Comportamiento del incendio en múltiples estancias

1 Introducción

Todo bombero conoce la curva de desarrollo del incendio de la figura 1. Esa curva representa la manera posible en que puede comportarse un incendio en el interior de un edificio. Para que esta curva se manifieste, deben cumplirse varias condiciones:

- Tiene que haber suficiente combustible dentro de la habitación.
- La carga de combustible debe estar colocada de tal manera que pueda desarrollarse un incendio cuya tasa de liberación de calor supere el límite necesario para que se produzca un flashover en la sala.
- Debe haber suficiente aire (ventilación) para que el fuego alcance ese índice de liberación de calor.

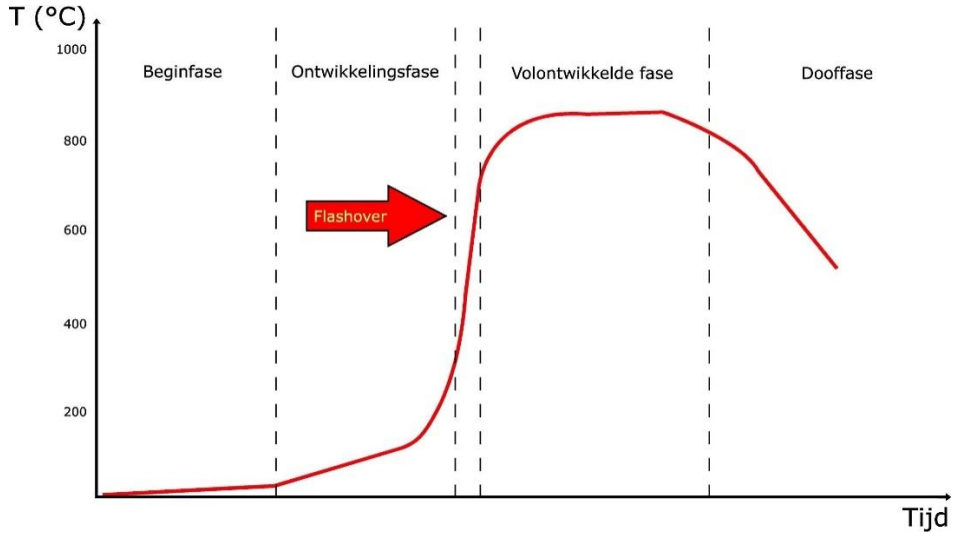

figura1 La curva de crecimiento del fuego *ventilado (Figura: Karel Lambert)*

No todos los bomberos entienden que esta curva ilustra una evolución de la temperatura en función del tiempo, mientras que en realidad se hace referencia a la tasa de liberación de calor en las condiciones descritas anteriormente. El artículo "The fire growth curve" presenta el fuego en un gráfico "tiempo-HRR" [2]. El artículo analiza el impacto de diferentes variaciones (ventilación, carga de combustible) en la HRR.

Esta curva sólo se refiere a un incendio en un único compartimento. *Entonces, ¿cómo se comporta y crece un incendio cuando hay varios compartimentos implicados?*

En este artículo, examinaremos más de cerca el comportamiento del fuego en múltiples habitaciones. El artículo no será exhaustivo, ni pretende serlo. Nos centraremos en un incendio que se inicia en una habitación y se propaga a través de una puerta a una segunda habitación.

2 De humo se trata

Todos los incendios producen humo. El humo es crucial para la propagación del incendio porque el propio humo propaga tres cosas que son importantes para los equipos de extinción:

1. Propagación de energía
2. Propagación del combustible
3. Propagación de toxicidad

La sección siguiente trata con más detalle la propagación del humo y sus consecuencias.

2.1 Propagación del humo

Un incendio produce humo. El humo está formado por partículas de hollín, aerosoles y gases. Sin embargo, en su mayor parte, el humo está formado por aire. *¿Cómo es esto realmente?*

El humo se produce en el foco del incendio. Una gran parte de la energía (el calor) liberada por el fuego se utiliza para calentar el humo. Así pues, la HRR del fuego desempeña un papel importante en la propagación del humo: cuanto mayor sea la HRR, más "fuerza" tendrá el fuego para empujar el humo lejos de sí mismo, por así decirlo. La temperatura inicial del humo depende de la cantidad de aire que puede fluir sobre el foco del incendio. El tamaño del contorno del fuego es importante aquí. Cuanto mayor sea el contorno, más aire podrá entrar. Si la HRR se mantiene constante, la temperatura del humo que sale de un fuego con un contorno más grande será más baja.

Como el humo está más caliente que el aire circundante, subirá hacia arriba. El efecto que causa esto es el mismo que hace que un globo de aire caliente se eleve: el aire caliente sube. Sin embargo, en un globo de aire caliente, el aire queda atrapado dentro del globo. No puede mezclarse con el aire exterior, más frío.

El humo difiere un poco en este aspecto. El humo sube y, a medida que se eleva, el aire se mezcla cada vez más con la columna de humo. Esto hace que ocurran varias cosas:

- La temperatura del humo disminuye. El humo caliente que se inició en el incendio se mezcla con el aire frío de los alrededores.
- Esto hace que la diferencia de temperatura con el aire circundante también disminuya y que el humo se eleve con menos rapidez que antes.
- La masa del humo también aumenta. Al fin y al cabo, una gran parte del aire se ha mezclado con el humo.

La temperatura del humo, la velocidad a la que asciende y la masa del humo cambian a medida que asciende (véase la figura 2).

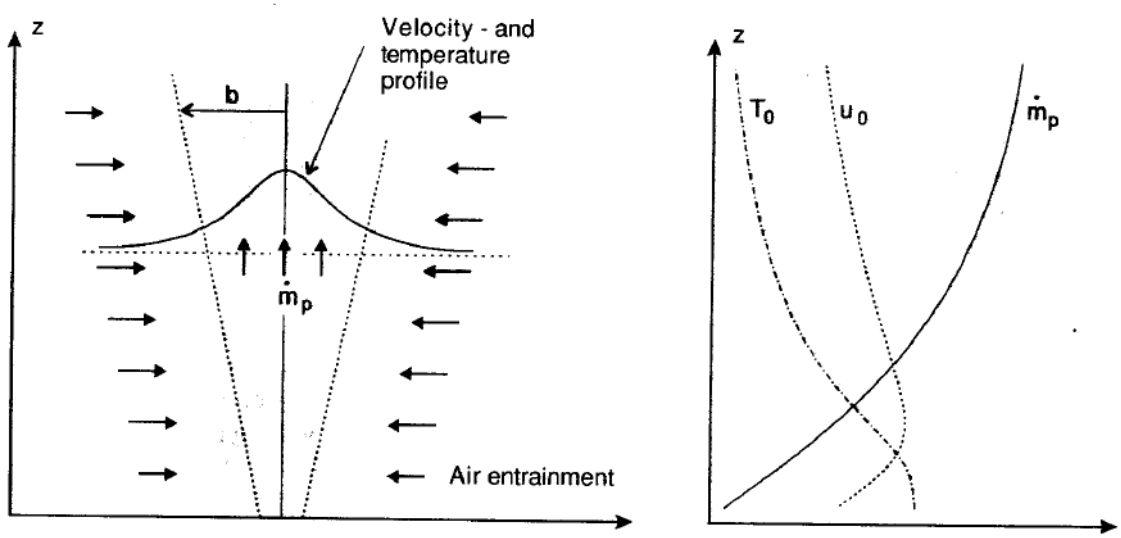

Figura 2 Esquema de una columna de humo. A medida que el penacho de humo se eleva, se ensancha. La temperatura y la velocidad son más altas en el centro y disminuyen hacia el exterior del penacho. La temperatura (T) y la velocidad (u) disminuyen a medida que el humo asciende. La masa (m) aumenta. (Figura: [7])

Todo bombero sabe que un incendio en una habitación produce primero una columna de humo y después una capa de humo. La columna de humo alcanza el techo y se propaga horizontalmente. El humo seguirá propagándose hasta que toque una pared. Las paredes y el techo de la sala limitan la capa de humo. La capa de humo se hará entonces más gruesa (= se expandirá y descenderá).

Esto hace que disminuya la distancia vertical que recorre la columna de humo desde el foco del incendio hasta la capa de humo. Esto significa que se permite que menos aire se mezcle en la columna de humo ascendente. Esto, a su vez, significa que el penacho de humo se enfriará menos que antes y que el humo con una temperatura más alta fluirá hacia la capa de humo.

Por ello, la altura del techo de la sala desempeña un papel importante en todo esto. En un almacén de 8 metros de altura, el penacho de humo se enfriará a esa distancia antes de entrar en la capa de humo. Por otra parte, el grosor de la capa de humo viene determinado por la superficie del compartimento. La superficie determina en parte la cantidad de humo que puede almacenarse en la capa de humo. Un compartimento más grande tardará más en formar una capa de humo de un metro de espesor. Un compartimento grande y alto forma una especie de amortiguador para el humo, por así decirlo.

Lo que también es importante aquí son las aberturas en las paredes. Si hay una ventana abierta, el humo empezará a salir en cuanto la capa de humo alcance la parte superior de la ventana. A partir de ese momento, el humo fluirá tanto hacia la capa de humo (desde el penacho) como hacia el exterior de la habitación (a través de la ventana). Cuando esto ocurra, existen -teóricamente- tres posibilidades:

1. Está entrando más humo en la capa de humo que saliendo. La capa de humo seguirá bajando.

2. El humo sale exactamente al mismo ritmo que entra. La altura de la capa de humo seguirá siendo la misma.

3. Entra menos humo del que sale. El tamaño de la capa de humo disminuirá. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando se abren las salidas de humo del techo en un incendio controlado por combustible.

Así pues, existen varios parámetros que determinan el comportamiento de la columna y la capa de humo:

- La HRR del incendio
- La circunferencia (tamaño del contorno) del incendio
- La altura de la sala
- La superficie de la sala
- La presencia de aberturas

El fuego constituye un sistema muy complejo en el que todo cambia constantemente.

El penacho de humo forma un puente entre el foco del incendio y la capa de humo. A través del penacho de humo, el combustible, la energía y las partículas tóxicas fluyen hacia la capa de humo.

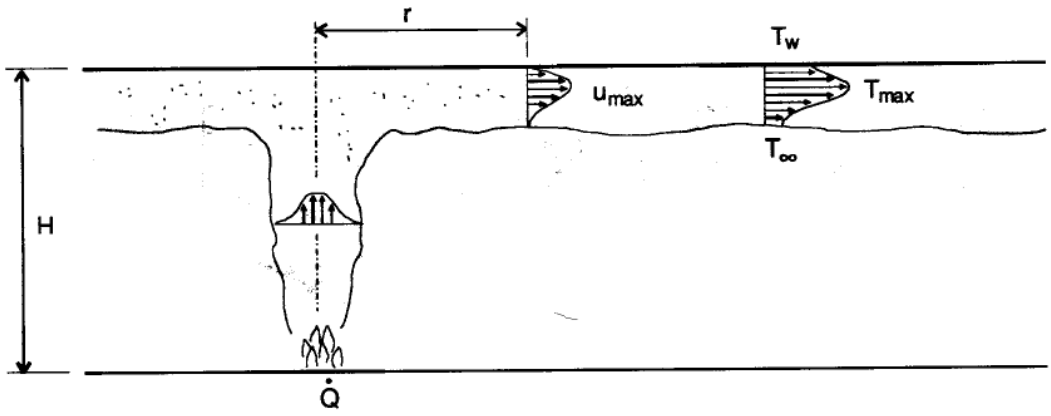

FIGURE 4.17 An idealization of the ceiling jet flow beneath a ceiling.

figura3 *Ilustración de un penacho de humo que fluye hacia la capa de humo. En la capa de humo se forma un chorro de techo. El chorro se divide en secciones con diferentes velocidades de flujo (u) y diferentes temperaturas (T). Ambas aumentarán cuando aumente la HRR del incendio. Ambas disminuirán cuando la habitación sea más alta. (Figura: [7])*

La capa de humo está unida a las paredes y al techo. Al principio del incendio, el interior de las paredes tiene aproximadamente la misma temperatura que el ambiente interior. En cuanto las paredes entran en contacto con el humo caliente, empiezan a calentarse. Parte de la energía contenida en la capa de humo se transfiere a las paredes.

En cuanto la capa de humo desciende por debajo del extremo superior de la abertura de una puerta que comunica con un compartimento vecino, el humo comenzará a fluir hacia esa segunda habitación. Ese flujo provocará un desplazamiento de energía, combustible y toxicidad.

2.2 Propagación de energía

El humo que fluye por la puerta de conexión volverá a subir hasta el techo. Todos los comentarios realizados sobre la acumulación de la capa de humo (grosor, temperatura) en la primera sala se aplican una vez más a la segunda sala.

Sin embargo, esa capa de humo constituye una amenaza significativa para todos y cada uno de los habitantes de la segunda habitación. La capa de humo transferirá energía a todos los objetos y ocupantes que tengan una temperatura inferior a la de la capa de humo.

Al igual que en la habitación inicial, la capa de humo irradiará calor a todo lo que se encuentre debajo de ella. Ese calor radiante puede ser bastante alto cuando la temperatura de la capa de humo también es alta. Si la cantidad de radiación es lo suficientemente alta, los objetos situados debajo de la capa de humo en algún momento comenzarán a pirolizar. Esto significa que la capa de humo está provocando la formación de gases inflamables en la segunda habitación.

Debe prestarse especial atención a los revestimientos inflamables de paredes y techos. El techo está directamente en contacto con la capa de humo caliente. El humo calentará el techo por convección. Se trata de un método de transferencia de calor diferente al de la radiación. La convección requiere un contacto directo entre el humo y el objeto más frío. Por lo tanto, si el humo toca el techo inflamable (madera o aislamiento inflamable), también pueden formarse gases inflamables. La pirolización de muebles bajo una capa de humo puede ser visible para los bomberos que se encuentran en la habitación, pero la producción de gases inflamables en el interior de la capa de humo no lo es. Por lo tanto, es mucho más peligroso.

Finalmente, el calor de la capa de humo podría provocar la ignición en la segunda habitación. A partir de ese punto, pronto se producirá un segunda flashover. Sin embargo, este Segundo flashover se producirá en la segunda habitación y no en la primera. Se considera que el incendio se ha propagado y que aún puede propagarse más.

2.3 Propagación de combustible

El combustible en forma gaseosa entra en la segunda sala a través de la abertura de la puerta. Hasta ese momento, la sala estaba llena de aire al 100%. Ahora, las partículas de combustible (gases de pirólisis y también gases parcialmente quemados, como el CO) entran en la sala. Se forma una capa de humo en el techo. Esto debe considerarse como un depósito de combustible gaseoso. Si los objetos comienzan a pirolizar en la segunda sala, los gases formados también irán a parar a esa capa de humo.

En algún momento, la capa de humo, o ciertas partes de ella, alcanzarán el límite inferior de inflamabilidad. Dependiendo de la temperatura de la capa de humo, el humo se encenderá en algún momento. Esto puede ocurrir de varias maneras:

- Llamas que salen de la primera habitación a través de la abertura de la puerta
- Ángeles que bailan (llamas aisladas) en la capa de humo
- Rollover en el segundo compartimento

Cada uno de estos fenómenos necesita combustible para producirse. Por eso es tan importante la propagación del combustible del primer compartimento al segundo (y la "producción" de combustible en el segundo).

Cada uno de estos fenómenos produce energía localmente. Allí donde hay llamas, se libera calor. La capa de humo se calentará (temporalmente) en ciertas partes. Esto hará que aumente también la transferencia de calor (por radiación y convección). Se forma un ciclo autorreforzado de propagación de energía y propagación de combustible. Las temperaturas más altas provocarán más pirólisis (= más combustible). Cuando hay suficiente combustible, puede producirse la ignición, que a su vez genera más energía.

El artículo "¿Cómo muere la gente en los incendios?" [9] explica que la radiación es proporcional a la temperatura absoluta a la cuarta potencia. Este principio dicta que las llamas (en ciertas partes de la capa de humo) emiten 16 veces más calor radiante que el humo con una temperatura de 200 °C. Por tanto, cuando partes de la capa de humo se inflaman, la radiación se multiplica por 16.

2.4 Propagación de la toxicidad

El tercer problema relacionado con la propagación del humo es la propagación de partículas tóxicas. Para los bomberos, esto no supone directamente un problema, ya que suelen llevar equipos de respiración autónomos. Aunque la concentración de gas tóxico alcance niveles significativos, mientras tengan aire en la botella, pueden respirar sin problemas. Pero esto no se aplica a las víctimas que se encuentran en la habitación. Los ocupantes del edificio podrían encontrarse en otra habitación, pero cuando la puerta está abierta, el humo transfiere una gran cantidad de sustancias tóxicas a la habitación. Los estudios realizados por UL han demostrado que esto conduce muy rápidamente a niveles letales de toxicidad. En una vivienda estándar, se espera que los ocupantes atrapados en la habitación del incendio sólo dispongan de 5 minutos.

Sin embargo, cuando esas víctimas están atrapadas en otra habitación con la puerta cerrada, el tiempo que transcurre antes de que las condiciones se vuelvan inviables es de hasta treinta minutos. Esto también tiene implicaciones tácticas para los equipos de búsqueda y rescate en un incendio doméstico: cuando un equipo se encuentra en una habitación llena de humo denso (por ejemplo, la cocina o el salón), tiene que tener cuidado al abrir las puertas. Es muy posible que abran una puerta desde la sala de estar llena de humo a un dormitorio que hasta ese momento estaba libre de humo. En cuanto se abra la puerta, el humo entrará en el dormitorio, donde podría haber una víctima potencial aún con vida. Al fin y al cabo, en el interior del dormitorio aún queda aire de calidad suficiente. Eso cambiará rápidamente una vez que la puerta se abra y ya no haya una barrera que retenga el humo. Podría darse el caso de que la actuación de los bomberos pusiera en peligro la seguridad de la víctima. Eso sería lo contrario de lo que se pretende con la búsqueda y el rescate.

Cuando un equipo de búsqueda se encuentra abriendo una puerta a una habitación que hasta entonces estaba libre de humo, puede ser una buena idea volver a cerrar inmediatamente esa puerta. Los ocupantes de esa habitación no corren peligro inmediato. Dejar a las víctimas en esa habitación, tal vez con un bombero para informarles y

tranquilizarles, podría ser una opción. Al mismo tiempo, se podría sofocar el incendio y eliminar la mayor parte del humo con ventiladores PPV. De este modo, las víctimas podrían ser evacuadas a través de las habitaciones en las que se haya despejado la mayor parte del humo. Es imperativo que los equipos de búsqueda y rescate se comuniquen claramente con sus oficiales al mando cuando pongan en práctica esta táctica.

Hay que tener en cuenta que no siempre será posible mantener a las víctimas en un compartimento durante un cierto tiempo. A veces se necesita un tiempo antes de poder controlar el incendio. En ese caso, se permitiría que se propagara más humo a las habitaciones vecinas. Incluso cuando hay una puerta resistente al fuego que separa las habitaciones, seguiría habiendo algo de humo que se filtraría. La mayoría de las puertas resistentes al fuego no son completamente estancas al humo. En una ocasión, los bomberos de Bruselas sufrieron un incendio en la planta 12 de un edificio de gran altura. Uno de los apartamentos estaba casi totalmente afectado. Los bomberos se enfrentaron a diversos problemas (suministro de agua defectuoso, una gran carga de combustible en el apartamento con objetos que bloqueaban parcialmente la puerta, etc.). Debido a estos problemas, el servicio de bomberos tardó mucho tiempo en poder sofocar el incendio. Al otro lado del pasillo, en el piso 12, una madre quedó atrapada en su apartamento junto con cuatro niños pequeños. El pasillo estaba completamente lleno de humo negro y espeso. La idea inicial era mantenerlos en su apartamento y que "aguantaran" el fuego. Sin embargo, al cabo de 45 minutos, el humo había penetrado hasta tal punto que hubo que evacuarlos. Para ello se utilizaron máscaras de rescate (véase la figura 4).

Existen diferentes tipos de mascarillas. Algunas funcionan con filtros, otras con un depósito de aire. Cuando se utilizan máscaras con filtro, tiene que quedar suficiente oxígeno en el humo para poder evacuar a las personas con seguridad. Esto no es necesario cuando se utiliza un equipo de respiración con depósito de aire. Si la temperatura del humo es lo suficientemente baja, las personas pueden ser evacuadas incluso a través de humo muy espeso utilizando estas máscaras de rescate.

Figura 4 Una máscara de rescate que puede colocarse en la cabeza de la víctima. Hay que acoplar un regulador o una válvula a demanda pulmonar, preferiblemente con un latiguillo extra largo para que tanto la víctima como el bombero puedan moverse fácilmente uno al lado del otro*. (Foto: Pieter Maes)*

Es posible que un equipo de búsqueda abra una puerta y entre en una habitación con menos humo que en la que se encontraban originalmente, pero suficiente para causar problemas de seguridad a las posibles víctimas que se encuentren dentro. En la extinción de incendios, las cosas rara vez están claras. Los equipos de búsqueda tendrán que evaluar lo mejor que puedan qué táctica van a emplear.

3 Segundo compartimento en llamas: algunas de las curvas posibles

Los bomberos conocen muy bien la curva de temperatura de un incendio en un compartimento ventilado. Es el gráfico de la figura 1. *¿Cómo cambia ese gráfico cuando el fuego se propaga a una segunda habitación?*

La figura 5 ilustra de nuevo el incendio de la figura 1 con una línea roja. Esta línea roja representa el comportamiento del fuego en un dormitorio, por ejemplo. Como la puerta del dormitorio está abierta, el humo fluirá del dormitorio a la habitación vecina (por ejemplo, un salón). En cuanto la capa de humo descienda por debajo de la parte superior de la abertura de la puerta, se formará un flujo. Como se ha descrito anteriormente, el humo caliente irradiará calor sobre todos los objetos que se encuentren debajo. Así, el sofá del salón se calentará.

Tras el flashover en la primera habitación, las llamas del dormitorio saldrán por la puerta hacia el salón. La temperatura en la sala de estar empezará a aumentar considerablemente. Esto hará que la radiación también aumente drásticamente (proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta). Esto provocará un incendio en la sala de estar. Ese segundo incendio se ilustra con la línea azul. Esta línea también tiene una fase de crecimiento y también entra en flashover. Es muy importante que los bomberos se den cuenta de que dos incendios en habitaciones diferentes, pueden estar en etapas diferentes. El incendio del dormitorio puede estar completamente desarrollado (después del flashover) mientras que el incendio del salón puede estar todavía en fase de crecimiento (pre flashover). Un incendio completamente desarrollado en una habitación no significa que no pueda producirse un flashover en otra habitación. En otras palabras, mientras se avanza hacia un incendio completamente desarrollado, puede producirse un flashover en la habitación por la que avanza el equipo de ataque.

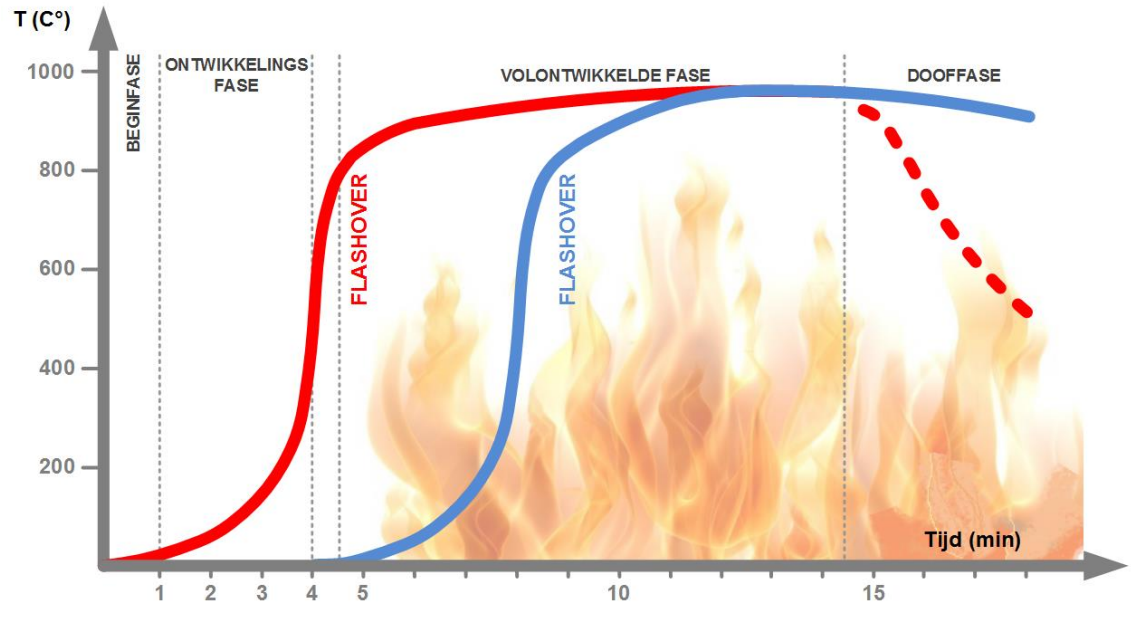

Figura 5 *Evolución del incendio en varias habitaciones. La línea roja representa el desarrollo del incendio en la habitación donde se origina el fuego. Durante la fase de totalmente desarrollado, las llamas salen de la habitación a través de la abertura de una puerta. Las llamas entran en una segunda habitación. El calor radiante de estas llamas creará un fuego secundario (línea azul). Al cabo de unos minutos, ese fuego secundario provocará un flashover. (Dibujo: Bart Noyens& Karel Lambert)*

Al cabo de cierto tiempo, la carga de combustible de la primera sala se agotará. La intensidad del fuego disminuirá. El fuego entrará en la fase de decaimiento. Sin embargo, el fuego de la sala de estar sigue ardiendo ferozmente. Ese fuego se encuentra en la fase de pleno desarrollo. Una vez más, los dos fuegos se comportan de forma diferente (y también tendrán un aspecto diferente).

También podemos observar la curva HRR, que ilustra la potencia o HRR que se acumula durante el incendio. Estas curvas son totalmente diferentes a las de la figura 5. Lo importante es tener en cuenta lo siguiente: no se pueden sumar dos temperaturas, ¡pero sí dos HRR!

La línea naranja de la figura 6 ilustra la HRR del incendio en el dormitorio (línea roja en la figura 5), pasando de la fase incipiente a la fase de crecimiento y luego a la fase de totalmente desarrollado. No se representa la fase de decaimiento. La progresión de la HRR se representa de forma simplificada. Una vez que el incendio alcanza la fase de totalmente desarrollado, la HRR sigue siendo la misma. El incendio se ha convertido en un incendio controlado por ventilación y la HRR viene determinada por la cantidad de aire que se deja entrar en la habitación.

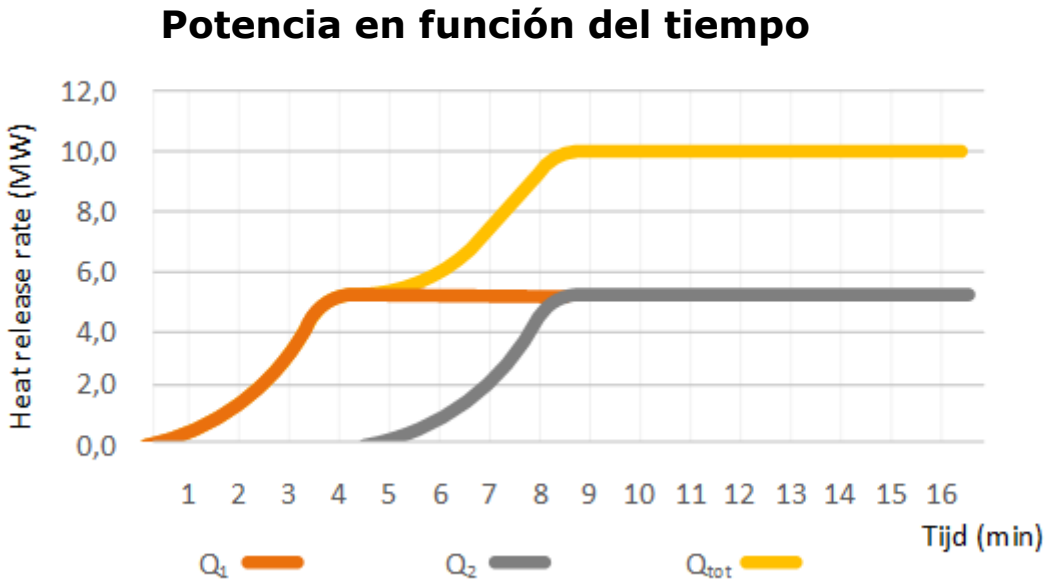

Figura 6 Representación simplificada del aumento de HRR en un incendio que se extiende a una segunda habitación. Pueden sumarse dos HRR diferentes. *(Figura: Bart Noyens& Karel Lambert)*

La línea gris ilustra la HRR en la segunda sala (la línea azul de la figura 5). También en este caso, la HRR sigue siendo la misma después del flashover. El gráfico no es del todo exacto. En realidad, lo más probable es que la inflamación en la sala de estar afecte al incendio en el dormitorio. Una (gran) parte del oxígeno necesario para el incendio del dormitorio será consumido por el incendio del salón. En aras de la simplicidad, esto se ignora en la representación actual.

La línea amarilla representa la HRR total que se está acumulando. La línea amarilla es la suma de las otras dos líneas. Cuando ambos fuegos producen una HRR de 5 MW cada uno, se alcanza una HRR total de 10 MW.

Aunque la temperatura es una magnitud física que resulta familiar a los bomberos, la potencia de extinción que tenemos en nuestras mangueras se presenta como HRR o potencia. Es importante para nuestra propia seguridad que siempre tengamos más potencia de extinción que la HRR del incendio.

4 Observaciones finales

El comportamiento del fuego en una habitación individual es muy conocido por los bomberos. Las reglas que se aplican a un incendio en varias habitaciones son mucho más complicadas. Este artículo intenta presentar las reglas más importantes de forma simplificada. El objetivo no es abarcar todo el tema. Por lo tanto, el lector debe tener en cuenta que se han hecho ciertas simplificaciones y que la realidad es aún más compleja de lo que aquí se presenta.

5 Bibliografía

[1] *Lambert K & Baaij S (2018) Brandverloop: technisch bekeken, tactisch toegepast; 2nd edition, Sdu, Nederland*

[2] *Lambert K (2019) De brandcurve anders bekeken, De BrandweerM/V, mei 2019*

[3] *CFBT-BE (2019) Bijscholinginstructeurs Attack Cell 2019*

[4] *Drysdale D (1999) An introduction to fire dynamics, 2nd edition, John Wiley & sons, England*

[5] *Merci B (2010) Active fire protection II: smoke and heat control, postgraduate studies in fire safety engineering, Universiteit Gent.*

[6] *Merci B (2011) Fire dynamics, postgraduate studies in fire safety engineering, Universiteit Gent.*

[7] *Karlsson B, Quintiere J (2000) Enclosure fire dynamics, CRC press*

[8] *Lambert K (2016) Brandbaarheidsgrenzen, De BrandweerM/V, november 2016*

[9] *Lambert K (2019) Waarom sterven mensen in een brand, De BrandweerM/V, maart 2019*

Karel Lambert