

NTP 326: Radiación térmica en incendios de líquidos y gases



Radiation thermique en incendies de liquides et gaz
Heat radiation in fires of liquids and gases

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Emilio Turmo Sierra
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

Uno de los efectos de los incendios es la radiación térmica, cuya determinación es del todo necesaria no tan sólo para la evaluación de sus consecuencias dañinas y la verificación de la resistencia al fuego de las instalaciones, sino también para establecer las distancias de seguridad en las intervenciones, así como para calcular la cantidad de agua de refrigeración necesaria.

Introducción

Los accidentes por escape de líquidos y gases inflamables pueden dar lugar a la formación de un charco ardiendo, una bola de fuego o un incendio tipo llamarada, cuando el combustible entra en contacto con un foco de ignición.

El modelo de partida para la evaluación de la radiación térmica se basa en un incendio de base circular o rectangular situada sobre el nivel del suelo. Se considera la fase de incendio estacionario independientemente de la fase inicial y de su desarrollo. El tamaño de la superficie del charco formado es importante y a efectos de cálculo se adopta la superficie alcanzada inmediatamente después del derrame y supuesta constante.

En el caso de charco de base no circular se considera la razón longitud/anchura, la cual nos determina el alcance y la forma en que se puede utilizar el modelo.

En este documento se estudia la irradiación térmica de incendios estacionarios, que no varían con el tiempo y sin considerar la influencia del viento que ocasiona una inclinación y un desplazamiento de la base de las llamas. No se ha estudiado la medición de la radiación térmica en las bolas de fuego, ya que está expuesta en la NTP 293-1991

Radiación térmica en un incendio

La intensidad de la radiación térmica recibida por un ser vivo u objeto situado en el campo de influencia de un incendio depende de las condiciones atmosféricas (humedad ambiente), de la geometría del incendio (diámetro de la base del incendio, altura de las llamas y distancia al punto irradiado) y de las características físico-químicas del producto en combustión.

La determinación de la intensidad de irradiación por unidad de superficie que se recibe en un punto P situado a una distancia c del incendio (figura 1) puede estimarse mediante la ecuación:

$$q = d F E$$

siendo:

q = Intensidad de irradiación a una distancia determinada (kW/m²).

d = Coeficiente de transmisión atmosférica (adimensional).

F = Factor geométrico de visión, de vista o de forma (adimensional).

E = Intensidad media de radiación de la llama kW/m²).

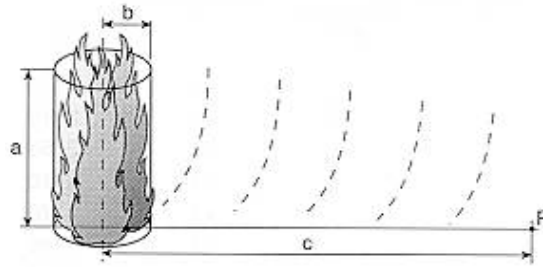


Fig. 1: Forma de incendio cilíndrico vertical

A continuación describiremos los métodos de cálculo más usuales para cada uno de los tres parámetros que es preciso conocer para evaluar la intensidad de la irradiación.

Coefficiente de transmisión atmosférica

Parte del calor radiante es absorbido por el aire existente entre el objeto expuesto a la radiación y el incendio. Esta reducción entre la radiación emitida y la recibida se tiene en cuenta mediante el coeficiente de transmisión atmosférica **d**. El valor de **d** es función de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera existente entre el foco emisor de radiación y el receptor. Este valor se puede obtener de gráficos o de una fórmula empírica.

Una serie de gráficos dan el coeficiente de transmisión **d** en función de la distancia **c** para diferentes temperaturas ambientales y grados de humedad relativa (figura 2).

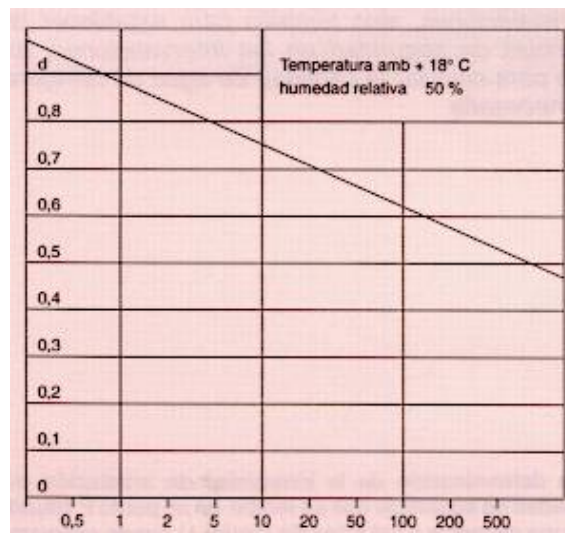


Fig. 2: Coeficiente de transmisión d en función de la distancia c

La presión parcial del vapor de agua se calcula a partir de la humedad relativa del aire ambiental y de los valores de las presiones de vapor saturado a diferentes temperaturas dados en la Tabla 1.

Tabla 1: Presión de vapor saturado del agua (Pa) en función de la temperatura (°C)

Temperatura °C	Presión de vapor (Pa)	Temperatura °C	Presión de vapor (Pa)
0	600	19	2170
2	700	20	2310
4	800	21	2450
6	920	22	2610
8	1060	23	2770
10	1210	24	2940
11	1300	25	3130
12	1380	26	3320
14	1580	27	3520
15	1680	28	3730
16	1790	29	3950
17	1920	30	4190
18	2040		

Así para un caso determinado, la presión parcial de vapor se calcula multiplicando la humedad relativa por la presión de vapor saturado a la temperatura existente.

Una fórmula empírica empleada normalmente es la siguiente, propuesta por Pietersen y Huerta (TNO):

$$d = 2,02 (P_v \cdot x)^{-0,09}$$

siendo:

P_v = Presión parcial del vapor de agua a la temperatura determinada (Pa).

x = Longitud de recorrido de la radiación, distancia desde la superficie de llama al blanco receptor (m).

Factor de visión geométrico

El factor de visión geométrico o factor de forma es un coeficiente que valora el efecto de la forma geométrica de las llamas (altura alcanzada y dimensiones de la superficie de líquido incendiada), de la distancia al punto **P** o superficie irradiada y de la posición u orientación (horizontal, vertical, inclinada) de dicha superficie. Este factor se simboliza F_v para superficies verticales, F_h para horizontales y $F_{m\acute{a}x}$ para superficie inclinada de irradiación máxima.

El cálculo del factor de visión geométrico para diferentes configuraciones está expuesto en la mayoría de bibliografía especializada de transmisión de calor con fórmulas complejas por lo que generalmente se dan tablas de valores o gráficos de cálculo.

En este documento se consideran los dos tipos más comunes de forma de incendio para las cuales se dan los correspondientes valores del factor de visión, indicados en las tablas 2 y 3: el incendio de forma cilíndrica vertical y el incendio de forma rectangular.

Tabla 2: Factor de visión geométrico para incendio cilíndrico

Factor de visión horizontal, F_h											
c/b	a/b	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0
1.10	0.132	0.242	0.332	0.354	0.360	0.362	0.362	0.362	0.362	0.363	0.363
1.20	0.044	0.120	0.243	0.291	0.307	0.310	0.312	0.312	0.312	0.313	0.313
1.30	0.020	0.065	0.178	0.242	0.268	0.274	0.277	0.277	0.270	0.278	0.279
1.40	0.011	0.038	0.130	0.203	0.238	0.246	0.250	0.251	0.251	0.252	0.253
1.50	0.005	0.024	0.097	0.170	0.212	0.222	0.228	0.229	0.229	0.231	0.232
2.00	0.001	0.005	0.027	0.073	0.126	0.145	0.158	0.160	0.160	0.164	0.166
3.00	0.000	0.000	0.005	0.019	0.050	0.071	0.091	0.095	0.095	0.103	0.106
4.00	0.000	0.000	0.001	0.007	0.022	0.038	0.057	0.062	0.062	0.073	0.078
5.00	0.000	0.000	0.000	0.003	0.011	0.021	0.037	0.043	0.043	0.054	0.061
10.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.007	0.009	0.009	0.017	0.026
20.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Factor de visión vertical, F_v											
1.10	0.330	0.415	0.449	0.453	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454
1.20	0.196	0.308	0.397	0.413	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
1.30	0.130	0.227	0.344	0.376	0.383	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
1.40	0.096	0.173	0.296	0.342	0.354	0.356	0.356	0.357	0.357	0.357	0.357
1.50	0.071	0.135	0.253	0.312	0.229	0.312	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
2.00	0.028	0.056	0.126	0.194	0.236	0.245	0.248	0.249	0.249	0.249	0.249
3.00	0.009	0.019	0.047	0.086	0.132	0.150	0.161	0.163	0.163	0.165	0.166
4.00	0.005	0.010	0.024	0.047	0.080	0.100	0.115	0.119	0.119	0.123	0.124
5.00	0.003	0.006	0.015	0.029	0.053	0.069	0.086	0.091	0.091	0.097	0.099
10.00	0.000	0.001	0.003	0.006	0.013	0.019	0.029	0.032	0.032	0.042	0.048
20.00	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.007	0.009	0.009	0.014	0.020
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004
Factor de visión máximo, F_{max}											
1.10	0.356	0.481	0.559	0.575	0.580	0.581	0.581	0.581	0.581	0.581	0.581
1.20	0.201	0.331	0.466	0.505	0.517	0.519	0.520	0.521	0.521	0.521	0.521
1.30	0.132	0.236	0.387	0.448	0.468	0.472	0.474	0.474	0.474	0.475	0.475
1.40	0.094	0.177	0.323	0.398	0.427	0.433	0.436	0.436	0.436	0.437	0.437
1.50	0.072	0.138	0.271	0.355	0.392	0.400	0.404	0.404	0.404	0.405	0.406
2.00	0.028	0.056	0.129	0.208	0.267	0.285	0.294	0.296	0.296	0.299	0.300
3.00	0.009	0.019	0.048	0.088	0.141	0.160	0.183	0.189	0.189	0.195	0.197
4.00	0.005	0.010	0.024	0.047	0.083	0.106	0.129	0.134	0.134	0.143	0.147
5.00	0.003	0.005	0.015	0.029	0.054	0.073	0.094	0.100	0.100	0.111	0.117
10.00	0.000	0.001	0.003	0.006	0.013	0.019	0.030	0.034	0.034	0.045	0.055
20.00	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.007	0.009	0.009	0.014	0.022
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004

Tabla 3: Factor de visión geométrico para incendio rectangular

Factor de visión horizontal, F_h								
a/b c/b	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0
0,1	0,0732	0,1380	0,1705	0,1998	0,2126	0,2217	0,2279	0,2305
0,2	0,0263	0,0728	0,1105	0,1549	0,1774	0,1944	0,2063	0,2113
0,3	0,0127	0,0414	0,0720	0,1182	0,1459	0,1687	0,1855	0,1928
0,4	0,0073	0,0257	0,0485	0,0899	0,1190	0,1452	0,1660	0,1752
0,5	0,0047	0,0171	0,0339	0,0687	0,0966	0,1243	0,1478	0,1588
0,6	0,0032	0,00120	0,0245	0,0530	0,0784	0,1059	0,1312	0,1436
0,7	0,0023	0,0087	0,0182	0,0414	0,0638	0,0903	0,1162	0,1296
0,8	0,0017	0,0065	0,0139	0,0327	0,0522	0,0767	0,1028	0,1169
0,9	0,0013	0,0050	0,0108	0,0261	0,0429	0,0653	0,0908	0,1054
1,0	0,0010	0,0040	0,0086	0,0211	0,0355	0,0557	0,0803	0,0951
1,2	0,0007	0,0026	0,0056	0,0142	0,0249	0,0409	0,0629	0,0774
1,5	0,0004	0,0015	0,0032	0,0084	0,0152	0,0265	0,0440	0,0572
2	0,0002	0,0007	0,0015	0,0041	0,0076	0,0139	0,0253	0,0355
3	0,0001	0,0002	0,0005	0,0013	0,0026	0,0050	0,0100	0,0154
4	—	0,0001	0,0002	0,0006	0,0011	0,0023	0,0047	0,0077
5	—	—	0,0001	0,0003	0,0006	0,0012	0,0026	0,0043

Factor de visión vertical, F_v												
b/c a/c	10	5	3	2	1	0,75	0,50	0,25	0,2	01	0,05	0,02
10	0,2480	0,2447	0,2369	0,2234	0,1767	0,1499	0,1118	0,0606	0,0490	0,0249	0,0125	0,0050
5	0,2447	0,2421	0,2350	0,2221	0,1750	0,1491	0,1114	0,0604	0,0489	0,0248	0,0124	0,0050
3	0,2369	0,2350	0,2292	0,2176	0,1734	0,1478	0,1101	0,0598	0,0483	0,0245	0,0123	0,0049
2	0,2234	0,2221	0,2176	0,2078	0,1674	0,1427	0,1068	0,0581	0,0470	0,0239	0,0120	0,0048
1	0,1767	0,1760	0,1734	0,1674	0,1385	0,1193	0,0902	0,0494	0,0400	0,0203	0,0102	0,0041
0,75	0,1499	0,1494	0,1475	0,1427	0,1193	0,1032	0,0784	0,0431	0,0349	0,0178	0,0089	0,0036
0,50	0,1118	0,1114	0,1101	0,1068	0,0902	0,0784	0,0599	0,0331	0,0268	0,0137	0,0069	0,0027
0,25	0,0606	0,0604	0,0598	0,0581	0,0494	0,0431	0,0331	0,0184	0,0149	0,0076	0,0038	0,0015
0,20	0,0490	0,0489	0,0483	0,0470	0,0400	0,0349	0,0268	0,0149	0,0121	0,0062	0,0031	0,0012
0,10	0,0249	0,0248	0,0245	0,0239	0,0203	0,0178	0,0137	0,0076	0,0062	0,0031	0,0016	0,0006
0,05	0,0123	0,0124	0,0123	0,0120	0,0102	0,0089	0,0069	0,0038	0,0031	0,0016	0,0008	0,0003
0,002	0,0050	0,0050	0,0049	0,0048	0,0041	0,0036	0,0027	0,0015	0,0012	0,0006	0,0003	0,0001

$$F_{mix} = \sqrt{F_v^2 + F_h^2}$$

Incendio de forma cilíndrica vertical

Corresponde a un depósito cilíndrico ardiendo y adopta la forma representada en la figura 1 asimilable a un cilindro en el que:

a = Altura de la llama

b = Radio del recipiente

c = Distancia entre P y el centro de la base de las llamas

El valor de la altura a de la llama se puede calcular con la fórmula empírica:

$$a = 29 b^{0,7} m^{0,6}$$

que depende de la dimensión conocida **b** y del parámetro **m** que es el caudal de producto evaporado también llamado tasa de combustión (Kg/m² s).

Otra fórmula alternativa es la dada por Thomas (1963):

$$\frac{a}{D} = 42 \left[\frac{m}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0,81}$$

en donde **D** es el diámetro equivalente del incendio, ρ_a = densidad del aire (1,2 kg/ m³), y **g** = aceleración de la gravedad (9,8 m/s²).

El caudal de evaporación **m** se calcula mediante la expresión:

$$m = K \frac{h_c \cdot 10^{-3} \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}}{h_v}$$

siendo:

K = Parámetro adimensional función de la temperatura de ebullición.

h_c = Calor de combustión del producto evaporado (J/kg).

h_v = Calor atente de vaporización (J/kg)

Al calcular el caudal de producto evaporado se debe introducir el valor del parámetro **K** para lo cual se hace la distinción siguiente:

a. Líquidos con punto de ebullición inferior a la temperatura ambiente

El caudal de evaporación está originado por la radiación interior de las llamas y por el calor proporcionado por el pavimento. El primero tiene el valor:

$$m = \frac{h_c \cdot 10^{-3} \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}}{h_v}$$

El caudal originado por la absorción de calor del pavimento disminuye rápidamente con el tiempo por lo que el valor dado por la fórmula anteriores adecuado para la mayoría de líquidos.

Esta aproximación equivale a considerar el coeficiente K = 1.

Para el caso de incendio de propano licuado:

- o Calor inferior de combustión (potencia calorífica inferior) $h_c = 11079,2 \text{ cal/g}$
- o Calor latente de vaporización a la temperatura de ebullición - 42,1°C $h_v = 101,76 \text{ cal/g}$

$$m = \frac{11079,2 \cdot 10^{-3}}{101,76} = 0,109 \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$$

b. Líquidos con punto de ebullición superior a la temperatura ambiente

En un escape de tales líquidos tiene lugar el proceso de evaporación normal. En caso de incendio parte del calor radiante se emplea en calentar el líquido (o la capa superficial) hasta su punto de ebullición y parte se utiliza para la evaporación.

El coeficiente **K** adopta la expresión:

$$K = \frac{h_v}{c_p \Delta T + h_v}$$

c_p = Calor específico a presión constante (J/kg . K)

ΔT = Diferencia entre la temperatura de ebullición del líquido y la temperatura ambiente en grados Kelvin (K).

El denominador representa el calor total necesario para calentar 1 kg. de líquido desde la temperatura ambiente hasta su punto de ebullición y su evaporación subsiguiente. Se supone que los valores c_p y h_v son independientes de la temperatura.

Sustituyendo el valor de **K** en la fórmula general se tiene el caudal de evaporación:

$$m = \frac{h_v}{c_p \Delta T + h_v} \cdot \frac{h_c}{h_v} \cdot 10^{-3} = \frac{h_c}{c_p \Delta T + h_v} \cdot 10^{-3} \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$$

Conociendo **m** y **b** se calcula la altura de las llamas **a**. El valor **c**, distancia entre el punto considerado y el centro de la base de las llamas se elige para las distancias deseadas.

Mediante los valores de las relaciones a/b y c/b y con la ayuda de la tabla 2 se obtiene el factor de visión geométrico para las tres posiciones horizontal, vertical e inclinada máxima del blanco irradiado frente al incendio cilíndrico.

Incendio de forma rectangular

Adopta la forma representada en la figura 3, asimilable a un incendio de líquido derramado en un cubeto, charco o piscina rectangular. Es la forma normalmente esperada cuando el incendio sobrepasa el propio recipiente, pero queda delimitado por el propio recinto de contención.

En este caso la altura de las llamas también se calcula con la misma fórmula que vimos en incendios circulares.

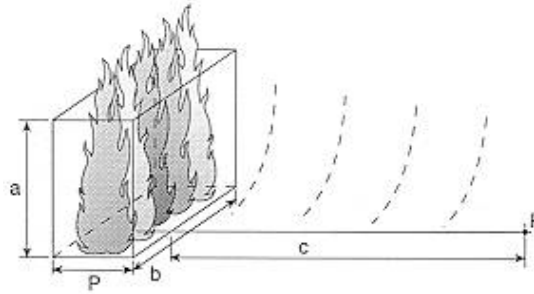
$$a = 29 b_{eq}^{0,7} \cdot m^{0,6}$$

en que la **b** se ha sustituido por **b_{eq}** para lo cual se equipara el área del rectángulo a un círculo de radio **b_{eq}** obteniendo

$$bp = \pi b_{eq}^2$$

$$b_{eq} = \sqrt{bp / \pi}$$

Mediante las relaciones a/b y cb y b/c y a/c y con la ayuda de la tabla 3 se obtiene el factor de visión geométrico para las tres posiciones F_n, F_v y F_{máx}.



Forma de Incendio con frente rectangular

Intensidad de radiación de la llama

La intensidad media de radiación **E** de las llamas de un incendio depende del tipo de combustible y del diámetro de la base del líquido incendiado.

La dependencia del diámetro de la base del líquido incendiado se fundamenta en los siguientes puntos:

- El nivel de turbulencia de una llama está afectado por el diámetro.
- Si la llama es ópticamente transparente, la intensidad de radiación es función del diámetro.
- A mayor diámetro, aumenta la posibilidad de formación de humo negro y hollín debido a la deficiencia de oxígeno en la zona interna del incendio.
- En general la intensidad de radiación **E** varía entre 40 y 140 kW/m².

En las tablas 4 y 5 se indican, para diversos combustibles, los valores de **E**, que sirven para calcular la irradiación recibida a una cierta distancia del incendio y con una cierta sobrevaloración al comparar con datos experimentales ya que no se tiene en cuenta la dependencia del diámetro del incendio ni la formación de humo negro y hollín.

Tabla 4: Intensidad media de radiación de la superficie de llama (kW/m²)

LÍQUIDOS CON TEMPERATURA EBULLICIÓN > TEMPERATURA AMBIENTE (CHARCOS NO HIRVIENTES)	
Acetato de vinilo	30
Acetonitrilo	37
Acrilonitrilo	26
Acido fórmico	=2
Alcohol alílico	38
Acrilato de metilo	30
Benceno	70
Bromo	
N-butil mercaptano	85
T-butil mercaptano	73
Cloroformo	≈1
Cloruro de alilo	32
Dicloropropano	20
Dietilamina	77
Disulfuro de carbono	16
Epiclorhidrina	22
Etilendiamina	30
Etil mercaptano	59
Formiato de etilo	30
Formato de metilo	19
Metanol	15
Nafta disolvente	68
Oxido de propileno	45
Tetracloruro de carbono	=1
Tetraetilo de plomo	20
Tetrahidrotiofeno	-

Tabla 5: Intensidad media de radiación de la superficie de la llama (kW/m²)

LÍQUIDOS CON TE < TA (CHARCOS HIRVIENTES)	
Acetaldehido	32
Amoníaco	13
Butadieno	86
Butano	94
Bromuro de metilo	8
Butileno	93
Cloruro de etilo	14
Cloruro de metilo	14
Cloruro de vinilo	26
Dimetilamina	61
Etano	89
Etileno	89
Metano	95
Oxido de etileno	35
Monóxido de carbono	14
Propano	92
Propileno	93
Sulfuro de hidrógeno	20

Evaluación de las consecuencias

Para evaluar las consecuencias que puede causar la radiación térmica de un incendio de un determinado producto y dimensiones se calcula la irradiación q recibida a las distancias a considerar mediante la expresión ya citada $q = d F E$ en la cual se sustituyen los valores del coeficiente de transmisión atmosférica d , el factor de visión F y la intensidad media de radiación E , tal como se ha indicado en apartados anteriores.

Las distancias consideradas en metros y las irradiaciones recibidas en kW/m² configuran un mapa para la fuente de radiación estudiada en la que se trazan círculos concéntricos de isorradiación que pueden quedar reducidos a un sector en el caso de no existir personas o bienes en todo el entorno circular de la fuente de radiación.

Los valores de la irradiación recibida en función de la distancia se comparan con referencias como las indicadas en la tabla 6, que dan la máxima radiación tolerable para materiales y personas.

Tabla 6: Máxima radiación tolerable para materiales y personas

MÁXIMA RADIACIÓN TOLERABLE	
	Irradiación térmica kW/m ²
Materiales	
Pared de ladrillos	400
Hormigón armado	200
Cemento	60
Acero	40
Madera	10
Personas	
Durante 20 s. sin quemaduras	6,5
Bomberos y personas protegidas	4,7
Personas desprotegidas	4,0

En la Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico (BOE 6-2-1991) se establecen unos valores umbrales que deberán adoptarse para la delimitación de la Zona de Intervención y de Alerta que son respectivamente 5 kW/m² con un tiempo máximo de exposición de 3 minutos y 3 kW/m² (sin indicación de tiempo máximo de exposición).

El límite soportable por las personas es de 4 a 5 kW/m², debiendo tenerse en cuenta que la radiación recibida del sol en un día de verano es aproximadamente 1 kW/m².

Un procedimiento complementario para estimar las consecuencias en un grupo de población es el método "Probit" de vulnerabilidad a radiaciones térmicas, desarrollado en la NTP 291-1991.

En este método "Probit" se añade el concepto de dosis de irradiación recibida, calculada con la expresión $D = t \cdot I^k$ en la que:

K = Constante experimental (valor más utilizado = 4/3)

D = Dosis (s . W^{4/3} /m^{2.4/3})

I = Intensidad de irradiación (W/m²)

t = tiempo de exposición (s)

En función de la dosis recibida se puede estimar de forma orientativa el porcentaje de personas afectadas según nos refiramos a diferentes grados de quemaduras y/o a muertes.

Resolución de un caso práctico

Calcular el flujo de radiación térmica recibido a una distancia $c = 50$ m, originado por el incendio de un derrame masivo de acrilonitrilo contenido en un cubeto rectangular de dimensiones: $b = 35$ m y $p = 20$ m (Ver figura 3). Las condiciones atmosféricas se suponen sin viento, 25 °C y 60% de humedad relativa.

Datos:

Calor de combustión $h_c = 33200$ kJ/Kg

Calor latente de vaporización $h_v = 616$ kJ/kg

Temperatura de ebullición = 77,4 °C

Calor específico medio a presión constante $c_p = 0,5$ cal/°C g = 2090 J/°C kg

Presión de vapor saturado del agua a 25 °C= 3130 Pa

El primer valor a calcular es el caudal de evaporación en la combustión **m**:

$$m = \frac{h_c}{C_p \Delta t + h_v} 10^{-3} \text{ kg / m}^2 \text{ s} = \frac{33200000 \cdot 10^{-3}}{2090(77,4 - 25) + 616000} = 0,0457 \text{ kg / m}^2 \text{ s}$$

En segundo lugar se debe calcular las dimensiones del incendio del cual se conoce la base rectangular y se debe transformar en un valor equivalente como si fuera base circular para poder aplicar la fórmula de la altura de llama:

$$b = 35 \text{ m} \quad p = 20 \text{ m} \quad 35 \cdot 20 = \pi b_{\text{eq}}^2$$
$$b_{\text{eq}} = (35 \cdot 20 / \pi)^{1/2} = 14,92 \text{ m}$$

La altura del incendio sería:

$$a = 29 b_{\text{eq}}^{0,7} \cdot m^{0,6} = 29 \cdot 14,92^{0,7} \cdot 0,0457^{0,6} = 30 \text{ m}$$

A continuación se obtiene el factor de visión geométrico para el incendio rectangular a partir de las relaciones:

$$a/b = 30/35 = 0,85; c/b = 50/35 = 1,43$$

$$b/c = 35/50 = 0,7 \text{ y } a/c = 30/50 = 0,6 \text{ y la tabla 3}$$

a. **Factor de visión horizontal** para $a/b = 0,85$ y $c/b = 1,43$

Para evitar la laboriosidad de una interpolación entre los valores dados en las tablas y teniendo en cuenta que en los valores de la intensidad media de radiación **E** no puede darse gran precisión, se puede optar por el valor más desfavorable, es decir el de mayor factor de visión. En este caso sería el correspondiente a:

$$a/b = 1 \text{ c/b} = 1,2 \text{ que es } F_h = 0,0409$$

b. **Factor de visión vertical** para $b/c = 0,7$ $a/c = 0,6$

Empleando el mismo criterio se puede tomar el factor de visión correspondiente a:
 $b/c = 0,75$ $a/c = 0,75$ que es $F_v = 0,1032$

c. El **factor de visión máximo** para un blanco receptor con la inclinación c de irradiación máxima sería:

$$F_{\text{máx}} = (F_h^2 + F_v^2)^{1/2} = (0,0409^2 + 0,1032^2)^{1/2} = 0,3796$$

El coeficiente de transmisión atmosférica d se calcula con la fórmula dada:

$$d = 2,02 (P_v \cdot x)^{-0,09}$$

siendo:

$$P_v = \frac{3130 \cdot 60}{100} = 1878 \text{ Pa}$$

Observando la configuración de la figura 3 y el valor de x en la fórmula del coeficiente de transmisión atmosférica, en el caso de incendio rectangular coinciden los valores de x y c de forma que $x = c = 50$.

$$d = 2,02 (1878 \cdot 50)^{-0,09} = 0,72$$

La intensidad media de radiación de la superficie de llamas de acrilonitrilo según tabla 4 es 26 kW/m^2 .

La irradiación recibida por una persona u objeto en posición vertical será aproximadamente:

$$q = d F_v E = 0,72 \cdot 0,1032 \cdot 26 = 1,93 \text{ kW/m}^2$$

Irradiación soportable comparando con los valores de referencia dados en la tabla 6.

Bibliografía

(1) ROMANO, A., PICCININI, N., y G.C. BELLO

Evaluación de las consecuencias de incendios, explosiones y escapes de sustancias tóxicas en plantas industriales.
Ingeniería Química, Vol. 17, nº 200, Noviembre 1985

(2) HOFTWZER, G.W.

Heat radiation (Chapter 6 Yellow Book)

Apeldoorn, Netherland, TNO.

(3) A.I.Ch.E.

Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis

New York, American Institute of Chemical Engineers, 1989, 585 págs.