

# El Estudio alemán sobre los riesgos de las centrales nucleares

---

por A. Birkhofer

En agosto de 1979 se publicaron los resultados del "Estudio alemán sobre los riesgos de las centrales nucleares". El informe principal, en el que se presentan el método y los resultados de ese estudio, se hizo público a finales de 1979.

El objetivo del estudio — realizado en nombre del Ministro de Investigaciones y Tecnología de la República Federal de Alemania — era aplicar en lo posible los métodos del Estudio de Seguridad de los Reactores de los Estados Unidos (WASH-1400) a las centrales y condiciones de los emplazamientos alemanes.

No se estimó justificada una extrapolación directa de los resultados norteamericanos debido, sobre todo, a las siguientes razones:

- Existe gran número de diferencias entre el diseño de las centrales de referencia utilizadas en WASH-1400 (Surry-1, Peach Bottom-2) y las centrales nucleares alemanas.
- La densidad media de población en la República Federal de Alemania es más de 10 veces superior a la de los Estados Unidos. En las cercanías de las centrales nucleares la proporción entre esas densidades medias es de 3:1 aproximadamente.

La Gesellschaft für Reaktorsicherheit quedó encargada por contrato de la parte principal del estudio y ejecutó la mayoría de los análisis de las centrales. El Kernforschungszentrum de Karlsruhe realizó los cálculos de las consecuencias de los accidentes. Con respecto a los efectos de las radiaciones sobre la salud, la Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung prestó su asistencia. Otras instituciones han contribuido a los trabajos estudiando problemas especiales.

Como central de referencia para la parte técnica del análisis se seleccionó la central Biblis-B, equipada con un PWR\* del tipo KWU\*\*, de 3750 MW(t) de capacidad, que entró en servicio en marzo de 1976.

Para calcular el riesgo colectivo resultante de los accidentes en reactores, se consideró un total de 25 centrales en 19 emplazamientos distintos de la República Federal de Alemania. Se incluyeron todas las centrales de 600 MW(e) o más de capacidad, en explotación, en construcción o en trámites de obtención de la licencia en 1 de julio de 1977. Como aproximación a la situación real, se supuso que las 25 centrales eran todas técnicamente idénticas a la de referencia.

---

\* Reactor de agua ligera a presión.

\*\* Kraftwerk Union AG.

---

El Prof. Dr. A. Birkhofer es profesor de la Universidad Técnica de Munich y Presidente de la Comisión de Seguridad de los Reactores de la República Federal de Alemania.

## Métodos empleados en el estudio y resultados conseguidos

Todo riesgo puede caracterizarse por la probabilidad y la magnitud de los daños potenciales. Con respecto a las centrales nucleares, ninguno de estos dos componentes puede determinarse a partir de la experiencia directa. En más de 25 años de funcionamiento de los reactores, ha habido numerosos incidentes operacionales y cierto número de accidentes graves. Sin embargo, no ha habido ningún muerto ni herido fuera de una central a causa de un accidente nuclear.

Por consiguiente, la única manera de estimar los riesgos, siempre existentes a pesar de las minuciosas medidas de seguridad, es mediante métodos analíticos.

El concepto de seguridad aplicado en centrales nucleares garantiza que los accidentes no provoquen un escape peligroso de materiales radiactivos hacia el medio ambiente, a condición de que funcionen adecuadamente un número mínimo de sistemas técnicos de seguridad paralelos redundantes. Por tanto, un análisis de los riesgos tiene que postular que se producen fallos en dichos sistemas de seguridad, puesto que solo en tal caso se puede producir un escape de productos de fisión y, en consecuencia, hacer real el riesgo.

Una encuesta aproximada de las existencias de materiales radiactivos (inventario) de una central nuclear indica que — promediados en el tiempo — los productos de fisión del núcleo de un reactor representan alrededor del 95% del inventario total. En consecuencia, está justificado considerar sobre todo aquellos sucesos que podrían provocar escapes importantes de productos de fisión del núcleo.

Para una estimación del riesgo pueden despreciarse los escapes siempre que se impidan los daños al núcleo, y en particular, su fusión. Por tanto, en el análisis de los riesgos se ha de suponer un fuerte sobre calentamiento del núcleo, cuya prevención es el objetivo fundamental de las medidas de seguridad de los reactores.

Los "sucesos iniciadores" capaces de producir daños al núcleo como consecuencia de una refrigeración insuficiente suelen agruparse en dos tipos:

- (i) accidentes con pérdida de refrigerante, iniciados por una fuga o una ruptura en el sistema de refrigeración del reactor;
- (ii) estados transitorios (llamados simplemente "transitorios") que conducen a un desequilibrio entre el calor generado en el núcleo y el extraído del mismo, causados por sucesos distintos de los accidentes con pérdida de refrigerante.

Lo más probable es que, después de producirse un suceso iniciador, la central pueda mantenerse en un estado de seguridad gracias a los sistemas de control y de seguridad. Sin embargo, si fallan los sistemas esenciales para lograr una refrigeración suficiente del núcleo, se producirá un sobrecalentamiento y eventualmente la fusión del núcleo. Según las características específicas del suceso iniciador, para ello podrá ser necesario que se produzca una serie de fallos sucesivos en un número de sistemas diferentes. En el caso de los transitorios operacionales, el funcionamiento de los sistemas de seguridad en general solo se requerirá si fallan los sistemas de control. Sin embargo, otros sucesos más graves exigirían la inmediata entrada en funcionamiento de los sistemas de seguridad.

A fin de registrar claramente la posible secuencia de acontecimientos resultante de sucesos iniciadores se han preparado los denominados "árboles de sucesos". El tronco de un árbol de sucesos representa el suceso iniciador. El tronco se ramifica en los puntos en el que el suceso queda influido por el funcionamiento eficaz o deficiente de los distintos sistemas. En consecuencia, las ramas del árbol representan las posibles secuencias de accidentes. La frecuencia de que ocurra una secuencia dada de accidentes viene dada por la frecuencia del suceso iniciador y por la probabilidad de un funcionamiento eficaz o deficiente de los sistemas implicados.

**CUADRO 1: Resumen de los resultados del análisis del árbol de sucesos**

Suceso iniciador de un accidente	Probabilidad de que ocurra el suceso iniciador por año-reactor ( $P_1$ )	Probabilidad de fallo de las funciones requeridas de seguridad ( $P_2$ )	Probabilidad de que ocurra la fusión del núcleo por año-reactor ( $P_3 = P_1 \times P_2$ )
APR grande <sup>1</sup>	$2,7 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-7}$
APR medio <sup>1</sup>	$8 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-6}$
APR pequeño <sup>1</sup>	$2,7 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$5,7 \times 10^{-5}$
Fallo del suministro eléctrico del exterior	$1 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-5}$
Pérdidas en el suministro principal del agua de alimentación	$8 \times 10^{-1}$	$4 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$
Fallo del sistema de emergencia de suministro de energía, con pequeñas fugas en el estanque a presión	$2,7 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$7 \times 10^{-6}$
Otros transitorios con pequeñas fugas en el estanque a presión	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-2}$
Sucesos TASPE <sup>2</sup>	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-6}$

<sup>1</sup> Accidente con pérdida de refrigerante.<sup>2</sup> Transitorios anticipados sin parada de emergencia.

La frecuencia de los transitorios se estima sobre todo basándose en la experiencia de funcionamiento. A partir de las obras publicadas se han obtenido datos relativos a los accidentes con pérdida de refrigerante.

Los sistemas de seguridad de una central nuclear están diseñados para funcionar con una alta fiabilidad. Por tanto, en general, la experiencia directa no sirve para determinar la probabilidad de fallo de estos sistemas. En consecuencia, dicha probabilidad se ha calculado mediante análisis de árboles de fallos. En un árbol de fallos, la interacción funcional de los componentes del sistema se traduce en una estructura lógica. Según esta estructura, es posible calcular la probabilidad de que falle el sistema, empezando con la indisponibilidad de los componentes. En principio se puede tener también en cuenta la influencia de las acciones humanas y de sucesos del exterior.

El análisis de fiabilidad tiene que evaluar qué parte de un sistema redundante basta para desempeñar la función requerida. Con esa finalidad, el estudio utilizó el análisis de seguridad realizado durante el proceso de adjudicación de licencia. Se supone que un sistema redundante falla por completo si se dispone de un número de subsistemas menor que los considerados necesarios en el análisis de seguridad. Hay buenas razones para creer que, en una situación real, un sistema averiado bastaría para mantener la integridad del núcleo.

Se ha mencionado ya que en los análisis de riesgos deben definirse aquellos sucesos que podrían provocar la fusión del núcleo del reactor. Solo en este caso se produciría la liberación de una gran cantidad de productos de fisión.

Para calcular la frecuencia probable de un accidente de fusión del núcleo, el estudio consideró con cierto detalle alrededor de 70 secuencias de accidentes. Resumiendo todos los sucesos pertinentes contribuyen al accidente, se calculó una frecuencia global de fusión del núcleo de alrededor de  $9 \times 10^{-5}$  por año. El Cuadro 1 resume los resultados de los análisis del árbol de sucesos y del árbol de fallos. La Figura 1 ilustra la influencia relativa de los distintos sucesos iniciadores sobre la frecuencia global de fusión del núcleo.

Una pérdida del refrigerante principal debida a una pequeña fuga en las tuberías del refrigerante y reactor es el suceso más importante que puede contribuir al accidente, debido sobre todo a las siguientes razones:

- Las pequeñas fugas pueden ocurrir con más frecuencia que las fugas medias o grandes.
- El sistema secundario es necesario para eliminar el calor de desintegración y enfriar el reactor. En la central de referencia, los operadores deben poner en funcionamiento este sistema y controlarlo. Esto reduce de modo significativo su fiabilidad.

El segundo suceso en orden de importancia se debe a los transitorios, en los que desempeña un papel importante un fallo del suministro eléctrico en el exterior de la central.

En muchos transitorios es de suponer que se produce un aumento de la presión del sistema primario. El accionamiento de las válvulas aliviadoras de presión (o válvulas de seguridad) podría llegar a ser necesario para proteger el sistema contra una sobrepresión excesiva. En este caso, un transitorio puede transformarse en una pequeña fuga si la válvula no se cierra después de haber estado abierta. Esta secuencia desempeñó un papel predominante cuando se publicaron en noviembre de 1977 los resultados provisionales del estudio. Los perfeccionamientos introducidos en la central han reducido esta probabilidad considerablemente.

No es sorprendente que la probabilidad de una fuga importante sea muy pequeña. Este accidente se estudia detenidamente desde hace muchos años como accidente de referencia. Los sistemas técnicos de seguridad se han optimizado para hacer frente a este tipo de accidentes.

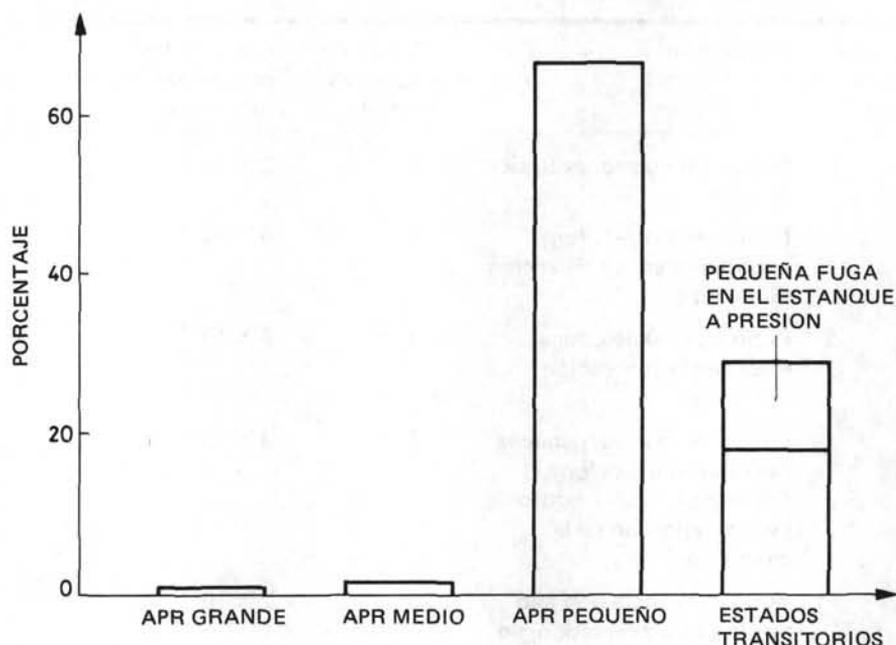


Figura 1. Contribución relativa de varios sucesos iniciadores de un accidente a la probabilidad de fusión del núcleo

Después de la liberación de productos de fisión del núcleo, los procesos de deposición que se producen en la atmósfera del sistema de contención, así como el estado de integridad de la contención, determinan la cantidad de productos de fisión que llegan hasta el aire libre.

Durante un accidente de fusión el material fundido caería sobre el fondo de la vasija de presión. El calor de desintegración generado por el combustible fundido se supone que es suficiente para perforar y fundir el extremo inferior de la vasija de presión del reactor e incluso las estructuras de hormigón del pozo del reactor y los cimientos de la estructura de contención. Se ha calculado que los cimientos del edificio del reactor serán perforados y fundidos unas 100 horas después de haberse iniciado el accidente.

Como consecuencia de la fusión y la perforación por fusión, no solo se libera parte del inventario del núcleo radiactivo, sino que se producen grandes cantidades de vapor e hidrógeno con un aumento subsiguiente de la presión y temperatura en el sistema de contención. Se ha calculado que unas 25 horas después de iniciarse el accidente, fallará el sistema de contención debido a la sobrepresión.

Antes de que se produzca este "fallo tardío por sobrepresión", el sistema de contención puede perder su integridad como consecuencia del fallo de su aislamiento o por una "explosión de vapor". Cuando el núcleo fundido cae en el agua de la cámara inferior se produce una rápida evaporación del agua. Sin embargo, una liberación de energía suficientemente grande para poner en peligro la integridad del sistema primario requeriría una fragmentación muy fina de grandes partes del núcleo fundido.

**CUADRO 2: Tiempos de liberación y probabilidades de las categorías de liberación**

Categoría de liberación Número	Descripción	Tiempo de liberación (horas)	Probabilidad <sup>1</sup> por año-reactor (promedio)
1	Fusión del núcleo, explosión de vapor	1	$2 \times 10^{-6}$
2	Fusión del núcleo, fuga importante en la contención (300 mm $\phi$ )	1	$6 \times 10^{-7}$
3	Fusión del núcleo, fuga media en la contención (80 mm $\phi$ )	2	$6 \times 10^{-7}$
4	Fusión del núcleo, pequeña fuga en la contención (25 mm $\phi$ ), "Fallo tardío por sobrepresión en la contención"	2	$3 \times 10^{-6}$
5	Fusión del núcleo, "Fallo tardío por sobrepresión, en la contención", avería de los sistemas de filtros.	25	$2 \times 10^{-5}$
6	Fusión del núcleo, "Fallo tardío por sobrepresión, en la contención"	25	$7 \times 10^{-5}$
7	Accidente de referencia, fuga importante en la contención (300 mm $\phi$ )	0	$1 \times 10^{-4}$
8	Accidente de referencia	0	$1 \times 10^{-3}$

<sup>1</sup> Las probabilidades se calculan incluyendo contribuciones del 10% procedentes de categorías de liberación vecinas.

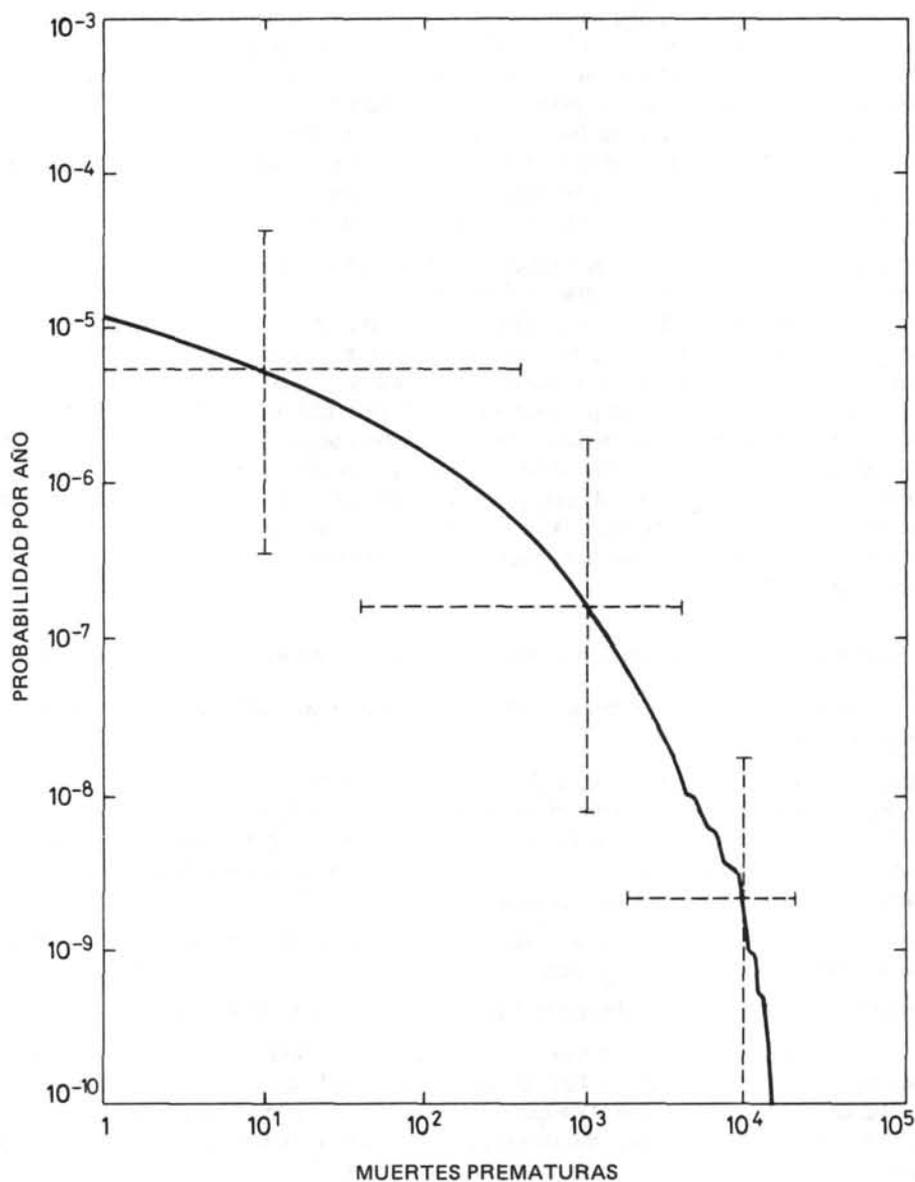
<sup>2</sup> Accidentes sin fusión del núcleo.

Combinando los resultados de los análisis de la fusión del núcleo y del comportamiento del sistema de contención, se obtiene la cantidad de los productos de fisión y la frecuencia de liberación desde la central a la atmósfera.

Para simplificar los ulteriores análisis, las secuencias de accidentes que producen el mismo tipo de fallo del sistema de contención se agrupan en una de las varias categorías de liberación.

Los datos típicos de esta categoría figuran en el Cuadro 2.

Las categorías 1 a 6 comprenden los accidentes de fusión del núcleo. La probabilidad de que la fusión del núcleo vaya seguida por un "fallo tardío por sobrepresión" de la contención es del 95% aproximadamente. Estos sucesos se incluyen en las categorías 5 y 6. En la categoría 5, se supone un fallo adicional del sistema de filtros antes del "fallo tardío por



**Figura 2. Función de distribución acumulada complementaria para muertes prematuras por año para 25 centrales (las líneas de trazos indican límites de confianza del 90%)**

sobrepresión" de la contención. Las categorías 2 a 4 inclusive abarcan los accidentes de fusión del núcleo, con fallo del aislamiento de la contención, orificios que pueden dar lugar a fugas importantes (diámetro equivalente a 300 mm) o fugas pequeñas (diámetro equivalente a 25 mm). En estos casos, la liberación de los productos de fisión, en particular en una fuga grande, es mucho mayor que las señaladas en las categorías 5 y 6. La categoría 1 incluye las liberaciones más graves. Se ha supuesto que la vasija de presión del reactor y la contención han sido averiados gravemente por una explosión de vapor después de la fusión del núcleo. El estado actual de las pruebas analíticas y experimentales demuestra que un suceso de esta índole es extremadamente improbable. Como hipótesis muy prudente, análoga a la adoptada en WASH-1400, se ha asignado una probabilidad de 2% al suceso en el que una fusión del núcleo produce una explosión de vapor que destroza la integridad de la contención.

Además, el estudio ha analizado los accidentes con pérdida de refrigerante, suponiendo una refrigeración suficiente del núcleo gracias a los sistemas de emergencia. Estos sucesos se agrupan en las **categorías 7 y 8**. Los productos de fisión solo son liberados debido a roturas postuladas de vaina. Para la categoría 7, se supone el deterioro del aislamiento de la contención debido a una fuga grande. Como continuación a la parte técnica del análisis, se ha examinado la dispersión de los productos de fisión por difusión y transporte atmosférico. Las condiciones meteorológicas reinantes se han supuesto según los registros de datos reales aplicables a diferentes regiones. Por último, se han calculado las diversas exposiciones resultantes, los efectos sanitarios de esta radioexposición y — a partir de datos demográficos — el número de individuos lesionados. Para este cálculo, se tuvieron en cuenta procedimientos de emergencia basados en recomendaciones oficiales existentes en la República Federal de Alemania.

### **Principales resultados obtenidos con los cálculos de las consecuencias de los accidentes**

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos con los cálculos de las consecuencias de los accidentes:

La Figura 2 indica la correlación entre el número y la frecuencia y muertes prematuras resultantes de la radioexposición del público después de un accidente con fusión del núcleo. Con 25 centrales en explotación se ha estimado que las muertes prematuras ocurrirían solo con una frecuencia aproximada de  $10^{-5}$  por año. Este valor permite afirmar que los sucesos de gran gravedad son extremadamente improbables.

Con respecto a los resultados, el estudio ha tratado de cuantificar los intervalos de confianza que se indican en puntos seleccionados.

Las muy bajas frecuencias calculadas en el estudio son producto de varios factores (Figura 3).

Tomando en consideración 25 centrales, los cálculos señalan una frecuencia de fusión del núcleo con una razón anual de 1 a 400. Dada una fusión del núcleo, la liberación de productos de fisión hasta la atmósfera queda, en la mayoría de los casos, muy eficazmente limitada por la contención. Hay solo una probabilidad en 16 de que después de un fallo grave de la contención se liberen dosis potencialmente mortales. En este caso las consecuencias nocivas dependerían de las condiciones meteorológicas y de la distribución demográfica. La probabilidad de que ocurran muertes prematuras después de un fallo grave de la contención tiene un valor de 1:10.

En total, hay más de un 99% de probabilidades de que un accidente con fusión del núcleo no cause muertes prematuras por irradiación. Solo ocurriría un gran número de muertes si las condiciones meteorológicas adversas coincidiesen con características desfavorables del emplazamiento y en el caso de un accidente de extrema gravedad. Por ello es muy baja la probabilidad de que ocurran sucesos de graves consecuencias.

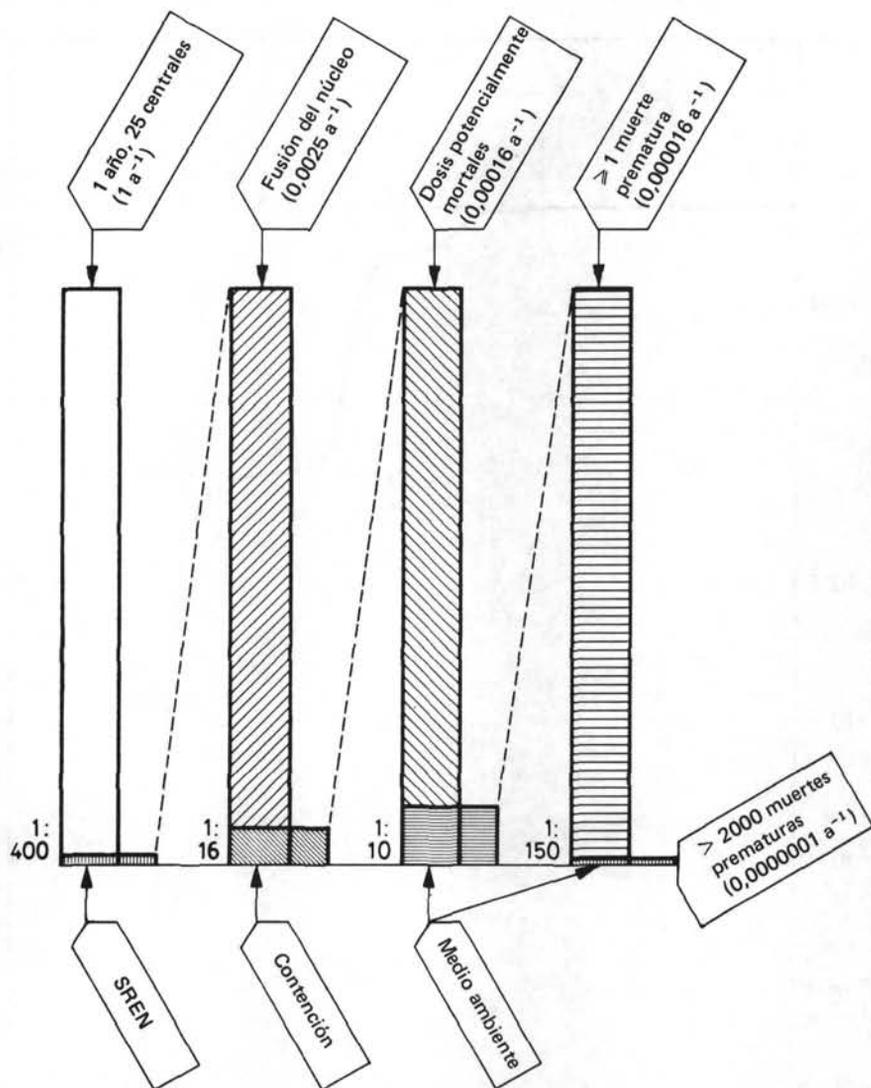


Figura 3. Frecuencia de las consecuencias de un accidente (por año, 25 centrales)

La situación es distinta con respecto a los efectos sanitarios tardíos. Se ha calculado también un considerable número de muertes tardías en los casos de accidentes menos graves (Figura 4). Conviene tener presente que en el estudio se utilizó una relación lineal dosis-riesgo. Esto supone que incluso una radioexposición mínima provocará un aumento del riesgo de cáncer.

Los efectos sanitarios tardíos causados por la radiación aparecerían después de 10 a 20 años y se extenderían sobre grandes zonas y durante varios decenios.

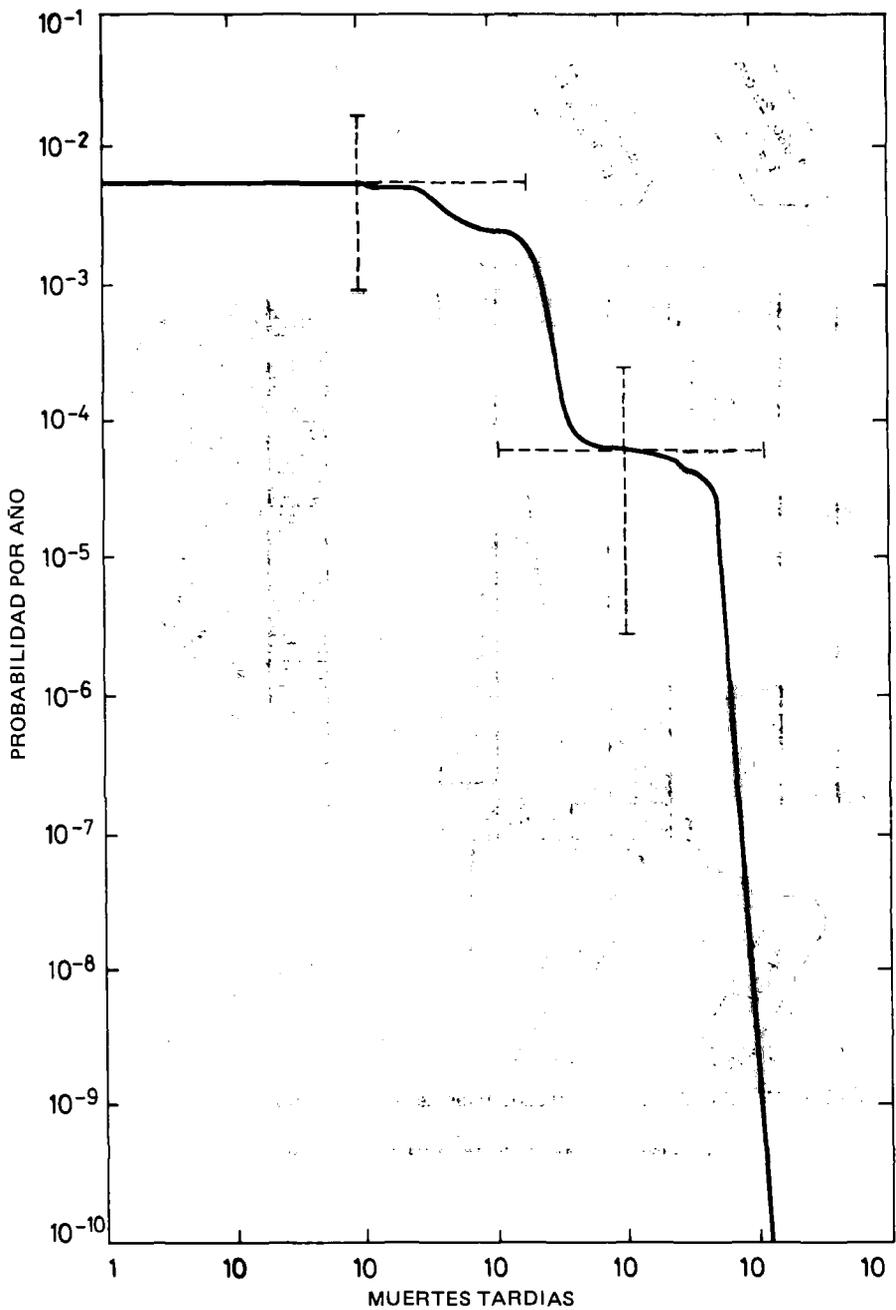


Figura 4. Función de distribución acumulada complementaria para muertes tardías por año para 25 centrales (las líneas de trazos indican límites de confianza del 90%)

Por término medio, alrededor de la mitad de estos efectos podrían ocurrir fuera de la República Federal de Alemania. Este fenómeno subraya la importancia internacional del problema de la seguridad de los reactores.

Parece apropiado colocar en su justa perspectiva el número de efectos tardíos calculados en el estudio. Aplicando la relación lineal dosis-riesgo empleada en el estudio es posible calcular que alrededor de la mitad de todas las muertes por cancer son provocadas por la radiación natural. Aunque este porcentaje sea relativamente pequeño, las cifras absolutas ascienden a más de 50 000 casos en Alemania y a alrededor de 600 000 en Europa, durante todo un período de duración de vida, es decir, 71 años.

### **Conclusiones**

Los análisis de los riesgos representan un método totalmente nuevo pero eficaz para evaluar el nivel de seguridad de importantes sistemas tecnológicos. Aunque los márgenes de incertidumbre de los resultados sean considerables, el análisis facilita valiosa información, siempre que en su interpretación se tengan en cuenta las limitaciones del método. Como resultado de este estudio se ha determinado un número de posibles mejoramientos del sistema de la central de referencia. En algunos casos, pudo obtenerse una disminución significativa de la probabilidad de fusión del núcleo introduciendo pequeñas modificaciones en el diseño de la central.

Los resultados globales del estudio sobre los riesgos permiten una comparación aproximada de los procedentes de distintas fuentes. Aunque en teoría no puedan excluirse absolutamente accidentes nucleares de grandes consecuencias, el estudio ha calculado que la importancia potencial de los efectos sanitarios no es mayor que la de otros efectos posibles procedentes de riesgos naturales o artificiales. Sin embargo, las probabilidades de una catástrofe nuclear son muy pequeñas. Esta conclusión concuerda con los resultados de WASH-1400.