

¿Es verdaderamente segura una seguridad "excesiva"?

por S.C. Black y F. Niehaus

Toda actividad humana implica cierto riesgo para la vida o la salud. Si bien es posible reducir el riesgo inherente a una actividad determinada, es imposible alcanzar el "riesgo nulo" o la "seguridad absoluta" que se pide frecuentemente. Una vez aceptado este axioma, se hace necesario definir el nivel aceptable de riesgo.

Para ello se utilizan corrientemente tres métodos: el primero, el de *considerar los riesgos en perspectiva*, permite determinar si los riesgos de una tecnología pueden compararse favorablemente con los riesgos resultantes de otras tecnologías aceptadas actualmente (Refs.[1, 2]). Se ha sugerido que el riesgo de una nueva tecnología debería ser como mínimo diez veces menor que el de las tecnologías ya bien establecidas (Refs.[3, 4]). El segundo método, el de *comparación de riesgos y beneficios*, consiste en adoptar un conjunto de alternativas para escoger entre diversas opciones. Este procedimiento requiere que los riesgos y los beneficios se expresen en unidades comunes, por lo general en términos monetarios. Sin embargo, estos dos métodos no responden a la cuestión de si se debe hacer más segura una tecnología determinada. Para tal fin se recurre al tercer método, en el que las decisiones sobre seguridad se basan en un enfoque más complejo de *análisis de la eficiencia del coste*, que es sinónimo de análisis de costes-beneficios marginales.

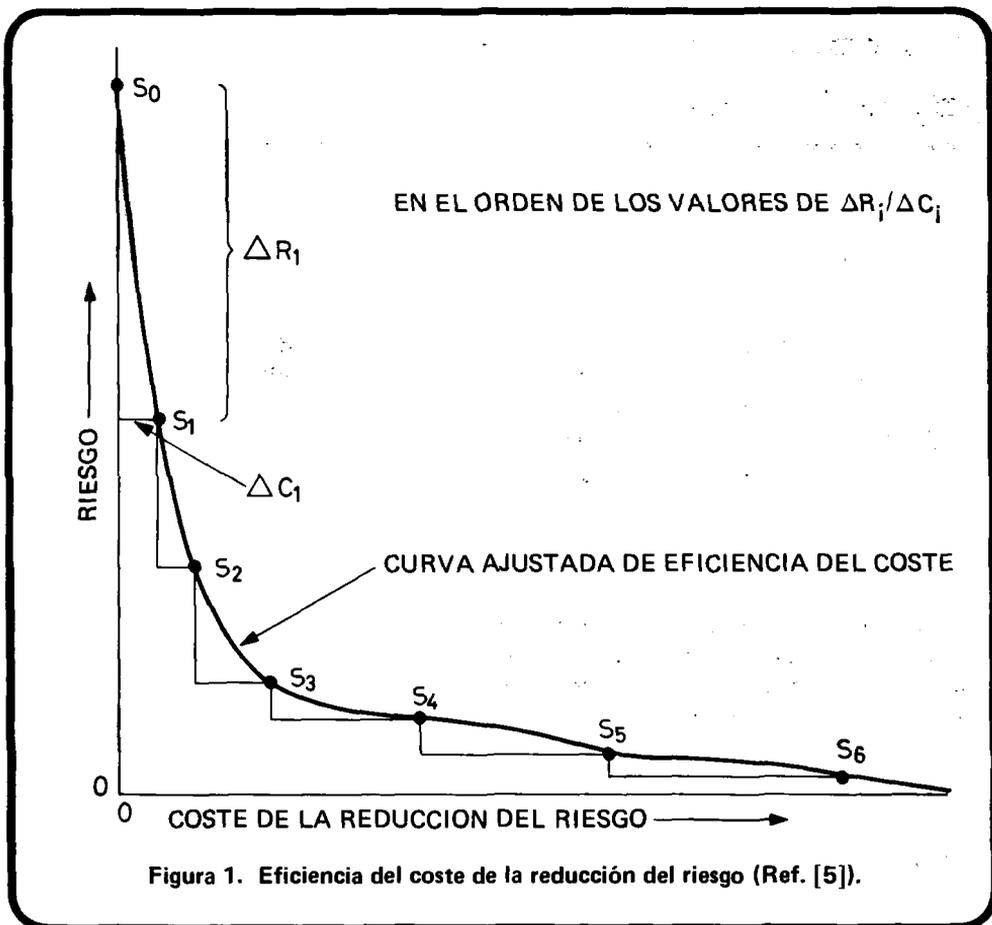
ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL COSTE

Los gastos en materia de seguridad siguen generalmente la ley económica del rendimiento decreciente. Las relaciones generales de esta ley se indican en la Figura 1 de la Ref.[5] y las Refs.[6, 7] contienen estudios de casos particulares. Esta figura indica que es posible reducir un riesgo relativamente alto a un nivel mucho menor (por ejemplo ΔR_1) a un coste adicional bastante bajo (por ejemplo ΔC_1). En cambio, se hace cada vez más costoso reducir más aún el riesgo (por ejemplo de S_5 a S_6). La relación $\Delta R/\Delta C$ (es decir la primera derivada) en cada punto de la curva es una medida de la eficiencia del coste de una nueva reducción del riesgo a partir del nivel de seguridad representado por ese punto. Estos costes marginales de reducción del riesgo se miden en términos tales como los efectos sobre la salud humana evitados por unidad de coste de reducción del riesgo (por ejemplo la pérdida de días-hombre evitada por millón de dólares*). Las dos conclusiones principales que se pueden sacar de esta figura son:

- 1) el coste marginal de la reducción del riesgo aumenta con el nivel de seguridad logrado;
- 2) para un nivel de seguridad determinado es posible reducir aún más el riesgo existente; sin embargo, no es posible reducir el riesgo a cero.

* Todos los costes monetarios que figuran en el presente artículo se expresan en dólares de los Estados Unidos.

El Dr. Black es funcionario superior y el Dr. Niehaus dirige el Proyecto conjunto OIEA/IIASA relativo a la evaluación de riesgos.



Dos puntos implícitos en estas conclusiones necesitan una discusión más a fondo. En primer lugar ¿deben hacerse las tecnologías *tan seguras como sea técnicamente posible*? Si bien a primera vista éste parece un criterio muy atractivo, la experiencia diaria nos demuestra que no es realizable. En el caso de los automóviles, por ejemplo, existen innumerables oportunidades de aumentar la seguridad. Pero es evidente que no se pueden dotar todas las calles de barreras protectoras o de señales eléctricas, ni todos los pasos a nivel se pueden reemplazar por pasos a distinto nivel, etc. Por lo tanto, las decisiones en materia de seguridad se deben tomar de forma que garantice la máxima eficiencia de los recursos limitados de la sociedad. Las dos conclusiones que se desprenden de la Fig. 1 implican que la "seguridad" viene determinada siempre por un compromiso entre dos objetivos: utilizar los recursos limitados con la máxima eficiencia (minimizando los costes) y alcanzar el más alto nivel de seguridad (minimizando los riesgos).

En segundo lugar ¿se puede asignar un valor monetario a la vida humana? Todo punto de la curva de la Fig. 1, que se escoja como límite pasado el cual no quepa considerar una nueva reducción del riesgo, se caracteriza por un gasto específico por unidad de reducción del riesgo. Concretamente, todo riesgo de muerte que se evite implica un valor monetario por cada vida humana salvada. Esta relación, en toda decisión acerca de la seguridad, ha

sido frecuentemente mal interpretada y ha causado mucha confusión. Se ha tratado muchas veces de deducir el "valor de la vida humana" (Ref.[8]) (por ejemplo, aplicando el criterio del capital humano, o el de lo que se está dispuesto a pagar). Los autores del presente artículo opinan personalmente que tales planteamientos carecen de sentido para las decisiones en materia de seguridad y son en realidad peligrosos desde el punto de vista de conseguir la aceptación pública de las normas de seguridad. La razón fundamental de elegir un valor típico de dicha relación *no* debe ser tratar de determinar el "valor de la vida humana". Esa relación tiene solo validez para *comparar los gastos de seguridad* correspondientes a las diversas clases de riesgos a los cuales está expuesto al ser humano. Actualmente, esos gastos parecen oscilar alrededor de 300 000 dólares por vida salvada. Este valor solo refleja una gran variedad de prácticas seguidas hoy día, no es resultado de ninguna regla o metodología general. Un coste marginal de la reducción del riesgo muy superior a este valor indicaría que sería preferible, desde el punto de vista de la eficiencia del coste, dedicar los recursos limitados de la sociedad a otros campos de actividad en los que lograrían una reducción mayor del riesgo. Estas consideraciones son especialmente válidas en el caso de los servicios básicos para la sociedad, tales como la producción de electricidad, en que los gastos que rebasan el principio de "al nivel más bajo que razonablemente se pueda alcanzar" repercuten directamente en el precio de kWh y, por lo tanto, gravan a todos los miembros de la sociedad. Se ha propuesto (Ref.[9]) aplicar un valor único a todas las industrias y que las desviaciones se compensen en forma de aumento o disminución de sus impuestos.

La razón del criterio precedente es la utilización óptima de los recursos limitados de que dispone la sociedad para gastos de seguridad. Pero esto no responde a la cuestión más general de saber los gastos totales que deben consagrarse a la seguridad puesto que, como se deduce de la Fig. 1, todo riesgo existente se puede hacer menor que cualquier límite dado aumentando mucho los costes. Pero de las reflexiones siguientes se deduce que, en la práctica, existe sin duda un límite de la reducción del riesgo, pues un gasto excesivo para tal reducción aumenta en realidad el riesgo total de la sociedad.

Considérese la cuestión de reducir aún más los riesgos debidos a la explotación de los reactores de potencia. En el caso de las medidas de seguridad que implican costes marginales tan extremadamente altos de reducción de riesgos, es importante tener en cuenta el riesgo para el público y el riesgo profesional que entraña la producción del propio equipo de seguridad, lo que no se considera en la Fig. 1. Ello quiere decir que se debe modificar ligeramente la curva. Como muestra la Fig. 2, se debe agregar un término lineal para incluir el riesgo debido a la producción del equipo de seguridad. Esto no modifica las relaciones de la Fig. 1 si los costes marginales son relativamente bajos. Pero para costes mucho más elevados, este término lineal, sumado a la otra curva, da una curva del riesgo total que pasa por un mínimo. Para costes elevados, la curva del riesgo total ya no se aproxima al nivel cero de riesgo, sino al riesgo que entraña la producción del equipo de seguridad. El mínimo se obtiene cuando los costes marginales de la reducción del riesgo (es decir la primera derivada de la curva de explotación) son iguales al riesgo específico de la producción del equipo de seguridad (es decir, a la pendiente del término lineal).

EL RIESGO DE LA PRODUCCION DEL EQUIPO DE SEGURIDAD

Calcular este riesgo es lo mismo que determinar la pendiente de la línea recta de la Fig. 2, que representa los efectos sobre la salud pública por unidad de coste del equipo de seguridad. Para nuestros cálculos, hemos supuesto que el equipo instalado de seguridad se compone de un 30% de trabajo de construcción, 10% de servicios, y 60% de máquinas herramientas más equipo eléctrico. Para producir máquinas herramientas, por ejemplo, hay que extraer minerales y carbón, refinar los minerales, producir coque, fabricar acero,

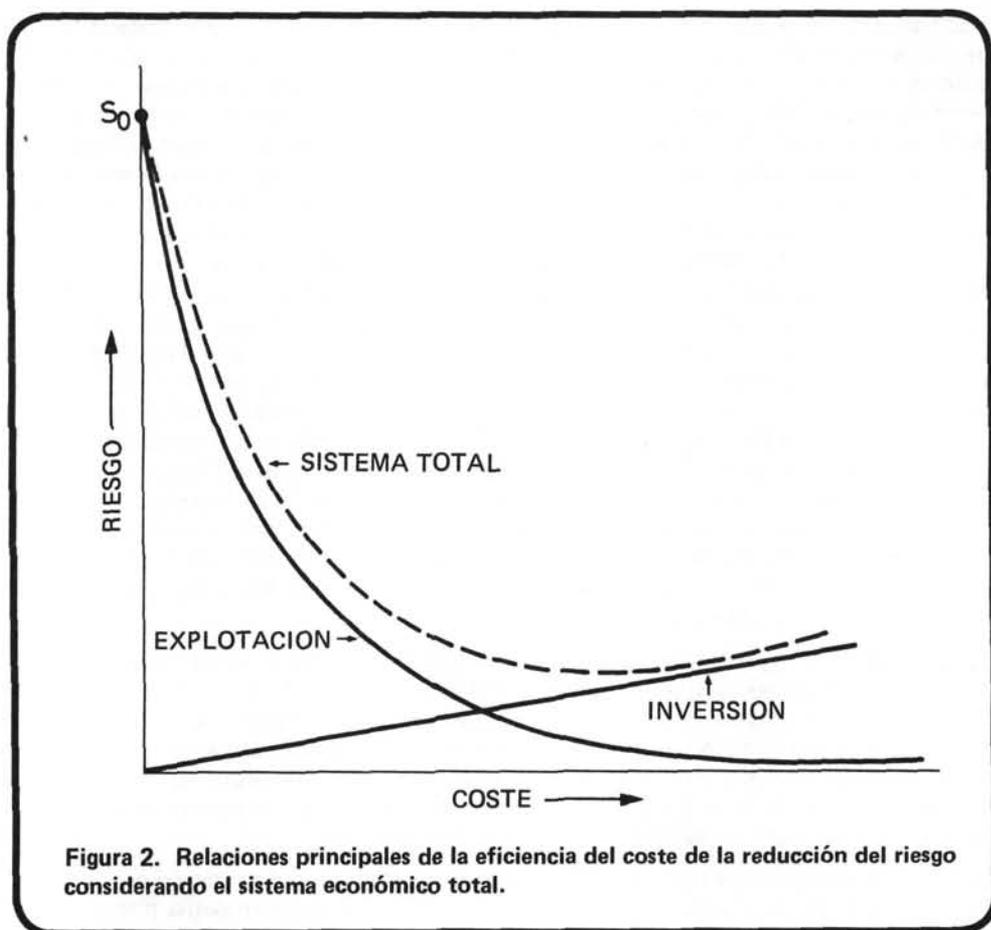


Figura 2. Relaciones principales de la eficiencia del coste de la reducción del riesgo considerando el sistema económico total.

fundir, transportar, consumir electricidad, etc., de manera que resulta una matriz de actividades. Se denomina esta matriz la tabla de entradas/salidas y se utiliza en economía para describir en términos monetarios las relaciones mutuas entre los sectores económicos. Utilizando estas tablas y los datos sobre lesiones y muertes en las distintas profesiones, se puede establecer una matriz que, en vez de indicar un flujo monetario, expresa el flujo de los efectos sobre la salud. Un sencillo procedimiento matemático (la matriz de Leontief inversa) permite sumar los riesgos derivados de todas las etapas de elaboración previa. Los efectos sobre la salud según las profesiones, utilizados para el cálculo, se han deducido de los datos correspondientes a 1973 de la República Federal de Alemania. En el Cuadro 1 se indican a título de ejemplo los resultados para ciertas ramas de la industria. Se observa que la minería es la que causa los mayores efectos sobre la salud por unidad de valor de los bienes producidos, a pesar de que requiere un total de horas de trabajo inferior al de la construcción. En el caso de la construcción, las muertes por accidentes de tráfico conexos con el trabajo son las más numerosas.

Sobre la base de la composición del equipo de seguridad antes mencionada, el Cuadro 2 indica el riesgo profesional total y las horas de trabajo requeridas. Cabe señalar la contribución relativamente alta a los efectos sobre la salud, resultante de los accidentes de

Cuadro 1. Total de horas de trabajo y efectos profesionales sobre la salud correspondientes a la producción de bienes y servicios por valor de un millón de dólares

Industria	Total de horas de trabajo	Accidentes mortales de trabajo (10^{-2})	Muertes por accidentes de tráfico en conexión con el trabajo (10^{-2})	Enfermedades mortales crónicas profesionales (10^{-3})	Horas de trabajo perdidas
Máquinas herramientas y equipo eléctrico	82 000	0,470	0,354	0,302	416
Minería	76 600	1,916	0,340	8,740	1040
Canteras y movimiento de tierras	63 200	1,182	0,356	0,894	438
Géneros textiles y ropa	119 600	0,270	0,314	0,232	336
Servicios, suministros y productos de precisión	75 000	0,566	0,210	0,206	118
Construcción	101 000	1,492	0,592	0,344	630

Cuadro 2. Riesgo profesional total de la producción de equipo de seguridad por valor de un millón de dólares

Total de horas de trabajo	87 000
Horas de trabajo perdidas	450
Muertes por accidentes profesionales	$7,86 \times 10^{-3}$
Muertes por accidentes de tráfico	$4,12 \times 10^{-3}$
Muertes por enfermedades crónicas profesionales	$0,306 \times 10^{-3}$
Total de muertes	$12,28 \times 10^{-3}$
Σ de muertes equivalentes*	$21,6 \times 10^{-3}$
o	
Σ de días de trabajo equivalentes perdidos*	130

* 1 muerte = 6000 días-hombre perdidos.

tráfico conexos con el trabajo. Los datos del Cuadro 2 comprenden las muertes y las horas de trabajo perdidas por enfermedad. Ambas se han totalizado suponiendo que una muerte equivale a una pérdida de 6000 días-hombre.

La calidad de los datos sobre accidentes profesionales es bastante buena, pero no existen datos similares para el riesgo del público en general. A fin de estimar el orden de magnitud de dicho riesgo, se han admitido los siguientes supuestos:

Riesgo derivado de la energía: se supone que se necesita una energía primaria total de unas 700 toneladas equivalentes de carbón (tec) para producir equipo por valor de un millón de dólares (Ref.[10]). Si esta energía se produce con carbón y se suponen 10 muertes/GW(e) año, el riesgo total sería $2,6 \times 10^{-3}$ muertes/1 millón de dólares de equipo.

Riesgo derivado de la industria: los datos correspondientes a 1970 de la República Federal de Alemania (Ref.[11]) indican que los riesgos de las emisiones industriales son aproximadamente iguales a los de la producción de energía.

Riesgo derivado de accidentes de tráfico: se supone que el riesgo público derivado de estos accidentes es aproximadamente igual al riesgo profesional respectivo.

En total, de esto se desprende que el riesgo público aumenta aproximadamente en un 50% el riesgo profesional. Por lo tanto, se calcula que el riesgo específico que entraña la producción de equipo de seguridad (r_p) es de aproximadamente 3×10^{-2} muertes equivalentes o 180 días-hombre equivalentes perdidos por cada millón de dólares de equipo. En la Ref.[12] se dan más detalles concretos de los cálculos que conducen a este valor de r_p .

APLICACIONES

El riesgo específico, r_p , determina la pendiente de la recta de la Fig. 2. También significa que un gasto de 33 millones de dólares en equipo de seguridad causaría una muerte equivalente durante la construcción e instalación del mismo.

Se puede utilizar entonces este valor para determinar el riesgo mínimo de la curva correspondiente a todo el sistema. Este mínimo se presenta en el punto en que el coste marginal de reducción del riesgo (la curva "Explotación") tiene la misma pendiente, aunque de signo opuesto, que la línea "Inversión". En este punto la producción e instalación de equipo de seguridad se traduciría en un efecto equivalente sobre la salud de los trabajadores y del público, resultante de una tentativa de prevenir un efecto equivalente estimado para el público en un momento futuro. En otras palabras, se causa una muerte estadísticamente segura en el presente, en vez de una muerte hipotética más adelante. Naturalmente, todo coste de las medidas de seguridad que exceda del mínimo causará mayores efectos sobre la salud que los que prevenga. Así pues, este nivel de unos 33 millones de dólares por vida equivalente salvada parece establecer un límite absoluto en términos físicos para la reducción del riesgo. (Conviene señalar que semejante principio se usa también en la práctica médica; se ha dejado de recomendar la vacuna antivariólica porque el riesgo inherente a la propia vacunación se ha hecho mayor que el riesgo de contraer la enfermedad.)

Ciertamente, estos riesgos para los trabajadores y para el público se originarían igualmente si, en vez de equipo de seguridad, se fabricaran otros productos. Pero esto no quiere decir que deban considerarse únicamente los efectos netos, puesto que la producción de otros bienes aportaría un beneficio a la sociedad, y habría que comparar los riesgos resultantes de las diversas maneras de producir esos bienes.

Es interesante ahora comparar este resultado con los gastos reales de seguridad en diversas ramas de la industria. En la Ref.[9] el lector podrá encontrar una compilación de datos. En el Cuadro 3 se presenta una muestra de esos gastos tomada de la Ref.[6]. Se puede observar que se excede en varios casos el valor r_p . La segunda columna muestra la razón entre los efectos prevenidos y los efectos causados. Una razón igual a 1 indica que no se ha logrado ninguna prevención neta, y los valores mayores que 1 indican que el riesgo ha aumentado en realidad. Esto no quiere decir, sin embargo, que el coste marginal de reducción del riesgo deba elevarse realmente hasta el nivel de 33 millones por vida equivalente salvada, por las razones que se exponen a continuación.

Según un cálculo basado en el Cuadro 2, se requerirían unos 1400 años-hombre de mano de obra para transferir una muerte equivalente (o 6000 días-hombre equivalentes perdidos) del período de explotación (o un momento posterior) al período de construcción, sin lograr ningún beneficio neto. Este punto requiere más aclaración. Consideremos el ejemplo de los recombinadores y los seis lechos de carbón vegetal indicados en el Cuadro 3.

La eficiencia del coste de la reducción del riesgo en el caso de los seis lechos de carbón vegetal adicionales se calculó en 22 millones de dólares por vida equivalente salvada (sobre la base de dos muertes por 10 000 rem-hombre). Los gastos totales de inversión que supone este sistema por central son unos 3 millones de dólares. Supongamos que dicho sistema se utiliza en 10 reactores; la inversión total sería entonces de 30 millones de dólares. De los datos sobre la eficiencia del coste se deduce que esta inversión salvaría aproximadamente 1,36 vidas equivalentes. La presente memoria sugiere, sobre la base de los datos de la República Federal de Alemania, que tal vez no sean directamente aplicables a esta situación concreta, que la producción de estos 10 sistemas originaría unas 0,91 muertes equivalentes entre los trabajadores y el público. Es decir, el riesgo se hubiera disminuido en realidad solo en unos 3000 días-hombre perdidos. Para disminuir el riesgo en la mitad de una vida, la sociedad tendría que invertir 1300 años-hombre de mano de obra, sin contar la energía

Cuadro 3. Comparación de los costes marginales de la reducción del riesgo (Ref.[6]) con r_p (1 muerte equivalente/33 millones de dólares)

Medida de seguridad	Millones de dólares por vida salvada	(Millones de dólares por vida salvada) $\cdot r_p^*$
Cinturón de seguridad (automóviles)	0,3	0,01
Protección contra incendios en edificios de gran alzada	40	1,21
Desulfuración al 50% de los gases de combustión de una central eléctrica con:		
chimenea de 30 metros	0,2	0,006
chimenea de 120 metros	2,5	0,08
Centrales nucleares con: **		
recombinadores	9	0,27
adición de 6 lechos de carbón vegetal	22	0,66
adición de 12 lechos de carbón vegetal ⁺	150	4,5
tratamiento para el yodo ⁺	500	15,0

* Un valor superior de 1,0 indica que el riesgo de producir el equipo de seguridad es mayor que la reducción del riesgo buscada.

** Sobre la base de 2 efectos por 10^4 rem-hombre (cáncer mortal sumado a graves efectos genéticos, todas las generaciones).

+ Medida propuesta, pero no puesta en práctica.

ni la materia prima necesarias. En total, la sociedad invertiría 1300 años-hombre de mano de obra y 0,9 muertes para prevenir 1,4 efectos graves sobre la salud.

Por lo tanto, sigue en pie la cuestión de cuántos días-hombre de mano de obra se deberían invertir para prevenir un día-hombre de efectos sobre la salud. Es evidente que este problema requiere amplios estudios y que no se puede ofrecer aquí una solución. A título de estimación aproximada, supongamos que la sociedad debiera invertir un año-hombre de vida. En este caso, la pérdida de una vida equivalente puede sumarse con 59 vidas de trabajo (1400 años-hombre por 33 millones de dólares, lo que resulta en una inversión total de 60 vidas-hombre o un r_p efectivo de una vida equivalente por 0,5 millones de dólares. Este valor está claramente dominado por las necesidades de mano de obra. Con respecto a la protección radiológica cabe señalar que este valor sería equivalente a 100 dólares/rem-hombre.

Volviendo a la cuestión de la seguridad de las centrales nucleares, consideremos el reciente estudio de la EPA (Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente)

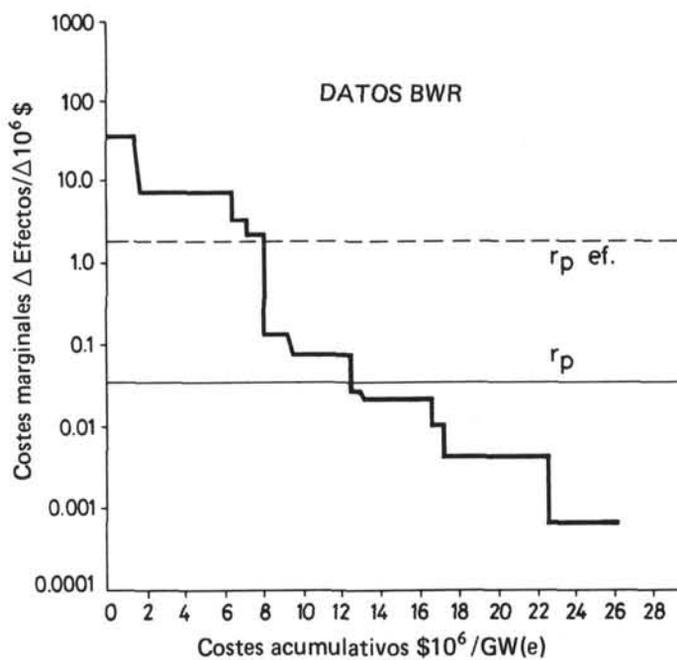
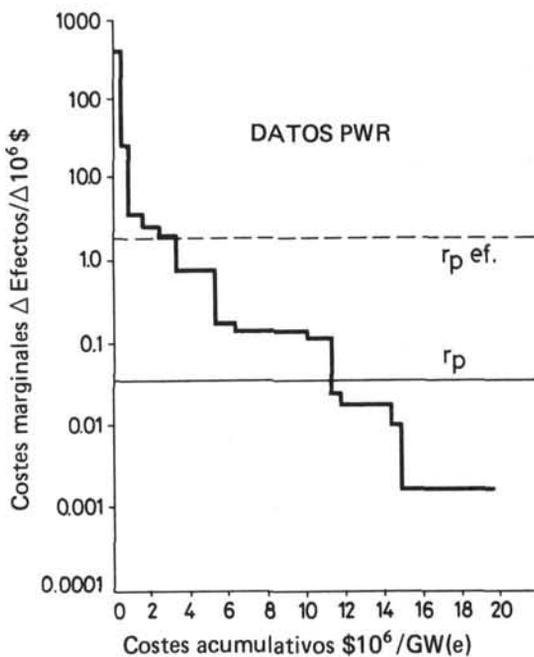


Figura 3. Eficiencia del coste de la reducción del riesgo (Ref.[7]).

(Ref.[7]), que presenta cálculos de la eficiencia del coste de los sistemas de reducción del riesgo, en el marco de los ciclos totales del combustible, para los reactores de agua a presión (PWR) y los de agua en ebullición (BWR). En la Fig. 3 se representan a escala logarítmica los costes marginales inversos de reducción del riesgo. Si se aplica un riesgo específico r_p de 1 muerte/33 millones de dólares, puede verse que se han considerado varios sistemas de reducción del riesgo que, en realidad, prevendrían menos efectos esperados sobre la salud que los que se causarían durante la producción de dichos sistemas. Para costes acumulativos totales de unos 12 millones de dólares, en el caso de los PWR y BWR, el coste marginal de la reducción del riesgo — considerando el sistema económico total — alcanzaría el mínimo expresado por la Fig. 2. En el diagrama se representa igualmente el r_p efectivo basado en los efectos sobre la salud, y en las necesidades de mano de obra.

Hay que señalar que el hecho de igualar un efecto en el futuro a un efecto durante la construcción implica un juicio de valor. Convenimos con lo sugerido en la Ref.[13]. a saber, que no se debería aplicar ningún tipo de descuento a los efectos futuros: en consecuencia, un efecto en el futuro se debería considerar tan grave como un efecto presente. Ahora bien, ello introduce en los cálculos un factor de prudencia quizás excesiva, pues no se tiene en cuenta la creación de métodos perfeccionados de tratamiento médico en el futuro.

Los cálculos aquí descritos se basan en valores esperados y en determinadas hipótesis para la suma de diversos riesgos sociales. Las conclusiones formuladas en esta memoria dependen efectivamente de las diferentes hipótesis adoptadas. Otras hipótesis podrían dar resultados diferentes, pero en general la metodología sería válida y se podría utilizar de todas maneras.

RESUMEN

La presente memoria indica que no se puede reducir el riesgo total por debajo de cualquier límite dado. En un punto determinado, el riesgo profesional y público resultante de la producción de equipo de seguridad es mayor que la reducción obtenida de un riesgo existente. A juzgar por los datos de la República Federal de Alemania, se calcula que durante la construcción e instalación de equipo de seguridad que cueste unos 33 millones de dólares, se causa 1 muerte equivalente o una pérdida de 6000 días-hombres equivalentes. Así pues, los gastos de seguridad para costes marginales de reducción del riesgo superiores a 33 millones por vida equivalente salvada, se traducirían en realidad en un aumento del riesgo. Se podría llegar a la conclusión de que se había conseguido una seguridad "excesiva". Por otra parte, este gasto implica que se han empleado 1400 años-hombre de trabajo, por vida equivalente, sin ninguna ganancia neta de seguridad.

La ventaja del método explicado aquí es que describe la efectividad de la reducción del riesgo en términos físicos, es decir, en forma de riesgos profesionales y para el público, así como de necesidades de mano de obra para la producción del equipo de seguridad, con lo cual se evita poner en la balanza dinero y vidas humanas.

Referencias

- [1] US Nuclear Regulatory Commission. Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014). Washington, D.C. (1975).
- [2] Canvey: An Investigation of Potential Hazards from Operations in the Canvey Island/Thurrock Area. Health & Safety Executive, Her Majesty's Stationery Office, Londres (1978).
- [3] Higson, D.J., The Development of Safety Criteria for Use in the Nuclear Industry. Memoria presentada en la 6a Conferencia Nacional de Ingeniería Química en Queensland, Australia, 6-8 de noviembre (1978).

- [4] Tattersall, J.O., D.M. Simpson, and R.A. Reynolds, A Discussion of Nuclear Plant Safety with Reference to Other Hazards Experienced by the Community. Pag 671, A/CONF. 49. Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena, Austria (1972).
- [5] Rowe, W.D., An Anatomy of Risk. John Wiley & Sons, Nueva York (1977).
- [6] Sagan, L., Public Health Aspects of Energy Systems. In H. Ashley, R.L. Rudman and C. Whipple (eds.), Energy, and the Environment – A Risk-Benefit Approach. Págs. 87-111. Pergamon Press, Nueva York (1976).
- [7] US Environmental Protection Agency. Environmental Radiation Protection Requirements for Normal Operations of Activities in the Uranium Fuel Cycle. EPA-520/4-76-016. Washington, D.C. (1976).
- [8] Linnerooth, J., The Value of Human Life: A Review of the Models. Economic Inquiry, 17, 52-74, enero (1979).
- [9] Siddall, E., A Rational Approach to Public Safety – An Interim Report. Canatom, Ltd., Toronto, Canada (1979).
- [10] Niehaus, F., Nettoenergiebilanzen – Ein Hilfsmittel zur Analyse von Energienutzungsstrukturen. Brennstoff – Wärme – Kraft, 10, 396-400 (1975).
- [11] Niehaus, F., and H. Engelhardt, Vergleichende Darstellung atmosphärischer Schadstoffbelastungen. VDI-Bericht, 224, 127-141 (1974).
- [12] Black, S.C., F. Niehaus, and D.M. Simpson. How Safe is "Too" Safe? WP-79-68, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (1979).
- [13] Cohen, J.J. and H.A. Tewes (1979), Development of Radiological Criteria for Nuclear Waste Management. IAEA-SR-36-22. Paper presented at the Topical Seminar on the Practical Implications of the ICRP Recommendations (1977) and the Revised IAEA Basic Standards for Radiation Protection. International Atomic Energy Agency, Viena, Austria.

Expresión de agradecimiento

Los autores expresan su reconocimiento al Sr. David Simpson, quien ha contribuido a redactar la versión más técnica de la presente memoria que se cita en las referencias.