



FORMACIÓN DE EXPERTOS EN SEGURIDAD DE LAS CENTRALES NUCLEARES: EXPERIENCIA PERSONAL

La seguridad de las centrales nucleares requiere la formación de expertos sobre regulación, emplazamiento, diseño, construcción, operación, desmantelamiento y gestión de residuos. La diversidad de conocimientos exige a las instituciones reguladoras y a los titulares de las instalaciones la necesidad de disponer de expertos en muchos temas. Los procesos de gestión, evaluación y vigilancia de la seguridad se han perfeccionado a través de la experiencia operativa, la investigación y el análisis de accidentes. Los conocimientos requeridos han sido resumidos por el OIEA en un cuadrante de competencias legales y reguladoras. Los titulares de las centrales han creado instituciones internacionales, INPO y WANO para la mejor aplicación de los conocimientos requeridos. El autor analiza su experiencia personal en la formación académica sobre la seguridad nuclear.

En la Nota Técnica NT 02-14 de la SNE se propone la siguiente definición de seguridad nuclear: *Requisitos reglamentarios, procedimientos administrativos, comportamiento humano y dispositivos técnicos, establecidos bajo la supervisión de la autoridad competente del Estado, para prevenir accidentes por causas internas o externas, mitigar sus consecuencias en caso de que se produzcan, limitar la liberación incontrolada de productos radiactivos al exterior y proteger a la población potencialmente afectada y al medio ambiente contra daños radiológicos, en todas y en cada una de las fases de la vida de instalaciones y actividades nucleares o radiactivas.*

En las centrales nucleares los requisitos, procedimientos, comportamiento humano y dispositivos técnicos requeridos aplican desde la concepción, hasta el desmantelamiento. La formación de expertos requiere una larga variedad de conocimientos y competencias. La selección del emplazamiento se basa en las ciencias de la tierra: geología, hidrología, sismología, meteorología y distribución de la población. En el diseño se requieren conocimientos científicos específicos sobre física nuclear, química nuclear, mecánica de fluidos, termotecnia, metalurgia, matemáticas, computación y estadística. Durante la construcción y montaje aparecen muchas tecnologías: mecánica, eléctrica, electrónica, térmica, estructural y blindajes contra la radiación, aplicadas de acuerdo con normas específicas para garantizar la calidad de los materiales, la fabricación y el

montaje. La explotación requiere conocer, analizar y mantener el comportamiento humano, en circunstancias normales y anormales, aplicar las normas de mantenimiento y los requisitos sobre la gestión segura de los residuos radiactivos de operación y el combustible usado. El desmantelamiento y clausura incluye tecnologías diversas que han de ser aplicadas de acuerdo con normas de protección radiológica y gestión de los residuos generados. No es posible formar expertos individuales que dispongan de todos los conocimientos citados. Los organismos estatales de control y los titulares deben disponer de una organización de seguridad básica y acceder a expertos externos que cubran los conocimientos citados.

LAS BASES DE LA FORMACIÓN

La seguridad se basa en el establecimiento de una relación formal entre el órgano regulador y el titular de la instalación, que requiere la elaboración, por parte del titular, de los informes preceptivos establecidos y la comprobación, por parte del regulador, de que las propuestas del titular satisfacen los requisitos. El sistema se completa mediante la inspección y vigilancia, continuadas y específicas, para verificar el cumplimiento de los requisitos propuestos y aceptados. Por ello, los conocimientos y experiencias de cada parte deben ser análogas.

Como ejemplo de la formación de expertos específicos en las instituciones reguladoras-extrapolable a los titulares-procede presentar el trabajo realizado por el OIEA en la organización de numerosos cursos



AGUSTÍN ALONSO SANTOS

Catedrático Emérito de la Universidad Politécnica de Madrid.

Exdirector del Departamento de Seguridad Nuclear de la Junta de Energía Nuclear.

Exconsejero del Consejo de Seguridad Nuclear.

CREATING EXPERTS ON THE SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS: PERSONAL EXPERIENCE

The safety of nuclear power plants requires the training of experts on regulation, siting, design, construction, operation, dismantling and waste management. The diversity of knowledge forces regulators and plant owners to maintain experts covering many issues. The safety evaluation and vigilance processes have been perfected through operating experience, research and analysis of accidents. The acquired knowledge has been summarized and revised by the IAEA in four quadrants legal and regulatory competencies. On the owner's side, international institutions, INPO and WANO, have been created to better apply the required knowledge. The author describes and analyzes his personal experience on the academic creation of safety experts.

internacionales cuyo contenido se ha descrito en el documento TEC-DOC-1254 y resumido en el llamado **Modelo de los cuatro cuadrantes para la formación del personal de seguridad de los organismos reguladores** (Tabla 1).

1. Competencias sobre las bases legales y los procesos reguladores. - Bases legales. - Procesos reguladores. - Documentos reguladores. - Resoluciones de autorizaciones. - Proceso de coerción.	2. Competencias sobre disciplinas técnicas - Tecnología básica. - Tecnología aplicada. - Tecnología especializada.
3. Competencias sobre prácticas reguladoras - Técnicas analíticas asociadas a la seguridad. - Técnicas de inspección. - Técnicas de evaluación. - Técnicas de investigación.	4. Competencias personales e interpersonales efectivas - Consideraciones analíticas, solución de problemas y toma de decisiones. - Efectividad personal. - Comunicación. - Trabajo en equipo. - Gestión.

Tabla 1.

Tomando como referencia el documento del OIEA, el autor ha participado en la preparación, ejecución, a veces dirección, de cursos internacionales de formación de expertos en seguridad, subvencionados por el OIEA y dirigidos a miembros de organismos reguladores, titulares actuales y futuros de centrales nucleares e instituciones interesadas en el tema. Esta actividad internacional ha sido reconocida por la *American Nuclear Society* con la concesión del "Theos J. Thompson Award in recognition of a life time of outstanding contributions to nuclear safety and service to the international nuclear safety community. As well as having taught and guided two generations of nuclear engineers and scientists in Spain and worldwide. June 2008".

LAS FUENTES DEL CONOCIMIENTO

Los conocimientos sobre seguridad nuclear se nutren de la experiencia operativa, los programas de investigación, el análisis de accidentes, la creación de procesos de evaluación y de consideraciones éticas y sociales.

Lecciones de la experiencia operativa

El art. 11 de la ley de creación del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) enmendada por la ley 33/2007, le requiere elevar "...al Congreso de los Diputados y al Senado un informe anual sobre el desarrollo de sus actividades", también a "...los Parlamen-

tos autonómicos en cuyo territorio estén radicadas instalaciones nucleares...", que se ha de canalizar : "...a través de una ponencia o comisión parlamentaria ad hoc...". De esta forma se crea un diálogo constructivo entre el Parlamento y el Consejo.

En sus informes el Consejo evalúa la experiencia operativa de cada una de las centrales a través de siete índices, tomados de la experiencia internacional, que permiten medir el nivel de seguridad de cada central, alertar y corregir las deficiencias que aparezcan. Los titulares también comparan los índices nacionales con los internacionales definidos por la *World Association of Nuclear Operators*, WANO.

También suministra información sobre la explotación segura de las centrales nucleares el *Sistema Integrado de Supervisión de Centrales*, SISC, tomado del *Reactor Oversight Process* establecido por la NRC de los EE.UU., puesto en servicio en 2007. El SISC ayuda a centrar la vigilancia en las áreas de mayor riesgo potencial, mejora la transferencia del proceso de supervisión y da respuesta a los objetivos estratégicos del Consejo. Tanto el Consejo como los titulares utilizan SISC para supervisar de forma más eficaz la supervisión del funcionamiento y el establecimiento de acciones correctoras.

Lecciones de la investigación

La participación en programas de investigación incrementa la competencia específica científica y técnica de la seguridad nuclear. Se agrupan en cuatro grupos: *Regulatorios*, *Operacionales*, *Promocionales*, y *Sociales*. *Programas Regulatorios*: se trata de proyectos de investigación diseñados para verificar la idoneidad de los requisitos de seguridad o definir la necesidad de dictar nuevos requi-

sitos. Son definidos por los organismos reguladores de los países más avanzados, por lo general abiertos a la participación internacional. Entre los proyectos más salientes en los que han intervenido instituciones españolas, cabe citar:

- *Proyecto Internacional LOFT*, propuesto por el Departamento de Energía de los EE.UU. y dirigido por la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE. Las autoridades españolas decidieron participar en el proyecto en 1964 con la participación del CSN, Ciemat, Enusa, Unesa, Enresa y la Universidad Politécnica de Madrid, a través de la Cátedra de Tecnología Nuclear (CTN) de la ETS de Ingenieros Industriales. El Ciemat analizó el ensayo LP-FW-1, con reducido deterioro del combustible, y la CTN el LP-FP-2, con deterioro considerable del núcleo del reactor. La clausura del Proyecto se celebró en Madrid el 11 de mayo de 1990 con más de 150 representantes de los países participantes.

El proyecto sirvió para conocer la fenomenología asociada a los accidentes con pérdida de refrigerante en los reactores de agua a presión. Se utilizaron con éxito códigos de cálculo y se desarrollaron nuevos códigos. La CTN, a petición de parte, analizó secuencias accidentales con pérdida de refrigerante en los reactores de las centrales de Ascó.

- *Proyecto internacional PHEBUS-FP*, propuesto por el *Institut de Protection et Sûreté Nucléaire*, IPSN, de Francia, abierto a la participación de los miembros de Euratom, sobre la generación y el comportamiento de los productos radiactivos de fisión.

- *Proyecto internacional LACE*, propuesto por el *Electric Power Research Institute*, EPRI, de los EE.UU. y abierto a la participación internacional con el objetivo de analizar el comportamiento de los aerosoles radiactivos en los recintos de contención.

- *Proyecto Internacional MACE*. Propuesto por Euratom y realizado en las instalaciones comunitarias de Ispra, posteriormente trasladadas a Francia, sirvieron para conocer las interacciones entre el corium fundido y el hormigón.

Los resultados de estos proyectos fueron analizados por expertos del Ciemat y de la CTN. Se originaron publicaciones y varias tesis doctorales. Los resultados han servido para mejorar las salvaguardias tecnológicas e incluir otras nuevas. Para mejorar la



transmisión de conocimientos la CTN creó un apreciado *Ideograma de fenómenos asociados a accidentes severos en reactores de agua ligera*.

Lecciones de accidentes

El desarrollo de la seguridad nuclear se ha beneficiado del análisis de las causas y consecuencias de tres accidentes graves: Unidad 2 de Three Mile Island, EE. UU., en 1979; Unidad 4 de Chernobil, Ucrania, en 1986, y unidades 1, 2, 3 y 4 de Fukushima Daiichi, Japón, en 2011. Estos accidentes han sido analizados por los países propietarios; las instituciones internacionales, OIEA y NEA/OECD, y muchas instituciones nacionales, incluyendo la JEN y la CTN.

El análisis de TMI-2, con reactor PWR, concluyó que el accidente, iniciado por el fallo de una válvula, evolucionó de forma catastrófica por errores del personal de explotación. Para prevenir accidentes de este tipo la NRC promulgó cerca de 90 requisitos adicionales y los titulares crearon el *Institut on Nuclear Power Operations*. INPO, con el fin de garantizar el mejor entrenamiento del personal de explotación.

El accidente de Chernobil-4, con reactor RBMK, fue presentado por las autoridades soviéticas ante el OIEA; los expertos occidentales concluyeron que la causa raíz del accidente se encontraba en la *"falta de cultura de seguridad de las autoridades soviéticas"*. El propio OIEA, a través del Grupo INSAG, definió el término cultura de seguridad como *"conjunto de principios aceptados por una comunidad nuclear que favorece que sus miembros adopten actitudes que garanticen el cumplimiento de los requisitos de la seguridad con el rigor exigido por su importancia"*. En paralelo con INPO, los titulares de todo el mundo decidieron crear la *World Association of Nuclear Operators*, WANO.

El accidente de Fukushima Daiichi, con reactores BWR, fue causado por el maremoto asociado al terremoto de magnitud 9.0, que originó olas de altura superior a 10 metros que superaron la altura del muro protector e inundó las instalaciones, evitando el suministro de energía eléctrica de emergencia. La imposibilidad de extraer el calor residual supuso la fusión del combustible, la generación y explosión de hidrógeno y la interacción del corium con la losa de hormigón. El accidente ha sido analizado en detalle por el OIEA que ha encontrado falta de independencia del organismo regulador, pobre cultura de seguridad del titular y defectos de

diseño. El autor fue requerido por el OIEA como uno de los cinco revisores externos del informe. Las autoridades de la Unión Europea han exigido a los países miembros con reactores nucleares la realización de análisis de resistencia de sus instalaciones ante sucesos externos y el establecimiento de nuevas medidas en caso de emergencia.

Lecciones promocionales

En octubre de 1975 la NRC publicó el *Reactor Safety Study* con el objetivo de estimar los riesgos asociados a las centrales nucleares. El estudio supuso la introducción de la aproximación probabilista a los análisis de seguridad con la pretensión de sustituir la metodología determinista anterior.

El organismo regulador y los titulares tomaron nota de la importancia e interés del nuevo proceso, pero no consideraron urgente su aplicación. La CTN reconoció el valor docente del documento y la necesidad de analizar, conocer y aplicar la nueva metodología. En 1984, a través de Unesa, los titulares aceptaron la creación en la Cátedra de un Grupo de Trabajo de seis personas. Los miembros del Grupo tuvieron la oportunidad de participar en reuniones internacionales, publicar artículos sobre los trabajos que realizaban y participar en cursos y presentaciones. Posteriormente tuvieron la ocasión de continuar sus trabajos como miembros de las empresas eléctricas, del propio Consejo, del Ciemat, y de empresas de ingeniería.

Lecciones sociales

La creciente fobia nuclear no podía ser desapercibida en una institución de enseñanza universitaria. El autor consideró el tema acudiendo a la declaración universal de los derechos humanos a través de las características éticas de la energía nuclear. Este tema constituyó la esencia del Discurso de Entrega de Diplomas a los Ingenieros de la Promoción 137. El tema fue también presentado en la reunión bianual de WANO en Seúl y ante los miembros de AMAC.

EXPERIENCIA DEL AUTOR EN LA FORMACIÓN DE EXPERTOS NACIONALES

El discurso *Átomos para la Paz* del Presidente Eisenhower en 1963 estimuló el interés por las centrales nucleares y abrió los centros de investigación y enseñanza de los EE. UU. a estudiantes extranjeros. En 1959 se abrió la *Oak Ridge School on Reactor Technology*, ORSORT, en la que se ofrecía un curso, de un año de duración, sobre el enton-

ces llamado *Reactor Hazards Analysis*. El autor tuvo la suerte de ser alumno de tal curso, con la ayuda y protección de la Junta de Energía Nuclear.

El curso facilitó al autor la participación, como profesor, en los cursos organizados por el Instituto de Estudios Nucleares de la JEN y posteriormente como catedrático de Tecnología Nuclear en las Escuelas de Ingenieros Industriales de Cataluña en Barcelona y de Madrid. Enfrentado con el problema de construir un currículo universitario apropiado tomó como referencia principal el curso seguido en ORSORT que a lo largo del tiempo fue paulatinamente adaptado a las necesidades nacionales, al desarrollo de nuevos conocimientos y a los criterios del modelo de los cuatro cuadrantes del OIEA.

Aunque el Instituto de Estudios Nucleares no podía expedir títulos universitarios, permaneció activo hasta la conversión de la JEN en Ciemat; se dirigía a personas con títulos universitarios, por lo general empleados de las empresas eléctricas, suministradoras de equipos y servicios tecnológicos. El currículo de seguridad incluía un parte sobre fundamentos y otra sobre temas específicos. Se editaron notas bien ilustradas por el servicio de delineantes e impresores de la JEN y se incluían respuestas a los problemas propuestos en los exámenes.

La experiencia adquirida en el Instituto de Estudios Nucleares fue esencial para el desarrollo del currículo sobre Seguridad Nuclear y Protección Radiológica en la Escuela de Madrid. Se reeditó la parte relativa a fundamentos (documento CTN-78/94) y se crearon nuevos temas específicos que incluían los resultados de los programas de investigación y la nueva metodología probabilista (CTN-19/93). También se crearon notas para las asignaturas de doctorado y un curso específico sobre la Gestión de Residuos, en colaboración con el Ciemat y subvencionado por Enresa, que se ha mantenido activo desde su creación hace 28 años.

AGRADECIMIENTO

El autor agradece a sus alumnos y colaboradores en las tareas de investigación y desarrollo, y en la formación de los recursos humanos que demanda la energía nuclear en España. Como no es posible citar a todos ellos, lo hago a través del catedrático Eduardo Gallego, que decidió seguir la carrera docente y de la ingeniera Lola Morales que prefirió la industria con éxitos bien reconocidos.■