

MODELANDO EL INCENDIO EN ALMACENES

17/04/2023

Javier Querol - Director Zona Noreste Pefipresa (España) – Grupo Minimax

1. ABSTRACTO

Se pretende definir la curva de crecimiento del fuego, potencia calorífica vs tiempo, que sea apropiada para los almacenes según su tipología. Esta curva es normalmente un dato de entrada para las simulaciones del incendio mediante programas informáticos en modelos de campo (tipo CFD como el FDS) y a partir de esta se generan los humos con sus concentraciones de gases tóxicos, oscurecimiento y calentamiento por radiación y convección, que permiten determinar hasta cuando las condiciones son sostenibles para los ocupantes o pueden resultar perjudiciales para los materiales presentes, para la estructura de la edificación o a terceros. Se demostrará que el valor generalizado de fuego ultra-rápido (75 segundos para llegar a 1 MW con un fuego cuadrático) subestima en muchos casos la curva que se debería aplicar en el caso de los almacenes.

2. INTRODUCCIÓN

En los estudios prestacionales es habitual realizar simulaciones del incendio con programas que se valen de CFD (modelos de campo) con el fin de predecir los efectos del fuego y los humos, y con ello determinar si se mantienen las condiciones adecuadas para la evacuación del personal, la intervención de bomberos, la resistencia de los elementos estructurales y de compartimentación, o para evaluar los posibles daños a personas o mercancías.

Es usual representar el fuego mediante una curva potencia calorífica vs tiempo con un crecimiento, desarrollo, estabilización y decrecimiento que pueda ser avalada por ensayos experimentales y que represente con la mayor exactitud posible el escenario estudiado, o en su defecto, caracterizarlo con una curva estandarizada.

La norma ISO 16733-1 (1) en su Anexo C (informativo) define los fuegos crecientes con curva cuadrática como lento, medio, rápido y ultra-rápido, con tiempos característicos para alcanzar 1 MW de 600s, 300s, 150s y 75 segundos respectivamente. Es de resaltar que específicamente refiere a la norma NFPA 204 (2) y a la SFPE (3) para datos de crecimiento para bienes almacenados.

Sin embargo, esa norma induce al error cuando, en ausencia de datos más específicos, define en la tabla C2 y para todo tipo de almacenaje, asigna el fuego ultra-rápido, dando por supuesto que se trata del fuego de la mayor rapidez de crecimiento posible. **Esto puede conducir a error**, porque los fuegos en almacenes suelen resultar mucho más veloces.

NFPA 204 (2)

La norma NFPA 204, citada como referencia para almacenes en la ISO 16733-1, tiene una tabla en el anexo F, que define tiempos para alcanzar 1 MW que dependen del material, modo de almacenamiento y altura de almacenamiento, con tiempos que son en numerosos casos inferiores a los 75 s, algunos tan bajos como 7 a 10 segundos (por ejemplo, láminas de aislamiento de poliestireno o polietileno a 4,57 m de altura, botellas de PVC en cajas de cartón hasta 4,57 m o tubos de polipropileno en cajas de cartón hasta 4,57 m). El valor α en estos casos sería de por lo menos 10,55 kW/s² en contraposición a los 0,188 kW/s² del fuego ultra-rápido, es decir, un coeficiente 56 veces superior.

Lo que es peor, el valor de α es proporcional a la altura de almacenamiento según se explica claramente en la norma NFPA 204 puntos 8.3.2 y 8.3.3. Citando de la NFPA 204 (la traducción es nuestra):

“8.3.3. Para diferentes alturas de almacenamiento, el tiempo de crecimiento t_g , será calculada como inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la altura de almacenamiento, y el coeficiente de crecimiento del fuego, α_g , será calculado como directamente proporcional a la altura de almacenamiento (Ver Sección F.1)”

De manera que, si las botellas de PVC en cajas de cartón almacenadas hasta 4,57 m, antes mencionadas, tienen un valor de α de 10,55 kW/s², entonces si se almacenasen hasta 9 m (el doble), deberían tener un coeficiente de α del doble, a saber, 21 kW/s².

SFPE

En el capítulo “26: Heat Release Rates”, subapartado “Industrial Stored Commodities”, tiene figuras y tablas que tratan el asunto para almacenes, muchas derivadas de pruebas de FM. La Fig. 26.49 por ejemplo, muestra el efecto de la altura de almacenamiento en la pendiente de la curva, corroborando lo indicado en NFPA 204.

Asimismo, en la Tabla 26.8 aparecen valores de potencia calorífica máxima y tiempo para alcanzarla. Por ejemplo, para tazas de poliestireno en cajas de cartón compartimentadas, y altura de almacenamiento de 4,42 m, aporta un valor de 6.580 kW/m² en un tiempo de 100 segundos. Como la superficie de los pallets ensayada era de 2,29 m x 2,29 m, eso quiere decir que la potencia calorífica máxima alcanzada fue de 34 MW. Si se asume un crecimiento cuadrático hasta ese punto, entonces se tiene un α de 3,45 kW/s² y un tiempo de crecimiento característico t_g de 17 segundos para alcanzar 1 MW.

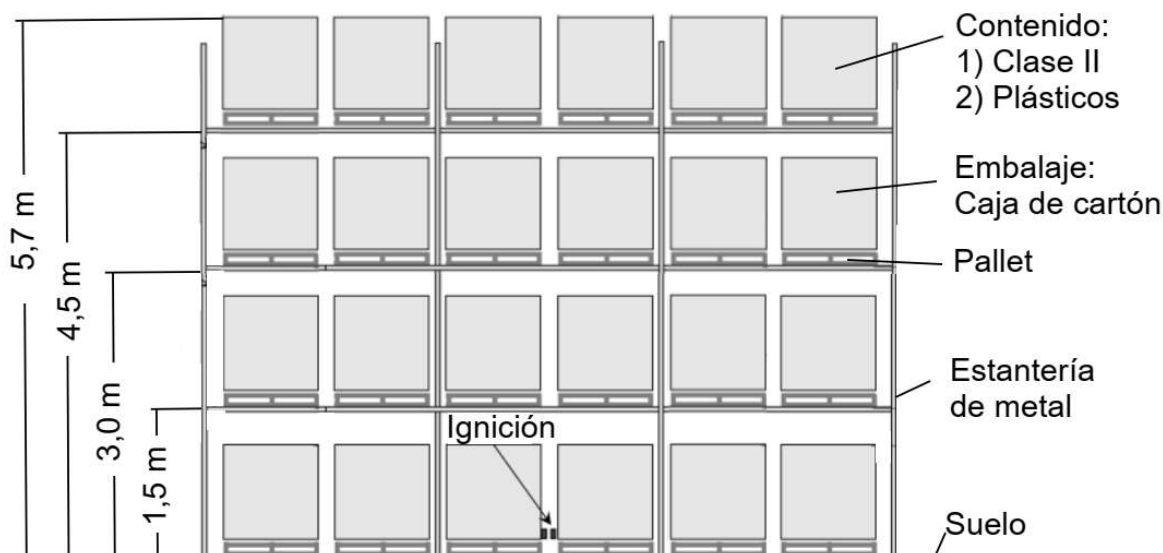
FM

En el libro Industrial Fire Protection Engineering de Robert G. Zalosh (4), capítulo 5 “Warehouse Storage” cita múltiples ensayos de FM con calorímetro para mercancía de todo tipo a diferentes alturas, aportando como resultado la rapidez de crecimiento. Por ejemplo, en la Tabla 5.13 para dos alturas de almacenamiento, proporciona valores de α de 0,90 kW/s² para tazas de poliestireno en cajas de cartón o de 0,98 kW/s² para espuma de poliuretano, valores muy superiores a los 0,188 kW/s² del fuego ultra-rápido, y eso con sólo 2 alturas de almacenamiento (total 3 m).

Son de resaltar las Figuras 5.7 para mercancía Clase II de 2, 3 y 4 alturas de almacenamiento y la 5.8 para Plásticos en 2, 3 y 4 alturas de almacenamiento. Si bien es cierto que el crecimiento inicial es muy rápido, también lo es que la curva luego tiende a estabilizarse, pero en valores muy superiores a la simple aplicación de la curva del fuego ultra-rápido, como se verá en los ejemplos siguientes.

Para ilustrar la diferencia entre el fuego ultra-rápido y los ensayos experimentales, utilizaremos un ejemplo de 4 alturas de almacenamiento en racks de estanterías como se muestra en la figura.

Cada nivel de almacenamiento tendrá 1,5 m de altura, lo que quiere decir que la altura total del almacenamiento para 4 niveles será de aproximadamente 5,7 m.



3. EJEMPLO 1: PRODUCTO CLASE II EN CAJAS DE CARTÓN ALMACENADOS HASTA 4 NIVELES

En este primer ejemplo, se tratará de mercancía Clase II, que significa material no combustible almacenado en cajas de cartón, pallets de madera, y sin plásticos presentes o con una cantidad despreciable. Se considerará un poder calorífico de la mercancía de 17 MJ/kg.

Para este caso, la curva de la Figura 5.7 de FM antes citada aporta las siguientes ecuaciones:

$$\frac{m'}{N} = 7,26 * 10^{-5} * t^{1,7} \quad (\text{para } t < 120 \text{ s})$$

Y

$$\frac{m'}{N} = 2,42 * 10^{-3} * t - 0,042 \quad (\text{para } 120 \text{ s} < t < 180 \text{ s})$$

Siendo:

m' = Tasa de material de la Clase II quemado por unidad de tiempo (kg/s)

N = Número de niveles de almacenamiento

t = tiempo transcurrido desde que la combustión se sostiene, más allá del tiempo de incubación (s).

Estas fórmulas muestran que la masa quemada por unidad de tiempo, y con ello la potencia calorífica al multiplicar por el poder calorífico de dicha masa, es directamente proporcional al número de niveles de almacenamiento, tal y como especifica NFPA 204.

4. EJEMPLO 2. PLÁSTICOS ALMACENADOS HASTA 4 NIVELES

Este caso tiene una disposición idéntica al ejemplo anterior, pero con plásticos presentes en lugar de material no combustible. Se considerará un poder calorífico de 26 MJ/kg.

Aquí resulta perentorio destacar la diferencia que hay entre plásticos no expandidos y los plásticos expandidos (que tiene aire en el interior como las espumas). También difieren si están en cajas de cartón compartimentado o expuesto. NFPA 204 da valores del tiempo de crecimiento cuadrático cuando están almacenados a 4,5 m de altura que van de 7 a 120 segundos dependiendo del tipo de plástico (polietileno, poliestireno, poliuretano, polipropileno, PVC) y de su disposición.

La curva de la Figura 5.8 de FM para mercancía de plástico antes citada aporta las siguientes ecuaciones:

$$\frac{m'}{N} = 2,99 * 10^{-5} * t^2 \quad (\text{para } t < 120 \text{ s})$$

Y

$$\frac{m'}{N} = 1,13 * 10^{-3} * t + 0,289 \quad (\text{para } 120 \text{ s} < t < 150 \text{ s})$$

Siendo:

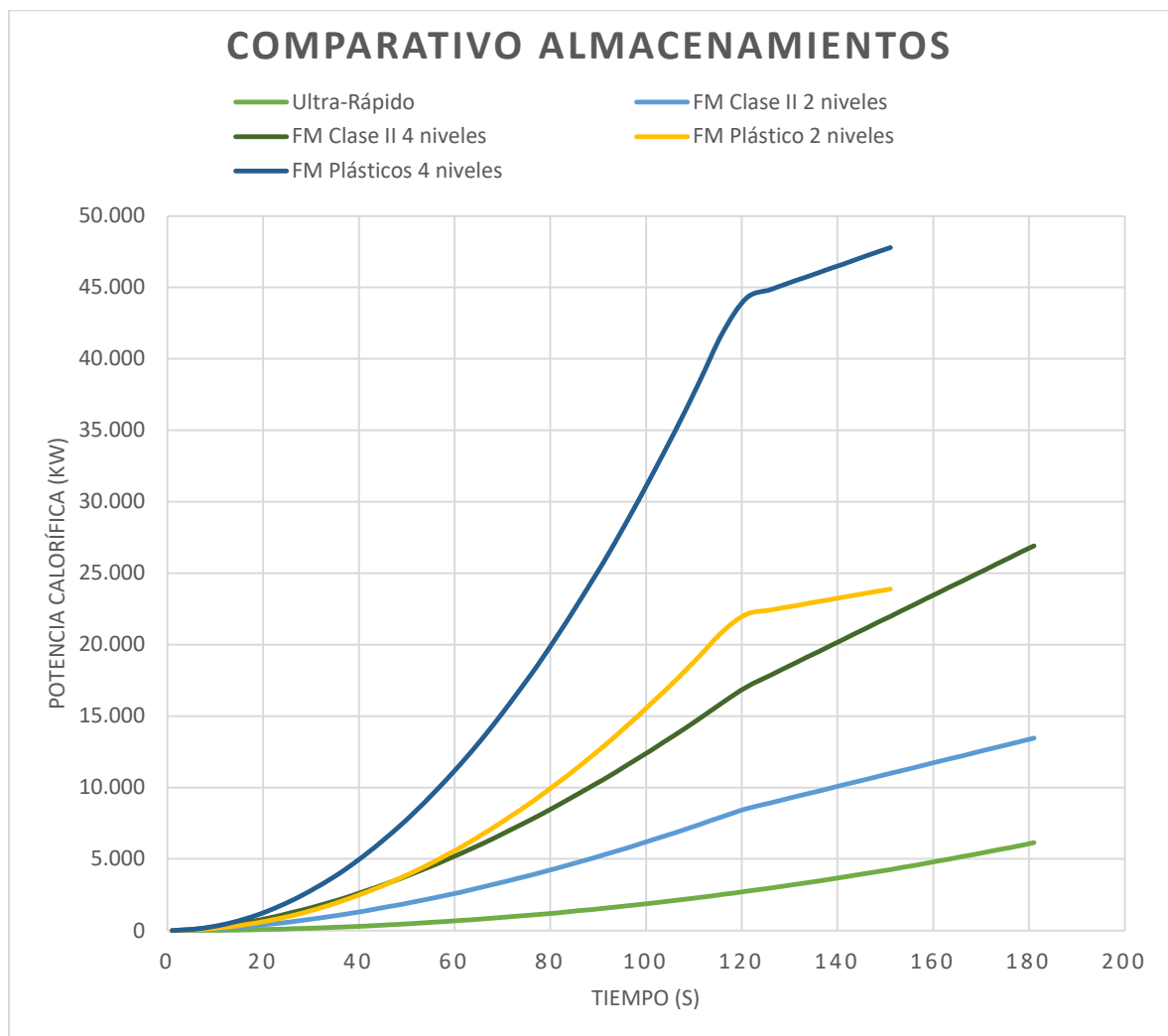
m' = Tasa de material plástico quemado por unidad de tiempo (kg/s)

N = Número de niveles de almacenamiento

t = tiempo transcurrido desde que la combustión se sostiene, más allá del tiempo de incubación (s).

De nuevo la masa quemada por unidad de tiempo, y con ello la potencia calorífica al multiplicar por el poder calorífico de dicha masa, es directamente proporcional al número de niveles de almacenamiento, tal y como especifica NFPA 204.

En la figura siguiente se muestra lo que ocurre los primeros 180 segundos (3 minutos) aplicando la curva cuadrática ultra-rápida en comparación con los valores de la curva de FM tanto para Clase II como para plásticos en 2 y 4 alturas de almacenamiento.



5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como se observa, la potencia calorífica depende del material almacenado y resulta mayor cuanto mayor sea la altura de almacenamiento, dándose situaciones, por lo demás muy comunes, en las que la curva crece mucho más rápidamente que la estándar ultra-rápida.

Mientras que a los 2 minutos (120 segundos), la curva ultra-rápida apenas tiene una potencia de 2,7 MW, para productos de la Clase II a 4 alturas puede llegar a tener 17 MW y en plásticos a 4 alturas tanto como 45 MW.

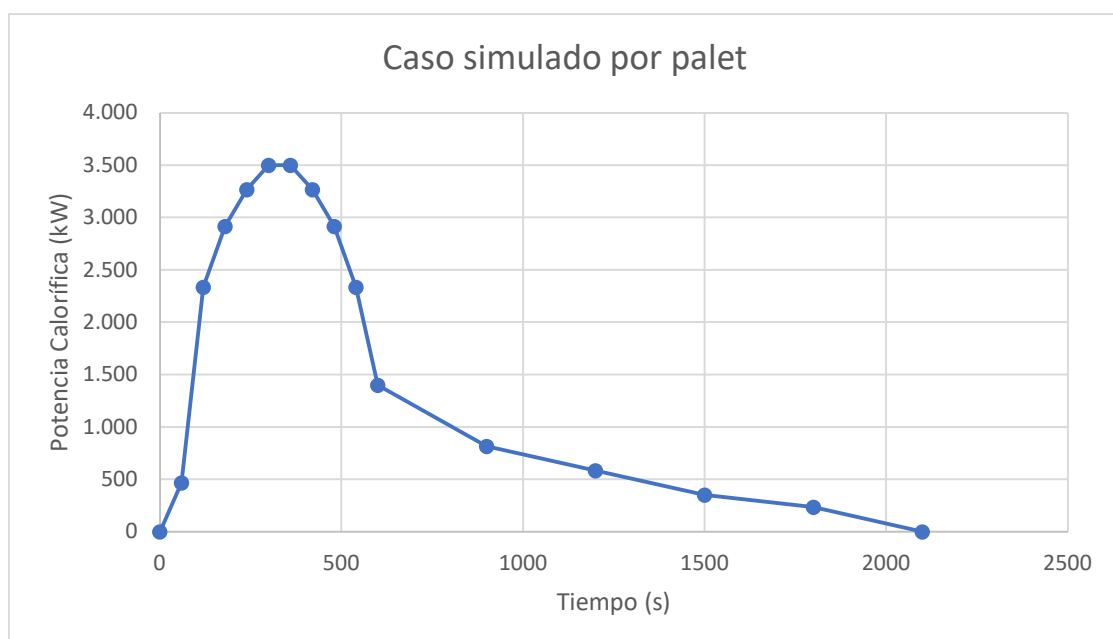
Esta diferencia es muy significativa, y debe tenerse en cuenta para asegurar que la simulación se asemeja a la realidad y que los valores deducidos para las condiciones peligrosas (por ejemplo, el ASET) no aportan datos excesivamente favorables y alejados de una situación altamente probable para el caso bajo estudio.

6. SIMULACIÓN

Con fin de comprobar e ilustrar el efecto acumulativo acelerador de la altura de almacenamiento, se han realizado simulaciones mediante FDS en la que se ha atribuido a cada unidad de palet una curva de desarrollo del fuego de acuerdo con valores obtenidos experimentalmente. Partiendo por ejemplo de la curva de la Figura 26.19 del SFPE para unidad de palet de cestas de frutas.

Las dimensiones de cada carga sobre palet son de 1,25 m de largo x 0,75 m ancho x 1,66 m de alto colocado sobre un europalet de 1,2 m x 0,8 m x 0,1 m. La superficie total de las paredes es de 5,81 m², por lo que la potencia máxima de 3.500 kW implica un flujo de calor de 602 kW/m². En la simulación se ha asignado el valor de 625 kW/m², por equivalencia con un valor normalizado.

Se asignará la curva por puntos que se muestra a continuación al palet inferior, mientras que los palets contiguos o por encima sólo se pondrán a arder con la misma curva una vez que se supere su temperatura de ignición. En los primeros 120 segundos, para una curva cuadrática, el coeficiente que se obtiene es de 0,162 kW/s² ($t_g = 80$ segundos), es decir un fuego cercano al ultra-rápido, y luego crece más lentamente hasta 3.500 kW para decaer progresivamente a medida que se agota el combustible.

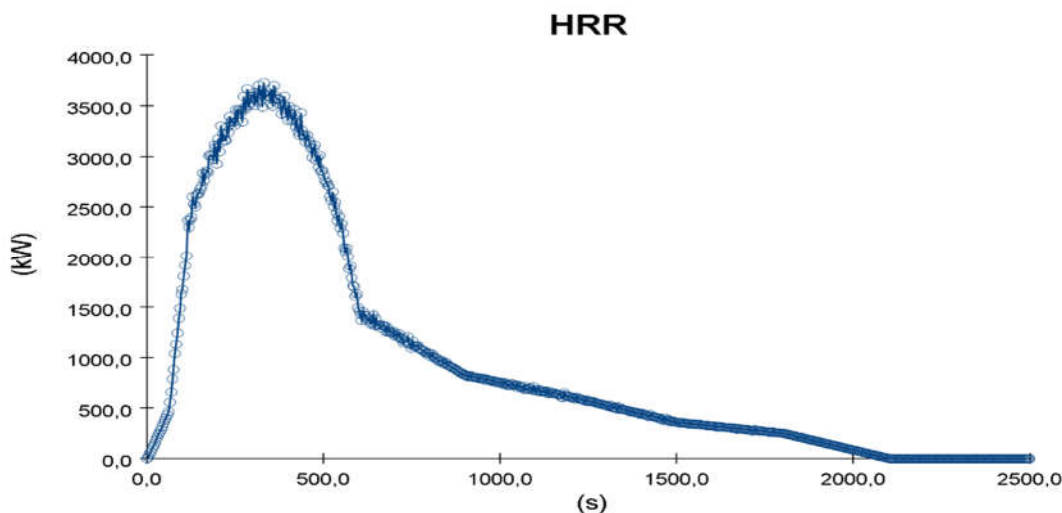


El área debajo de esta curva representa el poder calorífico total del palet, que ronda los 2.300 MJ. Este valor es algo superior al máximo de la Tabla 5.12 de la referencia 4 (2.070 MJ), pero se trata de un palet más alto y de mayor volumen, guardando exactamente la misma proporción por volumen y por ende por kg de combustible en su interior.

Al simular una curva idéntica para los siguientes palets que arden una vez alcanzan su temperatura de ignición, es probable que se subestime el efecto acelerador del calor incidente, ya que, aunque la curva tendría igualmente la misma área debajo (por estar limitado el poder calorífico por la cantidad de material presente en el palet), la potencia calorífica podría alcanzar el valor máximo antes y con una magnitud superior. De todos modos, aun con el supuesto de curvas similares para todos, se demostrará que la curva conjunta del almacenamiento con varios palets en llamas alcanza una aceleración mayor.

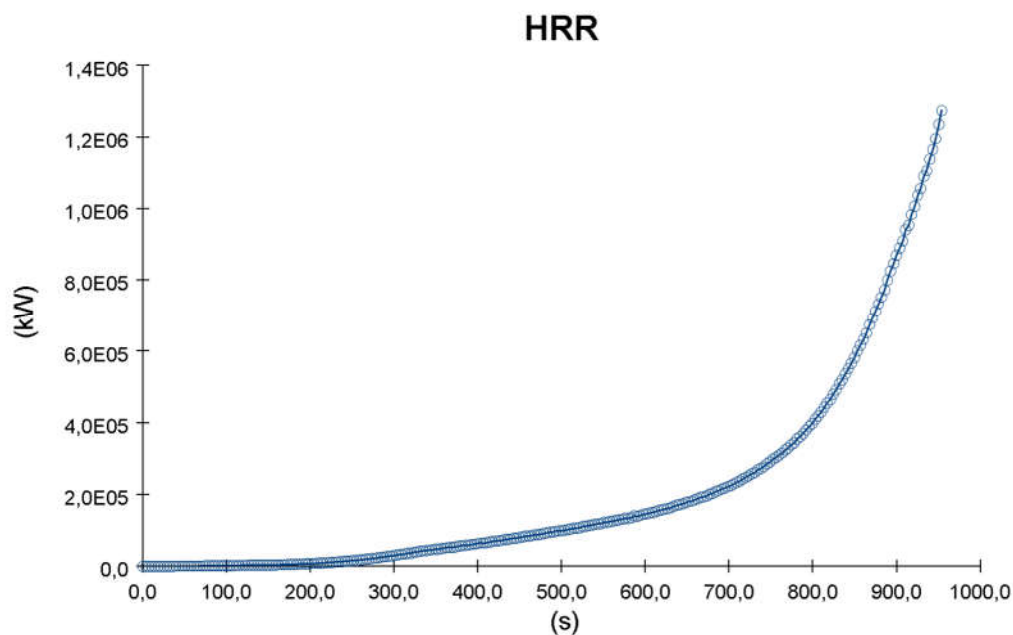
Aunque para sólidos, la temperatura de ignición depende del flujo radiante y del grosor del material, debiendo producirse primero su evaporación (porque lo que arde realmente es la fase gaseosa), en la Tabla 21.3 y Figura 21.10 de la SFPE se muestra que cuando se alcanzan temperaturas entre los 300 y 400°C para la mayoría de los combustibles la ignición está garantizada con un retardo de menos de 1 segundo y flujos radiantes superiores a 11 kW/m². En la simulación se ha asignado una temperatura de ignición de 500°C.

Los resultados de la simulación con FDS para un almacenamiento paletizado de 5 alturas se muestran en las figuras siguientes. La primera corresponde a la de un palet ardiendo sólo según la curva predefinida anteriormente y la segunda la que se produce cuando arden otros palets de almacenamiento en los que la temperatura de la pared supera la de ignición.



Curva simulada en FDS para un palet ardiendo

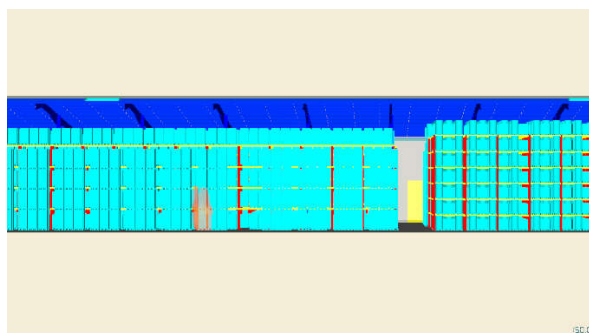
Si a los 400 segundos la potencia calorífica de un palet se ha estabilizado a los 3.500 kW, en ese mismo tiempo un almacenamiento con palets contiguos y por encima hasta 5 niveles de altura con idénticas características se alcanza los 67.500 kW (correspondería a una tasa de crecimiento de 0,42 kW/s² o un $t_g = 50$ segundos). Y como el fuego sigue propagándose al no haber descarga de agua de rociadores, la curva se vuelve cada vez más pronunciada.



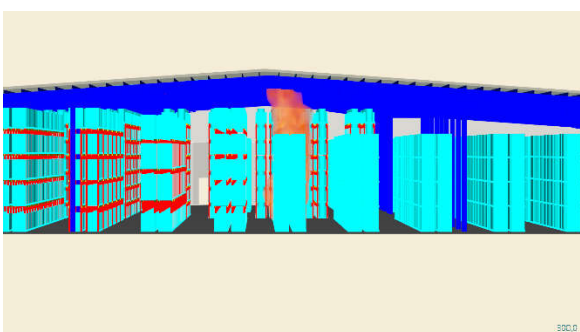
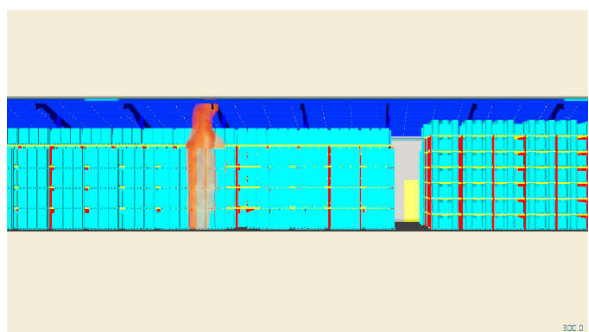
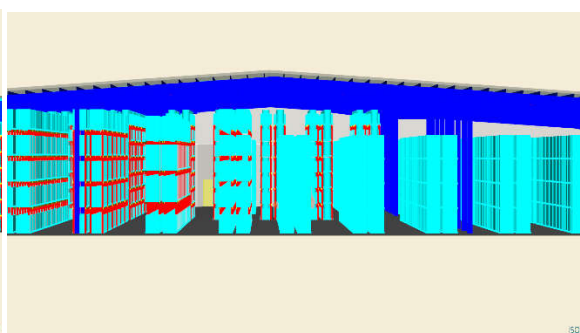
Curva obtenida en FDS para varios palets ardiendo una vez superada su temperatura de ignición

En las capturas siguientes se muestran los palets ardiendo en secuencias de 150 segundos, observándose cómo hay cada vez más palets envueltos en llamas, llegando a afectar a palets situados en estanterías a los otros lados de los pasillos y eventualmente ardiendo palets aledaños en la parte superior del almacenamiento. Se ha ocultado el humo para una mejor visión.

Vista Frontal

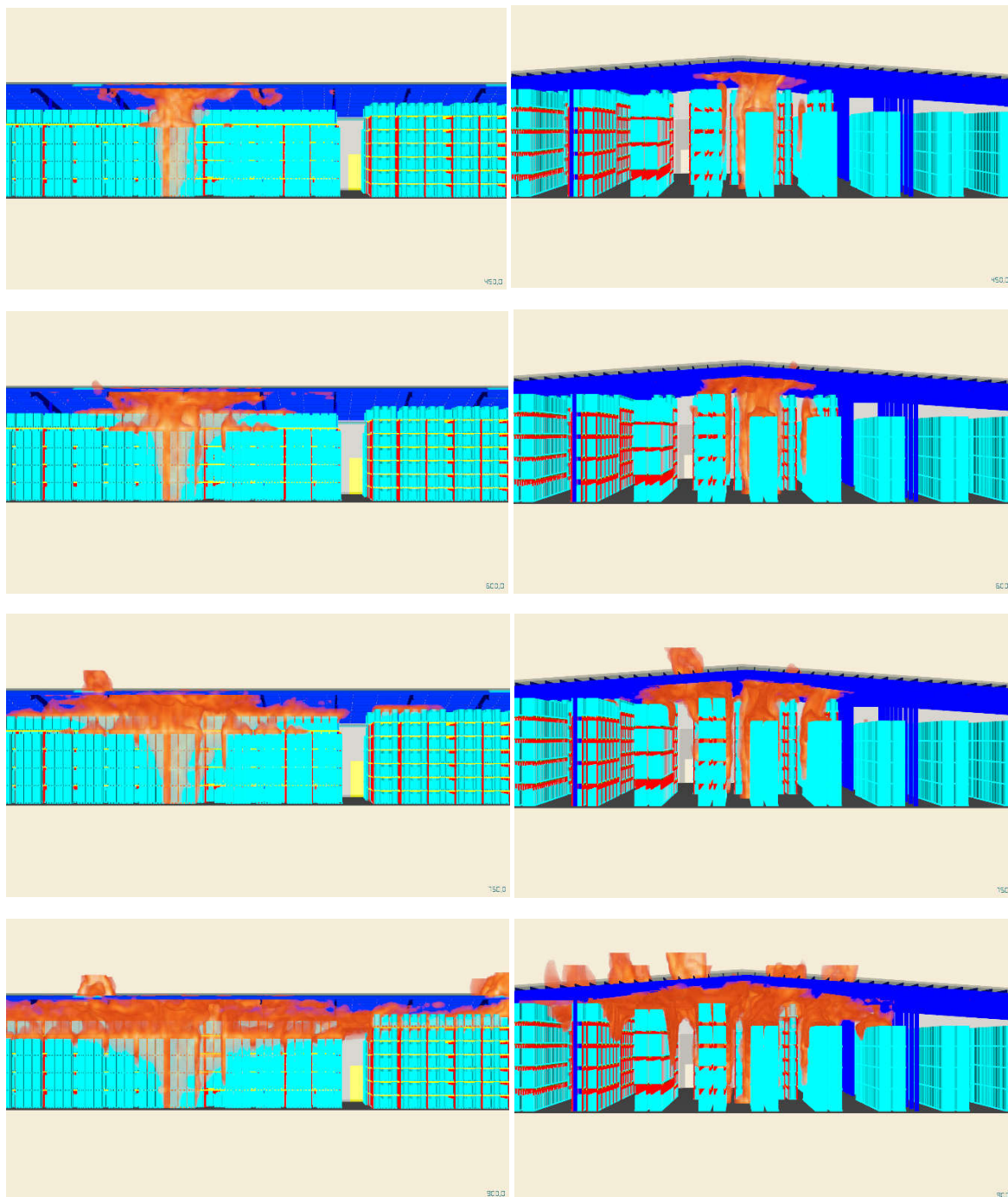


Vista Lateral



Vista Frontal

Vista Lateral



Queda claro que no se puede simplemente aplicar la curva de fuego de un elemento cuando éste se encuentra almacenado en altura, debiendo adoptarse algún criterio de aceleración de la curva y acumulativo para la potencia calorífica como el de la NFPA 204 o de las tablas de la SFPE, o alternatively realizando la simulación con una curva de fuego para cada unidad de palet que se ponga en marcha al superar su respectiva temperatura de ignición.

De adoptarse este último método deberá tenerse presente que puede subestimarse el crecimiento mientras no actúan los rociadores, al no tener en cuenta el efecto acelerador del calor radiado incidente (en los ensayos únicamente arde una unidad de carga, mientras que en el caso bajo análisis otras unidades arden al mismo tiempo a su alrededor) y una vez actúan puede sobreestimarlos (porque cuando están mojados los palets tendrán una curva de crecimiento más reducida) si no se agrega un factor de extinción.

7. CONCLUSIONES

Al definir la curva del fuego para las simulaciones en estudios prestacionales, sobre todo en almacenes, se deberá tener en consideración el producto almacenado, la altura de almacenamiento y los datos experimentales disponibles con el fin de generar resultados que sean lo más ajustados a la realidad posibles.

8. REFERENCIAS

1. ISO 16733-1 "Ingeniería de seguridad contra incendios. Selección de escenarios de fuego de diseño y fuegos de diseño. Parte 1", 2017.
2. NFPA 204 "Standard for Smoke and Heat Venting", 2021.
3. "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 5th Edition, 2016.
4. "Industrial Fire Protection Engineering", Robert G. Zalosh, Wiley, 2002.