cunningham (EEUU), y posteriormente, en 1968, la AEN creó un grupo de expertos presidido por E.E. Smith, del Servicio de Protección Radiológica del Reino Unido, para desarrollar recomendaciones. Éstas se publicaron en 1970 y resultaron ser de gran ayuda [32].

Durante la redacción de la *Publicación nº 9* de la ICRP, el grupo editorial había llegado a sentirse preocupado por las muchas distintas opiniones que había sobre el riesgo de los efectos estocásticos. Por esta razón, la Comisión solicitó a R. Scott Russell presidir un grupo de trabajo que "considerara la medida en que se pudiera evaluar la magnitud de los riesgos somáticos y genéticos asociados con la exposición a las radiaciones".

El informe presentado por este grupo se publicó en 1966 como *Publicación nº 8* de la ICRP. Fue un documento sobresaliente. Por primera vez en la historia de las publicaciones de la ICRP se resumía el conocimiento de los riesgos de la radiación, tanto somáticos como genéticos, de forma más eficaz incluso que los informes de UNSCEAR. La probabilidad de la leucemia tras una dosis absorbida de 1 rad de radiación gamma (es decir, 10 mSv) se estimó en 20 casos por millón de individuos expuestos. Ahora bien, se supuso erróneamente que la probabilidad de todos los demás tipos de cáncer juntos era aproximadamente la misma que la correspondiente a la leucemia.

El grupo de Scott Russell creía que la incertidumbre en las estimaciones era tan grande que podría conducir a errores presentar números aparentemente exactos, como 20 casos, por lo que sugirió que se utilizara la terminología *órdenes de riesgo*. Una frecuencia de 20 en un millón, correspondiente a una probabilidad de entre 1×10^{-5} y 10×10^{-5}, sería entonces un riesgo de quinto orden. Por primera vez se sugirió además que unos diagramas que mostraran la tasa de mortandad específica por edades (curvas Gompertz) podrían servir para ilustrar los cambios relativos del riesgo, una idea que se incorporó en la *Publicación nº 60* de la ICRP, veinticinco años más tarde.

En 1969 el canadiense Gordon Stewart sucedió al Dr. Pochin como presidente de la ICRP. Durante los años sesenta se había reconocido el riesgo de contraer cáncer del pulmón como consecuencia del radón en las minas de uranio, y en algunos países, por ejemplo Suecia, se encontraron problemas en minas que no eran de uranio, un hecho que abrió el camino a la cuestión del radón en las viviendas.

8. La década de los setenta

En Suecia, Arne Hedgran y Bo Lindell propusieron en 1970 una limitación sobre la dosis colectiva para cada práctica como medio de con-

trolar las dosis individuales futuras asociadas con prácticas en fase de expansión [6]. Esta misma forma de expresión se utilizó en el informe de UNSCEAR de 1972, donde las dosis profesionales de la industria nuclear se expresaron en términos de hombre-rem por MWaño.

En la conferencia de IRPA celebrada en Brighton en 1970, dos ponencias trataron el tema de la cantidad de dinero que sería razonable pagar para eliminar una dosis de radiación unitaria. John Dunster y Andrew McLean derivaron un valor a partir del método utilizado por las compañías de seguros para valorar una vida humana [5]. Hedgran y Lindell informaron de un estudio sobre la disposición de las personas a pagar [7]. Estas ponencias fueron las primeras en introducir el concepto de la evaluación coste-beneficio en la protección radiológica.

En 1972 se celebró en Estocolmo la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente. UNSCEAR presentó un informe elaborado por un pequeño grupo presidido por el delegado canadiense Gordon Butler, en el cual se sugería que sus métodos de evaluación de las dosis medioambientales podrían quizá aplicarse también a algunos contaminantes no radiactivos [3].

El importante párrafo 52 de la *Publicación nº 9* de la ICRP, que recomendaba que "todas las dosis se mantengan tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta las consecuencias económicas y sociales" exigía la disponibilidad de más información. Por lo tanto, la ICRP nombró un grupo de trabajo presidido por el americano Lester Rogers para facilitar consejos. Este grupo determinó que un nivel óptimo de protección podría encontrarse mediante el análisis coste-beneficio diferencial, y que el principio que se describía en el párrafo 52 era el de la *optimización de la protección*. El informe de este grupo se publicó en 1973 como *Publicación nº 22* de la ICRP.

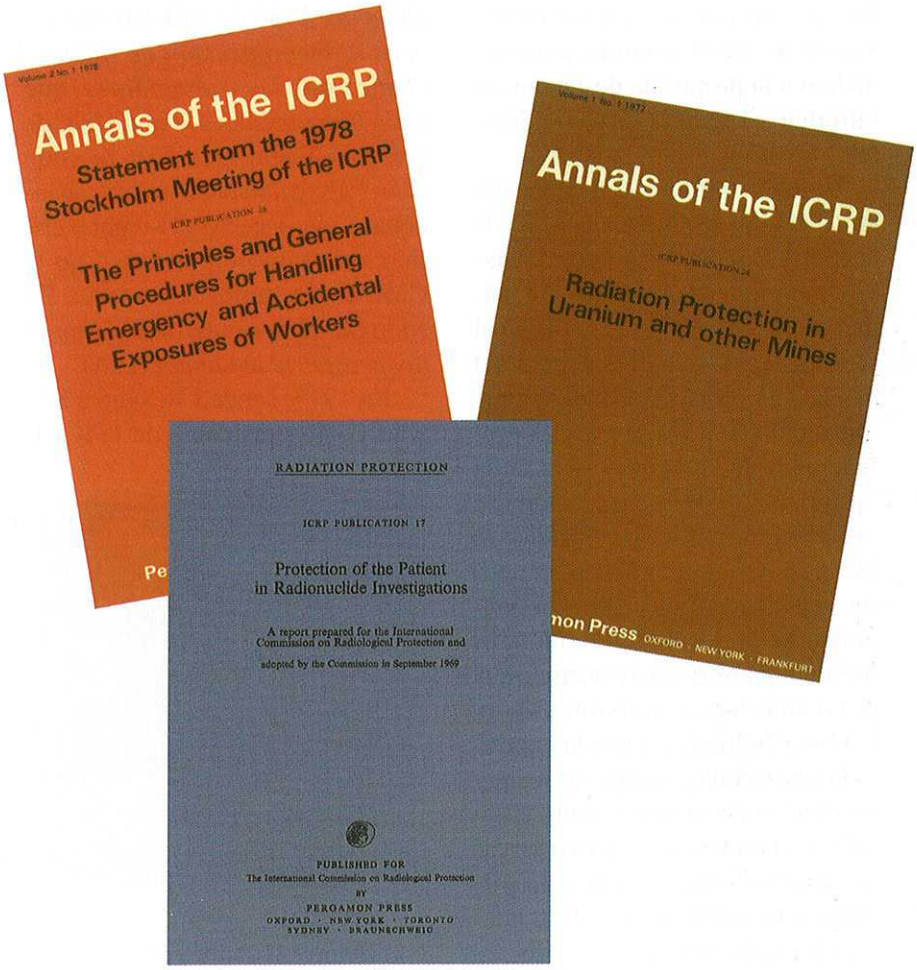


Figura 6. Diferentes publicaciones de la ICRP.

En 1973, el OIEA nombró un grupo de expertos para estudiar lo que en principio se llamó "la capacidad del medio ambiente de incorporar materiales radiactivos en condiciones de seguridad". Pronto se acordó que este título reflejaba una visión antigua y que no reconocía el riesgo de efectos estocásticos. El título final del informe, que se publicó en 1978 como *Colección de Seguridad nº 45* del OIEA, fue *Principios para el establecimiento de límites para la liberación al medio ambiente de materiales radiactivos* [11]. Este documento ofrecía ideas nuevas. Además de aplicar los coeficientes de transferencia de UNSCEAR y de hacer uso del compromiso de dosis y del compromiso de dosis colectiva para cada práctica, describía las condiciones a cumplir en el caso de una liberación compuesta de una gama de radionucleidos.

En 1974, el secretariado de UNSCEAR se trasladó de Nueva York a Viena, y el secretario italiano Francesco Sella fue sucedido por Dan Beninson, de Argentina. En aquellos momentos, la ICRP tenía un nuevo grupo editorial que estaba trabajando en una revisión de la *Publicación nº 9*, presidido por el Dr. Pochin. El grupo propuso una serie de cambios bastante radicales. Se abandonó el concepto del *órgano crítico*. Se pensaba que había ya un conocimiento suficiente del riesgo del cáncer para que un número de órganos permitiera calcular la dosis ponderada de cuerpo entero. Se había sugerido anteriormente una cantidad basada en tal ponderación en una ponencia de Wolfgang Jacobi [25], pero en las nuevas recomendaciones la Comisión introdujo el procedimiento de ponderación sin presentar el resultado como nueva cantidad. Esto se

hizo por primera vez en una declaración de 1978, cuando, respondiendo a la propuesta de Jacobi, se introdujo el término *dosis equivalente efectiva.*

El nuevo informe fue publicado en 1977 como *Publicación nº 26* de la ICRP. Contenía numerosos nuevos conceptos y propuestas. La unidad del sievert venía a reemplazar al rem. Se introducía el concepto del *detrimento* de la salud radiológica, tomándolo como base para las evaluaciones de coste-beneficio en la optimización de la protección. Se establecían tres reglas básicas: la justificación de la práctica, la optimización de la protección y la limitación de la dosis al individuo. El término *límite de dosis* sustituía a la dosis máxima permisible, ahora también en lo referente a la exposición profesional, aunque se mantenía el valor de 50 mSv (5 rem) en un año. La Comisión mantuvo largas discusiones sobre el límite anual de dosis aplicable a los miembros individuales del público. De haberse mantenido, este límite habría sido de 5 mSv, aunque algunos querían reducir el valor a 1 mSv. El resultado fue reflejado en un texto casi incomprensible, mantenía el valor de 5 mSv, pero indicaba que no debería superarse un valor medio anual de 1 mSv a lo largo de la vida si la dosis se evaluara de forma realista.

Ya abandonado el concepto del órgano crítico, y aplicados los límites a la dosis equivalente efectiva, se tuvieron que volver a calcular todos los valores de concentración máxima permisible. Se temía que de no hacer esto, las autoridades nacionales se mostraron reacias a aceptar la *Publicación nº 26* y la dosis equivalente efectiva. Era una tarea pesada para el Comité 2 de la ICRP, presidido por Jack Vennart, que se encontraba en la situación embarazosa de tener que pedir al personal de otros laboratorios, en un principio el de Oak Ridge, que acelerara los trabajos que estaba realizando gratuitamente para la ICRP. El resultado fue la voluminosa *Publicación nº 30* de la ICRP *Límites para la incorporación de radonucleidos por los trabajadores*, que tenía tres secciones y una serie de gruesos suplementos. Esta revisión de la *Publicación nº 2* no sólo abandonaba el concepto del órgano crítico sino también el rango de la CMP como límite secundario. En su lugar se presentaron los *límites de incorporación anual* (LIA).

En 1977, Lindell sucedió a Stewart como presidente de la ICRP, con Beninson como vicepresidente (Beninson abandonó el secretariado de UNSCEAR en 1979, pasando el testigo a Giovanni Silini, de Italia). Durante esa época hubo otra vez una estrecha cooperación entre la ICRP y la ICRU. Se creó un comité conjunto, presidido por Harald Rossi, el padre de la microdosimetría, para elaborar un informe sobre la *Base conceptual para la determinación de la dosis equivalente*, publicado como *Informe nº 25* de ICRU (1976) [18].

> El periodo posterior a 1986 ha estado marcado, en gran medida, por la experiencia de Chernóbil

Ya en 1956, las mediciones realizadas en Suecia habían revelado la presencia de niveles muy altos de radón en algunos edificios) [9], debidos no sólo a los materiales ricos en radio utilizados, sino también a que el radón emana del suelo, introduciéndose en los edificios. En 1979 se nombró una comisión especial y se establecieron niveles de acción referidos al radón en las viviendas. Los expertos suecos opinaban que se encontrarían problemas similares en otros países en cuanto se realizaran mediciones completas. Hasta 1977 los informes de UNSCEAR presentaban evaluaciones de dosis sólo para algunos órganos críticos. A partir del informe de 1982, que trataba de forma exhaustiva el problema del radón, se presentaban también estimaciones de la dosis equivalente efectiva, haciéndose evidente la importancia del radón dentro de los edificios. De repente, la dosis anual de fuentes naturales prácticamente se duplicó, pasando de aproximadamente 1 mSv a 2 mSv.

El día 28 de marzo de 1979 se produjo el accidente del grupo 2 de la central nuclear de Three Mile Island, que destruyó el reactor pero supuso liberaciones muy reducidas de materiales radiactivos al medio ambiente. Este accidente tuvo un enorme impacto sobre la aceptación pública de la energía nuclear en todo el mundo. También dio lugar a la adopción de puntos de vista críticos sobre los conceptos de riesgo y probabilidad y sobre su significado en casos únicos, por ejemplo en un reactor nuclear en particular [1].

En 1980 se publicó *BEIR III* de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, con nuevas evaluaciones de los riesgos de la radiación [53]. Se habían incluido unas estimaciones del riesgo del cáncer en el informe de UNSCEAR de 1977, pero éstas no se incluían en el informe de 1982 del comité.

En los debates nucleares, había un creciente interés en el tema de los problemas que suponían los residuos, particularmente en lo referente a los nucleidos de muy larga vida, como el yodo-129. En 1979, un grupo de expertos nombrado por la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE presidido por W.D. Rowe revisó este problema y publicó un informe en 1980 [33]. Se sugirió que las evaluaciones de las dosis colectivas aportadas por los radionucleidos de muy larga vida, si se calcularan para fines de optimización de la protección, sólo se deberían considerar para un periodo de diez mil años, toda vez que cabía esperar

que la retención de tales nucleidos no fuera efectiva a más largo plazo. La dosis remanente sería igual para todas las opciones de protección y no influiría en la optimización.

En 1980 la ICRP y la ICRU crearon un nuevo grupo de trabajo conjunto, también presidido por Harald Rossi, para revisar las cantidades que intervenían en la protección radiológica, toda vez que recientes descubrimientos en el campo de la radiobiología indicaban que las recomendaciones de protección radiológica vigentes no ofrecían el mismo grado de protección para niveles altos de radiación LET que para niveles bajos. En el informe de este grupo se hacían dos enfoques distintos a la protección. En el enfoque de limitación no había que adoptar otro supuesto biológico más que el supuesto de que el riesgo sería aceptable en el límite de dosis. En el *enfoque de evaluación* se postulaba una relación cuantitativa entre dosis y respuesta para posibilitar la determinación de la aceptabilidad a cualquier nivel de dosis y la optimización de la protección. El grupo recomendaba aumentar el factor de calidad para los neutrones. El informe *El factor de calidad en la protección radiológica*, se publicó en 1986 como *Informe nº 40* de la ICRU [19].

Las recomendaciones de la *Publicación nº 26* de la ICRP se aceptaron gradualmente en todo el mundo y formaron la base para la normativa básica de seguridad revisada preparada por el OIEA y otras organizaciones internacionales [12]. En 1981 la Comisión Principal de la ICRP recibió una invitación para visitar China y Japón con objeto de discutir la nueva política en materia de protección radiológica, que fue bien acogida.

Las altas exposiciones debidas a la presencia del radón en los edificios pusieron en evidencia la imposibilidad de excluir de las consideraciones en materia de protección radiológica todas las dosis debidas a las radiaciones naturales. Anteriormente, se había hecho caso omiso de la radiación natural de fondo, en parte porque se creía que era bastante constante, pero principalmente porque se suponía incontrolable. Cuando se descubrió que la exposición al radón en las viviendas variaba por varios órdenes de magnitud, y que a menudo resultaba relativamente fácil controlarla, surgió la necesidad de facilitar alguna información orientativa al respecto. Las primeras recomendaciones se ofrecieron en 1983 en la *Publicación nº 39* de la ICRP *Principios para la limitación de la exposición del público a la fuentes naturales de radiaciones*. Este documento hacía uso del concepto del límite superior, introducido anteriormente por el OIEA para otros propósitos. Se propuso un límite superior relacionado con la fuente para las exposiciones en edificios, que era independiente del límite de dosis de la ICRP, que no se había desarrollado para cubrir también las dosis procedentes de fuentes naturales.

El procedimiento de optimización de la protección incluye el establecimiento de un precio para la unidad de dosis colectiva. Esto también supone que la suma de dinero que se debería pagar para salvar una vida humana (en sentido estadístico) se identifica como $A = \alpha/r$, donde α es la cantidad de dinero apropiada para la eliminación de una dosis colectiva unitaria y r es la probabilidad nominal de muerte atribuible por unidad. Cuando se elaboró la Normativa Básica de Seguridad, esta implicación causó alguna inquietud desde el punto de vista ético, y hubo preguntas del Vaticano sobre la justificación ética de "poner un precio a la vida humana". Por este motivo, se designó un grupo de expertos en la Academia Pontificia de las Ciencias. Este grupo preparó un informe y concluyó que no puede ser inmoral mejorar la protección en el marco de unos límites de dosis para salvar el mayor número posible de vidas humanas [36]. Los problemas éticos surgirían a la hora de distribuir el dinero destinado a salvar vidas, no en lo relativo al método utilizado para optimizar su uso.

La política de protección relativa al almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos de alta actividad se discutió durante el transcurso de una conferencia del OIEA celebrada en Seattle en 1983, y posteriormente en la *Publicación nº 46* de la ICRP sobre *Los principios de protección radiológica para el almacenamiento definitivo de residuos radiactivos sólidos*.

En 1984 el OIEA comenzó a aplicar la práctica de las misiones RAPAT, es decir, equipos de asesores de protección radiológica que visitaban a invitación distintos países, para asesorar a la organización nacional responsable en la materia. El primer equipo, compuesto por Beninson, Lindell y Sowby, junto con un representante del OIEA, visitó China en noviembre de 1984.

9. Chernóbil y sus consecuencias

En 1985 Beninson sucedió a Lindell como presidente de la ICRP, y poco después David Sowby dimitió del puesto de secretario tras un largo periodo de duro trabajo. El OIEA creó un nuevo grupo asesor para actualizar su *Colección de Seguridad nº 45*, sobre los principios a aplicar para limitar las liberaciones de efluentes radiactivos al medio ambiente. El documento revisado se publicó en 1986 como *Colección de Seguridad nº 77* [14]. Otro grupo asesor del OIEA había elaborado la *Colección de Seguridad nº 67*, también publicada en 1985, sobre la *Asignación de un valor a exposiciones a radiaciones transfronterizas* [13]. Este último informe se basaba en el principio de que "las políticas y los criterios adoptados para la protección de poblaciones ajenas al territorio nacional contra las liberaciones de sustancias radiactivas, deberán ser por lo menos

tan estrictos como los adoptados para la protección de la población en la que se produzcan tales liberaciones". Esto significaba que a la hora de optimizar la protección mediante evaluaciones de coste-beneficio, el valor de la dosis colectiva unitaria tendría que ser cuanto menos tan elevado fuera como dentro del territorio nacional. Quedaba, sin embargo, un problema: un país podría tener pocas ambiciones en lo relativo a la protección de su propia población y mantener el mismo nivel bajo de protección fuera de su territorio. Por lo tanto, el informe recomendaba un valor mínimo de dosis colectiva unitaria a utilizar en tales casos.

El 26 de abril de 1986 se produjo el accidente de Chernóbil, que causó una contaminación radiactiva a escala mundial y un elevado nivel de inquietud entre el público [10]. Hasta esa fecha, los planes de emergencia se habían restringido a las zonas en torno a los reactores nucleares puesto que no se esperaba un gran impacto en regiones y países alejados de los mismos. Los niveles de intervención para proteger contra alimentos contaminados se tuvieron que inventar en muy poco tiempo, sin que hubiera mucha coordinación entre distintos países. Tras esta experiencia, se publicó un elevado número de informes con recomendaciones actualizadas sobre la planificación para emergencias y las acciones correctoras a tomar, por el OIEA, ICRP, AEN/OCDE y la OMS [15][34]][35].

En agosto de 1986, expertos de la URSS presentaron un informe franco y completo sobre el accidente durante el transcurso de una conferencia organizada por el OIEA en Viena. Desde entonces varios equipos asesores internacionales, incluidos grupos del OIEA y de la OMS, han visitado las zonas más contaminadas para efectuar mediciones y observaciones de los efectos para la salud. Tanto el OIEA como UNSCEAR, donde Burton Bennett ya había sucedido a Giovanni Silino como secretario, cooperaron en la recogida y evaluación de datos.

El periodo posterior a 1986 ha estado marcado, en gran medida, por la experiencia de Chernóbil y UNSCEAR ha publicado informes en los años 1988, 1993 y 1994.

En 1987, una cápsula que contenía cesio-137, robada de una unidad médica de teleterapia en la ciudad brasileña de Goiânia, causó una extendida contaminación por el material radiactivo, provocando la muerte de 4 personas y altas dosis a otras muchas [17]. Este trágico suceso aumentó los esfuerzos por encontrar una política de protección que evitara las exposiciones accidentales.

Cuando en 1987 la ICRP se reunió con sus comités en Como, se decidió crear un nuevo grupo editorial para elaborar un borrador con recomendaciones que sustituyera a la *Publicación nº 26*, de 1977. Este grupo incluía al presidente y vicepresidente de la Comisión (Beninson y Jammet), al secretario (ahora el Dr. Hylton Smith), los presidentes de los comités y el miembro emérito Bo Lindell. John Dunster aceptó la tarea de redactar el texto principal.

La ICRP nunca había consultado formalmente con otras organizaciones antes de proceder a la publicación de sus recomendaciones. No habría sido tarea fácil, teniendo en cuenta que la Comisión contaba con un único secretario científico para manejar todos los contactos. Sin embargo, sus recomendaciones habían ido logrando cierto rango y cobrando cada vez más importancia. En esta ocasión, la Comisión efectuó amplias consultas con otros organismos internacionales y con sociedades y autoridades nacionales y regionales. Dunster y Smith leyeron y consideraron unos mil comentarios y sugerencias.

Las nuevas recomendaciones diferían de las anteriores de la ICRP en que incluían anexos en los que se facilitaba material de consulta y referencias y se explicaba su base. Las nuevas recomendaciones fueron adoptadas por la Comisión en 1990, y publicadas en 1991 como *Publicación nº 60* de la ICRP. El límite de dosis profesional se redujo de 50 mSv/año a 20 mSv/año, promediado por periodos de 5 años. El límite de las exposiciones del público se establecía ya en 1 mSv/año, con la posibilidad excepcional de mayores exposiciones, siempre que la media anual a lo largo de un periodo de 5 años no superara el valor de 1 mSv.

La *Publicación nº 60* hablaba más de la exposición a fuentes naturales que el informe anterior y también trataba explícitamente el riesgo de exposiciones en potencia, un tema que también había abordado, por ejemplo, el OIEA [16]. La nueva publicación de la ICRP introdujo una distinción entre las *prácticas* (que añaden dosis cuando son introducidas) y la *intervención* (que tiene como objetivo reducir las dosis que de otro modo se producirían). El concepto del límite superior, que no figuraba en la *Publicación nº 26*, se introducía, pero con la denominación de *restricción*. Las recomendaciones sustituyeron el anterior concepto de las aproximaciones permisible del factor medio de calidad por el de los *factores de ponderación de la radiación*, W_R, sustituyendo también el equivalente de dosis por el concepto más sencillo de la *dosis equivalente* como la dosis media absorbida en el órgano en cuestión, multiplicada por el factor de ponderación de la radiación. La dosis equivalente efectiva pasó a ser la *dosis efectiva*, cambio que afectaba principalmente al nombre, toda vez que ya se daban factores de ponderación de la radiación para un mayor número de órganos.

En 1993 la ICRP publicó su *Publicación nº 65* sobre *La protección contra el radón-222 en el hogar y en el trabajo*, que incluía tanto estimaciones del riesgo del cáncer de pulmón como recomendaciones en



Figura 7. Los miembros de la ICRP en 1990.

materia de los niveles de acción para viviendas y límites anuales en el caso de exposiciones profesionales. Ese mismo año Roger Clarke, director de la NRPB británica, sucedió a Dan Beninson como presidente de la ICRP, con Charles Meinhold como vicepresidente. Beninson sucedió a Henri Jammet como presidente del Comité 4. Los actuales presidentes, por número del comité en cuestión son: (1) Warran Sinclair (Efectos biológicos), (2) Alexander Kaul (Límites secundarios), (3) Henri Jammet (Protección en la medicina) y (4) Dan Beninson (Aplicación de las recomendaciones de la Comisión). Entre las principales tareas que se están abordando actualmente destaca la elaboración de informes sobre dosis dependientes de la edad a los miembros del público y la aproximación a una política para tratar las evaluaciones probabilísticas de las exposiciones potenciales [16].

Fuera de la ICRP, se han invertido últimamente muchos esfuerzos en la preparación de las normativas básicas de seguridad de la FAO, OIEA, ILO, AEN/OCDE, PAHO y OMS, así como de una normativa europea similar, sobre reglas básicas de seguridad para la protección sanitaria del público en general y de los trabajadores contra los peligros de las radiaciones ionizantes. Con esto, queda actualizada esta historia de 100 años.

Aunque este repaso ha sido bastante extenso, ha sido preciso seleccionar sólo unos pocos de los hitos más importantes para mantenerlo dentro de unos límites razonables. Esta selección ha sido necesariamente subjetiva, otros autores habrían escogido quizá otra. La selección restringida también ha determinado la aparición de quienes figuran en el artículo. Esto quiere decir que un número de personas importantes, algunas de ellas apreciados amigos del autor, no se mencionan por su nombre, simplemente porque no han tenido que ver con los sucesos tratados.

Referencias

[1] Beninson, D. and Lindell, B.: *Critical views on the application of some methods for evaluating accident probabilities and consequences.* In: Current Nuclear Power Plant Safety Issues, Vol II. IAEA, Vienna (1981), 325-341.

[2] Blair, C. Jr.: *The Atomic Submarine and Admiral Rickover.* Henry Holt & Co., N.Y. (1954).

[3] Butler, G.C. et al: Assessment and control of environmental contamination: Experience with artificial radioactivity. Biological Conservation 4 (1972), 177-183.

[4] Churchill, Winston S.: *The Story of the Malakand Field Force* (1897).

[5] Dunster, H.J. and McLean, A.S.: The use of risk estimates in setting and using basic radiation protection standards. Health Physics 19 (1970), 121-122.

[6] Hedgran, A. and Lindell, B.: On the Swedish policy with regard to the limitation of radioactive discharges from nuclear power stations: An interpretation of current international recommendations. Swedish Radiation Protection Institute Report SSI: 1970-027 (1970).

[7] Hedgran, A. and Lindell, B.: PQR - *A posibble way of thinking.* Acta radiol. Supplement 310 (1971), 163-172.

[8] De Hevesy, G. and Sievert, R. (Ed.): Conference on radiobiology and radiation protection, Stockholm, September 15-20, 1952. Acta radiol. 41 (1954), 1-108.

[9] Hultqvist, B.: *Studies on naturally occurring ionizing radiations.* Kungl. Svenska Vetenskaps-akademiens Handlingar 6 Nr. 3 (1956).

[10] Ilying, L.A. *Chernobyl: Myth and reality.* Megapolis, Moscow (1995).

[11] International Atomic Energy Agency: Principles for establishing limits for the releases of radioactive material into the environment. IAEA Safety Series No. 45. Vienna (1978).

[12] International Atomic Energy Agency: *Basic Safety Standards for Radiation Protection,* 1982 Edition. IAEA Safety Series No. 9. Vienna (1982).

[13] International Atomic Energy Agency: *Assigning a Value to Transboundary Radiation Exposure.* IAEA Safety Series No. 67. Vienna (1985).

[14] International Atomic Energy Agency: *Principles for Limiting Releases of Radioactive Effluents into the Environment.* IAEA Safety Series No. 77. Vienna (1986).

[15] International Atomic Energy Agency: Derived Intervention Levels for Application in Controlling Radiation Doses to the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency. IAEA Safety Series No. 81. Vienna (1986).

[16] International Atomic Energy Agency: *Extension of the principles of radiation protection to sources of potential exposures.* IAEA Safety Series No. 104. Vienna (1990).

[17] International Atomic Energy Agency: *The Radiological Accident in Goiânia.* IAEA, Vienna (1988).

[18] International Commission on Radiation Units and Measurements: *Conceptual Basis for the Determination of Dose Equivalent.* ICRU Report 25. ICRU, Bethesda MD (1976).

[19] International Commission on Radiation Units and Measurements: *The Quality Factor in Radiation Protection.* ICRU Report 40. ICRU, Bethesda MD (1986).

[20] International Commission on Radiological Protection: *Recommendations of the ICRP.* Brit. J. Radiol. Suppl. No. 6 (1955).

[21] International Commission on Radiological Protection: *Report on amendments during 1956 to the recommendations of the ICRP.* Radiation Research 8 (1958), 539-542.

[22] International Commission on Radiological Protection: *ICRP Publications 1-71.* Pergamon Press, Oxford (1958-1995).

[23] International Commission on Radiological Protection and International Commission on Radiological Units and Measurements: *Exposure of man to ionizing radiation. An enquiry into methods of evaluation.* Physics in Medicine and Biology 2 (1957), 107-151.

[24] International Labour Organization: Convention (115) concerning the Protection of Workers against Ionizing Radiations. ILO, Geneva (1960).

[25] Jacobi, V.: *The Concept of the Effective Dose - A Proposal for the Combination of Organ Doses.* Paper presented at an International Symphosium on Radiation Protection, Aviemore, Scotland, 1974. Rad, and Environm. Biohys. 12 (1975), 101-109.

[26] Lindell, B.: An approach to the question of computing doses and effects from fall-out. Health Physics 2 (1960), 341-365.

[27] Lindell, B.: *ICRP 1928-1978.* Radiological Protection Bulletin (NRPB) No. 24 (1978).

[28] Lindell, B. and Sowby, F.D.: *ICRP since 1963.* Journal of the Society for Radiological Protection 4 (1984), 113-117.

[29] Acklis, R.M.: *The Great Radium Scandal.* Scientific American, August 1993, pp. 78-83.

[30] McMahon, B.: *Prenatal x-ray exposure and childhood cancer.* J. Nat. Cancer Inst. 28 (1962), 1173-1191.

[31] Morgan, J.R.: *A history of pitchblende.* Atom 329 (1984), 63-68.

[32] OECD European Nuclear Energy Agency: Basic approach for safety analysis and control of products containing radionuclides and available to the general public. OECD/ENEA Paris (1970).

[33] OECD Nuclear Energy Agency: Radiological significance and management of tritium, carbon-14, krypton-85 and iodine-129 arising from the nuclear fuel cycle. OECD/NEA Paris (1980).

[34] OECD Nuclear Energy Agency: Emergency Planning Practices and Criteria after the Chernobyl Accident. OECD/NEA Paris (1988).

[35] OECD Nuclear Energy Agency: Protection of the population in the event of a nuclear accident. OECD/NEA Paris (1990).

[36] Pontifical Academy of Sciences: *Biological implications of Optimization in Radiation Procedures.* Pontifical Academy of Sciences, Vatican (1985).

[37] Powers, Thomas: *Heisenberg's war.* Jonathan Cape, London (1993).

[38] Rhodes, Richard: *The Making of the Atomic Bomb.* Penguin Books, London (1986).

[39] Second International Congress of Radiology: *International Recommendations for X-Ray and Radium Protection.* P.A. Norstedt & Söner, Stockholm (1929).

[40] Sievert, R.: *Measurements of γ-radiation from the human body* (Mediciones de las radiaciones gamma del organismo humano). Arkiv för fysik 3 (1951), 337-346.

[41] Sievert, R.: *The International Commission on Radiological Protection (ICRP).* International Associations, Brussels (1957), 3-7.

[42] Smith, Eric E.: *Radiation Science at the National Physical Laboratory 1912-1955.* National Physical Laboratory, Department of Industry, London, 1975.

[43] Sowby, F.D.: *Radiation and other risks.* Health Physics 11 (1965), 879-887.

[44] Spiers, F.W. and Burch, P.R.J.: *Radioactivity of the human body.* Advances in Biological and Medical Physics, Vol. V. Academic Press, New York (1957).

[45] Stannard, J.N.: *Radioactivity and Health. A History.* Document DE 880113791 (DOE/ RL/01830-T59) US National Technical Information Service, Springfield VA (1988).

[46] Stewart, A., Webb, J., Giles, D and Hewitt, D.: *Malignant disease in childhood and diagnostic irradiation in utero.* Lancet (1956), 447.

[47] Taylor, L.S.: *History of the International Commission on Radiological Protection (ICRP).* Health Physics 1 (1958), 97-104.

[48] Taylor, Lauriston S.: *Organization for Radiation Protection. The operations of the ICRP and NCRP 1928-1974.* U.S. Department of Energy, Office of Technical Information. DOE/TIC-10124 (1979).

[49] Taylor, Lauriston S.: *Reminiscences about the early days of organized radiation protection.* In Health Physics: A backward glance (Ed. R.L. Kathren & P.L. Ziemer), Pergamon Press, Oxford (1980).

[50] UK Medical Research Council: *The Hazards to Man of Nuclear and Allied Radiations.* Her Majesty's Stationery Office. London (1956).

[51] United Nations Scientific Commitee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Reports to the UN General Assembly* (1958, 1962, 1964, 1966, 1969, 1972, 1977, 1982, 1986, 1988, 1993 y 1994).

[52] US National Academy of Sciences - National Research Council: *The biological effects of atomic radiation. Summary reports.* NASc, Washington (1956).

[53] US National Academy of Sciences - National Research Council: *The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation.* Commitee on the Biological Effects of Ionizing Radiations ("BEIR III"). NASc, Washington (1980).

[54] US National Bureau of Standards: *Safe handling of radioactive luminous compound.* NBS Handbook 27, Washington (1941).

[55] Wintz, Hermann och Walther Rump: *Protective measures against dangers resulting from the use of radium, roentgen and ultra-violet rays.* Health Organization of the League of Nations, Report C.H. 1054, Geneva (1931).

[56] Åberg, Bertil and Frank Hungate (editors): *Radioecological Concentration Processes.* Pergamon Press, Oxford (1967).

Fernando Zamora, Sofía Suárez, Engracia Rubio y Carlos Enríquez*

Futura reglamentación de transporte de material radiactivo

La última revisión del reglamento de transporte de material radiactivo del OIEA introduce cambios significativos frente a la edición anterior. El artículo pretende destacar dichos cambios con vistas a la próxima puesta en vigor de los nuevos requisitos en la reglamentación internacional y nacional sobre la materia.

1. Introducción

A raíz de la rápida expansión de la industria nuclear y de las aplicaciones del material radiactivo en la década de los cincuenta, se creó en 1957 el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y, en 1959, el Consejo Económico y Social de la ONU le encomendó la elaboración de unas recomendaciones aplicables al transporte de material radiactivo.

De esta manera, en 1961 surgió la primera edición del *Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos* o *Guía de Seguridad nº 6* del OIEA (*SS-6*), que posteriormente ha sido revisado en sucesivas ocasiones, siendo fundamentales las ediciones de 1965, 1967 y 1973, así como las enmiendas publicadas en 1979, 1985 y 1990. Las diferentes ediciones se han ido trasladando a las principales reglamentaciones internacionales aplicables en los diferentes modos de transporte, en general de manera prácticamente literal.

La última edición fue publicada en septiembre de 1996 y supone la primera gran revisión del reglamento desde la introducción del proceso continuado iniciado en 1986 a raíz de la edición de 1985 y que ha ido dando lugar a cambios menores o de importancia intermedia en 1988 y 1990.

Junto al reglamento han ido editándose tres guías de ayuda para su aplicación, la *SS-7*, *SS-37* y *SS-80*, que han sido fundamentales para todos los que hemos tenido que manejar día tras día los requisitos en él recogidos.

La nueva edición del reglamento ha pasado a identificarse como *ST-1* en lugar de *SS-6* y ha supuesto la ampliación en materias esenciales (como la aparición de nuevos tipos de materiales y de bultos) o modificaciones muy importantes en valores de exención y en criterios de referencia y límites.

Además de los cambios en el contenido, la nueva edición ha generado en el foro internacional un importante impulso de armonización de las diferentes reglamentaciones de transporte. Hasta ahora, la revisión de los reglamentos internacionales para los distintos medios de transporte ha ido caminando independientemente, de manera que, en general, la entrada en vigor en ellas de las sucesivas ediciones del reglamento del OIEA no ha coincidido. Esto ha provocado situaciones muy complicadas para los usuarios de la reglamentación, pues muchos movimientos se efectúan consecutivamente por diferentes medios de transporte. Por otra parte, la estructura de las diversas reglamentaciones internacionales ha sido distinta, lo que ha complicado enormemente su utilización debido a su complejidad.

Sin embargo, dado el evidente interés en solucionar estos problemas, a raíz de la publicación de la última edición de su reglamento, el OIEA ha promovido su incorporación al tiempo en las principales reglamentaciones de los distintos modos de transporte (ADR, RID, OACI e IMDG). De esta manera, existe una decidida tendencia, casi un compromiso, a que la fecha de la entrada en vigor de los nuevos requisitos en los diferentes regla-

* F. Zamora es jefe del Área de Instalaciones Radiactivas Industriales del CSN, a la que pertenecen S. Suárez y E. Rubio. C. Enríquez es responsable del Área de Operaciones y Transporte de Enresa.

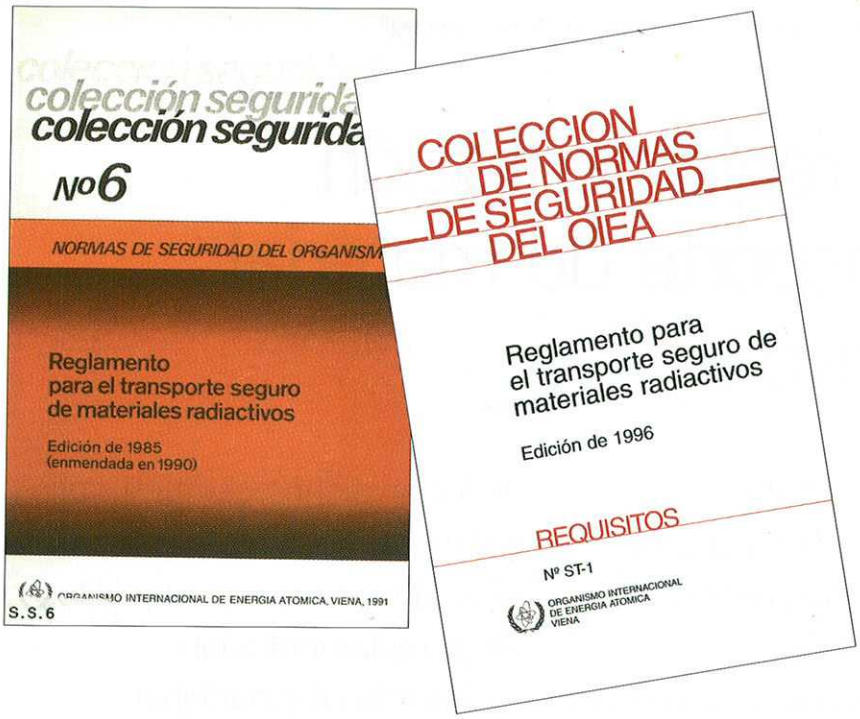


Figura 1. Ediciones SS-6 y ST-1 del Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos del OIEA.

mentos se produzca en torno a los primeros meses del año 2001. Igualmente, se está concretando una postura generalizada para que las distintas reglamentaciones evolucionen hacia una estructura similar a la hora de presentar los requisitos aplicables a la materia radiactiva.

Por tanto, es de esperar que tras su inclusión en los reglamentos internacionales, prácticamente en el año 2001, la edición de 1996 que, por el momento sólo tiene carácter recomendatorio, entre en vigor plenamente en nuestro país.

En este artículo se identifican los cambios que se consideran fundamentales o más significativos, sin pretender hacer una relación exhaustiva, y se hará un análisis de las implicaciones de estos cambios en los transportes que se vienen llevando a cabo en nuestro país.

Se pretende que este artículo, de carácter general, sea el primero de una serie sobre los futuros cambios en la reglamentación, de manera que los próximos entren más en detalle en los requisitos para los distintos tipos de bulto, que son la columna vertebral del reglamento del OIEA.

2. Cambios estructurales

El reglamento pasa de siete a ocho secciones, sencillamente porque las definiciones que antes se incluían en la sección I pasan a ser una sección independiente, la II. Al igual que en la anterior edición, aparecen dos anexos, pero uno de ellos no coincide con los anteriores. Ahora, el listado de números de Naciones Unidas pasa a ser una tabla del reglamento y es sustituido por el resumen sobre los requisitos de aprobación y notificación, que resulta muy útil para sus usuarios y que antes se contenía en la *Guía SS-80*.

Sin duda, el cambio más significativo en este apartado es la inclusión de la hasta ahora *Guía SS-80*. Es decir, pasan a formar parte del reglamento los esquemas sinópticos sobre requerimientos para los diferentes tipos de remesas de material radiactivo, más conocidos como *fichas*. Considerando la ya demostrada utilidad práctica que han tenido estos esquemas para los usuarios de las normas, sin duda ahora se facilita su consulta al formar parte del mismo documento donde se recogen los requerimientos.

Dentro de las fichas aparece una nueva, la relativa a los novedosos bultos tipo C, que será la nº 12 y por tanto la ficha de materiales fisionables pasa a ser la nº 13 y la de transporte bajo arreglos especiales la nº 14. Además, hay un cambio en la forma de presentar los esquemas o fichas con respecto a la antigua *SS-80*. En la *ST-1*, además de las fichas para cada uno de los tipos de remesa, se incluye una ficha con los requisitos comunes para las fichas 1 a 4 y otra con los comunes para las fichas 5 a 14, siguiendo la práctica de reglamentaciones como el ADR.

En definitiva, estos cambios probablemente facilitarán la consulta del reglamento a la hora de definir en cuál de los 14 tipos de remesas se puede encontrar el material radiactivo que pretendamos transportar.

3. Cambios esenciales

Aunque la nueva edición contiene numerosos cambios, es evidente que algunos son de un carácter más esencial, bien porque implican variaciones fundamentales de criterios de referencia o bien porque suponen un cambio importante de los requisitos de transporte de determinados materiales, apareciendo nuevos tipos de embalaje o incluso nuevos tipos de materiales.

3.1 Protección radiológica

Un caso claro de modificación de criterios afecta a los valores de dosis que sirven de referencia para el establecimiento de medidas de vigilancia radiológica de los trabajadores del transporte. Tomando como base las últimas recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica ya consideradas en las normas básicas del OIEA (*SS-115*) y en la directiva de la Unión Europea sobre protección contra las radiaciones ionizantes 96/29/Euratom, se ha decidido la reducción de esos valores de referencia. En la tabla 1, se pueden ver las di-

ferencias entre la nueva y la anterior edición del reglamento

Como consecuencia de este cambio, no habrá duda de que las empresas que transportan grandes cantidades de bultos con materiales radiofarmacéuticos, especialmente los de categoría II y III amarilla, deberán dotar a sus conductores de dosimetría personal.

Es muy probable, asimismo, que algunos grupos de trabajadores de los terminales de carga de aeropuertos con mucho movimiento de bultos radiactivos queden encuadrados en la categoría intermedia y deban ser sometidos a algún tipo de vigilancia radiológica, salvo que las operaciones se automaticen.

No obstante, en ambos casos las dosis podrían reducirse significativamente considerando plenamente el principio Alara en los procedimientos de trabajo.

Se mantienen, sin embargo, en la *ST-1* los valores de referencia de la anterior edición para el cálculo de las distancias de segregación entre los bultos radiactivos y las personas, 5 mSv/año para trabajadores en áreas de trabajo normalmente ocupadas y 1 mSv/año para miembros del público. Se ha considerado que estos valores son lo suficientemente restrictivos como para permitir dar cumplimiento a los nuevos límites de dosis anual para los trabajadores expuestos y miembros del público.

Por último, es destacable en este ámbito la introducción de un nuevo concepto: el Programa de Protección Radiológica (PPR). Estos programas deberán ser desarrollados por las empresas que intervengan en cualquiera de las actividades relacionadas con el transporte que impliquen una exposición a las radiaciones ionizantes (expedidores, transportistas y receptores). Los programas recogerán procedimientos de protección radiológica en condiciones normales y en emergencias y programas de formación de los trabajadores, y deberán estar a

Tabla 1. Dosis de referencia para establecer requisitos de vigilancia radiológica a los trabajadores.

SS-6	ST-1	Tipo de vigilancia radiológica
< 5mSv/año	< 1mSv/año	No se precisa
de 5 mSv/año a 15 mSv/año	de 1mSv/año a 6mSv/año	Vigilancia de área o dosimetría personal
> 15 mSv/año	> 6 mSv/año	Dosimetría personal

disposición de las autoridades competentes.

Este último requisito no debe considerarse nuevo para los expedidores y receptores españoles, todos ellos titulares de instalaciones nucleares o radiactivas, ya que el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas exige a estas instalaciones un reglamento de funcionamiento y, en ciertos casos, un manual de protección radiológica (en ambos deberían estar recogidos los contenidos especificados por estos PPR). No obstante, en muchos casos esos documentos son excesivamente genéricos en lo que al transporte se refiere y, por tanto, será preciso llevar a cabo una revisión de los mismos. Sin embargo, el requisito sí será especialmente novedoso para las empresas transportistas, que por el momento sólo precisan registrarse ante el Ministerio de Industria y Energía (Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre). Aunque algunos de los puntos contemplados por los PPR deben ser cumplidos por estas empresas por requerimiento del Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, no existe por el momento un requisito explícito de que dispongan de un documento de estas características.

3.2 Exenciones y exclusiones

La edición de 1985 definía como material radiactivo (sólo a los efectos de aplicación del reglamento de transporte) aquel cuya actividad específica fuera superior a 70 Bq/g. Sin embargo, en uniformidad con las normas básicas del OIEA (*SS-115*), la *ST-1* pasa a fijar un valor de exención para cada radionucleido, expresado tanto en actividad específica como en actividad por remesa. Por debajo de cualquiera de esos valores, el transporte de la remesa quedaría exento de la aplicación del reglamento.

Por otra parte, aparecen tres nuevas exclusiones del campo de aplicación del reglamento:

— Cuando el material forme parte integral del medio de transporte (sería el caso de las señalizaciones de emergencia provistas de tritio en aviones).

— El transporte de productos de consumo provistos de material radiactivo, siempre que su puesta en el mercado haya sido autorizada y una vez adquiridos por el usuario final (pensemos en los detectores de humo iónicos). De hecho, la mayoría de estos productos ya están exceptuados de muchos de los requisitos reglamentarios al encuadrase en alguna de las fichas de transporte de bultos exceptuados.

— Materiales y minerales conteniendo radionucleidos en la concentración natural, siempre que la actividad específica no exceda diez veces la establecida por el propio reglamento para los diferentes radionucleidos. De esta manera, muchos productos naturales con actividad específica significativa quedarían fuera de la aplicación de la reglamentación de transporte (exclusivamente de la del transporte).

Estos tres casos se añaden a los actuales que excluyen el movimiento del material radiactivo dentro de instalaciones sujetas a reglamentaciones de seguridad, es decir, a las instalaciones nucleares y ra-

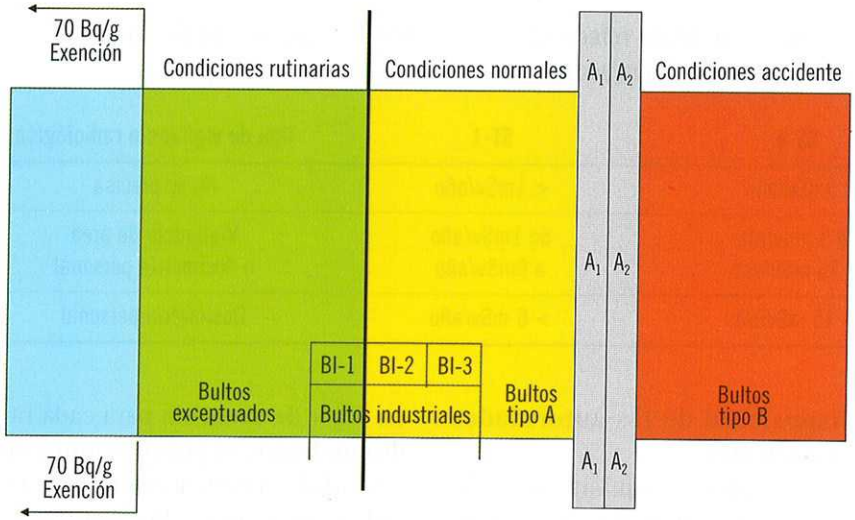
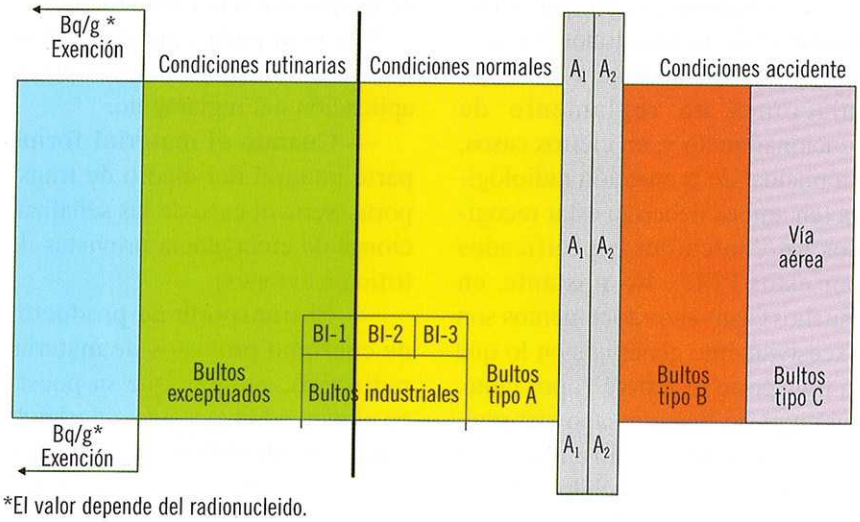


Figura 2. Requisitos según tipo de bulto y condiciones de transporte (SS-6).



*El valor depende del radionucleido.

Figura 3. Requisitos según tipo de bulto y condiciones de transporte (ST-1).

diactivas (en la nueva edición se añade: salvo que el movimiento implique el uso de vías públicas) y al material radiactivo incorporado a personas para su tratamiento o diagnóstico (se añade ahora: "y a animales vivos").

3.3 Bultos tipo C y material de baja dispersabilidad (ficha 12)

Hasta esta edición, uno de los pilares de la filosofía del reglamento del OIEA era establecer los requisitos de diseño de los embalajes en función del riesgo de su contenido y de las incidencias que debían soportar (condiciones de transporte), en general independientemente del modo de transporte (figura 2). Sin embargo, en la nueva edición se produce una desviación sustancial de esta filosofía al aparecer un nuevo tipo de bulto y un nuevo tipo de material, en función de consideraciones del transporte por vía aérea (figura 3).

En el proceso de revisión del reglamento se consideró que los requisitos de diseño del bulto tipo B con vistas a soportar condiciones de accidente no serían suficientemente estrictos para un accidente severo por vía aérea. En un principio, el análisis se inició para materiales de alto riesgo como el plutonio, pero finalmente se extendió a materiales con alta actividad transportados por vía aérea.

En resumen, si la actividad del material a transportar por vía aérea supera unas determinadas cantidades deberá ser embalado en bultos del tipo C, que han de cumplir requisitos más severos que los del tipo B. Los bultos tipo C requerirán aprobación unilateral —salvo que contengan material fisionable, en cuyo caso deberá ser multilateral— y para obtener la aprobación tendrán que superar una serie de ensayos, entre ellos tres específicos para este tipo de bultos (uno térmico y dos mecánicos), que simulan condiciones de accidente severo. Uno de los mecánicos es totalmente novedoso y simula las condiciones de un accidente aéreo: el impacto del bulto sobre un blanco rígido a una velocidad no inferior a 90 m/s.

Además, en conjunción con este nuevo tipo de bulto aparece un nuevo tipo de material, el *material de baja dispersabilidad* (MBD). El sentido de este nuevo tipo de material no es otro que permitir que se puedan utilizar bultos tipo B para el transporte aéreo de materiales de alta actividad, que de no tener esa baja dispersabilidad deberían transportarse en bultos tipo C.

El material de baja dispersabilidad incrementa la familia de los materiales que de acuerdo con el reglamento deben superar ensayos específicos: el material en forma especial y los materiales de baja actividad específica tipo III (BAE-III). El material de baja dispersabilidad estará sujeto a aprobación multilateral y su baja dispersabilidad quedará demostrada por la superación de un ensayo térmico y otro de impacto (los mismos que para los bultos tipo C) y uno de lixiviación (el mismo que para los materiales BAE-III).

3.4 Bultos para hexafluoruro de uranio

Este material, además de ser radiactivo, tiene otras características de peligro pues al contacto con el aire se produce fluoruro de hidrógeno, que es muy corrosivo y tóxico y además se transporta en recipientes a presión.

En la anterior edición del reglamento no existían unos requisitos específicos para los embalajes del UF_6,

sino que debían cumplir aquellos derivados de su característica radiactiva y, en su caso, fisionable. Considerando los riesgos particulares derivados de que el UF_6 es transportado a presión en sus contenedores, la *ST-1* establece, en la línea de las reglamentaciones internacionales sobre mercancías peligrosas como el ADR, que los embalajes para UF_6 deben además cumplir los requerimientos establecidos en la norma ISO 7195 y superar una serie de ensayos que simulen condiciones normales de transporte y de accidente (figura 4).



Figura 4. Bulto COGEMA 30B Overpack para el transporte de hexafluoruro de uranio.

4. Otros cambios de importancia

Además de los cambios citados como esenciales, se han producido otros que, siempre desde una perspectiva subjetiva, se pueden calificar como importantes y que afectan fundamentalmente a los requisitos de protección radiológica y administrativos.

4.1. Valores A_1 y A_2

A_1 y A_2 son los valores de actividad para cada radionucleido a partir de los que un material debería ser transportado en un tipo de bulto capaz de soportar condiciones de accidente (figuras 2 y 3). Con motivo de la revisión de algunas de las hipótesis de cálculo del sistema Q (procedimiento para la obtención de los valores A_1 y A_2), se han obtenido cambios en estos valores en numerosos radionucleidos, pero en general no suponen variaciones muy significativas.

En la tabla 2 se muestran la variaciones en algunos de los radioisótopos de uso más común en nuestras instalaciones, que se han producido entre la edición en vigor en nuestra reglamentación, la *SS-6* de 1985 (enmendada en 1990) y la nueva *ST-1*.

Tabla 2. Cambios en los valores A_1 y A_2.

	SS-6		ST-1	
Radionucleido	**A_1 (TBq)**	**A_2 (TBq)**	**A_1 (TBq)**	**A_2 (TBq)**
Am-241	2	2×10^{-4}	10	1×10^{-3}
C-14	40	2	40	3
Co-60	0,4	0,4	0,4	0,4
Co-57	8	8	10	10
Cs-137	2	0,5	2	0,6
Ga-67	6	6	7	3
I-125	20	2	20	3
I-131	3	0,5	3	0,7
Ir-192	1	0,5	1	0,6
Kr-85	20	10	10	10
Mo-99	0,6	0,5	1	0,6
P-32	0,3	0,3	0,5	0,5
Pu-238	2	2×10^{-4}	10	1×10^{-3}
Ra-226	0,3	2×10^{-2}	0,2	3×10^{-3}
Sr-90	0,2	0,1	0,3	0,3
Tl-204	4	0,5	10	0,7
Tritio	40	40	40	40
U natural	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
U enr < 5%	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite

Como puede observarse, en la mayoría de estos radioisótopos se produce una ligera elevación de los valores de A_1 y A_2. Por tanto, podrá transportarse algo más de actividad en bultos tipo A, que no tienen por qué soportar condiciones de accidente. En este sentido, es destacable la subida en cinco veces de emisores alfa como el Am-241 y el Pu-238. En el lado de las bajas destaca el Ra-226, cuyo valor de A_2 disminuye casi en un orden de magnitud, por lo que si el material no va encapsulado en for-

Tabla 3. Valores límite de contaminación superficial.

	SS-6		ST-1	
	Emisores β/γ y α de baja toxicidad	Otros emisores α	Emisores β/γ y α de baja toxicidad	Otros emisores α
Definición de contaminación	0,4 Bq/cm²	0,04 Bq/cm²	0,4 Bq/cm²	0,04 Bq/cm²
Bultos exceptuados (*)	0,4 Bq/cm²	0,04 Bq/cm²	4 Bq/cm²	0,4 Bq/cm²
Resto de bultos (*)	4 Bq/cm²	0,4 Bq/cm²	4 Bq/cm²	0,4 Bq/cm²

(*) Contaminación desprendible superficial.

ma especial precisará ser transportado en un bulto tipo B, capaz de soportar condiciones de accidente, si se superan sólo 3 GBq (81 mCi).

4.2. Límites de contaminación superficial

La definición de contaminación mantiene los valores recogidos en la anterior edición del reglamento. Sin embargo, el límite de contaminación desprendible en la superficie externa de los bultos exceptuados, que era diez veces inferior al del resto de los tipos de bultos y, por tanto, coincidía con la definición de contaminación, se incrementa equiparándose a los del resto, como puede observarse en la tabla 3.

El incremento en los valores para los bultos exceptuados se ha basado en nuevos análisis de protección radiológica, en especial los llevados a cabo por el NRPB británico, que han concluido que la subida de los límites hasta el mismo valor del resto de bultos no supone un aumento de las dosis al público y trabajadores.

La armonización de los valores eliminará la confusión que actualmente se da en este tema y, sin duda, aportará claros beneficios a los usuarios, tanto logísticos como de reducción de costes, ya que hasta ahora el transporte en común de los bultos exceptuados con el resto de tipos de bulto obliga a adoptar los valores de contaminación más restrictivos de los primeros.

4.3. Señalización de bultos

Se produce un incremento significativo de los requisitos de señalización. Así, los bultos exceptuados, para los que antes no se requería ningún tipo de señalización externa, ahora deberán señalizarse con el número de Naciones Unidas (NU). Este cambio se ha debido fundamentalmente a la consideración de que la identificación rápida de la materia por los servicios de intervención inmediata es básica en el caso de una emergencia. Por otra parte, se continúa exigiendo la señalización interna de los bultos exceptuados con la palabra *radiactivo*. Además, salvo en el caso de los bultos exceptuados, todos los bultos deberán llevar junto al número NU la correspondiente descripción del tipo de material contenido.

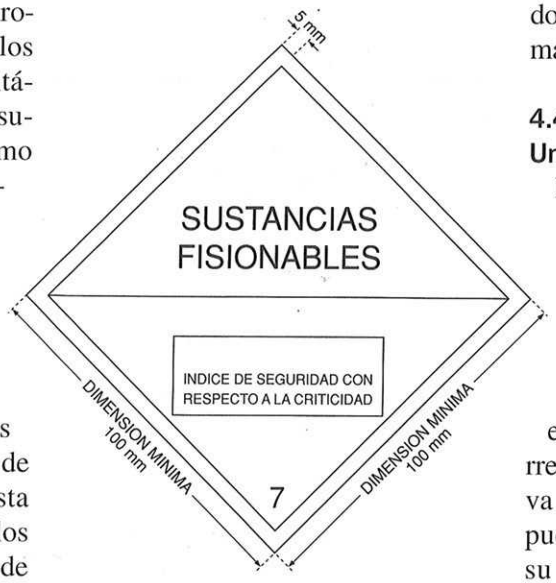


Figura 5. Etiqueta para el índice de seguridad con respecto a la criticidad.

Todos los bultos deberán ser marcados externamente con la identificación del expedidor, el destinatario o ambos (esta exigencia ya venía requiriéndose en el reglamento de transporte por vía aérea). Esta es una buena medida para evitar las incidencias de pérdidas de bultos en transportes que no se efectúan bajo uso exclusivo.

Los bultos industriales pasarán a ser marcados exteriormente con criterios similares a como hasta ahora lo eran los del tipo A. Además, tanto los bultos industriales como los bultos tipo A, tendrán que ser marcados con la identificación del país de origen y con el nombre del fabricante.

El incremento de la señalización y el marcado en bultos exceptuados y tipo A tendrá un impacto significativo en los fabricantes o comercializadores en origen de productos radiofarmacéuticos y de investigación, que suponen el 90% de los movimientos de material radiactivo en forma de paquetería. Al no existir prácticamente fabricantes españoles, el impacto en nuestro país será mínimo.

Por último, se crea una nueva etiqueta directamente relacionada con la aparición del nuevo concepto de *índice de seguridad sobre la criticidad* (ISC), que identifica el contenido del bulto como fisionable e informa del riesgo de criticidad (figura 5).

4.4. Números de las Naciones Unidas (NU)

Los números NU y las correspondientes identificaciones de las materias tienen como objetivo básico la información rápida en un control durante el transporte o en la intervención ante una emergencia. Los 13 números correspondientes a la materia radiactiva se han considerado insuficientes, pues engloban las materias según su riesgo con criterios excesivamente genéricos. Por tal motivo, se pasa de 13 a 25, buscando una mayor especificidad. Así por ejemplo,

si antes se englobaban en un sólo número NU todos los tipos de bultos exceptuados, ahora se generan cuatro números, uno para cada tipo. Igualmente para los materiales de baja actividad específica (BAE) se crea un número para cada uno de sus tres tipos. Otro ejemplo son los materiales radiactivos fisionables, que de un sólo número pasan a nueve, discriminando el tipo de bulto o de materia, según su naturaleza radiactiva (no fisionable).

4.5. Índice de transporte

Hasta ahora un solo concepto, el *índice de transporte* (IT), podía informar tanto del riesgo de irradiación a un metro del bulto como del riesgo de criticidad, en el caso de que transportara material fisionable. Así, en este caso, el índice de transporte podía tener dos valores y se elegía el mayor, es decir el más restrictivo. Esta situación ha dado lugar a numerosas confusiones, por lo que se ha decidido separar completamente ambos conceptos de riesgo, de manera que según la nueva edición del reglamento el índice de transporte informará de intensidad de dosis a un metro de la superficie del bulto y el índice de seguridad sobre la criticidad informará sobre el riesgo de criticidad.

En consecuencia, los bultos con materiales fisionables tendrán ambos índices y así se indicará en la documentación de acompañamiento y en las señalizaciones de los bultos, siendo el valor del índice de seguridad sobre la criticidad particular para cada diseño y obteniéndose del análisis de criticidad correspondiente.

4.6. Materiales fisionables

Los cambios que se han producido en este ámbito precisarían un análisis más detallado y extenso que el pretendido en este artículo, pero se pueden identificar algunos de ellos. Así, el Pu-238 ya no será considerado material fisionable en el ámbito de la reglamentación de transporte. Además, se han producido algunas variaciones en los criterios para considerar a un material exento de los requisitos que establece el reglamento a los materiales fisionables, aunque *físicamente* lo sea. Por otra parte, se introducen parámetros más restrictivos en las hipótesis de partida a aplicar en los análisis de criticidad de los bultos para materiales fisionables.

5. Guías explicativas o de apoyo del reglamento del OIEA

Las guías *SS-7* y *SS-37*, de gran utilidad hasta ahora como apoyo explicativo del reglamento, aunque sin ningún carácter normativo, pasarán a ser un solo documento que se denominará *ST-2*, cuya publicación se espera en el OIEA para el primer semestre del año 2000. Lógicamente, los cambios en estas guías van en relación con los introducidos en el reglamento, si bien también se ha tratado de mejorar las explicaciones sobre algunos párrafos del reglamento que no han sufrido modificación, pero que se ha considerado precisan mayor claridad.

La *Guía SS-87*, sobre planificación de emergencias en el transporte, pasará a ser la *ST-3* y previsiblemente será publicada también en el primer semestre de 2000.

6. Futuro de las reglamentaciones nacionales

En los casos de la carretera y el ferrocarril, el cambio fundamental ya se ha producido, pues desde el último trimestre de 1998 han desaparecido los reglamentos nacionales sobre transporte de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril, TPC y TPF. Así, en los reales decretos que los derogan, 2115/1998 de 2 de octubre y 2225/1998 de 19 de octubre, respectivamente, se remite al ADR y RID, que serán la reglamentación aplicable en nuestro país, además de algunas normas de carácter particular que establecen esos decretos para el transporte por territorio español.

Tanto el ADR como el RID son la reglamentación aplicable en todos los países de la Unión Europea y ya están siendo modificados de acuerdo con los nuevos requisitos de la *ST-1* del OIEA.

Igualmente, están siendo modificados con los requerimientos de la ST-1 las instrucciones técnicas de la OACI (Organización Internacional de Aviación Civil) a las que refiere nuestro reglamento de transporte de mercancías peligrosas por vía aérea, que se irán publicando cada dos años como hasta ahora, y el IMDG (Código Marítimo Internacional) de la Organización Marítima Internacional, que continuará siendo la reglamentación de obligado cumplimiento en España para la vía marítima.

Y como ya se indicaba en la introducción al artículo, todo indica que las cuatro reglamentaciones pondrán en vigor los requerimientos de la *ST-1* del OIEA en el año 2001.

Referencias

☐ Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos del OIEA. Edición de 1996. *Nº ST-1* de la colección de normas de seguridad del OIEA.

☐ Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos del OIEA. Edición de 1985 (enmendada en 1990). *SS-6* de la colección de normas de seguridad del OIEA.

☐ *Potential Radiation Exposures from Surface Contamination on Packages during Transport*. National Radiological Protection Board. NRPB-M598. Agosto, 1995

☐ *The 1996 IAEA regulations for the safe transport of radioactive materials. The transport of fissil material*. C.K. Wilson. International Journal of Radioactive Materials Transport. Vol.8, Nº 2, 1997.

Sonia Serrano*

Simulacro general del Plan de Emergencia Nuclear de Guadalajara

Tras año y medio de minucioso trabajo, en marzo de 1999 se realizó un simulacro general del Plan de Emergencia Nuclear de Guadalajara (Pengua) para el área de los 10 kilómetros en torno a la central nuclear José Cabrera. Además de la respuesta institucional, destacó el buen talante de los ciudadanos que participaron en este simulacro, de cuyos detalles da cuenta este artículo.

1. Introducción

El Plan de Emergencia Nuclear de Guadalajara (Pengua), actualmente en vigor, data del año 1990, año en que fue aprobado por acuerdo de Consejo de Ministros tras ser adaptado a lo establecido en el Plan Básico de Emergencia Nuclear (Plaben), publicado en 1989, que constituye la directriz básica de planificación de emergencia nuclear para centrales nucleares de potencia.

Técnicamente, la planificación para hacer frente a posibles emergencias que pudieran derivarse de accidentes graves en las centrales nucleares que se encuentran funcionando en nuestro país se aborda a través de dos tipos de planes relacionados entre sí por una interfase: el Plan de Emergencia Interior (PEI), elaborado por el titular de la instalación, y el Plan de Emergencia Exterior (PEE), elaborado por la Dirección General de Protección Civil bajo los criterios radiológicos del Consejo de Seguridad Nuclear.

Así pues, estos planes de emergencia constituyen una barrera de seguridad más y entrarían en funcionamiento si el resto de los sistemas fracasaran, con un mismo objetivo fundamental: evitar, o al menos reducir en lo posible, los efectos adversos de las radiaciones ionizantes sobre los trabajadores y la población.

Por tanto, el Pengua constituye el Plan de Emergencia Exterior de las centrales nucleares que se encuentran ubicadas en la provincia de Guadalajara: José Cabrera, más conocida como Zorita, y Trillo.

Asimismo, de acuerdo con la Ley 2/1985, sobre Protección Civil, y la norma básica que la desarrolla, las emergencias nucleares se engloban dentro de los riesgos objeto de planes especiales, cuya aplicación viene exigida siempre por el interés nacional, correspondiéndole al Estado la total competencia y responsabilidad, aunque sin perjuicio de la participación del resto de las administraciones públicas o entidades. Por ello, el Pengua es también un plan de protección civil, de tipo especial y de ámbito estatal.

Teniendo esto en cuenta, una de las características más importantes del Pengua, así como del resto de sus homólogos, es que la activación formal de este plan supone necesariamente la implicación simultánea de dos niveles de respuesta a la emergencia distintos y complementarios:

— El nivel del entorno de la central nuclear accidentada.

— El nivel central de respuesta y apoyo, integrado por la Dirección General de Protección Civil, como órgano coordinador de todos los medios y recursos de apoyo, y por el Consejo de Seguridad Nuclear, como único órgano competente por ley en materia de seguridad nuclear y protección radiológica.

No obstante, sabemos que la eficacia de cualquier plan de emergencia de protección civil depende de dos factores básicos: de la preparación de las personas que forman parte de su organización y del comportamiento de la población acorde con las instrucciones

* Técnico superior de riesgo nuclear y radiológico de la Dirección General de Protección Civil.

que recibe. Conseguir que estos objetivos se cumplan con cierto nivel de garantía a lo largo del tiempo requiere, especialmente en este caso de las emergencias nucleares, una laboriosa y constante tarea de mantenimiento de la efectividad de estos planes, dada la falta de oportunidad real de su aplicación.

Uno de los mecanismos que establece la Ley 2/1985 sobre Protección Civil, y que también recogen los planes de emergencia nuclear para garantizar dicha eficacia, es la realización de ejercicios y simulacros de forma periódica.

Así pues, como comprobación de la capacidad de respuesta y empleo de los medios previstos en el Pengua, el 16 de marzo de 1999 se desarrolló un simulacro general que no incluyó la simulación de los aspectos vinculados al PEI de la central nuclear de José Cabrera, aunque sí se establecieron comunicaciones y se activó el Plan de Vigilancia Radiológica de Emergencia (PVRE).

El Pengua se activó en las fases de preemergencia y emergencia, llegando a declararse las situaciones siguientes para las distintas zonas de planificación en el entorno de la central: situación 4 para el sector de atención preferente (SAP) de la zona IA; situación 3 para el SAP de la zona IB; situación 2 para el SAP de la zona IC; y situación 1 para el resto de la zona I.

Esto supuso tener que aplicar medidas de protección a la población en los 12 municipios del área de los 10 kilómetros, que fueron además del control de accesos, el confinamiento, la profilaxis radiológica (reparto de pastillas de yoduro potásico), la estabulación de animales y la evacuación.

Este simulacro se desarrolló en una jornada de mañana, tuvo una duración real de siete horas y media, iniciándose a las 7.30 y finalizando a las 15.00 y contó con la participación activa de la población para llevar a cabo la evacuación, 21 personas del poblado de la central nuclear José Cabrera y 36 personas de Zorita de los Canes, así como de profesionales de todos los medios de comunicación social (agencias de prensa, radio y televisión), tanto provinciales como nacionales, que pudieron seguir *in situ* las operaciones del simulacro.

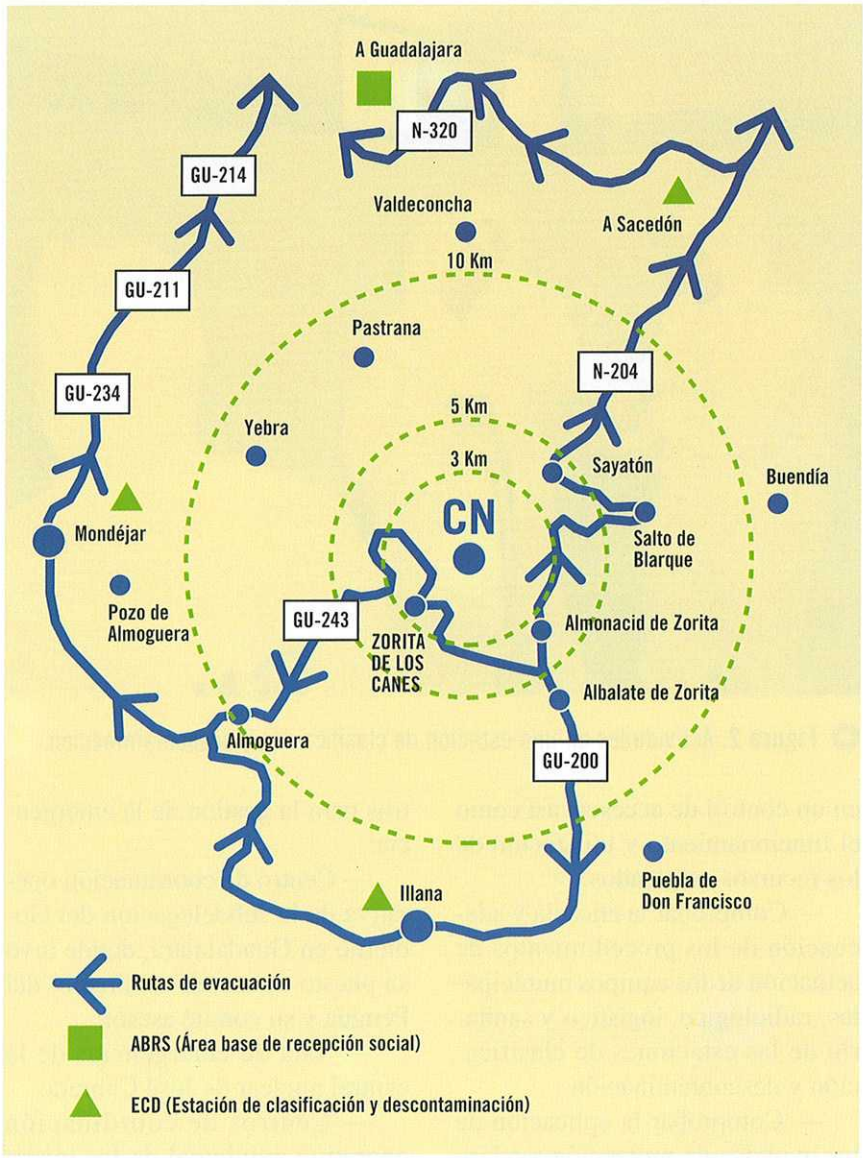


Figura 1. Zonas de división del entorno de la central nuclear José Cabrera.

2. Objetivos

Para este simulacro se establecieron siete objetivos generales, aunque cada uno de éstos se desglosó en otros más específicos:

— Comprobar la eficacia y adecuación de los procedimientos que regulan las acciones a desarrollar en el centro de coordinación operativa (Cecop) del Pengua y la utilización y funcionamiento de los recursos necesarios para llevarlas a cabo.

— Comprobar la eficacia y adecuación de los procedimientos de actuación de la Dirección General de Protección Civil ante emergencias nucleares.

— Comprobar la eficacia y adecuación de los procedimientos que regulan las acciones a desarrollar en los centros de coordinación operativa municipal (Cecopal) y la utilización y funcionamiento de los recursos necesarios para llevarlas a cabo.

— Comprobar la eficacia y adecuación de los procedimientos de actuación de los equipos del grupo logístico y del grupo radiológico



Figura 2. Actividades en una estación de clasificación y descontaminación.

en un control de accesos, así como el funcionamiento y utilización de los recursos empleados.

— Comprobar la eficacia y adecuación de los procedimientos de actuación de los equipos municipales, radiológico, logístico y sanitario de las estaciones de clasificación y descontaminación.

— Comprobar la aplicación de las medidas de protección a adoptar en la zona IA por los servicios del plan de actuación municipal en emergencia nuclear (servicio de avisos a la población, servicio de abastecimiento y albergue, servicio de orden, servicio de evacuación y servicio sanitario) en el núcleo urbano del municipio de Zorita de los Canes.

— Comprobar la aplicación de las medidas de protección a adoptar en la zona IC por los servicios del plan de actuación municipal en emergencia nuclear (servicio de avisos a la población, servicio de abastecimiento y albergue, servicio de orden y servicio sanitario) en el núcleo urbano de Almoguera.

3. Alcance

En este simulacro se activaron y constituyeron los siguientes centros para la gestión de la emergencia:

— Centro de coordinación operativa de la subdelegación del Gobierno en Guadalajara, donde tuvo su puesto de mando el director del Pengua y su comité asesor.

— Sala de emergencias de la central nuclear de José Cabrera.

— Centros de coordinación operativa municipal de los municipios de la zona I (radio de los 10 kilómetros): Zorita de los Canes, Almonacid de Zorita, Sayatón, Pastrana, Yebra, Albalate de Zorita, Almoguera, Buendía, Pozo de Almoguera, Valdeconcha y Puebla de Don Francisco, y de los municipios sede de estaciones de clasificación y descontaminación: Illana y Sacedón.

— Sala de emergencias del Consejo de Seguridad Nuclear (Salem).

— Centro de coordinación operativa de la Dirección General de Protección Civil y Sala Nacional de Seguimiento para Situaciones de Emergencia (SNSSE).

Cabe resaltar el papel que en este simulacro jugó la Dirección General de Protección Civil como órgano coordinador de los medios y recursos del nivel central de respuesta y apoyo, constituyéndose el Comité Estatal de Coordinación Operativa (CECO), compuesto por representantes del Departamento de Infraestructura y Seguimiento para Situaciones de Crisis, la Dirección General de Política y Defensa, la Dirección General de la Guardia Civil, la Dirección General de la Policía, el Ministerio de Sanidad y Consumo y el Consejo de Seguridad Nuclear.

4. Desarrollo

A las 7.30 la central nuclear de José Cabrera comunicó el incidente de categoría III, procediéndose a la activación del Pengua en situación 0 (fase de preemergencia). Los jefes de los grupos de acción, sanitario, radiológico y logístico, desde el Cecop, alertaron a sus servicios y equipos respectivos.

A las 8.05, tras la recomendación del Salem, el director del Pengua declaró la situación 1 y ordenó al jefe del grupo logístico el establecimiento de los controles de accesos. Asimismo, se procedió a informar a los ayuntamientos de la zona I y estaciones de clasificación y descontaminación para que constituyesen los centros de coordinación operativa municipal y diesen los avisos a la población.

A las 8.45, la central nuclear José Cabrera pidió ayuda externa para evacuar el poblado.

A las 9.05, la central comunicó categoría IV y el director del Pengua declaró situación 2 (fase de emergencia) en Zorita, Casas del Saco, Finca Condes de San Rafael, Granja y Recópolis. Además, declaró situación 1 en los tres núcleos aislados de Yebra y Almoguera y mantuvo esta situación 1 en el resto de la zona I.

El Cecop solicitó a la Dirección General de Protección Civil medios de apoyo a la zona y se activó la red atmosférica nacional de alerta a la radiactividad (RAR). Se ordenó, vía fax, desde el Cetra a Zorita que diese los avisos a la po-

blación correspondientes a la nueva situación por megafonía fija (casco urbano) y móvil (población dispersa). Estos avisos fueron repetidos por la megafonía de los helicópteros presentes en la zona.

Se ordenó a este municipio que procediese a entregar los equipos de protección radiológica al personal actuante, estabular animales, confinar a la población y distribuir el yoduro potásico.

Se envió un fax a los centros de coordinación operativa municipal de Illana y Sacedón para que procediesen a preparar las estaciones de clasificación y descontaminación.

A las 9.15, el autobús encargado de la evacuación del poblado de la central pasó por el control de accesos nº 6, donde se hizo entrega de los dosímetros correspondientes, y se dirigió hacia el punto de concentración para recoger al personal a evacuar a la estaciones de clasificación y descontaminación (ECD) de Sacedón.

El grupo radiológico se incorporó a las estaciones de clasificación y descontaminación. Se solicitó un Chinuk a la Dirección General de Protección Civil, como apoyo a la posible evacuación de Zorita, así como una dotación complementaria de equipos de vestuario para las ECD y una dotación de dosímetros.

Entre las 11.00 y las 12.00, ante la gravedad del accidente simulado, se gestionaron telefónicamente ambulancias para Illana, Sacedón y Almoguera, y se dio paso por el control nº 6 a una ambulancia con destino a Yebra, otra con destino a Zorita y al autobús para la probable evacuación de este municipio.

Tras la orden de activación de las ECD se procedió al control radiológico de los evacuados del poblado, 18 en total, resultando cuatro contaminados en piel, y del personal del grupo logístico encargado de su escolta.

Se solicitó a la Dirección General de Protección Civil la gestión para la asistencia médica en un centro de nivel II a tres trabajadores de la central nuclear, fuertemente irradiados.

A las 11.50, la central avisó que era necesario proceder al venteo; tras las recomendaciones del CSN, el director del plan de emergencia nuclear de Guadalajara, a las 12.35, declaró situación 4 en Zorita y sus núcleos aislados, situación 3 en los tres núcleos aislados de Yebra, situación 2 en Almoguera y término municipal afectado y situación 1 en el resto de la Zona I.

Se dio la orden de concentración al municipio de Zorita en la plaza de la Diputación.

A las 13.04, en Zorita se dio la orden de salida del autobús de evacuación hacia Sacedón, en el que salieron 15 personas. Otras 14 salieron en el Chinuk hacia la misma ECD.

Entre las 12.35 y las 14.45, en Almoguera se procedió a la distribución de equipos de protección radiológica a los actuantes y comenzaron las tareas de aviso a la población para llevar a cabo las medidas de estabulación de animales, confinamiento y reparto de pastillas de yoduro potásico.

Tras el control radiológico de los evacuados de Zorita en la ECD de Sacedón se dio por finalizado el simulacro (a las 15.00), al haber mejorado las condiciones operativas de la planta.

5. Observación

Con el fin de realizar posteriormente una evaluación del simulacro, desde la Dirección General de Protección Civil se organizó un dispositivo para que 30 observadores técnicos pertenecientes a este organismo, a las unidades de Protección Civil de otras provincias con centrales nucleares y al Consejo de Seguridad Nuclear pudieran ubicarse en los escenarios principales.

Además, se dispuso de la asistencia de numerosas autoridades de organismos nacionales e internacionales, que pudieron observar el desarrollo del simulacro desde el Cecop de Guadalajara en tiempo real y con imágenes en directo transmitidas desde un helicóptero de la Policía Nacional.

6. Conclusiones

Posteriormente a la realización del simulacro, el director del Pengua celebró en Guadalajara un juicio crítico del mismo con los miembros de su comité asesor, los observadores de Protección Civil y del Consejo de Seguridad Nuclear y representantes de algunos de los organismos pertenecientes al nivel central de respuesta y apoyo. Además, mantuvo reuniones con los alcaldes de los municipios participantes. Todo ello con objeto de extraer algunas conclusiones.

La opinión general manifestada en estas primeras valoraciones fue que, de acuerdo con el diseño y los objetivos planteados, las incidencias surgidas habían sido muy pocas y los resultados obtenidos eran buenos. Asimismo, se había conseguido un alto grado de operatividad, que era necesario seguir manteniendo, gracias a la gran dotación de medios que se dispuso, al interés demostrado por todas las personas que participaron y a las actividades previas que se habían desarrollado, tales como jornadas de formación impartidas a los actuantes, charlas de información a la población, ejercicios, reuniones, etcétera.

De la aplicación de las diferentes medidas de protección previstas (control de accesos, confinamiento, profilaxis radiológica y evacuación) se podían extraer importantes conclusiones para incluir en los procedimientos de actuación y corregir las pequeñas deficiencias detectadas. Esta experiencia será de gran utilidad para la realización de posteriores simulacros de los diversos planes de emergencia nuclear.

Enric Trillas*

Noticia breve de los conjuntos borrosos

Hace más de 15 años que se habla mucho de la lógica borrosa o lógica de la borrosidad. En buena medida, ello se debe a sus numerosas aplicaciones; en especial a las derivadas de la teoría del control borroso. Basada en el concepto de *conjunto borroso,* la lógica borrosa facilita la representación de conocimiento experto impreciso, así como el razonamiento aproximado con el mismo. Este artículo sólo es una presentación breve de sus conceptos más elementales.

"Presentar la realidad
es un pacto entre diseño y realidad."
(Valentí Puig, en
Los geómetras y la novela)

1. Introducción: péndulos y copos

Muchos de quienes hemos estudiado ciencias o ingeniería no sólo tenemos una gran confianza en los modelos matemáticos, sino que llegamos a creer que sin un tal modelo se hace muy difícil, por no decir imposible, decir o hacer nada. No en balde la palabra *matematización* es singular respecto de otras ramas de la ciencia.

Hasta muy recientemente los modelos matemáticos se entendían en forma, digamos, clásica; es decir obtenidos con los recursos del cálculo diferencial e integral o, a lo más, con los del cálculo de probabilidades. Sin embargo, en los últimos treinta años han surgido alrededor de la inteligencia artificial problemas en los que se pretende hacer mediante máquinas y ordenadores lo que anteriormente sólo hacían las personas y que, sin desmentir lo primero que se ha dicho (antes incrementando la confianza en los modelos matemáticos) han venido a ofrecer un punto de vista más amplio por lo que respecto a lo segundo. Precisamente, la teoría de los conjuntos borrosos, al habérselas con la representación del conocimiento impreciso, generalmente a través de reglas del tipo "si la comida ha sido sólo buena y el servicio correcto, entonces la propina debe ser moderada", ha puesto en contacto a científicos e ingenieros con problemas en los que bien no se conoce un modelo matemático clásico, bien éste es conocido pero no permite una computación adecuada con los datos de entrada. Ejemplos de ello son el control por medios computacionales de un péndulo invertido y el de una planta potabilizadora de agua.

En el caso del péndulo invertido, se trata de un sistema dinámico que puede describirse perfectamente por un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales; sin embargo, a partir de él no hay manera de controlar computacionalmente el péndulo debido a que hay que linealizarlo y su sensibilidad a las pequeñas variaciones lo hace entonces imposible. Pero una persona con entrenamiento suficiente lo logra mediante un conjunto de entre 5 y 7 reglas empíricas que contienen predicados imprecisos; es el caso de mantener un palo verticalmente en la palma de la mano. Tales reglas empíricas, una vez expresadas lingüísticamente y representadas como superficies mediante las técnicas que ofrece la teoría de los conjuntos borrosos, llevan a construir máquinas que, por medio de un ordenador de propósito específico llamado controlador borroso, consiguen el control del péndulo invertido con gran precisión.

El caso de las plantas potabilizadoras de agua es substancialmente distinto. Parte importante del problema reside en que uno de los trasvases de agua sólo puede efectuarse cuando se conoce el tamaño medio de los copos depositados en el fondo, y no se ha encontrado la forma de obtener un modelo matemático de ese tamaño medio. Es decir, no se dispone de un modelo matemático que eventualmente permitiese el control computacional del proceso que, de nuevo, es bien conducido por expertos a través de conocimientos

* Catedrático del Departamento de Inteligencia Artificial. Universidad Politécnica de Madrid.

empíricos. Explicitados tales conocimientos en una serie de reglas con predicados imprecisos y representadas como superfícies por medio de los conjuntos borrosos, se logra automatizar el control de las plantas potabilizadoras de agua; en Japón, muchas funcionan bajo tal sistema computacional.

2. 1965, nacen los conjuntos borrosos

El introductor de los conjuntos borrosos es el ingeniero Lotfi A. Zadeh (Bakú, Azerbayán, 1921), actualmente profesor emérito en la Universidad de California, en Berkeley, donde enseña desde 1959. Antes de dedicarse a la teoría de los conjuntos borrosos, Zadeh ya era bien conocido por sus publicaciones en la teoría del control y había participado del entusiasmo generado por la Cibernética. Precisamente, sus estudios en esos campos le llevaron a la conclusión de que cuando la complejidad de los sistemas aumenta acaban chocando los conceptos de precisión y de significatividad: a más precisión menos significatividad conceptual en lo que concierne, por ejemplo, a las clasificaciones requeridas y a sus posibilidades de ser racionalmente comprendidas y designadas. Por ello, hacia 1964 creyó que hacía falta una ampliación de la teoría clásica de conjuntos que permitiese operar con clases imprecisas. A su juicio, resultaba insuficiente el concepto de pertenencia a un conjunto clásico A, que sólo ofrece para cada objeto x las dos posibilidades excluyentes "x está en A ($x \in A$)" o "x no está en A ($x \notin A$)" que, mediante la función característica μ_A de A equivalen, respectivamente, a que sea $\mu_A(x) = 1$ ó $\mu_A(x) = 0$.

Zadeh concibió la idea de que lo que hay en un universo del discurso E son clases de bordes imprecisos o conjuntos borrosos α, determinados por funciones características generalizadas μ_α entre E y el intervalo unidad [0,1], o funciones de pertenencia, cuyos valores pueden ser todos los números entre 0 y 1 y no sólo esos dos extremos. De esta manera, los conjuntos clásicos de E son un caso límite de conjunto borroso; por lo tanto una tal función μ_α sólo definirá un conjunto estrictamente borroso cuando para algún elemento x de E el valor $\mu_\alpha(x)$ esté en el intervalo abierto (0,1). Con ello, los elementos x del universo E no sólo pueden estar o no estar en un conjunto borroso α sino que, en general, están en él con un cierto grado; Zadeh flexibilizó la noción de pertenencia.

Para cada x de E y cada conjunto borroso α en E, la relación básica que establece Zadeh es "$x \underset{a}{\in} \alpha$", que se lee "x pertenece a α con grado a", siendo a un número del intervalo [0,1]. Naturalmente, el signo clásico $\in$ es ahora el $\underset{1}{\in}$, en tanto que el $\notin$ es $\underset{0}{\in}$, y el hecho de que la teoría de Zadeh englobe a los conjuntos clásicos es esencial ya que al representar conocimientos empíricos también habrá que considerar conceptos precisos que corresponderán a conjuntos clásicos.

El primero de los muchos e influyentes trabajos que Lotfi Zadeh ha publicado sobre su teoría fue el titulado *Fuzzy Sets*, que apareció en 1965 en el volumen 8, páginas 338 a 353, de la revista *Information and Control*. Con él nació la teoría de los fuzzy sets o conjuntos borrosos.

3. ¿Qué es y qué representa un conjunto borroso?

3.1. Cada subconjunto clásico A de E define la función característica μ_A, antes considerada, entre E y el conjunto {0,1} que sólo contiene al cero y al uno, y cada función f entre E y {0,1} define, a su vez, al subconjunto $F = \{x \in E;\ f(x) = 1\}$ con el cual es $\mu_F = f$. Además, obviamente, un subconjunto A de E está contenido en otro B ($A \subset B$) cuando es $\mu_A \leq \mu_B$ (es decir, si es $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ para todo x de E) y, por consiguiente, dos subconjuntos A y B de E son iguales ($A = B$) cuando $\mu_A = \mu_B$ (o sea, si $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ para todo x de E). La familia P(E) de todos los subconjuntos clásicos de E, ordenada por la relación $\subset$ de contención, y la familia $\{0,1\}^E = \{f;\ f$ es una función entre E y $\{0,1\}\}$, ordenada mediante "$f_1 \leq f_2$ si y sólo si para todo x de E es $f_1(x) \leq f_2(x)$", son familias isomorfas. Desde el punto de vista matemático no hay ninguna diferencia entre los subconjuntos clásicos de un universo del discurso E, y las funciones entre tal E y el conjunto de los dos números cero y uno.

Análogamente, los subconjuntos borrosos de E no son sino funciones entre E y [0,1] ordenadas en la forma "$\alpha \subset \beta$ cuando $\mu_\alpha(x) \leq \mu_\beta(x)$", con lo que dos conjuntos borrosos son iguales ($\alpha = \beta$) cuando $\mu_\alpha = \mu_\beta$, es decir, cuando están definidos por la misma función de pertenencia. Al igual que el conjunto P(E) se ha identificado con el $\{0,1\}^E$, el conjunto clásico F(E) de los subconjuntos borrosos de E se identifica con el $[0,1]^E$ de las funciones entre E y [0,1], que contiene al $\{0,1\}^E$. Así, en este sentido, cabe decir que el conjunto F(E) de los conjuntos borrosos de E amplía al conjunto P(E) de los subconjuntos clásicos de E.

3.2. En la teoría clásica se acepta como un axioma, llamado de especificación, que cada propiedad binaria p de los objetos de E (es decir, que tales objetos la verifican del todo o no la verifican en absoluto) especifica un único subconjunto de E, al que sólo pertenecen aquellos objetos que verifican p. Si p tiene el nombre P, entonces "x verifica p" equivale a que la afirmación lingüística "x es P" es verdadera, y "x no verifica p" a que "x es P" es falsa. El subconjunto especificado por p se suele escribir como $\underset{\sim}{P}$, y al representar a {x ∈ E; "x es P" es verdadera}, su función característica es

$$\mu_{\underset{\sim}{P}}(x) = \begin{cases} 1, \text{ si "x es P" es verdadera} \\ 0, \text{ "x es P" es falsa} \end{cases}$$

Sin embargo, no todas las propiedades de los universos de dis-

curso que gestionan las personas son propiedades binarias; muchísimas son propiedades graduables, es decir, propiedades p para las que las afirmaciones "x es P" no son sólo verdaderas o falsas sino que admiten grados de verdad. Por ejemplo, si E es un gran colectivo de piedras de muchos tamaños, la propiedad de nombre P = pesado no es binaria; no es posible clasificar E en sólo dos subconjuntos (E_1, de las piedras pesadas, y E_2 de las no pesadas), ya que siempre quedarán piedras por clasificar; a menos que se cambiase esa propiedad por la de nombre P* = pesa más de 10 kilos y se dispusiese de una báscula de total precisión. Ni P* es lo que significa P, ni jamás dispondremos de una tal báscula. Cuando la propiedad p es graduable, los x de E la verifican en un cierto grado y las afirmaciones "x es P" tienen ese grado de verdad. En lo sucesivo nos limitaremos a tratar con propiedades graduables p para las que pueda darse un criterio suficientemente objetivo para determinar los grados en que "x es P". Pues bien, en la teoría de Zadeh también se acepta un axioma de especificación que, naturalmente, amplía al clásico. Cada propiedad graduable p de nombre P de los elementos de E especifica un único conjunto borroso $\underset{\sim}{P}$ tal que "$x \underset{a}{\in} \underset{\sim}{P}$, y si y sólo si x verifica p con grado a en [0,1]" o bien "x es P", es verdadera con grado a. Por tanto, la función de pertenencia a $\underset{\sim}{P}$ está dada por "$\mu_{\underset{\sim}{P}}(x) = a$ si y sólo si "x es P" con grado a.

En conclusión, las propiedades graduables se representan por conjuntos borrosos de manera que si la propiedad sólo puede graduarse con cero y uno (es decir, si es binaria) entonces el conjunto es clásico. Usualmente, los subconjuntos borrosos que se emplean en las aplicaciones representan propiedades graduables; son del tipo $\underset{\sim}{P}$ y su función de pertenencia $\mu_{\underset{\sim}{P}}$ suele escribirse simplificadamente μ_P y, con frecuencia, se llama la función de compatibilidad de P en E.

3.3. A modo de ejemplo, consideremos E = [0,10] y la propiedad de nombre P = pequeño. ¿Qué decir de la función μ_P? En primer, lugar que depende de cómo se use P en E, pero que sin embargo, cabe explicitar tres "axiomas" que compartirán todos los usos de P:

1. "0 es pequeño" es verdadera.
2. "10 es pequeño" es falsa.
3. Si $x \leq y$, el grado de "x es pequeño" es menor que el de "y es pequeño".

Es decir, que la función μ_P es decreciente, por 3, y verifica $\mu_P(0) = 1$, $\mu_P(10) = 0$ por 1 y 2. Pero una función que sólo verificase esos tres axiomas no daría la función buscada; en efecto, si P* = menor o igual que 9 (que es el nombre de una propiedad binaria), su función de compatibilidad verifica los tres axiomas sin que el predicado P* tenga el mismo significado que el P. ¿Qué falta? Falta la flexibilidad típica del predicado *pequeño*, que cabe expresar exigiendo a μ_P que sea una función continua, lo que excluirá a funciones como la de P* y traducirá que P se usa de acuerdo con el axioma:

4. Si "x es pequeño" no es falsa, existe un número 10^{-n} tal que "$x + 10^{-n}$ es pequeño" tampoco es falsa.

Por lo tanto, cualquier uso de p en E vendrá representado por una función de compatibilidad μ_P entre E y [0,1] que será continua, decreciente y tal que $\mu_P(0) = 1$, $\mu_P(10) = 0$. Existen muchísimas de tales funciones y esas propiedades sólo definen el perfil de los usos de P. Para un uso concreto hace falta más información acerca del mismo; para tener una μ_P concreta habrá que saber cómo decrece. Por ejemplo, si decrece linealmente con tangente continua, será $\mu_P(x) = 1 - x/10$, y si decrece linealmente con la tangente discontinua en los puntos x = 4, x = 7 será

$$\mu_P(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq x \leq 4 \\ 7-x/3, & \text{si } 4 \leq x \leq 7 \\ 0, & \text{si } 7 \leq x \leq 10 \end{cases}$$

En conclusión, cada predicado P no define un único conjunto borroso en su universo del discurso, si bien muchas veces puede darse un perfil genérico de sus usos. Lo que define un conjunto borroso en E es cada uso concreto de P en E, y en ese sentido, el conjunto borroso $\underset{\sim}{P}$ es una teoría del uso de P.

4. ¿Qué son las teorías de los conjuntos borrosos?

4.1. Una vez representados los predicados por funciones de compatibilidad se hace necesario, para representar frases complejas, un cálculo con conjuntos borrosos; ese es el objetivo de las teorías de los conjuntos borrosos. Si la teoría clásica de conjuntos ya permite transformar algunas frases no imprecisas del lenguaje en fórmulas con conjuntos, es decir, compactar en fórmulas lo más simples posibles a ciertas frases, hay que extender esas representaciones a frases imprecisas complejas como "ni x es P ni y es Q, y si y fuese el antónimo de Q entonces X sería el antónimo de P" (por ejemplo, "ni Juan es rico ni su socio Pedro es pobre, pero si Pedro fuese rico entonces Juan sería pobre").

Naturalmente, la compactación de frases en fórmulas depende de las propiedades que puedan atribuirse a los conectivos y a los modificadores que aparezcan en ellas. Así, en el ejemplo anterior, aparecen los conectivos "y", "si..., entonces...", así como los modificadores "no" y "antónimo", pero en el lenguaje ordinario se usan más conectivos y modificadores. Los conectivos indispensables son los "y", "o" y "si, entonces", y en cuanto a los modificadores, son muchos los que se usan, aunque aquí sólo nos referiremos al "no".

Las teorías de los conjuntos borrosos dan modelos de conectivos y modificadores. Además, definen la forma de aparear conjuntos borrosos al igual que, en el caso de los conjuntos clásicos, se define el producto cartesiano de dos de ellos

A y B por $A \times B = \{(a,b);\ a \in A,\ b \in B\}$. Como sea que si $A \in P(E_1)$ y $B \in P(E_2)$ es $A \times B \in P(E_1 \times E_2)$, la función característica de $A \times B$ es $\mu_{A\times B}(x,y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$ para todo (x,y) de $E_1 \times E_2$. Con ello, en el caso borroso, si $\alpha \in F(E_1)$ y $\beta \in F(F_2)$, su producto cartesiano $\alpha \times \beta$ se define por medio de $\mu_{\alpha\times\beta}(x,y) = \min(\mu_a(x), \mu_b(y))$, para todo x de E_1 y todo y de E_2. Es $\alpha\times\beta \in F(E_1\times E_2)$ y se trata de una definición que claramente amplía a la clásica.

4.2. En el caso de los conectivos y, o (que corresponden, respectivamente, a la intersección y la unión de conjuntos borrosos) se trata de dados dos de ellos α, β hallar los conjuntos borrosos $\alpha \wedge \beta$ y $\alpha \vee \beta$ de tal manera que si $\mu_\alpha = \mu_P$, $\mu_\beta = \mu_Q$ sea $\mu_{\alpha\wedge\beta} = \mu_{P\ y\ Q}$, $\mu_{\alpha\vee\beta} = \mu_{P\ ó\ Q}$. La práctica totalidad de las teorías de conjuntos borrosos suponen la existencia de sendas funciones T,S en el intervalo unidad tales que $\mu_{\alpha\wedge\beta}(x) = T(\mu_\alpha(x), \mu_\beta(x))$, $\mu_{\alpha\wedge\beta}(x) = S(\mu_\alpha(x), \mu_\beta(x))$, para todo x de E. Naturalmente, cada par de operaciones numéricas T, S determina una intersección de conjuntos borrosos $\wedge$ y una unión $\vee$ de ellos; en principio la única limitación a que están sometidas T y S es que si α y β son clásicos también deben serlo $\alpha \wedge \beta$ y $\alpha \vee \beta$. Es decir, $T(0,0)=T(0,1)=T(1,0)=0, T(1,1)=1$; $S(0,0)=0, S(1,1)=0, S(1,0)=S(0,1)=1$.

Normalmente, también se supone que tanto la intersección como la unión conmutan, para lo que basta que T y S sean conmutativas: $T(a,b) = T(b,a)$, $S(a,b) = S(b,a)$, para cualesquiera a,b de $[0,1]$. En las llamadas teorías estándar de conjuntos borrosos se supone, además, que T y S son crecientes en cada argumento; asociativas y que para todo a de $[0,1]$ valen $T(1,a) = S(0,a) = a$. De tales propiedades resulta que cualquiera de las operaciones T (llamadas t-normas) verifica $T \leq \min$, y que cualquiera de las S (llamadas t-conormas) verifica $\max \leq S$.

Por lo tanto, en las teorías estándar de los conjuntos borrosos se verifican las propiedades asociativas ($\alpha \wedge (\beta \wedge \gamma) = (\alpha \wedge \beta) \wedge \gamma$, $\alpha \vee (\beta \vee \gamma) = (\alpha \vee \beta) \vee \gamma$), conmutativas ($\alpha \wedge \beta = \beta \wedge \alpha$, $\alpha \vee \beta = \beta \vee \alpha$), de monotonía (si $\alpha \leq \beta$ y $\gamma \leq \delta$, entonces $\alpha \wedge \gamma \leq \beta \wedge \delta$ y $\alpha \vee \gamma \leq \beta \vee \delta$), existencia de elementos neutros (las funciones μ_{α_0} = constantemente nula y μ_{α_1} constantemente igual a uno, que verifican $\alpha \wedge \alpha_1 = \alpha$, $\alpha \vee \alpha_0 = \alpha$) y finalmente, de existencia de elementos absorbentes ($\alpha \wedge \alpha_0 = \alpha_0$, $\alpha \vee \alpha_1 = \alpha_1$). Debe observarse que μ_{α_0} y μ_{α_1} son las funciones características de los conjuntos clásicos ϕ y E y que, por tanto $\alpha_0 = \phi$ y $\alpha_1 = E$.

Con todo ello, si $\alpha = A$ y $\beta = B$ son conjuntos clásicos, resulta $\alpha \wedge \beta = A \cap B$, $\alpha \vee \beta = A \cup B$; es decir, la intersección y la unión estándar generalizan a la intersección y la unión clásicas.

4.3. Por lo que se refiere al modificador "no", que originará el conjunto borroso complementario, conviene empezar por observar que en el caso clásico el complemento A' de un conjunto A, es $A' = \{x \in E;\ x \notin A\}$ que verifica las propiedades $\phi' = E$, $A'' = A$, y si $A \subset B$ entonces $B' \subset A'$. Como consecuencia, también verifica $(A \cap B)' = A' \cup B'$ y $(A \cup B)' = A' \cap B'$. Además, valen las leyes $A \cap A' = \phi$ (de no contradicción) y $A \cup A' = E$ (del tercero excluído). Todas esas propiedades del complemento no pueden mantenerse en las teorías estándar de conjuntos borrosos, pero es posible obtener operaciones de complementación que, generalizando el caso clásico, mantengan el mayor número posible de aquellas propiedades.

Como sea que si $A \in P(E)$, es $\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$ para todo x de E, una vía (que no es la más general) para definir el complemento α' de cada F(E) es definir $\mu_{\alpha'}(x) = N(\mu_\alpha(x))$, con una función N entre $[0,1]$ y $[0,1]$ que verifique: 1) $N(0) = 1$; $N(N(a)) = a$ para todo a de $[0,1]$, y 3) Si $a \leq b$, entonces $N(b) \leq N(a)$. Tales funciones, que son biyectivas, se llaman funciones de negación y entre ellas destacan las de la familia paramétrica $N_k(x) = 1 - x/1 + kx$ $(k > -1)$, como las más empleadas en las aplicaciones y, en particular, la correspondiente a $k = 0$, $N_0(x) = 1 - x$, es la negación más simple y frecuente. Está claro que con cualquier función de negación se obtiene $\alpha_0' = \alpha_1$, $\alpha_1' = \alpha_0$, y que si $\alpha = A$ es clásico entonces $\mu_{\alpha'} = \mu_{A'} = 1 - \mu_A$.

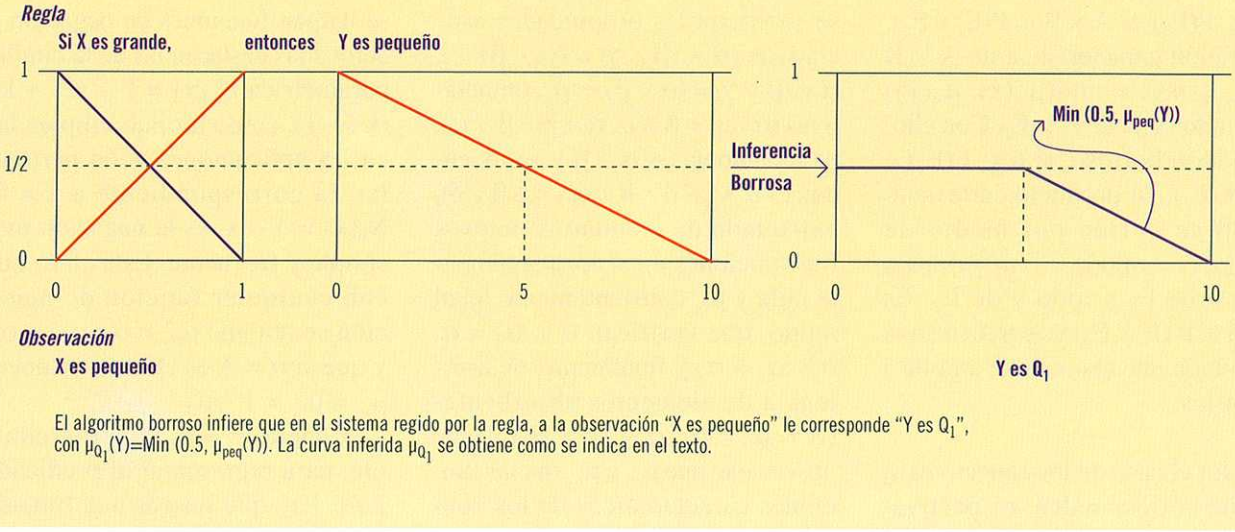
Cuando $\alpha = \mu_P$, con P graduable, para representar al predicado no-P hay que buscar una función N adecuada para que realmente sea $\mu_{no\ P}(x) = N(\mu_P(x))$ para todo x de E. Además, dadas una t-norma T y una negación N, la función $S^*(a,b) = N(T(N(a), N(b)))$ es una t-conorma que recibe el nombre de dual de T, y cuando la intersección y la unión se expresan, respectivamente, por una t-norma T y su dual S*, entonces:

$$\mu_{(\alpha\wedge\beta)'}(x) = N(T(\mu_\alpha(x), \mu_\beta(x)) = S^*(N(\mu_\alpha(x)), N(\mu_\beta(x))) = \mu_{\alpha'\vee\beta'}(x),$$

es decir, vale la ley $(\alpha \wedge \beta)' = \alpha' \vee \beta'$ y, por consiguiente, también vale $(\alpha \vee \beta)' = \alpha' \wedge \beta'$. Siempre es $\alpha'' = \alpha$; sin embargo, en general no valen las leyes de no contradicción y del tercero excluído.

Los pares duales T, S* más habituales (con la negación N_0) son los $T = \min$, $S^* = \max$; $T = \text{prod}$, $S^* = \text{sum-prod}$, y $T = W = \max(0, \text{sum-1})$, $S^* = W^* = \min(1,\text{sum})$; sólo con el tercer par se verifican las leyes de no contradicción y tercero excluído, al ser $W(a,1-a) = \max(0,a+1-a) = 0$ y $W^*(a,1-a) = \min(1,a+1-a) = 1$.

4.4. Una teoría estándar de conjuntos borrosos está dada por una terna de funciones numéricas (T,S*,N). Por lo tanto, el problema básico para representar sistemas descritos lingüísticamente mediante subconjuntos borrosos reside en los dos pasos siguientes: primero el diseño de las variables cualificadas



El algoritmo borroso infiere que en el sistema regido por la regla, a la observación "X es pequeño" le corresponde "Y es Q_1", con $\mu_{Q_1}(Y)=\text{Min}\ (0.5, \mu_{peq}(Y))$. La curva inferida μ_{Q_1} se obtiene como se indica en el texto.

Figura 1. Una inferencia no-numérica elemental.

lingüísticamente, del tipo "X es P", para obtener las funciones de compatibilidad μ_P que definen los conjuntos borrosos $\underset{\sim}{P}$, y segundo, la determinación de la terna (T,S*,N) que permita definir la intersección, la unión y el complemento (el y, el o, el no), de la manera más ajustada posible al uso de los predicados graduables P que aparezcan en la descripción lingüística del problema. Luego, si los resultados también deben ser lingüísticos habrá que proceder a la *aproximación lingüística* de las funciones obtenidas, y si los resultados deben ser numéricos habrá que aplicar métodos de *desborrosificación* para obtenerlos.

¿Qué es eso de la aproximación lingüística de las funciones obtenidas? Es un problema al que, por ahora, no se le ha encontrado una solución general, aunque en cada aplicación se suele resolver por razones contextuales. Ese problema proviene de que si el axioma de especificación asegura que para cada P existe un $\underset{\sim}{P}$ no puede, sin embargo, asegurar que para cada $\alpha \in F(E)$ exista un nombre P tal que $\alpha = \underset{\sim}{P}$. Es que a partir de los predicados P que califican a las variables, y una vez diseñadas sus funciones de compatibilidad μ_P, se llega, tras operar con las t-normas, las t-conormas y las funciones de negación, a unos resultados α que deben ser reinterpretados lingüísticamente; es decir, hallar predicados P* tales que $\mu_\alpha = \mu_P{}^*$. En general, lo único que se consigue y que suele ser suficiente, es hallar funciones *con nombre* que aproximen suficientemente a las μ_α .

5. Final: reglas y conjuntos borrosos

Como se anticipó en la introducción, muchas de las aplicaciones de las teorías de los conjuntos borrosos se dan en el caso de sistemas o procesos físicos cuyo funcionamiento puede ser descrito, en forma lingüística experta, por medio de reglas imprecisas del tipo "si X es P, entonces Y es Q", donde X e Y son variables básicas del sistema, y P, Q predicados graduables que las califican en sus respectivos universos de valores E_1 y E_2. En tales casos, si "X es P" se representa por una función μ_P entre E_1 y [0,1]; "Y es Q" se representa por una función m_Q entre E_2 y [0,1] , entonces la regla se representa por medio de una adecuada función F de dos variables entre $E_1 \times E_2$ y [0,1], de manera que el grado de verificación de la regla, para cada par de puntos x de E_1, y de E_2, sea precisamente $F(\mu_P(x), \mu_Q(y)) \in [0,1]$.

Claro está, previamente hay que elegir la función F de manera que refleje el significado (en el contexto del problema en cuestión) de la frase condicional "si X es P, entonces Y es Q"; y ello puede hacerse de diversas formas no equivalentes, en función de las características lógicas del antecedente "X es P" y del consecuente "Y es Q". Las funciones F que más se usan en las aplicaciones son las dadas a través de las funciones numéricas $F_1(a,b) = \min(a,b)$; $F_2(a,b) = \max(1-a,b)$; $F_3(a,b) = \min(1,1-a+b)$; $F_4(a,b) = \max(1-a, \min(a,b)$ y

$$F_5(a,b) = \begin{cases} 1, \text{ si } a \le b \\ \min\ (a, b/a), \text{ si } a > b \end{cases}$$

Cada una de estas funciones define una superficie sobre el cuadrado unidad $[0,1] \times [0,1]$ de alturas máxima 1 y mínima 0.

Así, gracias a la teoría de los conjuntos borrosos, los predicados P se representan por curvas $y= \mu_P(x)$, y las frases condicionales se representan por medio de superficies $z = F(\mu_P(x), \mu_Q(y))$. Ello permite plantear un problema de inferencia que es importante para muchas aplicaciones.

Lo ejemplificaremos en el caso más simple (aunque irreal) de un sistema con sólo dos variables X,Y, de tal suerte que su comportamien-

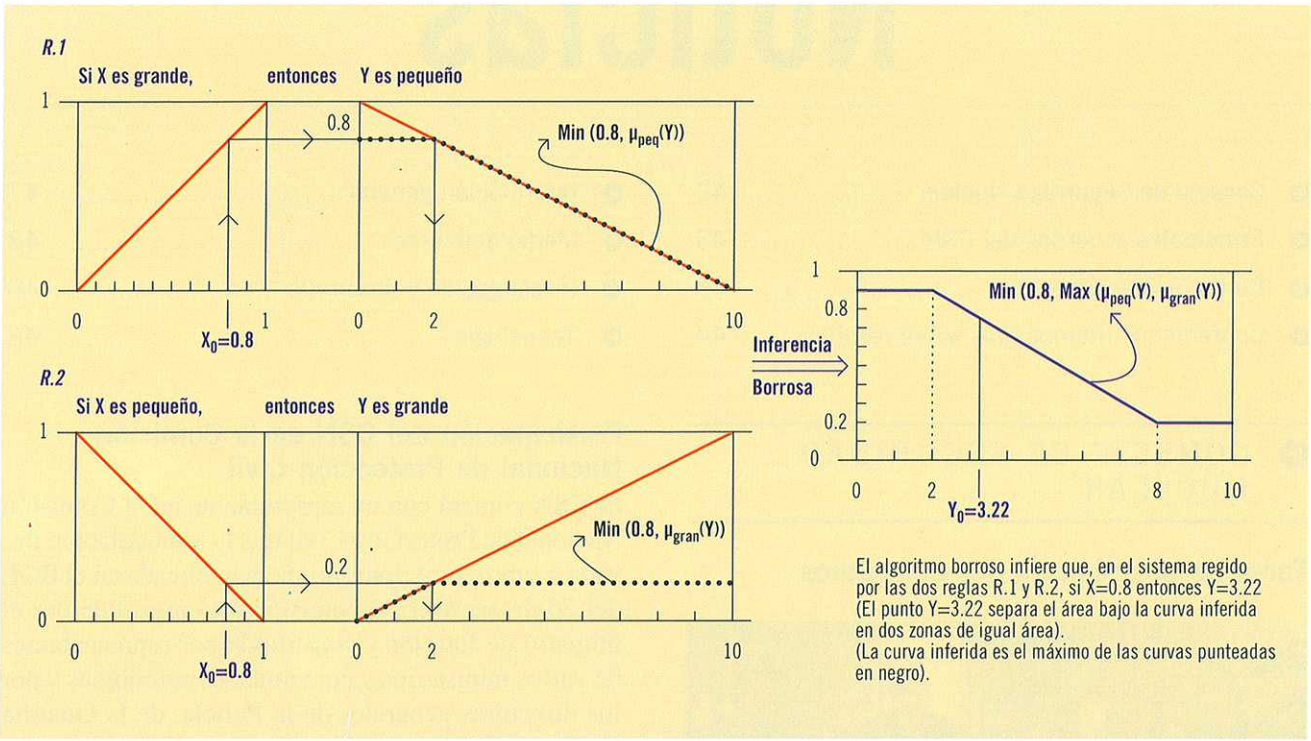


Figura 2. Una inferencia numérica elemental.

to esté completamente descrito lingüísticamente por una regla "si X es P, entonces Y es Q". Observada la variable X en el estado P_1 (es decir, observado que "X es P_1", ¿qué decir de la variable Y?

Si, encontrada la función F, también se encuentra una operación numérica & en [0,1] tal que verifique &(1,1) = 1 y &(a,F(a,b)) ≤ b para cualesquiera números a,b de [0,1], entonces la función

$$f(y) = \sup\{\&(\mu_{P1}(x), F(\mu_P(x), Q(y)); x \in F\},$$

para todo y de E_2,

da el estado menor en que puede hallarse la variable Y. Es decir, supuesto que f pueda aproximarse lingüísticamente por μ_{Q1}, cabe concluir que por lo menos es "Y es Q_1", y de la relación entre Q y Q_1, si el sistema se mantiene bajo control o no lo hace.

La operación & depende, como se ha dicho, de F. Así, cuando F es F_1 ó F_2 debe tomarse & = min; cuando F es F_3 ó F_4, & = W, y si F es F_5 deberá tomarse & = prod.

Para finalizar, veamos un ejemplo numérico. X varía en [0,1], Y en [0,10] y la regla que liga tales variables es "si X es grande, entonces Y es pequeña", que se supone representada por F_1. Si se observa que "X es pequeña", entonces el menor estado en que puede hallarse Y es:

$$f(y) = \sup\{\min(\mu_{peq}(x), \min(\mu_{gra}(x), \mu_{peq}(y))); x \in [0,1]\},$$

para todo y de [0,10] .

Con ello, si $\mu_{peq}(x) = 1-x$, $\mu_{peq}(y) = 1-y/10$ y $\mu_{gra}(x) = x$, resulta:

$$f(y) = \sup\{\min(\min(x,1-x), 1-y/10); x \in [0,1]\},$$

es decir, f(y) = min(1/2,1–y/10).

Asi, cuando X sea pequeña Y será Q_1, con algún predicado Q_1 tal que $\mu_{Q1}(y) = f(y)$. Una tal expresión lingüística Q_1 deberá asignarse de acuerdo con más información sobre el sistema; por ejemplo, si tal información lo permitiese cabría concluir que, por lo menos, Y es bastante pequeña (figura 1).

En la mayoría de las actuales aplicaciones de la lógica borrosa, sin embargo, la observación es numérica y se requiere una conclusión numérica que suele tomarse como el centro de masas de la función inferida (esto es, como el punto que separa dos áreas iguales bajo esa función). En la figura 2 está resuelto el caso de un sistema con dos reglas simples (R.1 y R.2), en el cual de la observación "X es 0,8" se concluye que debe ser "Y es 3,22".

Referencias

[1] B. Bouchon-Meunier, La logique floue, P.U.F. (Que sais-je?), Paris, 1993.

[2] G.J. Klir y B. Yuan, Fuzzy Sets and Fuzzy Logic, Prentice Hall, Nueva York, 1995.

[3] H.T. Nguyen y E.A. Walker, A Firts Course in Fuzzy Logic, Chapman & Hall / CRC, Londres, 2000.

[4] H. Tanaka, An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications, Springer, Nueva York, 1997.

[5] E. Trillas y J. Gutiérrez, Aplicaciones de la lógica borrosa, Eds. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Nuevas Tendencias), Madrid, 1992.

[6] E. Trillas, C. Alsina y J.M. Terricabras, Introducción a la lógica borrosa, Ed. Ariel, Barcelona, 1995.

Noticias

- Consejo de Seguridad Nuclear 42
- Principales acuerdos del CSN 43
- Centrales nucleares 43
- Conferencia internacional sobre residuos..... 44
- Información general 47
- Medio ambiente 48
- Investigación y desarrollo 48
- Tecnología 48

CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

Toma de posesión de dos consejeros



Paloma Sendín y José Ángel Azuara (derecha) durante la toma de posesión de sus cargos como consejeros del CSN.

El pasado 2 de marzo se produjo la toma de posesión de los consejeros del CSN José Ángel Azuara, que renueva el cargo que ya ocupaba, y Paloma Sendín, que sustituye a Rafael Caro, en un acto realizado en presencia del ministro de Industria y Energía, Josep Piqué. El nombramiento de ambos consejeros fue realizado por el Consejo de Ministros del pasado 18 de febrero.

Paloma Sendín era, hasta su incorporación al CSN, directora general de Minas, cargo que desempeñaba desde el 24 de mayo de 1996. José Ángel Azuara fue nombrado consejero por primera vez en 1996. Hasta entonces, y desde 1986, era director general del Ciemat.

Conferencias en el CSN

El pasado 24 de febrero, Anna Genescà Garrigosa, profesora de biología celular de la Universidad Autónoma de Barcelona, pronunció una conferencia en el Consejo titulada *Alteraciones cromosómicas inducidas por radiaciones ionizantes: mecanismos de formación*. Durante su exposición, analizó los efectos que producen las radiaciones ionizantes en el ADN y los mecanismos naturales de reparación que poseen las células.

Participación del CSN en la Comisión Nacional de Protección Civil

El CSN contará con un representante en la Comisión Nacional de Protección Civil tras la remodelación llevada a cabo a principios de año y publicada en el BOE del 20 de enero. Esta comisión está presidida por el ministro de Interior y constituida por representantes de varios ministerios y comunidades autónomas y por los directores generales de la Policía, de la Guardia Civil y de Tráfico.

La finalidad de la Comisión Nacional de Protección Civil es mantener una adecuada coordinación entre los diferentes órganos de la Administración en materia de protección civil y garantizar la eficacia de las actuaciones en caso de catástrofe, tanto en la prevención como en la asistencia a las personas afectadas.

La junta directiva de AMAC visita el CSN

Tras la renovación producida por las elecciones municipales del mes de junio de 1999, la junta directiva de AMAC (Agrupación de Municipios Afectados por Centrales Nucleares) visitó el pasado 28 de febrero el CSN. Los alcaldes, encabezados por el de Casatejada, Agustín Miguel, que ostenta la presidencia semestral, fueron recibidos por el presidente y otros representantes del CSN y visitaron la Sala de Emergencias y el Centro de Información.



La junta directiva de AMAC en el Centro de Información del CSN.

PRINCIPALES ACUERDOS DEL CSN

Renovación de autorizaciones de protección de materiales nucleares

El Consejo informó favorablemente la prórroga por un periodo de dos años de la autorización requerida por el Real Decreto 158/1995, sobre protección física de los materiales nucleares, para todas las centrales nucleares españolas en operación, las instalaciones de Enusa y el Ciemat.

Transferencia a Enresa de la chatarra radiactiva que se detecte

El Consejo, en respuesta a una petición del Ministerio de Industria y Energía, emitió una resolución genérica para la transferencia a Enresa del material radiactivo que se detecte en la chatarra y en su procesado. El informe del CSN, de carácter preceptivo, recoge los límites y condiciones que deben aparecer en la citada resolución, y hace referencia a la autorización de la transferencia del posible material radiactivo detectado a Enresa para su custodia y gestión.

Criterios para la revisión del Plan Básico de Emergencia Nuclear

El Plan Básico de Emergencia Nuclear está siendo objeto de revisión por una Comisión mixta del Ministerio del Interior y el CSN para su actualización y puesta al día. El Consejo aprobó los criterios radiológicos en los que se basará el nuevo plan.

Criterios para la gestión de las cenizas de Acerinox

El Consejo remitió al Ministerio de Industria y Energía un informe en el que se establecen los criterios para la gestión de los últimos residuos procedentes de la descontaminación realizada en Acerinox. La empresa había solicitado evacuar parte de estos materiales en el depósito de seguridad de Nerva. De acuerdo con tales criterios, que se basan en los límites contemplados en el Reglamento de instalaciones nucleares y radiactivas, se estima que aproximadamente 1.200 sacas del total de 1.531 cumplen el requisito reglamentario de que la dosis máxima que podrían producir en un individuo potencialmente expuesto sería cien veces inferior al límite anual para el público. El resto del material deberá gestionarse como residuo radiactivo y ser enviado al almacenamiento de El Cabril.



Acto de entrega de las menciones honoríficas en el CSN.

Entregadas las menciones por 25 años de servicio

Por tercer año consecutivo, el pasado mes de diciembre se llevó a cabo, en un acto solemne, la entrega de las menciones honoríficas a aquellas personas del CSN que han cumplido 25 años de servicios en la Administración pública y cinco en el organismo, en cumplimiento de la resolución del Consejo que estableció estas distinciones. En esta ocasión fueron 20 las personas que recibieron el diploma y un obsequio conmemorativo.

CENTRALES NUCLEARES

La información relativa a las centrales nucleares se refiere a los meses de diciembre de 1999 y enero y febrero de 2000.

La Dirección General de la Energía, a propuesta del CSN, modificó la condición número 5.3 del anexo a la orden ministerial por la que se renovó el permiso de explotación de las centrales José Cabrera, Garoña y Trillo. Dicha condición requiere que el titular presente un informe anual en el que se analicen los nuevos requisitos de licencia que se establezcan, para centrales similares, en el país de origen de la tecnología de la central. Mediante esta modificación se suprimió de la condición el requisito de que dicho informe incluyese el análisis de la nueva normativa publicada por organismos internacionales con competencias en materia de seguridad nuclear y protección radiológica.

José Cabrera

El CSN otorgó al titular una exención temporal a las especificaciones técnicas de funcionamiento del sistema de generación de corriente continua (baterías) en dos ocasiones. En la primera, la exención estuvo mo-

(continúa en la página 46)

Conferencia Internacional sobre la Seguridad en la Gestión de los Residuos Radiactivos

Durante los días comprendidos entre el 13 y el 17 de marzo se celebró en Córdoba la Conferencia Internacional sobre la Seguridad en la Gestión de los Residuos Radiactivos. Participaron 318 personas, de las cuales más de 200 fueron expertos extranjeros procedentes de 60 países. En relación con el contenido, se alcanzaron conclusiones importantes que deberán ser confirmadas por el OIEA ante la Conferencia General y la Junta de Gobernadores. Dichas conclusiones fueron refrendadas con la presencia del director general del OIEA, Mohamed El Baradei, y la mayor parte de los máximos responsables de los organismos reguladores de Europa, América y Asia.

Resumen del discurso de clausura del presidente del CSN

Como ya les comenté en la inauguración de la Conferencia, uno de los objetivos de esta reunión era promover un diálogo abierto entre la comunidad científica, los productores de residuos, las agencias de gestión y los organismos reguladores. He observado con satisfacción que dicho diálogo ha tenido lugar y que algunos temas controvertidos, como el de la recuperabilidad, por citar algún ejemplo, se han debatido con una total franqueza, lo que puede constituir un paso importante en la búsqueda del consenso internacional que reclamábamos en la inauguración de la Conferencia. El consenso internacional sobre la seguridad en la gestión de residuos radiactivos es uno de los elementos clave para la adecuada resolución de este complejo tema.

Acaban ustedes de escuchar las conclusiones y recomendaciones de las diferentes sesiones técnicas de esta Conferencia presentadas por sus presidentes. Ellas hablan por sí mismas y no es mi intención volver a repetirlas. Quedarán registradas en las memorias de esta Conferencia y, de acuerdo con lo que me ha informado la Secretaría, serán reflejadas en un documento informativo para la Conferencia General y la Junta de Gobernadores del OIEA. Los poderes políticos allí representados tendrán así la posibilidad de tomar las acciones que estimen oportuno.

Como ustedes han oído, en la primera sesión, la discusión se centró en los aspectos de confianza, participación y comunicación con el público en el proceso de selección de emplazamientos para instalaciones de residuos radiactivos. También se debatieron en esta sesión los problemas de la comunicación del riesgo y la dimensión internacional, nacional y local de la selección de emplazamientos.

En la segunda sesión, se debatieron los aspectos legales y de seguridad radiológica en el contexto de la gestión de residuos radiactivos. Debemos reconocer que la estabilidad que sería conveniente para el marco regulador de la gestión segura de residuos a muy largo plazo, no puede estar garantizada. Es preciso contemplar la evolución de las expectativas sociales y no sólo la de los conocimientos técnicos. Por lo tanto, deberíamos evitar decisiones irreversibles que comprometieran a las generaciones futuras.

La tercera sesión se centró en la gestión de los residuos previa a su almacenamiento definitivo. Se concluyó entre otras cosas que es importante llegar a acuerdos para la exención del control regulador de materiales muy poco radiactivos, pero para ello es necesario disponer previamente de un amplio consenso internacional.

La cuarta sesión llamó nuestra atención sobre el hecho de que existe una inconsistencia entre los criterios radiológicos utilizados para evaluar el comportamiento de los almacenamientos definitivos de residuos de corta vida y los almacenamientos definitivos para los estériles y residuos de la minería que contienen nucleidos de larga vida. También se consideró que el control institucional parece un buen mecanismo de enlace entre la generación presente y las generaciones futuras.

La sesión quinta abordó los aspectos de seguridad relacionados con los almacenamientos definitivos en medios geológicos. Se presentaron argumentos convincentes que demuestran que dichos almacenamientos geológicos son la única solución definitiva para los residuos de alta actividad. El almacenamiento en superficie necesitaría un control institucional permanente para prevenir la degradación de la instalación y proteger al público y el medio ambiente. Por esta razón, el almacenamiento en superficie ha sido visto por esta Conferencia como una solución temporal y no definitiva. El repositorio geológico, por otra parte, puede presentar la opción de recuperar los residuos en el futuro.

Las sesiones seis y siete trataron dos problemas que preocupan enormemente a la comunidad internacional. Me refiero al problema de las fuentes de radiación huérfanas y al movimiento transfronterizo. Las conclusiones de estas sesiones, tal como han sido expresadas por sus presidentes, tendrán una gran repercusión en nuestras acciones futuras.

La Conferencia tuvo la oportunidad de tomar nota de las políticas y actividades de la entidad organizadora, el Organismo Internacional de Energía Atómica, como también de las organizaciones cooperadoras, la Agencia de la Energía Nuclear de la OCDE y la Comisión Europea. En particular, hemos notado la evolución del régimen internacional en materia de seguridad radiológica y nuclear que se está estableciendo *de facto* bajo la égida del OIEA. Este régimen está constituido por la Convención Conjunta, que esperamos que entre pronto en vigor, por las normas internacionales de seguridad, y por las provisiones para la aplicación de esas normas que, a petición de los Estados miembros, implementa el Organismo.

La Conferencia recibió con agrado la información sobre dos nuevos documentos que la Comisión Internacional de Protección Radiológica ha aprobado, y que contienen recomendaciones sobre la gestión segura de los residuos radiactivos. Dado que éste es un tema de seguridad radiológica, y que las recomendaciones de la ICRP son aceptadas universalmente, estos nuevos documentos serán de gran utilidad para fortalecer aun más la normativa internacional vigente. La Conferencia también recibió una reseña de las recomendaciones del Grupo Internacional Asesor sobre Seguridad Nuclear (INSAG).

Se presentó también un resumen de los resultados del reciente simposio internacional sobre la restauración de áreas contaminadas con residuos radiactivos, y hemos tomado nota con atención de las conclusiones y recomendaciones de esa reunión.

Prácticamente en todas las sesiones técnicas se ha discutido la necesidad de involucrar en nuestros avances a todas las partes interesadas en este problema, es decir lo que en idioma in-

glés se suele denominar *stakeholders*. Nuestro ponente invitado, el embajador Ritch, también se ha referido en su brillante presentación a este importante asunto. Por todo ello, creo que como presidente de la Conferencia debo contemplar con satisfacción la iniciativa del OIEA de convocar un foro internacional, donde estos problemas tan importantes para el devenir humano pueden ser debatidos por todas las partes interesadas.

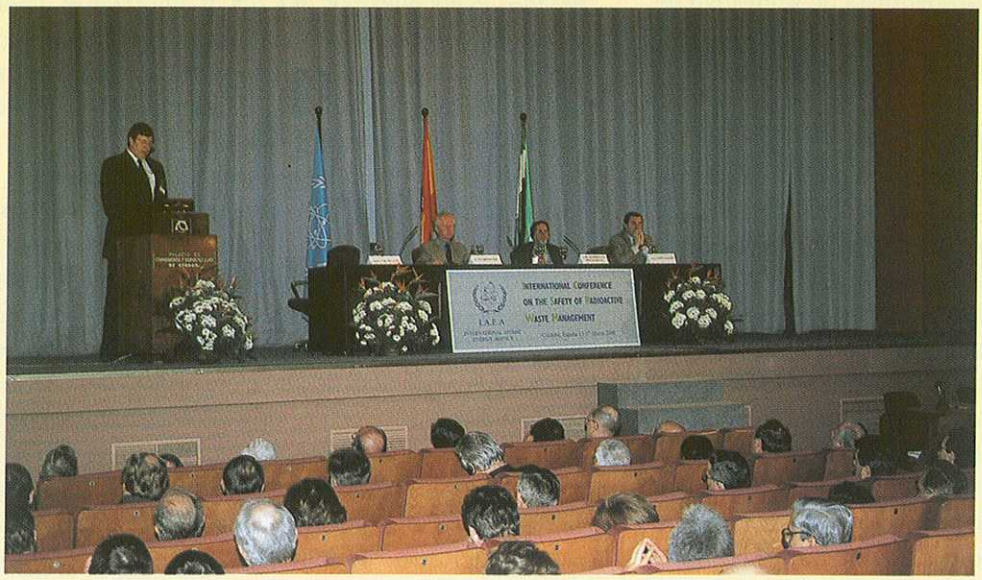
Permítanme que comparta con ustedes algunas reflexiones sobre estos temas tan controvertidos, a las que he llegado después de prestar gran atención a los debates de esta Conferencia.

Los residuos radiactivos existen ya y no hacer nada con ellos no es, desde mi punto de vista, una opción sostenible. El deber de la presente generación es evitar transmitir cargas indebidas a las generaciones futuras y, por consiguiente, debe planificar y llevar a cabo soluciones viables para la gestión segura de estos residuos. Es la responsabilidad de los parlamentos y gobiernos de cada país adoptar las medidas adecuadas para establecer un marco legislativo, y tomar las decisiones políticas que permitan llevar a cabo una política nacional para la gestión segura de los residuos radiactivos.

Hay una serie de principios que deben presidir dicha política:

— Los productores de residuos son los primeros responsables para su gestión segura, proponiendo opciones para su almacenamiento definitivo y proveyendo los recursos económicos necesarios.

— La gestión de los residuos radiactivos debe considerarse como un problema integrado, evitando acciones específicas que, con la intención de resolver problemas concretos, puedan constreñir decisiones futuras. Sin embargo, cuando se planteen cuestiones de seguridad, entonces los residuos deben ser tratados para mejorar las condiciones de almacenamiento.



Desarrollo de una de las jornadas de la conferencia internacional celebrada en Córdoba.

— Teniendo en cuenta que existen incertidumbres en las distintas opciones para la gestión de residuos radiactivos, es preciso mantener un esquema de gestión robusto que sea aceptable para un amplio margen de posibles circunstancias futuras. Esto es válido no solamente para incertidumbres técnicas o científicas sino también para las legales y políticas.

— Los diferentes problemas de seguridad deben ser evaluados con independencia para asegurar su cumplimiento con la regulación y los criterios existentes, que deben ser definidos por la Administración, y pueden necesitar una revisión periódica, de forma que tengan en cuenta la evolución del conocimiento científico y técnico.

— Como mencioné antes, no podrá llevarse a cabo de un modo eficiente la gestión final prevista sin una definición, a nivel nacional, de una estrategia clara, transparente y gradual que permita a todas las partes concernidas, incluyendo la opinión pública, tomar parte en el proceso de decisiones.

Se han realizado muchos progresos en el desarrollo de opciones técnicas y en los diferentes métodos para gestionar los residuos radiactivos; sin embargo, es preciso aún desarrollar trabajos de investigación y desarrollo que confirmen estas opciones. Por otra parte, hay que continuar los esfuerzos necesarios para desarrollar almacenamientos definitivos en medio geológico para los residuos de alta actividad.

La cooperación internacional debe jugar un importante papel para alcanzar el consenso técnico y público, y así apoyar los programas nacionales. En este sentido quiero hacer especial referencia a los siguientes mecanismos:

— La Convención Conjunta, que es una herramienta legal de carácter incentivador, supone el mayor nivel de compromiso de los Estados parte en aras de la seguridad en la gestión de los residuos radiactivos.

— La normativa internacional ya existente para este fin y los mecanismos internacionales adecuados que permitan facilitar su aplicación.

Para terminar, me gustaría transmitir un agradecimiento muy especial para todos aquellos que hicieron posible esta Conferencia. Quisiera mencionar a los comités de programa y organizador, a los presidentes, relatores, participantes en las mesas redondas, contribuyentes de memorias y de posters.

No quisiera en este punto dejar de agradecer el importante apoyo recibido de los organismos patrocinadores españoles, Enresa y Unesa, que junto con el CSN han hecho posible la celebración de esta Conferencia. Es también muy satisfactorio para mí contar con la presencia del director general de la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE, cuya agencia ha contribuido también de manera especial al contenido técnico de esta Conferencia. Y también, naturalmente, debo recordar a las instituciones andaluzas; la Junta de Andalucía y el Ayuntamiento de Córdoba han demostrando una vez más su generoso sentido de la hospitalidad.

Finalmente, muchas gracias a todos ustedes, que con su participación activa y franca han hecho de esta Conferencia un gran evento.

(viene de la página 43)
tivada porque un elemento (vaso) de una de las baterías había sido recientemente sustituido por otro nuevo y éste no alcanzaba el mínimo de la tensión de flotación requerido en las especificaciones. En la segunda, el nuevo elemento instalado en la batería había alcanzado el valor de la tensión dentro de los valores admisibles, pero se había estabilizado en un valor cercano al mínimo, pudiendo, en caso de producirse fluctuaciones, descender por debajo del límite.

El CSN comunicó al titular la aceptación final de la revisión 3 del análisis probabilista de seguridad de nivel 1.

El CSN realizó una inspección a la central.

Santa María de Garoña

El día 8 de febrero la central realizó una parada no programada para reparar una fuga en una soldadura de una tubería de prueba de un lazo del sistema de inyección de seguridad de baja presión. Una vez reparada la fuga, la central reanudó la operación a potencia.

El CSN informó favorablemente la aprobación de la revisión 41 de las especificaciones técnicas de funcionamiento de la central, en la que se incluyen cambios derivados de la introducción de una nueva especificación relativa a la instrumentación de vigilancia de la alimentación eléctrica al sistema de protección del reactor.

El CSN remitió al titular instrucciones complementarias derivadas de los resultados de las evaluaciones de la revisión periódica de la seguridad decenal, en relación con los sistemas eléctricos de la central. Las instrucciones se refieren a la prevención de fallos de equipos de seguridad provocados por fallos de equipos de no seguridad, a los requisitos aplicables a la instrumentación de vigilancia neutrónica y a la segregación de la alimentación eléctrica desde centros de control de motores a válvulas del sistema de inyección de seguridad de baja presión.

El CSN informó favorablemente la aprobación de la revisión 13 del reglamento de funcionamiento. La revisión incluye cambios derivados de la reorganización realizada en Nuclenor, empresa titular de la central.

Durante los tres meses el CSN realizó dos inspecciones a la central.

Almaraz

El CSN comunicó un apercibimiento a la central por no facilitar al inspector residente parte de la información solicitada por éste en relación un suceso de aparición de alarma de fallo urgente de las barras de control en la unidad 2.

El CSN realizó 11 inspecciones.

Ascó

El CSN propuso la apertura de un expediente sancionador al titular de la central por el almacenamiento de elementos de combustible nuevos con enriquecimiento superior al permitido en las especificaciones técnicas de funcionamiento. El titular había recibido y almacenado 32 elementos de combustible nuevo, para realizar la recarga de la unidad I en marzo de 2000, con un enriquecimiento nominal del 4,5%, sin disponer de aprobación de la modificación de la especificación que permitía el almacenamiento de combustible nuevo con un enriquecimiento máximo del 4,3% en peso de U-235. No obstante, los análisis justificativos del aumento de enriquecimiento fueron elaborados con carácter único para ambas unidades y habían sido evaluados y considerados aceptables por el CSN al autorizar el cambio de las especificaciones de la unidad II (septiembre de 1999). Asimismo, las modificaciones físicas requeridas en la instalación ya habían sido completadas antes de la llegada del combustible a la unidad I.

Se informó favorablemente la aprobación de la revisión número 58 de las especificaciones de funcionamiento de la unidad I, que incluye cambios relativos a las características de diseño del combustible y aumenta el enriquecimiento máximo admisible del combustible para su almacenamiento en el foso de combustible nuevo y la capacidad de almacenamiento del citado foso. Los cambios tienen su origen en el aumento de potencia de la unidad I previsto para marzo de 2000.

El CSN informó favorablemente la aprobación de la revisión 10 del reglamento de funcionamiento en la que se incluyen cambios organizativos relacionados con los temas de formación de personal y de gestión de repuestos, tras la unificación de la gestión de las centrales de Ascó y Vandellós II.

El CSN realizó una inspección.

Cofrentes

Desde principios del mes de diciembre se había detectado una disminución del rendimiento del ciclo secundario de agua-vapor, sin que se presentaran síntomas de la causa. El día 16 de diciembre la central inició una parada programada para revisión de las extracciones de turbina, donde se había determinado que existía una derivación de vapor directamente al condensador, sin pasar por turbina. Como resultado de la revisión realizada se encontraron dos fuelles de conexión de la turbina con las tuberías de extracción rotos y otros cinco deteriorados. Se procedió a sustituir los siete fuelles por otros de acero inoxidable. Una vez sustituidos los fuelles, la central inició de nuevo la operación a potencia.

El día 22 de enero la central realizó una bajada de carga hasta el 50% tras detectar la existencia de un fallo en el combustible. El titular realizó las pruebas necesarias para la localización del elemento de combustible fallado, insertando posteriormente dos barras de control para su apantallamiento con el fin de disminuir las fugas del combustible. Una vez finalizadas estas operaciones la central realizó la subida de carga y reanudó la operación al 100% de potencia.

El CSN informó favorablemente la aprobación de la revisión 11 del reglamento de funcionamiento en la que se incluyen cambios derivados de la modificación de la organización de la Unidad de Servicio Técnico Nuclear en el emplazamiento de la central.

El CSN propuso la apertura de un expediente sancionador por incumplimientos del reglamento de funcionamiento, de las especificaciones técnicas de funcionamiento y del manual de garantía de calidad. Los incumplimientos fueron detectados durante una inspección realizada por técnicos del CSN durante el arranque de la central para el ciclo 12 de operación de la central. El objeto de la inspección fueron las actividades realizadas por el titular en relación con la implantación de una solución para la prevención de inestabilidades termohidráulicas en el reactor.

El CSN realizó dos inspecciones.

Vandellós II

El CSN informó favorablemente la aprobación de la revisión 4 del Plan de Emergencia Interior, que incluye cambios para la actualización completa del documento, adaptándolo al contenido de las guías de seguridad del CSN 1.3, 1.6 y 1.9 e incluyendo la nueva organización del titular tras la unificación de la gestión de las centrales de Ascó y Vandellós II.

El CSN informó favorablemente la aprobación de la revisión 34 de las especificaciones técnicas de funcionamiento, que incluye cambios para la adaptación de la especificación relativa a la instrumentación postaccidente al NUREG 1431 de la US NRC, ampliación del intervalo de inspección para vigilancia de la integridad del volante de inercia de las bombas de refrigeración del reactor y adaptación de los intervalos entre pruebas de las bombas del sistema de agua de alimentación auxiliar al contenido de la carta genérica 93-05 de la US NRC.

El CSN realizó 15 inspecciones a la central.

Trillo

El CSN informó favorablemente la desclasificación de los aceites usados con muy bajo contenido de radiactividad almacenados en la central, con el objetivo de que estos puedan ser gestionados como residuos no radiactivos. Como condiciones para la desclasificación se limita la cantidad máxima anual de aceite a desclasificar, se establecen las medidas de radiactividad a realizar antes de la desclasificación y el tratamiento que debe darse a estas medidas.

El CSN informó favorablemente la aprobación de la revisión 6 del Plan de Emergencia Interior. Incluye diversos cambios para la actualización de la información sobre la central y su emplazamiento, sobre la organización de la administración local, sobre la organización del titular en caso de emergencia y sobre las funciones y dotaciones asignadas a las diferentes unidades organizativas establecidas. Asimismo, se modifica la secuencia de incorporación a la central del retén de emergencia.

El CSN realizó cuatro inspecciones a la central.

Vandellós I

Durante los tres meses continuaron los trabajos de desmantelamiento de la central sin incidencias destacables.

El CSN realizó dos inspecciones a la central.

INFORMACIÓN GENERAL

Participación española en la evaluación de proyectos europeos

La Comisión Europea ha mostrado un especial interés en que los paneles de expertos para la evaluación de propuestas del V Programa Marco de Euratom sean equilibrados. Por parte española se han presentado suficientes candidaturas procedentes del mundo académico, pero no así de la industria. Los técnicos y científicos de la industria española interesados en participar como expertos en dichas evaluaciones pueden descargar el formulario y las instrucciones para ello en *http://www.cordis.lu/expert-candidature*. Entre el 16 de octubre de 2000 y el 22 de enero de 2001 estará abierto el plazo de presentación de propuestas al V Programa Marco de Euratom, en las áreas de seguridad operativa de instalaciones, seguridad del ciclo, seguridad y eficiencia de sistemas futuros y protección radiológica.

Visita de seguimiento de la misión OSART a la central de Ascó

Durante los días 21 al 25 de febrero de 2000, tuvo lugar en la central nuclear de Ascó la visita de seguimiento de las acciones derivadas de la misión OSART Operational Safety Review Team del OIEA, que se realizó entre el 18 de mayo y el 4 de junio de 1998. Esta visita se suele llevar a cabo unos 18 meses después de la misión, con el fin de comprobar el avance de las mejoras en las prácticas operacionales de la central, producidas como resultado de la aplicación de las recomendaciones y sugerencias del OSART.

El 93% de las recomendaciones y sugerencias que fueron planteadas se han considerado resueltas o con progreso satisfactorio.

Reuniones de INRA y WENRA

Durante los días 3 y 4 de febrero se celebró en Londres la sexta reunión del INRA, en la que el CSN estuvo representado por su presidente. Cada país presentó un informe de los acontecimientos más relevantes ocurridos durante el año pasado. Japón presentó un avance de las investigaciones sobre el suceso de Tokaimura y Francia sobre el de Blayais.

Por otra parte, durante los días 9 y 10 de marzo se celebró en Córdoba una reunión de los organismos

pertenecientes a WENRA, cuyo objetivo era analizar el progreso en la revisión del informe sobre la seguridad de las instalaciones nucleares en los países candidatos a la ampliación de la Unión Europea. Se abordaron asimismo otros temas, como la armonización de las prácticas reguladoras de la UE.

MEDIO AMBIENTE

Jornada técnica sobre medida de radiactividad ambiental

El pasado 29 de febrero tuvo lugar en el CSN una jornada técnica sobre medida de la radiactividad ambiental, en la que participaron representantes de 30 laboratorios nacionales y un laboratorio de la Dirección General de Medio Ambiente de Portugal.

Se presentaron los resultados del ejercicio de intercomparación analítica realizado en 1999, que pusieron de manifiesto que los análisis radioquímicos de muestras líquidas se realizan en general con un nivel de calidad satisfactorio. Asimismo, se presentó el estado actual de implantación de las redes de vigilancia densa y espaciada, establecidas por el CSN para satisfacer los requisitos de la Comisión Europea, las conclusiones de la evaluación de los últimos resultados disponibles y el grado de desarrollo de los manuales de calidad en los laboratorios de la red.

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Jornada sobre resultados del Plan de Investigación del CSN

El pasado 15 de diciembre tuvo lugar en el CSN la cuarta jornada de presentación de los resultados de los proyectos de investigación subvencionados por el CSN. Presentada por el presidente, Juan Manuel Kindelán, y moderada por los consejeros Agustín Alonso, en la primera parte, y José Ángel Azuara, en la segunda, se realizaron cinco presentaciones relativas al campo de la seguridad nuclear y cuatro sobre protección radiológica.

Jornada sobre el Plan Coordinado de Investigación

El pasado 16 de diciembre se celebró en el Ministerio de Industria y Energía la primera jornada sobre el Plan Coordinado de Investigación CSN-Unesa. El director general de Unesa, Pedro Rivero, el consejero del CSN Agustín Alonso y el director general de la Energía, Antonio Gomis, se encargaron de la presentación, conclusiones y cierre, respectivamente. El objetivo de la jornada fue informar sobre la marcha del plan, que ya ha dado sus primeros frutos tras dos años de actividad.

TECNOLOGÍA

Actividades de combustible del proyecto Halden

El pasado 28 de febrero tuvo lugar en la sede del CSN una jornada técnica sobre las actividades de combustible que se realizan dentro del proyecto del reactor Halden. Este proyecto, auspiciado por la AEN/OCDE, realiza actividades de investigación en los campos del combustible, materiales e interacción hombre-máquina. España participa en el proyecto desde 1991, a través del convenio nacional Halden, del que forman parte Ciemat, CSN, DTN, Enusa y Tecnatom.

La jornada, que fue introducida por el consejero del CSN, doctor Alonso, se estructuró alrededor de cuatro presentaciones técnicas de detalle, que resumieron algunos de los trabajos más importantes realizados en Halden en los últimos años.

Fe de erratas

En el artículo *Vigilancia radiológica ambiental,* publicado en el número 14 de *Seguridad Nuclear,* en la página 10, columna tercera, se dice: "Estos niveles corresponden a los valores de concentración derivados de una dosis de 1Sv, valor considerado suficientemente bajo", cuando debería decir "1μSv".

Por otra parte, en la página 26 del mismo número de la revista se reprodujeron dos fotografías correspondientes al emplazamiento del reactor Shippingport antes del desmantelamiento. Las fotografías correctas se reproducen a continuación y corresponden a antes y después del desmantelamiento, respectivamente.



