

# La seguridad de las centrales nucleares

por H.J. Otway

*En el último decenio transcurrido, ha quedado demostrado que los reactores nucleares constituyen una fuente de energía eléctrica que puede competir económicamente con los medios convencionales de producción de electricidad. Paralelamente al aumento que, en consecuencia, han experimentado los pedidos de centrales nucleares, la opinión pública se ha ido percatando, cada vez con mayor claridad, de los aspectos ambientales y de seguridad relacionados con estas instalaciones. Prueba de esta toma de conciencia de la opinión pública es el número de artículos publicados por la prensa mundial, ponderando o condenando esta orientación hacia la energía nucleoelectrónica.*

*Sus oponentes pregonan una serie de inquietudes que vienen a centrarse en tres puntos principales: la evacuación a largo plazo de los desechos radiactivos, los efectos de las emisiones radiactivas y térmicas propias del funcionamiento ordinario de las centrales, y los efectos y probabilidad de los accidentes de gran magnitud. El presente artículo se limitará al examen de este último punto, con la extensión que el espacio disponible permite, basándose en gran parte en un resumen de los datos tomados del informe WASH-1250 [1] de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos de América, titulado "The Safety of Nuclear Power Reactors (Light Water Cooled) and Related Facilities" (Seguridad de los reactores nucleares de potencia (refrigerados con agua ligera) e instalaciones conexas).*

## **Posibles efectos de los accidentes catastróficos**

En los años cincuenta, se planteó la necesidad de determinar la cuantía de los seguros de responsabilidad civil que requeriría la nascente industria nucleoelectrónica. Con este motivo, en 1957, la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos publicó su conocido informe WASH-740 [2], en el que se trataban de estimar las consecuencias de un accidente catastrófico en un reactor hipotético de 500 MW(t) situado a unos 50 km de una ciudad de 1 000 000 de habitantes. Su título "Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants" (Posibilidades teóricas y consecuencias de accidentes importantes en grandes centrales nucleares), y su subtítulo "A Study of Possible Consequences if Certain Assumed Accidents, Theoretically Possible but Highly Improbable, Were to Occur in Large Nuclear Power Plants" (Estudio de las posibles consecuencias de que se produjeran determinados accidentes hipotéticos teóricamente posibles, pero muy improbables, en grandes centrales nucleares), resumen bastante bien, en efecto, su contenido y propósito.

El propio informe facilita una evaluación técnicamente correcta de las peores consecuencias posibles en caso de accidente grave, pero —y esto es importante— en él no se tomaron en consideración los mecanismos físicos por los que se inicia un accidente. Es decir, se supuso que se producían accidentes que darían lugar a la liberación de una cierta cantidad de productos de fisión, estimándose entonces las peores consecuencias posibles en cuanto a muertos, heridos y daños materiales.

Los cálculos se efectuaron partiendo de tres conjuntos diferentes de hipótesis relativas a las condiciones meteorológicas, cantidad y temperatura de los productos de fisión liberados, tamaño de las partículas, etc. Los resultados a que se llegó ofrecían un amplio margen de

variación según el conjunto de hipótesis utilizado. Por ejemplo, las muertes se estimaron, según las diferentes hipótesis, entre 0 y 3 400, los heridos entre 0 y 43 000, y la contaminación del terreno entre 18 y 150 000 millas cuadradas (o sea, entre 46,8 y 390 000 km cuadrados). Las consecuencias del "caso peor de accidente" parecen ciertamente graves, pero debe observarse que el cálculo está basado en el supuesto de que pasa a la atmósfera el 50% de la actividad total de los productos de fisión, en condiciones meteorológicas adversas. No se tomaron en consideración los mecanismos físicos por los que se inicia esta descarga de radiactividad ni se tuvo en cuenta tampoco el margen de seguridad que suponen los sistemas especiales de protección que se incorporan en las centrales nucleares de hoy día. Actualmente se considera que una descarga en la atmósfera del 50% de todos los productos de fisión es mucho mayor que la que podría producirse en un accidente real en un reactor.

### **Defensa en profundidad**

En 1973, la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos publicó su informe WASH-1250 (1), que constituye un estudio general del estado actual de los conocimientos sobre los aspectos ambientales y de seguridad de las centrales nucleares. En este informe, que en cierto modo es una actualización del contenido del WASH-740, se exponen también los conceptos básicos de diseño encaminados a garantizar la seguridad de las centrales nucleares: la "defensa en profundidad". Estos conceptos básicos suponen tres niveles de seguridad:

*El primer nivel consiste en diseñar y construir la central de manera que funcione del modo previsto con un alto grado de fiabilidad. Este nivel está encaminado a la prevención de los accidentes por obra de las características intrínsecas del diseño y en él se concede especial importancia al control de la calidad, la duplicación de dispositivos, las pruebas, la inspección y el diseño a prueba de fallos.*

*El segundo nivel sigue lógicamente al primero al suponer que, a pesar de las medidas que se tomen para evitar los accidentes, lo prudente es pensar que podría producirse alguno.*

*En consecuencia, se habilitan medios de protección de funcionamiento seguro para evitar incidentes o reducir al mínimo sus efectos. Entre estos medios se cuentan los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo, que hacen posible la necesaria refrigeración del núcleo en caso de accidente por pérdida de refrigerante, los dispositivos para limitar el ritmo de aumento de la potencia, los sistemas de parada instantánea del reactor accionados por canales de instrumentos duplicados e independientes, y un suministro independiente de electricidad generada fuera del emplazamiento.*

*El tercer nivel de seguridad complementa los dos primeros gracias a ciertas características que amplían el margen de seguridad del diseño, al garantizar la protección del público aun en el caso de que se produzcan sucesos aparentemente remotos e inverosímiles. Se procede sometiendo a evaluación el diseño concebido en condiciones de accidentes hipotéticos graves, tales como que se produzcan supuestos fallos independientes en sistemas de protección duplicados, simultáneamente con el accidente que tenían la misión de controlar. A este fin, se estudian diversos accidentes que tienen su origen en el diseño, el mejor conocido de los cuales es el accidente por pérdida de refrigerante, en el que se supone que se produce repentinamente*

*la ruptura de una tubería grande. Entre otras características del tercer nivel relativas al diseño figura la protección contra seísmos, tornados, inundaciones, fallos de los componentes, etc.*

Debe mencionarse que, desde que las pruebas a escala piloto efectuadas en 1969 revelaron ciertas deficiencias en los modelos de evaluación y en los códigos de cálculo electrónico utilizados en su diseño, se viene desarrollando una controversia en torno a los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo. Desde entonces, estos sistemas han sido objeto de minucioso estudio, con miras a obtener información básica para las investigaciones y a establecer nuevos criterios de diseño. Entretanto, los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo han de ajustarse a los criterios de funcionamiento exigidos, rigiendo hipótesis de carácter prudencial por lo que respecta al fallo simultáneo de componentes. En el Cuadro I se comparan las hipótesis prudentiales efectivamente utilizadas en el diseño con un conjunto de hipótesis que se cree que reflejan mejor la realidad. En los Estados Unidos, el proceso de reglamentación de los criterios aplicables a los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo está casi ultimado; en principio, parece que las centrales nucleares dotadas de estos sistemas, que hayan sido diseñados de acuerdo con los antiguos criterios, estarán sujetas a una reducción de potencia del orden del 5% por término medio [3].

#### Los riesgos nucleares en comparación con otros riesgos

En el informe WASH-1250 se señala que la metodología actualmente en desarrollo del análisis de la seguridad por cálculo de probabilidades ofrece el mejor enfoque para ver en perspectiva el problema del riesgo de accidentes en los reactores nucleares. Este enfoque permite calibrar las consecuencias de los accidentes de gran magnitud según las probabilidades de que se produzcan.

Muchas de las actividades ordinarias de la vida entrañan una posibilidad de muerte o lesión súbitas. Se sigue participando en estas actividades porque, a la vez, reportan un beneficio que parece preponderar sobre los riesgos a ellas inherentes. Este proceso comparativo riesgo-beneficio se observa también a escala personal, aunque la evaluación de los riesgos y beneficios se hace normalmente de modo subjetivo e intuitivo. De hecho, no existe prácticamente ninguna actividad que sea perfectamente "segura"; existe siempre la probabilidad, por pequeña que sea, de que se produzca un accidente. Por ejemplo, hasta los actos necesarios de comer y respirar entrañan un riesgo: en los Estados Unidos mueren cada año más de 1 000 personas a causa de la inhalación o ingestión de materias que provocan la asfixia (referido al riesgo, y partiendo de la base de una población de 200 millones, este hecho puede expresarse como un riesgo medio de  $5 \times 10^{-6}$  por persona y año:

$$\frac{1000}{200\ 000\ 000} = \frac{5}{1\ 000\ 000} = 5 \times 10^{-6}/\text{año}$$

Se ha hecho observar [4] que los riesgos inferiores a  $10^{-6}$  por persona y año (1 en 1 000 000) no parecen preocupar demasiado a la gente, que, en verdad, apenas se percatada de su existencia. Por su parte, Starr [5] postula que, en los Estados Unidos, los riesgos de accidente superiores a  $10^{-2}$  por persona y año (promedio de riesgo de muerte por causas naturales en ese país) resultan claramente inadmisibles. Ahora bien, según se ha indicado anteriormente, la participación en actividades que entrañan riesgos está relacionada también con la magnitud del beneficio esperado. Se ha propuesto la Figura 1 como representación gráfica de la división entre grados de riesgos "admisibles" e "inadmisibles" en función del beneficio obtenido. Se trata ahora de estimar el riesgo que representan los accidentes en las centrales nucleares y situarlo en su justa perspectiva.

---

CUADRO I.\* COMPARACION PARCIAL ENTRE LAS HIPOTESIS REALISTAS Y LAS HIPOTESIS PRUDENCIALÉS ADOPTADAS EN LOS CALCULOS RELATIVOS A LOS ACCIDENTES POR PERDIDA DE REFRIGERANTE

---

**Hipótesis realistas**

Iniciación del accidente

1. Grieta en tubería grande o rotura en tubería más pequeña seguidas de parada del reactor y reparación.

Sistemas eléctricos

1. Se dispone de electricidad generada fuera del emplazamiento.

Potencia

1. La central funciona al 100% de potencia o menos.
2. La región más caliente del núcleo corresponde al factor de punta esperado.
3. El calor de desintegración corresponde a la previsión "óptima".

Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo

1. Todos los componentes del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo funcionan cuando deben.
2. La rotura se produce en el sistema de modo que surte efecto parte del agua del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo que llega al circuito roto.
3. Las bombas suministran un caudal superior al previsto.

Funcionamiento del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo

1. Las bombas del refrigerante del reactor siguen funcionando.
2. Parte del agua de emergencia suministrada durante la purga llega a la vasija de presión y permanece en ella.
3. Se utilizan los coeficientes de transmisión del calor correspondientes a la previsión "óptima".
4. Las barras de combustible presentarán una distribución de temperaturas.

**Hipótesis prudentiales**

1. Rotura de dos frentes o rotura importante de la tubería más grande.

1. No se dispone de electricidad generada fuera del emplazamiento, y en uno de los generadores diesel de emergencia en paralelo falla el arranque.

1. Se supone que la central funciona constantemente al 102% de potencia (reactor de agua a presión), o al 105% de potencia (reactor de agua hirviente), para compensar posibles errores de los instrumentos.
2. Se supone que la región más caliente del núcleo corresponde al factor de punta máximo admisible debido a una situación anormal.
3. Se supone que el calor de desintegración es prudencialmente superior a la previsión "óptima" para compensar incertidumbres de previsión.

1. El componente activo independiente correspondiente a la "peor consecuencia" no funciona cuando debe.
2. Se pierde en la contención toda el agua que llega al circuito roto procedente del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo (reactor de agua a presión solamente).
3. Las bombas suministran el caudal previsto.

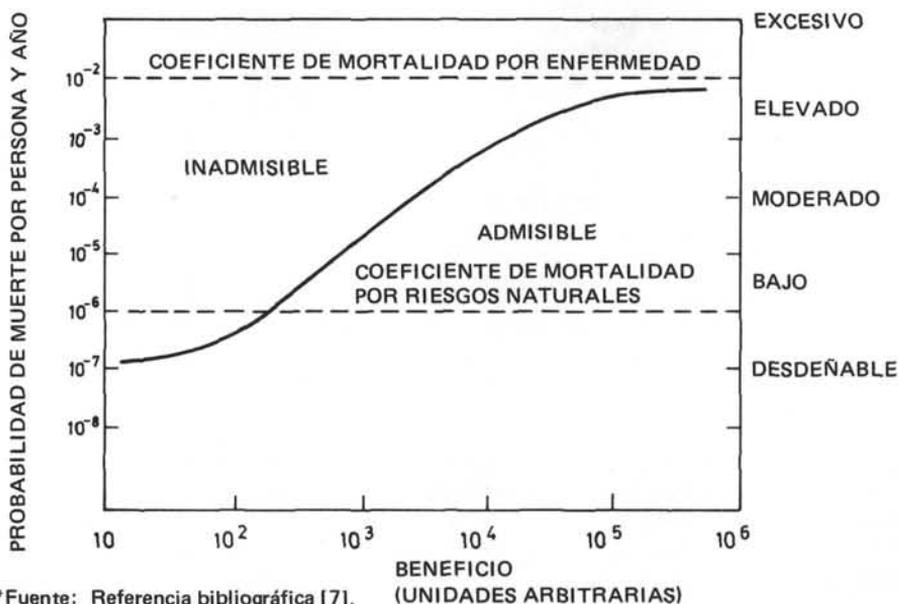
1. Las bombas del refrigerante del reactor entran en acción, pero van frenándose, o se supone que tienen los órganos propulsores enclavados.
2. Se pierde toda el agua de emergencia suministrada durante la purga (reactor de agua a presión solamente).
3. Se utilizan coeficientes de transmisión del calor prudencialmente más bajos.
4. Se toma como punto de partida la barra de combustible más caliente.

---

\* Fuente: Referencia bibliográfica [1].

---

FIGURA 1\*  
ESTRUCTURA DE LA RELACION BENEFICIO-RIESGO  
EN EXPOSICION INVOLUNTARIA



\*Fuente: Referencia bibliográfica [7].

De los primeros trabajos realizados para calcular la probabilidad de los accidentes de gran magnitud [4, 6], que se resumen en el informe WASH-1250, se deduce que la probabilidad de un accidente catastrófico en una central nuclear es muy pequeña: del orden de  $10^{-9}$  a  $10^{-10}$  por año ( $10^{-9}$  por año significa una probabilidad de 1 en 1 000 000 000 por año de funcionamiento). Los resultados preliminares de estudios más completos realizados en los Estados Unidos [3] parecen concordar bastante bien con estas cifras. En el informe WASH-1250 se interpretan los resultados a que se llega en las referencias bibliográficas [4] y [6] deduciendo que el riesgo medio de mortalidad para las personas que viven en la proximidad de una central nuclear es de  $10^{-10}$  por persona y año. En comparación con la relación expuesta en la Figura 1, este riesgo se considera trivial, aun cuando no llevara consigo beneficio alguno; representa, sin embargo, un beneficio obvio en forma de energía eléctrica.

Otro modo de enjuiciar este riesgo nuclear consiste en compararlo con otros riesgos corrientes en los Estados Unidos de América. En el Cuadro II figuran algunas de las demás probabilidades medias de mortalidad que pueden compararse con el valor de  $10^{-10}$  por persona y año calculado para aquellas personas que viven cerca de las centrales nucleares.

En otro estudio [7] se comparan los riesgos para la salud pública inherentes a las centrales nucleares y a las centrales alimentadas con combustibles fósiles. Los resultados indican que el riesgo global correspondiente a una central nuclear es inferior, en un factor que quizá se encuentre entre 10 y 100.

El presente estudio del riesgo constituye tan sólo un examen superficial de un tema complejo e interesante; por razones de espacio, no se han abordado siquiera muchos de sus aspectos. Dunster [8] ha publicado recientemente un trabajo sucinto sobre la aplicación

CUADRO II.\* DATOS ESTADISTICOS SOBRE RIESGOS DE MORTALIDAD  
(ESTADOS UNIDOS)

Clase de riesgo	Riesgo de mortalidad por persona y año
Cáncer (todas las clases)	$1,6 \times 10^{-3}$
Accidente de automóvil	$2,8 \times 10^{-4}$
Ahogamiento	$3,7 \times 10^{-5}$
Envenenamiento	$1,2 \times 10^{-6}$
Cáncer (empleo médico de los rayos X)	$1 \times 10^{-5}$
Asfixia al ingerir alimentos	$5 \times 10^{-6}$
Fulminación	$8 \times 10^{-7}$
Catástrofe natural	$6 \times 10^{-7}$

\* Fuente: Referencias bibliográficas [1] y [4].

del criterio costo-beneficio a la energía nucleoelectrica. Quienes se interesen por esta cuestión pueden consultar, para mayor información, el informe WASH-1250 o las referencias bibliográficas originales [4-8].

#### Aspectos internacionales

La actuación en el plano internacional adquiere mayor relieve a medida que aumenta el número de centrales nucleares, especialmente en aquellas partes del mundo de mayor densidad de población. Las previsiones de crecimiento efectuadas antes de octubre de 1973 [9] señalan que, hacia 1980, las centrales nucleares suministrarán el 14% de la electricidad y que, hacia el año 2000, la cifra será del 50% aproximadamente. En consecuencia, la cooperación y las normas internacionales revestirán todavía mayor importancia.

Desde hace mucho tiempo, el OIEA se viene ocupando de prestar asistencia a sus Estados Miembros respecto del diseño, emplazamiento y explotación de reactores nucleares. Estas actividades se han desarrollado a través de misiones de asesoramiento, publicación de manuales, prontuarios e informes técnicos, y organización de reuniones para fomentar el intercambio de información.

En las primeras fases de desarrollo de la energía nucleoelectrica, no se disponía de una experiencia suficientemente sólida que permitiese la formulación de criterios de seguridad internacionalmente aceptables, salvo en raros casos especiales. De aquí que las cuestiones de seguridad y fiabilidad relativas a las centrales nucleares recibieran a menudo un enfoque casuístico que necesariamente suponía una falta de coherencia en los criterios aplicados y en los niveles de seguridad exigidos.

Mantener este enfoque casuístico de los problemas de seguridad resulta inadecuado a todas luces en el marco de una industria nucleoelectrica de ámbito mundial, y del comercio internacional que ésta supone. Como sucede en otros sectores, se impone la necesidad de fijar normas de seguridad internacionalmente aceptables y de sentar directrices apropiadas por las que puedan guiarse los órganos reguladores, las compañías explotadoras, los proyectistas, y los constructores.

El OIEA proyecta actualmente preparar una recopilación de los requisitos básicos relativos a la seguridad y a la fiabilidad de las centrales nucleares, internacionalmente aceptables

y que puedan servir de marco de referencia para el análisis de la seguridad y fiabilidad de dichas centrales.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] "The Safety of Nuclear Power Reactors (Light Water Cooled) and Related Facilities", Informe WASH-1250 de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, julio de 1973.
- [2] "Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants", Informe WASH-740 de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, marzo de 1957.
- [3] "Rasmussen Study, ECCS, Standardization are First Day Topics", nota Nuclear Industry, enero de 1974, pág. 22.
- [4] OTWAY, H.J. y ERDMANN, R.C., "Reactor Siting from a Risk Viewpoint", Nuclear Engineering and Design, 13 (1970) págs. 365-376. North-Holland Publishing Co.
- [5] STARR, C., "Benefit-Cost Relationships in Socio-Technical Systems", memoria presentada en el Simposio sobre las centrales nucleares y el medio ambiente organizado por el OIEA en cooperación con la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos y celebrado en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York) del 10 al 14 de agosto de 1970. Publicación del OIEA STI/PUB/261, Viena, 1971, págs. 895-917.
- [6] OTWAY, H.J., LOHRDING, R.K. y BATTAT, M.E., "A Risk Estimate for an Urban-Sited Reactor", Nuclear Technology, Vol. 12, octubre de 1971, págs. 173-184.
- [7] STARR, C., GREENFIELD, M.A., HAUSKNECHT, D.F., "A Comparison of Public Health Risks: Nuclear vs Oil-Fired Power Plants", Nuclear News 15, octubre de 1972, págs. 37-45.
- [8] DUNSTER, J., "Costs and Benefits of Nuclear Power", New Scientist, 18 de octubre de 1973, págs. 192-194.
- [9] EKLUND, SIGVARD, "Energía nucleoelectrica, seguridad nuclear y medio ambiente", en el presente número del Boletín.

# La gestión de desechos y la energía nucleoelectrica

por P.J. West

El objetivo primordial de la gestión de desechos es la protección del hombre y su medio ambiente. Cuando se trata de la gestión de desechos en la esfera de la energía nucleoelectrica, es preciso tener en cuenta los procedimientos de todas las fases del ciclo del combustible nuclear.

El ciclo del combustible nuclear abarca las operaciones físicas y químicas necesarias para producir el combustible que se va a usar en el reactor, el funcionamiento del reactor para producir electricidad, y la reelaboración del combustible agotado para recuperar el material reutilizable. Las fases principales del ciclo del combustible son las siguientes:

- 1) Descubrimiento, extracción de su yacimiento y purificación de los materiales fértiles y fisionables existentes en la naturaleza;
- 2) Transformación de estos materiales en un compuesto químico adecuado para su enriquecimiento;
- 3) Elaboración de las combinaciones requeridas de materiales fisionables y fértiles, bien mediante ajuste isotópico, bien mediante mezcla por métodos físicos;