

Aplicación práctica del análisis de riesgo por rayo utilizando lógica difusa

Yelennis Godoy Valladares

Correo electrónico: yelennis@eprob.cu

Empresa de Proyectos de la Industria Básica (EPROB), Ciudad de La Habana, Cuba

Olga Susana Suárez Hernández

Correo electrónico: susana@electronica.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Resumen

En este artículo se presenta la herramienta difusa de análisis de riesgo de impacto de rayo en edificaciones para las condiciones de Cuba, así como su aplicación en un caso específico como parte de su validación. Los fundamentos de la teoría de la lógica difusa fueron tratados en un artículo publicado con anterioridad en esta revista.

Palabras clave: análisis de riesgo, lógica difusa, rayo, nivel ceráuneo

Recibido: enero 2010

Aprobado: marzo 2010

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se aplican, por primera vez en el país, las propiedades de la lógica difusa al importante problema de la protección de los seres vivos y las instalaciones contra las descargas atmosféricas que constituyen en la actualidad la primera causa de muerte por fenómenos naturales y una de las causas fundamentales de pérdidas económicas en Cuba.

Se crea un sistema difuso para el análisis de riesgo de impacto por rayo en estructuras y en su vecindad. Este sistema abarca los razonamientos contenidos en la norma IEC 62305-2 y las experiencias de especialistas cubanos, entre ellas están las características de la variación espacio-temporal de la actividad ceráunica en el país a partir de un estudio actualizado realizado en el 2005.

RIESGO Y COMPONENTES DE RIESGO

El riesgo R es el valor de una pérdida anual promedio probable. Para cada tipo de pérdida que puede ocurrir en una edificación o en un servicio, se evalúa el riesgo pertinente. Los riesgos que se evalúan en una edificación pueden ser:

R_1 : Riesgo de pérdida de vidas humanas.

R_2 : Riesgo de pérdida del servicio para el público.

R_3 : Riesgo de pérdida del patrimonio cultural.

Estos riesgos son el resultado de la suma de varios componentes de riesgo, dependiendo de las pérdidas que pueden ocurrir y de las características del objeto a proteger.

La expresión general para obtener los componente de riesgo es:

$$R_x = N_x \cdot P_x \cdot L_x$$

donde:

N_x : Número anual promedio de eventos peligrosos.

P_x : Probabilidad de daño.

L_x : Pérdida resultante.

FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA DIFUSO

El sistema difuso consta de tres variables de entrada (N_x , P_x y L_x) y una variable de salida (R_x), como se explica en la referencia 1.

Estas variables se describen de forma cualitativa y cuantitativa permitiendo así una mayor interpretación de la subjetividad envuelta en el análisis de riesgo.

Evaluación de la densidad de rayos a tierra

El número anual promedio de eventos peligrosos debidos a descargas de rayos que influye en un objeto que se va a proteger depende de la actividad de tormentas eléctricas de la región donde se encuentra el objeto y de las características físicas del objeto.

La expresión fundamental para hallar N_x es:

$$N_x = N_g \cdot A_e \cdot C_x \cdot 10^{-6}$$

donde:

N_g : Densidad de rayos a tierra por kilómetro cuadrado por año.

A_e : Área equivalente.

C_x : Coeficiente de corrección para las características físicas del objeto a proteger.

Esta expresión varía según la posición del punto impactado por el rayo o fuente de daño, [2] como se muestra en la tabla 1.

Actualmente algunos países cuentan con sistemas de localización de rayos o red de contadores que les permite obtener directamente la densidad de rayos a tierra.

En Cuba el indicador de incidencia con que se cuenta es el nivel ceráuneo (días tormenta promedio), por lo que N_g ha de ser obtenido a través de una relación empírica.

Muchas de estas aparecen en la literatura y se normalizan en diferentes documentos en función de mediciones de parámetros del rayo que han sido realizadas en regiones tropicales.

Países como México, Brasil, Sudafrica, Colombia, ubicados en regiones tropicales han realizado diferentes investigaciones y han podido establecer la variación espacio-temporal de la intensidad de la actividad eléctrica atmosférica en general, y de los parámetros de los rayos en particular con desviaciones significativas de las que se reportan en países templados.

En la tabla 1 se muestran desviaciones en los resultados de N_g al variar las expresiones que obtienen distintos países, es por ello que en este trabajo se escoge la estimación empírica

$$N_g = 0,1 \cdot T_d$$

Para evaluar de forma lingüística a N_g se trabaja con la versión actualizada del *mapa de niveles isoceráuneos* del país según las últimas evaluaciones realizadas teniendo en cuenta las sesenta y tres estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo del país y veinte años de información.

La densidad de descargas a tierra por kilómetro cuadrado anual se describe a través de cuatro conjuntos difusos como se muestra en la figura 1. En la evaluación de N_g se trabaja

Fórmulas de cálculo de N_g	Regiones y países	Regiones montañosas y llanas $T_d = 130$	Regiones costeras	
			$T_d = 100$	$T_d = 80$
$N_g = 0,1 \cdot T_d$	Estimación empírica	1,3	10	8
$N_g = 0,024 \cdot T_d^{1,12}$	Correlación con contadores de rayo. Regiones montañosas (México, 1996)	5,59	-	-
$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,24}$	Correlación con contadores de rayo. Regiones montañosas (Brasil, 1993)	16,7	-	-
$N_g = (5,4 \lambda^{1,6} \cdot T_d^{2,5}) \cdot 10^{-7}$ λ : Latitud en grados	Correlación con contadores de rayo. Regiones montañosas (Colombia, 1995)	13,1	-	-
$N_g = 0,044 \cdot T_d^{1,24}$	Correlación con contadores de rayo. Regiones planas (México, 1996)	18,4	-	-
$N_g = 0,026 \cdot T_d^{1,33}$	Correlación con contadores de rayo. Regiones costeras (México, 1996)	-	11,88	8,83
$N_g = 176 \lambda^{-3,8} \cdot T_d$ λ : Latitud en grados	Correlación con contadores de rayo. Regiones costeras (Colombia, 1995)	-	0,17	0,13
$N_g = 0,004 \cdot T_d^{1,25}$	Correlación con contadores de rayo. (Sudáfrica, 1980)	17,6	12,65	9,57

con la variación espacio-temporal a nivel local (estaciones meteorológicas). Cada conjunto agrupa los valores mínimos, promedio y máximos de los días tormenta registrados.

En la zona de Isabel Rubio, Pinar del Río, se registran los mínimos valores de días tormenta, alcanzándose un valor máximo igual a 19, esto se aleja mucho de los valores registrados en el resto de las estaciones meteorológicas, por lo que se crea el conjunto difuso *muy bajo* que representa este comportamiento.

El conjunto difuso *bajo* refleja los valores más bajos que se localizan en zonas costeras sobre todo hacia la porción oriental del país.

El conjunto difuso *alto* refleja los valores relativamente altos observados en la costa sur de Cuba y en especial en zonas aledañas del oeste del Golfo de Batabanó, el Golfo de Ana María y el Golfo de Guacanayabo, donde estos alcanzan entre 100 y 120 días.

El conjunto difuso *muy alto* refleja los valores más altos (mayores a 120 días) que se registran en la cordillera de Guaniguanico, el interior de las provincias de La Habana y Matanzas, en el Grupo Guamuhaya y en las zonas llanas interiores y las montañosas de las provincias orientales. Los máximos absolutos se observan en el interior de la cuenca del Cauto con 135 días anuales seguidos muy de cerca por las zonas más elevadas de la Sierra Maestra, que reportan 134 días de tormenta.

La mayor membresía, uno, en cada conjunto, lo tienen los días tormenta promedio, en tanto los valores mínimos y máximos tienen una membresía igual a 0,5. De este modo se representa la ocurrencia de aproximadamente igual cantidad de días tormenta anuales por debajo y por encima del promedio registrados en la mayoría de las estaciones.

Cinco estaciones no coinciden; tres de ellas, La Sabana, Sagua la Grande y Santa Cruz muestran una tendencia a que la cantidad de valores máximos estén por encima del promedio y otras dos, Isabel Rubio y Manzanillo, una tendencia a que la cantidad de valores mínimos estén por encima del promedio registrado. En el caso de Isabel Rubio, en el conjunto *muy bajo*, el valor mínimo tiene una función de membresía de 0,35 y el máximo de 0,65. En las otras cuatro estaciones, los valores mínimos o máximos pueden ocupar el valor máximo en otros conjuntos si el diseñador decide darle una menor o mayor membresía.

Evaluación del área equivalente

Para cada N_x , según la fuente de daño se obtiene un área de captación equivalente y la misma se afecta por distintos factores como se expresa a continuación:

A_d : Área equivalente de las descargas que impactan en la edificación, se expresa como:

$$A_d = L \cdot A + 6 \cdot (L+A) + 9 \cdot \pi \cdot (H)^2 \quad (1)$$

donde:

L : Longitud del objeto a proteger (m).

A : Ancho del objeto a proteger (m).

H : Altura del objeto a proteger (m).

Esta área se afecta por el factor C_d que se muestra en la referencia 2, dependiendo de la localización del objeto a proteger.

A_m : Área equivalente de las descargas que impactan cerca de la edificación, se expresa como:

$$A_m = [L \cdot A + 500 \cdot (L+A) + \pi \cdot (250)^2]$$

Si $A_m < 0$, se asume que $N_M = 0$.

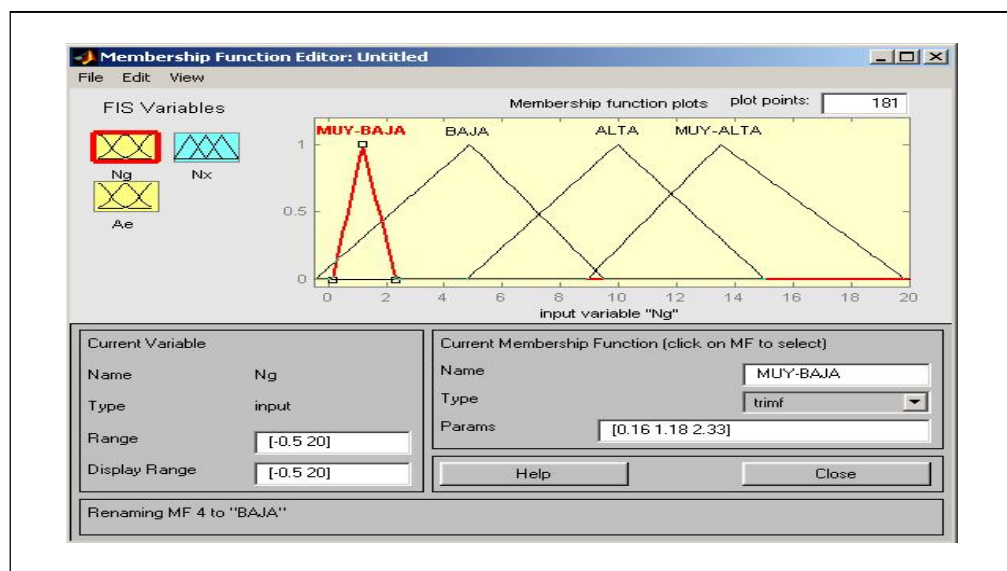


Fig. 1. Función de membresía de N_s .

A_i : Área equivalente de las descargas que impactan en un servicio que entra a la edificación, si el servicio es aéreo se expresa como:

$$A_{ia} = [L_c - 3 \cdot (H_a + H_b)] \cdot 6 \cdot (H_c) \quad (2)$$

donde:

L_c : Longitud (m) de la sección del servicio desde la edificación hasta el primer nodo con un valor máximo de 1 000 m.

H_a : Altura (m) de la edificación conectada al extremo *a* del servicio. [2]

H_b : Altura (m) de la edificación conectada al extremo *b* del servicio. [2]

H_c : Altura (m) de los conductores del servicio por encima del terreno.

Si el servicio es soterrado la expresión del área equivalente es:

$$A_{is} = [L_c - 3 \cdot (H_a + H_b)] \cdot \sqrt{p} \quad (3)$$

donde:

p : Es la resistividad del suelo (Ωm) donde la línea entre en tierra con un valor máximo de 500 m.

En cualquier caso el área equivalente se afecta por los factores (C_d), dependiendo de la localización de la estructura y por el factor de corrección (C_c) por la presencia de un transformador AT/BT ubicado entre el punto de impacto y la edificación. [2]

A_i : Área equivalente de las descargas a tierra cerca del servicio que entra a la edificación, si el servicio es aéreo se expresa como:

$$A_{ia} = 1\,000 \cdot L_c \quad (4)$$

Si el servicio es soterrado la expresión es la siguiente:

$$A_{is} = 25 \cdot L_{co} \cdot \sqrt{p} \quad (5)$$

Esta área se afecta por los factores C_p de corrección por la presencia de un transformador AT/BT ubicado entre el punto de impacto y la edificación y el factor ambiental (C_e) que se muestra en la referencia 2.

Teniendo en cuenta las características de distintas edificaciones que se construyen en el país, así como el ambiente y la ubicación de las mismas, se proponen distintos conjuntos de áreas. Estas áreas afectan a la función de membresía de N_g , anteriormente explicada, y como resultado se describe lingüísticamente N_x a través de cinco conjuntos. [2]

Evaluación de la probabilidad de daño

Existe probabilidad de que una descarga atmosférica que impacte en la edificación a proteger, en un servicio que esté conectado a la misma y en los alrededores de ambos, cause lesiones a las vidas humanas, daños físicos y/o fallos a los sistemas internos. Los valores de la probabilidad de daño

dependen de las medidas de protección implantadas o se diseñen para este objeto.

Para cada componente de riesgo identificado y en dependencia de las características de la estructura se selecciona la probabilidad de daño correspondiente. En la referencia 2 se muestran las tablas donde se recogen los valores de probabilidad en dependencia de las medidas de protección que reducen las lesiones a las personas, los daños físicos y los fallos de los sistemas internos. La descripción de los conjuntos difusos de estas pérdidas se dan en las referencias 1 y 2.

Evaluación de las pérdidas

La pérdida resultante L_x se refiere a la cantidad relativa media de un tipo de daño, su magnitud y efectos, a causa de una descarga atmosférica. Cada tipo de daño produce una pérdida resultante diferente en el objeto que se va a proteger. El tipo de pérdida depende de las características del propio objeto y de su contenido. Se tienen en cuenta los siguientes tipos de pérdida:

1. Pérdida de vidas humanas.
2. Pérdida del servicio al público.
3. Pérdida de patrimonio cultural.

La descripción de los conjuntos difusos de estas pérdidas se explica en las referencias 1 y 2.

Evaluación de los componentes de riesgo

La variable de salida del componente de riesgo R_x del sistema difuso, se describe a través de tres conjuntos lingüísticos denominados *bajo*, *medio* y *alto*.

En el conjunto *bajo* se proponen los valores resultantes de la relación entre las entradas del sistema que dan una evaluación del componente de riesgo tolerable.

En el conjunto *medio* se reúnen valores resultantes de relación entre las entradas del sistema que dan una evaluación del componente de riesgo tolerable para $R_x \leq 1$ y no tolerable para $R_x > 1$.

En el conjunto *alto* se reúnen los valores resultantes de la relación entre las entradas del sistema que dan una evaluación del componente de riesgo no tolerable.

La función de membresía de R_x se muestra en la referencia 2.

ANÁLISIS DE RIESGO DE IMPACTO DE RAYO A EDIFICACIÓN HOSPITALARIA APLICANDO LÓGICA DIFUSA

Se realiza el estudio del análisis de riesgo de impacto de rayo en una edificación hospitalaria. Se escoge esta instalación porque se pueden involucrar todos los componentes de los diferentes riesgos (R_1 , R_2 y R_3).

El procedimiento a seguir para realizar el análisis de riesgo se encuentra en la referencia 1.

Características de la edificación

Las características de la edificación hospitalaria, así como las de la línea eléctrica de alimentación principal que entra a esta se muestran en la tabla 2.

Identificación de los tipos de pérdida y los riesgos relacionados

En el hospital pueden presentarse las siguientes pérdidas:

- Vidas humanas.
- Servicio al público.
- Patrimonio cultural.

Por lo que se analizarán los riesgos R_1 , R_2 y R_3 para estos tipos de pérdidas respectivamente.

Identificación de los componentes que constituyen los riesgos

En la tabla 3 se recogen los componentes que se involucran según las características de la edificación a proteger, para cada tipo de riesgo.

Tabla 2 Datos y características de la edificación hospitalaria y línea eléctrica			
Características de la edificación			
Parámetro	Comentario	Símbolo	Valor
Dimensiones (m)		$L; W; H$	100; 60; 12
Factor de ubicación	Rodeada de árboles y edificaciones de altura similar	C_d	0,5
Densidad de descargas a tierra (1/km ² /año)	Ubicada en municipio Playa D _T = 100	N_g	10
Características de la línea eléctrica que entra a la edificación			
Parámetro	Comentario	Símbolo	Valor
Longitud (m)		L_c	50
Altura de la línea(m)		H_c	7
Altura (m) de la edificación conectada al extremo b del servicio		H_c	12
Transformador	sí	C_i	0,2
Factor de ubicación de la línea	Rodeada de árboles y edificaciones de mayor altura	C_d	0,25
Factor ambiental	Urbano	C_e	0,1

Tabla 3 Identificación de los componentes de riesgo	
Riesgos y componentes	Comentario
$R_1 = R_A + R_B + R_C + R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z$	Debido a que el hospital tiene instalados equipos eléctricos vitales a los que están conectadas las personas, se involucran R_C, R_M, R_W y R_Z
$R_2 = R_B + R_C + R_M + R_V + R_W + R_Z$	-
$R_3 = R_B + R_V$	-

Calculo del número anual promedio de eventos peligrosos

Los cálculos de las áreas de captación y del número anual promedio de eventos peligrosos se muestran en las tablas 4 y 5.

Tabla 4 Áreas de captación de la edificación y la línea	
Áreas	Valores (m)
$A_d = L \cdot A + 6 \cdot (L+W) + 9 \cdot \pi \cdot (H)^2$	$A_d = 21\ 590$
$A_m = L \cdot A + 500 \cdot (L+W) + \pi \cdot (250)^2 - A_d$	$A_m = 282\ 250$
$A_{La} = [L_c - 3 \cdot (H_a + H_b)] \cdot 6 \cdot (H_c)$	$A_{La} = 126$
$A_{la} = 1\ 000 \cdot L_c$	$A_{la} = 1\ 000$

Tabla 5 Número anual promedio de eventos peligrosos	
Número anual promedio de eventos peligrosos	Valores
$N_D = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6}$	$N_D = 0,108$
$N_M = N_g \cdot A_m \cdot 10^{-6}$	$N_M = 2,61$
$N_{Da} = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot C_i \cdot 10^{-6}$	$N_L + N_{Da} = 0,0\ 21\ 7$
$N_L = N_g \cdot A_L \cdot C_d \cdot C_t \cdot 10^{-6}$	$N_I + N_L = 0,000\ 263$
$N_I = N_g \cdot A_I \cdot C_e \cdot C_t \cdot 10^{-6}$	0,000\ 263

Selección de la probabilidad de daños

En la tabla 6 se pueden observar las características de las protecciones existentes en la edificación y en la línea eléctrica de alimentación principal, a partir de las cuales se seleccionan las probabilidades de daño.

Selección de P_M, P_U, P_V y P_W

El factor que tiene en cuenta las medidas de protección adoptadas (K_{MS}) se halla según la siguiente expresión:

$$K_{MS} = K_{S1} \cdot K_{S2} \cdot K_{S3} \cdot K_{S4} = 0,000\ 04$$

Según la referencia 2:

Para $K_{MS} = 0,000\ 04$, $P_M = 0,000\ 1$.

Para $U_W = 2,5\ kV$ y $R_S = 1,5\ \Omega/km$ $P_U = P_V = P_W = 0,6$.

Para $U_W = 2,5\ kV$ y $R_S = 1,5\ \Omega/km$ $P_Z = 0,02$.

Probabilidad de daño en la estructura			
Parámetro	Comentario	Símbolo	Valor
Protección contra lesiones	Aislamiento eléctrico del bajante expuesto	P_A	1
LPS	No	P_B	0,01
Protección coordinada/LPL	No	P_C	1
Espaciamiento entre electrodos (m)		W	3
Cable apantallado/Resistencia de pantalla del cable (Ω/km)	Sí	R_S	1,5
Eficacia del apantallado de la edificación	Para $W = 3$	K_{S1}	0,36
Eficacia del apantallado de las pantallas internas de la edificación	Para $W = 3$	K_{S2}	0,36
Características del cableado interno	Cable con pantalla de resistencia $1,5\ \Omega/km$ conectado a una barra de protección equipotencial en ambos extremos y equipos conectados a la misma barra de protección	K_{S3}	0,000 2
Tensión soportada de impulso del sistema	Para $U_W = 2,5\ kV$	K_{S4}	0,6
Tensión soportada de impulso de los equipos (kV)		U_W	2,5
Probabilidad de daño en la línea eléctrica			
Parámetro	Comentario	Símbolo	Valor
LPS	No	P_B	0,01
Protección coordinada/LPL	No	P_C	1

Evaluación lingüística de L_x

La pérdida debida a lesiones por tensiones de contacto y de paso de vidas humanas que se encuentran dentro de la edificación se evalúan como *media* para la superficie del suelo (losas de cerámica) de la edificación, como se muestra en la tabla 7.

Las pérdidas de vidas humanas debidas al daño físico corresponden al conjunto lingüístico C14 para una edificación hospitalaria con peligro de incendio bajo, dificultad de evacuación y con medidas de protección para reducir las consecuencias de un incendio (extintores y otros), como se muestra en la tabla 8.

Las pérdidas de vidas humanas debidas al fallo de los sistemas internos en una edificación hospitalaria se evalúan como *baja*, como se muestra en la tabla 9.

Valores de resistencia de contacto según superficie del suelo o del piso ($k\ \Omega$)	Conjuntos difusos de pérdidas debidas a lesiones por tensiones de contacto y de paso		
	Personas dentro de edificación	Personas fuera de edificación	
$r \leq 1$	Agrícola, hormigón	Alta	Baja
$1 < r \leq 10$	Mármol, cerámica	Media	Baja
$r > 10$	Gravilla, alfombra, tapete	Baja	Baja

Tabla 8
Evaluación lingüística de las pérdidas L_B y L_Y

r	L_f	0,1					
		h	1	2	5	10	20
Desprotegido 1	B	C 11	C 13	C 16	C 18	C 19	C 20
	N	C 18	C 19	C 20	C 22	C 24	C 24
	A	C 22	C 24	C 25	C 26	C 28	C 28
	EXP	C 26	C 28	C 28	C 29	C 30	C 30
Protegido 0,5	B	C 9	C 11	C 14	C 16	C 18	C 18
	N	C 16	C 18	C 20	C 20	C 22	C 23
	A	C 20	C 22	C 24	C 25	C 26	C 27
	EXP	C 25	C 26	C 28	C 28	C 29	C 30
Protrotegido 0,2	B	C 6	C 8	C 11	C 13	C 15	C 16
	N	C 13	C 15	C 18	C 19	C 20	C 20
	A	C 19	C 20	C 22	C 24	C 25	C 25
	EXP	C 11	C 13	C 16	C 18	C 19	C 20

La pérdida del servicio al público debida al daño físico se evalúa como *baja* para una edificación hospitalaria con peligro de incendio bajo y con medidas de protección para reducir las consecuencias de un incendio (extintores y otros), como se muestra en la tabla 10.

La pérdida del servicio al público debida al fallo de los sistemas internos se evalúa como *alta* para los servicios de gas y agua y como *baja* para los servicios de TV, TLC y electricidad, como se muestra en la tabla 11.

Tipo de edificación	Conjuntos difusos de las pérdidas de vidas humanas debidas al fallo de los sistemas internos
Riesgo de explosión	Alta
Hospitalaria	Baja

Medidas de protección para reducir consecuencias de un incendio	Riesgo de incendio	Pérdida debida a daño físico	
		Servicio de gas, agua	Servicio TV, TLC, electricidad
No hay medidas	Explosión	Muy alta	Media 4
	Alto	Media 4	Media 1
	Normal	Media 1	Baja
	Bajo	Baja	Baja
Una de las siguientes medidas: Extintores, instalaciones de extinción fijas de operación manual, instalaciones de alarmas manuales, hidrantes, compartimientos a prueba de incendio, vías de escape protegidas	Explosión	Alta 2	Media 3
	Alto	Media 3	Baja
	Normal	Baja	Baja
	Bajo	Baja	Baja
Una de las siguientes medidas: Instalaciones de extinción fijas de operación automática, instalaciones de alarma automática (solo si están protegidas contra sobretensiones y otros daños y si los bomberos llegan en menos de 10 min).	Explosión	Alta 1	Media 2
	Alto	Media 2	Baja
	Normal	Baja	Baja
	Bajo	Baja	Baja

La pérdida de patrimonio cultural debida al daño físico se evalúa como *muy baja* para un peligro de incendio bajo y con medidas de protección para reducir las consecuencias de un incendio (extintores y otros), como se muestra en la tabla 12.

Tipo de servicio	Conjuntos difusos de la pérdida debida al fallo de los sistemas internos
Servicios de gas, agua	A
Servicios TV, TLC, electricidad	B

Medidas de protección para reducir consecuencias de un incendio	Riesgo de incendio	Pérdida debida a daños físicos
No hay medidas	Explosión	Muy alta
	Alto	Media 4
	Normal	Media 1
	Bajo	Muy baja
Una de las siguientes medidas: Extintores, instalaciones de extinción fijas de operación manual, instalaciones de alarmas manuales, hidrantes, compartimientos a prueba de incendio, vías de escape protegidas	Explosión	Alta 2
	Alto	Media 3
	Normal	Baja
	Bajo	Muy baja
Una de las siguientes medidas: Instalaciones de extinción fijas de operación automática, instalaciones de alarma automática (sólo si están protegidas contra sobretensiones y otros daños y si los bomberos llegan en menos de 10 min).	Explosión	Alta 1
	Alto	Media 2
	Normal	Muy baja
	Bajo	Muy baja

Obtención de funciones de membresía de N_x, L_x y P_x .

En las figuras 2-7 se muestra el visor de reglas del toolbox fuzzy de los sistemas difusos de todos los componentes de riesgo. En cada uno de ellos se introducen los valores de N_x, P_x y L_x que se obtienen.

Funciones de membresía de las pérdidas.

Pérdidas de vidas humanas por tensiones de paso y de contacto:

$$Fm M (L_A = L_U = 10^{-5}) = 1$$

Pérdidas de vidas humanas debidas al daño físico:

$$Fm C_{14} (L_B = L_V = 2,510^{-5}) = 1$$

Pérdidas de vidas humanas debidas al fallo de los sistemas internos:

$$Fm B (L_C = L_M = L_W = L_Z = 10^{-3}) = 1$$

Pérdidas del servicio al público debidas al daño físico para servicios de gas, agua, TV, TLC y electricidad:

$$Fm B (L_B = L_V = 5 \cdot 10^{-4}) = 1$$

Pérdidas del servicio al público debidas al fallo de los sistemas internos para servicios de gas, y agua, TV, TLC y electricidad

$$Fm B (L_C = L_M = L_W = L_Z = 10^{-3}) = 1$$

Servicios de TV, TLC y electricidad:

$$Fm A (L_C = L_M = L_W = L_Z = 10^{-2}) = 1$$

Pérdida de patrimonio cultural debida al daño físico:

$$Fm M B (L_B = L_V = 2 \cdot 10^{-5} \text{ a } 2 \cdot 10^{-4}) = 1$$

Obtención de la salida R_x

En las figuras 2, 3 y 4 se muestra el resultado de los componentes de riesgo que se evalúan como *no tolerables* para los valores de N_x, P_x y L_x que se introducen.

Evaluación de la necesidad de protección

Los componentes R_C y R_W de R_1 y el componente R_C de R_2 se evalúan como *no tolerables* por lo que hay necesidad de mejorar las medidas de protección contra rayo.

Identificación del tipo de protección a adoptar, según el R_x evaluado de *no tolerable*.

Para reducir el riesgo R_1 a un valor tolerable, se deben considerar medidas de protección que influyan en los componentes R_C y R_W y para reducir el riesgo R_2 a un valor tolerable se deben considerar medidas de protección que influya en el componente R_C .

Reevaluación de la necesidad de protección variando P_x en el R_x evaluado de *no tolerable*

En las figuras 5, 6 y 7 se observa que utilizando un sistema de protección coordinado para un nivel de protección III o IV se reducen los valores de P_C y P_W de 1 a 0,03, lo que implica que disminuyan los resultados de los componentes de riesgo R_C y R_W y por tanto los riesgos R_1 y R_2 se evalúan como tolerables.

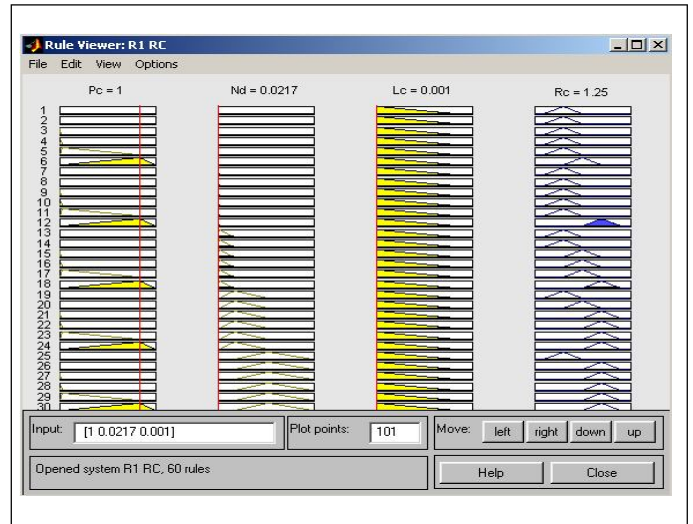


Fig. 2. Visor de reglas del sistema difuso R_1, R_C .

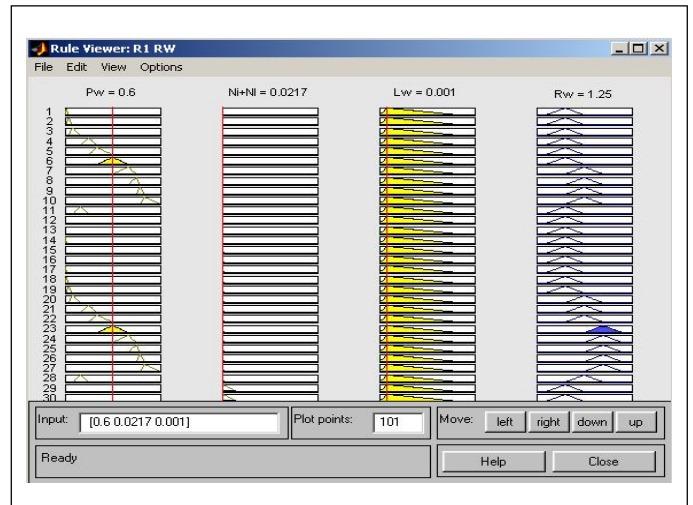


Fig. 3. Visor de reglas del sistema difuso R_1, R_W .

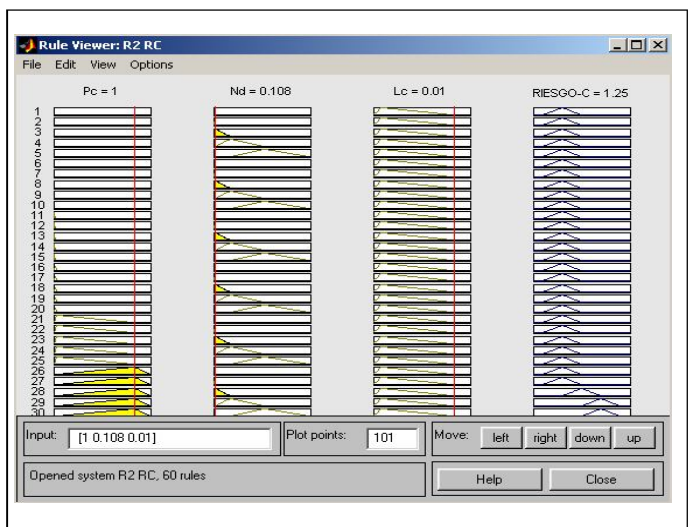


Fig. 4. Visor de reglas del sistema difuso R_2, R_C . Servicios de gas y agua.

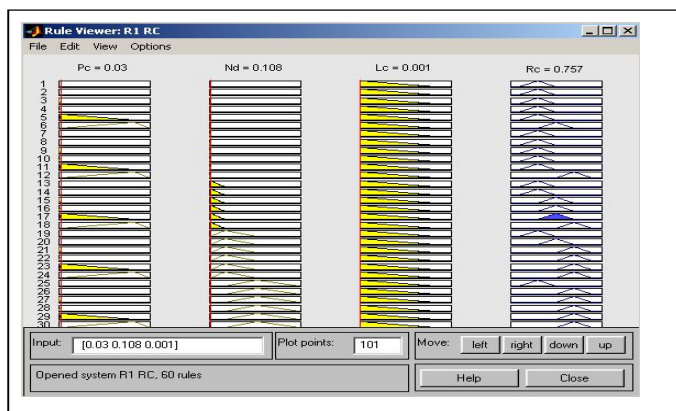


Fig. 5. Visor de reglas del sistema difuso R_1, R_c . Reevaluación de R_c .

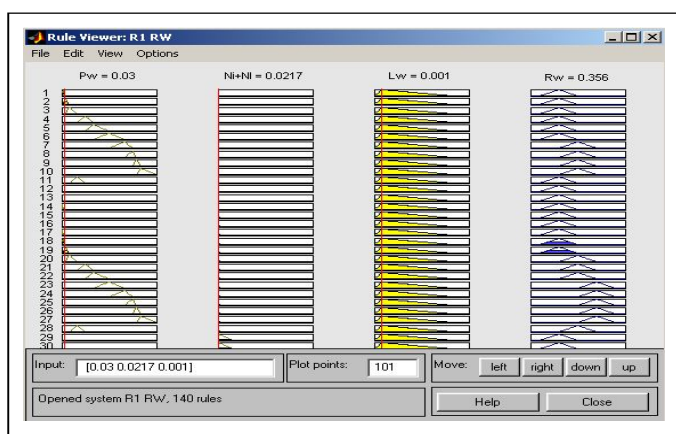


Fig. 6. Visor de reglas del sistema difuso R_1, R_w . Reevaluación de R_w .

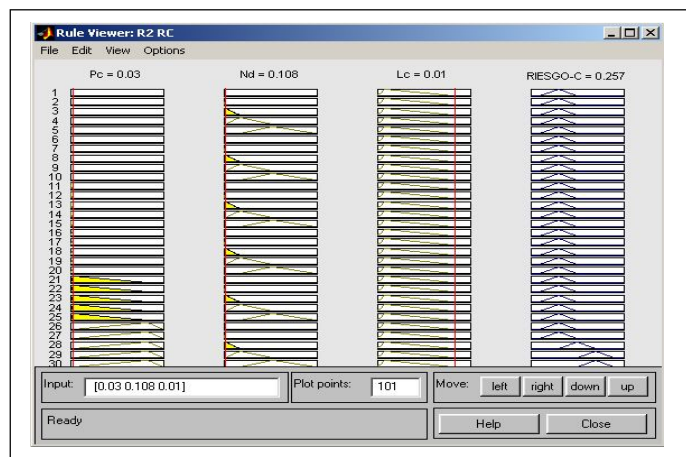


Fig. 7. Visor de reglas del sistema difuso R_2, R_c . Reevaluación de R_c .

CONCLUSIONES

La utilización de la lógica difusa permite el trabajo con la subjetividad incluida en el análisis de riesgo y la obtención de los resultados a partir de reglas sencillas que parten del criterio y la experiencia, por lo que la elaboración del sistema difuso para el análisis de riesgo constituye una herramienta que facilita el trabajo del diseñador. Esta herramienta además considera las características de la variación espacio-temporal de la actividad cerámica y las características de las edificaciones así como las condiciones ambientales del país.

REFERENCIAS

1. GODOY, Y. y SUÁREZ, O. S. "Aplicación de la lógica difusa al análisis de riesgo por rayo". *Revista Cubana de Ingeniería*. 2006, vol. I, nº 2, p. 5-12.
2. GODOY, Y. *Aplicación de lógica difusa al análisis de riesgo por rayo en Cuba*. Tesis de Maestría, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana. 2006.

AUTORAS

Yelennis Godoy Valladares

Ingeniera Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Empresa de Proyectos de la Industria Básica (EPROB), Ciudad de La Habana, Cuba

Olga Susana Suárez Hernández

Ingeniera Electricista, Doctora en Ciencias Técnicas, Investigadora Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Application of Fuzzy Logic in the Analysis of Lightning Risk

Abstract

In this paper the diffuse tool of analysis of risk of lightning impact in structures is presented for the conditions of Cuba, as well as its application in a specific case as part of its validation.

Key words: analysis of risk, fuzzy logic, lightning, keraunic level.