

DEFINIENDO LA CURVA DE FUEGO CUANDO HAY ROCIADORES AUTOMÁTICOS

01/03/2025

Javier Querol - Director Técnico Pefipresa (España) – Grupo Minimax

1. ABSTRACTO

Se pretende aportar información de apoyo para definir correctamente la curva de potencia calorífica respecto al tiempo en las simulaciones de incendio deterministas donde funcionan los rociadores automáticos de modo que los resultados sean lo más conservadores posibles en escenarios creíbles.

2. CURVA DEL FUEGO

2.1 Datos claves que se deben introducir en una simulación

Entre los múltiples datos de partida que se introducen en el programa FDS respecto a la combustión para simular el fuego de la manera más exacta posible, está el tipo de combustible, el poder calorífico, la potencia calorífica máxima por unidad de superficie, la fórmula química, los productos de la combustión, la fracción radiada, condiciones para la transferencia de calor, pero hay uno que es muy crítico y suele simplificarse, a saber, la curva del desarrollo del fuego. Y para que sea lo más real posible se intenta basar tal curva en ensayos experimentales.

Para ello se crean uno o varios quemadores (“burners”) a los que se les define una curva que puede ser del tipo parabólica, hiperbólica o simplemente por puntos en los que se introduce el crecimiento, estabilización y decaimiento en el tiempo. Incluso puede ser un todo – nada, es decir que una vez empiece a arder lo haga en la potencia calorífica máxima por unidad de superficie establecida desde el primer instante.

Un método alternativo consiste en definirle a la superficie del quemador una velocidad de propagación radial. Otro consiste en atribuir a todas las superficies de materiales combustibles una reacción en la que el inicio de la combustión quede controlado por la temperatura de ignición en cada celda en la que esté presente.

En cualquiera de los casos, es decir sea un quemador o una superficie combustible con reacción al fuego, se puede atribuir un coeficiente de extinción ligado con el agua presente en la celda que se expresa en $\text{m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$.

2.2 Representación geométrica y potencia calorífica unitaria

La representación geométrica del incendio es muy relevante. Durante mucho tiempo se ha simplificado este representándolo en el suelo mediante un círculo con un “diámetro” de fuego que produce una potencia calorífica equivalente al incendio previsto obtenido de una curva de ensayo. El ejemplo resuelto en la NFPA 204 [5] Apéndice D es así. Cuando se utiliza esta simplificación, entonces se debe tener la precaución de utilizar la **potencia calorífica máxima por unidad de área en planta** y que puede tener valores tan elevados como 30.000 kW/m^2 (NFPA 204 o SFPE [6]).

Este es también el criterio de la norma UNE 23585 tabla 1.3 [7] cuando aplica para fuego bajo 250 kW/m^2 y para fuego alto 625 kW/m^2 multiplicado por la altura de almacenamiento menos 1, y en los que el área viene dada por un cuadrado a nivel del suelo con una dimensión por lado que a su vez determina el perímetro del fuego.

Test	Commodity	Storage ht. (m)	Peak HRR (kW m ⁻²)	Time of peak (s)
SP-4	PS jars in compartmented CB cartons	4.11	16,600	439
SP-13	PS foam meat trays, wrapped in PVC film, in CB cartons	4.88	10,900	103
SP-23	PS foam meat trays, wrapped in paper, in CB cartons	4.90	11,700	113
SP-30A	PS toy parts in CB cartons	4.48	5,210	120
SP-35	PS foam insulation	4.21	26,000	373
SP-44	PS tubs in CB cartons	4.17	6,440	447
SP-15	PE bottles in compartmented CB cartons	4.20	5,330	434
SP-22	PE trash barrels in CB cartons	4.51	28,900	578
SP-43	PE bottles in CB cartons	4.41	4,810	190
SP-6	PVC bottles in compartmented CB cartons	4.63	8,510	488
SP-19	PP tubs in compartmented CB cartons	4.26	5,870	314
SP-34	PU rigid foam insulation	4.57	1,320	26
SP-41	Compartmented CB cartons, empty	4.51	2,470	144
RS-1	CB cartons, double tri-wall, metal liner	2.95	1,680	260
RS-2	" "	2.95	1,490	89
RS-3	" "	2.95	1,680	180
RS-4	" "	4.47	2,520	120
RS-5	" "	4.47	2,250	240
RS-6	" "	5.99	3,260	210
RS-7	PS cups in compartmented CB cartons	2.90	4,420	95
RS-8	" "	2.90	4,420	100
RS-9	" "	2.90	4,420	120
RS-10	" "	4.42	6,580	100
RS-11	" "	5.94	8,030	148

CB cardboard, PE polyethylene, PP polypropylene, PS polystyrene, PU polyurethane

Commodity	Heat Release Rate (kW per m ² of floor area)*
Wood pallets, stacked 0.46 m high (6%–12% moisture)	1,420
Wood pallets, stacked 1.52 m high (6%–12% moisture)	4,000
Wood pallets, stacked 3.05 m high (6%–12% moisture)	6,800
Wood pallets, stacked 4.88 m high (6%–12% moisture)	10,200
Mail bags, filled, stored 1.52 m high	400
Cartons, compartmented, stacked 4.5 m high	1,700
PE letter trays, filled, stacked 1.5 m high on cart	8,500
PE trash barrels in cartons, stacked 4.5 m high	2,000
PE fiberglass shower stalls in cartons, stacked 4.6 m high	1,400
FRP bottles packed in cartons, stacked 4.6 m high	6,200
PE bottles in cartons, stacked 4.5 m high	2,000
PU insulation board, rigid foam, stacked 4.6 m high	1,900
FRP jars packed in cartons, stacked 4.6 m high	14,200
PS tubs nested in cartons, stacked 4.2 m high	5,400
PS toy parts in cartons, stacked 4.5 m high	2,000
PS insulation board, rigid foam, stacked 4.2 m high	3,300
FRP bottles packed in cartons, stacked 4.6 m high	3,400
FRP tubs packed in cartons, stacked 4.6 m high	4,400
PP and PE film in rolls, stacked 4.1 m high	6,200
Methyl alcohol	600
Gasoline	2,500
Kerosene	1,700
Fuel oil, no. 2	1,700

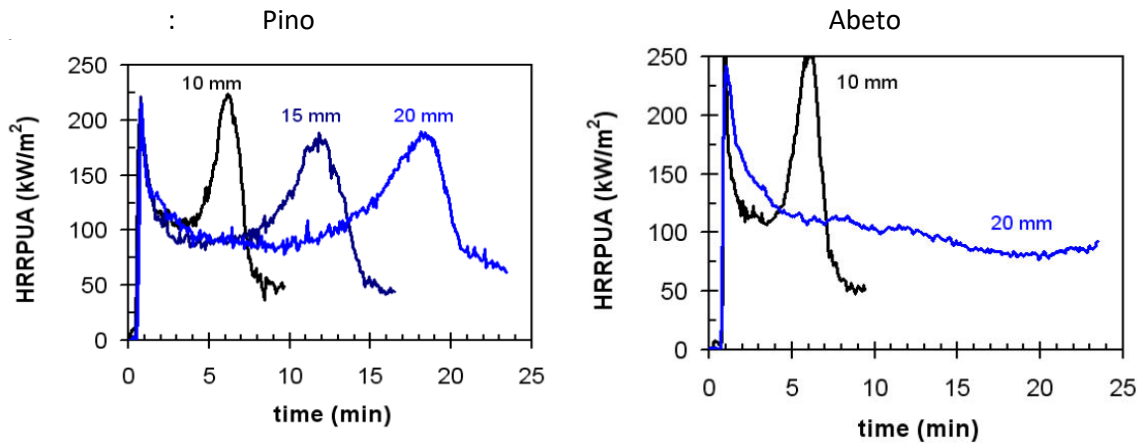
PE: polyethylene. PP: polypropylene. PS: polystyrene. PU: polyurethane. FRP: fiberglass-reinforced polyester.

*Heat release rate per unit floor area of fully involved combustibles, based on negligible radiative feedback from the surroundings and 100 percent combustion efficiency.

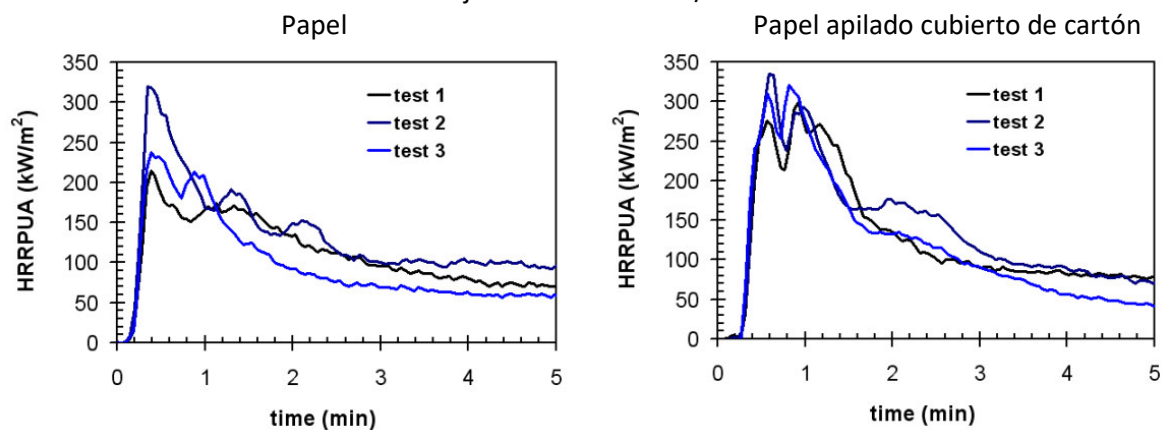
En cambio, si el material combustible está representado en 3 dimensiones, entonces hay que tener presente que existen unos límites máximos de **potencia calorífica máxima por unidad de superficie (en 3D)**, tal como se observa en las siguientes gráficas, que pueden rondar los 1.500 kW/m² para líquidos inflamables o algunos plásticos y que dependen del flujo incidente y del espesor de la lámina o capa de líquido que se quema:

Celulósicos.

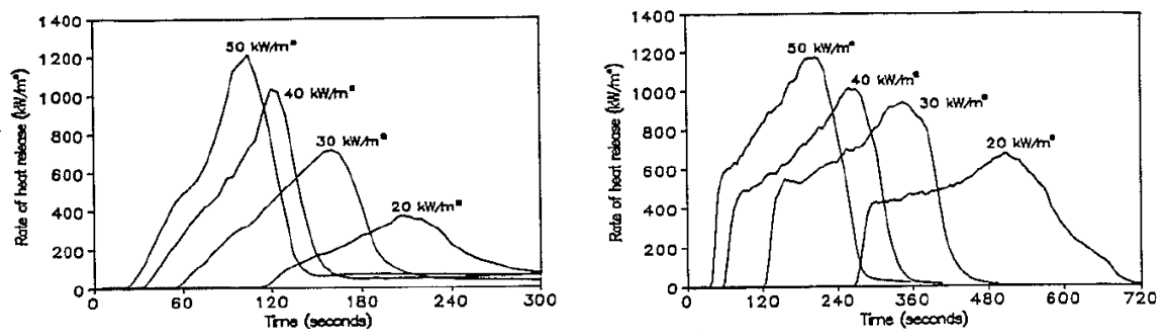
Flujo incidente 50 kW/m²

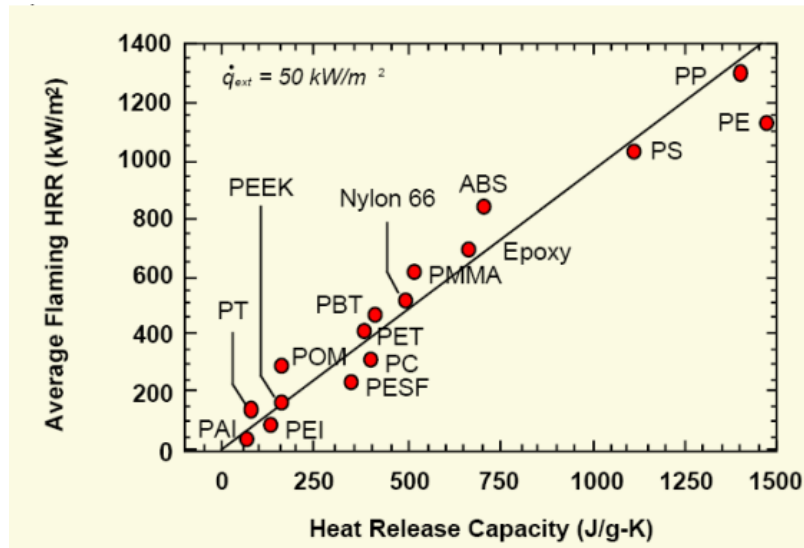


Flujo incidente: 35 kW/m²



Plásticos: Curvas para varios flujos incidentes





Líquidos inflamables: Gasolina:

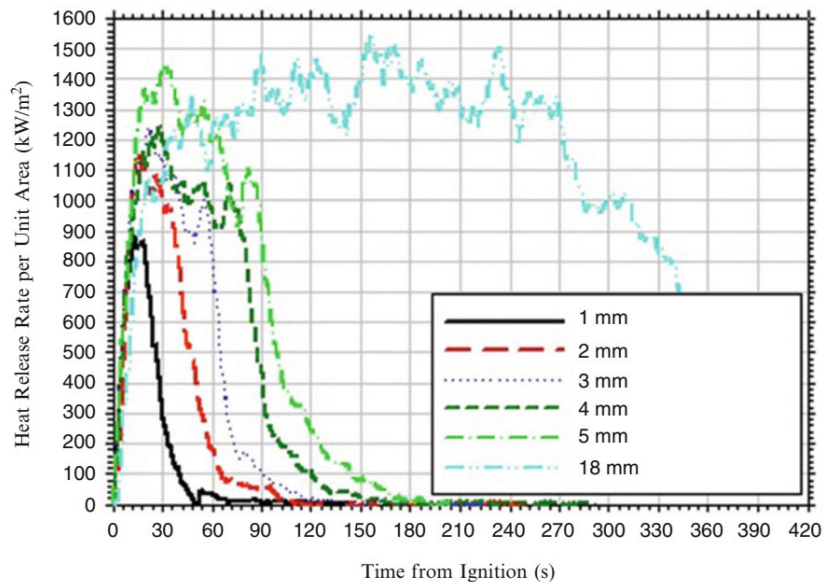


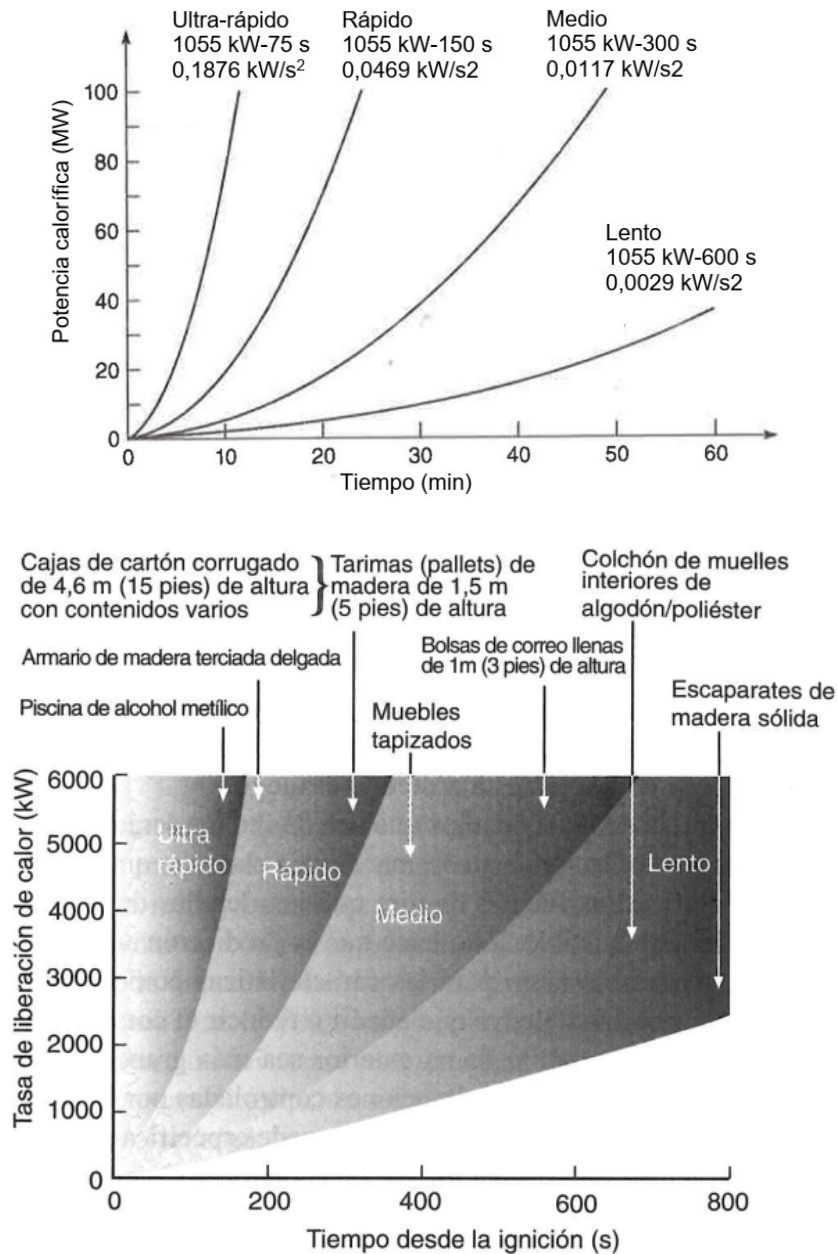
Fig. 65.24 Summary of HRRPUA data measured for gasoline on water in 1.5 m² (16 ft²) pan fire tests with fuel depths of 1, 2, 3, 4, 5 and 18 mm

2.3 Fase de crecimiento

La fase de crecimiento de la curva también ha de ser objeto de análisis. En general, se asume un crecimiento cuadrático del incendio con una curva simplificada en la que se clasifican el fuego como lento, medio, rápido y ultra-rápido, a partir de la fórmula:

$$Q = \alpha (t - t_0)^2$$

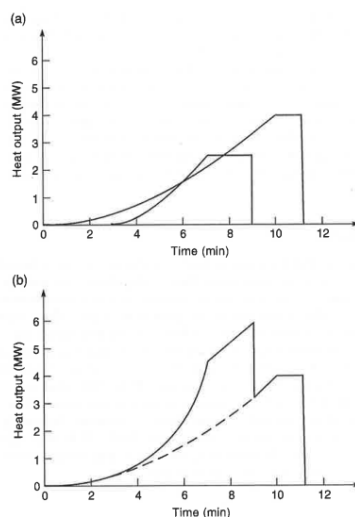
Siendo t el tiempo y t_0 el tiempo pasado la fase incipiente y habiéndose producido la ignición, en aquellos casos donde puede considerarse que el fuego crece de manera cuadrática.



Sin embargo, se debe tener presente que cuando se trata de materiales almacenados, pueden darse tiempos de crecimiento para alcanzar 1055 kW menores que para el fuego ultra-rápido de 75 segundos como se observa en la tabla siguiente, en los que los primeros 14 ejemplos corresponden a fuegos que llegan a ser más rápidos.

La razón para esto estriba en que el fuego crece de manera muy rápida verticalmente (se ha asemejado a un crecimiento cúbico que alcanza la parte alta del almacenamiento en muy pocos segundos) y, por ende, el efecto global es que la potencia resultante de almacenar material verticalmente equivale a la suma de las potencias de los materiales almacenados, y de ahí que el valor de la constante α resulte ser proporcional a la altura como expresa la norma NFPA 204 [5].

El efecto aditivo y de mayor inclinación de las curvas de potencia se muestra en la figura siguiente en la que dos fuegos se desarrollan simultáneamente:



Combustible	Altura (m)	tg (s)	Qmax (MW)
Panel aislante de espuma rígida de PS	4,27	7	167
Panel aislante de espuma rígida de PU	4,57	8	19
Botellas de PVC en cajas de cartón	4,57	9	42
Tubos de PP en cajas de cartón	4,57	10	57
Papel, rollos verticales	6,10	17-28	
Prendas de algodón, acrílica o nailon	3,66	22-43	
Bebidas destiladas en barriles	6,10	25-40	
Panel aislante de espuma rígida de PU	3,05	35	16
Film de PP y PE en rollos	4,27	40	
Palets de PE apilados	2,44	32-57	
Frascos de PS en cajas de cartón	4,57	55	30
Cubos de basura de PE en cajas de cartón	4,57	55	48
Cajas de cartón compartimentadas apiladas	4,57	60	25
Botellas de PE en cajas de cartón	4,57	75	43
Palets de madera, apilados (6%-12% humedad)	4,88	75-120	22
Palets de madera, apilados (6%-12% humedad)	3,05	80-120	13
Piezas de juguete PS en cajas de cartón	4,57	120	38
Colchón de PU, individual, horizontal		120	
Palets de PE, apilados	0,91	150	
Bandejas portacartas de PE, llenas en cajas cartón	1,52	180	
Palets de madera, apilados (6%-12% humedad)	1,52	90-190	7
Palets de madera, apilados (6%-12% humedad)	0,46	160-320	
Bolsas de correo llenas	1,52	190	
Papel, densamente empaquetado en cajas de cartón	6,10	470	

2.4 Fase de estabilización debida a los rociadores automáticos

Existen diversos criterios y es la intención de este artículo compararlos en un caso analizado como ejemplo. En todos se podría simular con el agua descargada por los rociadores (sin necesidad de coeficiente de extinción, es decir = 0), para que se incluya el efecto refrigerante. Sin embargo, algunos métodos están pensados para simular sin el agua, en particular aquellos que se detienen o incluso reducen la potencia con la activación del primer rociador.

El argumento para ello es que hay una tasa máxima de calor convectivo que puede aportarse a la capa de humos hasta la temperatura de activación de los rociadores. Según la norma UNE 23585, el flujo másico de gases sólo depende del perímetro del fuego y de la altura libre de humos (Thomas). De modo que, si la temperatura de la capa de humos no puede superar la de activación de los rociadores, hay un calor convectivo máximo que se puede transferir a la capa de humos, independientemente del número de rociadores activados:

$$M_f = C_e \cdot P \cdot Y^{3/2} \quad \text{pero como} \quad M_f = \frac{Q_f}{c \cdot \Theta_1} \quad \text{entonces} \quad Q_f = C_e P Y^{3/2} c \Theta_1$$

Si se aplica la fórmula de Zuloski, Heskestad se obtiene un resultado parecido. Y es lógico, ya que si se aportase más calor entonces se activarían más rociadores en compensación, de modo que hay una tasa residual convectiva máxima hacia la capa de humos.

Aunque esto sea cierto a nivel de temperatura, no lo es respecto a los productos de la combustión, que sí se incrementan con la potencia del incendio al haber mayor cantidad de masa quemada, y por ende los humos llegan a ser más oscuros y densos, y por lo tanto la visibilidad termina siendo menor y la toxicidad mayor (situación más crítica) que si se subestima la potencia del fuego.

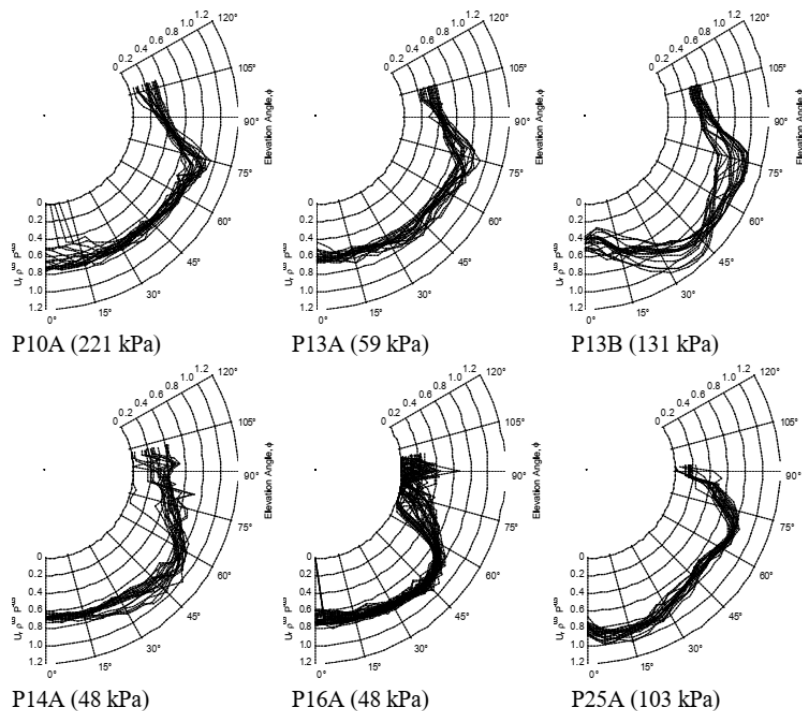
En cambio, si se incluye el agua descargada por los rociadores, entonces la representación del incendio es más realista, pues se tienen en cuenta los efectos de empuje descendente y enfriamiento de la capa de humos por las gotas de agua, así como los efectos más perjudiciales de un fuego más potente.

En contra se argumenta que hay escasa validación y verificación cuando se pretende incluir el factor de extinción, pero el hecho es que se puede simular perfectamente sin incluir este coeficiente, y aun así incorporar el efecto refrigerante del agua debido a su evaporación.

También se argumenta que se requiere mayor tiempo de computación, pero eso no debería primar si lo que se intenta es comprender mejor el fenómeno que se estudia, sobre todo si está ligado con la seguridad de vidas.

Es cierto que hay ciertas dificultades técnicas, pero estas tienen su solución. Por un lado, está el modelado adecuado del patrón de descarga de los rociadores, si bien ya hay estudios completos que tipifican los patrones de descarga de diferentes tipos de rociadores incluidos los ESFR, con sus ángulos de descarga, velocidades y distribución de las gotas como el del NIST [8] algunos de cuyos resultados se muestran a continuación:

Code	Orifice e	K ³	Frame Arm Distances											Deflector		Deflector		Deflector		Number of		Height of	
			Frame Arm	Frame Arm Thickness	Frame Arm Width 1	Frame Arm Width 2	Deflector Width	Deflector Height	Deflector Rise to Center	Deflector Angle	Deflector Notch Width	Deflector Notch Depth	Number of Notches	Deflector Thickness	Deflector over Orifice								
			(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)	(J)	(K)	(L)	(M)								
P10A	9.5	40	19	4	9	4	30	24	NA	NA	2	4	16	1	33								
P11A	10.9	50	18	4	6	3	23	1	NA	NA	2	5	16	1	35								
P13A	12.7	79	20	6	8	4	32	1	NA	NA	1	6	16	1	32								
P13B	12.7	81	23	6	8	4	27	1	NA	NA	2	6	12	1	38								
P14A	13.5	115	25	4	6	3	25	1	NA	NA	3	4	16	1	33								
P16A	15.9	161	25	4	6	3	27	1	NA	NA	3	5	16	1	33								
P25A	25.4	363	30	10	8	4	44	2	NA	NA	23	14	16	2	62								
U16																							
A	15.9	161	25	4	6	3	47	11	6	18	3	5	24	2	34								
U16B	15.9	161	24	9	7	5	46	10	4	15	4	5	24	1	43								
U25																							
A	25.4	363	30	10	8	4	68	10	6	17	6	7	20	1	64								
U25B	25.4	363	30	10	8	4	78	16	15	6	6	6	18	1	63								
U25C	25.4	363	30	10	8	4	67	21	9	20	6	4	16	1	67								



Sprinkler	Pressure (kPa)	Elevation (degrees)	Distribution below DV50	Distribution above DV50	DV50 (μm)	β (μm)	γ (μm)	σ _{ln} (μm)
P13B	88	60	log-normal	normal	1251	0.62	1.87	0.62
P13B	131	0	log-normal	Rosin-Rammler	548	0.68	1.85	0.70
P13B	131	10	Rosin-Rammler	Rosin-Rammler	518	0.68	2.05	0.69
P13B	131	30	log-normal	Rosin-Rammler	666	0.68	2.30	0.65
P13B	131	60	log-normal	log-normal	1117	0.62	1.62	0.63
P19A	345	0	log-normal	Rosin-Rammler	696	0.65	2.13	0.59
P19A	345	10	log-normal	Rosin-Rammler	632	0.66	2.05	0.60
P19A	345	30	log-normal	log-normal	344	0.67	1.85	0.60
P19A	345	60	log-normal	above log-normal	454	0.63	1.51	0.51

Por otro lado, existe limitación en el número gotas por segundo que se pueden simular ya que la tecnología actual de los equipos informáticos sólo permite simular miles de gotas por segundo para tener resultados en un tiempo razonable. Sin embargo, la simplificación de “super-gotas”, en representación de un grupo de gotas según la velocidad de descarga, aceleración de la gravedad, arrastre por los humos, evaporación, etc., cumpliendo con las ecuaciones de conservación de la energía y movimiento ha podido ser validado también [9-11].

A continuación, se exponen los criterios conocidos:

Criterio de Lund, Suecia, Dinamarca, Noruega: [12,13]

Si $\dot{Q}_{act} \leq 5,0 \text{ MW}$:

- después de la activación del rociador, la potencia calorífica se puede asumir constante durante un (1) minuto, igual a $\dot{Q}_{act}$;
- entonces la potencia calorífica se puede asumir que desciende a 1/3 de $\dot{Q}_{act}$;

- la potencia calorífica se puede asumir que se mantiene en $1/3$ de $\dot{Q}_{act}$ durante el resto del progreso del incendio, considerando que el sistema de rociadores puede no extinguir completamente el incendio.

Si $\dot{Q}_{act} > 5,0 \text{ MW}$:

- después de la activación del rociador, la potencia calorífica se puede asumir constante, igual a $\dot{Q}_{act}$ durante el resto del progreso del incendio.

Criterio de la ISO 16733-1 [14]

El valor de HRR se mantiene constante a la activación del sistema de rociadores. Aquí puede surgir cierta discrepancia porque, aunque la mayoría asume que la activación del sistema de rociadores se produce con el primer rociador, la misma norma cuando habla de sistemas de extinción sólo admite que se detenga cuando se alcanza la concentración de diseño y no cuando se descarga el gas, y en agua debería contemplarse un criterio similar teniendo en cuenta que la densidad efectiva no se alcanza con la activación de un único rociador sino de varios rodeando el fuego.

Los sistemas automáticos de supresión pueden funcionar en cualquier momento durante el incendio pero normalmente se espera que operen durante la etapa previa a la combustión súbita generalizada. La tasa de emisión de calor tras la activación de un sistema de rociadores se puede tomar como manteniéndose constante, a menos que se pueda demostrar que el sistema de rociadores se ha diseñado para suprimir el incendio dentro de un periodo especificado. En el último caso, se puede suponer que la tasa de emisión de calor disminuye de una manera lineal a lo largo del periodo especificado.

Criterio de VTT: [15]

La curva se detiene con un valor de HRR constante $2 \times \text{HRR}$ a la activación del sistema de rociadores.

3. The design HRR, $\dot{Q}_d$, is obtained by doubling this value $\dot{Q}_d = 2 \times \dot{Q}(t_{act})$, and the fire is assumed to burn on the design HRR until the end of calculation.

De esta forma se pretende incluir un factor de seguridad.

Criterio de NFPA 204: [5]

Recomienda que la activación total (“gang”) de un sistema de control de humos se realice después de la activación de “un número conservador de rociadores”. Además, concreta que los rociadores que están a 1,5 veces la distancia entre ellos y el punto de ignición juegan un papel importante en la extinción por lo que sería lógico incluirlos en ese número conservador.

(c) Use of high-temperature, heat-responsive actuation mechanisms, compared to the sprinklers, can mitigate the problem of open vents. For example, for 74°C rated ESFR sprinklers, a minimum 180°C activation temperature should be provided for vents. Another approach would be to provide gang operation of the vents at the moment a conservative number of sprinklers are operating.

(a) Draft curtains can delay or prevent operation and can interfere with the discharge of sprinklers capable of delivering water to the fire. In practice, sprinklers capable of delivering water to the fire can be considered to be those that are within $1\frac{1}{2}$ sprinkler spacings of the ignition point.

Cabe señalar un asunto importante que afecta a este criterio y todos aquellas que se rijan por la activación de un número de rociadores. **Es obligatorio incluir el agua de los rociadores, para que haya enfriamiento y la activación de sucesivos rociadores lo tenga en cuenta.** Sino los resultados son muy diferentes y no se atienen a la realidad. En la guía del usuario del CFAST [16] se hace el siguiente comentario: “Dado que la dinámica del rociador y los efectos directos del rociado sobre las temperaturas y velocidades del gas no están modelados, los tiempos calculados de activación

de rociadores secundarios y/o detectores después de que se activa el primer rociador no deben modelarse ya que el impacto del primer rociador en la activación de rociadores adicionales no está incluido en el modelo CFAST.” En el ejemplo más adelante se ve este asunto muy claramente.

Criterio de Singapur: [17]

La potencia HRR se detiene a la activación de un rociador del segundo anillo de rociadores. Aquí sucede lo mismo ya comentado sobre la obligatoriedad de incluir el agua descargada en la simulación, para que los resultados sean reales.

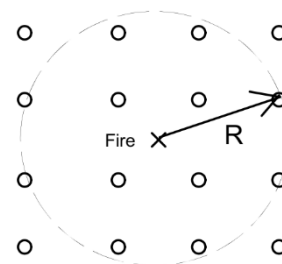
- (1) If automatic sprinkler system is installed, fire size can be determined based on 2nd ring of sprinkler activation

Criterio de la Comunidad de Madrid: [18]

Es similar al caso de la NFPA 204. En la guía de revisión recientemente publicada propone detener la curva ante la activación de 3 rociadores, aunque no define si con o sin la incorporación del agua en la simulación, dado que los resultados son muy diferentes en uno y otro caso, como ya se ha comentado.

Criterios de IFEG: [19]

IFEG propone detener la curva cuando se active un rociador que esté a una distancia radial del fuego conservadora y superior a la distancia entre rociadores. Aquí sucede lo ya comentado sobre la obligatoriedad de incluir el agua descargada en la simulación, para que los resultados se correspondan con la realidad.



Criterio de la UNE 12845: [20]

Este criterio establece que el valor máximo sea equivalente con la densidad de diseño y área de operación de los rociadores. De nuevo sucede lo mismo ya comentado sobre la obligatoriedad de incluir el agua descargada en la simulación, para que los resultados sean reales.

Criterios de equivalencia con el diseño del control de humos de la UNE 23585: [7]

Estrictamente hablando, se debería comprobar que se obtienen las condiciones adecuadas tanto en la condición de **fuego bajo** como de **fuego alto**. Pues bien, los criterios anteriores en general aportan fuegos que son iguales o inferiores al fuego bajo.

Criterio del Coeficiente de Extinción

Este se ha dejado de último porque es el más elaborado y porque es el que puede suscitar mayores objeciones, aunque es el que representaría la situación más realista del incendio y la capacidad de control o supresión del agua en función de su densidad en la base del fuego. No será objeto de este estudio comparativo ya que se han escrito diversos documentos respecto a la aplicación y validación de esta metodología a los que se puede consultar [1 a 4].

3. ESCENARIO DE PRUEBA

3.1 Características del Escenario

Se trata de un escenario similar al que aparece en el video que puede encontrarse en la red de internet titulado “*Incidental Storage of Uncartoned Unexpanded Plastic Fire Test*” al que puede accederse en el siguiente enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=1uXhOUQRWGk>

Este escenario fue simulado en los documentos de validación del coeficiente de extinción [3, 4]. La única diferencia será que aquí se compararán los resultados de los diferentes criterios antes explicados. Se trata de un recinto utilizado por FM para realizar pruebas de fuego y de rociadores con un techo a 9 m de altura y con medidas de 21 m x 21 m. La única diferencia es que para calibrar el efecto de los humos se han puesto paredes en el contorno y una abertura para entrada de aire y dos exutorios en el techo cumpliendo con el diseño de la norma UNE 23585. Los exutorios y la puerta se abren 60 segundos después de la detección del incendio por uno de los dos detectores de humo lineales.

Los rociadores están dispuestos cada 3 m en ambas direcciones, para un total de 49. Son de K160, respuesta rápida y temperatura de operación de 74°C, operando a la presión mínima de 0,5 bar, lo que proporciona un caudal de 113 l/min por rociador. Cabe resaltar que, en los ensayos de FM con palés de plástico vacíos, el fuego no fue extinguido si bien no se propagó a la mercancía adyacente gracias a mediar pasillos de 2,4 m entre los palés plásticos y el resto de mercancía.

A continuación, se presenta el cálculo justificativo según la norma UNE 23585 de los exutorios y las aberturas de entrada:

Temperatura ambiente	T_{amb} (°C)	20	
Densidad ambiente	ρ_{amb} (kg/m ³)	1.20	
Altura del techo	H (m)	9	
Longitud depósito humos	L (m)	21	
Ancho depósito humos	W_1 (m)	21	
Superficie en planta	S (m ²)	441	
Temperatura activación rociadores	T_{roc} (°C)	74	
Área de operación rociadores de techo	A_{roc} (m ²)	86	
Altura almacenamiento	h (m)	2	2
Tasa de calor liberado	Q (kW/m ²)	250	625
Superficie del fuego	A_f (m ²)	20.25	20.25
Superficie del fuego (máxima corregida)	A_f (m ²)	20.25	20.25
Perímetro del fuego	P (Wf) (m)	18.00	18.00
Calor total liberado	Q_t (kW)	5,063	12,656
Calor convectivo	Q_c (kW)	4,050	10,125
Coeficiente de entrada de aire al penacho	C_e	0.188	0.188
Altura libre de humos	Y (m)	2.50	2.50
Masa de humos generada	M_f (kg/s)	13.38	13.38
Calor específico del aire	c_p (kJ/kg °K)	1.026	1.026

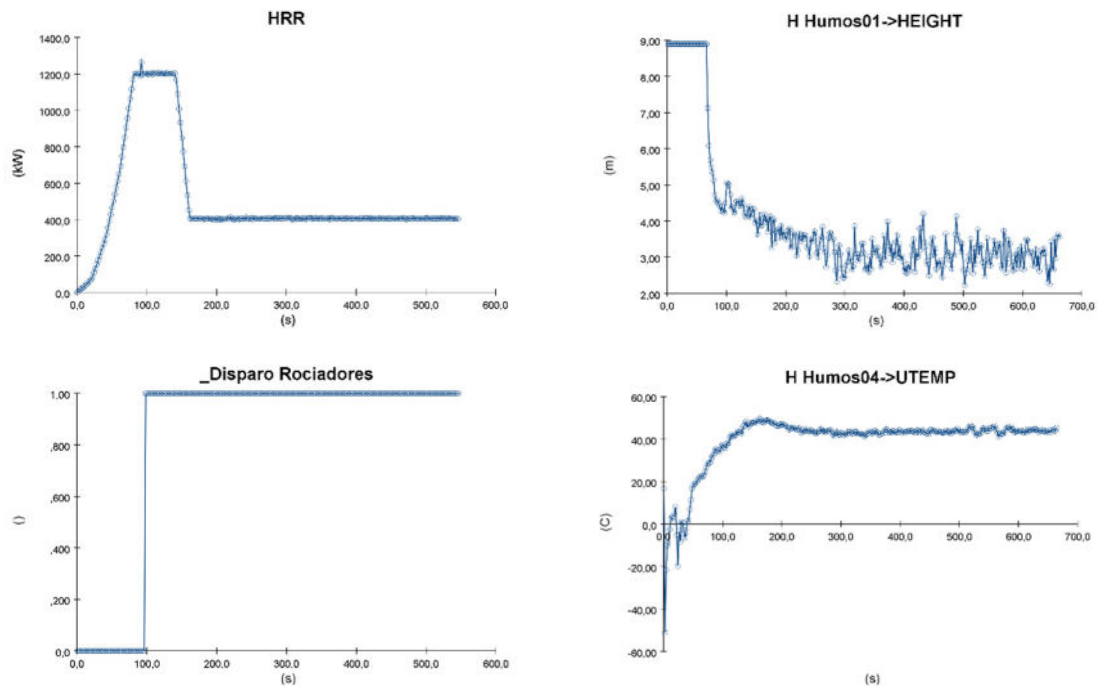
Incremento de temperatura de la capa de humos sin rociadores	Θ (°K)	295	738
Incremento de temperatura de la capa de humos con rociadores	Θ (°K)	54	54
Profundidad mínima de la capa de humos	d_{min} (m)	0.53	0.53
Grosor de la capa de humos	d_1 (m)	6.50	6.50
Superficie aerodinámica de entrada de aire	$A_i * C_i$ (m ²)	4.00	4.00
Superficie aerodinámica de venteo natural	$A_v * C_v$ (m ²)	3.48	3.48
Densidad del humo	ρ_{hum} (kg/m ³)	1.03	1.03
Caudal total de extracción	V_f (m ³ /s)	12.99	12.99
Flujo máximo por aireador para evitar el efecto vórtice (lejos de pared)	M_{cri} (kg/s)	144.79	144.79
Número mínimo de aireadores lejos de pared	N_{min}	0.1	0.1
Flujo máximo por aireador para evitar el efecto vórtice (cerca de pared)	M_{cri} (kg/s)	158.91	158.91
Número mínimo de aireadores cerca de pared	N_{min}	0.1	0.1
Largo aireador		2.0	2.0
Ancho aireador (ajustado para reducir obstrucciones)	D_v (m)	1.5	1.5
Diámetro equivalente aireador	D_i (m)	1.7	1.7
Coefficiente aerodinámico del aireador	C_v	0.70	0.70
Superficie aerodinámica del aireador natural elegido	$A_{v1} * C_{v1}$ (m ²)	2.10	2.10
Número de aireadores naturales necesarios	N_{req}	1.7	1.7
Número de aireadores naturales elegido	N_n	2.0	2.0

La curva de fuego programada para todos los casos ha sido la correspondiente al fuego alto de la norma UNE 23585 con crecimiento Ultra-rápido, deteniéndola claro está según el criterio que se aplique con el fin de que los resultados sean comparables en el tiempo. En rojo se muestra la activación del primer rociador. La fracción corresponde al valor introducido cuando se entra la curva por pares de puntos en el FDS.

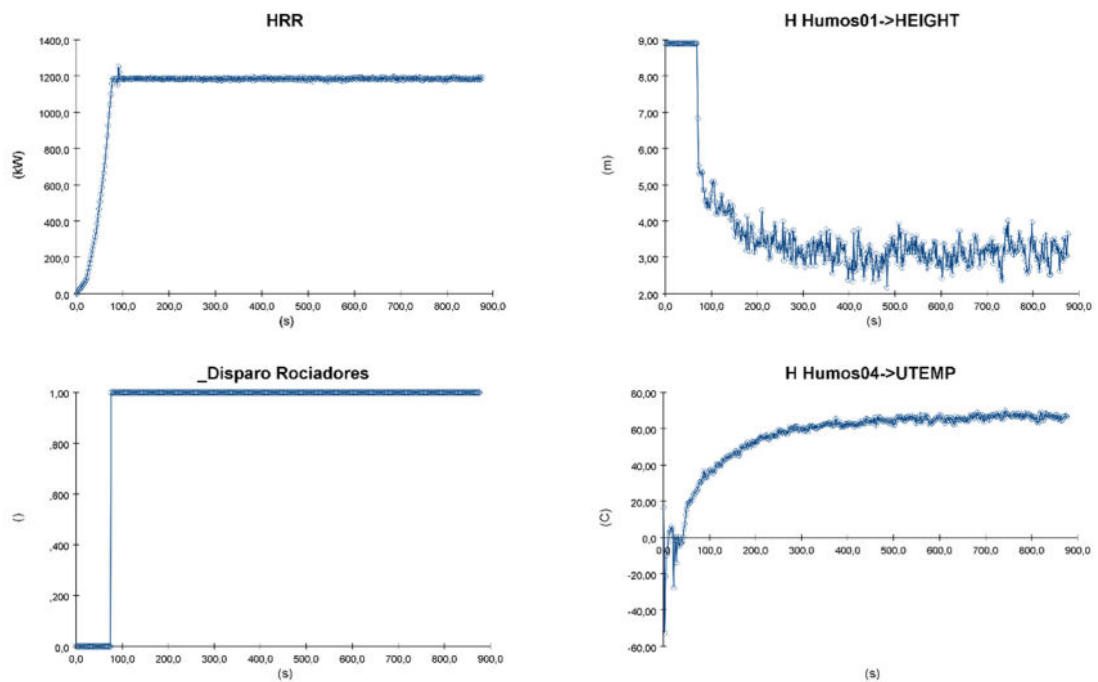
t_g	Ultra-rápido	75
α		0,18755556
Tiempo	Fracción	Potencia KW
0	0,000	0
20	0,006	75
40	0,024	300
60	0,053	675
78	0,090	1.141
80	0,095	1.200
100	0,148	1.876
112	0,186	2.353
120	0,213	2.701
140	0,290	3.676
160	0,379	4.801
180	0,479	6.077
200	0,592	7.502
220	0,716	9.078
240	0,852	10.803
260	1,000	12.679

4. RESULTADOS

4.1 Criterio de LUND

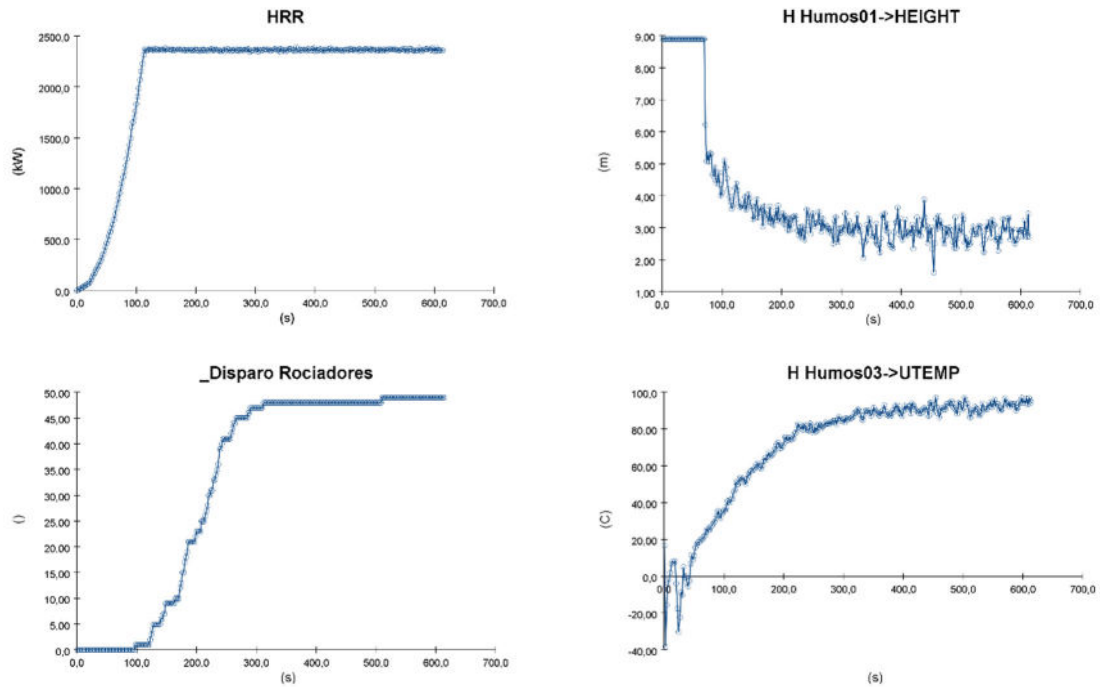


4.2 Criterio de la ISO 16733-1 con 1 rociador



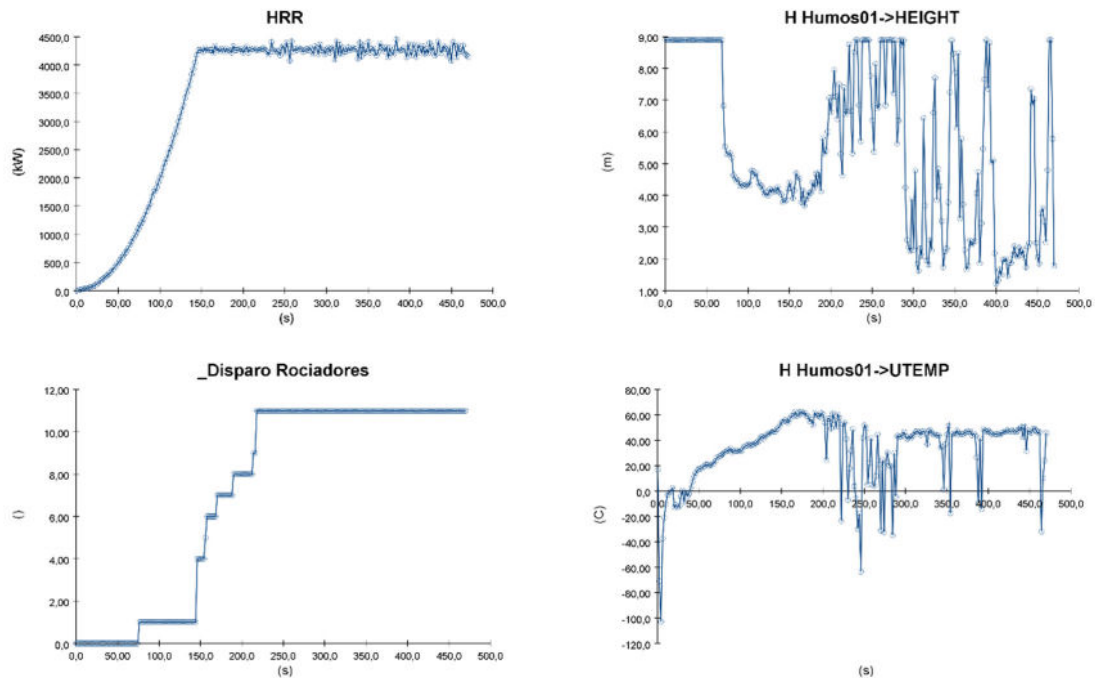
Se observa que con 1,2 MW únicamente se activa un rociador y la temperatura de la capa de humos se mantiene alrededor de 65°C.

4.3 Criterio de VTT sin descarga de agua



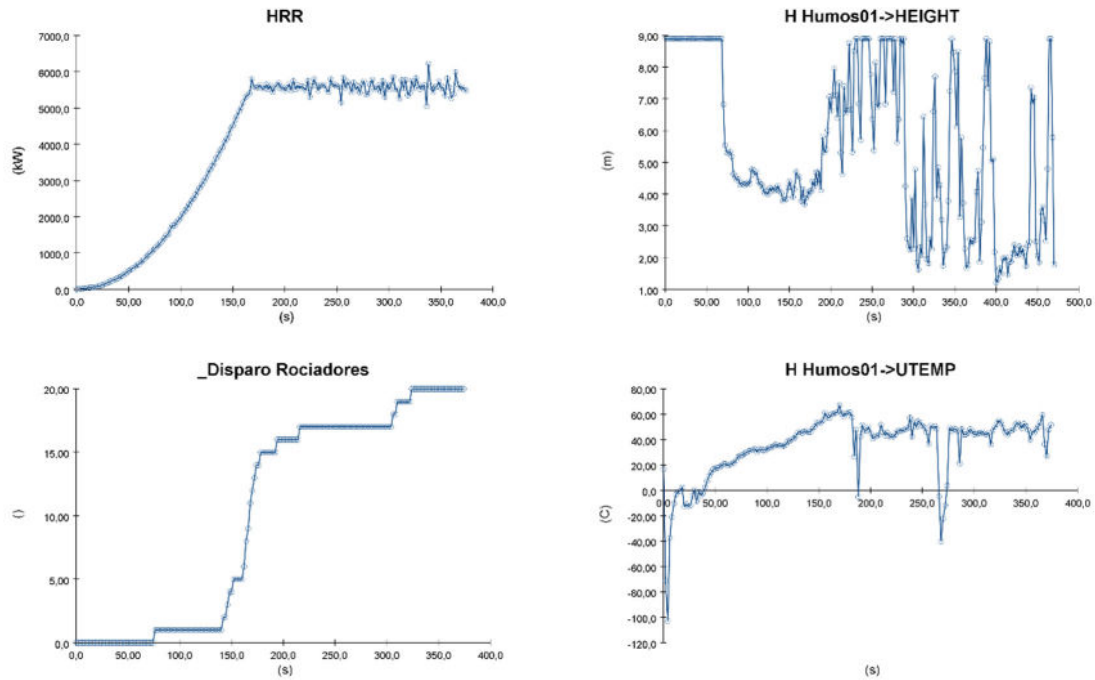
Se observa que con 2,3 MW se activan todos los rociadores ya que la temperatura media de la capa de humos llega a estar alrededor de 85°C por encima de los 74°C de activación de los rociadores.

4.4 Criterio de NFPA 204 detenida con 4 rociadores con descarga de agua



Se observa que, aunque la curva se detiene con la activación del 4º rociador en 4,2 MW, se terminan activando 11 rociadores debido a la inercia térmica (muchos menos que los 49 que se activaron sin descarga de agua y 2,3 MW).

4.5 Criterio de Singapur o IFEG con descarga de agua



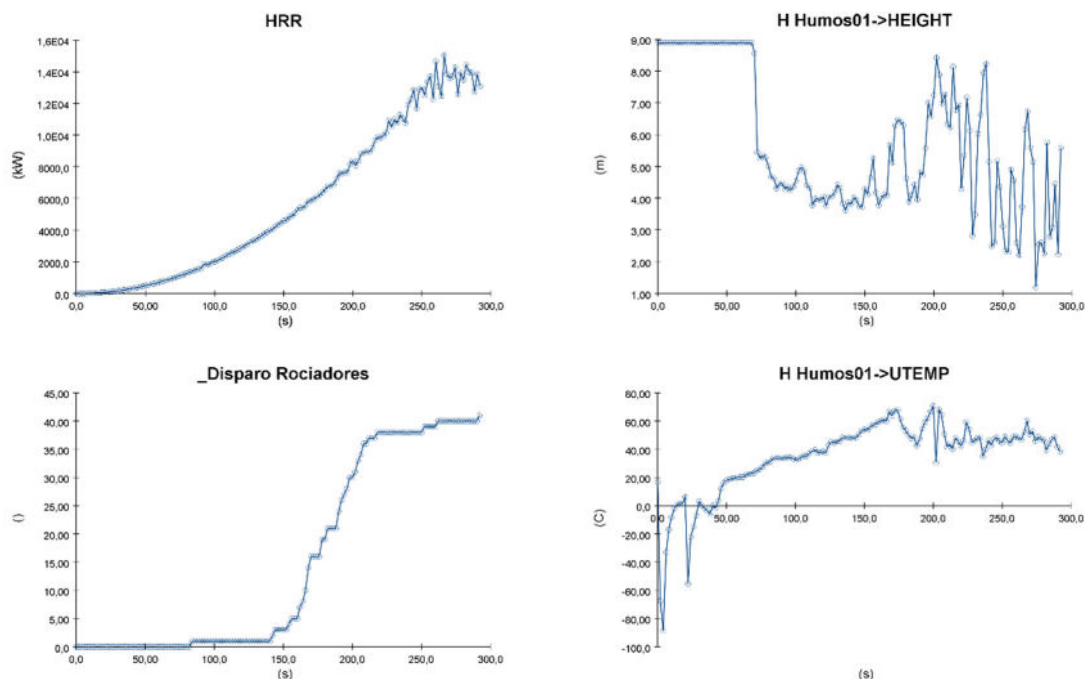
Se observa que se activan 20 rociadores, un valor que es perfectamente posible ya que el área de diseño del sistema de 260 m² implica hasta 29 rociadores.

4.6 Criterio de equivalencia con la UNE 23585 [7] fuego bajo y fuego alto

Áreas de producción y/o apilamiento con altura limitada				
	Altura crítica de apilamiento	Área de incendio (A _f) m ²	Perímetro del incendio (P) m	Flujo de calor liberado (q _f) kW / m ²
Categoría 2 según anexo I.	5	20,25	18	Conjuntos de combustibles hasta 2 m de altura. q _f (bajo) = 250 q _f (alto) = 625
				Conjuntos de combustible con altura entre 2 y 5 m (h _f) q _f (bajo) = 250 · (h _f - 1) q _f (alto) = 625 · (h _f - 1)

Según esto, para una altura de almacenamiento de hasta 2 m, se tendría un fuego bajo de 250 * 20,25 = 5.062 kW y para fuego alto de 625 * 20,25 = 12.656 kW.

El fuego bajo daría un resultado equivalente al criterio de Singapur o IFEG, de modo que se evalúa aparte el fuego alto.



Se observa que se terminan activando 41 rociadores cuando se detiene la simulación a los 13 MW. Como $41 > 29$ entonces queda claro que un fuego de estas características no puede llegar a producirse a menos que el sistema de rociadores quede desbordado de su capacidad de diseño. Y se asume que si está bien diseñado de acuerdo con el riesgo que protege esto no debería suceder. Por consiguiente, **este caso se descarta** y se va al inmediatamente anterior como máximo posible. Tal como lo expresa la norma UNE 23585 en el Anexo E:

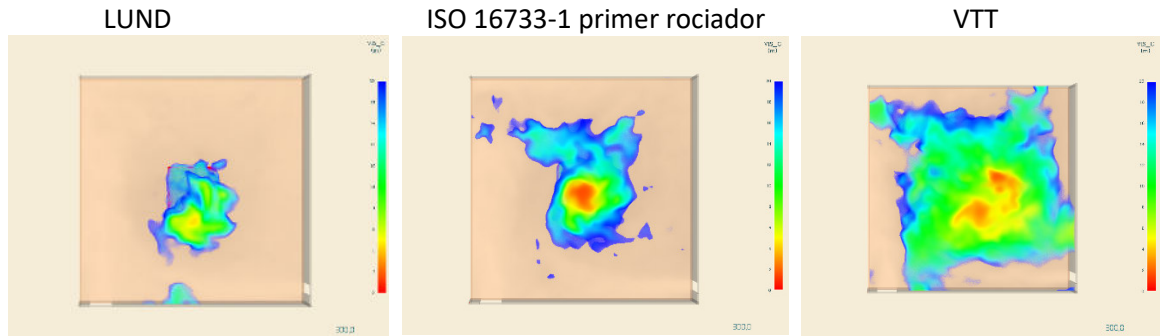
En ausencia de mejor información, puede asumirse razonablemente que no operarán más rociadores que los que están previstos en los cálculos de diseño del sistema de rociadores y su suministro de agua.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

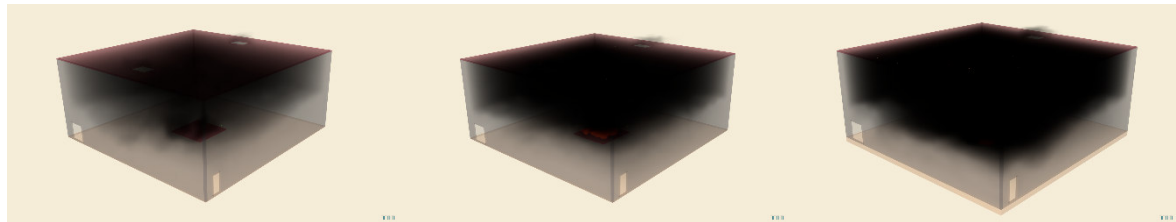
De los resultados queda claro que, si se quiere utilizar un criterio como la activación de un número conservador de rociadores antes de detener la curva del fuego, entonces es imprescindible incluir el agua descargada por estos para que se tenga en cuenta el enfriamiento de los gases debido a la evaporación del agua. De otro modo, los tiempos de activación de los siguientes rociadores después del primero son ficticios, tal como muestra la siguiente tabla comparativa:

Método utilizado para detener la curva	Sin descarga de agua			Con descarga de agua		
	LUND	ISO (1º rociador)	VTT	NFPA 204 (4º rociador)	Singapur IFEG UNE 23585 Anexo E UNE 23585 fuego bajo UNE EN 12845	UNE 23585 Fuego alto
Número de rociadores activados	1	1	49	11	20	41
Potencia estabilizada (MW)	0,4	1,2	2,4	4,2	5,6	12,7
Tiempo activación primer rociador (s)	76	76	76	76	76	82
Tiempo activación 4 rociador	—	—	111	144	148	153
Tiempo activación rociador 2 anillo	—	—	137	189	165	166

SIN DESCARGA DE AGUA (Visibilidad a los 2 m de altura y 300 segundos)



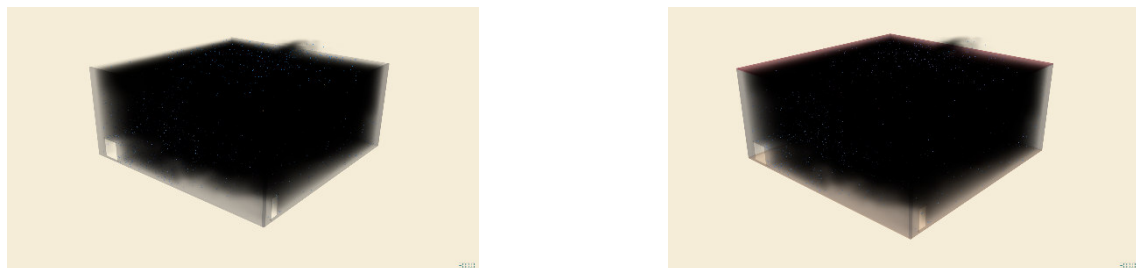
VISTA EN 3D DE LOS HUMOS



CON DESCARGA DE AGUA (Visibilidad a los 2 m de altura y 300 segundos)



VISTA EN 3D DE LOS HUMOS



Los criterios que requieren un número conservador de rociadores activados son muy equivalentes y parten de la base de que se necesita más que un rociador para lograr la densidad de agua necesaria sobre el fuego. Incluso la ISO 16733-1 entraría en este grupo si se entiende que el tiempo de activación del sistema de rociadores no es a la de activación del primer rociador sino aquel en que se logra la “concentración de diseño”.

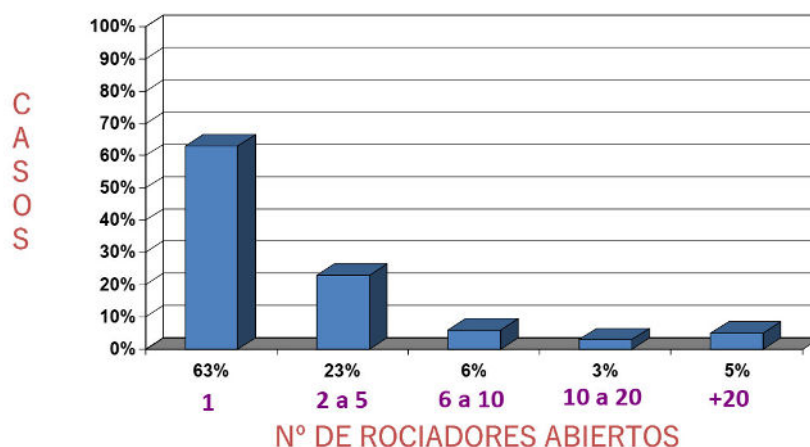
También queda patente que los humos son más perjudiciales cuanto mayor es la potencia del fuego y mayor la cantidad de rociadores activados. Por consiguiente, el criterio de equivalencia con la norma de diseño de los rociadores UNE EN 12845 sigue siendo el más conservador de todos, a saber, que no se activarán más rociadores que los previstos en el área de diseño. Ese es el verdadero límite, y la única razón válida para poder descartar un fuego alto en aplicación de equivalencia con la norma UNE 23585 Anexo E respecto al diseño del SCTEH.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con el RSCIEI y el CTE las soluciones prestacionales deberían asegurar un nivel de seguridad “equivalente” o superior al que se obtendría de aplicar la reglamentación prescriptiva. Pues bien, como se ha visto los criterios de LUND y de ISO 16733-1 (con la activación del primer rociador) distan mucho de ser equivalentes. Ni siquiera se acercan al fuego bajo de la norma UNE 23585. En cambio, los criterios de otras normas de reconocido prestigio como IFEG, NFPA 204. SINGAPUR al recomendar la activación de un SCTEH después de la activación de un número conservador de rociadores, que como se ha demostrado sólo puede hacerse si se incluye el agua descargada en la simulación, se aproximan mucho más al criterio de equivalencia que establece la norma UNE EN 12845, a saber, el del área de diseño de la norma.

Según las estadísticas de eficacia de los sistemas de rociadores, el método que se utilice se ajustará a la realidad de la siguiente forma:

1. Si la curva elegida únicamente activa 1 rociador abarcará el 63% de los casos;
2. Si en todo el incendio sólo se produce la activación de 4 o 5 incluyendo la descarga de agua entonces será representativo de > 86%;
3. Si la curva elegida consigue que se activen tantos como los previstos en el área de diseño del sistema de rociadores a lo largo del incendio incluyendo la descarga de agua, entonces podrá afirmarse con seguridad que englobará entre el 95% y el 100% de los casos.



Como se ha demostrado también, las condiciones son peores si el fuego adquiere mayor potencia y se activan más rociadores hasta el máximo determinado por el área de operación del diseño del sistema de rociadores. En el análisis determinista se trata de demostrar que las hipótesis iniciales del **peor escenario razonable** no producen un resultado que supere un conjunto de condiciones predeterminadas. Entonces, ¿cómo puede afirmarse que se ha analizado el peor escenario si no se evalúa desde el punto de vista 3?

7. REFERENCIAS

1. Validación del coeficiente de extinción al modelar el fuego con rociadores automáticos 1, 2024
2. Validación del coeficiente de extinción al modelar el fuego con rociadores automáticos 2, 2024
3. Validación del coeficiente de extinción al modelar el fuego con rociadores automáticos 3, 2024
4. Validación del coeficiente de extinción al modelar el fuego con rociadores automáticos 4, 2025
5. NFPA 204 “Standard for Smoke and Heat Venting”, 2021.
6. “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, 5th Edition, 2016.

7. UNE 23585, "Requisitos y métodos de cálculo y diseño para proyectar un sistema de control de temperatura y de evacuación de humos (SCTEH) en caso de incendio estacionario", 2017.
8. "Spray Characteristics of Fire Sprinklers", NIST GCR 02-838, David Thomas Sheppard, 2002.
9. Fire Dynamics Simulator User's Guide
10. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification
11. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation
12. "Selecting design fires", Staffanson, Leif - Lund University, 2010.
13. "Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings", Nystedt, Fredrik - Lund University, 2011.
14. UNE-ISO 16733-1 Ingeniería de seguridad contra incendios. Selección de escenarios de fuego de diseño y fuegos de diseño
15. VTT "Design Fires for Fire Safety Engineering" de Jukka Hietaniemi & Esko Mikkola, 2010.
16. CFAST "Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User's Guide"
17. "Singapore Fire Safety Engineering Guidelines", 2015
18. "Guía v1.0 Revisión de Proyectos Prestacionales de Protección Contra Incendios en Establecimientos Industriales" (Comunidad de Madrid), 2024
19. IFEG "International Fire Engineering Guidelines", 2005
20. UNE EN 12845, "Sistemas de rociadores automáticos", 2021.