

Aplicación de lógica difusa para la estimación de la intensidad de radiación térmica en incendios de hidrocarburos



Alejandro Talavera-Ortiz
Ricardo Aguasca-Colomo
José Blas Galván-González

Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA. Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería. Calle Juan De Quesada, 30 – 35001 Las Palmas.
Tfno: +34 928 451010.

Recibido: 01/12/2011 • Aceptado: 10/04/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4497>

APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO ESTIMATE THE INTENSITY OF THERMAL RADIATION IN HYDROCARBON FIRES

ABSTRACT

- This paper presents a fuzzy logic approach to the traditional model of solid flame to estimate the thermal radiation in hydrocarbon fires. The fuzzy set theory is a mathematical tool designed to model complex systems in uncertain environments so it can contribute, complementing the traditional model, to facilitate the treatment of uncertainty and imprecision associated with this type of accidents. The model input variables are treated as fuzzy sets and output variables are estimated through a knowledge base which incorporates the subjective interpretation done by experts. Given the number of variables and processes involved is analyzed using a hierarchical fuzzy inference system to connect the various basic systems of inference. The proposed approach is applied to three oil fire experiments, performed with different-sized fires, studying the fit of data and evaluating the differences between the predicted and observed values.
- **Key Words:** Uncertainty, fuzzy logic, pool fire, solid flame model, thermal radiation.

RESUMEN

Este trabajo presenta una aproximación de lógica difusa al modelo tradicional de llama sólida utilizado para estimar la intensidad de radiación térmica en incendios de hidrocarburos.

La teoría de los conjuntos difusos es una herramienta matemática que permite modelar sistemas complejos en entornos inciertos por lo que puede contribuir, complementando el modelo tradicional, a facilitar el tratamiento de la incertidumbre y la imprecisión que acompañan a este tipo de accidentes.

Para ello se tratan las variables del modelo como conjuntos difusos y se relacionan entradas y salidas a través de una base de conocimiento. Es en esta base de conocimiento donde se incorporan la valoración y la interpretación que realizan los expertos del fenómeno en estudio.

En este caso, dado el número de variables y procesos involucra-

dos, se analiza la utilización de un sistema jerárquico de inferencia difusa para conectar los distintos sistemas básicos de inferencia.

La aproximación propuesta se aplica a tres experimentos de incendios de hidrocarburos, realizados con incendios de diferente tamaño, estudiándose el ajuste de los datos y evaluando las diferencias entre los valores pronosticados y los valores observados.

Palabras Clave: Incertidumbre, lógica difusa, incendio de charco, modelo de llama sólida, radiación térmica.

1. INTRODUCCIÓN

La Teoría de los conjuntos difusos, que enuncia los fundamentos de la lógica difusa [1], y la Aritmética de intervalos, que desarrolla la aritmética difusa para las operaciones básicas [2], son el origen de una amplia bibliografía que profundiza en el tratamiento

de la información incierta e imprecisa que está presente en muchos problemas de ingeniería [3-10].

Se han desarrollado numerosas aplicaciones de lógica difusa en el ámbito del análisis de riesgo y de consecuencias [11-16]. También existen aplicaciones específicas en el análisis de incendios de sustancias peligrosas: Markowski y otros desarrollan una aplicación de lógica difusa para la evaluación del riesgo de accidentes relacionados con el transporte de mercancías peligrosas [17], Elsayed analiza las consecuencias de los accidentes originados en la manipulación de hidrocarburos, usando un sistema de inferencia difusa [18], Singh y otros proponen una metodología difusa para establecer un programa de inspección para conducciones de sustancias inflamables [19], Lliadis y otros desarrollan un algoritmo difuso para clasificar áreas forestales de acuerdo al riesgo de incendio [20], Paralikas y otros proponen una metodología multicriterio, basada en lógica difusa, para ordenar sustancias químicas e instalaciones según el peligro de incendio [21], Yang y otros determinan la ubicación óptima de parques de bomberos combinando programación multiobjetivo con lógica difusa [22].

En el ámbito específico de la estimación de la intensidad de radiación térmica y de las áreas de riesgo en incendios, a partir de la Directiva 96/82/CE (Seveso II) se utiliza la dosis de radiación térmica como índice para determinar el nivel de daño producido. Los modelos semiempíricos existentes para determinar la intensidad de radiación térmica junto con las características y los resultados de los experimentos de incendios de hidrocarburos son descritos por Raj, [23] y [24], identificando los parámetros básicos y las incertidumbres de la modelización. Algunos de estos modelos son desarrollados en las publicaciones de la TNO (*Netherlands Organisation for Applied Scientific Research*), [25] y [26]. Sandia National Laboratories ha estudiado los incendios de hidrocarburos en el mar, [27] y [28], reevaluando los riesgos del transporte y manipulación de hidrocarburos en buques de gran capacidad.

Este trabajo propone una nueva aproximación para estimar la intensidad de radiación térmica en incendios de hidrocarburos, basada en un sistema modular y jerárquico de inferencia difusa, que puede facilitar la gestión de la incertidumbre asociada a las variables y procesos involucrados en estos accidentes. Además puede ayudar a la labor de analistas y expertos, permitiendo un margen subjetivo en la definición de las variables de entrada conforme a la experiencia y a la información disponible.

2. MODELO TRADICIONAL DE LLAMA SÓLIDA

2.1 INTRODUCCIÓN

Entre los incendios exteriores en la industria química el más habitual es el incendio de charco, que se define como una llama de difusión flotante donde la base de combustible está configurada horizontalmente [29].

En general se considera que la dosis de radiación térmica es el índice más adecuado para establecer el nivel de daño

producido, ya que recoge no solo la intensidad de radiación térmica sino también el tiempo de exposición.

La TNO [25] define la dosis de radiación térmica como:

$$D = I^4 / 3t_e \quad (1)$$

Siendo:

I : Intensidad de radiación térmica (kW m^{-2}).

t_e : Tiempo de exposición a la radiación (s).

La Directriz básica de Protección Civil [30] establece dos zonas de seguridad:

1. Zona de alerta, donde el incendio tiene efectos perceptibles pero no se justifica una intervención, asociada con quemaduras de primer grado.
2. Zona de intervención, donde el nivel de daño justifica la aplicación de medidas de intervención, asociada con quemaduras de segundo grado.

A partir de datos experimentales, [31] y [32], se relaciona la dosis de radiación térmica con estas áreas, así la zona de alerta se establece a partir de $115 \left((\text{kW m}^{-2})^{4/3} \text{s} \right)$ y la zona de planificación se establece a partir de $250 \left((\text{kW m}^{-2})^{4/3} \text{s} \right)$.

2.2 DEFINICIÓN DEL MODELO

El modelo de llama sólida es un modelo matemático de predicción de los efectos térmicos de un incendio que estima la intensidad de la radiación térmica recibida por personas y objetos situados en los alrededores de un incendio. Está basado en correlaciones empíricas obtenidas a partir de datos experimentales y es apropiado para modelar incendios de hidrocarburos por su simplicidad para establecer zonas de seguridad. El modelo parte de la ecuación:

$$I = E \cdot F \cdot \tau \quad (2)$$

Donde I es la intensidad de radiación térmica (kW m^{-2}) recibida. E es la potencia emisiva específica de la llama (kW m^{-2}), valor medio del flujo de radiación térmica emitido a través de la superficie exterior de la llama. F es el factor de visión (adimensional) que relaciona la energía emitida por el fuego y la recibida por la persona u objeto. τ es el coeficiente de transmisividad atmosférica (adimensional) que estima la parte de la radiación no absorbida por la atmósfera.

2.3 COEFICIENTE DE TRANSMISIVIDAD ATMOSFÉRICA

Estima la parte de radiación térmica no absorbida en la atmósfera por el vapor de agua y el dióxido de carbono. Se expresa como:

$$\tau = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (3)$$

Siendo:

α_w : Coeficiente de absorción del vapor de agua (adimensional).

a_c : Coeficiente de absorción del dióxido de carbono (adimensional).

El valor de a_c es pequeño frente a a_w y puede despreciarse o tomar un valor constante.

La TNO [26] relaciona el coeficiente de absorción del vapor de agua con la presión parcial de vapor de agua en la atmósfera y con la distancia que separa al foco emisor del receptor, utilizando para la temperatura de la llama un valor intermedio de 1200 K, (Figura 1).

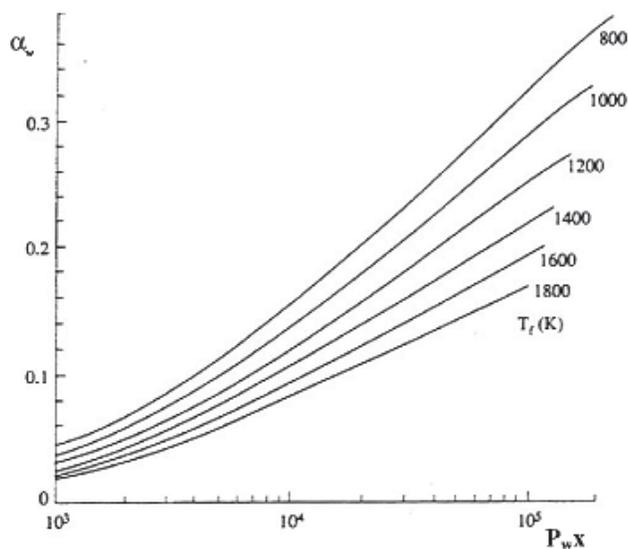


Figura 1: Coeficiente de absorción del vapor de agua

2.4 FACTOR DE VISIÓN

Es la relación entre la energía de radiación emitida y la recibida por unidad de área. Está determinado por el ángulo de inclinación de la llama, por las dimensiones de la llama y por la distancia entre el foco de la llama y el receptor.

En el modelo de llama sólida, la geometría de la llama del incendio de charco se aproxima a un cilindro de base igual a la superficie del charco y de altura igual a la alcanzada por las llamas. Este cilindro estará inclinado en presencia de viento, Figura 2.

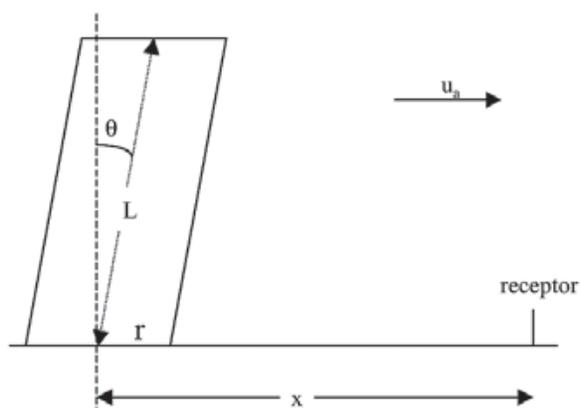


Figura 2: Modelo geométrico de incendio de charco

Ángulo de inclinación de la llama.

Depende de la velocidad del viento, el caudal másico del combustible evaporado, el diámetro y la densidad del aire, Moorhouse [33] propone la expresión:

$$\cos \theta = \begin{cases} 1 & u^* < 1 \\ 0,86 u^{*-0,25} & u^* \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

Donde u^* es la velocidad adimensional del viento:

$$u^* = \frac{u}{u_c} = \frac{u}{\left(\frac{gm'D_{ch}}{\rho_a}\right)^{1/3}} \quad (5)$$

Siendo:

u : Velocidad del viento (ms^{-1}).

u_c : Velocidad característica del viento, a partir de la cual el viento empieza a inclinar la llama.

m' : Caudal másico de combustible evaporado ($\text{kg m}^{-2}\text{s}$).

D_{ch} : Diámetro del charco (m).

g : Aceleración gravitacional (ms^{-2}).

ρ_a : Densidad del aire (kg m^{-3}).

Diámetro del charco.

Se estima a partir del diámetro equivalente:

$$D_{ch} = \sqrt{4V_l/\pi\delta} \quad (6)$$

Donde V_l representa el volumen de líquido fugado y δ representa el espesor del charco.

Caudal másico del combustible.

La Tabla 1 recoge los caudales másicos de evaporación, expresados en ($\text{kg m}^{-2}\text{s}$) de algunos materiales [34].

Material inflamable	Caudal másico
Liq. H_2	0'169
LNG	0'078
LPG	0'099
Butano	0'078
Hexano	0'074
Heptano	0'101
Benceno	0'085
Xileno	0'090
Gasolina	0'083
Diesel	0'062
JP-5	0'054
Metano	0'140

Tabla 1: Caudal másico de evaporación

Altura de la llama.

Se estima según la expresión:

$$L = 55 \left[\left(\frac{D_{ch} m'}{\rho_a} \right)^{2,21} u^{-0,63} g^{-0,79} \right]^{1/3} \tag{9}$$

Siendo:

- L: Altura de la llama.
- D_{ch} : Diámetro del charco.
- m' : Caudal másico evaporado.
- ρ_a : Densidad del aire.
- u : Velocidad del viento.
- g : Aceleración de la gravedad.

Factor de visión.

A efectos de cálculo se utiliza el valor máximo entre las dos orientaciones extremas referidas al factor de visión del cilindro inclinado sobre una superficie horizontal y sobre una superficie vertical:

$$F = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \tag{10}$$

La TNO [26] propone las siguientes expresiones para calcular F_h y F_v :

$$\pi F_v = -E \tan^{-1} D + E \left(\frac{a + (b + 1)^2 - 2a(1 + b \sin \theta)}{AB} \right) \tan^{-1} \left(\frac{AD}{B} \right) + \frac{\cos \theta}{C} \tan^{-1} \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F \sin \theta}{C} \right) \tag{11}$$

$$\pi F_h = -\tan^{-1} \left(\frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \left(\tan^{-1} \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F \sin \theta}{C} \right) \right) \left(\frac{a^2 + (b + 1)^2 - 2(b + 1 + ab \sin \theta)}{AB} \right) \tan^{-1} \left(\frac{AD}{B} \right) \tag{12}$$

Siendo:

- r : Radio del charco.
- x : Distancia desde el centro de la llama al receptor.
- L : Altura de la llama.

$$a = L/r$$

$$b = x/r$$

$$A = \sqrt{a^2 + (b + 1)^2 - 2a(b + 1) \sin \theta}$$

$$B = \sqrt{a^2 + (b - 1)^2 - 2a(b - 1) \sin \theta}$$

$$C = \sqrt{1 + (b^2 - 1) \cos \theta}$$

$$D = \sqrt{(b - 1)/(b + 1)}$$

$$E = (a \cos \theta)/(b - a \sin \theta)$$

$$F = \sqrt{b^2 - 1}$$

2.5 POTENCIA EMISIVA ESPECÍFICA DE LA LLAMA

Una parte importante de la llama queda escondida detrás de una espesa capa de humo por lo que se consideran dos zonas a efectos de la emisión radiante:

- Los destellos, donde el proceso de combustión se realiza adecuadamente, que alcanzan temperaturas de 1200 K a 1400 K.
- Los humos, que llegan a ocupar el 90 % de la superficie emisiva, donde la temperatura no supera los 800 K.

Un estudio realizado por el CERTEC [35], utilizando gasolina y diesel, concluye que los incendios presentan un poder de radiación creciente para diámetros de hasta 5 metros. A partir de este diámetro la potencia emisiva de la parte luminosa de la llama, E_{lum} , permanece constante a la vez que aumenta la presencia de humos por lo que va decreciendo la potencia emisiva total, hasta que, a partir de 20 metros de diámetro, la superficie de la llama está prácticamente cubierta por humo y se considera que la fracción luminosa se estabiliza en el 5 %.

Este estudio sitúa los valores de E_{lum} entre [80,120] kW m⁻² y la potencia emisiva de los humos, E_h , en 40 kW m⁻², constante e independiente del tipo de fuel y del diámetro.

La potencia emisiva total sigue la ecuación:

$$E_t = X_{lum} E_{lum} + (1 - X_{lum}) \cdot E_h \tag{13}$$

Siendo X_{lum} la fracción de la parte luminosa de la llama.

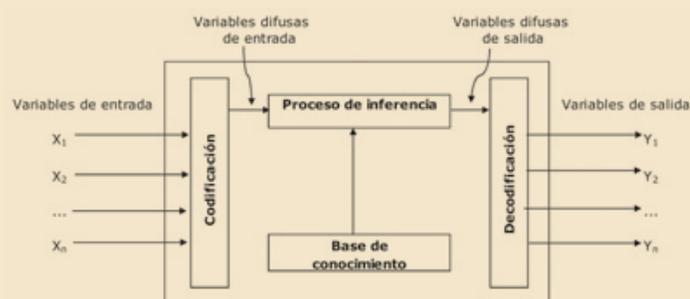
3. APROXIMACIÓN DE LÓGICA DIFUSA AL MODELO DE LLAMA SÓLIDA

3.1 JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

El modelo de llama sólida presenta dificultades para definir con precisión los datos utilizados en la estimación de las áreas de riesgo. Estas dificultades están asociadas con las características de la llama (geometría, temperatura, potencia emisiva), el proceso de combustión (formación de humos), las condiciones atmosféricas (temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento) y las características del receptor (tipo, dimensiones, ubicación y orientación con respecto a la llama,

SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA

Un sistema de inferencia difusa se compone de varios procesos. El proceso de codificación define las variables de entrada como conjuntos difusos de acuerdo a la información disponible y a la valoración de los expertos. Un conjunto difuso es un conjunto de límites imprecisos que puede contener elementos con un grado parcial de pertenencia. El grado de pertenencia de cada elemento se define por una curva denominada función de pertenencia que toma valores entre 0 y 1. El proceso de inferencia relaciona las variables difusas de entrada y salida mediante un conjunto de reglas tipo IF-THEN, que constituyen una base de conocimiento también definida por expertos. El proceso de inferencia aplicado habitualmente es el método de inferencia de Mamdani. Por último, el proceso de decodificación convierte los valores difusos de salida en valores concretos, utilizando diferentes métodos: cálculo del centro de gravedad y cálculo del centro de área, entre otros.



y tiempo de reacción). Como consecuencia el modelo presenta un alto grado de incertidumbre debido tanto a la variabilidad de los procesos (conocida como incertidumbre aleatoria) como a la falta de información (denominada incertidumbre epistémica), por lo que una evaluación completa de las zonas de riesgo debe incluir una estimación de la exactitud de los valores asignados a las distintas variables, en caso contrario se puede transmitir una sensación de precisión en los resultados que no se ajusta a la realidad. El uso de una aproximación que utilice lógica difusa puede ser apropiado para superar las limitaciones debidas a esta incertidumbre.

La aproximación propuesta considera catorce variables, obtenidas de distintas fuentes y procedimientos, y un conjunto de expresiones matemáticas que culminan en la determinación de la intensidad de radiación térmica por lo que se analiza una organización modular y jerárquica, estructurada como un sistema jerárquico de inferencia difusa.

Sistema jerárquico de inferencia difusa.

Un sistema jerárquico se construye a partir de sistemas básicos de inferencia difusa (SBID). Un sistema básico difuso tiene un máximo de dos variables difusas de entrada y una variable difusa de salida.

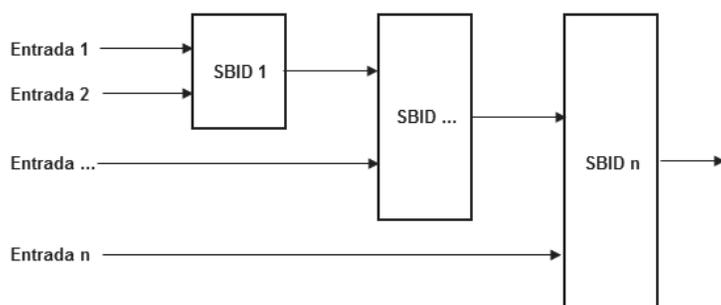


Figura 4: Estructura de un sistema jerárquico de inferencia difusa

Cada SBID convierte sus variables de entrada en conjuntos difusos y crea el proceso de inferencia que permite estimar la variable de salida. Esta variable de salida se incorpora, a su vez, al siguiente sistema básico hasta completar el sistema jerárquico como se indica en la Figura 4.

3.2 DEFINICIÓN DE LA PROPUESTA

Inicialmente el sistema identifica las variables que determinan la magnitud del incendio. Estas variables son las variables de entrada del sistema de inferencia difusa. Cuatro de estas variables son de medida incierta: potencia emisiva de la zona luminosa de la llama, diámetro, velocidad del viento y distancia llama-receptor. Estas variables inciertas se definen como conjuntos difusos siguiendo las indicaciones de los expertos en el proceso de codificación. Las dos variables restantes: caudal másico y presión de vapor de agua, son variables tabuladas que dependen del combustible y la temperatura respectivamente.

Para definir un conjunto difuso hay que establecer el rango de la variable, las categorías en que se divide la variable dentro de este rango y sus funciones de pertenencia. A modo de ejemplo la función de pertenencia de la velocidad del viento, establecida a partir de la escala de Beaufort se muestra en la Figura 5.

A partir de las variables de entrada y siguiendo la secuencia propuesta se construyen los sistemas básicos de inferencia, en este caso son seis sistemas que permiten estimar los valores de las variables de salida: la potencia emisiva total, la altura de la llama, la velocidad característica del viento, el coeficiente de transmisividad del aire, la velocidad adimensional del viento y, por último, la intensidad de radiación térmica. En cada sistema básico actúa una base de conocimiento (como un conjunto de reglas lingüísticas del tipo IF-THEN) que determina la relación entre las variables de entrada y la variable de salida.

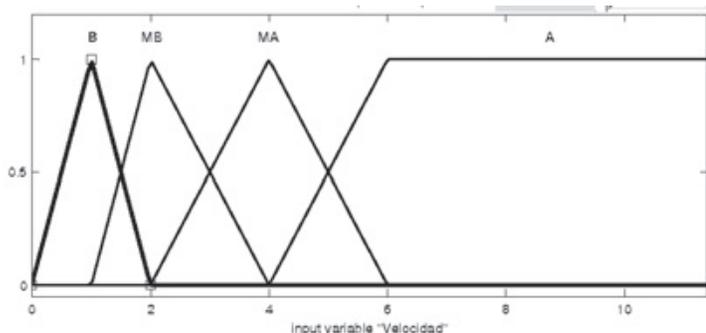


Figura 5: Función de pertenencia de la velocidad del viento

Así la relación existente entre, por ejemplo, las variables de entrada: potencia emisiva de la zona luminosa (destellos) y diámetro y la variable de salida: potencia emisiva total de la llama (Etotal) se puede representar en un gráfico tridimensional como muestra la Figura 6.

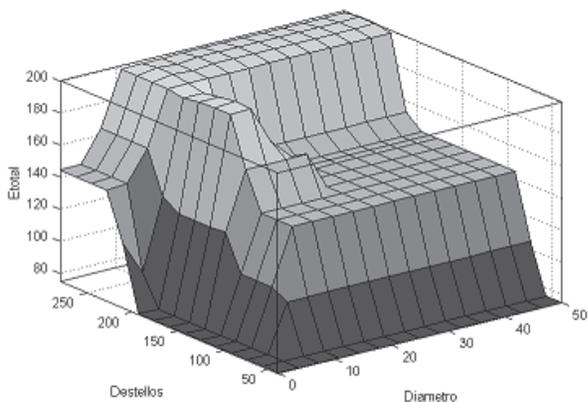


Figura 6: Relación entre variables de entrada y variable de salida

El desarrollo completo de los procesos de codificación y de inferencia se puede seguir en el enlace: http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/pdfs/_adic/4497_2.pdf

4. VALIDACIÓN DE LA APROXIMACIÓN PROPUESTA

Para la validación de la propuesta se han seleccionado tres experimentos con incendios de hidrocarburos que están suficientemente documentados para, posteriormente, contrastar los resultados de estos experimentos con los pronosticados por la aproximación propuesta. A continuación se describen brevemente las condiciones en que se realizaron estas pruebas y los resultados obtenidos.

4.1 EXPERIMENTOS

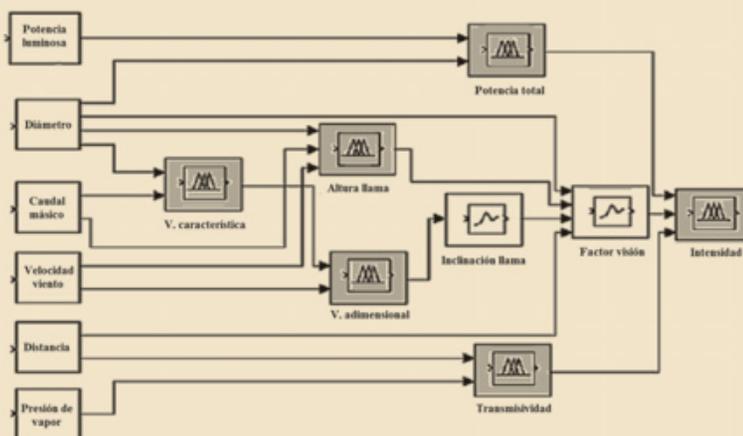
4.1.1 CERTEC

Los tests, [35] y [36], se realizaron en una instalación del Centro de estudios del riesgo tecnológico (CERTEC) de la Universidad Politécnica de Cataluña. Se utilizó gasolina y diesel como combustibles sobre una base de agua, empleando cinco piscinas circulares concéntricas de hormigón reforzado de diámetros: 1.5, 3, 4, 5 y 6 metros.

Las condiciones climatológicas se registraron usando una estación meteorológica colocada a 10 m de altura. La temperatura de la llama se midió con un conjunto de termopares colocados en diferentes posiciones sobre una estructura metálica y sobre cables que cruzaban los charcos de incendio a distintas alturas. El caudal másico se midió con un sistema de vasos comunicantes. Los experimentos fueron filmados usando dos cámaras de video y una cámara termográfica comercial. También se utilizaron radiómetros de gran angular para medir la radiación térmica emitida por la llama. Los valores obtenidos se recogen en la Tabla 4.

APROXIMACIÓN DE LÓGICA DIFUSA AL MODELO DE LLAMA SÓLIDA

El sistema jerárquico difuso propuesto está formado por seis sistemas básicos de inferencia difusa (sombreados en el gráfico) conectados entre sí, de manera que cada uno de estos sistemas cuenta con un máximo de dos variables difusas de entrada y una variable difusa de salida. A la izquierda se alinean las variables de entrada. A partir de estas variables, los distintos sistemas básicos estiman secuencialmente las variables difusas de salida, el proceso se completa al determinar la intensidad de radiación térmica del incendio.



Diámetro (m)	Gasolina			Diesel		
	E_{lum} ($kw\ m^{-2}$)	E_t ($kw\ m^{-2}$)	L (m)	E_{lum} ($kw\ m^{-2}$)	E_t ($kw\ m^{-2}$)	L (m)
1,5	65,0	52,0	3,8	40,0	40,0	3,5
3,0	90,3	63,0	6,9	73,5	53,0	6,3
4,0	103,5	68,0	8,7	94,5	52,0	8,0
5,0	115,0	73,0	10,6	115,0	63,0	9,7
6,0	115,0	61,0	12,3	115,0	60,0	11,3

Tabla 4: Resultados experimento Certec

Los tests se realizaron en condiciones de baja velocidad de viento, observándose un ángulo medio de inclinación de la llama próximo a 15° para una velocidad adimensional del viento próxima a la unidad.

4.1.2 Gaz de France (Montoir de Bretagne)

Se realizaron tres experimentos de 35 metros de diámetro sobre un dique aislado de hormigón, [23] y [37].

Se midieron variables como el índice de evaporación de líquido, las dimensiones físicas y el calor radiante, utilizando instrumentos colocados dentro y fuera del dique. Se emplearon radiómetros para medir la potencia emisiva de la llama. Dentro del dique se emplearon dos conjuntos verticales de termopares, un sistema de vasos comunicantes para evaluar el caudal másico y seis calorímetros para medir el calor aportado por el fuego.

El volumen de metano derramado en cada prueba estaba en torno a los $200\ m^3$. La profundidad de metano en el dique varió entre 80 y 110 mm debido a diferencias en el volumen derramado y en la duración del derrame. Los tests 1 y 3 se realizaron con vientos de velocidad baja, $[2,7,4,8]$ m/s y el test 2 se realizó con viento moderado $[7,10]$ m/s. Las condiciones de las pruebas y algunos resultados se recogen en la Tabla 5.

Test	E_{lum} ($kw\ m^{-2}$)	E_t ($kw\ m^{-2}$)	Caudal másico ($kw\ m^{-2}\ s$)	L (m)	Angulo llama (grados)
1	$260,5 \pm 6,4$	$168,4 \pm 45,7$	0,146	$75,0 \pm 7,1$	$47,0 \pm 9,9$
2	$264,8 \pm 6,6$	$188,6 \pm 55,4$	0,142	$77,8 \pm 4,3$	$57,3 \pm 3,2$
3	$261,3 \pm 2,5$	$167,4 \pm 44,7$	0,134	$71,0 \pm 1,0$	$44,7 \pm 8,1$

Tabla 5: Resultados experimento Montoir

Test	Volumen derrame (m^3)	Duración derrame (s)	Ratio derrame ($m^3\ s^{-1}$)	Diámetro (m)	E_t ($kw\ m^{-2}$)	Caudal másico ($Kg\ m^{-2}\ s$)	L (m)
3	4,2	49	0,0857	11,5	207 ± 5	0,433	$47,2 \pm 3,9$
4	4,2	248	0,0169	9,0	200 ± 11	0,153	$25,5 \pm 6,3$
5	3,0	32	0,0938	12,8	187 ± 29	0,404	$55,0 \pm 8,5$
12	5,7	81	0,0704	14,0	224 ± 13	0,222	$44,0 \pm 6,3$
6	5,7	52	0,1096	15,0	185 ± 6	0,363	$42,0 \pm 6,4$

Tabla 6: Resultados experimento China Lake

4.1.3 China Lake

Experimento realizado en el Naval Weapons Center de China Lake, California. Se realizaron 16 pruebas, correspondiendo 7 pruebas a incendios de charco, [23] y [38], mediante el derrame de metano sobre una superficie de agua.

El volumen derramado varió entre $3\ m^3$ y $5\ m^3$, y la ignición se activaba cerca del punto de derrame tan pronto como el metano entraba en contacto con el agua, dando lugar a columnas de fuego. La mayoría de los tests se realizaron en condiciones de baja velocidad de viento. Se utilizaron radiómetros para medir la potencia emisiva y espectrómetros para observar el espectro de emisión del fuego. La temperatura de la llama se situó en torno a los 1.500 K. Las condiciones de las pruebas y algunos de sus resultados se presentan en la Tabla 6.

Se estableció una relación entre el ratio de derrame (volumen/duración del derrame (m^3/s)) y el caudal másico.

4.2 DESARROLLO DE LA APROXIMACIÓN DIFUSA

Se utilizó la aproximación propuesta para predecir los valores de tres variables: potencia emisiva total, altura de la llama y ángulo de inclinación de la llama; empleando cuatro

sistemas de inferencia difusa: potencia total, velocidad característica, velocidad adimensional y altura de la llama. El ángulo de inclinación de la llama se estima a partir de los valores de la velocidad adimensional.

Potencia emisiva total.

La Figura 9 presenta los valores observados en los experimentos y los valores pronosticados por el sistema de inferencia difusa.

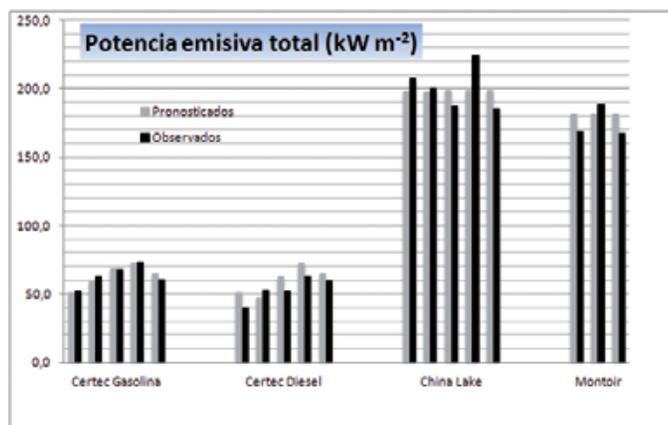


Figura 9: Potencia emisiva total

Altura de la llama.

La Figura 10 presenta los valores observados en los experimentos y los valores pronosticados por el sistema de inferencia difusa de acuerdo a la expresión (14). La modificación del diámetro es proporcional al caudal másico por lo que se definen tantas funciones de pertenencia diferentes como valores de esta variable se observan en los distintos tests realizados.

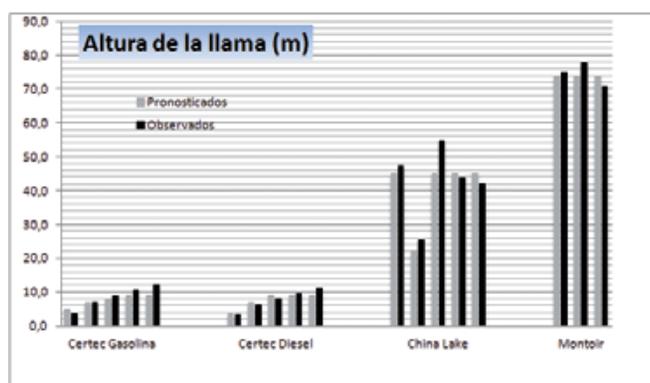


Figura 10: Altura de la llama

Angulo de inclinación de la llama.

La Figura 11 presenta los valores observados en los experimentos y los valores pronosticados. También con esta

variable se definen tantas funciones de pertenencia diferentes como valores de caudal másico se observan en los distintos tests realizados. El experimento China Lake no midió esta variable. Para los valores pronosticados se han considerado velocidades de viento de 1.4 m/s y 0.9 m/s en los tests de Certec gasolina y Certec Diesel, 3.75 m/s en los tests 1 y 3 de Montoir, y 8.5 m/s en el test 2.

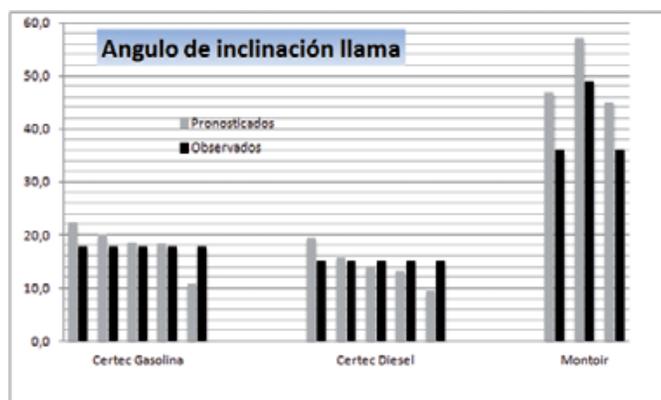


Figura 11: Angulo de inclinación de la llama

4.3 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Para comparar los valores observados y los pronosticados se utilizan dos estadísticos: el error cuadrático mínimo normalizado (ECMN) y el sesgo fraccional (SF), utilizados por Rew y otros, [39], y posteriormente por Muñoz y otros, [36].

Si una cantidad X tiene n valores pronosticados, X_p, y sus correspondientes valores observados, X_o, los estadísticos ECMN y SF se definen como:

$$ECNM = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{(X_o - X_p)^2}{X_o X_p} \tag{14}$$

$$SF = \frac{2}{n} \sum_1^n \frac{(X_o - X_p)}{(X_o + X_p)} \tag{15}$$

Potencia emisiva total	Certec Gasolina	Certec Diesel	Montoir Metano	China Lake Metano
ECMN	0,0016	0,0270	0,0043	0,0051
SF	0,0041	-0,1086	-0,0364	0,0085
Altura de la llama	Certec Gasolina	Certec Diesel	Montoir Metano	China Lake Metano
ECMN	0,0416	0,0203	0,0014	0,0134
SF	0,0540	-0,0106	0,0083	0,0589
Angulo de inclinación de la llama	Certec Gasolina	Certec Diesel	Montoir Metano	
ECMN	0,0668	0,0634	0,0481	
SF	-0,0086	-0,0726	0,2127	

Tabla 7: Comparación de resultados.

	Certec Gasolina	Certec Diesel	Montoir Metano	China Lake Metano
Potencia emisiva total	100.0%	60.0%	100.0%	100.0%
Altura de la llama	40.0%	80.0%	100.0%	80.0%
Angulo de inclinación de la llama	60.0%	60.0%	33.3%	-----

Tabla 8: Fracción de los valores que verifican la condición

El ECNM permite medir la precisión de la simulación y el sesgo fraccional proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable. Los resultados se recogen en la Tabla 7.

La aproximación propuesta para la potencia emisiva total parece ajustarse mejor a los resultados observados en Certec Gasolina, Montoir y China Lake. En cuanto a la altura de la llama, la aproximación presenta mejores resultados en el test de Montoir para ambos estadísticos. El ángulo de inclinación de la llama presenta un índice ECNM del mismo orden de magnitud en los tres tests analizados. (Como se indica en el apartado anterior, el experimento China Lake no midió esta última variable). En todos los casos, el índice SF toma valores positivos y negativos por lo que no muestra tendencia a sobreestimar o subestimar los resultados.

La Tabla 8 refleja un índice de similaridad, propuesto por Hanna y otros [40], que representa el porcentaje de valores pronosticados de cada una de las variables que se sitúan en un intervalo del $\pm 15\%$ de los valores observados en los distintos experimentos.

Los valores pronosticados y los observados parecen similares en cuanto a la potencia emisiva total (con la excepción de Certec Diesel que presenta un índice de similaridad del 60 %) y a la altura de la llama (salvo en el caso de Certec Gasolina con un índice del 40 %), mientras que no parece existir similaridad entre valores pronosticados y valores observados para el ángulo de inclinación de la llama.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza un sistema jerárquico de inferencia difusa que puede contribuir a la gestión de la incertidumbre asociada al análisis de los incendios de hidrocarburos y que puede complementar al modelo tradicional de llama sólida.

La propuesta presentada puede ser un apoyo para la toma de decisiones al describir el conocimiento disponible y puede aportar una mayor flexibilidad a expertos y decisores ya que facilita un margen en la definición de las variables de entrada.

La aproximación difusa se aplica a tres experimentos para su validación. La propuesta resulta ser una aproximación razonable para dos de las variables analizadas: potencia emisiva total y altura de la llama, al contrario de lo que

sucede en lo referido al ángulo de inclinación de la llama.

Esta propuesta puede extenderse a procesos que cuenten con un modelo de cálculo contrastado y con un alto grado de incertidumbre y, en particular, a otros tipos de incendio de hidrocarburos en los que se aplica el modelo de llama sólida como los incendios de bolas de fuego y los dardos de fuego. No se tiene constancia de trabajos en este campo.

Una línea futura de investigación, que por su magnitud puede ser el origen de nuevas publicaciones, puede dedicarse al análisis de sensibilidad de las predicciones respecto de los supuestos establecidos en las funciones de pertenencia del sistema difuso definido.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Zadeh LA. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol.8 p.338-353.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [2] Moore R. Interval analysis. Science. 1966. Vol.20 p.159.
- [3] Zadeh LA. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy sets and systems. 1977. Vol.100 p.9-34.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)80004-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114(99)80004-9)
- [4] Zadeh LA. Outline of a computational theory of perceptions based on computing with words. Soft Computing and intelligent systems. 2007. Vol.2000 p. 3-22
- [5] Klir GJ. On fuzzy-set interpretation of possibility theory. Fuzzy sets and systems. 1999. Vol.108 p.263-273.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00371-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00371-0)
- [6] Dubois D. Possibility theory and statistical reasoning. Computational statistic and data analysis. 2006. Vol.51 p.33
- [7] Dubois D, Prade H. Fuzzy set and possibility theory-based methods in artificial intelligence. Artificial intelligence. 2003. Vol.148 p. 1-9.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0004-3702\(03\)00118-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0004-3702(03)00118-8)
- [8] Zadeh LA. From computing with numbers to computing with words. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. 2002. Vol.12 p. 307-324.
- [9] Ross TJ. Fuzzy logic with engineering applications. 2ª Edición. West Sussex: John Wiley and sons Ltd, 2004. 650 p. ISBN:978-0-470-86075-5
- [10] Dubois D, Prade H. Gradual elements in a fuzzy set. Soft Computing. 2008. Vol.12 p.165-175.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00500-007-0187-6>
- [11] Liu KF, Lai JH. Decision-support for environmental impact assessment: a hybrid approach using fuzzy logic and fuzzy analytic network process. Expert system applications. 2009. Vol.36 p. 5119-5136
- [12] de Sequeira A, de Mello R. A decision support method for environmental impact assessment using a fuzzy logic approach. Ecological Economics. 2006. Vol.58 p. 170-181.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.06.007>
- [13] Markowski A, M.S. Mannan. Fuzzy risk matrix. Journal of hazardous materials. 2008. Vol.159 p.152-157.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.055>
PMid:18440700

- [14] Karimi I, Hullermeier F. Risk assessment system of natural hazards: a new approach based on fuzzy probability. *Fuzzy sets and systems*. 2007. Vol.158 p. 987-999. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fss.2006.12.013>
- [15] Xu Z, Shang S, Qian W et al. A method for fuzzy risk analysis based on the new similarity of trapezoidal fuzzy numbers. *Expert system applications*. 2010. Vol.37 p.1920-1927. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.07.015>
- [16] Muré S, Demichela M. Fuzzy application procedure for the risk assessment of occupational accidents. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2009. Vol.22 p.593-599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2009.05.007>
- [17] Markowski A, Mannan MS. Fuzzy logic for piping risk assessment. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2009. Vol.22 p.921-927. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2009.06.011>
- [18] Elsayed T. Fuzzy inference system for the risk assessment of liquefied natural gas carried during loading/offloading at terminals. *Applied ocean research*. 2009. Vol.31 p.179-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2009.08.004>
- [19] Singh M, Markeset T. A methodology for risk-based inspection planning of oil and gas pipes based on fuzzy logic framework. *Engineering failure analysis*. 2009. Vol.16 p.2098-2113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.02.003>
- [20] Liadis LS, Vangeloudh M, Spartalis S. An intelligent system employing and enhanced fuzzy c-means clustering model: Application in the case of forest fire. *Computers and electronics in agriculture*. 2010. Vol.70 p. 276-284. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2009.07.008>
- [21] Paralikas AN, Lygeros AI. A multi-criteria and fuzzy logic based methodology for the relative ranking of the fire hazard of chemical substances and installations. *Process safety and environmental protection*. 2005. Vol.83 p.122-134. <http://dx.doi.org/10.1205/psep.04236>
- [22] Yang L, Jones B, Yang S. A fuzzy multiobjective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms. *Journal of operational research*. 2007. Vol.181 p. 903-915.
- [23] Raj PJ. LNG Fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges. *Journal of Hazard Materials*. 2008. Vol. 140, p. 444-464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.029> PMID:17156916
- [24] Raj PJ. Large LNG fire thermal radiation-Modelling issues & hazard criteria revisited. *Process Safety Progress*. 2005. Vol. 24, p.192-202. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.10082>
- [25] TNO. Methods for the determination of possible damage. *The Green Book*. CPR 16 E. The Hague. The Netherlands. 1989. p.325 ISBN: 90-5307-052-4
- [26] TNO. Methods for the calculation of physical effects. *The Yellow Book*. CPR 14 E. The Hague. The Netherlands. 1997. p. 870.
- [27] Luketa A, Hightower M, Attaway S. Breach and safety analysis of spills over water from large liquefied natural gas carriers. Sandia National Laboratories. Sandia Report. SAND 2008-3153. 2008.
- [28] Luketa A. DOE/Sandia National Laboratories coordinated approach for LNG safety and security research. Staff Subcommittee on Gas, NARUC summer committee meetings, Seattle. 2009.
- [29] Hamins A, Kashiwagi T, Burch RR. Characteristics of pool fire burning. *Fire Resistance of industrial fluids*. 1995. Vol.11284 p. 15-41.
- [30] ESPAÑA. MINISTERIO DEL INTERIOR. Directriz básica de Protección Civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas. Aprobada por el Real Decreto 1196/2003 de 19 de septiembre. 2003.
- [31] Buettner K. Effects of extreme heat and cold on human skin, II. Surface temperature, pain and heat conductivity in experiments with radiation heat. *Journal of Applied Physiology*. 1951. Vol.3 p. 691-702. PMID:14850400
- [32] Metha AK, Wong F, Williams GC. Measurement of flammability and burn potential of fabrics. Summary report to NSF-Grant GI-31881, Fuel Research Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. 1973.
- [33] Moorhouse J. Scaling criteria for pool fires derived from large scale experiments. I. *Chem. E. Symposium Series N° 71*. 1982. p.165-179.
- [34] Babrauskas V. Estimating large pool fire burning rates. *Fire Technology*. 1983. Vol.19 p.251-261 <http://dx.doi.org/10.1007/BF02380810>
- [35] Muñoz M, Planas E, Ferrero F et al. Predicting the emissive power of hydrocarbon pool fires. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol.144 p.725-729. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.121> PMID:17363158
- [36] Muñoz M, Arnaldos J, Casal J, Planas E. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fire. *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 139 p. 263-277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.09.001>
- [37] Malvos H, Raj PK. Thermal emission and other characteristics of large liquefied natural gas fires. *American Institute of Chemical Engineers*. 2006. Vol. 26, N° 3 p. 237-247.
- [38] Luketa A. A review of large-scale LNG spills: experiments and modeling. *Journal of hazardous materials*. 2006. Vol. 132 p. 119-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.008> PMID:16271829
- [39] Rew PJ, Hulbert WG, Deaves, Deavas DM. Modelling of thermal radiation from external hydrocarbon pool fires. *Institution of Chemical Engineers*. 1997. Vol 75, Part B, p. 1-89.
- [40] Hanna SR, Strimaitis DG, Chang JC. Evaluation of fourteen hazardous gas models with ammonia and hydrogen fluoride data. *Journal of hazardous materials*. 1991. Vol. 26 p. 127-158. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3894\(91\)80002-6](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3894(91)80002-6)