

# Modelo de lógica difusa para estimar zonas de planificación en incendios

Alejandro Talavera  
julio - 2010

Trabajo de Fin de Master  
Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería  
Tutores: Blas José Galván González y Ricardo Aguasca Colomo

# Índice

<b>1. Antecedentes</b>	<b>3</b>
1.1. Accidentes graves en la industria química . . . . .	3
1.2. Dosis de radiación térmica . . . . .	3
1.3. Intensidad de radiación térmica . . . . .	4
1.4. Zonas de planificación en incendios . . . . .	4
<b>2. Modelos de superficie emisora</b>	<b>5</b>
2.1. Modelo de llama sólida . . . . .	5
2.2. Coeficiente de transmisividad atmosférica . . . . .	6
2.3. Factor de visión . . . . .	6
2.4. Potencia emisiva específica de la llama . . . . .	8
<b>3. Modelo de comportamiento de la población frente a los incendios</b>	<b>9</b>
3.1. Tiempo efectivo de exposición . . . . .	9
3.2. Incidencia de la distancia entre foco emisor y receptor . . . . .	10
<b>4. Modelo de lógica difusa</b>	<b>10</b>
4.1. Análisis de riesgo en incendios e incertidumbre . . . . .	10
4.2. Base de conocimiento . . . . .	11
4.3. Codificación . . . . .	12
4.3.1. Velocidad del viento . . . . .	13
4.3.2. Diámetro del charco . . . . .	14
4.3.3. Potencia emisiva de los destellos . . . . .	16
4.3.4. Distancia foco-receptor . . . . .	17
4.4. Sistema de inferencia . . . . .	18
4.4.1. Potencia emisiva total . . . . .	18
4.4.2. Velocidad característica del viento . . . . .	19
4.4.3. Coeficiente de transmisividad del aire . . . . .	21
4.4.4. Altura de la llama . . . . .	22
4.4.5. Velocidad adimensional del viento . . . . .	23
4.4.6. Angulo de inclinación de la llama . . . . .	25
4.4.7. Factor de visión . . . . .	25
4.4.8. Intensidad térmica de radiación . . . . .	26
4.5. Desarrollo del modelo propuesto . . . . .	27
<b>5. Establecimiento de las zonas de planificación</b>	<b>29</b>
5.1. Incertidumbre . . . . .	29
5.2. Sectorización . . . . .	29

5.3. Zonas de planificación . . . . .	31
<b>6. Validación del modelo propuesto</b>	<b>31</b>
<b>7. Conclusiones y desarrollos futuros</b>	<b>38</b>
<b>8. Anexo</b>	<b>40</b>

# 1. Antecedentes

## 1.1. Accidentes graves en la industria química

La industria química se caracteriza por la utilización de sustancias combustibles que tienen un alto potencial de impacto sobre las personas, los bienes y el medio ambiente en caso de producirse accidentes graves.

Estos accidentes pueden originar diversos fenómenos peligrosos:

- De tipo mecánico: ondas de presión y proyectiles.
- De tipo térmico: radiación térmica.
- De tipo químico: nube tóxica o contaminación del medio ambiente provocada por la fuga o vertido incontrolado de sustancias peligrosas.

La Directriz Básica de Protección Civil [1] define los fenómenos térmicos peligrosos como aquellos que son provocados por la oxidación rápida, no explosiva, de sustancias combustibles, produciendo llama, que puede ser estacionaria (incendio de charco, dardo de fuego) o progresiva (llamarada, bola de fuego), pero que en todos los casos disipa la energía de combustión principalmente por radiación.

La mayoría de los escenarios comunes de incendio pueden ser considerados como incendio de charco, entendido como una llama de difusión flotante en la que la base de combustible está configurada horizontalmente [2].

## 1.2. Dosis de radiación térmica

Tanto en la bibliografía especializada como en la legislación se acepta la dosis de radiación térmica como el índice más adecuado para establecer el nivel de daño producido en un incendio porque considera no solo la intensidad de radiación térmica sino también el tiempo de exposición.

La formulación matemática de dosis de radiación térmica,  $(Kw/m^2)^{4/3}s$ , según la define TNO [9] es la siguiente:

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

Esta ecuación es válida para un régimen estacionario en el que foco emisor es fijo y los afectados permanecen inmóviles.

### 1.3. Intensidad de radiación térmica

Tal como recoge la Guía Técnica [3] para estimar la intensidad de radiación térmica sobre cualquier receptor se deben tener en cuenta numerosos factores relacionados con la geometría de la llama, el calor generado por la combustión, la fracción emitida en forma de radiación, la formación de humos, la radiación absorbida por la atmósfera y la posición del objeto entre otros. Estos factores se pueden agrupar en cuatro bloques:

- Propiedades del combustible, que incluye: entalpía de combustión, entalpía de vaporización, temperatura de ebullición y calor específico del líquido.
- Características de la llama: temperatura , potencia emisiva y geometría (altura de la llama y diámetro del charco).
- Otros procesos químicos implicados en la combustión: formación de humos y productos gaseosos parcialmente quemados que disminuyen de forma sustancial la potencia emisiva de la llama.
- Características del receptor (tipo, dimensiones, ubicación y orientación respecto de la llama) y condiciones atmosféricas ( en especial la velocidad y dirección del viento).

### 1.4. Zonas de planificación en incendios

Las diferencias de temperatura que tienen lugar en un incendio originan un flujo de calor que puede causar daño en las personas y los objetos que se encuentran en los alrededores del incendio. Como es sabido el daño más importante que causa en las personas se manifiesta en forma de quemaduras que se clasifican en primero, segundo y tercer grado de acuerdo a la gravedad del daño producido.

La citada Directriz Básica de Protección Civil establece dos zonas de planificación:

1. La zona de alerta, es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención excepto para los grupos críticos de población.
2. La zona de intervención, es aquella en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección.

Tabla 1: Delimitación de zonas de planificación

Dosis de radiación	Quemaduras	Zona de planificación
115 $Kw/m^2 s$	Primer grado	Alerta
250 $Kw/m^2 s$	Segundo grado	Intervención

En la práctica, el límite inferior de la zona de alerta se establece en los lugares donde las personas pueden sufrir quemaduras de primer grado y el límite inferior de la zona de intervención se establece en los lugares donde las personas pueden sufrir quemaduras de segundo grado.

Partiendo de datos experimentales recogidos en [4],[5] y [6] se establece la relación entre dosis de radiación térmica y tipo de quemaduras, es decir, entre dosis de radiación térmica y zonas de planificación como refleja la Tabla 1.

## 2. Modelos de superficie emisora

### 2.1. Modelo de llama sólida

En las proximidades del punto donde se desarrolla la llama existe transmisión de calor por convección, por radiación y por conducción. A partir de cierta distancia del foco de emisión, la transmisión de calor se efectúa exclusivamente por radiación, disminuyendo su intensidad al alejarnos del foco.

Teóricamente el calor procedente de la superficie radiante de una llama se puede calcular aplicando la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$E = \varepsilon\sigma(T_{ll}^4 - T_{amb}^4) \quad (2)$$

Siendo  $\varepsilon$  el coeficiente de emisión, comprendido entre 0 y 1, y  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann que toma el valor:  $5'6703 \cdot 10^{-8} J/(m^2 s T^4)$ .

En la práctica no es fácil fijar el valor de  $\varepsilon$  ni conocer la temperatura de la llama,  $T_{ll}$ , que además no es uniforme a lo largo de toda la superficie emisora, por lo que a efectos de cálculo se usan los modelos de superficie emisora que simplifican el proceso de transmisión de calor por radiación en 3D.

Entre estos modelos el más utilizado es el modelo de llama sólida que se fundamenta en una modelización de la llama y que parte de los siguientes supuestos:

- La llama se representa con geometrías tridimensionales sencillas, cuyas dimensiones se corresponden aproximadamente con las del incendio.

- La energía radiante se emite uniformemente a través de la superficie exterior de la llama, considerando como emisora solo la zona visible de la misma.
- La intensidad de radiación térmica, ( $Kw/m^2$ ), se calcula mediante la expresión:

$$I = \tau FE \quad (3)$$

Siendo:

$\tau$  : Coeficiente de transmisividad atmosférica.

F: Factor de visión.

E: Potencia emisiva de la llama ( $Kw/m^2$ )

## 2.2. Coeficiente de transmisividad atmosférica

Cuando el receptor está algo alejado de la llama, la radiación emitida es parcialmente atenuada por la absorción que produce el medio durante el trayecto entre la llama y el receptor. En la atmósfera, la radiación es absorbida principalmente por el dióxido de carbono y el vapor de agua.

A partir de los coeficientes de absorción se define el coeficiente de transmisividad:

$$\tau = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (4)$$

El valor de  $\alpha_c$  es pequeño frente a  $\alpha_w$  y puede despreciarse o tomar un valor constante [3].

A su vez la concentración de vapor de agua depende de la temperatura y de la humedad del medio.

TNO [7] propone relacionar 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, generalmente desconocida, un valor intermedio de 1.200°K. Esta relación se refleja en la figura 1.

## 2.3. Factor de visión

El factor de visión es la relación entre la energía de radiación emitida y la recibida por unidad de área. Este factor está determinado por las dimensiones y la forma de la llama, y por la posición relativa y la orientación del receptor.

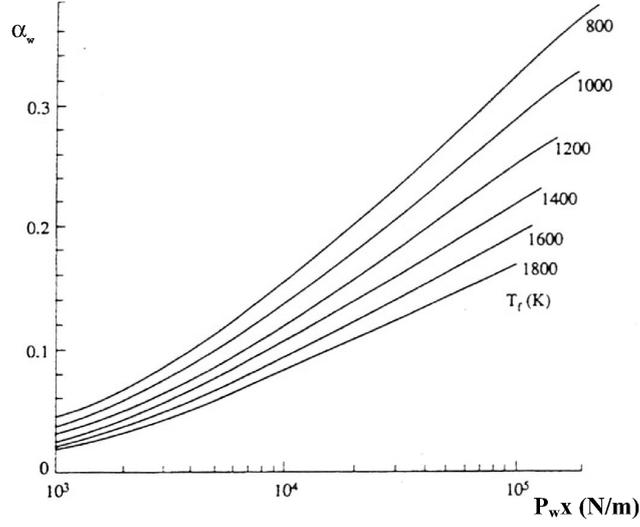


Figura 1: Coeficiente de absorción del vapor de agua

Lo más habitual en los casos de incendios de charco es aproximar la geometría de la llama a un cilindro cuya base corresponde a la superficie del charco, considerada circular, y su altura es la alcanzada por las llamas (Figura 2) que, en caso de existir viento, estará inclinado.

Según la propuesta realizada por la American Gas Association [8], que es la que más se acerca a los resultados experimentales [3], el ángulo de inclinación de la llama toma los valores siguientes:

$$\theta = \begin{cases} 0 & u^* < 1 \\ \arccos \frac{1}{\sqrt{u^*}} & u^* \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

Donde  $u^*$  es la velocidad adimensional del viento que sigue la siguiente expresión:

$$u^* = \frac{u}{u_c} = \frac{u}{\left(\frac{gm'D_{ch}}{\rho_a}\right)^{1/3}} \quad (6)$$

Siendo:

$u$ : Velocidad real del viento a 10m. sobre el suelo ( $m/s$ )

$u_c$ : Velocidad característica del viento (velocidad a partir de la cual el viento empieza a inclinar la llama)( $m/s$ ).

$m'$ : Caudal másico de combustible evaporado por unidad de superficie ( $Kg/m^2s$ ).

$D_{ch}$ : Diámetro del charco (m).

$g$ : Aceleración gravitacional ( $m/s^2$ ).

$\rho_a$ : Densidad del aire ( $Kg/m^3$ ).

La Tabla 2 recoge los caudales máxicos de evaporación de algunos materiales inflamables, obtenidos experimentalmente para incendios de gran diámetro [17].

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:

$$F = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \quad (7)$$

## 2.4. Potencia emisiva específica de la llama

En los grandes incendios de hidrocarburos una parte importante de la llama queda escondida detrás de una espesa capa de humo negro por lo que, desde el punto de vista de la emisión radiante, existen dos zonas:

- Los destellos, donde el proceso de combustión se realiza adecuadamente y se alcanzan temperaturas de 1.200°K a 1.400°K y
- Los humos, que llegan a ocupar el 80-90 % de la superficie emisiva y donde la temperatura no supera los 800°K.

Para este tipo de incendios, Mudan [10] propone la expresión:

$$E_t = 140 \cdot 0,887^{D_{ch}} + 20 (1 - 0,887^{D_{ch}}) \quad (8)$$

Tabla 2: Caudal máxico de evaporación ( $Kg/m^2s$ )

Material inflamable	Caudal máxico
<i>Liq.H<sub>2</sub></i>	0,169
LNG	0,078
LPG	0,099
Butano	0,078
Hexano	0,074
Heptano	0,101
Benceno	0,085
Xileno	0,090
Gasolina	0,055
Keroseno	0,039
JP-5	0,054
Metanol	0,015
Etanol	0,015

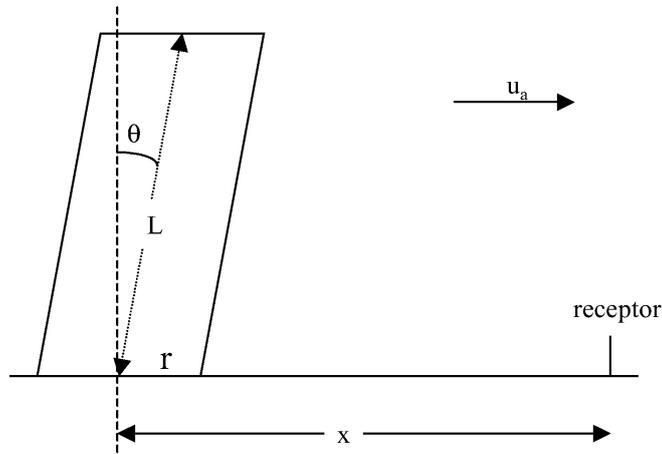


Figura 2: Modelo geométrico de incendio en charco con llama inclinada por la acción del viento

De acuerdo a esta fórmula, la fracción luminosa es del 89 % para diámetros de 1 *m.* y de solo el 9 % para diámetros de 20 *m.*, debido a la combustión incompleta por falta de oxígeno en la zona central de la llama en incendios grandes.

### 3. Modelo de comportamiento de la población frente a los incendios

#### 3.1. Tiempo efectivo de exposición

TNO [9] propone un modelo de comportamiento de la población frente a los incendios, suponiendo un régimen no estacionario en el que los afectados intentarán alejarse del foco del incendio hasta encontrar protección o salir de la zona peligrosa. Este modelo sigue las hipótesis siguientes:

- El tiempo de exposición a la radiación será igual a la suma del tiempo requerido para reaccionar, establecido en 5 s., más el tiempo necesario para escapar (a una velocidad media de 4 *m/s*) hasta una distancia en la que la intensidad de radiación sea de 1,7 *Kw/m<sup>2</sup>*, que es el valor de radiación a partir del cual no existe sensación de dolor según distintos estudios.

- La dosis de radiación térmica se puede descomponer también en dos partes:

$$D_{total} = D_{reaccion} + D_{escape} \quad (9)$$

$$D_{total} = 5 I_0^{4/3} + \int_0^{t_{esc}} I^{4/3} dt \quad (10)$$

Siendo:

$$x_{1,7} = x_0 + 4 t_{esc}$$

$$dx = 4 dt$$

### 3.2. Incidencia de la distancia entre foco emisor y receptor

Aplicando el modelo de llama sólida se pueden relacionar los valores de intensidad y distancia foco-receptor [11], obteniéndose una expresión potencial del tipo:

$$I = \frac{A^*}{x^a} \quad (11)$$

De acuerdo a las hipótesis del modelo se llega a la expresión:

$$D = 5 \left( \frac{A^*}{x_0^a} \right)^{4/3} + \frac{3}{4} \frac{(A^*)^{4/3}}{(3-4a)} \left( x_{1,7}^{\frac{3-4a}{3}} - x_0^{\frac{3-4a}{3}} \right) \quad (12)$$

Siendo  $x_0$  la posición inicial y  $x_{1,7}$  la posición que corresponde a una intensidad de  $1,7 Kw/m^2$ .

Esta última ecuación permite determinar la dosis recibida por cualquier afectado que se encuentre a una distancia inicial  $x_0$ .

## 4. Modelo de lógica difusa

### 4.1. Análisis de riesgo en incendios e incertidumbre

El modelo de llama sólida, aceptado de forma general como método de cálculo para medir la magnitud de las consecuencias de un incendio sobre las personas y los objetos y, por tanto, como parte de un estudio general de análisis de riesgo, tiene asociado un alto grado de incertidumbre debido a:

- La variabilidad de los procesos implicados.

- La dificultad para modelar alguno de los fenómenos que se desencadenan.
- La falta de datos sobre la información a considerar.

En esta situación el uso de un modelo de lógica difusa puede ser apropiado para superar las limitaciones debidas a datos imprecisos y, en ocasiones, de valor desconocido.

Las estimaciones de los datos procederán de la información disponible y de la experiencia y conocimiento de los expertos, por lo que tendrán un carácter subjetivo pero no arbitrario. [23]

## 4.2. Base de conocimiento

De la información recogida en los apartados anteriores se deduce que existe un conjunto amplio de variables que intervienen en la caracterización de los procesos implicados en los incendios en plantas industriales. Estas variables se pueden clasificar en varios bloques:

1. Variables relacionadas con la naturaleza de la sustancia combustible:
  - Entalpía de combustión.
  - Entalpía de vaporización.
  - Temperatura de ebullición.
  - Calor específico del líquido.

Con ellas se estima el caudal másico de combustible evaporado, ( $m'$ ), que se incorpora al incendio y la potencia de emisión de la radiación térmica.

2. El segundo bloque lo forman las variables que definen las características geométricas de la llama que, por aplicación del modelo de llama sólida y mediante geometrías tridimensionales sencillas representan el foco emisor del incendio. En este grupo las variables fundamentales son la altura de la llama y el diámetro del charco. Existe una ecuación que establece la relación entre ambas para situaciones de viento:

$$\frac{L}{D_{ch}} = 55 \left( \frac{m'}{\rho_a \sqrt{g D_{ch}}} \right)^{0,67} (u^*)^{-0,21} \quad (13)$$

Siendo:

L: Altura de la llama.

$D_{ch}$ : Diámetro del charco.  
 $m'$ : Caudal másico evaporado.  
 $\rho_a$ : Densidad del aire.  
 $g$ : Aceleración de la gravedad.  
 $u^*$ : Velocidad adimensional del viento.

3. El tercer bloque está relacionado con las condiciones atmosféricas, siendo la más importante la velocidad del viento que interviene en el ángulo de inclinación y en la geometría de la llama. También se considera la presión parcial del vapor de agua presente en el aire para estimar el coeficiente de transmisividad atmosférica.
4. El cuarto bloque está vinculado con la posición del receptor respecto del foco emisor. Aquí son fundamentales la distancia foco-receptor y la orientación relativa entre ambos que es evaluada por el factor de visión (determinado a su vez por la altura de la llama, la distancia foco-receptor, el diámetro del charco, y el ángulo de inclinación de la llama).

### 4.3. Codificación

De acuerdo al apartado anterior las variables que determinan la magnitud de un incendio son:

- Caudal másico de evaporación del combustible
- Presión parcial de vapor de agua
- Velocidad del viento
- Diámetro del charco
- Potencia emisiva de radiación
- Distancia foco-receptor

El caudal másico evaporado está tabulado para algunos materiales combustibles, de no disponer de esta información se pueden utilizar las expresiones empíricas que propone TNO [7]:

$$m' = \frac{10^{-3} \Delta H_c}{\Delta H_v} \quad (14)$$

para combustibles con temperatura de ebullición inferior a la ambiental, o bien:

$$m' = \frac{10^{-3} \Delta H_c}{\Delta H_v + c\Delta T} \quad (15)$$

si la temperatura de ebullición es superior a la del ambiente.

Siendo:

$\Delta H_c$ : Entalpía de combustión.

$\Delta H_v$ : Entalpía de vaporización.

$c$ : Calor específico del líquido.

$\Delta T$ : Diferencia entre la temperatura de ebullición del líquido y la ambiental.

La presión parcial de vapor de agua toma distintos valores en función de la temperatura.

Las variables restantes introducen incertidumbre y se pueden configurar como variables de estado susceptibles de fuzzificación.

#### 4.3.1. Velocidad del viento

Las condiciones meteorológicas influyen en la evolución del incendio, por lo que es necesario contar con datos meteorológicos de la zona en estudio, obtenidos a partir de la estación meteorológica más cercana, recogiendo información sobre las condiciones de viento y las direcciones de viento predominantes de la zona. Se considera la velocidad de viento en ( $m/s$ ) a 10  $m$ . de altura para evitar las turbulencias superficiales.

Los análisis de vulnerabilidad, que contemplan la velocidad del viento como uno de los parámetros que permiten valorar las características de la atmósfera como sistema de transporte, establecen distintos tramos para la

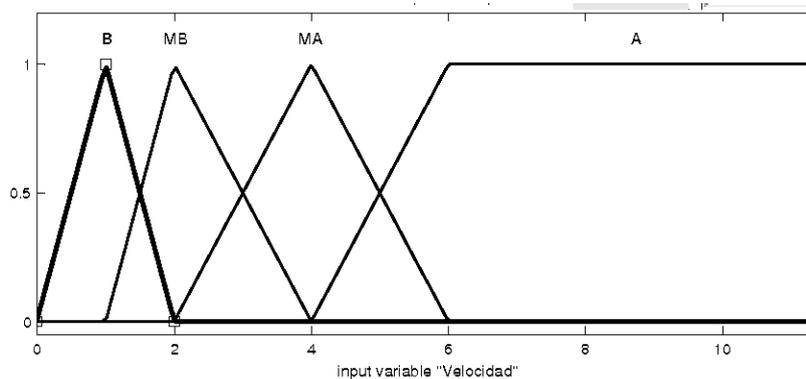


Figura 3: Velocidad del viento: Función de pertenencia

Tabla 3: Velocidad media del viento en la zona, (u).

Velocidad media
$u \leq 1 \text{ m/s}$
$1 \text{ m/s} \leq u \leq 2 \text{ m/s}$
$2 \text{ m/s} \leq u \leq 4 \text{ m/s}$
$4 \text{ m/s} \leq u \leq 6 \text{ m/s}$
$u \geq 6 \text{ m/s}$

velocidad del viento [15], como se incluye en la Tabla 3. De acuerdo a estos tramos, y considerando que hay que garantizar la continuidad de la función de salida, se define la función de pertenencia recogida en la Figura 3 para la velocidad media del viento estimada en la zona, donde las etiquetas de cada número difuso son: B para velocidad baja, MB para velocidad media-baja, MA para velocidad media-alta y A para velocidad alta. Se observa asimetría en las etiquetas B y MB que tienen su origen en la asimetría de la Tabla 3. Esta función de pertenencia se define analíticamente como:

$$\mu_B(v) = \begin{cases} x & 0 \leq x \leq 1 \\ (2-x) & 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_{MB}(v) = \begin{cases} (x-1) & 1 \leq x \leq 2 \\ (4-x)/2 & 2 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_{MA}(v) = \begin{cases} (x-2)/2 & 2 \leq x \leq 4 \\ (6-x)/2 & 4 \leq x \leq 6 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_A(v) = \begin{cases} (x-4)/2 & 4 \leq x \leq 6 \\ 1 & 6 \leq x \leq \infty \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

#### 4.3.2. Diámetro del charco

El diámetro del charco se puede estimar a partir del diámetro equivalente:

$$D_{ch} = \sqrt{\frac{4 V_l}{\pi \delta}} \quad (16)$$

donde  $V_l$  representa el volumen de líquido fugado y  $\delta$  representa el espesor que alcanza el charco, parámetros de difícil estimación, además esta ecuación

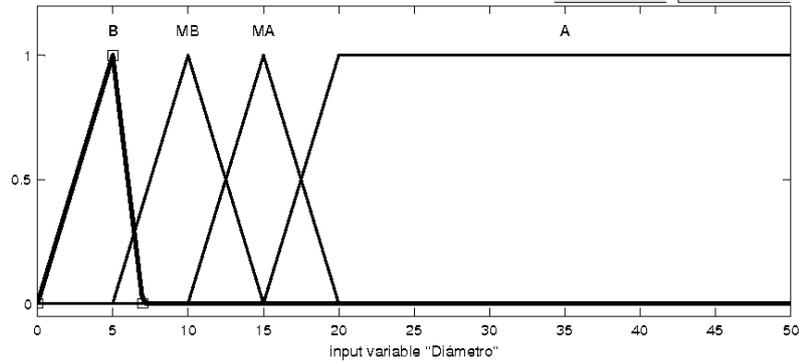


Figura 4: Diámetro del charco: Función de pertenencia

no considera la permeabilidad ni la inclinación del terreno, tampoco las velocidades de permeación y evaporación; por lo que se plantea la opción de estimar en cada caso y sobre el terreno los valores posibles que puede alcanzar el diámetro.

Un estudio experimental realizado por el CERTEC [16] concluye que los incendios presentan un poder de radiación creciente para diámetros hasta 5 metros, debido a que el poder de emisión de los destellos crece con el diámetro. A partir de este valor la potencia emisiva de la fracción luminosa de la llama,  $E_d$ , se mantiene constante a la vez que aumenta la presencia de humo en la llama lo que hace decrecer el poder de emisión 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 %.

Por tanto la mayor o menor presencia de humos define dos valores umbrales de diámetro, para  $D = 5m.$  y  $D = 20m.$  que, considerando la necesidad de garantizar la continuidad de la función de salida, sirven para definir la función de pertenencia recogida en la Figura 4, donde las etiquetas de cada número difuso son: B para diámetro bajo, MB para diámetro medio-bajo, MA para diámetro medio-alto y A para diámetro alto. La asimetría que presenta la etiqueta B refleja la existencia de un punto de inflexión en la evolución de  $E_d$  para  $D_{ch} = 5 m.$  Esta función de pertenencia se define analíticamente como:

$$\mu_B(D_{ch}) = \begin{cases} x/5 & 0 \leq x \leq 5 \\ (7-x)/2 & 5 \leq x \leq 7 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

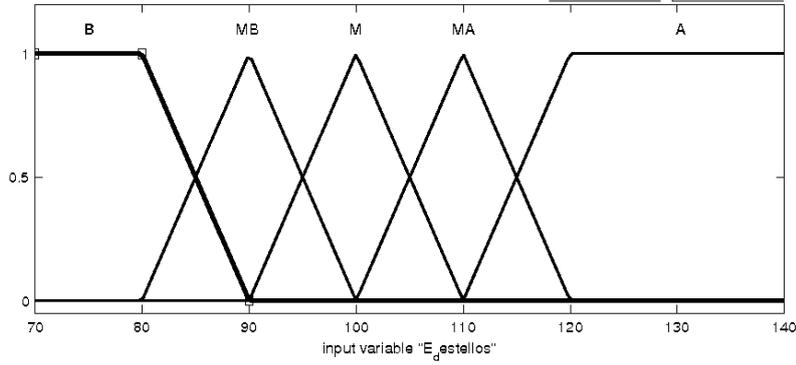


Figura 5: Potencia emisiva de los destellos: Función de pertenencia

$$\mu_{MB}(D_{ch}) = \begin{cases} (x - 5)/5 & 5 \leq x \leq 10 \\ (15 - x)/5 & 10 \leq x \leq 15 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_{MA}(D_{ch}) = \begin{cases} (x - 10)/5 & 10 \leq x \leq 15 \\ (20 - x)/5 & 15 \leq x \leq 20 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_A(D_{ch}) = \begin{cases} (x - 15)/5 & 15 \leq x \leq 20 \\ 1 & 20 \leq x \leq \infty \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

### 4.3.3. Potencia emisiva de los destellos

El estudio del CERTEC es consistente con la ecuación de Mudan (8) en cuanto a la influencia del diámetro del charco en la potencia emisiva de radiación y revisa los valores de  $E_d$  y  $E_h$  que sitúa en el intervalo  $[80,120]$   $Kw/m^2$  para  $E_d$ , dependiendo del tipo de fuel, y que eleva a  $40 Kw/m^2$  para  $E_h$ , considerándolo constante e independiente del tipo de fuel y del diámetro del charco. De acuerdo con ésto se propone la siguiente función de pertenencia para la potencia emisiva de la parte luminosa de la llama que se recoge en la Figura 5, donde las etiquetas de cada número difuso son: B para potencia baja, MB para potencia media-baja, M para potencia media, MA para potencia media-alta y A para potencia alta. Esta función de pertenencia se define analíticamente como:

$$\mu_B(E_d) = \begin{cases} 1 & -\infty \leq x \leq 80 \\ (90 - x)/10 & 80 \leq x \leq 90 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

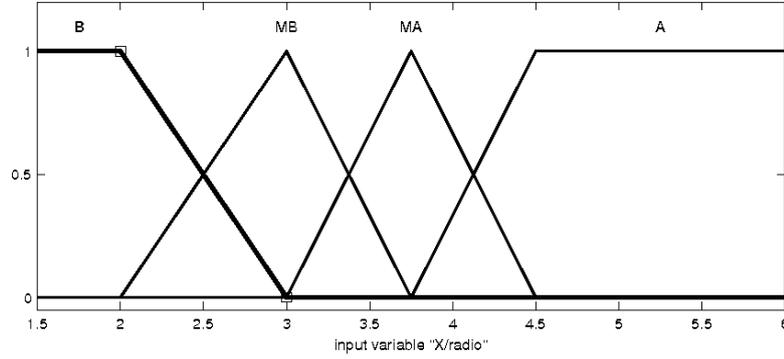


Figura 6: Distancia foco-receptor: Función de pertenencia

$$\mu_{MB}(E_d) = \begin{cases} (x - 80)/10 & 80 \leq x \leq 90 \\ (100 - x)/10 & 90 \leq x \leq 100 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_M(E_d) = \begin{cases} (x - 90)/10 & 90 \leq x \leq 100 \\ (110 - x)/10 & 100 \leq x \leq 110 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_{MA}(E_d) = \begin{cases} (x - 100)/10 & 100 \leq x \leq 110 \\ (120 - x)/10 & 110 \leq x \leq 120 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_A(E_d) = \begin{cases} (x - 110)/10 & 110 \leq x \leq 120 \\ 1 & 120 \leq x \leq \infty \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

Aplicada sobre la ecuación:

$$E_t = E_d 0,887^{D_{ch}} + 40 (1 - 0,887^{D_{ch}}) \quad (17)$$

para obtener la potencia emisiva total de la llama.

#### 4.3.4. Distancia foco-receptor

Es una variable fundamental y de caracter impredecible. Interviene en la estimación del factor de visión y del coeficiente de transmisividad atmosférica y es básica en la estimación de la dosis de radiación térmica puesto que determina el tiempo de exposición. Para reflejar la relación existente entre el

tamaño del incendio y sus consecuencias, se puede expresar la distancia foco-receptor como múltiplo del radio del charco. Por otra parte, para delimitar las zonas de planificación se consideran distancias cuyas intensidades estén comprendidas entre 10 y 1,7  $Kw/m^2$ , [3]. Estas distancias están comprendidas entre 1,5 y 4,5 veces el radio del charco, dependiendo de las dimensiones del incendio. De acuerdo a este intervalo se define la función de pertenencia como recoge la Figura 6, donde las etiquetas de cada número difuso son: B para distancia baja, MB para distancia media-baja, MA para distancia media-alta y A para distancia alta. Esta función de pertenencia se define analíticamente como:

$$\mu_B(x/r) = \begin{cases} 1 & -\infty \leq x \leq 2 \\ (3-x) & 2 \leq x \leq 3 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_{MB}(x/r) = \begin{cases} (x-2) & 2 \leq x \leq 3 \\ (3,75-x)/3,75 & 3 \leq x \leq 3,75 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_{MA}(x/r) = \begin{cases} (x-3)/0,75 & 3 \leq x \leq 3,75 \\ (4,5-x)/0,75 & 3,75 \leq x \leq 4,5 \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

$$\mu_A(x/r) = \begin{cases} (x-3,75)/0,75 & 3,75 \leq x \leq 4,5 \\ 1 & 4,5 \leq x \leq \infty \\ 0 & \text{el resto} \end{cases}$$

#### 4.4. Sistema de inferencia

A partir de la información recogida en la base de conocimiento y en la fase de codificación se definen las funciones de pertenencia de las variables intermedias (potencia emisiva total, velocidad característica, coeficiente de transmisividad del aire, velocidad adimensional, altura de llama, inclinación de llama y factor de visión) y de la variable final (intensidad de radiación térmica).

##### 4.4.1. Potencia emisiva total

Responde a la expresión (17). Se obtiene mediante inferencia difusa a partir de dos variables difusas y, de acuerdo a los intervalos definidos, su valor estará comprendido en el intervalo [40,120]. Las reglas difusas de control se recogen en la Tabla 4 (donde las columnas reproducen las etiquetas del diámetro y las filas reproducen las etiquetas de la potencia de la fracción

Tabla 4: Potencia emisiva total: Reglas difusas de control

$E_d \setminus D_{ch}$	B	MB	MA	A
B	M	B	B	B
MB	M	B	B	B
M	A	M	B	B
MA	A	M	B	B
A	A	M	B	B

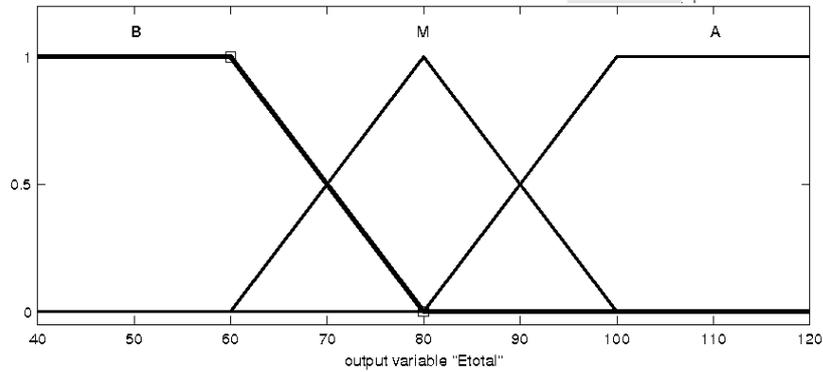


Figura 7: Potencia emisiva total: Función de pertenencia

luminosa) y con la función de pertenencia de la Figura 7. Se observa en la Figura 8 que para diámetros superiores a  $20\text{ m}$ . la presencia de humos sitúa la potencia emisiva total en torno a  $55\text{ Kw/m}^2$ .

#### 4.4.2. Velocidad característica del viento

Se obtiene mediante la expresión:

$$u_c = \left( \frac{gm'D_{ch}}{\rho_a} \right)^{1/3} \quad (18)$$

Siendo:

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $9,8\text{ m/s}^2$ ).

$m'$ : Caudal másico de combustible evaporado por unidad de superficie.

$D_{ch}$ : Diámetro del charco.

$\rho_a$ : Densidad del aire ( $1,232\text{ Kg/m}^3$ ).

La velocidad característica es función de dos variables, una difusa, que es el diámetro que alcanza el charco, y la otra tabulada, que es el caudal másico, que toma un valor concreto para cada combustible (Ver Tabla 2). Por tanto,

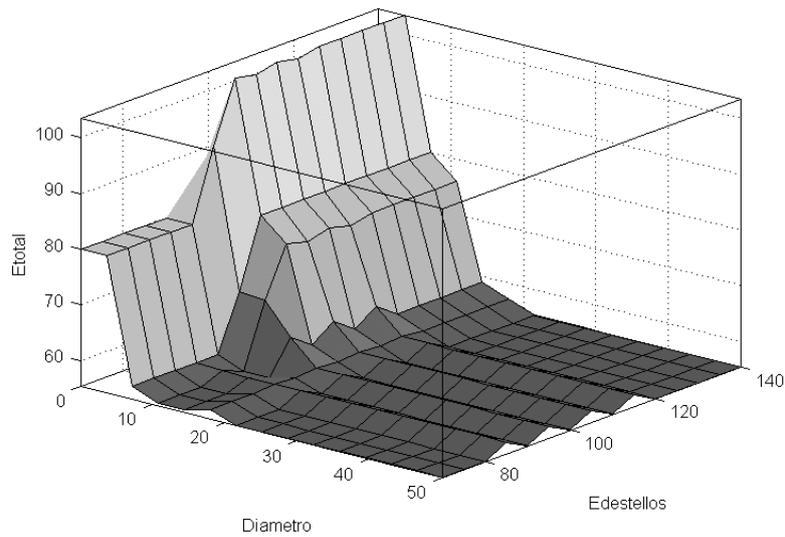


Figura 8: Potencia emisiva total: Superficie de salida

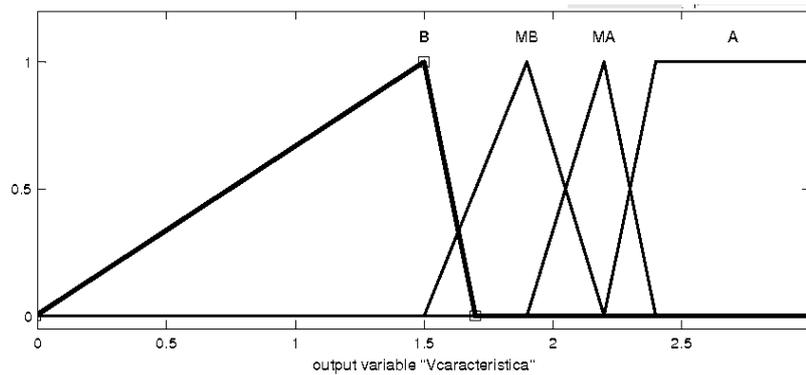


Figura 9: Velocidad característica del viento: Función de pertenencia

dado un combustible, la función de pertenencia de la velocidad característica se puede obtener, mediante una operación de números difusos, a partir de la función de pertenencia del diámetro del charco, aplicando la expresión (18) a cada uno de los parámetros de la función de pertenencia de  $D_{ch}$ . A modo de ejemplo, para el benceno de caudal másico,  $m' = 0,085Kg(m^2s)$ , la función de pertenencia de su velocidad característica es la incluida en la Figura 9 y la relación entre ambas variables se recoge en la Figura 10.

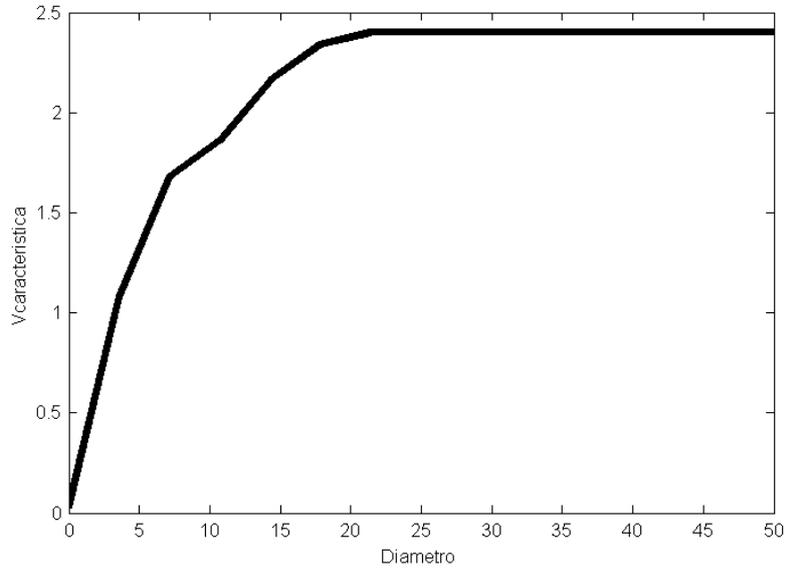


Figura 10: Velocidad característica del viento: Superficie de salida

#### 4.4.3. Coeficiente de transmisividad del aire

Se obtiene a partir del coeficiente de absorción del vapor de agua y del dióxido de carbono presentes en el aire:

$$\tau = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (19)$$

Siendo  $\alpha_w$  función de la presión parcial de vapor de agua (tabulada para distintos valores de temperatura) y de la distancia foco-receptor, variable difusa; por lo que se repite la situación anterior, es decir, dada una temperatura se obtiene una  $P_w$  y, mediante una operación de números difusos, la función de pertenencia del coeficiente de absorción del vapor de agua replica la función de pertenencia de la distancia foco-receptor. También a modo de ejemplo, para una  $T = 15^\circ\text{C}$  y una  $P_w = 1.705\text{Nw}/\text{m}^2$ , a partir de los valores de  $x/r$  se obtienen los valores de  $\alpha_w$  como recoge la Tabla 5, con lo que se obtiene la función de pertenencia recogida en la Figura 11, la relación entre ambas variables se recoge en la Figura 12. Para  $\alpha_c$  se toma el valor 0,04.

Tabla 5: Coeficiente de absorción en función de  $x/r$

$x/r$	$P_w x/r$	$\alpha_w$
1	$1,70 \cdot 10^3$	0,04
2	$3,41 \cdot 10^3$	0,07
3	$5,11 \cdot 10^3$	0,08
3,75	$6,39 \cdot 10^3$	0,10
4,5	$7,67 \cdot 10^3$	0,11
10	$1,70 \cdot 10^4$	0,17
12	$2,05 \cdot 10^4$	0,18

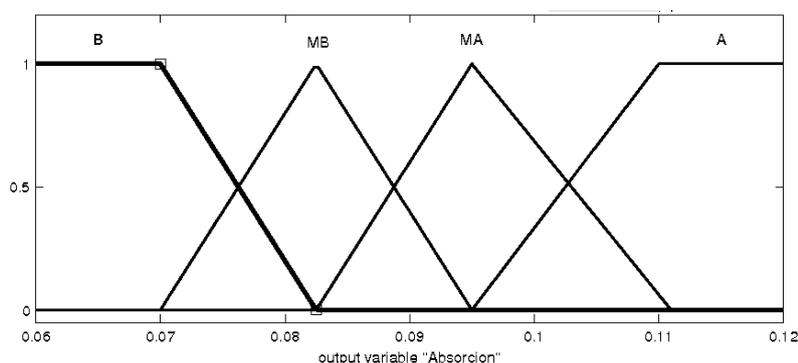


Figura 11: Coeficiente de absorción del vapor de agua: Función de pertenencia

#### 4.4.4. Altura de la llama

La ecuación (13) se puede reescribir así:

$$L = 55 \left[ \left( \frac{D_{ch} m'}{\rho_a} \right)^{2,21} u^{-0,63} g^{-0,79} \right]^{1/3} \quad (20)$$

Donde  $D_{ch}$  y  $u$  son variables difusas y  $m'$  es una variable tabulada que toma un valor concreto para un combustible dado, con lo que (20) queda como:

$$L = A D_{ch}^{2,21/3} u^{-0,21} \quad (21)$$

Siendo  $A = (55 (m')^{2,21/3}) / (\rho_a^{2,21/3} g^{0,79/3})$ , un factor que modifica el diámetro.

Las reglas difusas de control se recogen en la tabla 6, donde las columnas reproducen las etiquetas de la variable  $D_{ch}$  y las filas reproducen las etiquetas de la variable  $u$ , con la función de pertenencia recogida en la Figura 13. Se

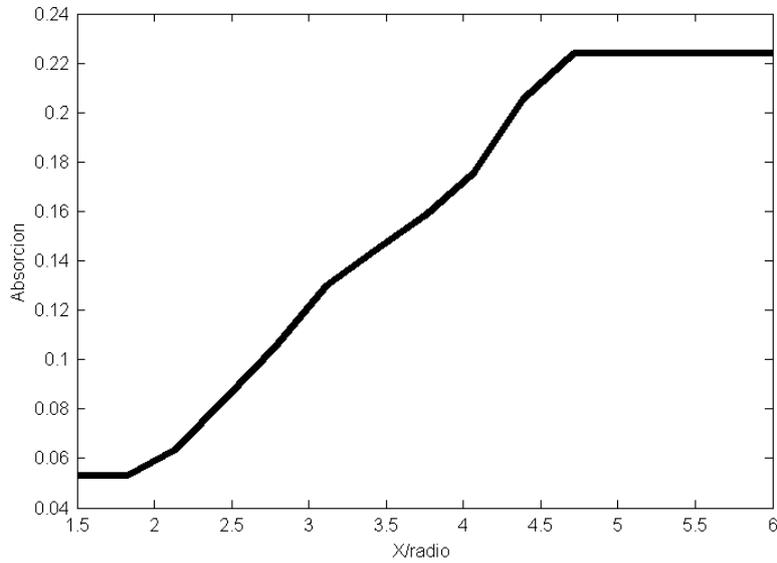


Figura 12: Coeficiente de absorción del vapor de agua: Superficie de salida

trata, por tanto, de una combinación de un proceso de inferencia difusa y una operación con números difusos. En la Figura 14 se observa como la velocidad del viento minora la altura de la llama para valores intermedios del diámetro.

#### 4.4.5. Velocidad adimensional del viento

Es el cociente entre la velocidad del viento y la velocidad característica del viento, ambas variables difusas. Se utiliza para estimar el ángulo de inclinación de la llama como se indica en el siguiente apartado. Las reglas difusas de control se recogen en la Tabla 7, donde las columnas reproducen las etiquetas de la velocidad del viento y las filas reproducen las etiquetas de la velocidad característica, con la función de pertenencia, obtenida mediante inferencia difusa, recogida en la Figura 15. La superficie de salida se incluye en la Figura 16.

Tabla 6: Altura de la llama: Reglas difusas de control

$u \setminus D_{ch}$	B	MB	MA	A
B	B	MB	MA	A
MB	B	MB	MA	A
MA	B	MB	MB	A
A	B	B	MB	A

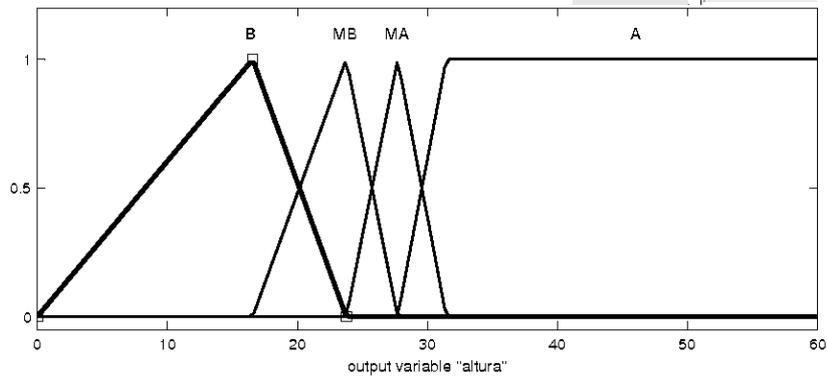


Figura 13: Altura de llama: Función de pertenencia

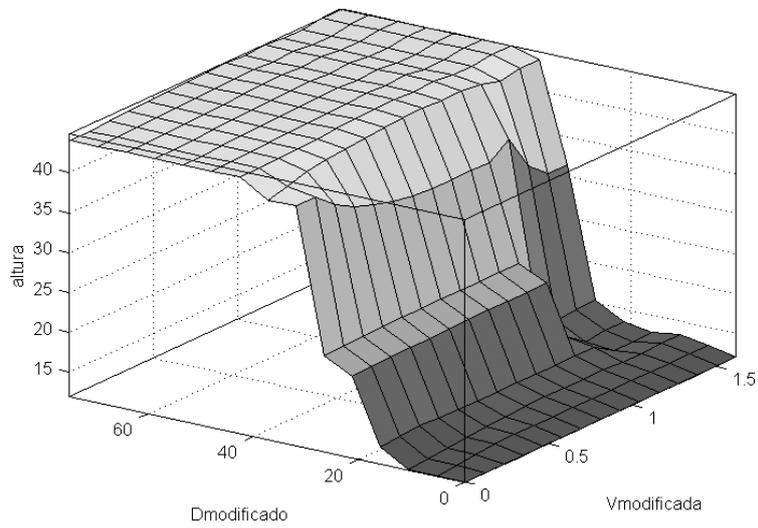


Figura 14: Altura de llama: Superficie de salida

Tabla 7: Velocidad adimensional: Reglas difusas de control

$u_c \setminus u$	B	MB	MA	A
B	B	MB	MA	A
MB	B	MB	MA	A
MA	B	B	MB	MA
A	B	B	MB	MA

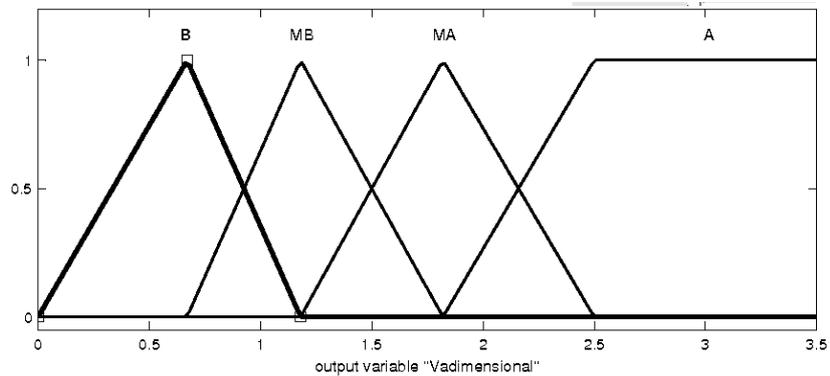


Figura 15: Velocidad adimensional del viento: Función de pertenencia

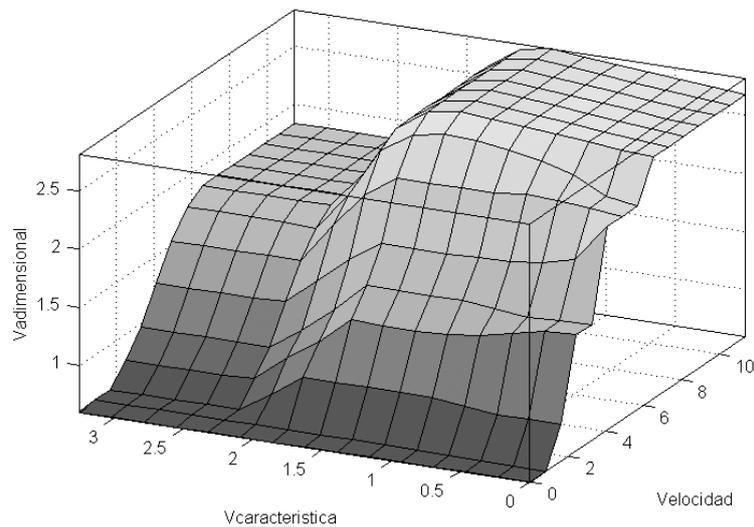


Figura 16: Velocidad adimensional del viento: Superficie de salida

#### 4.4.6. Ángulo de inclinación de la llama

El ángulo de inclinación de la llama toma el valor  $\arccos(u^*)^{-1/2}$  a partir de que la velocidad del viento iguala o supera a la velocidad característica del viento.

#### 4.4.7. Factor de visión

Depende del diámetro y de la distancia foco-receptor, también depende de la altura y la inclinación de la llama que, a su vez, están relacionadas con la velocidad del viento y el caudal másico de evaporación del combustible.

Tabla 8: Intensidad térmica de radiación: Reglas difusas de control

$\tau \setminus E_t F$	B	M	A
B	B	B	M
MB	B	B	M
MA	B	M	A
A	B	M	A

Se determinan los factores de visión para la orientación vertical y horizontal según las expresiones siguientes:

$$\pi F_v = -E \tan^{-1} \frac{D+E}{A} \left( \frac{a + (b+1)^2 - 2a(1+b \sin \theta)}{AB} \right) \tan^{-1} \left( \frac{AD}{B} \right) + \frac{\cos \theta}{C} \tan^{-1} \left( \frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{F \sin \theta}{C} \right) \quad (22)$$

$$\pi F_h = \tan^{-1} \left( \frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \left( \tan^{-1} \left( \frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{F \sin \theta}{C} \right) \right) \left( \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1 + ab \sin \theta)}{AB} \right) \tan^{-1} \left( \frac{AD}{B} \right) \quad (23)$$

Siendo:

$r$  : radio del charco

$x$  : la distancia desde el centro de la llama al receptor

$L$  =: la altura de la llama

$a = L/r$

$b = x/r$

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

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

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

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

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

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

#### 4.4.8. Intensidad térmica de radiación

Se estima según la expresión (3). El factor de visión minorra la potencia emisiva dando origen a una nueva función de pertenencia. De igual manera, la función de pertenencia del coeficiente de absorción del vapor de agua replica la función de pertenencia de la distancia foco-receptor para una temperatura dada. Las reglas difusas de control de la intensidad de radiación se recogen en la Tabla 8, donde las columnas reproducen las etiquetas de la potencia emisiva minorada y las filas reproducen las etiquetas del coeficiente de transmisividad.

Dado un diámetro y una presión parcial de vapor de agua se determina la función de pertenencia del coeficiente de transmisividad (operación de

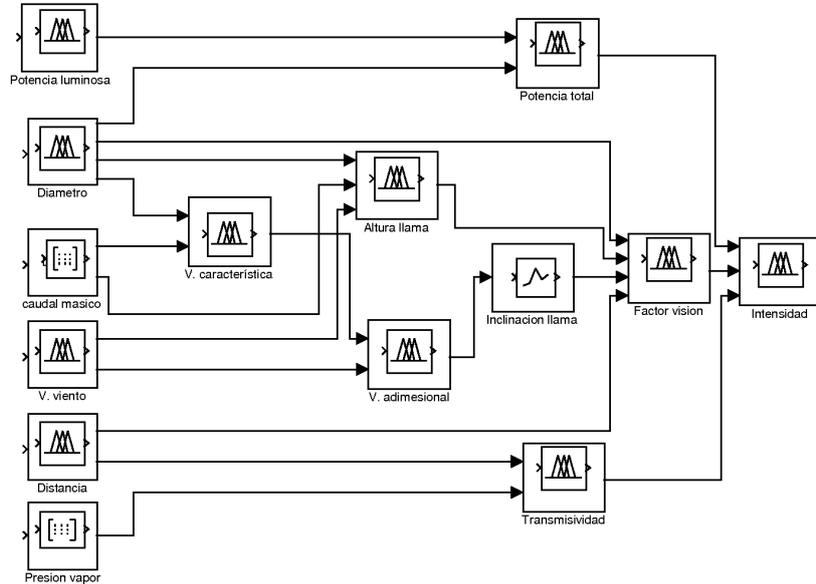


Figura 17: Esquema general del proceso

números difusos) y, mediante inferencia difusa se determina la función de pertenencia de la intensidad de radiación.

#### 4.5. Desarrollo del modelo propuesto

El esquema general del proceso definido en la base de conocimiento, fase de codificación y sistema de inferencia se recoge en la Figura 17.

La secuencia de este proceso es la siguiente:

1. Estimar el valor de las variables incluidas en la fase de codificación,  $(D_{ch}, E_d, m', u, x/r, P_w)$ , apartado 4.3
2. Obtener, mediante inferencia difusa, la función de pertenencia de la potencia emisiva total, apartado 4.4.1

$$E_t = f(E_d, D_{ch})$$

3. Calcular, como producto de un número difuso por un número real, la función de pertenencia de la velocidad característica del viento, apartado 4.4.2

$$u_c = f(m', D_{ch})$$

4. Calcular, mediante una operación de números difusos, [23], la función de pertenencia del coeficiente de transmisividad del aire, apartado 4.4.3

$$\alpha_\omega = f(P_w, x, r)$$

$$\tau = 1 - \alpha_\omega - \alpha_c$$

5. Obtener, por la combinación de una operación de números difusos y un proceso de inferencia difusa, la función de pertenencia de la altura de la llama, apartado 4.4.4

$$D'_{ch} = f(m', D_{ch})$$

$$L = f(D'_{ch}, u)$$

6. Obtener , mediante inferencia difusa, la función de pertenencia de la velocidad adimensional del viento, apartado 4.4.5

$$u^* = f(u, u_c)$$

7. Calcular la inclinación de la llama según la expresión (5).

$$\theta = \arccos \frac{1}{\sqrt{u^*}}$$

8. Calcular el factor de visión de acuerdo a las ecuaciones recogidas en el apartado 4.4.7

$$F = f(L, x, r, \theta)$$

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

9. Obtener, también por la combinación de una operación de números difusos y un proceso de inferencia difusa, la función de pertenencia de la intensidad térmica de radiación, apartado 4.4.8

$$E'_t = f(E_t, F)$$

$$I = f(E'_t, \tau)$$

10. Supuesto un tiempo de exposición,  $t_e$ , estimar la dosis de radiación térmica según la expresión (1) y establecer las zonas de planificación.

$$D = f(I, t_e)$$

## 5. Establecimiento de las zonas de planificación

### 5.1. Incertidumbre

La dosis de radiación térmica es función de la intensidad de radiación térmica y del tiempo de exposición como indica la ecuación (1). Además de la incertidumbre propia de la estimación de la intensidad, el tiempo de exposición introduce nuevos grados de incertidumbre: el tiempo depende, cuando se trata de personas, de la distancia foco-receptor, de la capacidad de reacción y de la velocidad a la que cada persona es capaz de alejarse del incendio. Estos tres factores no son predecibles y, por tanto, incorporan incertidumbre desde la misma definición de dosis de radiación.

Además las zonas de planificación se estiman en función del umbral de dosis para quemaduras de primer grado,  $115 (Kw/m^2)^{4/3}s$ , en la zona de alerta y del umbral para quemaduras de segundo grado,  $250 (Kw/m^2)^{4/3}s$ , en la zona de intervención. Estos umbrales se han determinado a partir de datos experimentales que presentan cierta imprecisión, especialmente en el caso de la zona de alerta ya que las quemaduras de primer grado están asociadas con la sensación de dolor que tiene un carácter subjetivo y depende, a su vez, del umbral de dolor de cada persona.

### 5.2. Sectorización

Se pretende considerar las condiciones locales del entorno en estudio.

Primero se establecen cuatro sectores que toman como referencia la dirección predominante del viento, de forma que esta dirección predominante

será la bisectriz del primer y tercer cuadrante y la dirección perpendicular a ésta será la bisectriz del segundo y cuarto cuadrante.

A continuación se estima la intensidad de radiación en cuatro posiciones de referencia, definidas por la dirección del viento, por la dirección perpendicular (posiciones derecha e izquierda) y la posición definida por la dirección del viento pero en el sentido contrario al del viento; en cada una de ellas hay que estimar el factor de visión, considerando que en la dirección del viento se aplican las ecuaciones (22) y (23), en el sentido contrario el ángulo de inclinación toma el valor  $-\theta$  para las mismas ecuaciones, y en la dirección perpendicular se determinan los factores de visión según la expresión siguiente para el factor de visión horizontal:

$$2\pi F_h = 2 \tan^{-1} D + \left( \frac{F \operatorname{sen} \theta}{I} \right) \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\frac{ab}{F} + \operatorname{sen} \theta}{I} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{\frac{ab}{F} - \operatorname{sen} \theta}{I} \right) - 2 \tan^{-1} \left( \frac{\operatorname{sen} \theta}{I} \right) \right] - \left( \frac{a^2 + b^2 - 1}{G} \right) \left[ \tan^{-1} \left( \frac{HD - 2a \operatorname{sen} \theta}{G} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{HD + 2a \operatorname{sen} \theta}{G} \right) \right]$$

Y para el factor de visión vertical:

$$2\pi F_v = - \left( \frac{a^2 \operatorname{sen} \theta \cos \theta}{2(a^2 \operatorname{sen}^2 \theta + b^2)} \right) \ln \left[ \frac{a^2 + b^2 - 1 - 2a \frac{F}{b} \operatorname{sen} \theta}{a^2 + b^2 - 1 + 2a \frac{F}{b} \operatorname{sen} \theta} \right] + \left( \frac{\cos \theta}{I} \right) \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\frac{ab}{F} + \operatorname{sen} \theta}{I} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{\frac{ab}{F} - \operatorname{sen} \theta}{I} \right) \right] - \left( \frac{ab \cos \theta}{b^2 + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta} \right) \left( \frac{a^2 + b^2 + 1}{G} \right) \left[ \tan^{-1} \left( \frac{HD - 2a \operatorname{sen} \theta}{G} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{HD + 2a \operatorname{sen} \theta}{G} \right) \right] - \left( \frac{2ab \cos \theta}{b^2 + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta} \right) \tan^{-1} D$$

Siendo:

$$G = \sqrt{(a^2 + b^2 + 1)^2 - 4(b^2 + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta)}$$

$$H = a^2 + (b + 1)^2$$

$$I = \sqrt{b^2 - \operatorname{sen}^2 \theta}$$

En cada uno de estos sectores también se puede estudiar si la base de la llama se encuentra a un nivel superior al del receptor, como sería el caso de un incendio en depósito, o si, debido a la orografía del terreno, el receptor se encuentra a un nivel superior al de la base de la llama. En ambos casos se aplican las ecuaciones (22) y (23), con las modificaciones siguientes:

1. Si la base de la llama está más elevada que el receptor:

$$x_1 = x + z \tan \theta$$

$$L_1 = z / \cos \theta$$

$$L_2 = L + L_1$$

Calculándose los factores de visión:

$$F_v = F_v(L_2) - F_v(L_1)$$

$$F_h = F_h(L_2) - F_h(L_1)$$

2. Si el receptor está más elevado que la base de la llama:

$$x_1 = x - z \tan \theta$$

$$L_1 = z / \cos \theta$$

$$L_2 = L - L_1$$

Calculándose, de igual forma, los factores de visión.

Siendo  $z$ , en ambos casos, la diferencia de altura entre el receptor y la base de la llama.

Para completar el estudio del entorno por sectores se puede considerar la existencia de elementos físicos que sirvan como protección o, por el contrario, dificulten el tránsito en las posibles trayectorias de evacuación.

### 5.3. Zonas de planificación

De acuerdo a la propuesta de sectorización recogida en el apartado anterior, el factor de visión y, por lo tanto, la intensidad de radiación tomarán distintos valores en cada uno de los cuadrantes. De manera que, suponiendo que no existan diferencias de nivel,  $I$  será máxima en la dirección del viento, primer cuadrante, tomará valores intermedios en los cuadrantes segundo y cuarto (dirección perpendicular al viento) y será mínima en el tercer cuadrante.

De igual forma, las isolíneas de dosis de radiación correspondientes a los valores límite de las zonas de alerta e intervención no serán circunferencias con centro en el foco del incendio sino que tendrán una forma discontinua. Por ejemplo si la dirección del viento es NE, las isolíneas se reproducen en la figura 18.

## 6. Validación del modelo propuesto

Este apartado reproduce un ejemplo desarrollado por TNO [7] y compara los resultados recogidos en este documento con los conseguidos por la aplicación del modelo de lógica difusa propuesto. TNO presenta un ejemplo para un incendio de charco producido por una fuga de  $28,3 \text{ m}^3$  de benceno que alcanzan un espesor de  $0,02 \text{ m}$ . Los datos de entrada son los siguientes:

$$V = 28,3 \text{ m}^3$$

$$\delta = 0,02 \text{ m}$$

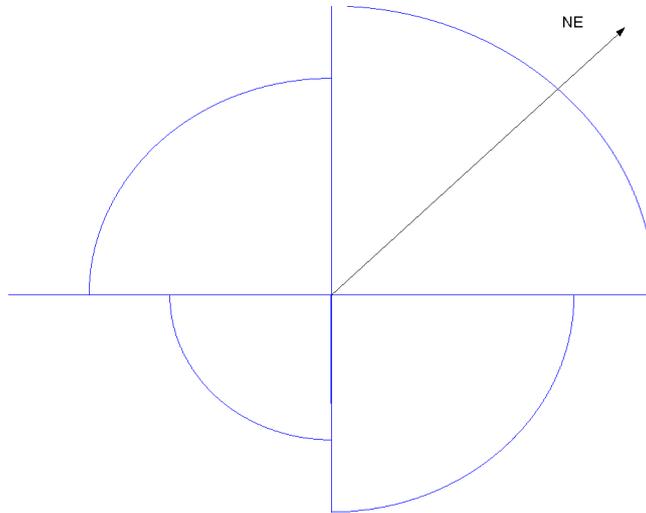


Figura 18: Sectorización de las zonas de planificación

$$\begin{aligned}
 u &= 5m/s \\
 m' &= 0,085Kg/m^2s \\
 k\beta &= 2,7m^{-1} \\
 v &= 7,5133 \cdot 10^{-6}m^2/s \\
 g &= 9,8 m^2/s \\
 RH &= 0,7 \\
 P_w &= 1.705 Nw/m^2 \\
 T &= 15^\circ C \\
 \zeta &= 0,8 \\
 \Delta H_c &= 4,015 \cdot 10^7 J/Kg \\
 \rho_a &= 1,2243 Kg/m^3 \\
 x &= 100 m \text{ (desde el centro del charco)} \\
 E_{humos} &= 20 \cdot 10^3 J/m^2s
 \end{aligned}$$

La propuesta de TNO para la resolución de este ejemplo está recogida en el Anexo.

De acuerdo al modelo de lógica difusa propuesto se siguen los siguientes pasos:

1. Valor de las variables incluidas en la fase de codificación.

$$\begin{aligned}
D_{ch} &= 42,4 \\
E_d &= 110 \text{ Kw/m}^2 \\
m' &= 0,085 \text{ Kg/m}^2\text{s} \\
u &= 5 \text{ m/s} \\
x/r &= 4,7 \\
T &= 15^\circ\text{K} \quad P_w = 1.705 \text{Nw/m}^2
\end{aligned}$$

2. Potencia emisiva total =  $55,3 \text{ Kw/m}^2$ . Obtenida por inferencia difusa a partir de  $E_d$  y  $D_{ch}$ . La regla de inferencia se recoge en la Figura 19.
3. Velocidad característica del viento =  $2,4 \text{ m/s}$ . Obtenida por operación de números difusos a partir del caudal másico y el diámetro. La regla de inferencia se recoge en la figura 20.
4. Coeficiente de transmisividad del aire.  $\tau = 0,70$ . Obtenido por operación de números difusos. Para  $x = 100\text{m.}$ ,  $r = 21,2\text{m.}$ ,  $T = 15^\circ\text{K}$ ,  $P_w = 1.705 \text{Nw/m}^2$  y  $\alpha_c = 0,04$ . La regla de inferencia para la inversa de la transmisividad se recoge en la Figura 21.
5. Altura de la llama =  $L = 44,5\text{m}$ . Obtenida por la combinación de una operación de números difusos y un proceso de inferencia difusa. La regla de inferencia se recoge en la Figura 22.
6. Velocidad adimensional del viento =  $2,14$ . La regla de inferencia se recoge en la Figura 23.
7. Angulo de inclinación de la llama,  $\theta = 46,87^\circ$ .
8. Factor de visión:

- En la dirección del viento:

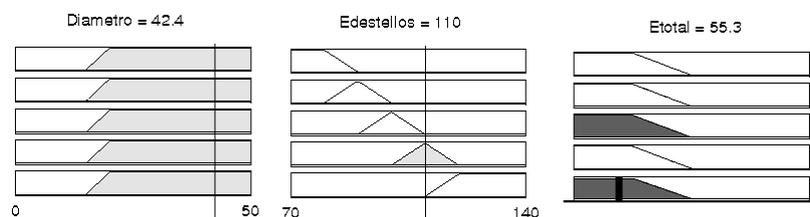


Figura 19: Potencia emisiva total: Activación de reglas

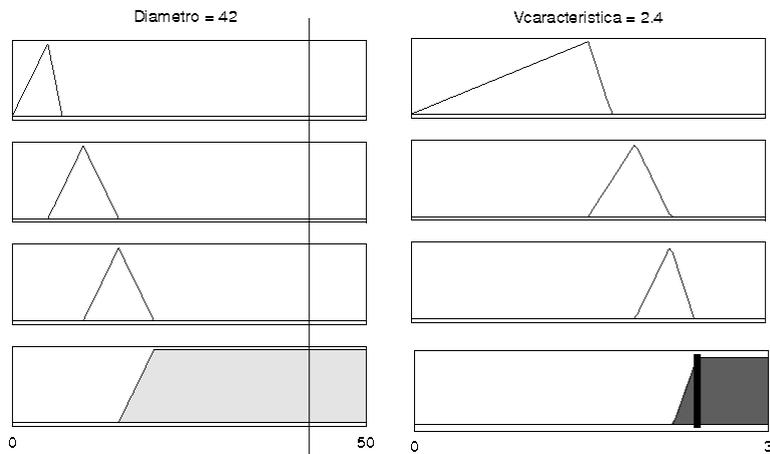


Figura 20: Velocidad característica del viento: Activación de reglas

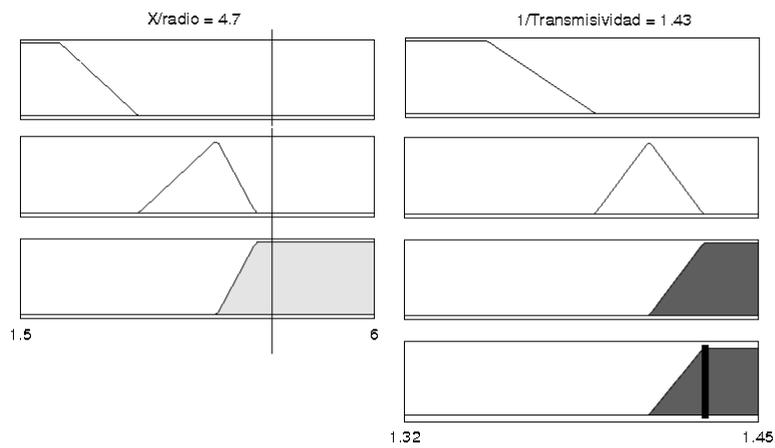


Figura 21: Coeficiente de transmisividad del aire: Activación de reglas

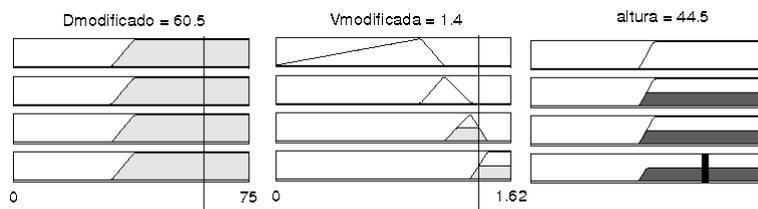


Figura 22: Altura de la llama: Activación de reglas

$$F_v = 0,088, F_h = 0,029, F_{max} = 0,093$$

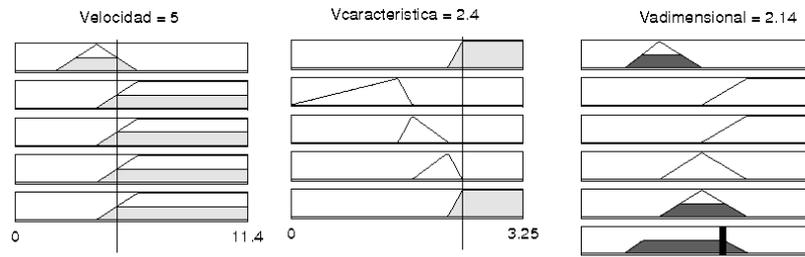


Figura 23: Velocidad adimensional del viento: Activación de reglas

- En la dirección del viento y sentido contrario:

$$F_v = 0,046, F_h = 0,025, F_{max} = 0,052$$

- En la dirección perpendicular a la dirección del viento:

$$F_v = 0,073, F_h = 0,021, F_{max} = 0,076$$

9. Intensidad térmica de radiación. Obtenida por la combinación de una operación de números difusos y un proceso de inferencia difusa. La regla de inferencia (para la dirección del viento) se recoge en la Figura 24.

- En la dirección del viento:

$$I = 3,61 Kw/m^2$$

- En la dirección del viento y sentido contrario:

$$I = 2,01 Kw/m^2$$

- En la dirección perpendicular a la dirección del viento:

$$I = 2,94 Kw/m^2$$

10. Dosis de radiación térmica. Para cada uno de los valores de intensidad se estima la dosis de radiación según la expresión (1), supuesto un tiempo de exposición de 20 s.

Tabla 9: Zona de alerta: Distancia foco-receptor (m)

Dirección	TNO	Modelo
Viento	111,12	98,15
Perpendicular	-	87,27
Contraria	-	61,41

- En la dirección del viento:

$$D = 110,7 (Kw/m^2)^{4/3} s$$

- En la dirección del viento y sentido contrario:

$$D = 50,6 (Kw/m^2)^{4/3} s$$

- En la dirección perpendicular a la dirección del viento:

$$D = 84,1 (Kw/m^2)^{4/3} s$$

- La dosis de radiación térmica alcanzada en el ejemplo de TNO para el tiempo de exposición considerado es de  $150,6(Kw/m^2)^{4/3}s$ .

11. Zonas de planificación. La Figura 25 representa la zona de alerta, donde la dosis de radiación es de  $115(Kw/m^2)^{4/3}s$ , tanto en el ejemplo de TNO como según el modelo propuesto, al ejemplo de TNO corresponde la circunferencia exterior. Los valores de distancia foco-receptor se recogen en la Tabla 9.

La Figura 26 representa la zona de intervención,  $D = 250(Kw/m^2)^{4/3}s$ ,

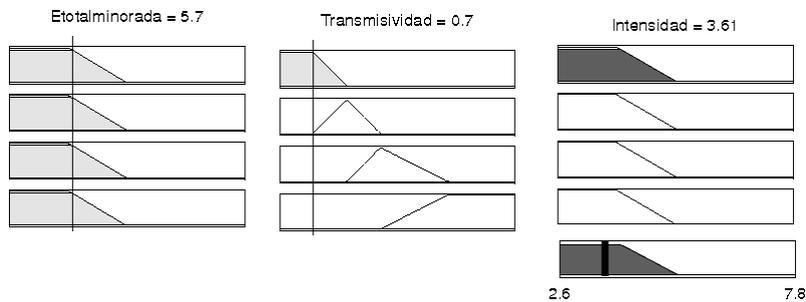


Figura 24: Intensidad de radiación: Activación de reglas

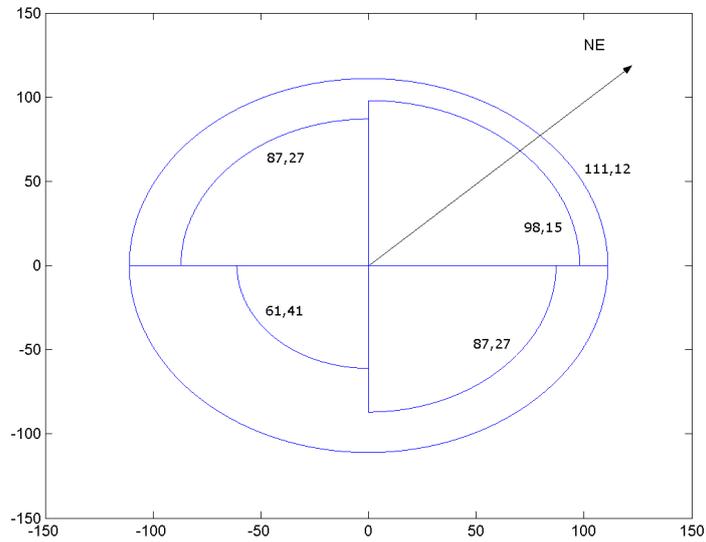


Figura 25: Zona de alerta

Tabla 10: Zona de intervención: Distancia foco-receptor (m)

Dirección	TNO	Modelo
Viento	82,98	72,93
Perpendicular	-	62,62
Contraria	-	40,71

tanto en el ejemplo de TNO como según el modelo propuesto, al ejemplo de TNO corresponde la circunferencia exterior. Los valores de distancia foco-receptor se recogen en la Tabla 10.

Para ambas zonas se considera que la dirección predominante del viento es NE.

## 7. Conclusiones y desarrollos futuros

La lógica difusa es una aproximación viable en la aplicación del modelo de llama sólida para medir los daños producidos en los incendios en instalaciones industriales ya que, siempre que se parta de las mismas premisas, los procesos de inferencia difusa y las operaciones con números difusos permiten obtener resultados similares a los obtenidos por el modelo tradicional de llama sólida.

La aproximación difusa requiere definir las funciones de pertenencia de cada variable difusa y las reglas difusas de control de cada proceso de inferencia por lo que el tratamiento del problema es más laborioso, pero este trabajo adicional permite una gestión más adecuada de la incertidumbre y la imprecisión que caracterizan a este tipo de problemas.

Es importante ajustar el modelo en estos dos aspectos, funciones de pertenencia y reglas de control, por lo que es conveniente contar con resultados experimentales para cada tipo de combustible y con la opinión de expertos que garanticen un tratamiento no arbitrario de la información.

Además de avanzar en este ajuste, la aproximación difusa se puede extender a otros tipos de incendios, en especial a aquellos que aplican modelos de llama sólida: las bolas de fuego y los dardos de fuego.

Otra línea de trabajo sería complementar la utilización del Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB, usado en este trabajo, con el entorno de desarro-

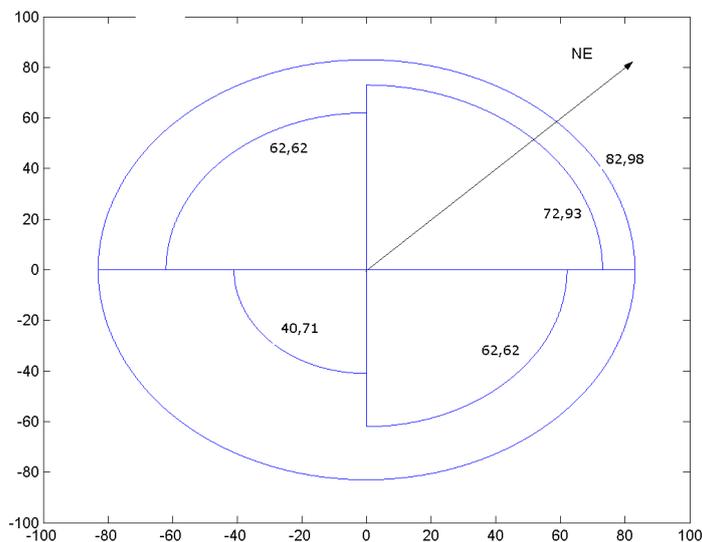


Figura 26: Zona de intervención

llo SIMULINK, también de MATLAB, para simular sistemas dinámicos que permitan un uso más ágil del modelo y un mejor conocimiento de su comportamiento.

## 8. Anexo

### Step 1

Determine the circular pool diameter:

$$\begin{aligned} D &= (4 \times V / (\pi \times \delta))^{1/2} \\ &= (4 \times 28.3 / (3.1416 \times 0.02))^{1/2} \\ &= 42.445 \text{ m} \end{aligned} \quad (6.64)$$

### Step 2

Determine the pool burning rate  $m''$  at still weather conditions

$$\begin{aligned} m'' &= m''_0 \times (1 - e^{-k \times \beta \times D}) \\ &= 0.085 \times (1 - e^{-2.7 \times 42.445}) \\ &= 0.085 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)} \end{aligned} \quad (6.66)$$

In general the value of the factor  $(1 - e^{-k \times \beta \times D})$  is above 0.95 if the pool diameter is more than 1 metre, so  $m'' \approx m''_0$ .

In Annex 1 data can be found to calculate the burning rate of some single components, which can be used in the calculation of step 2a.

### Step 3

Determine the characteristic wind velocity  $u_c$

$$\begin{aligned} u_c &= (g \times m'' \times D / \rho_{\text{air}})^{1/3} \\ &= (9.80665 \times 0.085 \times 42.445 / 1.2243)^{1/3} \\ &= 3.06866 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (6.14)$$

### Step 4

Determine the dimensionless wind velocity  $u^*$

$$\begin{aligned} u^* &= u_w / u_c \\ &= 5 / 3.06866 \\ &= 1.62937 \end{aligned} \quad (6.13)$$

### Step 5

Determine the mean length of the fire

$$\begin{aligned} L/D &= 55 \times (m'' / (\rho_{\text{air}} \times (g \times D)^{1/2}))^{0.67} \times (u^*)^{-0.21} \\ &= 55 \times (0.085 / (1.2243 \times (9.80665 \times 42.445)^{1/2}))^{0.67} \times 1.62937^{-0.21} \\ &= 1.101938 \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned}
L &= 1.101938 \times D \\
&= 1.101938 \times 42.445 \\
&= 46.7725 \text{ m}
\end{aligned}$$

*Step 6*

Determine the flame tilt angle  $\Theta$ :

$$\begin{aligned}
Fr_{10} &= u_w^2 / (g \times D) & (6.68) \\
&= 5^2 / (9.80665 \times 42.445) \\
&= 0.0545
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Re &= u_w \times D / \nu & (6.69) \\
&= 5 \times 42.445 / 7.5133 \cdot 10^{-6} \\
&= 2.824 \cdot 10^7
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tan\Theta / \cos\Theta &= 0.666 \times (Fr_{10})^{0.333} \times (Re)^{0.117} & (6.16) \\
&= 0.666 \times (0.0545)^{0.333} \times (2.824 \cdot 10^7)^{0.117} \\
&= 1.94315
\end{aligned}$$

In general, if  $\tan\Theta / \cos\Theta = c$ , then  $\Theta$  can analytically be calculated by:

$$\begin{aligned}
\Theta &= \arcsin(((4 \times c^2 + 1)^{1/2} - 1) / (2 \times c)) & (6.70) \\
&= \arcsin(((4 \times 1.94315^2 + 1)^{1/2} - 1) / (2 \times 1.94315)) \\
&= 50.8286^\circ
\end{aligned}$$

*Step 7*

Determine the actual elongated flame base dimension

*Step 7a)*

$$\begin{aligned}
D'/D &= 1.6 \times (Fr_{10})^{0.061} \text{ for a conical flame presentation} & (6.18-1) \\
&= 1.6 \times (0.0545)^{0.061} \\
&= 1.3398
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D' &= 1.3398 \times 42.445 \\
&= 56.867 \text{ m}
\end{aligned}$$

*Step 7b)*

$$\begin{aligned}
D'/D &= 1.5 \times (Fr_{10})^{0.069} \text{ for a cylindrical flame presentation} & (6.18-2) \\
&= 1.5 \times (0.0545)^{0.069} \\
&= 1.2272
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D' &= 1.2272 \times 42.445 \\
&= 52.0869 \text{ m}
\end{aligned}$$

*Step 8*

Calculate the Surface Emissive Power  $SEP_{theor}$  for a tilted cylindrical flame

$$\begin{aligned} SEP &= 140 \cdot 10^3 \times e^{0.12 \times D} + 20 \cdot 10^3 \times (1 - e^{0.12 \times D}) \\ &= 140 \cdot 10^3 \times e^{0.12 \times 42.445} + 20 \cdot 10^3 \times (1 - e^{0.12 \times 42.445}) \\ &= 21 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (6.19)$$

From table 6.6,  $F_s$  has been estimated at 0.40

$$\begin{aligned} SEP_{max} &= F_s \times m'' \times \Delta H_c / (1 + 4 \times L/D) \\ &= 0.40 \times 0.085 \times 4.015 \cdot 10^7 / (1 + 4 \times 1.101938) \\ &= 25.24 \cdot 10^4 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \end{aligned} \quad (6.71)$$

In literature  $\zeta = 80\%$  has been found

$$\begin{aligned} SEP_{act} &= SEP_{max} \times (1 - \zeta) + SEP_{theor} \times \zeta \\ &= 25.24 \cdot 10^4 \times (1 - 0.8) + 20 \cdot 10^3 \times 0.8 \\ &= 6.6 \cdot 10^4 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \end{aligned} \quad (6.20)$$

*Step 9*

Determine absorption factor for water vapour  $\alpha_w$  for an average flame temperature of 1200 K from Figure 6.2, in subsection 6.5.2.4, and for a distance  $x$  of 50 m from the flame surface.

Calculate the partial vapour pressure of water  $p_w$  at 15 °C and a relative humidity RH of 0.7.

$$\begin{aligned} p_w &= RH \times p_w^o \\ &= 0.7 \times 1705 \\ &= 1193.5 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (6.72)$$

$$\begin{aligned} p_w \times x &= 1193.5 \times 100 \\ &= 11.93 \cdot 10^4 \text{ N/m} \end{aligned}$$

From Figure 6.2 it can be found that  $\alpha_w = 0.24513$

*Step 10*

Determine the absorption coefficient for carbon-dioxide  $\alpha_c$  for an average flame temperature of 1200 K from Figure 6.3, subsection 6.5.2.4, and a distance  $x$  of 50 metres

$$\begin{aligned} p_c \times x &= 30.3975 \times 100 \\ &= 3.03975 \cdot 10^3 \text{ N/m} \end{aligned}$$

From Figure 6.3 it can be found that  $\alpha_c = 0.0401285$

*Step 11*

The calculation with formula (6.24) is generally much more accurate. If the value of  $p_w \times x$  is between  $10^4$  and  $10^5$  N/m, formula (6.29) can be used.

Determine the atmospheric transmissivity

$$\begin{aligned}\tau_a &= 1 - \alpha_w - \alpha_s \\ &= 1 - 0.24513 - 0.0401285 \\ &= 0.71474\end{aligned}\tag{6.24}$$

or use Figure 6.4 in subsection 6.5.2.4.

*Step 12*

Calculate the view factor with the formulae from Appendix, section 3

$$\begin{aligned}a &= L/R \\ &= 46.7725/21.222 \\ &= 2.20396\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}b &= X/R \\ &= 100/21.222 \\ &= 4.712\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A &= \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \times a \times (b+1) \times \sin\theta)} \\ &= \sqrt{(2.20396^2 + (4.712+1)^2 - 2 \cdot 2.20396 \times (4.712+1) \times \sin(50.8286^\circ))} \\ &= 4.2384\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B &= \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \times a \times (b-1) \times \sin\theta)} \\ &= \sqrt{(2.20396^2 + (4.712-1)^2 - 2 \times 2.20396 \times (4.712-1) \times \sin(50.8286^\circ))} \\ &= 2.439498\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C &= \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \times \cos^2\theta)} \\ &= \sqrt{(1 + (4.712^2 - 1) \times \cos^2(50.8286^\circ))} \\ &= 3.07555\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D &= \sqrt{((b-1)/(b+1))} \\ &= \sqrt{((4.712-1)/(4.712+1))} \\ &= 0.806135\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E &= (a \times \cos \theta) / (b - a \times \sin \theta) \\
&= (2.20396 \times \cos(50.8286)) / (4.712 - 2.20396 \times \sin(50.8286)) \\
&= 0.4635 \\
F &= \sqrt{(b^2 - 1)} \\
&= \sqrt{(4.712^2 - 1)} \\
&= 4.60457
\end{aligned}$$

The maximum view factors  $F_h$  and  $F_v$  can now be calculated with formulae (6.A.14) and (6.A.15), respectively.

$$F_v = 0.091915$$

$$F_h = 0.029146$$

The maximum view factor can be calculated with formula (6.A.18).

$$\begin{aligned}
F_{\max} &= \sqrt{(F_v^2 + F_h^2)} && (6.A.18) \\
&= \sqrt{(0.091915^2 + 0.029146^2)} \\
&= 0.0964
\end{aligned}$$

*Step 13*

Calculate the maximum heat flux at a distance of 50 metres

$$\begin{aligned}
q'' &= SEP_{\text{ref}} \times F_{\text{view}} \times \tau_a && (6.4) \\
&= 6.6 \cdot 10^4 \times 0.0964 \times 0.71474 \\
&= 4.581 \cdot 10^3 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}
\end{aligned}$$

## Referencias

- [1] Directriz básica de Protección Civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, de 19 de septiembre. Aprobada por Real Decreto 1196/2003 de 19 de septiembre.
- [2] Hamins Anthony, Kashiwagi Takashi. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD 20899. 1995.
- [3] González Ferradás E., Ruiz Boada F., Miñana Aznar A., Navarro Gómez J., Ruiz Gimeno J., Martínez Alonso J.. Zonas de planificación para accidentes graves de tipo térmico (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 (Seveso II)). Dirección General de Protección Civil, Ministerio del Interior, Servicio de Publicaciones, Universidad de Murcia. 2002.
- [4] Buettner K.. Effects of extreme heat and cold on human skin. II. Surface temperature, pain and heat conductivity in experiments with radiation heat. *J. Appl. Physiol.*, 3. 1951.
- [5] Stoll A.M., Greene L.C.. Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation. *J. Appl Physiol.*, 14. 1952.
- [6] Metha A.K., Wong F., Williams G.C.. 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.
- [7] TNO. Methods for the calculation of physical effects. The yellow book. CPR 14E. The Hague, The Netherlands. 1997.
- [8] American Gas Association. LNG Safety Research Program: Consequences of LNG Spills on Land. Phase II Projects IS 3-1, Final Report. 1974.
- [9] TNO. Methods for the determination of possible damage. The green book. CPR 16E. The Hague, The Netherlands. 1989.
- [10] Mudan K.S.. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 10. 1984.
- [11] Navarro J.. Zonas de planificación para incendios en charco y bolas de fuego en instalaciones industriales. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 2000.

- [12] Darbra R.M., Eljarrat E., Barceló D.. How to measure uncertainties in environmental risk assessment. *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 27, No. 4. 2008.
- [13] Thomas P.H.. F.R. Notr 600, Fire Research Station, Borehamwood, England. 1965.
- [14] Planas E., Casal J.. Fire accidents in process plants: mathematical modelling, uncertainties and research needs. Centre for Studies on Technological Risks (CERTEC).
- [15] Departameno de Seguridad integral, INERCO. Informe de seguridad de la ampliación de las instalaciones de planta de preparación de combustibles alternativos. Análisis de riesgos. 2006.
- [16] Muñoz M., Planas E., Ferrero F., Casal J. Predicting the emissive power of hydrocarbon pool fires. Elsevier. 2007.
- [17] Babrauskas V.. Estimating large pool fire burning rates. *Fire Technology*. 1983.
- [18] Passino K., Yurkovich S.. *Fuzzy Control*. Addison-Wesley. 1998.
- [19] MATLAB. User's Guide. Fuzzy Logic Toolbox. 2002.
- [20] Gomez, P.. A practical guide to model fuzzy inference system using Matlab and Simulink. 2004.
- [21] Aguasca R., Cabrera I., Benítez E.. *Introducción a la lógica difusa*. IU-SIANI. ULP GC.
- [22] Zadeh Lofti A.. *Generalized theory of uncertainty-principal concepts and ideas*. Elsevier. 2007.
- [23] Bojadziev G., Bojadziev M.. *Fuzzy Logic for business, finance and management*. World Scientific. 2007.