Volver

Matriz de vulnerabilidad difusa

Barón, J.H. y Rivera, S.S.

Presentado en: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – XX CILAMCE
San Pablo, Brasil, 3-7 noviembre 1999

MATRIZ DE VULNERABILIDAD DIFUSA

Barón, J.H. (*) (**) y Rivera, S.S.(**)

(*) Autoridad Regulatoria Nuclear

(**) Instituto de Capacitación Especial y Desarrollo de Ingeniería Asistida por Computadora
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Cuyo

Argentina

Palabras Claves: Análisis Probabilístico de Seguridad, Juicio de Expertos, Matriz de Vulnerabilidad, Lógica Difusa

RESUMEN

En la evaluación de un Análisis Probabilístico de Seguridad para una central nuclear, durante el cálculo de los Árboles de Eventos de Contención, se utiliza la denominada Matriz de Vulnerabilidad. Esta matriz, se forma a partir de lo que se denomina Categoría Numérica para Juicios de Ingeniería. Hasta el momento, la matriz de vulnerabilidad se conforma, a criterio del experto, adoptando un valor numérico bajo el concepto de la teoría de conjuntos (aritmética tradicional). Es evidente que es mucho más adecuado representar esta matriz mediante números difusos, ya que las Categorías Numéricas para Juicios de Ingeniería pueden representarse a través de variables lingüísticas tales como Altamente Probable, Probable, Imposible, etc.

Se presenta en este trabajo la metodología para obtener la Matriz de Vulnerabilidad Difusa a partir de las recomendaciones sobre Categoría Numérica para Juicios de Ingeniería[1].

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de un Análisis Probabilístico de Seguridad, aplicado a una central nuclear en etapa de diseño, es evaluar en forma preliminar el riesgo al público producido por su operación. La evaluación del riesgo específico de una planta provee tanto una medida del riesgo de un accidente potencial para el público, como una visión cercana sobre el diseño y operación de la planta, y una clasificación de los componentes con mayor contribución al riesgo.

El estudio comienza con una lista de eventos iniciantes postulados obtenidos mediante la identificación de las fuentes radiactivas existentes en la central, y de los posibles mecanismos que pueden permitir su liberación. Con base a los eventos iniciantes postulados y considerando su potencial de causar efectos significativos en el público se seleccionan y definen los eventos, calculándose sus probabilidades de ocurrencia.

Las funciones de los sistemas de seguridad y las acciones de recuperación constituyen las cabeceras de los árboles de eventos. El siguiente paso es desarrollar cualitativamente los árboles de eventos; los cuales se construyen después de analizar la sucesión de acciones que ocurren durante la evolución de las secuencias accidentales hipotéticas, debido a la ocurrencia del evento iniciante postulado.

A fin de cuantificar los árboles de eventos, se calculan las probabilidades de falla de las acciones de los sistemas y de las acciones humanas que constituyen las cabeceras de los árboles de eventos. Con estos valores de probabilidad y las probabilidades de ocurrencia de los eventos iniciantes se cuantifican las secuencias de accidentes eligiendo aquellas con probabilidad de ocurrencia significativas y seleccionando por lo tanto los estados finales correspondientes.

A continuación los estados de planta son definidos cualitativamente, las secuencias se analizan, se los agrupa entre sí y luego se los asocia a un estado de planta dado. Esos estados de planta caracterizan aquellas secuencias accidentales que producen un daño significativo a las barreras que separan los productos radiactivos del público, y servirán para estimar los términos fuente asociados. Se consideran aquellas secuencias accidentales representativas según su probabilidad anual de ocurrencia. Dichas secuencias se agrupan en estados de planta similares. A continuación se construyen los árboles de eventos de contención propios de cada estado de planta, considerando la posible respuesta de la contención ante las cargas derivadas del estado de planta, y el momento en que dichas cargas tienen lugar.

La siguiente tarea es calcular las dosis individuales en el público, correspondientes a cada estado de planta combinado con cada modo de falla de contención. Finalmente teniendo en cuenta los resultados de las etapas previas se definen las llamadas categorías de liberación, sus probabilidades de ocurrencia anual y las consecuencias radiológicas asociadas.

2. ÁRBOLES DE EVENTOS DE CONTENCIÓN

La estimación de cada estado de contención, a partir de las condiciones de cada estado de planta, se hace por juicio de ingeniería basándose en las condiciones particulares de cada planta. Dicho juicio de ingeniería está sustentado por una base de conocimiento muy amplia de experimentos realizados a pequeña escala, experimentos de efectos separados, simulaciones por computadora mediante modelos físicos y extrapolaciones justificadas de otras instalaciones similares. Dada la complejidad de la fenomenología asociada, de las interacciones entre distintos fenómenos, y la imposibilidad de hacer experimentos a escala real, resulta muy difícil definir con precisión la respuesta de la contención ante cada estado de planta, y por lo tanto los juicios de expertos son inherentemente inciertos.

Sin embargo, es necesario poder expresar numéricamente cada dependencia entre modo de falla de contención y estado de planta, de manera de poder obtener resultados cuantitativos del riesgo asociado a la instalación.

Con la finalidad de poder cuantificar los árboles de eventos de contención, en la industria nuclear se utilizan las siguientes categorías numéricas para juicios de ingeniería[1]:

Fenómeno	Rango de Probabilidad
Cierto	$P = 1$
Altamente Probable	$0.995 < P < 1$
Muy Probable	$0.95 < P < 0.995$
Probable	$0.7 < P < 0.95$
Indeterminado	$0.3 < P < 0.7$
Improbable	$0.05 < P < 0.3$
Muy Improbable	$0.005 < P < 0.05$
Altamente Improbable	$0 < P < 0.005$
Imposible	$P = 0$

Tabla 1. Categorías Numéricas para juicios de ingeniería

2.1. Matriz de vulnerabilidad

A partir de las probabilidades de fallas estimadas para cada modo de falla de contención en función del Estado de Planta que la produce, se construye la denominada Matriz de Vulnerabilidad, donde se indican los valores de probabilidad que serán utilizados en los árboles de eventos de contención. En dicha matriz, se representa la probabilidad condicional de que ocurra un determinado modo de falla de contención (indicado por las letras griegas) para cada uno de los Estados de Planta (indicado por EPi). Los valores de cada combinación representan la “vulnerabilidad” de la planta ante los fenómenos físicos que caracterizan el Estado de Planta correspondiente.

A continuación se presenta un ejemplo (ver tabla 2) tomado del Análisis Probabilístico de Seguridad efectuado para el reactor CAREM 25[2]. En dicha matriz se consideran siete posibles modos de falla de contención, y siete posibles Estados de Planta. Los valores indicados fueron tomados como representativos de juicios de ingeniería. Obsérvese que existen vulnerabilidades ciertas, imposibles, y con probabilidades de valores intermedios, así como situaciones donde no es aplicable el análisis, debido a la naturaleza física de los procesos que ocurren en cada caso.

Los valores numéricos indicados en la tabla 2 fueron arbitrariamente tomados de los rangos de la tabla 1, ya que las opiniones de expertos no se materializan en valores únicos, sino en conceptos relativamente vagos como “probable” o “altamente improbable”, por ejemplo. La pérdida de información al utilizar valores únicos es, por lo tanto, evidente.

Estado	α	ϕ	β	σ	γ	δ	π
EP1	0,005	0,9	0,01	0,01	0,1	0,9	0,9
EP2	0,05	0,9	0,01	0	0,1	0,1	0,9
EP3	0,05	0,9	0,01	0	0,1	0,1	0,9
EP4	0,05	0,9	0,01	0	0,1	0,1	0,9
EP5	0,05	0,9	1	n/a	n/a	n/a	n/a
EP6	0,05	0,9	1	n/a	n/a	n/a	n/a
EP7	0,005	0,9	0,01	0,01	0,1	0,9	0,9

Tabla 2. Matriz de vulnerabilidad del APS del CAREM-25[2]

3. ARITMÉTICA DIFUSA

Los conjuntos difusos[3] son aquellos donde sus límites no son precisos. La pertenencia a un conjunto difuso no está relacionada con una afirmación o negación, sino con un “grado” de pertenencia.

Si **A** es un conjunto difuso y **x** es un elemento que pertenece al conjunto, la proposición “x pertenece a A” no necesariamente debe ser verdadero o falso, como requiere la lógica binaria. Puede ser verdad en algún grado, el grado en cual **x** es realmente miembro de **A**. Es muy común, aunque no indispensable, expresar grados de pertenencia en los conjuntos difusos como grados de verdad de las proposiciones asociadas mediante números en el intervalo unitario cerrado [0,1]. Los valores extremos en este intervalo, 0 y 1, representan respectivamente la negación y la afirmación total de la pertenencia a un conjunto difuso dado así como la falsedad y la veracidad de la proposición asociada.

La capacidad de los conjuntos difusos para expresar transiciones graduales desde la pertenencia a la no pertenencia y viceversa tiene una amplia utilidad. No solamente es una potente representación de las medidas de incertidumbre, sino también una poderosa forma de representar conceptos vagos expresados en lenguaje natural. Por ejemplo, en lugar de describir el clima en términos del porcentaje exacto de nubosidad solo puede decirse que está **soleado**. Aunque esta última descripción es vaga y menos precisa, a menudo es mucho más útil. Su significado no es totalmente arbitrario; una nubosidad del 100% no es **soleado**, y tampoco lo es una nubosidad del 80%. Se pueden aceptar estados intermedios tales como 10% ó 20% de nubosidad como **soleado**. Pero, ¿dónde se traza la línea divisoria? Es evidente que el término **soleado** introduce vaguedad en su significado que puede ser representada mediante alguna transición gradual desde grados de nubosidad que pueden considerarse **soleado** a los que pueden considerarse **no soleados**. Esto es precisamente el concepto básico de los conjuntos difusos. Un concepto que en esencia es una generalización de la teoría clásica de conjuntos. La teoría clásica de conjuntos se define de forma tal que dicotomiza los individuos del universo de discurso en dos grupos: miembros (aquellos que ciertamente pertenecen al conjunto) y no miembros (aquellos que ciertamente no pertenecen al conjunto).

Un conjunto difuso puede definirse matemáticamente mediante la asignación a cada posible individuo del universo de discurso, de un valor que representa su grado de pertenencia al conjunto difuso. Este grado corresponde al grado en el cual cada individuo es similar o compatible con el concepto representado por el concepto difuso. Los individuos pueden caer en el conjunto difuso con mayor o menor grado, lo cual se indica mediante un mayor o menor grado de pertenencia. Estos grados de pertenencia frecuentemente se representan mediante números reales que varían dentro del intervalo cerrado [0,1]. Por lo tanto, un conjunto difuso que representa el concepto de **soleado** podría asignar un grado de pertenencia de 1 a una nubosidad del 0%, 0,8 a una nubosidad del 20%, 0.4 a una nubosidad del 30%, y 0 a una nubosidad del 75%. Estos grados de pertenencia indican el grado en el cual cada porcentaje de nubosidad se aproxima al concepto subjetivo de **soleado**.

Debido a que la pertenencia o no pertenencia completa al conjunto difuso puede indicarse por los valores 1 y 0, respectivamente, se puede considerar el concepto de un conjunto clásico como un caso particular de un concepto más general, el de conjunto difuso, para el cual sólo están permitidos estos dos grados de pertenencia.

4. MATRIZ DE VULNERABILIDAD DIFUSA

El concepto de número difuso juega un papel fundamental en la formulación cuantitativa de *variables difusas*. Son variables cuyos estados son números difusos. Cuando, además, el número difuso representa conceptos lingüísticos, tales como altamente probable, probable, imposible, etc. comúnmente se habla de *variables lingüísticas*.

Cada variable lingüística, el estado de la cual se expresa mediante un término lingüístico que se interpreta como un número difuso específico definido en términos de una variable base, cuyos valores son números reales dentro de un rango especificado. Una variable base es una variable en el sentido clásico, ejemplificado por cualquier variable física (por ejemplo, temperatura, presión, velocidad, etc.), así como cualquier otra variable numérica (por ejemplo, años, tasa de interés, probabilidad, etc.), en una variable lingüística, los términos lingüísticos representan valores aproximados de una variable base que son capturados por números difusos adecuados.

En el presente trabajo, la variable lingüística corresponde al concepto **categoría numérica para juicios de ingeniería**. Los estados posibles varían dentro de los rangos mostrados en la tabla 1 y pueden representarse gráficamente como se muestra en la siguiente figura:

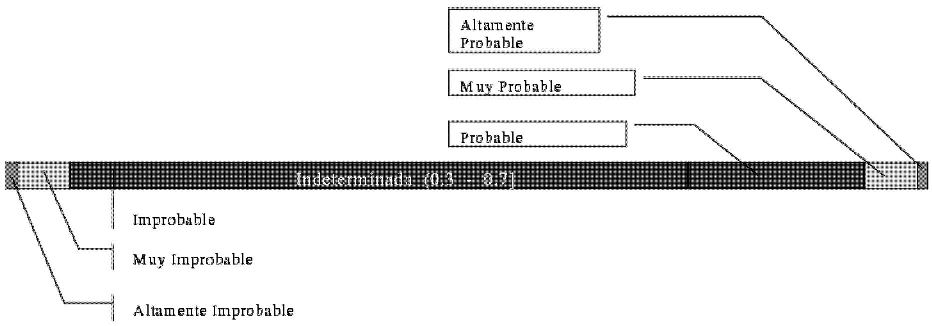

Figura 1. Categorías Numéricas para juicios de expertos

Cada estado de la variable base, en la aritmética clásica, se representa por un número real adoptado según criterio del experto dentro del rango correspondiente. Resulta evidente que una representación más adecuada puede lograrse mediante la utilización de números difusos, obteniendo como resultado una matriz difusa[4].

4.1. Función de pertenencia

En el presente trabajo se representa la función de pertenencia de la variable base mediante una distribución normal. Dicha distribución normal tiene una media y una desviación standard correspondiente a la media y la desviación standard de la distribución uniforme correspondiente dentro de los rangos indicados en la Figura 1.

De esta manera se pueden representar las categorías numéricas de juicios de expertos mediante las funciones de pertenencia que se grafican en la Figura 2.

Los estados Cierto e Imposible, se representan por 1 y 0 respectivamente. Esta representación es un caso particular, denominado intervalo degenerado[5] [1,1] y [0,0].

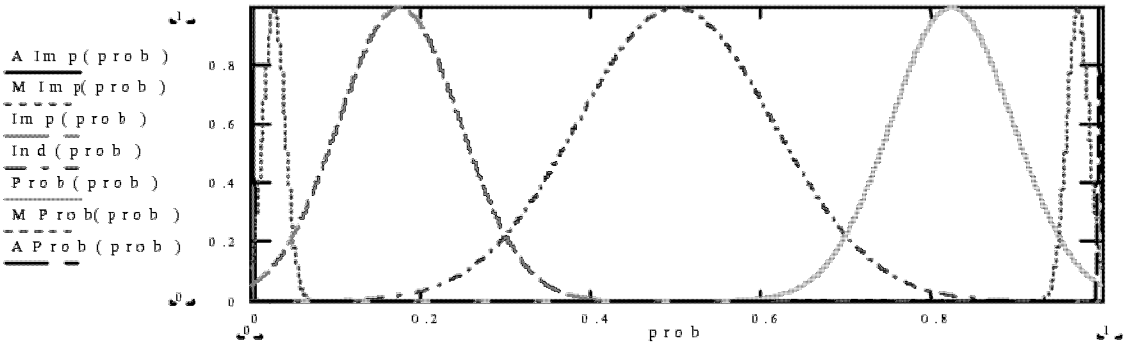

Figura 2. Funciones de pertenencia

Resultando la siguiente matriz de vulnerabilidad difusa, que representa con mejor detalle los juicios de ingeniería, con referencia a la utilización de un único valor:

Estado	α	ϕ	β	σ	γ	δ	π
EP1	Alt. Imp	Probable	Muy Imp.	Muy Imp.	Muy Imp.	Probable	Probable
EP2	Muy Prob.	Probable	Muy Imp.	Imposible	Muy Imp.	Muy Imp.	Probable
EP3	Muy Prob.	Probable	Muy Imp.	Imposible	Muy Imp.	Muy Imp.	Probable
EP4	Muy Prob.	Probable	Muy Imp.	Imposible	Muy Imp.	Muy Imp.	Probable
EP5	Muy Prob.	Probable	Cierto	n/a	n/a	n/a	n/a
EP6	Muy Prob.	Probable	Cierto	n/a	n/a	n/a	n/a
EP7	Alt. Imp	Probable	Muy Imp.	Muy Imp.	Muy Imp.	Probable	Probable

Tabla 3. Matriz de vulnerabilidad difusa para el APS del CAREM-25

5. OPERACIONES CON NÚMEROS DIFUSOS

Para operar con números difusos, puede aplicarse el principio de extensión[6] mediante el cual las operaciones sobre números reales se extienden a operaciones con números difusos.

Para calcular un árbol de eventos de contención es necesario utilizar dos operaciones: multiplicación y adición difusas[7]. Según el principio de extensión, estas dos operaciones son:

$$(A.B)(z) = \sup_{z=x\cdot y} min[A(x), B(y)] \tag{1}$$

$$(A+B)(z) = \sup_{z=x+y} min[A(x), B(y)] \tag{2}$$

Donde A y B son números difusos representados por su correspondiente función de pertenencia. Sup extrae la mayor función de pertenencia del conjunto min[A(x), B(y)]. Min extrae la menor función de pertenencia entre A(x) y B(y).

De la aplicación de las ecuaciones (1) y (2) a los árboles de eventos de contención, se obtienen como resultado estados de contención expresados mediante números difusos. Estos números difusos son sus correspondientes funciones de pertenencia, proporcionando resultados constituidos como una distribución en lugar de un número en el sentido tradicional de la aritmética.

6. CONCLUSIONES

La utilización de aritmética difusa en la representación de la matriz de vulnerabilidad permite una representación más adecuada de las correspondientes categorías numéricas de juicios de expertos.

Con el empleo de la aritmética tradicional se hace una división abrupta para pasar de un rango a otro de categoría. Por otra parte se supone una distribución uniforme dentro de un rango dado para la correspondiente categoría numérica. Es evidente que resulta una representación más adecuada mediante la utilización de funciones de pertenencia que permiten expresar transiciones graduales entre los distintos rangos considerados.

La aplicación de la matriz de vulnerabilidad difusa al cálculo de árboles de eventos de contención, permite a su vez, la obtención de estados de contención difusos. Estos estados de contención difusos representan en forma más adecuada la distribución de probabilidades de falla de la contención.

Actualmente, se está utilizando esta matriz de vulnerabilidad difusa para calcular los correspondientes estados de contención dentro del Análisis Probabilístico de Seguridad de la central CAREM-25, actualmente en estado de diseño en la Argentina. Para su cálculo, se mantiene la lógica binaria de los árboles de eventos de contención y se aplica aritmética difusa (según el principio de extensión) a cada rama del árbol.

7. REFERENCIAS

[1] U. S. NRC, “Evaluation of Severe Accident Risks”, NUREG/CR-4551, (1990).

[2] J. Barón, J. Núñez y S. Rivera, *"A Level III PSA for the Inherently Safe CAREM-25 Nuclear Power Station",* International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM-III, Creta, Grecia (1996).

[3] G. J. Klir / Bo Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic. Theory and applications*, Prentice-Hall, Part I, (1995).

[4] T. Terano, K. Asai and M. Sugeno, *Fuzzy systms theory and its applications*, Academic Press, Inc., Chapter 3, (1992).

[5] G. J. Klir / Bo Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic. Theory and applications*, Prentice-Hall, Sec. 4.3, (1995).

[6] T. Terano, K. Asai and M. Sugeno, *Fuzzy systms theory and its applications*, Academic Press, Inc., Chapter 2, (1992).

[7] G. J. Klir / Bo Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic. Theory and applications*, Prentice-Hall, Sec. 4.4, (1995).

Volver