

El control de las exposiciones probabilistas salva la distancia entre la protección radiológica y la seguridad

Examen de la evolución de los enfoques comunes de seguridad

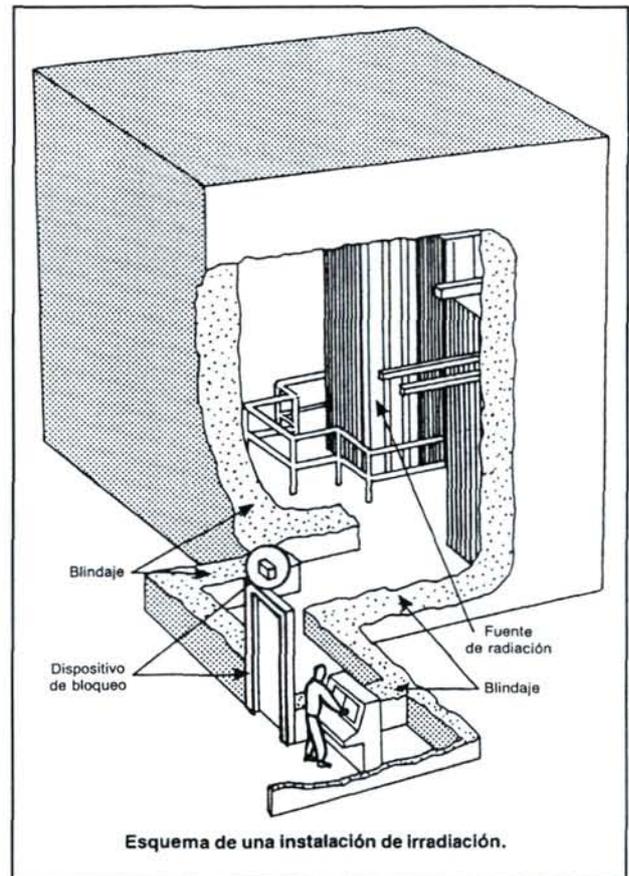
por A.J. González y G.A.M. Webb

El operador de la instalación de irradiación de alimentos se sentía seguro frente a la consola situada detrás de una gruesa pared de hormigón. Sabía que el blindaje le proporcionaba protección adecuada contra el haz radiactivo que la transpasaba; esa protección se regía por el "sistema de limitación de dosis" recomendado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR), y adoptado por la mayoría de las autoridades nacionales y organizaciones internacionales. Para aplicar el sistema de la CIPR se ha elaborado en todo el mundo un sinnúmero de normas, guías y recomendaciones. Sólo el OIEA había publicado más de 100 documentos de esa índole. El operador sabía que mediante la aplicación de estos reglamentos interrelacionados se respetaban universalmente los principios fundamentales del sistema de la CIPR.

No obstante, ni siquiera un sistema tan bien elaborado eliminaba todos los riesgos radiológicos potenciales. Basándose en diversas hipótesis de los efectos que podrían tener para la salud las dosis de radiación bajas recibidas a tasas de dosis bajas, el riesgo radiológico—calculado a partir de datos radioepidemiológicos de personas expuestas a dosis y tasas de dosis más bien elevadas—era del orden de 1 en 100 000 por milisievert de dosis recibida. La tasa de dosis fuera del blindaje era tal que la dosis que recibiría cualquier persona instalada permanentemente en el lugar sería de algunos milisievert a lo sumo. La exposición del propio operador era inferior. El año anterior, el operador había recibido una dosis acumulada de una fracción de un milisievert y, en consecuencia, su riesgo durante ese año fue menor de 1 en 100 000. El operador se daba cuenta de que el riesgo era despreciable, muy inferior a otros riesgos a que diariamente se exponía. El operador estaba satisfecho con sus condiciones de trabajo y confiaba en que el sistema de protección lo protegía adecuadamente de la fuente de radiación.

El Sr. González es Jefe de la Sección de Protección Radiológica de la División de Seguridad Nuclear del OIEA. El Sr. Webb es Secretario de la Junta Nacional Británica de Protección Radiológica. Las opiniones expresadas en el artículo son las de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las organizaciones a que pertenecen.

Mientras el operador observaba la consola, un centelleo luminoso le indicó que algo no funcionaba bien dentro del recinto de irradiación: el sistema que transportaba los alimentos se había bloqueado, y él tendría que penetrar en el recinto para repararlo. Siguiendo las instrucciones de operación que tenía por escrito, oprimió los controles para apagar la fuente, y sumergirla en la piscina que le servía de blindaje. El indicador de la consola le señaló que la operación se había realizado con éxito. Ya podía abrir la puerta del laberinto, entrar al recinto y proceder a la reparación. En ese momento, sin embargo, le asaltaron algunas dudas: ¿Estaba la fuente verdaderamente sumergida en la piscina?



¿Había funcionado el mecanismo correctamente, como estaba previsto? Aun cuando el sistema de parada hubiese fallado, el operador sabía que cuando abriera la puerta otro sistema de seguridad basado en un dispositivo de bloqueo conectado a la puerta apagaría la fuente de todas maneras. Pero, ¿y si ese sistema de seguridad también fallaba? Entonces, resultaría gravemente lesionado por la altísima exposición que recibiría... Se encogió de hombros. ¿Por qué preocuparse de algo tan poco probable? El operador entró confiado en el recinto. Después de todo, le habían dicho que los sistemas de seguridad eran de los más modernos y seguros, y que habían sido construidos conforme a estrictas normas técnicas. Era casi imposible que se produjera una sobreexposición accidental.

“Imposible” es una palabra que los científicos se niegan a emplear. Prefieren calificar la posibilidad de ocurrencia de los fenómenos atendiendo a su certidumbre (o incertidumbre) y medir esa certidumbre mediante la magnitud denominada “probabilidad”. Considere las dos situaciones de riesgo radiológico posibles descritas anteriormente: en una hay la *certidumbre* de que se producirá una *exposición*, con la consiguiente probabilidad de *daño radiológico*. En la otra, existe únicamente la *probabilidad* de una *exposición*, que, si realmente llega a producirse, puede acarrear una *certidumbre* de *daño radiológico*, según sea el nivel de la dosis. En ambas situaciones, es factible evaluar el riesgo radiológico*: mientras en el primer caso el riesgo es proporcional a la dosis, en el segundo es proporcional al producto de la probabilidad de exposición multiplicado por la dosis. Debería ser factible controlar el nivel de riesgo por medio de sistemas tecnológicos.** Por ejemplo, en la primera situación, el sistema de control es el blindaje contra la radiación, y el parámetro de control es el espesor del blindaje. En el segundo caso, el sistema de control es el dispositivo de bloqueo y el parámetro de control es su fiabilidad.

La disciplina denominada “protección radiológica” se ocupa, por lo general, del primer tipo de situación. El segundo tipo suele ser estudiado por expertos en materia de seguridad.

En el presente trabajo se describe la evolución de los enfoques comunes de seguridad que se aplican para abordar estos dos tipos de situaciones. Si se logra un enfoque común, coherente y consistente, existirá una vinculación equilibrada entre las disciplinas de la protección y de la seguridad radiológicas.

Situaciones que entrañan exposiciones radiológicas

Para pronosticar posibles escenarios de exposición radiológica se pueden considerar tres tipos de situaciones:

- situaciones previstas en que la exposición de las personas está planificada y se supone que ocurra con certeza (es decir, con una unidad de probabilidad, o muy cerca de esa unidad)

* La palabra riesgo se usa para denotar la probabilidad de que ocurran serios daños debidos a la exposición radiológica.

** “Controlar” equivale aquí a “moderar” límites y no a “comprobar” o “verificar”.

- situaciones que se pueden prever, pero de cuya ocurrencia no se tiene una certeza absoluta; de ocurrir, sin embargo, darían lugar a exposiciones

- situaciones (de facto) que pueden o no haberse previsto, pero que, de ocurrir, únicamente permiten la adopción de medidas correctoras.

La protección contra las radiaciones ionizantes suele basarse en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR). Si bien las recomendaciones no son específicas para los escenarios de exposición radiológica que abarcan, en la práctica, se han venido utilizando para el primer escenario y, en parte, para el tercero. Las recomendaciones de la CIPR se aplican fundamentalmente a *situaciones* que entrañan condiciones de *exposiciones radiológicas que se supone van a ocurrir con certeza*. En el presente artículo esta clase de exposiciones se denominarán “*ciertas*”; el término abarca, en general, las que en la práctica se denominan exposiciones “normales” y las resultantes de “incidentes operacionales de rutina”. En la práctica, las recomendaciones no se han usado para el segundo escenario, es decir, para las exposiciones en que la probabilidad de ocurrencia es menor de uno, las cuales se denominarán en este artículo exposiciones “probabilistas”.

Las normas nacionales e internacionales que aplican las recomendaciones de la CIPR han reconocido implícitamente este hecho.*

Política de protección contra las exposiciones “ciertas”

Para las exposiciones “ciertas”, la CIPR recomienda un sistema de limitación de dosis que incluye los siguientes requisitos interrelacionados**: a) no se adoptará ninguna práctica, a menos que su introducción produzca un beneficio neto positivo (o *justificación de la práctica*); b) todas las exposiciones se mantendrán al valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse teniendo en cuenta los factores económicos y sociales (u *optimización de la protección*); y c) la dosis equivalente para las personas no deberá sobrepasar los límites recomendados por la CIPR en las circunstancias pertinentes (o *limitación de la dosis individual*).

Vale la pena analizar estos tres principios básicos de la política que se aplica a las exposiciones “ciertas” en

* Por ejemplo, en las *Normas básicas de seguridad en materia de protección radiológica* del OIEA, la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN/OCDE) se reconocen “dos condiciones distintas de exposición, que son: 1) las condiciones en las cuales la ocurrencia de la exposición es previsible y puede ser limitada por control de la fuente y por aplicación del sistema de limitación de dosis... (condiciones normales de exposición); y 2) las condiciones en que la fuente de radiación no está sujeta a control, de modo que la magnitud de toda exposición resultante sólo puede limitarse, eventualmente, mediante medidas correctoras... (condiciones anormales de exposición)”. La condición 1) se aplica claramente a lo que en el presente trabajo se designa como situaciones que entrañan exposiciones “ciertas” y quizás en parte a situaciones previstas. La condición 2) se aplica a situaciones que han ocurrido. Las *Normas básicas de seguridad* se aplican en su totalidad a la condición 1), mientras que a la condición 2) solo se pueden extender algunas disposiciones generales.

** *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 26, *Annals of the ICRP*, Vol. 1, No. 3, Pergamon Press, Oxford (1977).

el marco de su posible extensión a las exposiciones "probabilistas".

Justificación de la práctica. En este requisito se especifica sencillamente que, para autorizar la introducción de una práctica de irradiación, es preciso que se prevean más beneficios que daños. Sin embargo, ni la CIPR ni otras organizaciones aún han analizado cabalmente sus consecuencias. Además, al traspasar el estrecho marco de la exposición "cierta" para abarcar el ámbito más amplio de la exposición "probabilista" la aplicación práctica del principio de la justificación se hace más complicada. Con algunos escenarios de probabilidad de ocurrencia puede ser muy escasa, pero si el escenario se hiciera realidad, las consecuencias podrían ser graves. No está claro cómo podrían incluirse situaciones como éstas en una evaluación de la justificación.

Optimización de la protección. La CIPR empleó este término para expresar sus intenciones de mantener todas las dosis al valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse (ALARA), teniendo en cuenta los factores económicos y sociales.* Lamentablemente, este sencillo requisito ha sido mal interpretado por muchos como un sinónimo del análisis costo-beneficio. Se ha señalado con toda claridad que para lograr la optimización no se requiere el empleo obligatorio de una técnica específica de ayuda a la adopción de decisiones, como el análisis costo-beneficio, y que la optimización responde a cualquier técnica adecuada, incluida la simple intuición y el sentido común.* Esta descripción más amplia de la optimización resulta esencial para extender los principios de la optimización más allá del limitado ámbito de las situaciones que entrañan exposiciones "ciertas".

Límites de la dosis individual. La CIPR recomienda estos límites para las exposiciones "ciertas" debidas a fuentes artificiales de radiación. Al establecer los límites, sin embargo, reconoció la posibilidad de que ocurrieran exposiciones "probabilistas". Si este escenario no se hubiera incluido, los valores numéricos de los límites habrían sido diferentes.

Como los límites de dosis se aplican a las personas y una sola persona puede estar expuesta a varias fuentes, tanto la CIPR como el OIEA han recomendado también la aplicación de *confines superiores*. El confín superior para una sola fuente se fija en alguna fracción del límite de dosis que se aplica respecto de la exposición total a todas las fuentes.

Exposiciones "probabilistas"

Como se dijo anteriormente, el sistema de limitación de dosis de la CIPR abarca todas las situaciones en las cuales se planifica la exposición de las personas a las radiaciones y se puede controlar la fuente. Aunque los principios son universales, no se pueden utilizar en su forma actual para controlar las fuentes que pueden o no originar exposiciones. En consecuencia, el sistema de la CIPR no es directamente aplicable a las exposiciones "probabilistas", aunque sus principios básicos se podrían desarrollar con miras a su uso. Para ello, el sistema tendría que basarse en el concepto de probabilidad y control de dosis y no únicamente en el control de la dosis.

* *Cost benefit analysis in the optimization of radiation protection*. ICRP Publicación 37, *Annals of the ICRP*, Vol. 10, No. 2/3, Pergamon Press, Oxford (1983).

En efecto, toda planificación relacionada con las fuentes de radiación abarca tanto exposiciones "ciertas" como exposiciones "probabilistas". La importancia relativa de estos dos modos de exposición puede variar enormemente según la fuente, pero, en principio, hay que considerar ambos para todas las fuentes. En una situación imaginaria, no siempre se hace evidente cómo hacer la distinción entre los dos modos, aunque no es tan difícil resolver el problema para una fuente en particular. Por ejemplo, una exposición de rutina puede obedecer a una serie de incidentes independientes; si esos incidentes son algo frecuentes, se podría tender a denominar la exposición como "cierta", mientras que si no son frecuentes, la exposición resultante podría incluirse en la categoría de "probabilista".

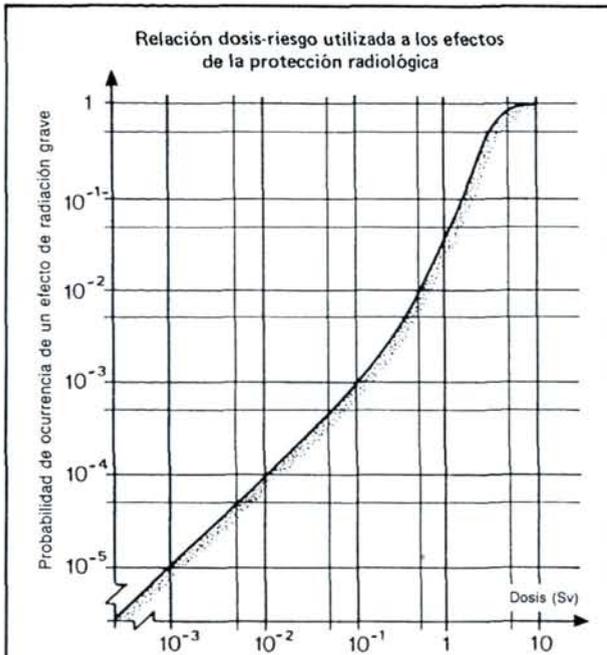
Desde el punto de vista de la seguridad, las magnitudes que caracterizan la fuente variarán según el escenario que se esté analizando. Para los escenarios que conllevan exposiciones "ciertas", la magnitud pertinente es la distribución de dosis, que suele caracterizarse tanto por la dosis impartida al individuo más expuesto como por la dosis colectiva recibida de la fuente. Estas magnitudes suelen ser suficientes para las dosis bajas previstas en una operación normal: se supone que la dosis incremental recibida por las personas produce un daño proporcional incremental y, por tanto, como la dosis individual es una medida del daño o del riesgo individual, la dosis colectiva se convierte en una medida del daño total previsto. Para las exposiciones "probabilistas", también se puede determinar la probabilidad del daño o el riesgo individual. Ello se logra combinando la probabilidad de ocurrencia de la dosis con la probabilidad de inducción de daño radiológico asignada a la dosis. Por consiguiente, también se podría definir la distribución probabilista de las consecuencias.

Progresos simultáneos en el control de las exposiciones "ciertas" y "probabilistas"

Algunos procedimientos para la evaluación y el control de las exposiciones "probabilistas" se han desarrollado paralelamente a los principios básicos de la protección radiológica y, hasta cierto punto, con independencia de éstos. Al nivel nacional se han definido los objetivos de la seguridad radiológica para algunas fuentes de "exposiciones probabilistas" —en particular para los reactores nucleares de potencia— y al parecer se está gestando un consenso internacional sobre algunos principios en materia de seguridad nuclear.* También han comenzado a evolucionar por separado los procedimientos de evaluación y control relacionados con la evacuación de desechos, aunque en la actualidad se trata de solucionar esta cuestión ampliando y desarrollando las recomendaciones básicas de la CIPR para que abarquen los problemas específicos de los desechos.** Se han formulado sugerencias con objeto de lograr un enfoque unificado respecto del control de todas estas esferas de interés, con principios comunes que permitan abordar,

* *Principios básicos de seguridad para centrales nucleares*, Vol. N° 75-INSAG-3, Colección Seguridad del OIEA, OIEA, Viena (1988).

** *Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive waste*, ICRP Publicación 46, *Annals of the ICRP*, Vol. 15, No. 5, Pergamon Press (1985).



La figura ilustra la relación dosis-riesgo utilizada a los efectos de la protección radiológica. Pueden reconocerse tres regiones, a saber; 1) A niveles de dosis inferiores a una pequeña fracción de un sievert, sólo se manifiestan efectos estocásticos, y la probabilidad de ocurrencia es directamente proporcional al nivel de dosis. Entre estos efectos se incluyen los casos de cáncer mortal en los individuos irradiados y los efectos genéticos graves en las generaciones sucesivas de descendientes del individuo irradiado. En este intervalo, se supone que a cualquier incremento de la dosis seguirá un incremento proporcional de la probabilidad de un efecto. Esta no es necesariamente una representación exacta de datos radiobiológicos, sino que debe considerarse como una simple hipótesis práctica a los efectos de la planificación, y no como un instrumento de evaluación aplicable a los individuos expuestos. Por tanto, se supone que en este intervalo la relación entre la probabilidad de daño y la dosis es lineal. Para los fines de la protección radiológica, se supone que la pendiente de la línea (es decir, el factor de riesgo en esta región) es en la actualidad de $1,6 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. La información radioepidemiológica más reciente sobre los sobrevivientes de la bomba atómica parece indicar que el factor de riesgo podría variar en el futuro. 2) En el caso de dosis de una fracción significativa de un sievert, recibidas en un período de tiempo corto, pueden manifestarse efectos no estocásticos. La relación dosis-riesgo es, aproximadamente, sigmoide. Al igual que en el intervalo estocástico, la forma exacta depende de varios factores, tales como la tasa de dosis, que podrían aplicarse para determinados escenarios de exposición. En el caso de una dosis de aproximadamente 3 Sv, la probabilidad de muerte es de un 0,5%. 3) Por último, se supone que para dosis que excedan de unos 5 a 10 Sv, aproximadamente, recibidas en un período de tiempo corto, prácticamente todos los individuos irradiados sufrirán un síndrome de radiación agudo que, a la larga, ocasionará su muerte. Por tanto, se supone que la relación se acerca asintóticamente a una probabilidad de unidad para dosis superiores a unos 5-10 Sv.

de manera armónica y coherente, la cuestión de las exposiciones radiológicas de rutina y potenciales. Por su parte, el OIEA ha elaborado recientemente un documento de consulta sobre la aplicación de los principios de la protección radiológica a las fuentes de exposición potencial, con la intención de ir aproximándose al logro de un enfoque unificado de la seguridad radiológica.*

* "The application of the principles of radiation protection to sources of potential exposure: Towards a unified approach to radiation safety" (a consultative document), OIEA, Viena (1988).

Bases para una política de seguridad radiológica

La base de una política de seguridad radiológica que abarque todos los escenarios con todas las condiciones de exposición, tanto ciertas como probabilistas, puede sustentarse en la relación que existe entre el riesgo y la dosis empleada a los fines de la protección radiológica, relación ésta que se funda en una serie de hipótesis radiobiológicas. En toda política de seguridad radiológica general se debe admitir cierta probabilidad de que las dosis sobrepasen los límites y los confines superiores y de que incluso entren en la región de las dosis en que puedan producirse efectos "no estocásticos" graves; de ahí la especial importancia de especificar estas hipótesis. Esa relación dosis-riesgo puede utilizarse como base de una política común de seguridad. (Véase la figura adjunta.)

Hacia una política convergente

Parece lógico centrar la atención en el concepto del límite de riesgo individual como requisito necesario, aunque no suficiente, para lograr un enfoque unificado de la seguridad radiológica en general y del control de las exposiciones probabilistas en particular. Resulta tentadora la idea de buscar cierta compatibilidad con el actual sistema de limitación de dosis y, por tanto, especificar un límite global para el riesgo de cualquier individuo, y abordar la cuestión de hasta qué grado debe aumentarse la seguridad por debajo de este límite mediante la ampliación del concepto de la optimización para que abarque el examen de todos los riesgos para la población expuesta. Todo esto es interesante desde el punto de vista conceptual, y las dos ideas de los límites individuales y de la optimización en el contexto de la exposición probabilista, se están desarrollando y perfeccionando.

No obstante, es necesario subrayar que los "riesgos para la sociedad" también han sido estudiados por los expertos en seguridad nuclear en función de los criterios expuestos como "límites de riesgo para la sociedad", u "objetivos en materia de riesgos para la sociedad".* Estos criterios sociales, que parecen quedar excluidos de la ampliación directa de los requisitos de limitación de dosis individuales y optimización, podrían sin embargo vincularse al requisito de la justificación, pero esa relación potencial no se analizará en este artículo.

Límites del riesgo individual

El actual límite de dosis de 1 milisievert (mSv) anual para los miembros del público recomendado por la CIPR equivale a un compromiso de riesgo de aproximadamente 10^{-5} y puede usarse como valor de referencia para formular un criterio de límite de riesgo individual. En el caso de las exposiciones de rutina por debajo del límite de dosis, los únicos efectos para la salud que hay que considerar son el cáncer y los efectos hereditarios. Si el límite de dosis se convierte en un límite de riesgo, se elimina la limitación de la dosis misma; por tanto, se deben tener en cuenta otros efectos para la salud como, por ejemplo, la muerte debida a la incorpo-

* Status, experience and future prospects for the development of probabilistic safety criteria, informe de una reunión de comité técnico celebrada en 1988, documento OIEA TECDOC (en preparación).

ración de altas dosis. En principio, no es necesario dar el mismo peso a todos los tipos de efectos para la salud; si, por ejemplo, se usara la pérdida de años-persona como una función de ponderación, entonces la muerte súbita debida a dosis elevadas tendría más peso que la muerte por cáncer después de un período de latencia. Pero, en aras de la sencillez, parece lógico en el contexto de los límites (no objetivos), considerar los efectos para la salud como si fueran igualmente graves, con lo que se hace posible definir un solo valor numérico como límite de riesgo aplicable a todos los sucesos de índole probabilista.

En consecuencia, para que las evaluaciones de seguridad radiológica relacionadas con el individuo fueran coherentes con las normas generales de seguridad de limitación de dosis, se ha propuesto un límite de riesgo anual de 10^{-5} . Este límite se aplicaría al riesgo individual de la persona más expuesta (excepto los pacientes) proveniente de todas las fuentes de exposición potencial (excepto las fuentes de radiación natural). Es importante saber que este límite de riesgo sería el límite inferior de la región de riesgo inaceptable; un riesgo por debajo de este límite no debería necesariamente considerarse aceptable.

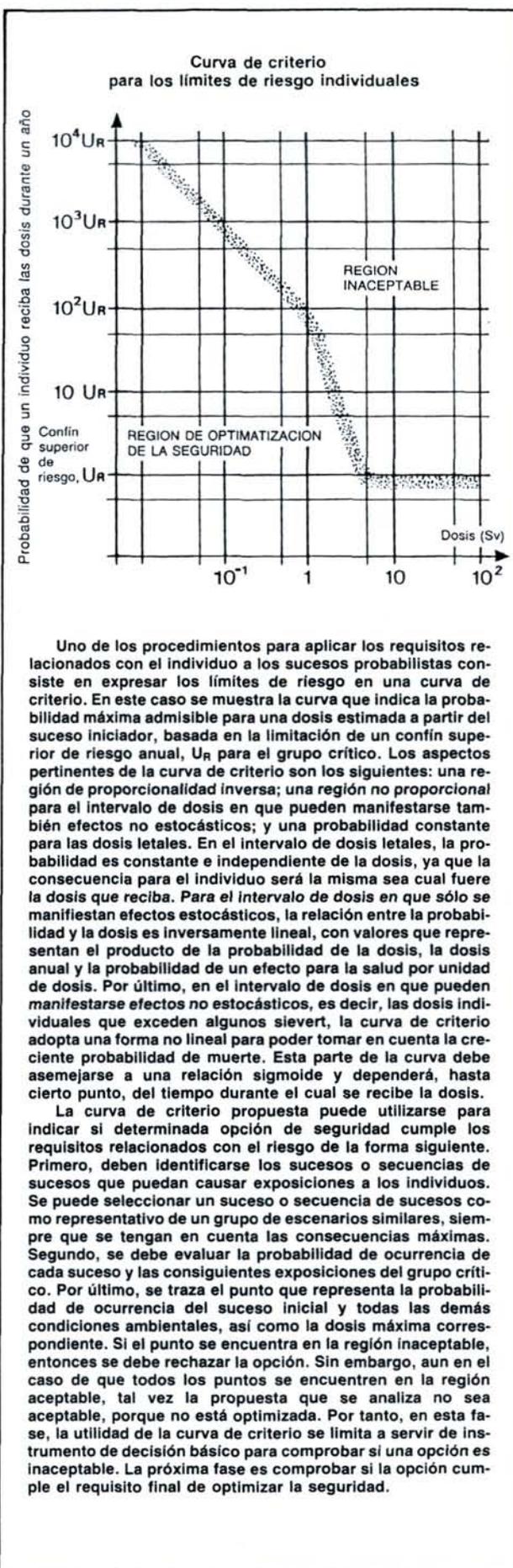
Como el individuo puede estar expuesto a riesgo debido a más de una fuente, además del límite de riesgo (referido a un individuo) tiene que haber un *confín superior de riesgo* relacionado con la fuente (o incluso un confín superior de riesgo relacionado con el escenario), que limite el riesgo individual proveniente de una sola fuente (o un solo escenario de exposición respectivamente). El *confín superior de riesgo* se toma del límite de riesgo (es decir, se selecciona como cierta fracción de este último) y puede depender de la fuente o del escenario que se esté analizando. Al diseñar y reglamentar una instalación determinada, se deberá usar un confín superior de riesgo, asignado a una fuente, de la misma manera que se emplean los confines superiores de dosis actuales. El método más sencillo de incorporar escenarios probabilistas a un sistema de protección radiológica basado en los riesgos consiste en determinar distintos confines superiores de riesgo para la exposición probabilista, mientras se mantiene el confín superior de dosis actual para las operaciones normales.

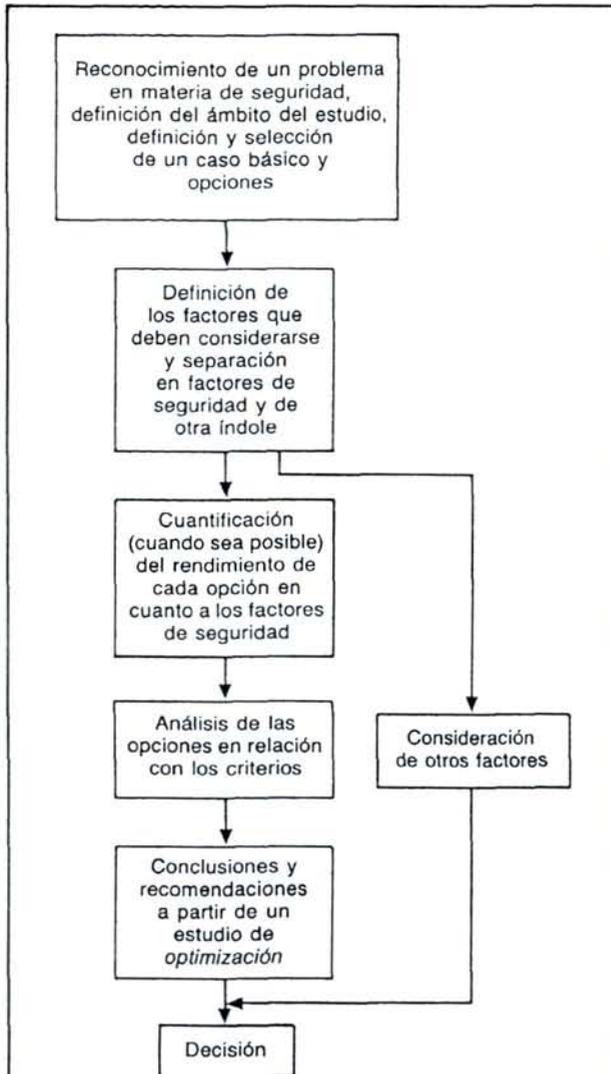
Según el confín superior de riesgo seleccionado, se puede formular una curva de criterio y limitar el riesgo individual para cada escenario como derivación directa de la relación riesgo-dosis.* (Como se mostró anteriormente en la figura sobre la relación riesgo-dosis.) (Véase también la figura adjunta en que se ilustra una curva de criterio.)

Optimización de la seguridad

Garantizar que ninguna persona quede expuesta a un riesgo de radiación indebidamente alto es condición necesaria, pero no suficiente, para lograr el nivel de seguridad apropiado de una fuente de radiación. Aún no se ha determinado si ese nivel se debe mejorar aún más habida cuenta, por ejemplo, de que tal vez un gran

* "The regulatory use of probabilistic safety analysis in Argentina", por A.J. González, en *Proceedings of the international meeting on thermal nuclear reactor safety*, Chicago, USA, NUREG/CP-0027, (1982).





Es importante adoptar un enfoque estructurado de optimización de la seguridad para cuidar de que no se pase por alto ningún aspecto significativo y registrar el análisis para que sirva de información y objeto de evaluación a otras personas. Los elementos esenciales de este enfoque estructurado pueden establecerse como se indica en este caso. La terminología utilizada es la siguiente: *opción de seguridad*: diseño específico o conjunto de procedimientos operacionales; *caso básico*: punto de partida para comenzar a evaluar los cambios; en un estudio de diseño, suele ser la opción menos costosa y, en el caso de las operaciones, el conjunto actual de procedimientos; *factor*: medida identificada del costo o del rendimiento de una opción; *factores de seguridad*: factores relacionados con el nivel de seguridad alcanzado. Entre éstos se incluyen aquellos factores que describen la distribución de los riesgos de radiación resultantes en cualquier forma, y aquellos factores que describen el costo y otras desventajas implícitas al modificar la distribución de los riesgos; *otros factores*: aquellos factores que se relacionan con el rendimiento o el costo de una opción o los describen, pero que no tienen que ver con el nivel de seguridad, como por ejemplo, los gastos en que se incurra únicamente para elevar la eficiencia del proceso, por motivos estéticos o de relaciones públicas, diferencias entre las opciones que expresan la probabilidad de que sean aceptadas por el público, medidas de la eficiencia del proceso como consideraciones en materia de resultados y planificación; *rendimiento de la opción*: resultados obtenidos con la aplicación de una opción de diseño o de un conjunto de procedimientos operacionales específicos; se expresa en términos tales como dosis resultante y probabilidades de ocurrencia; *criterio*: medida cuantitativa o cualitativa de lo que resulta aceptable o conveniente para uno o más factores. Esto constituye, por tanto, la base para comparar el rendimiento o el costo de una opción.

número de personas que se exponen a un bajo riesgo individual representen una expectativa de daño global inaceptablemente elevada.

En las situaciones de exposición "cierta" es necesario optimizar la protección radiológica aplicada a la fuente. Por lo general, este requisito se traduce en dosis individuales muy por debajo de sus límites. El concepto de optimización de la protección entraña la selección del nivel de protección más apropiado, tomando en cuenta una serie de factores, de los cuales los más importantes son: 1) el daño total que se ocasiona a la población expuesta, representado por la dosis colectiva, y 2) el costo de la protección. Sin embargo, se admite que pueden tenerse en cuenta otros factores, como la distribución de las dosis. Así, cabe pensar que en el proceso de optimización se emplea una técnica de ayuda para la adopción de decisiones. Dado que en la decisión final participan otros factores, algunos de los cuales no guardan ninguna relación con la protección radiológica, el resultado de la optimización puede considerarse como una contribución parcial a la decisión final.

Está claro que la evaluación total del daño previsto a partir de los escenarios de "exposición probabilista" incluye un examen del número de personas afectadas, la probabilidad y el nivel de dosis calculado para ellas, así como de todos los esfuerzos (incluido los costos) necesarios para aumentar la seguridad. Entre este aspecto y las ideas en torno a la optimización de la protección existe una relación lo suficientemente estrecha como para justificar que se examine la posibilidad de ampliar el concepto para que abarque un sistema basado en el riesgo.

Al ampliar este sistema, será muy útil centrar la atención en el concepto de la optimización como "ayuda a la adopción de decisiones" y ampliar el número de factores incorporados a fin de incluir la probabilidad y las consecuencias de las posibles exposiciones. Igualmente útil será considerar la optimización como un enfoque estructurado en el contexto de la adopción de decisiones. (Véase la figura adjunta.) Al ampliar el concepto de optimización quizás no sea conveniente basarse en la misma hipótesis sobre la equivalencia de los distintos tipos de efectos para la salud que se adoptó en aras de la sencillez para establecer los criterios de limitación de riesgos. En particular, tal vez sea mejor abordar por separado las consecuencias desde el punto de vista de los efectos no estocásticos, especialmente la muerte súbita, y de los efectos estocásticos.

La magnitud pertinente sugerida por la CIPR y aprobada por el OIEA para optimizar la protección contra las exposiciones "ciertas" es el "detrimento", definido como el valor del daño esperado para el grupo de personas afectadas por la fuente de radiación. En el caso de las exposiciones probabilistas, tal vez el uso del concepto de detrimento no sea preciso, como indica el ejemplo siguiente*: Consideremos una secuencia de accidente con una baja probabilidad de ocurrencia P y vastas consecuencias C en caso de que ocurra (y, por supuesto, ninguna consecuencia si no ocurre). El valor del daño esperado viene dado por el producto PC . Si P

* "Critical views on the application of some methods for evaluating accident probabilities and consequences", por D.J. Beninson y B. Lindell, *Current nuclear power plant safety issues*, OIEA (1980).

resulta muy baja y C muy vasta, el valor del detrimento será intermedio, lo cual, desde el punto de vista cuantitativo, no representa adecuadamente la situación, en que las consecuencias son nulas o de gran evergadura. Dicho de otro modo, la gran incertidumbre sobre la magnitud de las consecuencias no resulta evidente para el encargado de adoptar las decisiones y, por tanto, no puede incluirse en el proceso de adopción de decisiones. De ahí que el detrimento tal vez no sea una magnitud útil para evaluar las opciones en tales casos. Por tanto, en el caso de las exposiciones "probabilistas", las magnitudes a comparar deben incluir —además de los esfuerzos de seguridad— toda la distribución de probabilidades y consecuencias.

Además del problema que plantea determinar qué magnitudes se deben comparar, está el de cómo incluir en el proceso de comparación magnitudes o preferencias que no se expresan en unidades commensurables. Entre esas preferencias, que deben justificarse explícitamente, se incluye el grado de aversión al riesgo para los accidentes de consecuencias de gran magnitud, los costos sociales de las restricciones o de los inconvenientes, la morbilidad y mortalidad de los diversos tipos de efectos de las radiaciones, y la ponderación relativa (es decir, el grado de importancia relativa) de los efectos.

El problema que acarrea comparar magnitudes que no admiten comparación lineal directa puede abordarse mediante las funciones de utilidad y la teoría de decisión.* Las preferencias por diferentes tipos de magnitud se expresan mediante una función de utilidad que prescribe la forma en que deben combinarse los diferentes tipos de magnitud a los efectos de establecer una comparación. Así, las funciones de utilidad resultantes pueden luego combinarse mediante un mecanismo de ayuda para la adopción de decisiones a fin de obtener la "mejor opción en tales circunstancias" (es decir, la opción optimizada). Un grupo especial de la CIPR analiza el empleo de esta técnica de ayuda para la adopción de decisiones, que se ha descrito en líneas generales.**

Perspectivas: una política unificada; problemas pendientes de solución

En resumen, un sistema de limitación de riesgos basado en los principios de una optimización de la seguridad condicionada por los confines superiores de riesgo individual, conjuntamente con el actual sistema de limitación de dosis, pueden conformar la base para una política unificada de seguridad radiológica.

Ahora bien, para aplicar con éxito dicha política, quedan por resolver algunos problemas prácticos que

deben ser investigados más a fondo, entre ellos los siguientes:

- *El análisis probabilista de la seguridad entraña muchas incertidumbres.* La consiguiente falta de confianza en el resultado deberá reflejarse en el grado de cautela que se muestre al establecer el objetivo de seguridad pertinente o al comparar resultados con objetivos. Por ejemplo, el uso de límites de riesgo o confines superiores como objetivo de seguridad más que como restricción aplicable al objetivo puede presentar dificultades en este contexto. Por tanto, debe quedar claro que los límites de riesgo y los confines superiores no pueden interpretarse ni como objetivos ni como metas, sino más bien como la frontera de una región prohibida; y que deben formularse con la cautela necesaria para poder afrontar las incertidumbres previstas.

- Actualmente, no hay *instrumentos normalizados disponibles* para realizar evaluaciones probabilistas. Si la metodología y las condiciones límite para el análisis no se especifican con suficiente detalle, es posible que de una misma situación se obtengan resultados muy distintos. Esto podría acarrear el inconveniente de que dos análisis diferentes de una misma situación pudiesen denotar el cumplimiento o no cumplimiento de determinada restricción aplicable al riesgo. Tal parece que la solución de este problema radica en la elaboración de procedimientos normalizados de evaluación probabilista de la seguridad y su incorporación a los reglamentos pertinentes. Sin embargo, esto iría contra los principios en que basan su reglamentación algunos países que adoptan un enfoque no perceptivo.

- Otro problema es el de la *mensurabilidad y cuantificabilidad del riesgo*. En el caso de las exposiciones "ciertas", la "dosis equivalente efectiva" se utiliza como medida indirecta del riesgo en que incurren las personas expuestas. No obstante, tal magnitud es "medible" por medio de otras magnitudes físicas afines y diversos supuestos e hipótesis, y por ende, puede incluirse en los regitros pertinentes con carácter jurídico. Para las exposiciones probabilistas la situación es muy diferente: la dosis equivalente efectiva en que se ha de incurrir de producirse la exposición no mide el riesgo (ya que existe la posibilidad de que la exposición no ocurra) y no existe ninguna otra magnitud "medible" y "cuantificable". La fiabilidad de los sistemas de seguridad, la consiguiente probabilidad de exposición o la combinación de la probabilidad y la dosis, no pueden "medirse" desde el punto de vista práctico; y, como es probable que no se acepten como magnitudes a los fines del registro, la conformidad *a posteriori* no podría "demostrarse" legalmente. Es probable que existan formas de solucionar esta cuestión jurídica, pero aún no se han explorado.

En vista de estos problemas, algunos expertos en materia de seguridad han expresado cautela en cuanto a la aplicación de un sistema de limitación de riesgos en las centrales nucleares y prefieren centrar su atención en objetivos probabilistas generales. Otros expertos consideran que, pese a las dificultades prácticas que existen, debe alentarse el establecimiento de un marco conceptual básico para la limitación del riesgo, opinión ésta que, a juicio nuestro, brinda perspectivas de éxito cuyo logro valdría la pena procurar.

* Véanse dos trabajos de D.J. Beninson: "Optimization of radiation protection as a special case of decision theory", "Optimization of Radiation Protection", OIEA, Viena (1986); y "Application of radiation protection optimization principles to potential exposures from accidents", *Nuclear power performance and safety*, Vol. 4, OIEA, Viena (1986).

** "Decision-aiding techniques for radiological protection", por G.A.M. Webb y J. Lombard en *Radiation protection in nuclear energy*, actas de la conferencia del OIEA celebrada en Sidney en abril de 1988 (de próxima publicación).

