

VALIDACIÓN DEL COEFICIENTE DE EXTINCIÓN AL MODELAR EL FUEGO CON ROCIADORES AUTOMÁTICOS – PARTE 1

29/07/2024

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

1. ABSTRACTO

Se pretende dar soporte a la utilización del coeficiente de extinción (E_COEFFICIENT) al modelar el fuego con rociadores automáticos cuando se incluye el agua descargada en la simulación del incendio en un programa de CFD como el FDS. Se comparan los resultados de simulaciones realizadas para una instalación de rociadores automáticos en un recinto con techo a menos de 12 m de altura en el que se almacena hasta 7,2 m, aplicando diferentes densidades de diseño y modos de protección (control y supresión) así como diferentes materiales y se compara con los criterios de diseño de las normas de rociadores. Este documento complementa el artículo “Modelando el Fuego con Rociadores Automáticos”.

2. VALIDACIÓN DE SIMULACIONES EN FDS CON DESCARGA DE AGUA

2.1 Curva del Fuego

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 $\text{m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$.

En este estudio se utilizará el método más sofisticado sin forzar la curva de potencia calorífica respecto al tiempo sino más bien dejando que el fuego crezca por sí mismo en base a la temperatura de ignición de cada celda, a la vez que la potencia calorífica instantánea resulte afectada bien por la refrigeración del agua bien por su capacidad extintora. Las curvas obtenidas que queden validadas se compararán con el método simplificado. Haciendo un repaso de los criterios simplificados que se aplican habitualmente para definir en qué punto se estabiliza la curva debido a la intervención del sistema de rociadores:

Criterio de Lund, Suecia, Dinamarca, Noruega: [13,14,25]

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

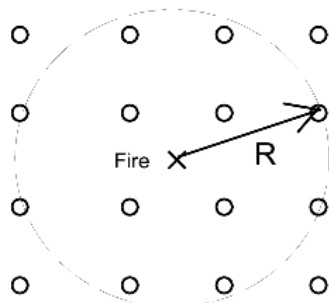
- después de la activación del rociador, la potencia calorífica se puede asumir constante durante un (1) minuto, igual a $\dot{Q}_{act}$;
- entonces la potencia calorífica se puede asumir que desciende a 1/3 de $\dot{Q}_{act}$;
- la potencia calorífica se puede asumir que se mantiene en 1/3 de $\dot{Q}_{act}$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

Criterios de IFEG, Singapur, NFPA 204: [21,22,23]

IFEG propone detener la curva cuando se active un rociador que esté a una distancia radial del fuego superior a la distancia entre rociadores. NFPA 204 considera que los rociadores situados a 1,5 veces la distancia entre ellos desde el fuego contribuyen a la extinción. Y Singapur habla de la activación del primer rociador en el segundo anillo alrededor del fuego. Estos 3 podría englobarse en un mismo criterio, de aplicar un factor de seguridad respecto a la activación del primer rociador antes de detener la curva.



Criterio de la Comunidad de Madrid: [24]

En la guía de revisión recientemente publicada propone detener la curva ante la activación de 3 rociadores.

2.2 Coeficiente de Extinción

Existe reticencia en la incorporación del agua descargada en las simulaciones. Por ejemplo, en el punto 9.4.1 de la recién publicada “Guía v1.0 de Revisión de Proyectos Prestacionales de Protección contra Incendios en Establecimientos Industriales” de la Comunidad de Madrid no se considera adecuado el uso de CFD para validar sistemas de extinción, aunque en contrapartida en el apartado A.3 se explica que se puede reproducir la reducción de combustión por el del agua descargada por los rociadores mediante el coeficiente de extinción (E_COEFFICIENT) obtenido de forma experimental. ¿Existen datos que permitan estimar este coeficiente con suficiente corrección? Sí.

Para ello se hace referencia a los trabajos de Madrzykowski, Vettori (1992) [10], Evans (1993) [11] y el de Yu, Lee y Kung (1994) [12]. En estos 3 estudios experimentales la fase de decaimiento del fuego debido a la aportación del agua sigue una curva exponencial del mismo tipo que la definida en FDS, a saber:

$$Q = Q_0 e^{-k(t-t_0)}$$

El parámetro k es el que condiciona que la curva descienda más o menos rápidamente. Las propuestas son:

Madrzykowski, Vettori [10]: $Q = Q_0 e^{-0,0023(t-t_0)}$ Q_0 HRR a la activación
(Ensayos riesgo ligero; w'' en planta = 4,2 mm/min)

Evans [11]: $Q = Q_0 e^{-1/3 w''^{1,85}(t-t_0)}$
 w'' = densidad en planta en mm/s
(Ensayos <500 kW; w'' en planta < 7,5 mm/min)

Yu, Lee, Kung [12]: $Q = Q_0 e^{-k(t-t_0)}$ siendo $k = c_1 w'' - c_2$
 w'' = densidad efectiva por superficie expuesta en kg/(m²-s)

Tipo de mercancía	c_1	c_2	Rango de aplicación de w''	
Clase II	0,536	0,0040	0,006	0,024
Grupo A Plásticos	0,716	0,0131	0,012	0,041

Es muy importante recalcar aquí que el valor de densidad que se debe aplicar en la fórmula de Evans es la densidad de planta, mientras que en la fórmula de Yu, Lee y Kung es la densidad por superficie (incluyendo las horizontales y verticales de la carga).

Veamos estos estudios más de cerca a la luz de las normas de diseño de rociadores. Por ejemplo, si se trata de un Riesgo Ordinario (RO) según la norma UNE EN 12845 [1,2,3], la densidad de aplicación sería de 5 mm/min o l/min m². En normas como NFPA 13 [4] y FM 3-26 [5] se darían condiciones similares.

Tabla 3 – Criterios de diseño para RL, RO y REP

Clase de riesgo	Densidad de diseño mm/min	Área de operación m²	
		Mojada o acción previa	Seca o alterna
RL	2,25	84	No permitida Se usa RO1
RO1	5,0	72	90
RO2	5,0	144	180
RO3	5,0	216	270
RO4	5,0	360	No permitida Se usa REP1
REP1	7,5	260	325
REP2	10,0	260	325
REP3	12,5	260	325
REP4	diluvio (véase la NOTA)		
NOTA Necesita consideración especial. Los sistemas de diluvio no están cubiertos por esta norma.			

Como un litro de agua pesa 1 kg, entonces esta densidad hay que dividirla por 60 para que esté expresada en mm/s, y de ahí $5/60 = 0,083 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$. Por consiguiente, para este caso aplicando Madrzykowski, Vettori [10] (5 mm/min está algo por encima de los 4,2 mm/min del estudio, pero bastante cerca) como el factor de extinción que hay que introducir en el programa FDS es por densidad del agua, entonces hay que dividir el exponente k entre la densidad en las unidades apropiadas, a saber, $E = 0,0023 / 0,083 = 0,03$. Y si hubiésemos escogido la fórmula de Evans [11], entonces $E = 0,083^{0,85} / 3 = 0,04$, valores muy aproximados entre sí.

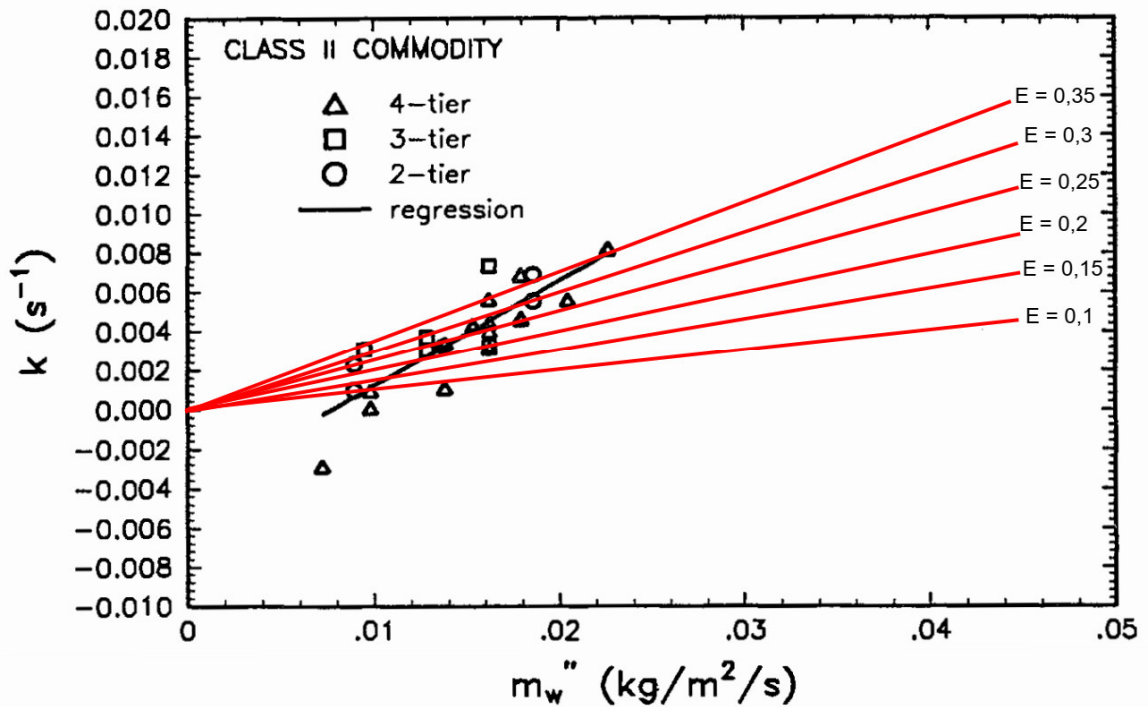
Cuando se analiza un almacenamiento, entonces se puede recurrir al estudio de Yu, Lee, Kung [12]. En el siguiente ejemplo se va a simular un producto paletizado almacenado en 4 niveles hasta 7,2 m. De acuerdo con la Tabla 4 de la UNE EN 12845 [1] si el producto quedase clasificado como Categoría 2, entonces se diseñaría el sistema con una densidad de aplicación de 17,5 mm/min y un área de operación de 260 m², mientras que, si fuese plástico no expandido dentro de cajas de cartón, Categoría 3, entonces se diseñaría con 27,5 mm/min y un área de operación de 300 m².

Tabla 4 – Criterios de diseño para REA con protección solo en cubierta o techo

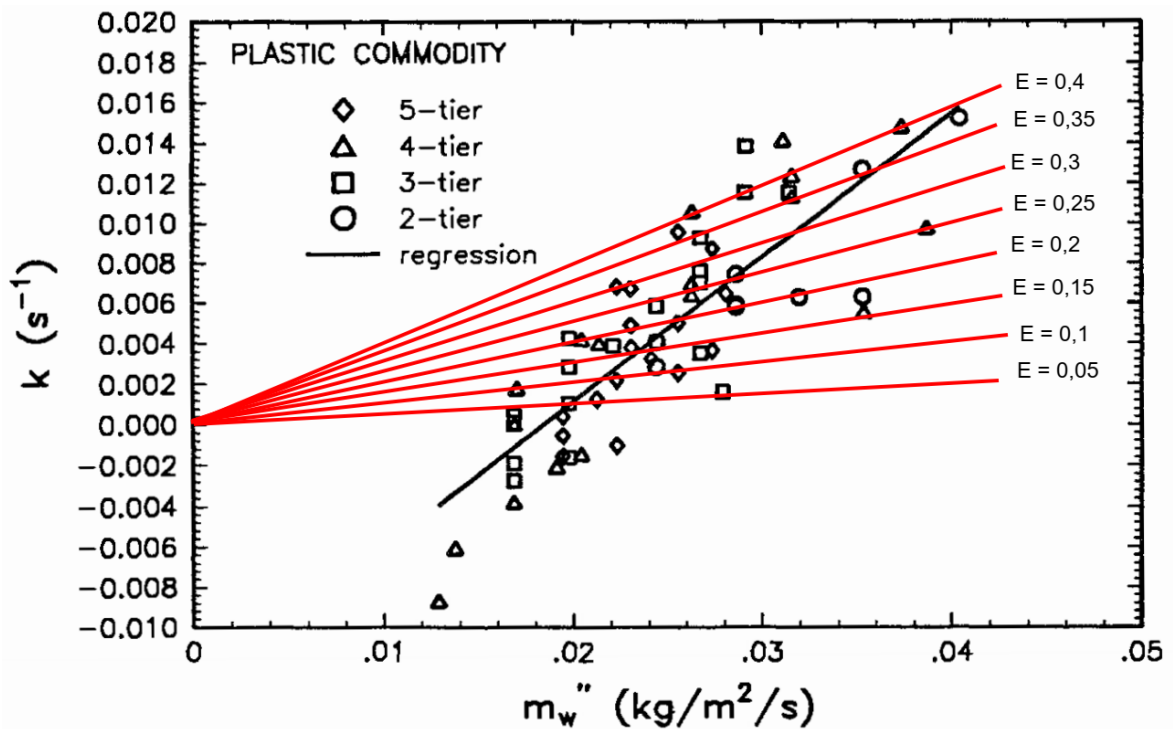
Configuración de almacenamiento	Altura máxima permitida de almacenamiento				Densidad de diseño	Área de operación [sistema mojado o de acción previa (véase la NOTA)]
	m				mm/min	m ²
	Categoría I	Categoría II	Categoría III	Categoría IV		
ST1 Libre o en bloques	5,3	4,1	2,9	1,6	7,5	260
	6,5	5,0	3,5	2,0	10,0	
	7,6	5,9	4,1	2,3	12,5	
		6,7	4,7	2,7	15,0	
		7,5	5,2	3,0	17,5	
			5,7	3,3	20,0	300
			6,3	3,6	22,5	
			6,7	3,8	25,0	
			7,2	4,1	27,5	
				4,4	30,0	

La densidad en planta de la norma hay que trasladarla a densidad superficial incluyendo las paredes verticales, por lo que para una unidad de carga bajo análisis (2 x 2 palets) la superficie que ocupa en planta es de $A_p = 2,5 * 2,3 = 5,75 \text{ m}^2$, de modo que el caudal que recibiría sería de $Q_p = 17,5 * 5,75 = 101 \text{ l/min}$ en el primer caso y de $Q_p = 27,5 * 5,75 = 158 \text{ l/min}$ en el segundo caso, que dividido por la superficie total incluyendo todas las paredes y superficies horizontales y verticales, que asciende a 93 m², y dividido por 60 segundos que tiene un minuto resulta en una densidad superficial de 0,018 kg/(m² s) en el primer caso y de 0,028 kg/(m² s) en el segundo caso. Conviene recordar aquí que el programa FDS determina la cantidad de agua en cada celda sumando las gotas que hay en un instante dado, y la superficie afectada por una celda cúbica es igual si se considera horizontal que verticalmente.

¿Cuáles serían entonces los factores de extinción a utilizar? Veamos las curvas del estudio citado más de cerca. Dado que una k negativa no sería de utilidad práctica para un sistema de rociadores porque indicaría que el fuego crece en lugar de disminuir, hemos representado en estas gráficas diferentes líneas de coeficiente de extinción tal como lo trata el programa FDS.



De modo que para Categoría 2 con una densidad de $0,018 \text{ kg/m}^2\text{/s}$ el factor de extinción sería entonces de $E = 0,3$.



Y para Categoría III con una densidad de $0,028 \text{ kg/m}^2\text{/s}$ el factor de extinción sería de $E = 0,25$.

Por otra parte, si se diseñase este sistema con rociadores ESFR, entonces la necesidad hidráulica para plásticos no expandidos y expuestos vendría dada por la Tabla P.4 de la norma UNE EN 12845 [1]:

Tabla P.4 – Plástico no expandido expuesto, almacenamiento ST1 o ST5

Aplicaciones de almacenamiento:				
ST1 Almacenamiento libre o en bloques				
ST5 Estantes sólidos o abiertos				
Mercancías:				
Plásticos: No expandidos expuestos				
Altura de almacenamiento máxima	Altura de techo máxima			
	m			
m	9,1	10,7	12,2	13,7
Presión de funcionamiento mínima de rociador				
bar				
Rociador colgante ESFR factor K nominal 200				
7,6	3,5	5,2	5,2	6,2

Que en este caso se diseña con 12 rociadores en el área de operación de K200 a una presión de 5,2bar, de modo que cada rociador descargará $Q = 200 \cdot \sqrt{5,2} = 456 \text{ l/min}$. Como los rociadores están colocados cada $3 \text{ m} \times 2,88 \text{ m} = 8,64 \text{ m}^2$, eso equivale a una densidad en planta de 52,8 mm/min que multiplicado por la superficie en planta de una unidad de carga de $5,75 \text{ m}^2$ y dividido por los 93 m^2 de superficie en 3D y por 60 segundos que tiene un minuto resulta en una densidad superficial de $0,054 \text{ kg/m}^2/\text{s}$. Este caso se encuentra en el límite de las figuras y extrapolando para plásticos se puede considerar que el factor de extinción será de alrededor a **E = 0,5**.

Dado que el techo tiene una inclinación de 25% superior a 16,7% (10°), el área de operación se ve afectada pues pueden activarse más rociadores de los previstos en el sentido de la pendiente del techo. Un método corrector que podría aplicarse al haber 7 ramales en el sentido de la pendiente, 3 a cada lado del techo a dos aguas y 1 en el centro, el máximo de rociadores que podrían verse afectados serían 4 rociadores por ramal x 4 ramales = 16 rociadores en lugar de los 4 rociadores x 3 ramales del área de operación para un techo plano según la norma UNE EN 12845 [1].

La norma FM 8-9 [7] actualizada en el 2024 aporta una solución de diseño para plásticos expuestos con una pendiente mayor de 10° , a saber, incrementar el área de operación en un 50% por lo que en este caso bajo estudio habría que considerar un área de operación de $12 \cdot 1,5 = \underline{18 \text{ rociadores}}$.

Protection of Uncartoned Unexpanded Plastic Commodities in Solid-Piled, Palletized, Shelf, and Bin-Box Arrangements; No. of AS @ psi (bar)																				
Max. Ceiling Height, ft (m)	Wet System, 160°F (70°C) Nominally Rated, Pendent Sprinklers										Wet System, 160°F (70°C) Nominally Rated, Upright Sprinklers					Dry System, 280°F (140°C) Nominally Rated Upright Sprinklers				
	Quick Response					Standard Response					Quick Response				Standard Response			Standard Response		
	K11.2 (K160)	K14.0 (K200)	K16.8 (K240)	K22.4 (K320)	K25.2 (K360)	K25.2EC (K360EC)	K11.2 (K160)	K14.0 (K200)	K16.8 (K240)	K25.2 (K360)	K11.2 (K160)	K14.0 (K200)	K16.8 (K240)	K25.2EC (K360EC)	K11.2 (K160)	K16.8 (K240)	K25.2 (K360)	K11.2 (K160)	K16.8 (K240)	K25.2 (K360)
10 (3.0)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	9 @ 20 (1.4)	9 @ 20 (1.4)	6 @ 20 (1.4)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	6 @ 20 (1.4)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	16 @ 10 (0.7)	16 @ 7 (0.5)	16 @ 7 (0.5)
20 (6.0)	12 @ 40 (2.8)	12 @ 26 (1.8)	12 @ 18 (1.2)	9 @ 20 (1.4)	9 @ 20 (1.4)	6 @ 30 (2.1)	12 @ 40 (2.8)	12 @ 26 (1.8)	12 @ 18 (1.2)	12 @ 8 (0.6)	12 @ 40 (2.8)	12 @ 26 (1.8)	12 @ 18 (1.2)	6 @ 30 (2.1)	12 @ 40 (2.8)	12 @ 18 (1.2)	12 @ 8 (0.6)	16 @ 40 (2.8)	16 @ 18 (1.2)	16 @ 8 (0.6)
25 (7.5)	12 @ 50 (3.5)	9 @ 50 (3.5)	9 @ 35 (2.4)	9 @ 20 (1.4)	9 @ 20 (1.4)	6 @ 38 (2.6)	12 @ 50 (3.5)	12 @ 32 (2.2)	12 @ 16 (1.1)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 50 (3.5)	12 @ 32 (2.2)	12 @ 16 (1.1)	6 @ 38 (2.6)	12 @ 50 (3.5)	12 @ 22 (1.5)	12 @ 10 (0.7)	20 @ 50 (3.5)	20 @ 22 (1.5)	20 @ 10 (0.7)
30 (9.0)	25 @ 50 (3.5)	9 @ 100 (6.9)	9 @ 70 (4.8)	9 @ 50 (3.5)	9 @ 40 (2.8)	12 @ 38 (2.6)	25 @ 50 (3.5)	25 @ 32 (2.2)	25 @ 16 (1.1)	25 @ 10 (0.7)	25 @ 50 (3.5)	25 @ 32 (2.2)	25 @ 16 (1.1)	12 @ 38 (2.6)	25 @ 50 (3.5)	25 @ 22 (1.5)	25 @ 10 (0.7)	30 @ 50 (3.5)	30 @ 22 (1.5)	30 @ 10 (0.7)
35 (10.5)				12 @ 63 (4.3)	12 @ 50 (3.5)															
40 (12.0)				12 @ 75 (5.2)	12 @ 60 (4.1)															

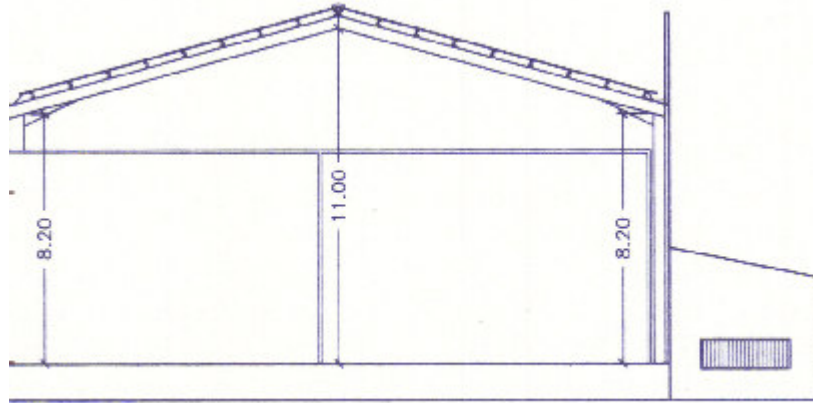


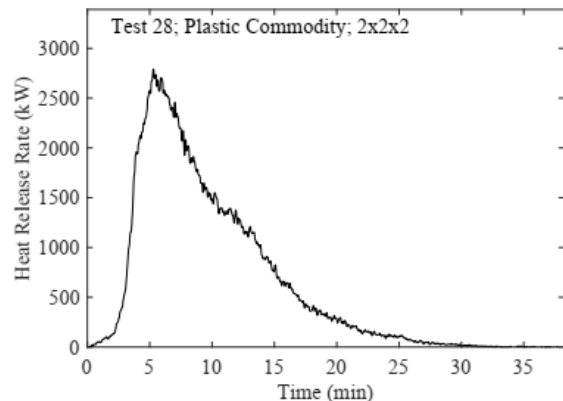
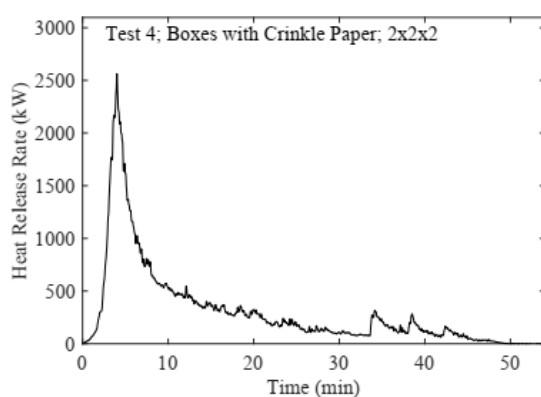
Table 6. Ceiling-Level Protection Guidelines for Uncartoned Expanded Plastic Commodities in a Solid-Piled, Palletized, Shelf or Bin-Box Storage Arrangement

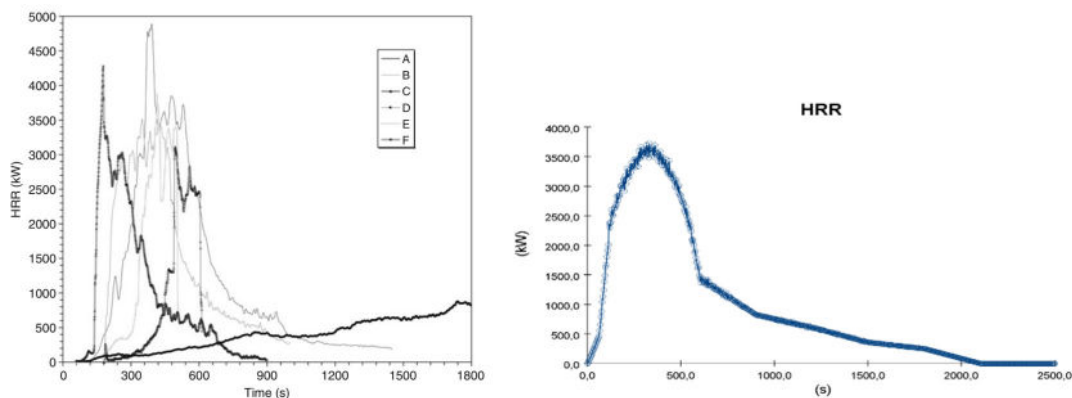
Protection of Uncartoned Expanded Plastic Commodities in Solid-Piled, Palletized, Shelf and Bin-Box Arrangements; No. of AS @ psi (bar)																								
Max. Ceiling Height, ft (m)	Wet System, 160°F (70°C) Nominally Rated, Pendent Sprinklers										Wet System, 160°F (70°C) Nominally Rated, Upright Sprinklers										Dry System, 280°F (140°C) Nominally Rated, Upright Sprinklers			
	Quick Response					Standard Response					Quick Response					Standard Response					Standard Response			
	K11.2 (K160)	K14.0 (K200)	K16.8 (K240)	K22.4 (K320)	K25.2 (K360)	K25.2EC (K360EC)	K11.2 (K160)	K14.0 (K200)	K19.6 (K280)	K25.2 (K360)	K11.2 (K160)	K14.0 (K200)	K16.8 (K240)	K25.2EC (K360EC)	K11.2 (K160)	K16.8 (K240)	K25.2 (K360)	K11.2 (K160)	K16.8 (K240)	K25.2 (K360)				
	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	9 @ 20 (1.4)	9 @ 20 (1.4)	6 @ 20 (1.4)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 16 (1.1)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	6 @ 20 (1.4)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	20 @ 10 (0.7)	20 @ 7 (0.5)	20 @ 7 (0.5)				
10 (3.0)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	9 @ 20 (1.4)	9 @ 20 (1.4)	6 @ 20 (1.4)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 16 (1.1)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	6 @ 20 (1.4)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 7 (0.5)	12 @ 7 (0.5)	20 @ 10 (0.7)	20 @ 7 (0.5)	20 @ 7 (0.5)				
20 (6.0)	12 @ 40 (2.8)	12 @ 26 (1.8)	12 @ 18 (1.2)	9 @ 20 (1.4)	9 @ 20 (1.4)	6 @ 30 (2.1)	12 @ 40 (2.8)	12 @ 26 (1.8)	12 @ 16 (1.1)	12 @ 8 (0.6)	12 @ 40 (2.8)	12 @ 26 (1.8)	12 @ 18 (1.2)	12 @ 12 (0.8)	12 @ 40 (2.8)	12 @ 18 (1.2)	12 @ 8 (0.6)	20 @ 40 (2.8)	20 @ 18 (1.2)	20 @ 8 (0.6)				
25 (7.5)	12 @ 50 (3.5)	9 @ 75 (5.2)	9 @ 52 (3.6)	9 @ 32 (2.2)	9 @ 25 (1.7)	6 @ 38 (2.6)	12 @ 50 (3.5)	12 @ 32 (2.2)	12 @ 16 (1.1)	12 @ 10 (0.7)	12 @ 50 (3.5)	12 @ 32 (2.2)	12 @ 22 (1.5)	6 @ 38 (2.6)	12 @ 50 (3.5)	12 @ 32 (2.2)	12 @ 10 (0.7)	20 @ 50 (3.5)	20 @ 22 (1.5)	20 @ 7 (0.7)				
30 (9.0)		9 @ 100 (6.9)	9 @ 70 (4.8)	9 @ 50 (3.5)	9 @ 40 (2.8)																			
40 (12.0)				20 @ 75 (5.2)																				

Cabe destacar que, si el plástico fuese “expandido”, entonces la única solución posible para rociadores únicamente en el techo la proporciona FM con 20 rociadores K360 a una presión de 5,2 bar. Es decir, una densidad aún mayor a la simulada y un área de operación debido al techo inclinado de hasta 30 rociadores. Es más, en este caso al no estar coloreado en verde, la autonomía para la reserva del agua contraincendios ha de ser de 2 horas en lugar de 1 hora.

2.3 Características del Escenario

Para que el fuego sea lo más real posible, se ha seguido el siguiente criterio. Al palet inicialmente incendiado (quemador o “burner”) se le ha programado una curva que se adapta a curvas de fuego experimentales como los Ensayos 4 y 28 del NIST Technical Note 2102 “Heat Release Rates of Multiple Transient Combustibles” [9], o la Fig. 26.18 del capítulo 26 de la SFPE [8]:





Las tres primeras corresponden a las curvas experimentales y la cuarta a la programada con una potencia máxima que se alcanza a los 300 s (5 min) decayendo progresivamente hasta los 1.800 s (30 min). En cuanto al valor de la potencia máxima, que para una unidad de carga va en función de la superficie expuesta, se ha asignado 250 kW/m^2 para los productos de la Categoría II según la norma UNE EN 12845, 500 kW/m^2 para Categoría III según la norma UNE EN 12845 que corresponde a plásticos no expandidos por ejemplo en cajas de cartón y 625 kW/m^2 para Categoría IV según la norma UNE EN 12845 que corresponde a plásticos expandidos y que son valores en la franja con los que se trabaja habitualmente en la norma UNE 23585 [16]. La base para ello se encuentra en la diferencia en la potencia máxima que se alcanza cuando se queman láminas de productos celulósicos en comparación con láminas de plásticos, tal y como se observa en las figuras 26.10 y 26.11 del capítulo 26 de la SFPE [8]:

Fig. 26.11 Effect of thickness on the HRR for medium-density fiberboard (heat flux = 50 kW m^{-2})

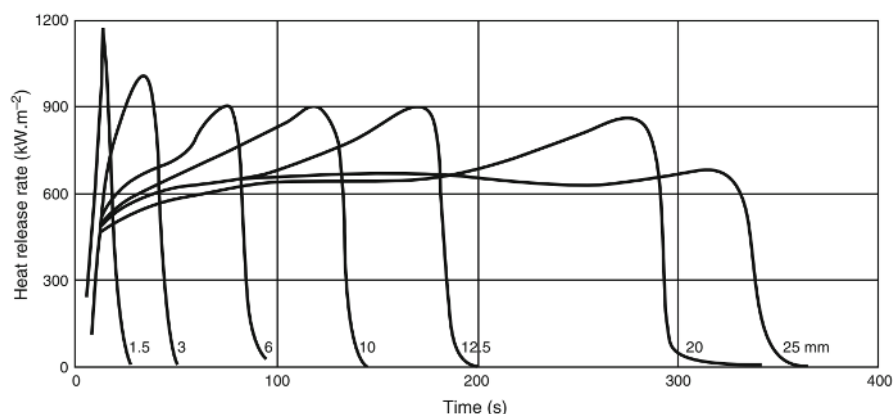
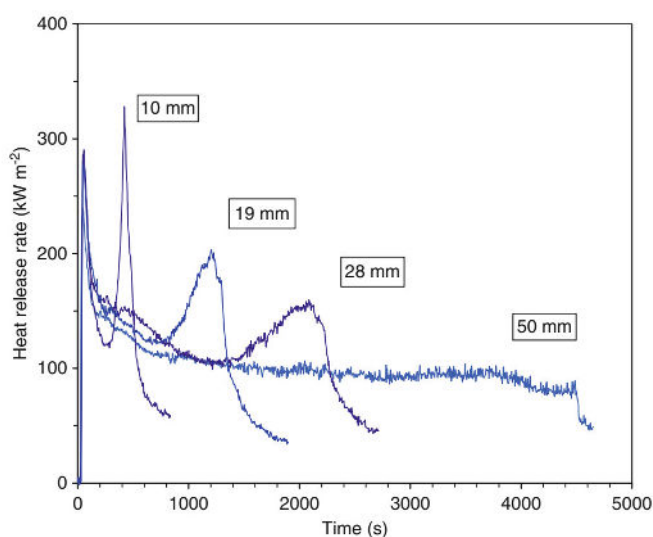
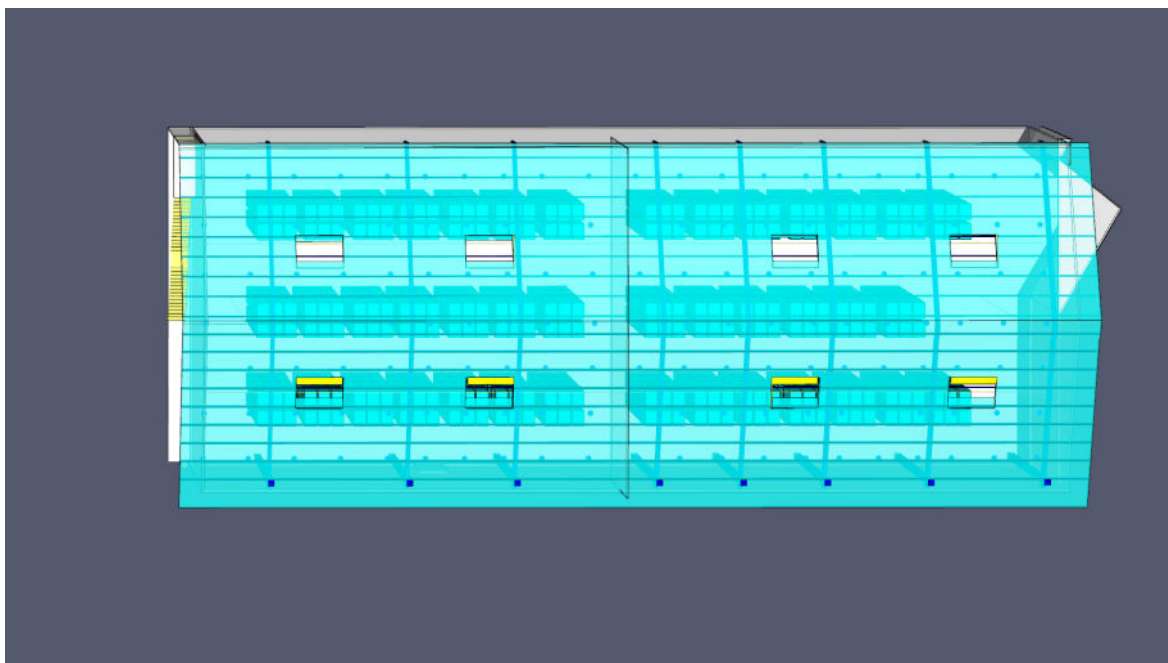


Fig. 26.10 Effect of thickness on the HRR for PMMA (heat flux = 35 kW m^{-2})

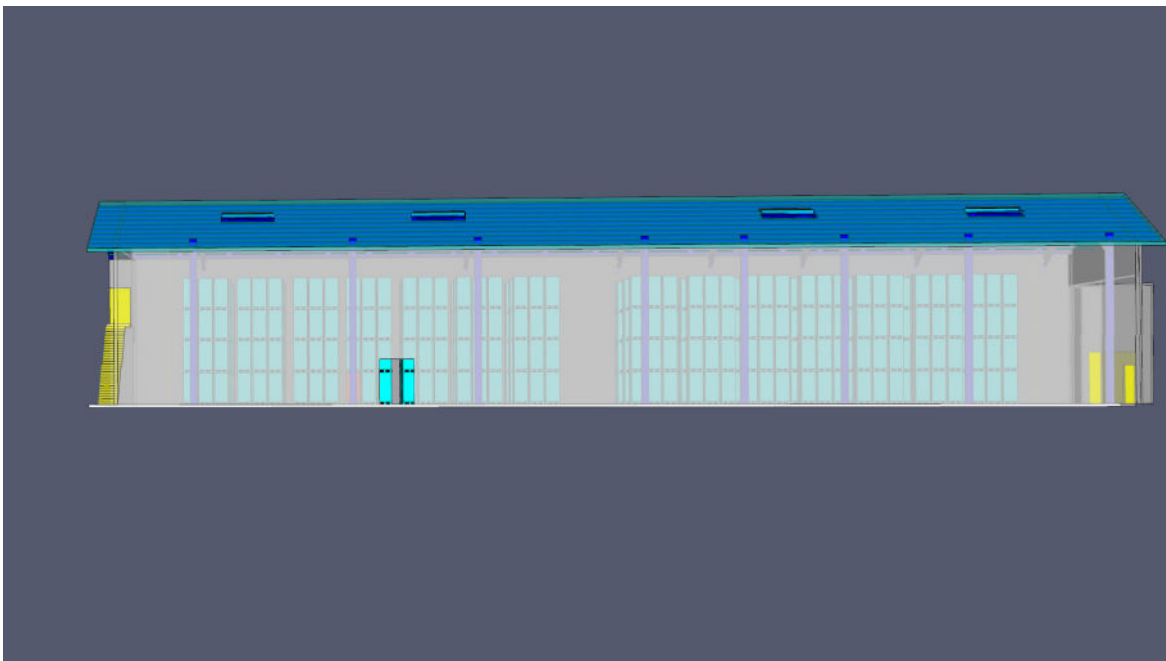
Es muy importante tener presente que la potencia calorífica máxima que se programa en FDS es superficial y no en planta, por lo que hay que tener eso presente cuando se simula, ya que no es lo mismo un incendio plano sobre el suelo que un incendio en tres dimensiones (3D) de un producto almacenado y que se representa tal cual en la simulación. Cuando la base de referencia es el área del suelo, entonces es lógico multiplicar esa potencia máxima por la altura de almacenamiento (por ejemplo, Tablas 1.2 y 1.3 de la UNE 23585 [16] o tablas 26.8 y 26.9 de la SFPE [8]).

Al resto de pallets únicamente se le ha programado una temperatura de ignición de 350°C. En las celdas donde se supere esa temperatura de ignición se considera un retardo de 1 segundo en alcanzar el calor por unidad de área previsto, a saber, 250 kW/m² para los productos de Categoría II, de 500 kW/m² para los que quedan dentro de Categoría III (plásticos no expandidos) y de 625 kW/m² para los de Categoría IV (plásticos expandidos).

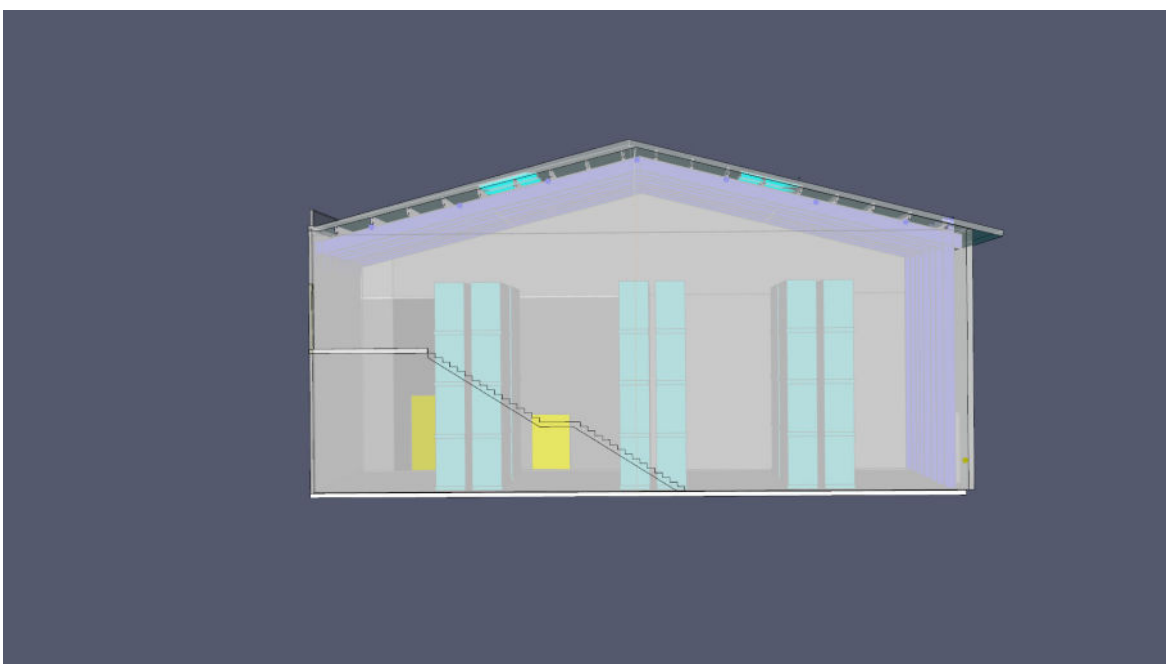
El sector de incendio tiene una superficie en planta de $S = 55 \text{ m} \times 22 \text{ m} = 1.210 \text{ m}^2$. El recinto tiene solución para la extracción de humos (SCTEH) en dos depósitos de humos a nivel del techo con una cortina de humos en el centro en sentido transversal, cada depósito con 4 exutorios de extracción natural. El sistema está programado para abrirse 20 minutos después de la detección del incendio si bien cada exutorio dispone de un fusible a 141°C para abrirse individualmente en caso de que el sistema de rociadores fallase en controlar las temperaturas.



Vista en planta



Vista Frontal



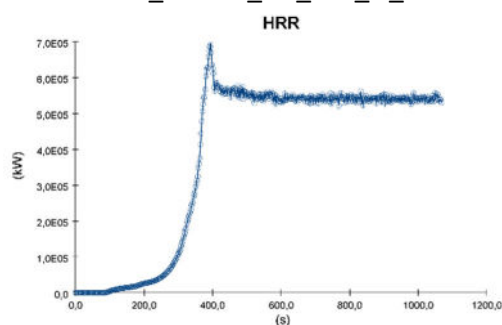
Vista Lateral

2.4 Curvas sin descarga de agua por los rociadores

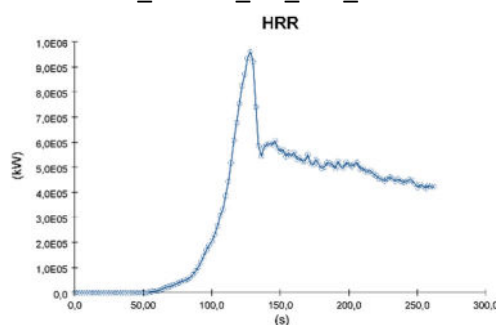
A continuación, se muestran las curvas que se obtienen del fuego sin la aportación de agua por los rociadores, que sería por ejemplo el caso de fallo del sistema, y en el que se abren los exutorios que alcanzan una temperatura superior a 141°C . Se observa que de no descargar agua el fuego crece sin control alcanzando una potencia máxima de 700 a 1000 MW al envolverse todo en llamas, quedando el fuego controlado por la ventilación y estabilizándose alrededor de 450 a 500 MW.

Cabe resaltar que, **como debería esperarse**, el fuego crece más lentamente para productos celulósicos a los que se ha asignado una potencia máxima superficial de 250 kW/m^2 que para productos plásticos con 625 kW/m^2 , si bien en ambos casos se trata de fuegos más rápidos que el denominado Ultra-Rápido por el efecto de propagación en altura del almacenamiento.

Categoría II (celulósicos)
TP03_cortina_No_Roc_Q_250



Categoría IV (Plásticos expandidos)
TP03_cortina_No_Roc_Q1

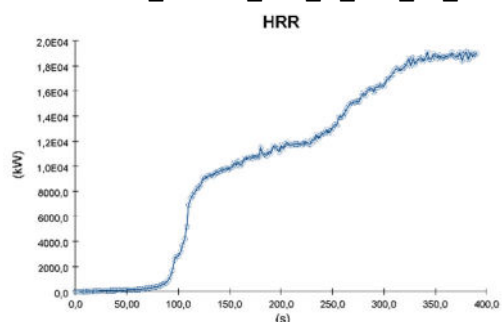


2.5 Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción

A continuación, se presentan los resultados del mismo escenario simulando el agua descargada y comparando cuando el agua únicamente refrigera (izquierda) con el caso en que también tiene capacidad extintora (derecha) y con 5.000 gotas/segundo por rociador. Se analizarán 3 instalaciones de rociadores sometidas a diferentes tipos de producto. Las primeras dos con rociadores estándar diseñada la primera para Categoría II y la segunda para Categoría III. La tercera con rociadores ESFR diseñada para plásticos no expandidos expuestos:

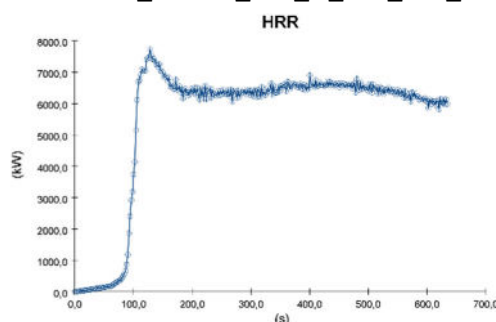
INSTALACIÓN 1 – 250 kW/m² – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 0,5 bar, 151 l/min rociador, 17,5 mm/min

TP03_cortina_Roc_Q_151_E0_5000_SR1

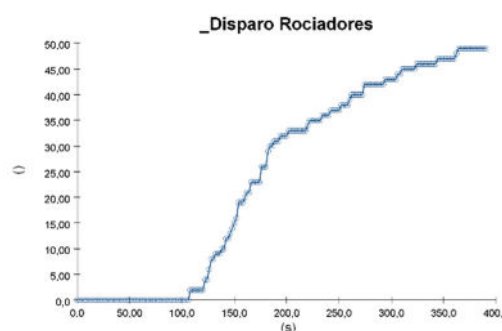


Curva creciente → **No OK**

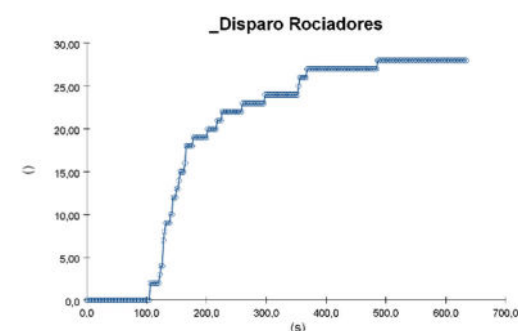
TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_5000_SR1



Curva estabilizada → **OK**



49 roc. activados, 423 m² >> 260 m² → **No OK**



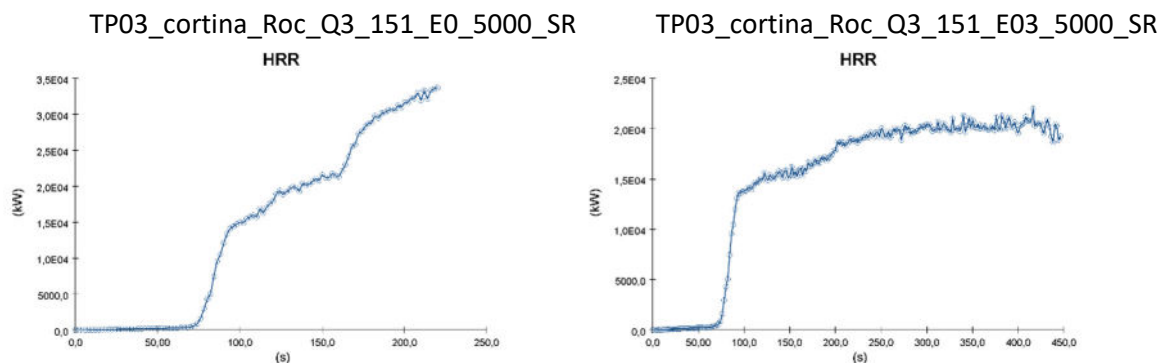
28 roc. activados, 242 m² < 260 m² → **OK**

Se observa que al incluir el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) el sistema de rociadores es capaz de controlar el incendio, **como cabría esperar**. La potencia queda recortada a los 8 MW siendo que se precisan 28 rociadores para conseguirlo. Sin embargo, si no se incluye el coeficiente de extinción, la refrigeración del agua no es suficiente para controlar la curva del fuego siendo continuamente creciente y activando más rociadores de los que cabría esperar según la norma de diseño.

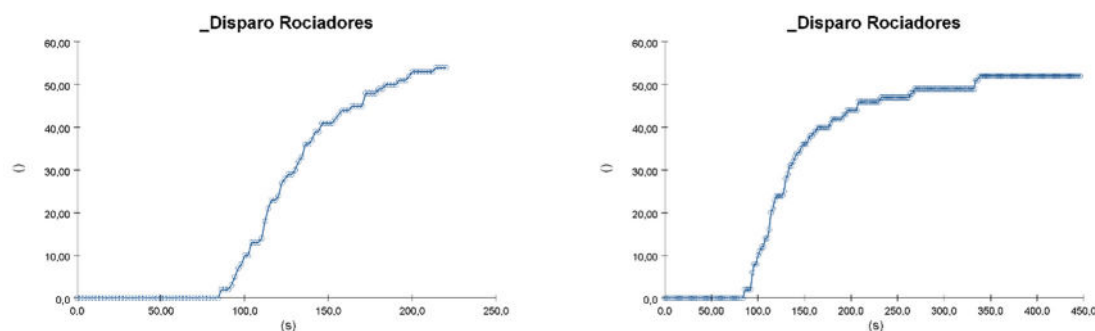
Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción (continuación)

En cambio, veamos qué pasa con estos mismos rociadores e igual densidad, pero con almacenamiento del tipo plástico, que según la norma no son capaces de controlar:

INSTALACIÓN 1 – 400 kW/m² – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 0,5 bar, 151 l/min rociador, 17,5 mm/min



Curvas crecientes → **No OK**



52 roc. activados = 449 m² >> 260 m² → **No OK**

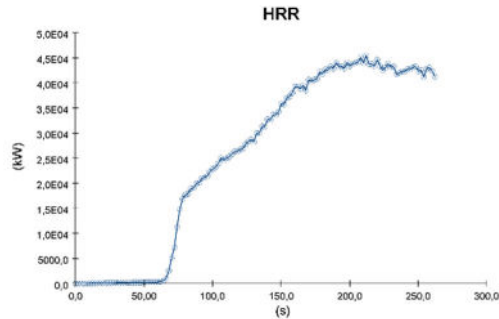
Se observa que ni siquiera incluyendo el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) el sistema de rociadores es capaz de controlar el incendio, **como cabría esperar** ya que el material supera la potencia máxima por unidad de superficie para el que está diseñado 400 kW/m² > 250 kW/m² (Categoría II).

Nota para todas las curvas. En el nombre del fichero se identifica el tipo de instalación (151 = l/min roc Instalación 1; 238 = l/min roc Instalación 2; nada = Instalación 3 de ESFR con 456 l/min roc), SR respuesta estándar, el número que sigue a E corresponde al coeficiente de extinción sin coma; el siguiente al número de gotas por segundo; Q3 = 400 kW/m²; Q2 = 500 kW/m². Cuando el título está en rojo, quiere decirse que la instalación no ha sido capaz de controlar o suprimir el incendio o que se activan más rociadores de los previstos en el diseño del sistema de rociadores. Cuando está en verde que sí ha sido efectiva. Salvo en los casos donde ha habido inestabilidades numéricas, las simulaciones se han detenido una vez ha quedado claro que se cumple o no se cumple con el requisito de diseño. Y dado que hay una inercia térmica en la activación de los rociadores, cuando la curva de activación de los rociadores sigue una tendencia de estabilización clara de modo que si han de activarse rociadores adicionales en el tiempo serán pocos más.

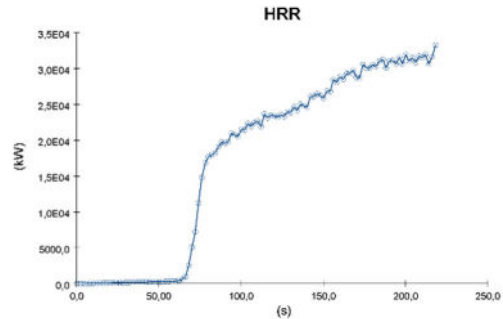
Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción (continuación)

INSTALACIÓN 1 – 500 kW/m² – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 0,5 bar, 151 l/min rociador, 17,5 mm/min

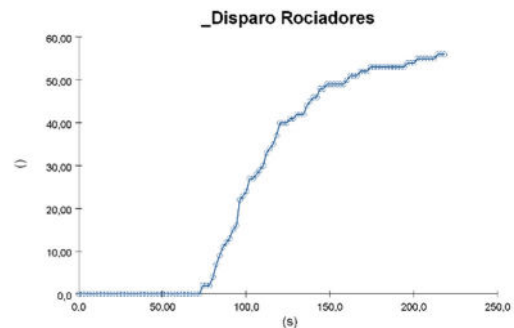
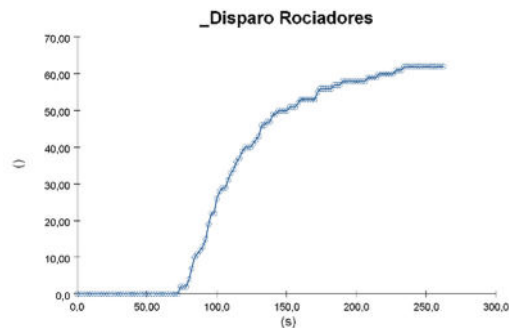
TP03_cortina_Roc_Q2_151_E0_5000_SR



TP03_cortina_Roc_Q2_151_E03_5000_SR



Curvas crecientes → **No OK**

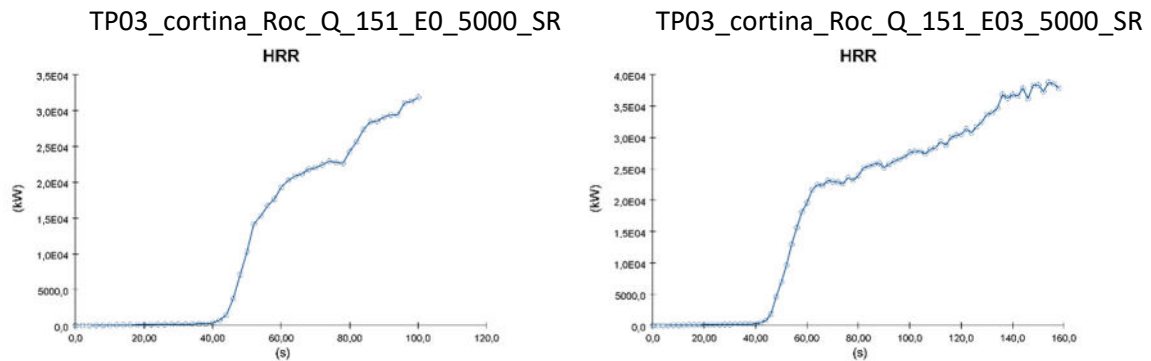


> 56 roc. activados = 484 m² >> 260 m² → **No OK**

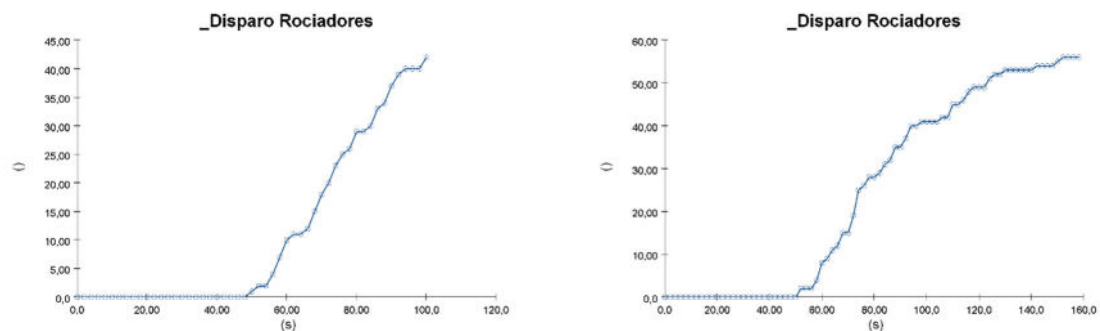
Se observa que ni siquiera incluyendo el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) el sistema de rociadores es capaz de controlar el incendio, **como cabría esperar** ya que el material supera la potencia máxima por unidad de superficie para el que está diseñado (Categoría II). Si no podía con 400 kW/m² lógicamente mucho menos con 500 kW/m².

Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción (continuación)

INSTALACIÓN 1– **625 kW/m²** – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 0,5 bar, 151 l/min rociador, 17,5 mm/min



Curvas crecientes → **No OK**



> 55 roc. activados, 475 m² >> 260 m² → **No OK**

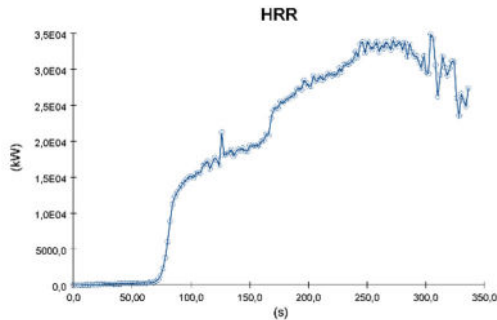
Se observa que ni siquiera incluyendo el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) el sistema de rociadores es capaz de controlar el incendio, **como cabría esperar** ya que el material supera la potencia máxima por unidad de superficie para el que está diseñado (Categoría II). Si no podía con 400 kW/m² ni 500 kW/m² mucho menos con 625 kW/m². **Según la norma de diseño de rociadores UNE EN 12845 [1] la densidad de 17,5 mm/min @ 260 m² sólo vale para Categoría II con 7,2 m de altura, pero no para Categoría superior III o IV. Esto otorga un extraordinario valor a las simulaciones, ¿no es cierto?**

Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción (continuación)

Veamos ahora qué pasa si con estos mismos rociadores se les incrementa la densidad a la indicada en la norma de diseño para almacenamiento del tipo plástico (Categoría III):

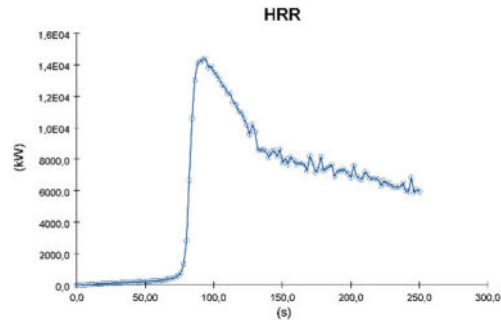
INSTALACIÓN 2 – 400 kW/m² – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 1,4 bar, 238 l/min rociador, 27,5 mm/min

TP03_cortina_Roc_Q3_238_E0_5000_SR

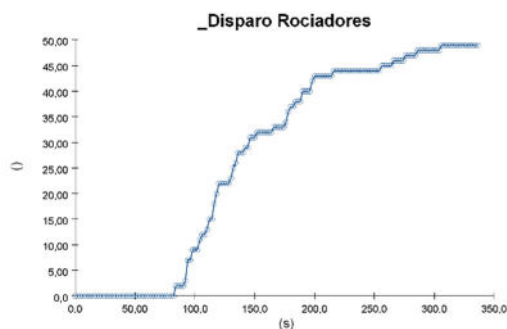


Curva creciente → **No OK**

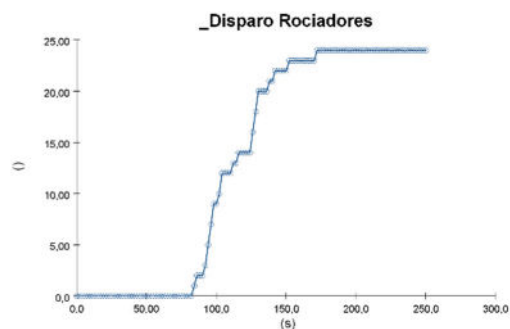
TP03_cortina_Roc_Q3_238_E025_5000_SR



Curva decreciente → **OK**



49 roc. activados = 423 m² > 300 m² → **No OK**



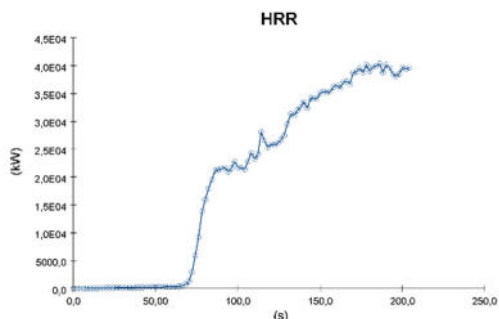
24 roc. activados = 207 m² < 300 m² → **OK**

Se observa que al incluir el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) el sistema de rociadores es capaz de controlar el incendio, **como cabría esperar**. La potencia es decreciente a partir de los 15 MW siendo que se precisan 24 rociadores para conseguirlo. Sin embargo, si no se incluye el coeficiente de extinción, la refrigeración del agua no es suficiente para controlar la curva del fuego siendo continuamente creciente y activando más rociadores de los que cabría esperar según la norma de diseño.

Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción (continuación)

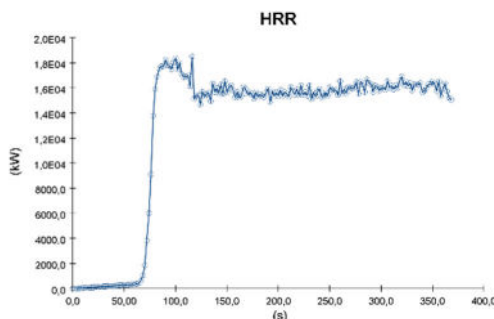
INSTALACIÓN 2 – 500 kW/m² – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 1,4 bar, 238 l/min rociador, 27,5 mm/min

TP03_cortina_Roc_Q2_238_E0_5000_SR

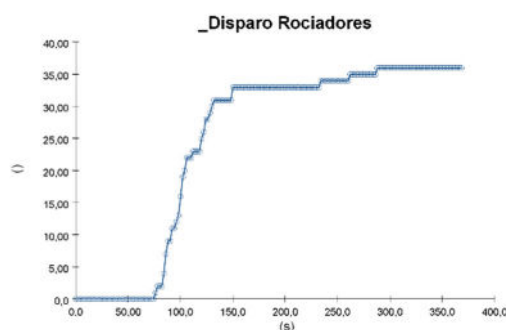
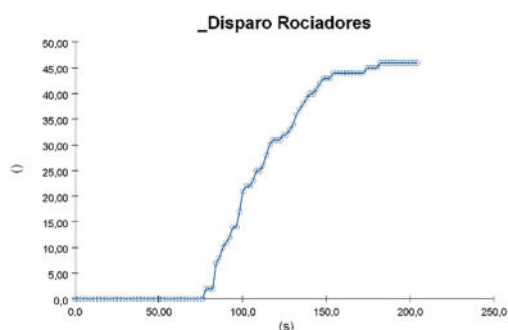


Curva creciente → **No OK**

TP03_cortina_Roc_Q2_238_E025_5000_SR



Curva estabilizada → **OK**



> 46 roc. activados = 397 m² > 300 m² → **No OK** 36 roc. activados = 311 m² ~ 300 m² → **OK**

Se observa que al incluir el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) el sistema de rociadores es capaz de controlar el incendio con el área de diseño del sistema, **tal y como cabría esperar**. Es decir, conforme con la capacidad de bombeo, de suministro de la red de distribución del agua contraincendios y el dimensionado de las tuberías del propio sistema de rociadores.

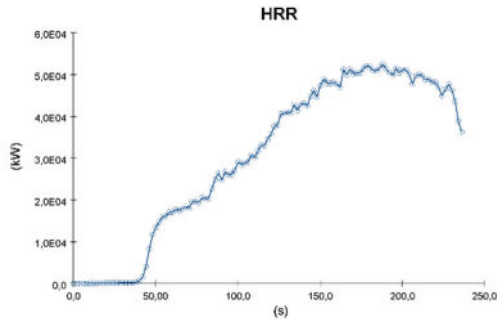
La potencia queda controlada por debajo de los 18 MW siendo que se precisan 35 rociadores descargando agua para conseguirlo. En cambio, si el agua únicamente refrigera (caso de la izquierda) el fuego sigue creciendo y el número de rociadores activados también, más allá de la capacidad para la que ha sido diseñado el sistema.

Luego entonces, queda demostrado no sólo que es necesario incluir el factor de extinción, sino que el valor elegido en base a los resultados experimentales representa fidedignamente lo definido en la norma de diseño de los rociadores, UNE EN 12845 [1] si a la Categoría III se le asigna una potencia calorífica máxima por unidad de superficie máxima de 500 kW/m².

Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción (continuación)

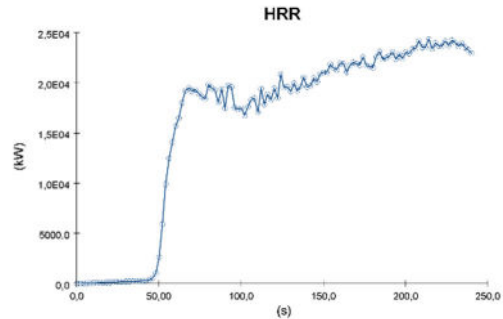
INSTALACIÓN 2 – 625 kW/m² – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 1,4 bar, 238 l/min rociador, 27,5 mm/min

TP03_cortina_Roc_Q_238_E0_5000_SR

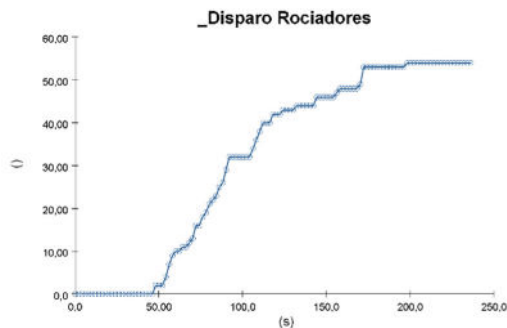


Curva controlada a los 50 MW → **No OK**

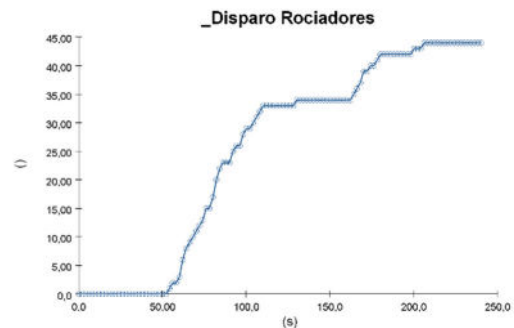
TP03_cortina_Roc_Q_238_E025_5000_SR



Curva creciente 23 MW → **No OK**



52 roc. activados, 449 m² >> 300 m² → **No OK**



48 roc. activad., 415 m² > 300 m² → **No OK**

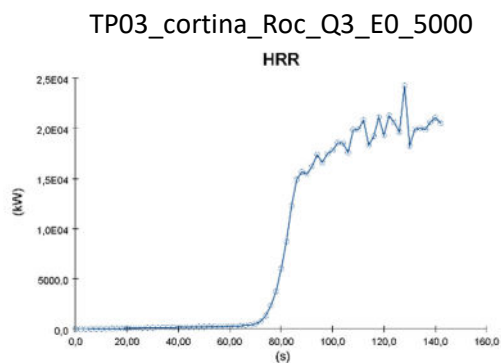
Se observa que tanto si se incluye el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) como si no, el sistema de rociadores no es capaz de controlar el incendio con el área de diseño del sistema. Es decir, conforme con la capacidad de bombeo, de suministro de la red y dimensionado de las tuberías del propio sistema de rociadores.

Se activan más rociadores que los previstos en los 300 m² lo que demuestra que la potencia calorífica de 625 kW/m² supera la capacidad del sistema que está diseñado para productos de la Categoría III y debe tratarse como de Categoría IV.

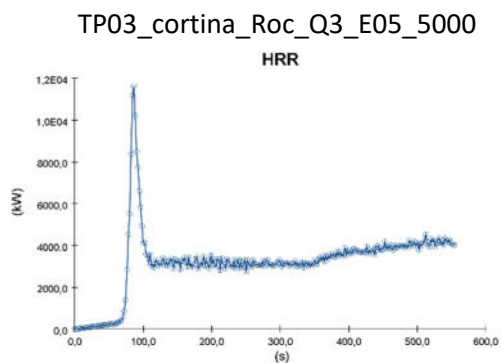
Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción (continuación)

Veamos ahora qué pasa si se instalan rociadores del tipo ESFR con respuesta rápida y gran caudal según las otras tablas de diseño de la normativa para el almacenamiento del tipo plástico no expandido expuesto:

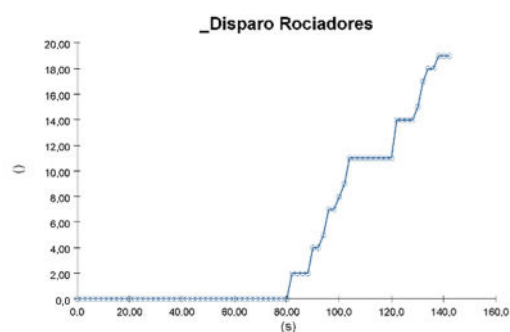
INSTALACIÓN 3 – 400 kW/m² – ROCIADORES ESFR
K200 RR 74°C @ 5,2 bar, 456 l/min rociador (51 mm/min)



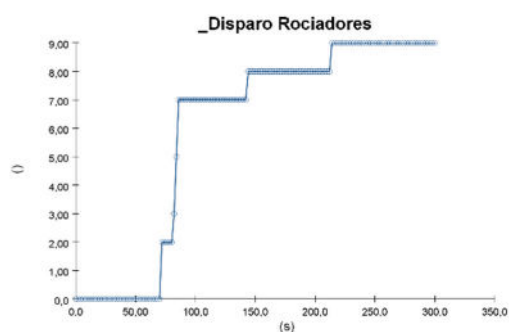
Curva creciente → **No OK**



Curva decreciente → **OK**



> 19 roc. activados > 18 → **No OK**



9 roc. activados < 18 → **OK**

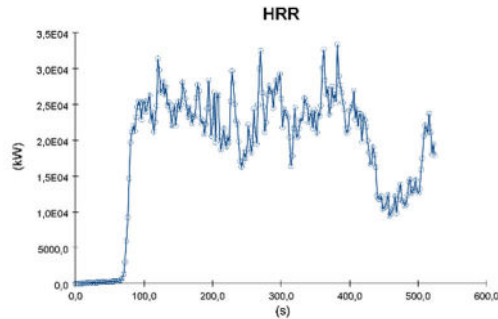
Se observa que al incluir el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) el sistema de rociadores es capaz de controlar el incendio, **tal y como cabría esperar**. Se produce una reducción inicial de la potencia desde los 12 MW hasta los 4 MW típico de un sistema de supresión. Sin embargo, los fuegos residuales, probablemente en zonas ocultas al agua descargada, hacen que el fuego continúe, aunque en una potencia reducida. Que el número de rociadores activados sea bastante menor demuestra que el sistema va holgado con la potencia calorífica por unidad de superficie de 400 kW/m².

En cambio, si el agua únicamente refrigera (caso de la izquierda) la curva se estabiliza alrededor de los 20 MW y la cantidad de rociadores activados supera el valor máximo previsto en la normativa. Esto demuestra la necesidad de incluir el coeficiente de extinción para que el resultado se ajuste a la realidad según la norma de diseño.

Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción (continuación)

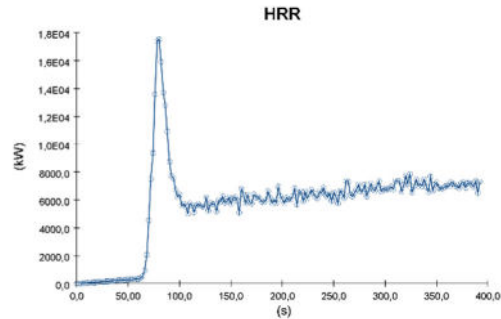
INSTALACIÓN 3 – 500 kW/m² – ROCIADORES ESFR
K200 RR 74°C @ 5,2 bar, 456 l/min rociador (51 mm/min)

TP03_cortina_Roc_Q2_E0_5000

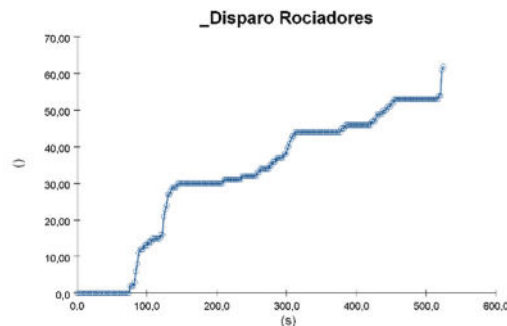


Curva estabilizada pero no típica de ESFR → **No OK**

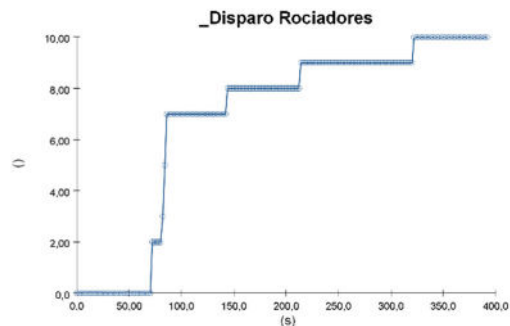
TP03_cortina_Roc_Q2_E05_5000



Curva decreciente → **OK**



61 roc. activados >> 18 → **No OK**



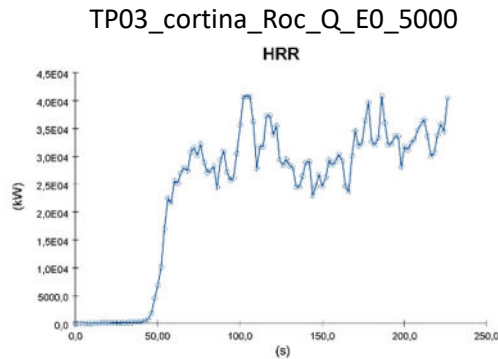
10 roc. activados < 18 → **OK**

Se observa que al incluir el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) el sistema de rociadores es capaz de controlar el incendio, **tal y como cabría esperar**. Se produce una reducción inicial de la potencia desde los 18 MW hasta los 6 MW típico de un sistema de supresión. Sin embargo, los fuegos residuales, probablemente en zonas ocultas al agua descargada, hacen que el fuego continúe, aunque en una potencia reducida.

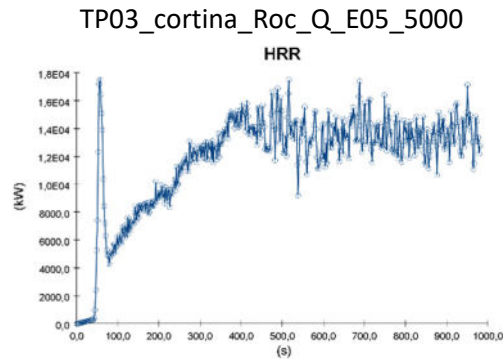
En cambio, si el agua únicamente refrigera (caso de la izquierda) la curva se estabiliza alrededor de los 27 MW y la cantidad de rociadores activados supera el valor máximo previsto en la normativa, y por lo tanto sería una situación insostenible para la capacidad de diseño del sistema de rociadores. Esto demuestra la necesidad de incluir el coeficiente de extinción para que el resultado se ajuste a la realidad según la norma de diseño.

Efecto de la descarga del agua y del coeficiente de extinción (continuación)

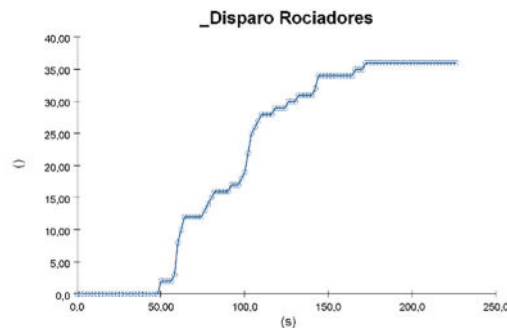
INSTALACIÓN 3 – 625 kW/m² – ROCIADORES ESFR
K200 RR 74°C @ 5,2 bar, 456 l/min rociador (51 mm/min)



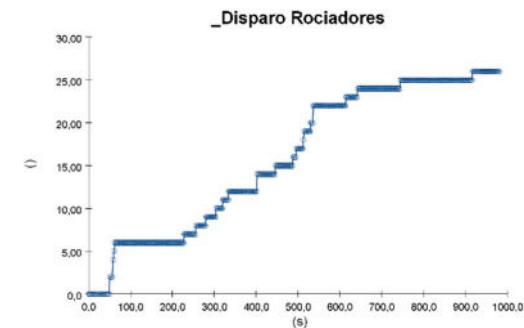
Estabilizado a 40 MW → ¿Podría valer?



Estabilizado a 14 MW → OK



Rociadores activados 37 > 18 → No OK



Rociadores activados 26 > 18 → No OK

Se observa que, incluyendo el coeficiente de extinción (curvas de la derecha) la curva se estabiliza a los 14 MW, pero se activan más rociadores de los previstos por la norma de diseño para plástico no expandido (12 + 50% debido a la pendiente del techo).

De modo que al igual que en los casos de diseño en modo control anteriormente analizados, se demuestra que la potencia calorífica máxima de 625 kW/m² supera la condición de diseño para plásticos no expandidos expuestos o la Categoría III, y por consiguiente el valor máximo para esta categoría sería de unos 500 kW/m².

Como se ha podido demostrar en todas estas simulaciones, al utilizar el coeficiente de extinción, los resultados son perfectamente equiparables con los de las normas de diseño. Eso le otorga un extraordinario valor al hecho de que sí es factible simular la descarga con el agua y obtener resultados que se correspondan con los valores contrastados por la experiencia y los ensayos que se reflejan en las normas de diseño, incluso con el número de gotas por defecto del FDS, siempre y cuando se incluya el coeficiente de extinción.

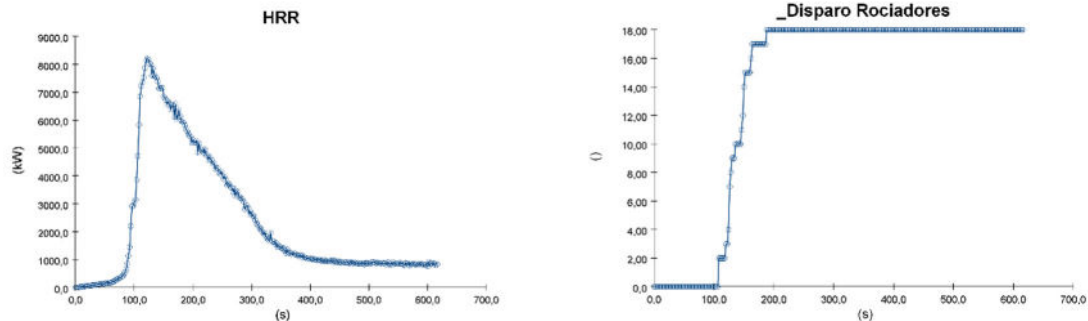
2.6 Efecto de la variación en el número de gotas

Con relación a la cuestión de validez de los resultados para un número de gotas por segundo, se han llevado a cabo simulaciones con distintos valores para percibir en qué modo se ven afectados los resultados.

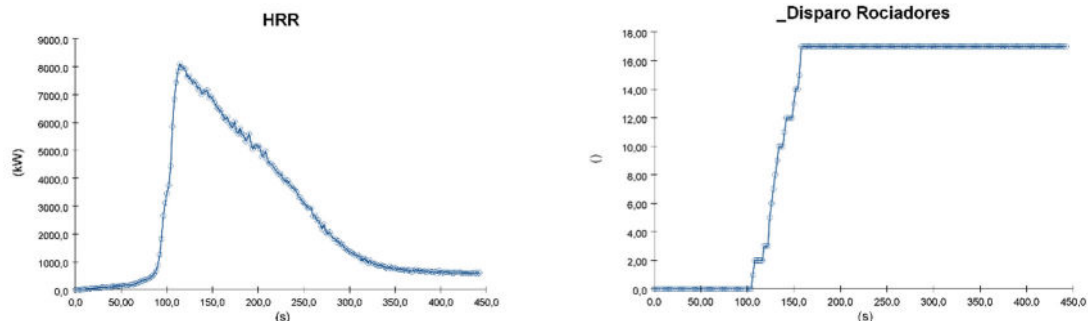
Efecto de la variación en el número de gotas (continuación)

INSTALACIÓN 1 – 250 kW/m² – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 0,5 bar, 151 l/min rociador, 17,5 mm/min

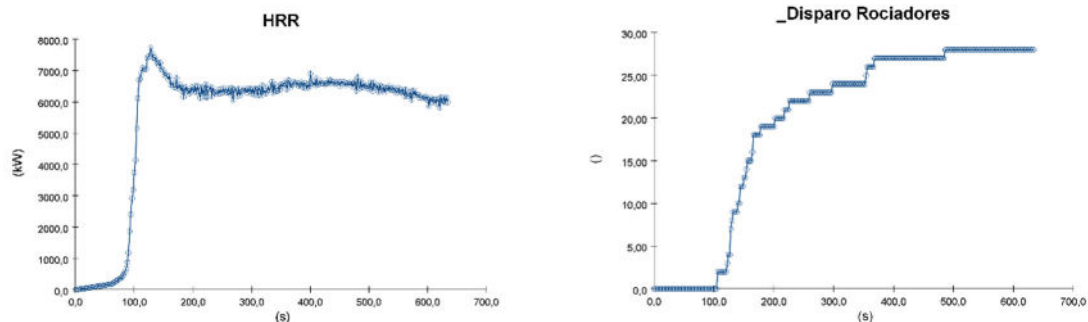
TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_500_SR1 (18 roc = 156 m²)



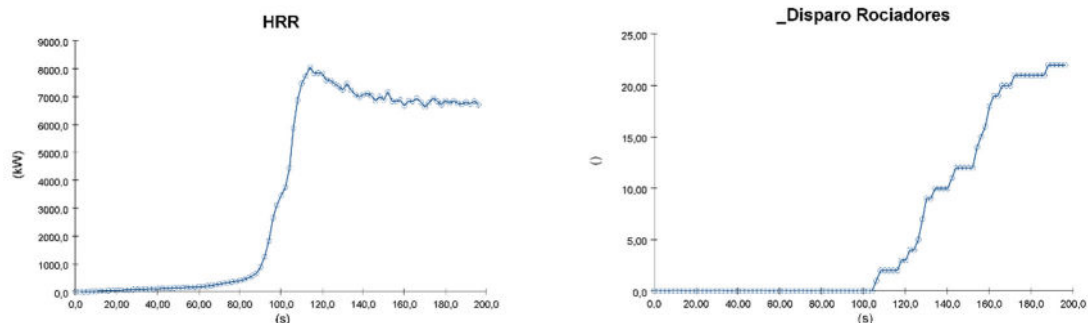
TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_2000_SR1 (17 roc = 147 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_5000_SR1 (28 roc = 242 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_10000_SR1 (22 roc = 191 m²)

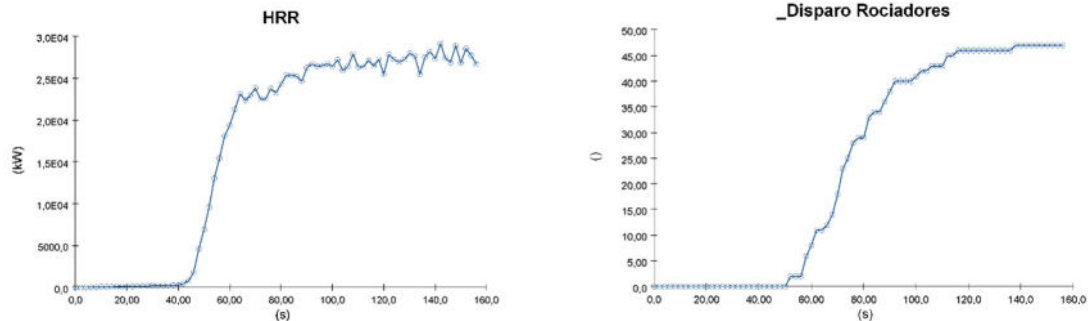


Se observa que con menos de 5.000 gotas/s los resultados son más optimistas por lo que hay que tener cuidado en el caso de utilizarlo así.

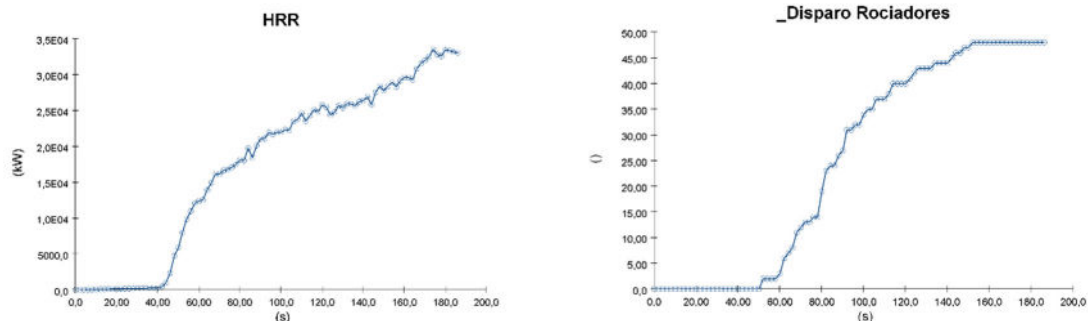
Efecto de la variación en el número de gotas (continuación)

INSTALACIÓN 1 – 625 kW/m² – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 0,5 bar, 151 l/min rociador, 17,5 mm/min

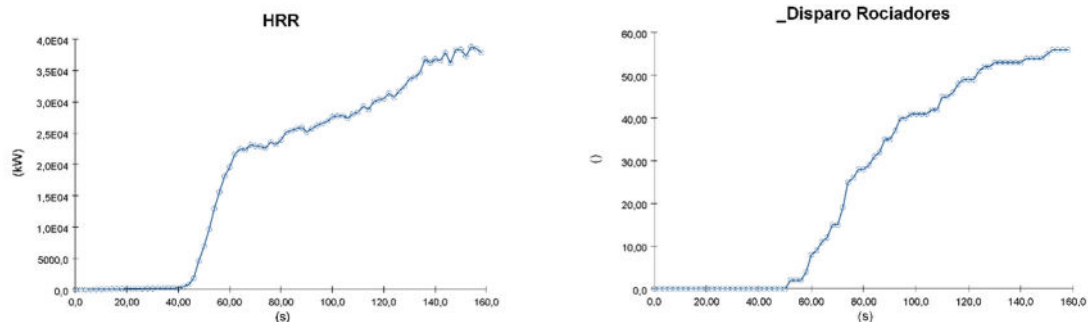
TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_500_SR (47 roc = 406 m²)



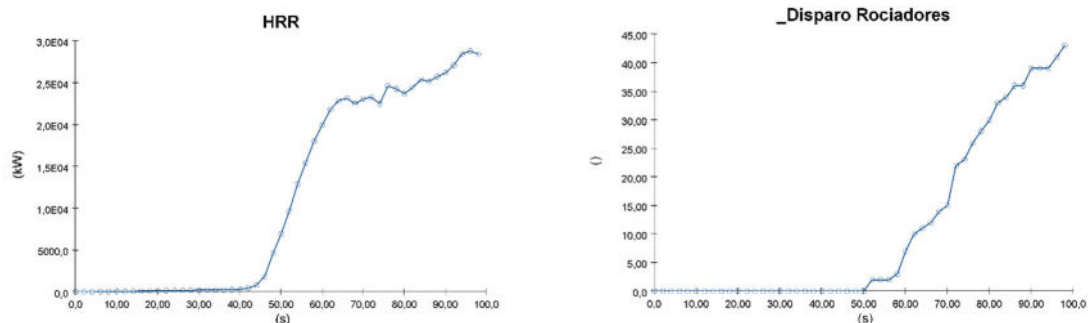
TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_2000_SR (47 roc = 406 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_5000_SR (54 roc = 467 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_10000_SR (> 42 roc = 363 m²)

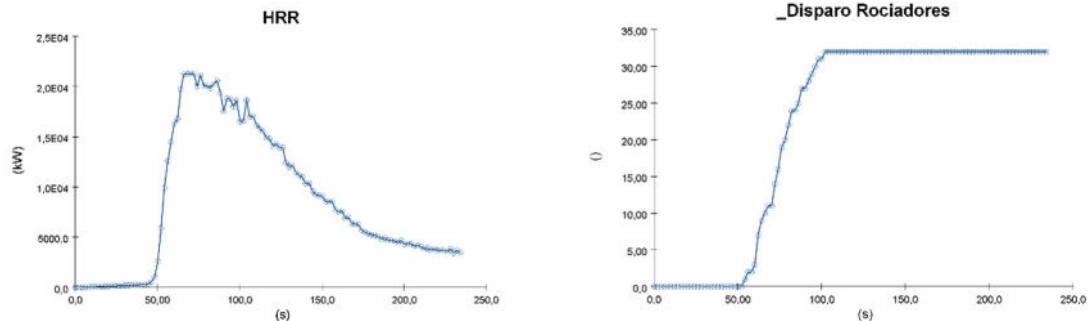


Todos coinciden en que no se alcanza el control ni siquiera incluyendo el factor de extinción, siendo el fuego siempre creciente y activando hasta 54 rociadores (467 m² >> 260 m²), mucho más allá del área de diseño, como cabría esperar pues el caudal unitario de los rociadores no se corresponde con el riesgo del incendio (Categoría III o IV).

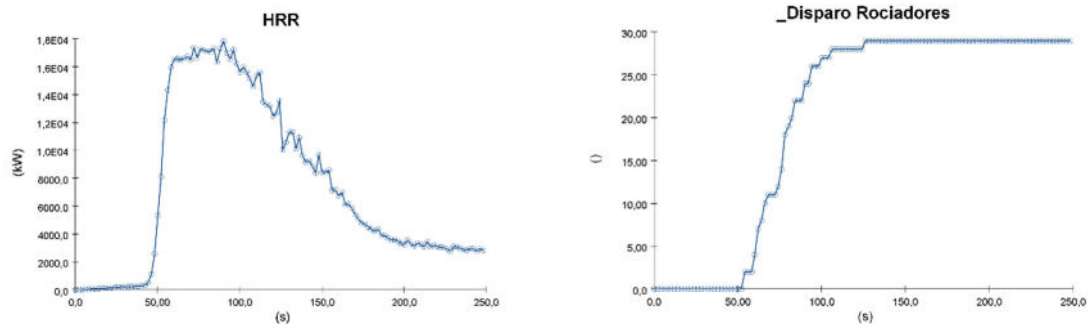
Efecto de la variación en el número de gotas (continuación)

INSTALACIÓN 2 – 625 kW/m² – ROCIADORES ESTANDAR
K200 SR 68°C @ 1,4 bar, 238 l/min rociador, 27,5 mm/min

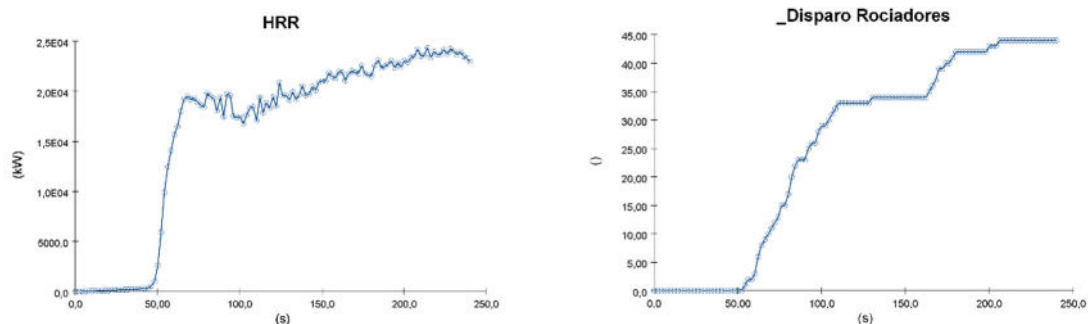
TP03_cortina_Roc_Q_238_E025_500_SR (32 roc = 276 m²)



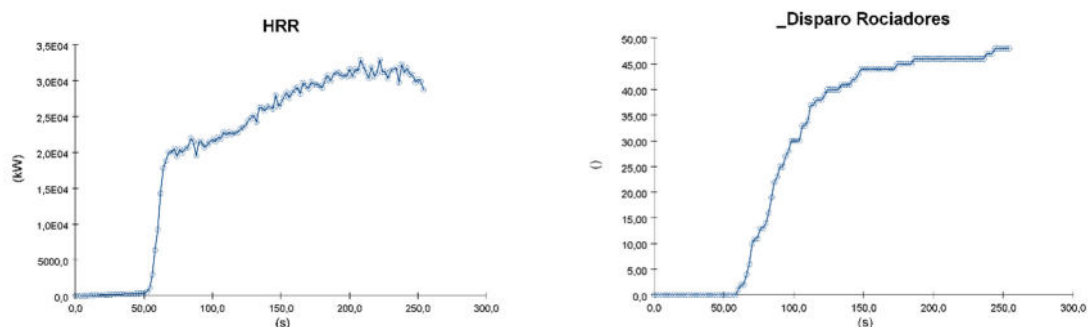
TP03_cortina_Roc_Q_238_E025_2000_SR (29 roc = 251 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_238_E025_5000_SR (44 roc = 380 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_238_E025_10000_SR (48 roc = 415 m²)

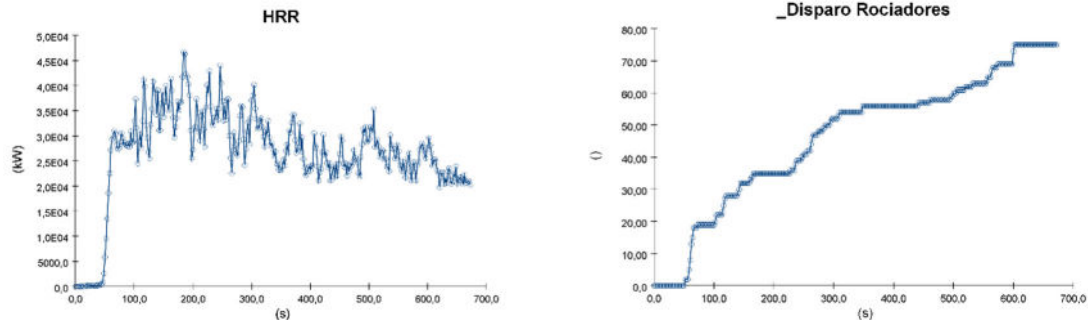


Los casos con 500 gotas/s y 2000 gotas/s son más optimistas por lo que debe tenerse eso presente en el caso de aplicar un número inferior a 5.000 gotas/s.

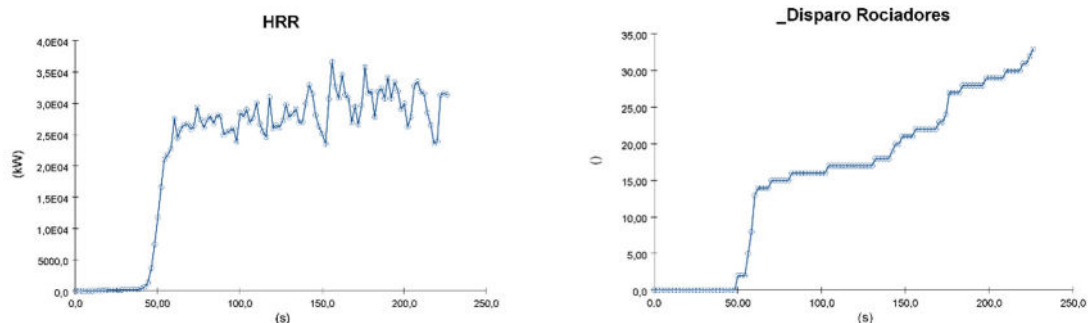
Efecto de la variación en el número de gotas (continuación)

INSTALACIÓN 3 – 625 kW/m² – ROCIADORES ESFR
K200 RR 74°C @ 5,2 bar, 456 l/min rociador (51 mm/min)

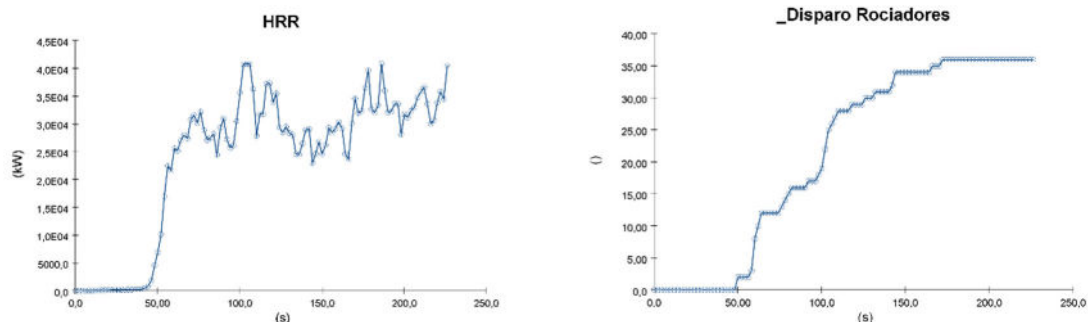
TP03_cortina_Roc_Q_E0_500 (72 roc = 623 m²)



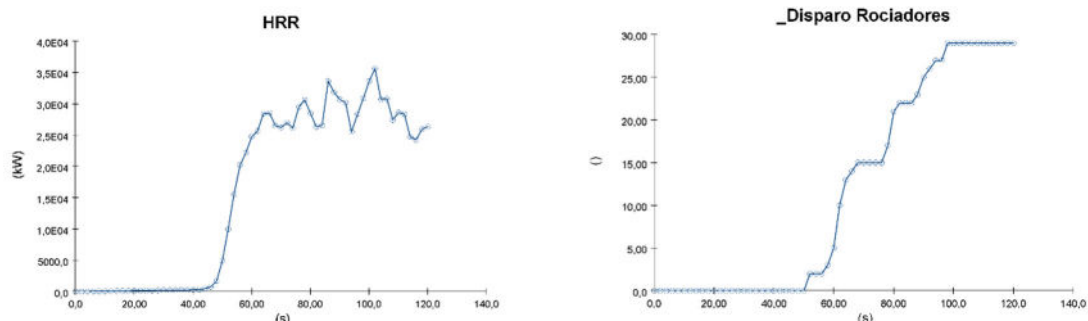
TP03_cortina_Roc_Q_E0_2000 (> 32 roc = 276 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_E0_5000 (36 roc = 311 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_E0_10000 (29 roc = 251 m²)

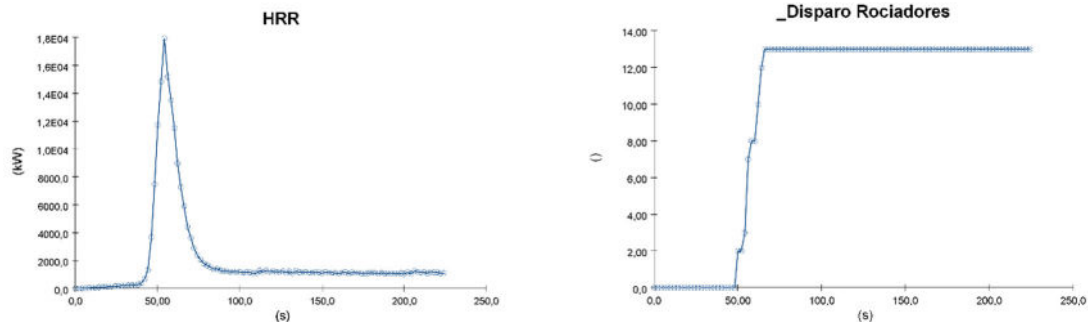


Como el factor de extinción es 0, todos coinciden en que la potencia se estabiliza alrededor de 35 MW, pero el número de rociadores activados es superior a los previstos en el diseño mínimo 29 >> 16. Se observa que el efecto refrigerante del agua es capaz de limitar la potencia del fuego (la curva se aplana y no llega a los valores de cientos de MW) pero el número de rociadores activados es mayor que el del diseño del sistema por no haber incluido el coeficiente de extinción (no se corresponde con el criterio de diseño de la norma de rociadores), lo que demuestra la necesidad de incluir el coeficiente de extinción.

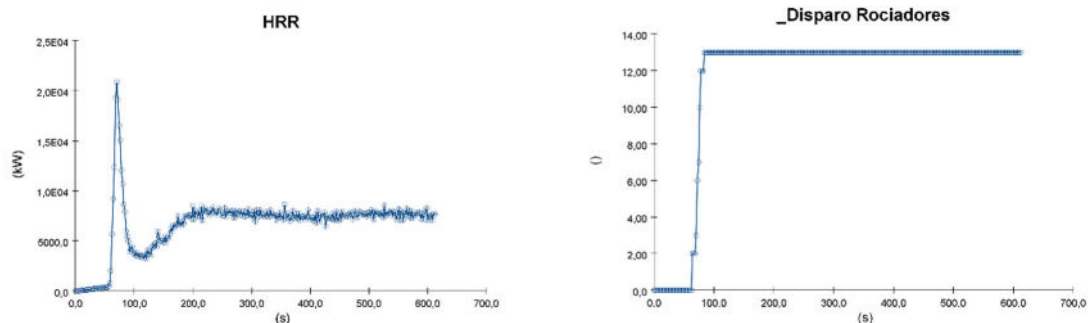
Efecto de la variación en el número de gotas (continuación)

INSTALACIÓN 3 – 625 kW/m² – ROCIADORES ESFR
K200 RR 74°C @ 5,2 bar, 456 l/min rociador (51 mm/min)

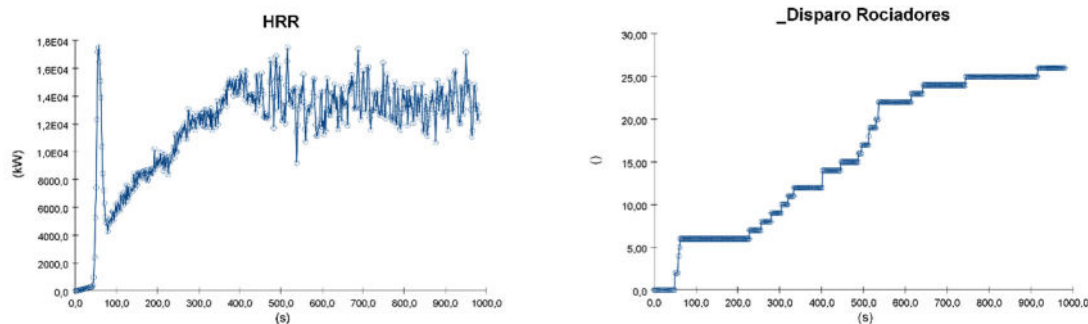
TP03_cortina_Roc_Q_E05_500 (13 roc = 112 m²)



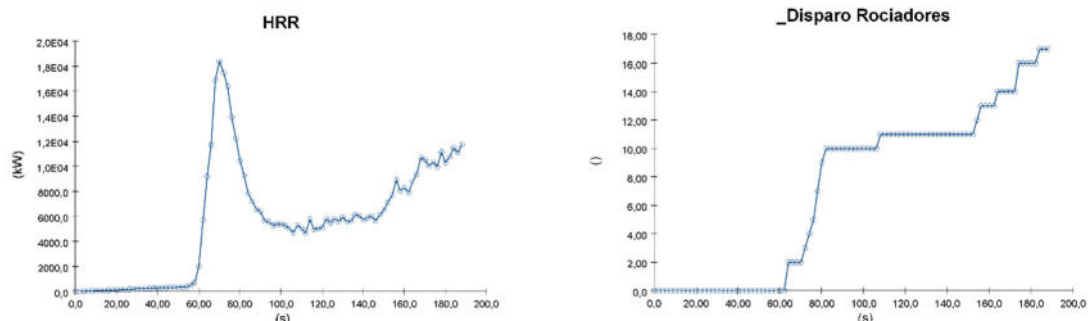
TP03_cortina_Roc_Q_E05_2000 (13 roc = 112 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_E05_5000 (26 roc = 225 m²)



TP03_cortina_Roc_Q_E05_10000 (> 17 roc = 147 m²)



Nota: En 10.000 gotas/s la simulación se detuvo por inestabilidades, pero sigue una tendencia creciente como en 5.000 gotas/s.

Al haber incluido el factor de extinción de 0,5 todos coinciden en que la potencia máxima es de 18 MW con una fuerte caída a continuación. Se observa el efecto de supresión del sistema, pero los resultados con menos de 5000 gotas/s/roc son más optimistas por lo que hay que tener cuidado en el caso de aplicarlo.

3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

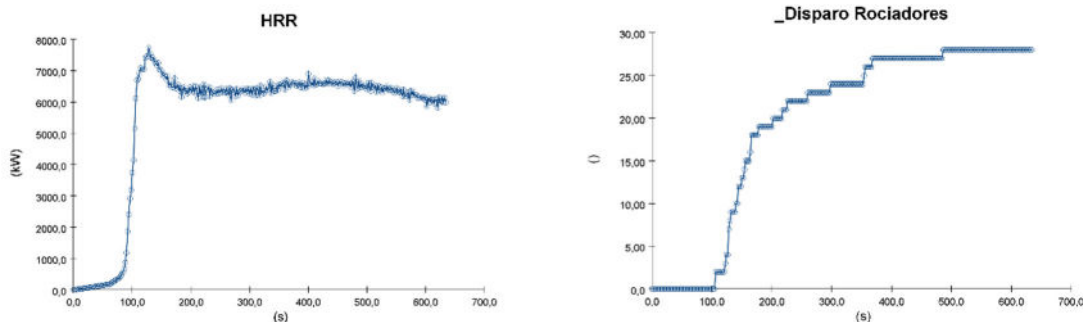
En el ejemplo estudiado en este artículo se ha podido evaluar lo siguiente:

- Se ha iniciado el incendio en un palet situado en la parte inferior de un almacenamiento de 4 alturas que llega hasta los 7,2 m bajo un techo a dos aguas de entre 9,0 y 11,5 m de altura y con una superficie en planta de 1.210 m². Cada unidad de carga o palet es de 1,0 m x 0,8 m x 1,6 m de altura. Las cargas están agrupadas en unidades de 3 x 2 separadas horizontalmente 0,2 m entre sí y 0,4 m entre cada grupo, habiendo un pasillo transversal central que está debajo de la cortina de humos y dos pasillos longitudinales de 4 m de distancia entre sí.
- Al pallet inicialmente ardiendo, considerado como el quemador o “burner”, se le asigna una curva de potencia calorífica en el tiempo que se corresponde con la obtenida en ensayos reales para pallets de cajas con material plástico de similares dimensiones.
- Al resto de pallets se ha asignado un material combustible con una tasa de generación de calor por unidad de superficie máxima para 250 kW/m², 400 kW/m², 500 kW/m² y 625 kW/m² con el fin de poder definir a qué mercancías aplican sabiendo que van desde productos celulósicos hasta plásticos expandidos. Se ha justificado que los productos celulósicos de la Categoría II quedan bien definidos para 250 kW/m² para almacenamiento de la norma de diseño de rociadores UNE EN 12845, que la Categoría III queda bien representada por 500 kW/m² y que la Categoría IV aplicaría para valores superiores a 625 kW/m².
- Se ha definido una temperatura de ignición de 350°C para establecer el momento en que el fuego se propaga a una celda de material combustible que previamente no estuviese ardiendo.
- El tamaño de todas las celdas asignado ha sido de 0,25 m x 0,25 m x 0,25 m.
- **Sin mediar la presencia del agua**, el fuego en producto con potencia calorífica máxima por unidad de superficie de 250 kW/m² alcanza **70 MW** para luego descender a unos **50 MW por quedar limitado por la ventilación** de los exutorios y puertas abiertos. El fuego en producto con potencia calorífica máxima por unidad de superficie de 625 kW/m² alcanza **100 MW máximo** y desciende igualmente a **45 MW al quedar limitado por la ventilación**.
- Si se introduce la posibilidad de que los rociadores descarguen agua de acuerdo con las densidades de diseño de las normas de rociadores UNE EN 12845 y FM 8-9 al alcanzar su temperatura de activación, pero sin otorgar al agua capacidad extintora, **la curva del fuego se ve recortada a valores entre 30 MW y 50 MW, pero no se logra la extinción y en todos los casos se activan más rociadores que los previstos en la norma en su correspondiente área de diseño**.
- Si se introduce el coeficiente de extinción tanto al pallet inicialmente ardiendo como al resto de pallets de acuerdo con la densidad superficial (tridimensional) y según el estudio de Yu, Lee y Kung [12] entonces **la paridad con el área de diseño de las normas de rociadores UNE EN 12845 y FM 8-9 es asombrosa**:
 - En el fuego de producto definido como Categoría II (250 kW/m²) la potencia máxima queda limitada a un máximo entre 7 y 8 MW.
 - En el fuego de producto definido como Categoría III (500 kW/m²) la potencia máxima queda limitada a un máximo entre 16 y 18 MW.
 - En el fuego de producto definido como Categoría II (250 kW/m²) el área de operación de los rociadores queda alrededor de los 260 m² correspondientes al área de diseño la norma.
 - En el fuego de producto definido como de Categoría III (500 kW/m²) el área de operación de los rociadores queda alrededor de los 300 m² de diseño de la norma.
 - En el fuego de producto definido como de Categoría III con plástico no expandido (500 kW/m²) el área de operación de los rociadores ESFR queda por debajo de los 18 máximos de diseño (12 + 50% por la pendiente del techo).

- La potencia calorífica máxima por unidad de superficie de 625 kW/m^2 se corresponde más a Categoría IV con >5000 gotas/s por los siguientes motivos:
 - Se supera el área de operación de rociadores cuando se diseña para Categoría III. De acuerdo con la Tabla 4 de la norma UNE EN 12845 para Categoría IV, la altura máxima de almacenamiento sólo podría ser de $4,4 \text{ m}$ ($< 7,2 \text{ m}$ por lo que no se podría almacenar tan alto con esa categoría) y aún en ese caso la densidad de diseño debería subir a 30 mm/min para los rociadores estándar.
 - También para los ESFR se activan más rociadores de los previstos. Si en cambio, se admite que 625 kW/m^2 aplica más a plásticos expandidos, entonces la norma de diseño requiere una densidad superior (95 mm/min en lugar de $52,8 \text{ mm/min}$) y un área de operación superior (30 rociadores en lugar de 18) de acuerdo con la Tabla 6 de FM 8-9 que sí estaría dentro de los resultados obtenidos en las simulaciones.
 - De lo anterior se deduce que con una potencia calorífica máxima por unidad de superficie de 500 kW/m^2 se representa mejor a los materiales plásticos no expandidos (Categoría III).
- Los resultados con menos gotas/s son más optimistas. Es posible que la razón esté ligada con que las gotas son más “gordas” y tengan mayor capacidad de penetración. Aun así, los resultados en cuanto a equivalencia con el área de operación de los rociadores prevista por la norma siguen siendo muy concordantes, pero se debe tener cuidado en lo que a generación de humos se refiere ya que la curva resulta descendente en lugar de quedar estabilizada.
- Es muy destacable que en los casos en los que se diseña para control según la norma UNE EN 12845 las curvas quedan estabilizadas en un nivel de potencia. También se hace resaltar que la estabilización se produce cuando se han activado 3 o 4 rociadores. Además, se observa que la curva crece muy rápidamente a partir de cierto momento. De las curvas apropiadas para cada caso:

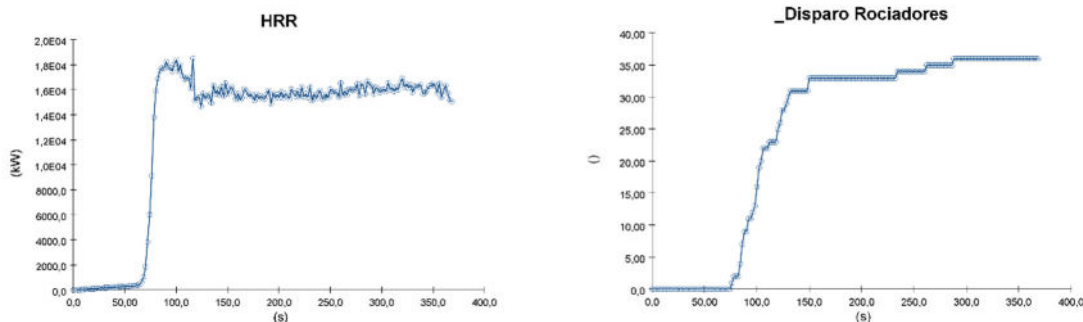
INSTALACIÓN 1 – 250 kW/m^2 – MODO CONTROL

TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_5000_SR1 (28 roc = $242 \text{ m}^2 < 260 \text{ m}^2 \rightarrow \text{OK}$)



INSTALACIÓN 2 – 500 kW/m^2 – MODO CONTROL

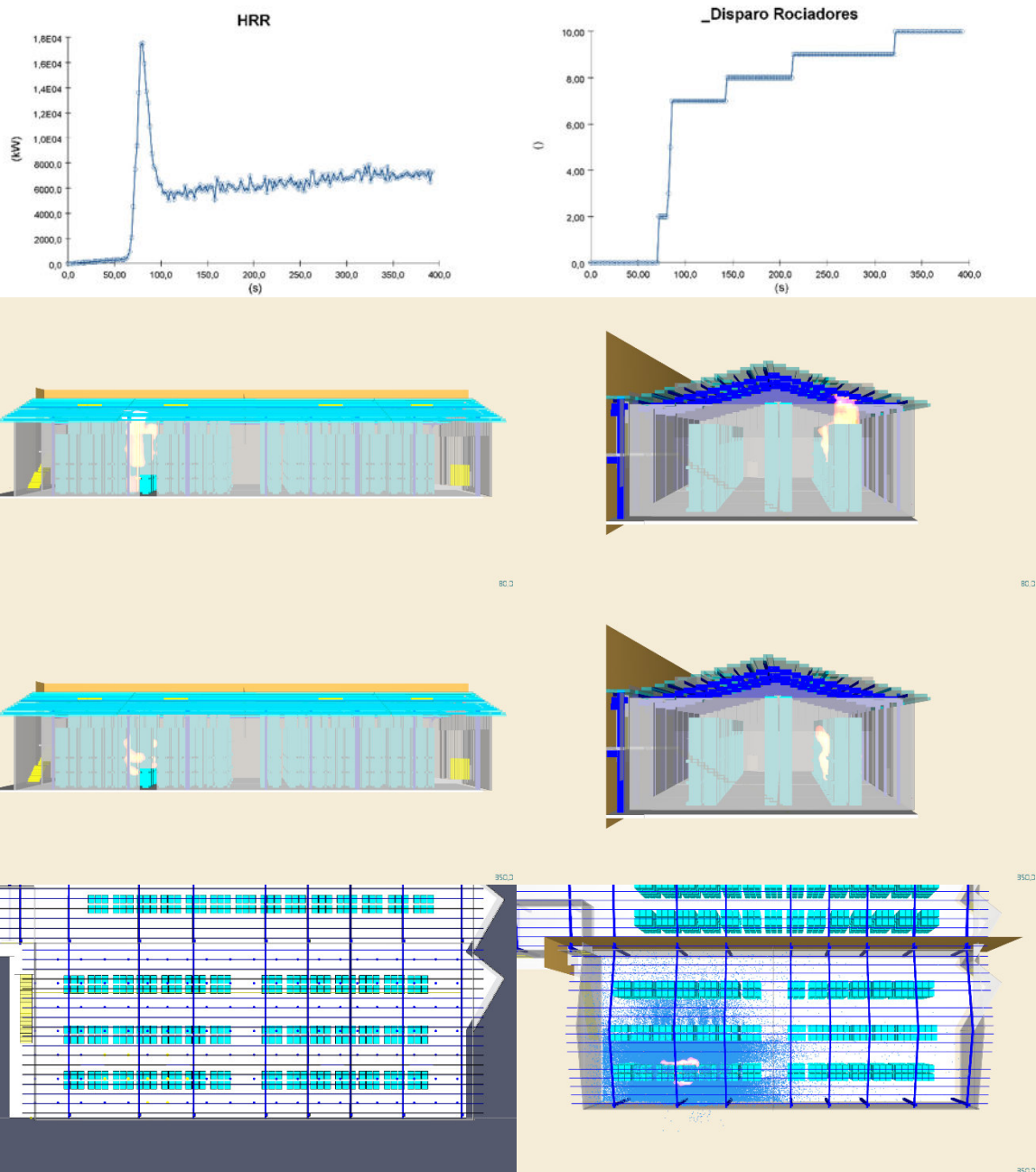
TP03_cortina_Roc_Q2_238_E025_5000_SR (36 roc = $311 \text{ m}^2 \sim 300 \text{ m}^2 \rightarrow \text{OK}$)



- A su vez, es muy destacable que en los sistemas diseñados para supresión (modo ESFR) la curva de potencia crece también muy rápidamente para llegar a un máximo y a continuación decrecer también deprisa. Para Categoría III en la activación del primer rociador la potencia es a los 6 MW mientras que la curva llega hasta 18 MW y luego decrece hasta estabilizarse en 6 MW. Se mantienen fuegos residuales probablemente por quedar zonas ocultas a la descarga del agua. ¡Cuánta razón tiene la norma de diseño en solicitar que el abastecimiento dure al menos 1 hora, aunque se diseñe para supresión! Se muestran las capturas del fuego ocultando los humos y el agua en el momento de la potencia máxima de 18 MW y una vez estabilizada a 6 MW. También se muestran en planta los rociadores activados en color amarillo en contraste con los no activados en azul y el agua descargada:

INSTALACIÓN 3 – 500 kW/m² – MODO SUPRESIÓN (ESFR)

TP03_cortina_Roc_Q2_E05_5000 (10 roc < 18 → OK)



4. CONCLUSIONES

4.1 Simular la realidad

Uno de los principales retos a los que nos enfrentamos al realizar simulaciones es tratar de reproducir la realidad con la máxima exactitud posible, de tal manera que los resultados obtenidos permitan llegar a conclusiones fiables y con ellas definir actuaciones que puedan verdaderamente considerarse efectivas y prácticas.

Mucho avance se ha logrado en programas CFD como el FDS en lo que se refiere a reproducir un fenómeno a la vez tan destructivo como aleatorio como lo es la combustión del fuego con su generación de llamas y humos, así como su posterior propagación, expansión y movimiento en espacios tridimensionales. Todo ello ha permitido predecir condiciones peligrosas y tomar las medidas correctoras sin necesidad de invertir enormes cantidades de dinero en ensayos de fuego real.

El fenómeno añadido de la descarga del agua también es posible reproducirlo, aunque haya más reticencia en hacerlo, principalmente porque requiere un esfuerzo computacional añadido al tener que analizar el programa el recorrido y el estado de cada gota descargada. La simplificación en gotas de mayor tamaño o “super-gotas” en el orden de miles en lugar de millones permite abordar este problema siempre que los resultados puedan ser contrastados con ensayos reales.

Una vez validada la metodología y habiendo sintonizado correctamente los diferentes parámetros involucrados mediante contrastar con los resultados experimentales de los que se disponen, en este caso con la normativa de diseño de rociadores automáticos que tiene mucho respaldo experimental, entonces se dispone de una herramienta poderosísima para poder predecir los resultados en determinadas condiciones con una alta probabilidad de certeza, y ahí está la ventaja, pudiendo realizar numerosos “ensayos de fuego virtuales” a través de las simulaciones para elegir las características más adecuadas del sistema extinción con agua y sin necesidad de nuevos “ensayos de fuego reales” altamente costosos. La pregunta ¿qué pasa si ...? puede realizarse de manera recurrente con un costo relativamente bajo.

4.2 Concordancia con las normas de diseño de rociadores

Se ha mostrado que cuando se simula el fuego que se propaga por temperatura de ignición, con la tasa de generación de calor del producto correspondiente al riesgo, y se incluye el agua descargada por los rociadores con su debido factor de extinción, asignando 5000 gotas/s por rociador, se obtienen resultados muy similares a los criterios de las normas de diseño de los rociadores. La potencia se estabiliza o se reduce y el área de operación de los rociadores es bastante cercana a la prevista, todo lo cual refrenda la validez de su aplicación.

4.3 Curvas de Control y de Supresión

Las curvas obtenidas efectivamente se corresponden con el objetivo de diseño del sistema, a saber, la potencia calorífica se estabiliza cuando el sistema se diseña para control mientras que la potencia descende de manera notoria cuando se diseña en modo supresión (ESFR).

El número de rociadores activados descargando agua cuando se incluye el coeficiente de extinción se corresponde mucho con los previstos en las tablas de diseño de las normas de rociadores.

4.4 Potencia calorífica máxima por unidad de superficie ardiendo

Si se opta por utilizar el valor por defecto de 5000 gotas/s del FDS, entonces las potencias caloríficas a utilizar más adecuados según los resultados obtenidos en este estudio serían:

Potencia calorífica máxima por unidad de superficie 3D		kW/m ²
Categoría II	Materiales celulósicos	250
Categoría III	Plásticos no expandidos en cajas de cartón	400
Categoría III	Plásticos no expandidos expuestos	500
Categoría IV	Plásticos expandidos	625

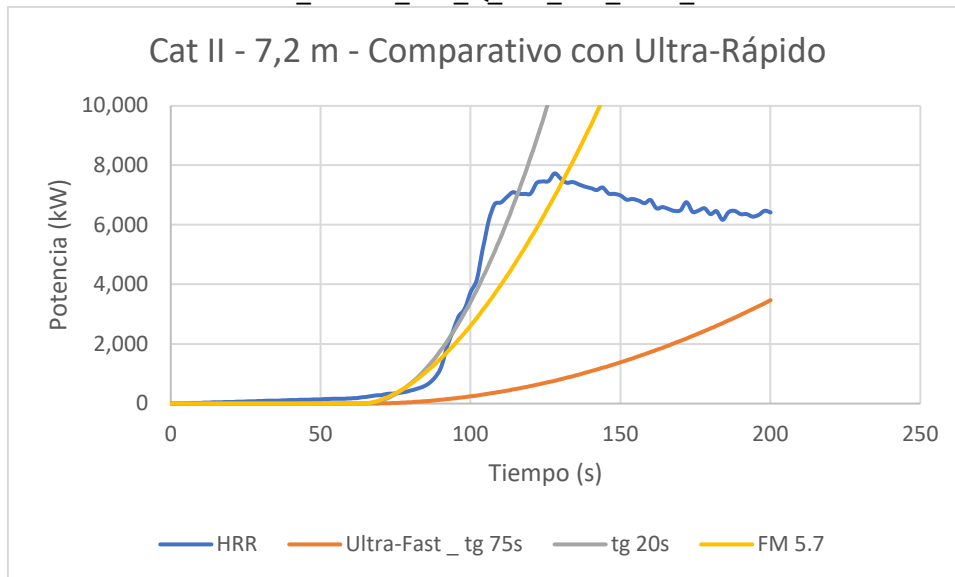
4.5 Fase de crecimiento del fuego

Al no simplificar la curva del fuego sino dejar que este crezca por la ignición de las celdas de los materiales combustibles una vez se supera en estas su temperatura de ignición, se da por hecho que la curva de crecimiento es lo más aproximada a la realidad posible, y si no hay descarga de agua, entonces la curva se detiene únicamente cuando se agota el combustible o queda controlada la combustión por el oxígeno presente (y con ello por la ventilación). Si hay descarga de agua entonces a medida que se va desarrollando el fuego esta refrigera el entorno y puede que no se supere la temperatura de ignición en una celda mojada. A su vez al incluir un coeficiente de extinción, tanto para el primer pallet que arde y al que se ha definido como “quemador” como para el resto de los materiales combustibles, también se interactúa con el fuego y afecta dicha curva, tanto en la fase de crecimiento como luego en la estabilización o decaimiento.

En almacenamiento en altura se comprueba que el fuego crece mucho más rápidamente que el fuego definido como “ultra-rápido”. En las siguientes gráficas se comparan los casos simulados con las diferentes opciones (SR por “Standard Response” y ESFR por “Early Suppression Fast Response”) y con Categoría de producto II (celulósicos) y III (plásticos no expandidos) que puede ayudar a definir la curva de desarrollo del fuego simplificada sin necesidad de simular la propagación por celda y temperatura de ignición.

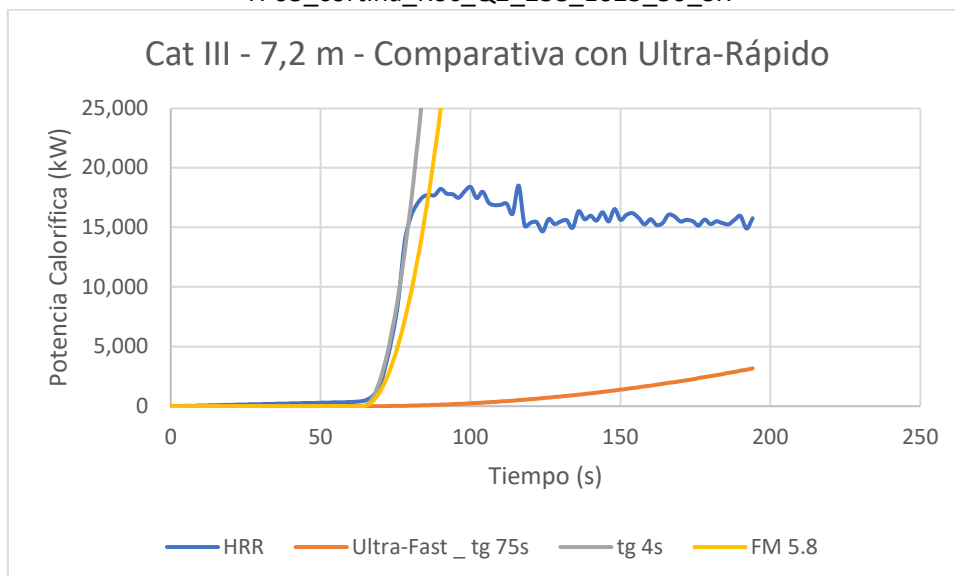
Además de la curva del fuego “ultra-rápido” con un tiempo característico t_g de 75 segundos se incluye otra curva con un tiempo característico que se adapta mejor al crecimiento real y la curva que saldría aplicando la Figura 5.7 de FM referenciada en el documento [17] con un poder calorífico de 17 MJ/kg. En todos los casos se retrasa el inicio de la curva los primeros 64 segundos en donde apenas hay crecimiento del fuego. El crecimiento de la curva de lo que se ha definido como Categoría II en este documento con una potencia calorífica superficial de 250 kW/m² se aproxima bastante si bien crece algo más deprisa que la de las curvas ensayadas de FM para Categoría II. Cabe destacar aquí que los niveles de la Figura 5.7 de FM citada eran de 1,5 m mientras que en este ejemplo son de 1,8 m por lo que en realidad el número de niveles equivalentes aplicado en la fórmula correspondiente ha sido de 4,8. Queda claro que la curva del fuego “ultra-rápido” es demasiado lenta en comparación con la que se obtiene en las simulaciones y de las curvas ensayadas de FM.

TP03_cortina_Roc_Q_151_E03_5000_SR1

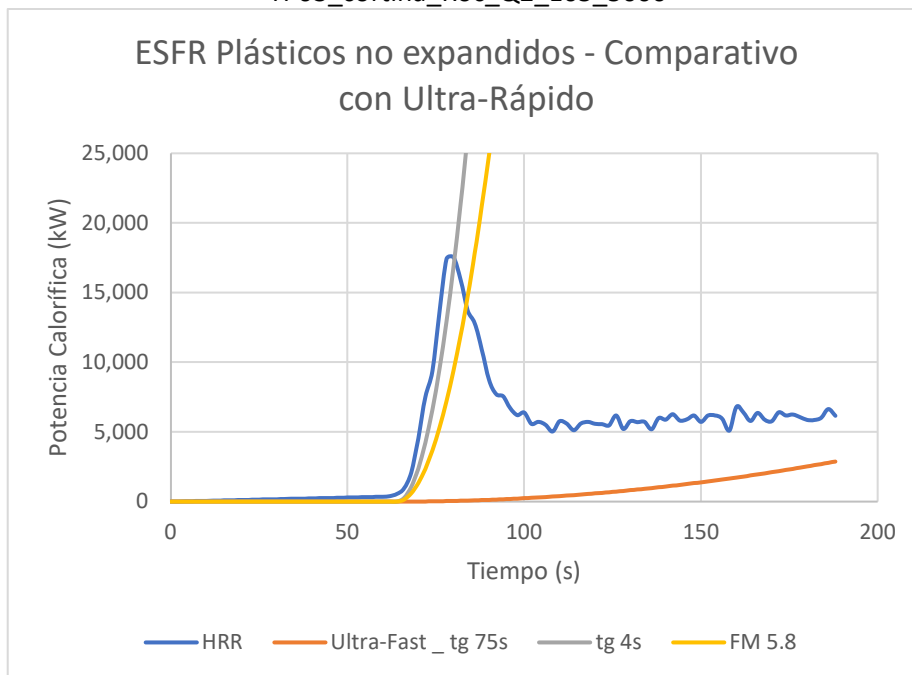


Para el producto Categoría III también se representa la curva del fuego “ultra-rápido” con un tiempo característico t_g de 75 segundos, otra curva con un tiempo característico que se adapta mejor al crecimiento real y la curva que saldría aplicando la Figura 5.8 de FM referenciada en el documento [17] para plásticos con un poder calorífico de 26 MJ/kg. En todos los casos se retrasa el inicio de la curva los primeros 64 segundos en donde apenas hay crecimiento del fuego. El crecimiento de la curva de lo que se ha definido como Categoría III en este documento con una potencia calorífica superficial de 500 kW/m² se aproxima bastante si bien crece algo más deprisa que la de las curvas ensayadas de FM para Categoría III. Cabe destacar aquí que los niveles de la Figura 5.8 de FM citada eran de 1,5 m mientras que en este ejemplo son de 1,8 m por lo que en realidad el número de niveles equivalentes aplicado en la fórmula ha sido de 4,8. De nuevo y con mayor razón, queda claro que la curva del fuego “ultra-rápido” es demasiado lenta en comparación con la que se obtiene en las simulaciones y de las curvas ensayadas de FM.

TP03_cortina_Roc_Q2_238_E025_50_SR



TP03_cortina_Roc_Q2_E05_5000

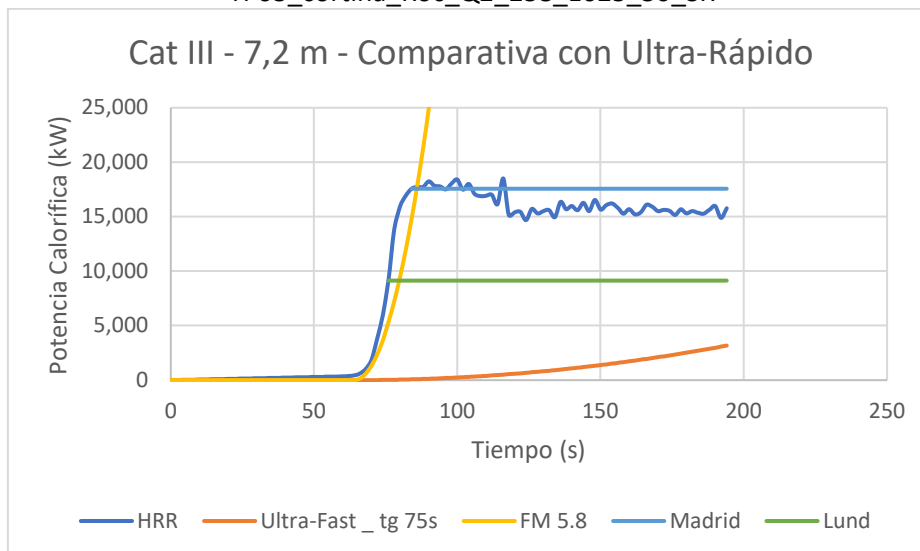


4.6 Potencia calorífica máxima de la curva del fuego

En los casos simulados la curva se estabiliza en la potencia que tiene el fuego cuando se activan 3 o 4 rociadores, dando soporte a ese criterio si se pretende definir la curva de desarrollo del fuego sin necesidad de simular la propagación por celda y temperatura de ignición, siempre que se cumpla con el punto anterior, es decir la curva tenga un crecimiento que se corresponda con el riesgo (por ejemplo, para almacenamiento en altura llega un momento en que crece muy deprisa como se ha demostrado en el apartado anterior [17,18]).

La potencia estabilizada en modo control para Categoría II (productos celulósicos ~ 6 MW) es inferior que para fuegos de Categoría III (plásticos no expandidos ~ 15 MW), de modo que el criterio no depende únicamente del momento en que se activa el primer rociador. Se muestran comparadas para Categoría III las curvas simplificadas de Lund y la de Madrid / IFEG asumiendo que el crecimiento del fuego hubiese seguido la curva de FM.

TP03_cortina_Roc_Q2_238_E025_50_SR



En todos los casos queda confirmado que no siempre la curva de potencia del fuego se puede considerar estabilizada con la activación de un solo rociador, al menos en riesgos de almacenamiento de grandes proporciones [13,14,15].

Se refuerza por consiguiente la tesis planteada en el documento [19] de elegir una curva simplificada que active tantos rociadores como los previstos en el área de diseño del sistema. Y para que los resultados con respecto a la temperatura de los humos sean correctos, siempre deberá incluirse la descarga del agua [19,20].

4.7 Curva Simplificada

Un programa informático que permita resolver un problema complejo puede ser una herramienta poderosa pero los resultados serán tan buenos como los datos de entrada que se le introduzcan. En el caso de los programas del tipo CFD, como es el FDS, puede que se dé mucha importancia al entorno (representación geométrica y dimensional, condiciones ambientales, características termodinámicas de los materiales, etc) pero en cambio se simplifique uno de los elementos más sensibles en lo que a generación de temperaturas y humos se refiere, a saber, la curva de crecimiento, estabilización y decaimiento del fuego de potencia calorífica en el tiempo.

Para esta “simplificación”, se asume una rapidez de crecimiento del fuego en base al riesgo con la utilización de valores “estandarizados” del tipo cuadrático (fuego bajo, medio, rápido y ultra-rápido) y, donde hay rociadores, la estabilización suele relacionarse con la potencia que tiene el incendio en el momento de la activación del sistema de rociadores, normalmente el primero. Para incrementar el grado de simplificación, el agua descargada por los rociadores no se introduce en la simulación, dejando que la transmisión de calor y humos se realice en función de la potencia residual que había en el momento de la activación.

En este estudio, con el fin de simular la realidad de la manera más exacta posible, se ha representado un escenario de almacenamiento hasta 7,2 m de altura, dejando que el fuego crezca por sí mismo libremente en función de las características de combustión de los materiales y su temperatura de ignición. Sin descarga de agua, se han obtenido unas curvas con potencias caloríficas elevadas (100 MW) en el que la potencia quedaba luego limitada por la ventilación (50 MW).

Con el mismo fuego se han representado a continuación 3 sistemas de rociadores diseñados para diferentes riesgos y con diferentes tipos, dos en modo control y uno en modo supresión (ESFR). Los rociadores una vez activados descargarían agua en base a su densidad de diseño para ver el efecto de reducción de la curva, en primer lugar, sin otorgar al agua el beneficio añadido del coeficiente de extinción, es decir únicamente refrigerando gracias a la absorción de calor que se produce principalmente por la evaporación del agua. Luego, las curvas obtenidas de esta manera se han comparado con aquellas en las que sí se le asigna al agua un coeficiente de extinción obtenido a partir de datos experimentales.

Se ha podido comprobar que en los casos en los que había “sintonía” adecuada entre la potencia calorífica máxima por unidad de superficie y la Categoría del material almacenado, entonces la concordancia con la norma de diseño de rociadores en cuanto al área de operación era total, respaldando no sólo la norma en sí, sino también la metodología aplicada en las simulaciones.

Las conclusiones han sido que efectivamente en el caso del diseño del sistema de rociadores en modo “control” con producto que se corresponda con la Categoría de los materiales, la curva se

estabiliza, pero y esto es muy importante, más allá de la activación del primer rociador. En el orden de 7 MW para fuego Categoría II y 16 MW para fuego Categoría III en este escenario.

También ha quedado manifiesto que asumir que el crecimiento del fuego se corresponde con el fuego “ultra-rápido” (“ultra-fast”) se aleja muchísimo tanto del crecimiento simulado en este escenario como de las curvas experimentales de FM para estas Categorías de producto en almacenamiento en altura, y esto conlleva a que los resultados que se obtengan en cuanto a temperaturas y cantidad de humos con una curva simplificada aunque sea con un fuego “ultra-rápido” sean menos exigentes que las previsibles [19,20].

Por consiguiente, la recomendación es que, en el caso de utilizar una curva simplificada para representar el incendio cuando se trata de almacenamiento en altura, se apliquen criterios más adecuados tanto para la fase de crecimiento del fuego como para la de estabilización, y dado que la potencia calorífica llega a ser muy superior a la residual convectiva, siempre incluyendo el agua descargada por los rociadores para lograr el efecto refrigerante sobre los humos. Además, tratándose de una curva simplificada, no se incluiría el coeficiente de extinción del agua si se pretende que permanezca estable en el tiempo.

5. REFERENCIAS

1. UNE EN 12845, “Sistemas de rociadores automáticos”, 2021.
2. EN 12845-1, CEN/TC 191/WG 5 "Sprinkler systems", 2024
3. EN 12845-2, CEN/TC 191/WG 5 "Sprinkler systems", 2024
4. NFPA 13, “Standard for the Installation of Sprinkler Systems”, 2022.
5. FM 3-26, “Fire Protection for Nonstorage Occupancies”, 2021.
6. FM 8-1, “Commodity Classification”, 2023.
7. FM 8-9, “Storage of Class 1, 2, 3, 4 and Plastic Commodities”, 2022.
8. “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, 5th Edition, 2016.
9. NIST Technical Note 2102. “Heat Release Rates of Multiple Transient Combustibles”, Kevin Mc Grattan, 2020.
10. NISTIR 4833, “A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System”, Daniel Madrzykowski, Robert L. Vettori, 1992.
11. NISTIR 5254, “Sprinkler Fire Suppression Algorithm for HAZARD”, David D. Evans, 1993.
12. “Suppression of Rack-Storage Fires by Water”, Hong-Zeng Yu, James L. Lee, Hsiang-Cheng Kung, 1994.
13. “Selecting design fires”, Staffanson, Leif - Lund University, 2010.
14. “Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings”, Nystedt, Fredrik - Lund University, 2011.
15. “Design Fires for Fire Safety Engineering” de Jukka Hietaniemi & Esko Mikkola, 2010.
16. 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.
17. Modelando el Fuego en Almacenes Rev 3, 2023.
18. Modelando el Fuego de Curvas Ensayadas Rev 2, 2023.
19. Modelando el Fuego en Almacenes con Rociadores Automáticos Rev 2, 2023.
20. Modelando el Fuego con Rociadores Automáticos, Rev 4, 2024.
21. IFEG “International Fire Engineering Guidelines”, 2005
22. “Singapore Fire Safety Engineering Guidelines”, 2015
23. NFPA 204 “Standard for Smoke and Heat Venting”, 2021.
24. “Guía v1.0 Revisión de Proyectos Prestacionales de Protección Contra Incendios en Establecimientos Industriales” (Comunidad de Madrid), 2024
25. BFS 2013:12 BBRAD 3; Dimensionamiento analítico de la protección contra incendios de edificios.