

Evaluación probabilista de la seguridad: Un interés creciente

La evaluación probabilista de la seguridad (EPS) se ha desarrollado hasta convertirse en un instrumento útil para la seguridad de los reactores

por Luis Lederman

La metodología probabilista para la evaluación de la fiabilidad y la seguridad está atrayendo actualmente mucha atención en la energía nuclear y otras esferas. Sin embargo, lejos de ser una idea nueva, data por lo menos de principios del decenio de 1940, cuando se propusieron por primera vez requisitos cuantitativos probabilistas de seguridad para la industria aeronáutica. Entonces, el término probabilista significaba que sólo se podría producir un accidente de aviación por cada 100 000 horas de vuelo.

En 1942, cuando se estudió el elevado porcentaje de fracasos del programa alemán de cohetes V-2, se introdujo el concepto de dependencia entre las partes de un sistema, lo que representó un paso de avance ante la opinión prevaleciente de que la calidad de un sistema estaba dada por su eslabón más débil. Así se inició el método de análisis lógico e integrado de sistemas. Durante los dos decenios siguientes se perfeccionaron y ampliaron los conceptos iniciales, incluida la creación de modelos estadísticos para analizar los fallos de los componentes y la teoría de la fiabilidad.

En 1960 se lograron nuevos avances con la aplicación del análisis lógico al programa Apolo de la National Aeronautics and Space Agency (NASA) de los Estados Unidos de América. Se introdujo entonces un importante método denominado "análisis de criticidad y efecto de la modalidad de fallo". En 1962 los laboratorios de la Bell Telephone de los Estados Unidos utilizaron la técnica de árboles de fallos en un estudio para la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de América sobre la fiabilidad del lanzamiento y el control de cohetes Minuteman. En la esfera nucleoelectrica el Sr. F.R. Farmer, del Reino Unido, propuso en 1967 por primera vez fijar un límite para las emisiones accidentales de yodo, en términos de probabilidades de tales incidentes.

Uno de los primeros informes sobre la aplicación de la metodología probabilista a la seguridad de los reactores nucleares fue el WASH-1400, más conocido por Estudio sobre la Seguridad de los Reactores. Publicado en 1975, este estudio analizó dos reactores de agua ligera (un reactor de agua a presión y otro de agua en ebullición) en cuanto a las probabilidades y consecuencias de posibles accidentes.

El estudio se realizó unos 18 años después del primer intento de analizar las consecuencias de posibles accidentes catastróficos en centrales nucleoelectricas, que

se denominó WASH-740. En este caso se preveían etapas progresivas de accidentes nucleares en una central nucleoelectrica, sobre la base de probabilidades y consecuencias calculadas fuera del emplazamiento. Empero, los resultados no tuvieron uso práctico por carecerse de información acerca de los datos del diseño y conocerse muy poco acerca de los métodos necesarios para un análisis de ese tipo.

No ocurrió lo mismo con el WASH-1400, que sí tuvo repercusiones. Su objetivo era responder tres interrogantes básicas formuladas en una evaluación probabilista de la seguridad:

- ¿Qué puede funcionar mal?
- ¿Con qué frecuencia?
- ¿Cuáles son las consecuencias?

El WASH-1400 aplicó métodos recién creados de análisis de fiabilidad, datos disponibles de las industrias nucleares y no nucleares, modelos estadísticos y los conocimientos existentes acerca de la fenomenología de la degradación del núcleo, la fuga de radionucleidos y las consecuencias fuera del emplazamiento. También se abordaron los errores humanos, los fallos por causas comunes y la propagación de las incertidumbres, pese a la limitada comprensión que existía al respecto.

Lamentablemente, la complejidad del estudio y las dificultades para informar los resultados se combinaron y redujeron sus posibilidades para evaluar la seguridad del reactor. En realidad el informe fue mal interpretado, principalmente como resultado de un análisis llamado Informe Lewis, que estuvo a cargo de un grupo de examen formado por la Comisión de Reglamentación Nuclear de los Estados Unidos de América (CRN). En consecuencia, las técnicas probabilistas fueron objeto de muchas controversias.

El accidente de Three Mile Island (TMI), ocurrido en 1979, cambió drásticamente el panorama. Los grupos de estudio creados a raíz del accidente, en especial la Comisión Kemeny, instaron a que se hiciera mayor hincapié en las técnicas probabilistas. La Comisión Kemeny observó en su informe que "se deberían iniciar estudios a fondo constantes sobre las probabilidades y consecuencias (en el emplazamiento y fuera de él) de los accidentes en las centrales nucleoelectricas, incluidas las consecuencias de la fusión", como parte del programa formal de garantía de seguridad.

Además, cuando se comprobó que el estudio WASH-1400 había previsto secuencias similares a las que condujeron al accidente de TMI, el uso de la metodología probabilista en seguridad nuclear adquirió una nueva dimensión.

El Sr. Lederman es funcionario de la División de Seguridad Nuclear del Organismo.

Estudios de APR realizados hasta la fecha

Hoy en día, diez años después de la publicación del WASH-1400 y seis años después de TMI, la técnica probabilista está madurando y es un provechoso instrumento para evaluar la seguridad de los reactores. Siglas como APR (análisis probabilista de riesgo), EPS (evaluación probabilista de la seguridad), RSSMAP (aplicación de la metodología de estudio sobre la seguridad de los reactores), IREP (programa de evaluación de la fiabilidad transitoria) y el NREP (programa nacional de evaluación de la fiabilidad), se han integrado a la jerga común de la esfera de la seguridad nuclear.

Ya se han realizado muchos estudios de EPS en varios países y otros están en curso. (El OIEA ha definido el EPS como la aplicación adecuada de los métodos de análisis probabilista de riesgo a las decisiones de seguridad nuclear.) En el cuadro adjunto se muestran los resultados de algunos de ellos.

Algunos estudios han sido auspiciados por organizaciones gubernamentales, como en el caso del WASH-1400 en los Estados Unidos de América y del Estudio Alemán sobre Riesgos en la República Federal de Alemania. Muchos otros fueron realizados totalmente por la industria o como empresas mixtas.

Una parte de estos estudios respondió a la necesidad de ampliar el alcance y el valor del Estudio sobre la seguridad de los reactores que condujo a la RSSMAP. Otros estudios se realizaron como investigaciones específicas de centrales (por ejemplo, los del IREP y el NREP). Las compañías eléctricas también han iniciado estudios auspiciados por industrias debido a

necesidades de reajuste, como un medio para capacitar el personal de explotación y evaluar los riesgos que tienen para el público las instalaciones en explotación situadas en zonas cercanas densamente pobladas. En los Estados Unidos de América, el estudio de Big Rock Point es un ejemplo del primer objetivo mencionado, mientras que los estudios de Zion e Indian Point son ejemplos del segundo.

Si bien en la mayoría de los países la realización de la EPS no es parte integrante del proceso de concesión de licencias, normalmente los estudios terminados se someten a las autoridades reglamentadoras para su análisis y la experiencia así adquirida se está empleando para apoyar las decisiones de seguridad. El estudio Limerick, realizado en 1982, fue el primero auspiciado por una industria en los Estados Unidos de América en respuesta a un requisito concreto de licencia. Más recientemente se presentó un APR a la CRN de los Estados Unidos de América como parte del General Electric Standard Plant Safety Analysis Report (GESSAR-II).

Énfasis en los resultados prácticos

En varias reuniones recientes se han destacado las tendencias actuales de la EPS. En la reunión internacional de la American Nuclear Society (ANS) y la European Nuclear Society (ENS) sobre Métodos y Aplicaciones Probabilistas de Seguridad (celebrada en San Francisco el pasado mes de marzo), se hizo mucho hincapié en las aplicaciones prácticas y las ventajas reales de los estudios de EPS. Las reuniones previas al

Resultados de los estudios de APR – Frecuencia de fusión del núcleo

Central	Capacidad de generación (MW(e))	Tipo. Proveedor del sistema nuclear de suministro de vapor	Fecha del programa	Probabilidad de fusión del núcleo (por año)
Arkansas-1	836	PWR, B&W	IREP. 1981	5×10^{-5}
Biblis B	1240	PWR, KWU	DRS. 1978	$4 \times 10^{-5*}$
Big Rock Point	71	BWR, GE	Servicio público. 1981	1×10^{-3}
Browns Ferry-1	1065	BWR, GE	IREP. 1981	2×10^{-4}
Calvert Cliffs-1	845	PWR, CE	RSSMAP. 1982	2×10^{-3}
Crystal River-3	797	PWR, B&W	IREP. 1980	4×10^{-4}
Grand Gulf-1	1250	BWR, GE	RSSMAP. 1981	4×10^{-5}
Indian Point-2	873	PWR, W	Servicio público. 1982	$4 \times 10^{-4*}$
Indian Point-3	965	PWR, W	Servicio público. 1982	$9 \times 10^{-5*}$
Limerick	1055	BWR, GE	Servicio público. 1982	$3 \times 10^{-5*}$
Millstone-1	652	BWR, GE	IREP. 1982	3×10^{-4}
Millstone-3	1150	PWR, W	Servicio público. 1983	1×10^{-4}
Oconee-3	860	PWR, B&W	RSSMAP. 1980	8×10^{-5}
Peach Bottom-2	1065	BWR, GE	WASH-1400. 1975	$3 \times 10^{-5*}$
Ringhals-2	800	PWR, W	SSPB. 1983	4×10^{-6}
Seabrook	1150	PWR, W	Servicio público. 1983	2×10^{-4}
Sequoyah-1	1148	PWR, W	RSSMAP. 1981	6×10^{-5}
Shoreham	819	BWR, GE	Servicio público. 1983	4×10^{-5}
Sizewell B	1200	PWR, W	CEGR. 1982	1×10^{-6}
Surry-1	788	PWR, W	WASH-1400. 1975	$6 \times 10^{-5*}$
Yankee Rowe	175	PWR, W	Servicio público. 1982	2×10^{-6}
Zion	1040	PWR, W	Servicio público. 1981	$7 \times 10^{-5*}$

Nota: En el cuadro se incluye la participación de sucesos externos cuando corresponde. La comparación de los valores contenidos en la lista debe hacerse con suma cautela ya que se han empleado modelos, supuestos y grados de complejidad diversos.

* Las cifras que aparecen con asterisco representan el valor de la mediana; de lo contrario se trata de estimaciones puntuales.

Fuente: *Risk Analysis*, Vol. 4 (diciembre de 1984).

respecto se habían centrado principalmente en la metodología. A continuación se ofrecen algunos aspectos destacados de algunos de los 190 documentos presentados.

Objetivos de seguridad

En los Estados Unidos de América y Europa se ha analizado la aplicación de los objetivos de seguridad. La CRN de los Estados Unidos de América aplica medidas de evaluación desde 1983, y en una declaración de política concluye que los objetivos de seguridad pueden utilizarse en el proceso de reglamentación para aumentar los métodos tradicionales de análisis de seguridad. No obstante, la declaración advierte que no se deben utilizar en un contexto reglamentador de criterios estrictos de aceptación o no aceptación. Los primeros resultados de un grupo especial organizado en Europa en 1983 para analizar esa cuestión son aún más prudentes. Los objetivos de seguridad relacionados con el análisis de riesgos pueden brindar directrices para el proceso de reglamentación, pero aún no está claro cómo será su aplicación en este sentido.

Mejora de las bases de datos

En varios documentos de la reunión de la ANS y la ENS se analizaron las principales bases de datos de los Estados Unidos pertinentes a los estudios de EPS y se informó una situación muy alentadora, especialmente en comparación con la situación de falta de datos que presentaba la industria cuando se realizó el WASH-1400.

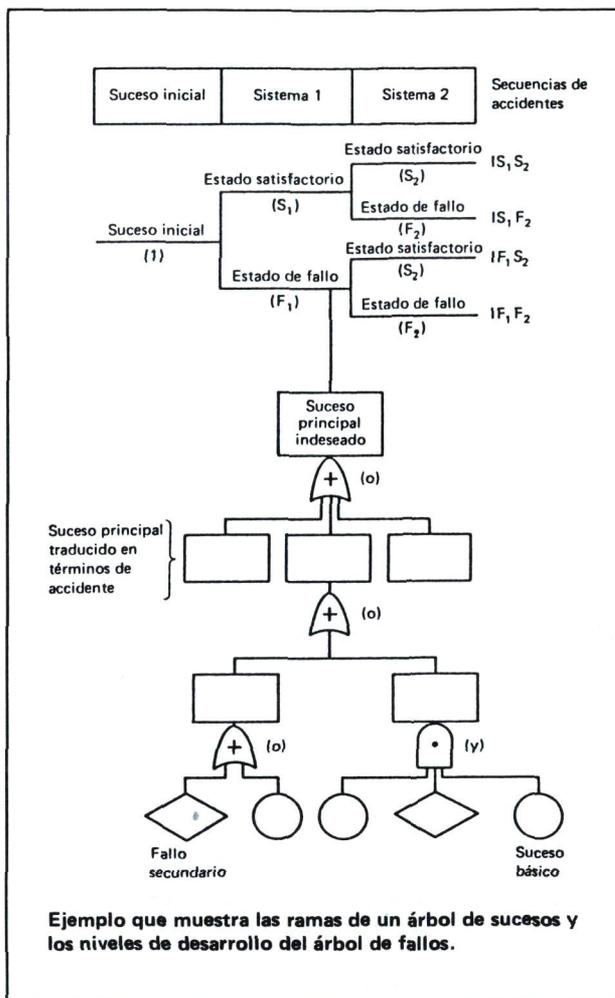
Se observó el gran avance experimentado por la base de datos (Std. 500 1984) del Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) hasta convertirse en una norma para el análisis del riesgo y la fiabilidad de las centrales nucleoelectricas. La ampliación y reestructuración significativas del Nuclear Plant Reliability Data System (NPRDS), operado por el Institute of Nuclear Power Operations (INPO) desde 1983, indican que en el futuro puede convertirse en una importante base de datos. Abarcará datos de todas las centrales nucleoelectricas en funcionamiento de una manera coherente y global, y ofrecerá acceso directo para la entrada y recuperación de datos.

También se analizó el European Reliability Data Bank, sistema centralizado que acopia y organiza información relativa al funcionamiento de los reactores de agua ligera. Se destacó el papel cada vez mayor que pueden desempeñar las técnicas de inteligencia artificial —como el lenguaje natural, el sistema “experto” y la lógica vaga— para mejorar las capacidades futuras de los cuatro bancos de datos que componen el sistema: el banco de datos de sucesos con los componentes, el informe de la situación de la unidad en funcionamiento, el sistema de información de incidentes anormales y el banco de datos de parámetros de confiabilidad.

Se describió el programa de acopio y análisis de datos sobre errores humanos, emprendido conjuntamente desde 1962 por *Electricité de France* e INPO. Entre los principales aspectos informados figuraron los factores cognoscitivos en los fallos humanos, los momentos en que se producen estos fallos, el lugar, el tiempo transcurrido entre el fallo y su detección, y las características de las tareas que conducen a fallos.

Aplicaciones: informes positivos

Se presentaron informes extremadamente positivos sobre las aplicaciones del EPS efectuadas por la industria



Ejemplo que muestra las ramas de un árbol de sucesos y los niveles de desarrollo del árbol de fallos.

y los órganos reglamentadores. Las compañías eléctricas informaron sus capacidades establecidas para cumplir, emplear y mantener modelos de EPS para sus centrales. El empleo de las EPS en la gestión de la seguridad, y como elemento de decisión en las esferas de ingeniería y operaciones, se considera parte de un “programa integrado dinámico” de las modificaciones de la central y las asignaciones presupuestarias.

Entre otras aplicaciones reglamentadoras concretas, se informó acerca de un análisis probabilista del choque térmico a presión que está ayudando a la CRN de los Estados Unidos de América y a la industria a resolver este problema. En particular el análisis ayuda a determinar secuencias importantes conducentes a fisuras que abren las paredes, y ayuda a definir las medidas de explotación y control.

Soporte lógico, directrices y recursos de la EPS

Mucho se ha logrado en la esfera del perfeccionamiento de la metodología de la EPS desde que se publicó el WASH-1400. Se ha seguido trabajando en las zonas débiles identificadas en el Informe Lewis. Entre éstas se encuentran el análisis de la fiabilidad humana; identificación y tratamiento de incertidumbres debidas a los parámetros; elaboración de modelos e integridad; y acopio de datos y tratamiento necesario para respaldar los estudios de EPS.

En la esfera de los códigos de computadora se dispone de una gran variedad de códigos para evaluar cuantitativamente grandes árboles de fallos y árboles de

sucesos, para ayudar a identificar los fallos producidos por causas comunes, y para analizar la propagación de incertidumbres. Se han creado o se están creando otros códigos para abordar la fenomenología de la degradación del núcleo, el comportamiento de la contención, y las consecuencias fuera del emplazamiento. También se ha brindado mucha atención a esferas no contempladas en el WASH-1400, en particular al análisis de riesgos de incendio y al tratamiento de sucesos externos que provocan accidentes. En esta última categoría diversos estudios han mostrado que los sucesos sísmicos constituyen el riesgo predominante.

La disponibilidad de literatura relativa a la EPS ha cobrado un auge súbito en los últimos años. Aparte de informes pormenorizados al respecto publicados con la descripción de la metodología y los resultados obtenidos, los órganos reglamentadores y los laboratorios nacionales han editado numerosos informes mucho más especializados.

En varias guías figuran procedimientos documentados para llevar a cabo una EPS. En enero de 1983 se publicó en los Estados Unidos de América la guía del IREP. Paralelamente, la CRN de los Estados Unidos de América, el Electric Power Research Institute (EPRI), el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y la American Nuclear Society (ANS) emprendieron una labor más amplia y editaron la *PRA Procedures Guide*. Esta última es un compendio de métodos reconocidos para realizar una EPS; define niveles de estudios de EPS que actualmente están ampliamente referenciados, a saber, el *nivel 1*, que incluye análisis de sistemas que conducen a la evaluación de la frecuencia de fusión del núcleo; el *nivel 2*, que incluye análisis de contención que conducen a emisiones; y el *nivel 3*, que brinda un análisis integral de los riesgos públicos en virtud de la inclusión de consecuencias fuera del emplazamiento.

Perspectivas y posibilidades

Los usos actuales de la EPS en la seguridad de los reactores ha servido para desarrollar las enormes posibilidades de estas técnicas, en particular para estudiar problemas técnicos en situaciones en que no basta el método puramente determinista. En la medida en que se adquiera mayor experiencia con los estudios de EPS, es probable que tanto las compañías eléctricas como las autoridades reglamentadoras hagan mayor hincapié en las técnicas de EPS.

A continuación se señalan algunas esferas especiales de utilización de la EPS, a saber, identificación de sistemas y componentes importantes para la seguridad; evaluación de requisitos técnicos, incluidas las condiciones que limitan la explotación (LCO); actualización de los elementos técnicos, incluido el análisis costo/beneficio; capacitación del explotador, el personal de la central y los reglamentadores; evaluación de diseños, incluidos los fallos por causas comunes y los errores humanos; identificación, evaluación y clasificación de los aspectos de seguridad; planificación del estado de preparación para situaciones de emergencia; distribución de las actividades de inspección; gestión de accidentes; simulación de escenarios de accidente; política de ensayos, mantenimiento y reparación; observancia de los valores propuestos; y gestión del riesgo.

Además, las organizaciones industriales y estatales realizan actualmente distintos programas de investigación para resolver los problemas que plantea la utilización de la EPS. Entre los aspectos que se abordan están la identificación y el tratamiento de las incertidumbres; el considerable grado de juicio que entrañan casi todos los aspectos de la evaluación de la fiabilidad humana; el desacuerdo respecto de la frecuencia de los fallos de causa común y los medios aceptados de análisis; el desarrollo metodológico que se requiere para analizar las interacciones entre los sistemas; las grandes incertidumbres que se asocian al cálculo de los riesgos de origen externo; y la caracterización de las incertidumbres de los términos fuentes.

Los problemas políticos y psicológicos relacionados con el nivel general de riesgo aceptable han ejercido una marcada influencia en el desarrollo de criterios generales para la concesión de licencias, en particular, en el uso polémico de los objetivos de seguridad. Afortunadamente, la mayoría de las aplicaciones de la EPS no dependen del resultado de los debates en curso y, por consiguiente, la seguridad de los reactores puede seguir aprovechando sus ventajas.

Debe pues señalarse, en resumen, que la EPS no es una forma de presentar los conocimientos existentes en un marco probabilista. Es más bien un instrumento técnico de investigación, reconocido y eficaz para la seguridad de los reactores, que permite comprender, mejor que por otros medios, los aspectos relacionados con la seguridad.

Actividades del Organismo relacionadas con la EPS

Los programas del OIEA en este campo se centran en tres aspectos distintos:

- La tendencia a pasar de la estimación de los riesgos generales a la identificación de las secuencias de accidentes dominantes, a los análisis de fiabilidad de los sistemas de importancia para la seguridad
- El inicio de programas de EPS en muchos Estados Miembros
- Actividades de EPS en la adopción de decisiones

En este contexto, recientemente se inició un programa interregional con el objetivo de coordinar las actividades de capacitación en curso y crear equipos capaces de realizar evaluaciones probabilistas de seguridad dentro del marco de las autoridades nucleares reglamentadoras de los Estados Miembros en desarrollo.

Otras actividades incluyen:

- *Preparación de informes técnicos.* Se están preparando informes técnicos en los campos de la EPS y la experiencia de explotación; el estado actual y las perspectivas futuras para el desarrollo de objetivos de seguridad cuantitativos;

la identificación de las secuencias de fallos que pueden ocurrir como resultado de fallos humanos; y la EPS de los sistemas técnicos de seguridad.

Se espera que un documento sobre la utilización y aplicación de la EPS en las decisiones de seguridad que está en preparación llene una importante laguna en este campo. Específicamente, contribuirá a normalizar los métodos, aplicaciones e interpretaciones de los resultados de la EPS.

- *Proyectos de investigación.* En 1982 se inició un proyecto coordinado de investigación en el que participan 17 países, para elaborar criterios sobre los riesgos relacionados con el ciclo del combustible nuclear.

- *Capacitación y apoyo.* El OIEA está organizando un curso corto para atender las necesidades de los administradores que se proponen incorporar un grupo de EPS en sus actividades. Ya se está ofreciendo un curso anual de siete semanas para analistas, cuyo objetivo es dar orientaciones sobre la realización de la EPS y el uso correcto de los resultados. También se están aplicando en Viena, para uso de los Estados Miembros, códigos de computadora destinados a aplicaciones de la EPS.