

¿Cómo muere la gente en los incendios?

1 Introducción

Todo bombero sabe que hay personas que mueren en los incendios. Sin embargo, a menudo carecen de una idea de cómo mueren realmente. Un fuego produce humo y calor. Ambos componentes son una posible causa de muerte para los seres humanos y este artículo profundiza en esto, teniendo en cuenta las implicaciones de ese conocimiento para nuestros métodos de operación. ¿El cambio en el comportamiento del fuego influye de alguna manera en estos dos factores? Si es así, ¿cómo y por qué tiene un impacto?

2 Calor

Un fuego produce energía. Esta energía se usa para calentar los alrededores. El factor más importante es la potencia del fuego o la tasa de liberación de calor (HRR). La HRR del fuego generalmente se mide en kW o MW. La HRR nos dice cuánta energía, medida en J, se produce cada segundo.

La HRR del fuego se transfiere principalmente a través de la convección y radiación. Una buena estimación es que el 70% se transfiere de forma convectiva, mientras que la radiación representa el otro 30%.

2.1 Transferencia de calor por convección



Figura1. Sobre la vela se puede sentir la parte convectiva del calor producido por la llama. (Photo: Szymon Kokot-Góra)

La transferencia de calor por convección es responsable de la mayor transferencia de energía producida por el fuego. El calor convectivo se puede demostrar fácilmente mediante el uso de una vela. Mantenga su mano 10 cm por encima de la vela como se muestra en la figura 1. El calor que se siente es el del aire que se eleva (humo). Al colocar la mano en el lateral de la vela, a una distancia similar, se puede sentir la diferencia entre el calor convectivo y el calor radiante.

Primero, el calor convectivo se transfiere del fuego al humo. Cuanto mayor sea la HRR del fuego, más caliente será el humo.

Sin embargo, hay otro factor que también determina qué tan caliente se volverá el humo. La altura de la capa de humo juega un papel en esto. Inicialmente, un incendio sobre el suelo de una habitación de tamaño normal hará que el humo suba durante 2,6 metros antes de tocar el techo. Durante esa ascensión, el aire se mezclará con el humo (ver figura 2). El volumen y masa del humo aumentarán continuamente durante la ascensión. Cuanto más aire frío se mezcle con el humo, menor será la temperatura final de este. Por lo tanto, el humo que llega al techo de un almacén de 5 metros de altura será menos cálido que en una cocina de 2,6 metros. En la siguiente etapa del incendio, se forma una capa de humo. Supongamos que la capa de humo en un departamento típico tiene un metro de espesor, implicando que el humo que sale del suelo solo se elevará un metro y medio. Esto significa que se mezcla menos aire y el humo estará más caliente. Aparte de eso, el fuego a menudo habrá aumentado su tasa de liberación de calor en comparación con la etapa incipiente. Por lo tanto, se agrega más calor y, al mismo tiempo, se mezcla menos aire frío. Esto genera un humo más caliente que al comienzo del incendio.

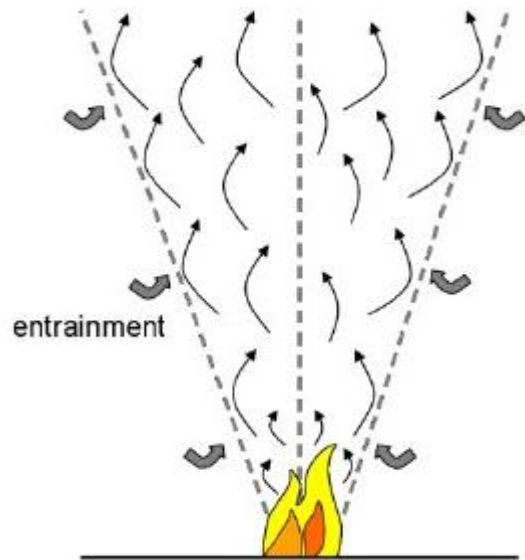


Figura2 Mientras el humo aumenta, más y más aire es mezclado con este. Esto se llama arrastre. (Figure: Edward Johnson)

La capa de humo caliente ahora se ha convertido en una fuente de calor y transferirá calor a otros objetos como las paredes y el techo, que están más fríos que el humo. Habrá una transferencia de calor por convección del humo a los límites del compartimento. Mientras sale humo de este, se enfriará parcialmente y las paredes y el techo se calentarán al mismo tiempo. A medida que las paredes y el techo continúan calentándose, absorberán cada vez menos calor de la capa de humo. La transferencia de calor por convección es de hecho proporcional a la diferencia de temperatura (ΔT) entre la capa de humo y las paredes y el techo. Los límites del compartimento a su vez transferirán calor a través de la radiación y la conducción.

Es posible calcular la transferencia de calor por convección:

$$\dot{Q} = h \times A \times \Delta T \quad [kW]$$

Cuando el humo que fluye a través de un edificio se encuentra con una abertura, este saldrá. Este humo constituye un volumen, una masa de humo que sale del edificio por lo que equivale a una cantidad significativa de energía que se pierde.

Cuando la capa de humo cae aproximadamente a medio metro del piso, los bomberos que participan en un ataque interior estarán parcialmente en la capa de humo. La parte de su cuerpo que está dentro del humo absorberá calor. De hecho, el área de superficie del cuerpo del bombero (A) que está en la capa de humo, actúa de la misma manera que

las paredes del edificio que rodea al humo. La capa de humo transferirá calor al equipo de protección de los bomberos. La cantidad de calor que se transfiere dependerá de la diferencia de temperatura entre el traje de intervención y el humo. El calor luego se transferirá del equipo al cuerpo del bombero por conducción.

Si la capa de humo cae al suelo, cualquier víctima que se encuentre allí sentirá inmediatamente los efectos de la transferencia de calor en su cuerpo. La ropa que lleva puesta ofrece poca o ninguna protección. Lo mismo ocurre con cualquier víctima que esté parada en una ventana, en el flujo del humo que sale. También recibirán calor del humo. Un problema adicional aquí es que la transferencia de calor por convección depende de la velocidad del humo de salida incluido en el coeficiente de transferencia de calor por convección h . El coeficiente de transferencia de calor por convección está determinado por varios factores diferentes, uno de los cuales es la velocidad. Cuanto más rápido fluya el humo, más calor transferirá.

Finalmente, la capa de humo, al salir, transferirá mucho calor a través de la radiación. La capa de humo irradiará calor sobre los objetos ubicados debajo de ella.

2.2 Radiación

La radiación es una forma de transferencia de calor que es bien conocida por todos. Piensa en la sensación del sol brillando en tu cara en un cálido día de verano. Todos pueden sentir el efecto del calor radiante. En una fogata o chimenea, esto se vuelve aún más claro. Todos también saben que el calor radiante aumenta a medida que la distancia a la fuente de calor se reduce.

En el terreno del incendio, el foco del incendio será la fuente principal de calor radiante. El foco del fuego y las llamas encima irradiarán calor. El calor radiante se mueve en línea recta y todo lo que esté a la vista del fuego (y de las llamas) se calentará.

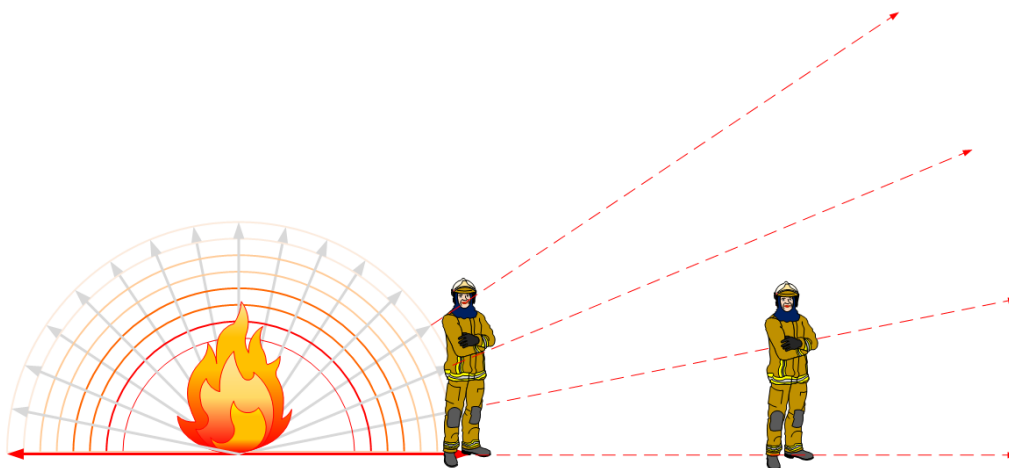


Figura3 Ambos bomberos en la ilustración son del mismo tamaño, incluso si esto parece no ser así. El bombero más cercano a las llamas absorberá mucho más calor radiante. Esto se ilustra por la cantidad de flechas que golpean su cuerpo. Cuanto más lejos de la fuente de calor, menos calor radiante (flechas). (Drawing: Bart Noyens based on an idea of James Mendoza of San Jose Fire Department)

La capa de humo caliente también irradiará calor sobre los objetos en su "línea de visión". Estos son los objetos ubicados debajo de esta. Eso significa que cerca del fuego, un sofá se calentará desde dos lados. Obviamente, el foco del fuego también emite calor radiante. La cantidad de calor que proviene de aquí suele ser bastante grande, sin embargo, la distancia al sofá podría ser de cinco metros, por ejemplo. La capa de humo será menos cálida que el foco del fuego o las llamas sobre él. Sin embargo, el calor radiante transferido desde la capa de humo al sofá puede ser mucho mayor debido a la menor distancia entre los dos. Por ejemplo, la capa de humo podría estar tan cerca como medio metro del sofá.

La distancia entre la fuente de calor y el objeto receptor es un parámetro importante en la transferencia de calor radiante. El calor radiante (cuantificado en kW/m²) es inversamente proporcional a la distancia al cuadrado. Esto significa que el calor radiante transferido se vuelve cuatro veces menor a medida que la distancia a la fuente de calor se duplica. La proporción de calor radiante recibido en relación con el calor radiante que se emite se denomina factor de *vista*. El símbolo que define el factor de vista es Φ . La figura 3 muestra claramente que el bombero que está más cerca de la fuente de calor está recibiendo una mayor cantidad de calor radiante que el que está más lejos.

Un segundo parámetro importante es la temperatura de la fuente de calor. Para la transferencia de calor por convección, la cantidad de calor transferido está determinada por la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el receptor. Para la transferencia de calor radiante, las cosas son más complicadas. La fuente de calor emitirá calor. La cantidad de calor que se emite es directamente proporcional a la temperatura en grados Kelvin a la cuarta potencia. Esto es algo más difícil de comprender. En términos generales, la cantidad de calor radiante se vuelve 16 veces mayor cuando la temperatura en Kelvin se duplica. La temperatura en Kelvin es 273 más alta que cuando se indica en grados Celsius. Una temperatura de 400 Kelvin equivale a 127 ° C. Una temperatura de 800 Kelvin coincide con 527 ° C. Cuando la temperatura de una capa de humo aumenta de 127 ° C a 527 ° C, el calor radiante proveniente de esa capa de humo habrá aumentado 16 veces.

Cada objeto emitirá calor radiante. El sofá que se está calentando también emitirá calor. Cuando el sofá ha alcanzado una temperatura de 77 °C (350 K), también emitirá algo de calor. Sin embargo, está claro que el calor que irradia del sofá es insignificante en comparación con el que proviene de la capa de humo.

Es posible calcular la transferencia de calor radiante:

$$\dot{Q} = \sigma \times \epsilon \times \Phi \times T^4 \quad [kW/m^2]$$

El calor radiante también puede ser emitido a las víctimas. Las víctimas que yacen en el suelo o de pie en un balcón pueden recibir calor radiante proveniente tanto de la capa de humo como de las llamas. En la práctica, a menudo encontramos víctimas que han huido a un balcón. Ya no se ven afectados por el humo, pero el calor radiante seguirá causando lesiones por quemaduras (graves). Una víctima parada en un balcón, junto a las llamas que salen de una gran puerta corredera de vidrio, se quemará. Esto en sí mismo es un



argumento para el uso del ataque transicional. Al extinguir las llamas, la temperatura de los gases que salen disminuirá significativamente. El calor radiante será rápidamente 16 veces menor. Esto significa que la víctima puede permanecer en ese balcón durante un período que es 16 veces más largo, antes de acumular la misma cantidad de calor radiante. Sin embargo, es importante usar la cantidad correcta de agua durante esta táctica. Las primeras docenas de litros que entran en el compartimento en llamas se evaporarán y extraerán una enorme cantidad de energía de estas. Estas llamas son en realidad gases súper calientes. Cuando se extrae energía de estos gases, se encogerán considerablemente. El volumen de reducción de gases a su vez permite la expansión del vapor proveniente del agua que se está evaporando. Después de eso, si se vierte más agua en la habitación, se evaporará principalmente en las paredes y el techo. Esta vez, no habrá volumen que se reduzca, sino que solo se formará una cantidad adicional de vapor. Este exceso de vapor se extenderá por todas partes y puede dificultar severamente a los bomberos e incluso dañar a las víctimas. Por lo tanto, es muy importante cerrar la lanza inmediatamente después de la extinción.

3 Humo

La producción de humo depende del tipo de fuego. Al observar los incendios desde el punto de vista de la "producción de humo", podemos discernir tres tipos de incendios: incendios latentes, incendios ventilados e incendios con poca ventilación. Un fuego latente se define como un proceso de combustión lenta con bajas temperaturas y sin llamas. Los incendios latentes y los incendios con poca ventilación generalmente producen grandes cantidades de gases (10 veces más que los incendios con ventilación). La producción de humo es mucho menor en incendios ventilados. Cuando se trata de incendios latentes, depende mucho del tamaño del incendio y de cómo progresa. Por ejemplo, un cigarrillo podría caerse en algún lugar, iniciar un fuego latente, pero ese fuego no podrá crecer. Mientras la superficie del fuego latente siga siendo pequeña, la producción de gases seguirá siendo baja también.

El humo es una mezcla de gases, partículas sólidas (hollín) y partículas líquidas en suspensión. También se producen diferentes gases. El CO_2 y el CO son dos gases importantes en el humo junto con los gases de pirólisis. Cuando el nitrógeno está presente en el combustible del fuego, también se forman sustancias como el HCN . Finalmente, a menudo quedará algo de oxígeno en el humo. El nivel de oxígeno obviamente será mucho menor que el 21% normal que está presente en el aire. El humo se elevará en forma de penacho hacia el techo donde formará una capa de humo. La composición de la capa de humo no es fija. Está cambiando constantemente. Dentro de la capa de humo, habrá cierta combustión localizada en determinadas partes. Esto depende de la temperatura y el oxígeno disponible. El nivel de CO en la capa de humo es directamente proporcional a la temperatura en incendios controlados por combustible y es inversamente proporcional a la temperatura en incendios controlados por ventilación. Los niveles de los diferentes gases en la capa de humo cambian constantemente. Es un fenómeno muy complejo.



4 Efectos sobre el cuerpo humano

4.1 Efecto del calor

Cuando nuestra piel se calienta, primero sentimos una sensación agradable. Nuevamente piense en el sol irradiando su calor sobre nuestra piel. Pero todos saben lo que es una quemadura solar. Cada uno de nosotros hemos tenido quemaduras de primer grado debido a permanecer demasiado tiempo al sol. Esa sensación agradable puede provocar lesiones por quemaduras debido a la exposición prolongada. El calor radiante que proviene del sol en un cálido día de verano es de aproximadamente 1 kW/m^2 . La exposición prolongada a este nivel de radiación puede provocar quemaduras de primer grado.

La temperatura de la piel podría calentarse aún más. Esto se puede hacer mediante transferencia de calor por convección o radiación, como se explicó anteriormente. El umbral del dolor humano es aproximadamente a los $43 \text{ }^\circ\text{C}$. Cuando la piel se calienta más allá de este punto, se sentirá dolor. Cuanto mayor sea la temperatura y mayor sea el área de superficie que se está quemando, más dolor causará. Este dolor puede incluso hacer que las personas salten por las ventanas, incluso cuando es seguro que no sobrevivirán a la caída.

Las quemaduras de primer grado, con el típico enrojecimiento de la piel, ocurrirán cuando la temperatura de la piel alcance los $48 \text{ }^\circ\text{C}$. A una temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$, comenzarán a formarse quemaduras de segundo grado. Este tipo de quemaduras se caracterizan por las ampollas. A temperaturas más altas, se producirán quemaduras de tercer grado lo que implica que la piel en el lugar de la quemadura está completamente destruida.

Por supuesto, hay una diferencia de temperatura sustancial entre la piel de alguien y la del humo. Debido a la transferencia de calor (ya sea radiante y/o convectiva), la piel se calentará.

Los bomberos a menudo se enfrentan a la transferencia de calor tanto convectivo como radiante ya que trabajan dentro de un humo a una temperatura determinada y al mismo tiempo están expuestos a una cierta cantidad de calor radiante (medido en kW/m^2). La organización estadounidense NIST ha formulado un gráfico que indica el efecto de ambas formas de transferencia de calor. El gráfico también tiene en cuenta el efecto protector del equipo de intervención.

El gráfico de NIST es, por supuesto, un modelo simplificado de la realidad. Aún así, ofrece una buena estimación inicial de cuánto tiempo es seguro para los bomberos operar en ciertas condiciones antes de sufrir lesiones por quemaduras.



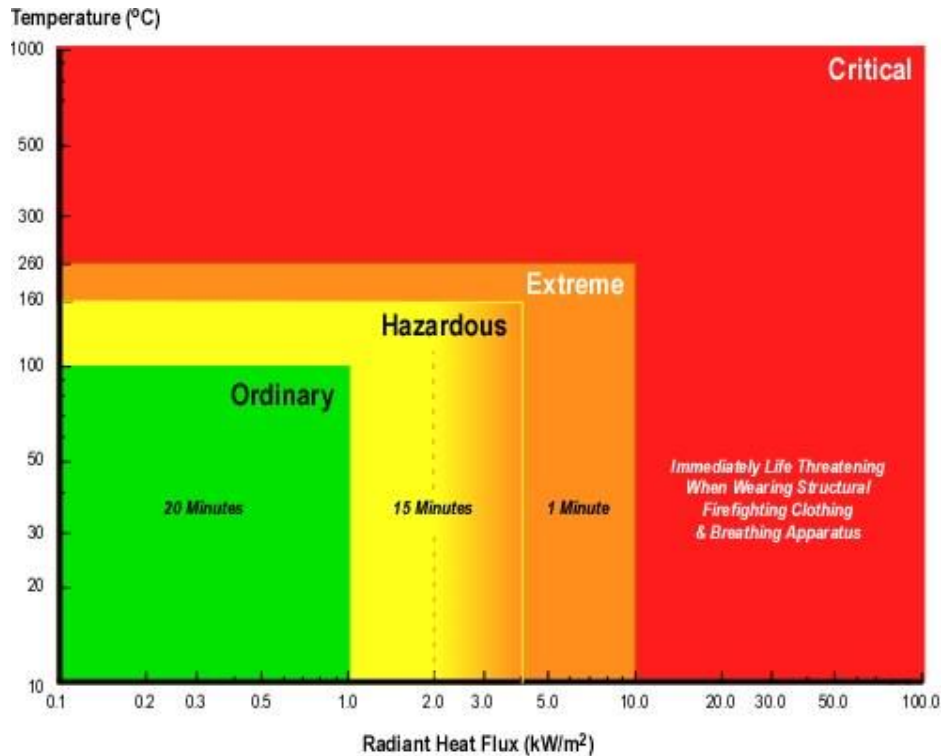


Figura4 Límite de exposición térmica en relación con el flujo de calor radiante y la temperatura ambiente.
(Graph: NIST)

4.2 Efecto del humo

El humo está, literalmente, compuesto de cientos de sustancias diferentes. Aún así, el efecto del humo en el cuerpo humano puede ilustrarse al observar ciertos gases claves y la interacción entre estos.

El humo causa una gran variedad de problemas a los seres humanos:

- El humo en parte se compone de sustancias irritantes.
- En parte se compone de sustancias asfixiantes (CO, CO², HCN, ...)
- El humo ha reducido los niveles de oxígeno.

Los gases irritantes en el humo afectarán negativamente los ojos y los pulmones. A altas concentraciones, causarán un dolor genuino. Además de eso, el humo no permite que la luz lo atraviese por lo que no se puede ver muy bien a través de él. Cuanto más espeso es el humo, menos se puede ver. Todas estas características hacen que sea muy difícil para las personas caminar a través del humo. La salud física de una posible víctima del incendio también juega un papel importante. Las personas mayores y los niños pequeños sucumbirán más rápidamente a los efectos de los irritantes químicos que los adultos en buena forma. No hace falta decir que las personas con enfermedad reactiva de las vías respiratorias experimentarán problemas físicos mucho más rápido cuando se expongan que una persona con salud normal.

Las personas que han estado expuestas a gases irritantes pueden desarrollar numerosos problemas de salud incluso después de que la exposición haya terminado. Después de

haberlos sacado del humo, todavía no están completamente fuera del peligro. Durante las primeras 24 horas después de la exposición, puede ocurrir una inflamación de los pulmones que puede ser fatal. Cuando tales inflamaciones se tratan o previenen adecuadamente, la mayoría de las víctimas muestran una recuperación completa en 3 meses. Solo cuando una víctima, de un incendio en una casa, abandona el hospital, podemos realmente decir que salvamos una vida. A menudo, son los esfuerzos combinados del servicio de bomberos, lo que "salva" la vida de las víctimas de incendios domésticos, y los servicios médicos los que aseguran que se mantengan con vida.

El humo también se compone en parte de CO. En un incendio, los niveles de CO a menudo alcanzan 5.000 a 10.000 ppm. Estas son concentraciones muy altas. El CO se adhiere a la hemoglobina en el torrente sanguíneo. La hemoglobina es la proteína en los glóbulos rojos que transporta el oxígeno. La hemoglobina puede verse como un conjunto de camiones que transportan oxígeno desde los pulmones hacia el resto del cuerpo. Cuando uno de esos camiones se carga con CO, ya no puede transportar oxígeno. Si muchos de estos camiones transportan CO, entonces el suministro de oxígeno fresco se reduce considerablemente. La cantidad de CO se cuantifica en %COHb. Altos niveles de CO en el torrente sanguíneo son la principal causa de muerte de las personas atrapadas en incendios domésticos. Para los seres humanos, se aplica la regla de Haber. Haber afirma que el envenenamiento por CO depende tanto del tiempo de exposición como del nivel de CO en la atmósfera. Esto significa que una exposición de cinco minutos a una concentración de 1.000 ppm tiene los mismos efectos que la exposición a 500 ppm durante diez minutos.

El humo a menudo también contiene cianuro de hidrógeno. Concentraciones de 1,000 ppm son posibles en escenarios de incendio. El HCN también es un gas tóxico, y es hasta 25 veces más venenoso que el CO. El efecto del HCN debe agregarse además de los efectos del CO. El HCN en el humo hará que las víctimas pierdan la conciencia aún más rápido de lo que sería el caso sin HCN. Esto acorta aún más el tiempo que las víctimas tienen para escapar. Finalmente, vale la pena señalar que la regla de Haber no se aplica al HCN. Las personas no sobrevivirán por mucho tiempo en niveles de HCN de 200 ppm o superiores.

El humo también tiene altas concentraciones de CO₂. Este gas hace que el cuerpo humano hiperventile. El objetivo natural de nuestros cuerpos es sacar el CO₂ del torrente sanguíneo. Sin embargo, la hiperventilación hace que los otros gases tóxicos se inhalen aún más rápido.

La concentración de oxígeno dentro del humo se ha reducido. A veces, apenas queda oxígeno del 21% original. Los niveles bajos de oxígeno son muy peligrosos. Durante el incendio de una casa, el nivel de oxígeno a nivel del suelo permitiría la supervivencia de las víctimas. Dentro de la capa de humo, se han medido concentraciones del 1%. A eso se añade la alta temperatura de la capa de humo. Las personas que respiran ese tipo de humo, a menudo tienen pocas posibilidades de salir con vida. Se han reportado casos en los que las personas abren una puerta a un compartimiento incendiado y de repente se encuentran con un humo pesado saliendo de él. Incluso después de una sola respiración dentro del humo, sucumben y caen inconscientemente al piso.

El humo contiene otros gases, como el NO_x, pero estos generalmente son de menor importancia.



En términos generales, el humo produce tres efectos en el cuerpo humano:

1. Los gases irritantes dificultan severamente la evacuación. Los ojos se vuelven llorosos y las vías respiratorias comienzan a doler. Esto incluso puede hacer que las víctimas colapsen.
2. Los niveles de gases a los que están expuestas las víctimas pueden hacer que se desorienten, pierdan el conocimiento o incluso mueran. El CO y el HCN son los gases más importantes a este respecto.
3. Los altos niveles de gases irritantes pueden incluso provocar la muerte de una víctima después de ser rescatada del fuego al causar inflamación de los pulmones y edema pulmonar.

El 75% de las víctimas que mueren por inhalación de humo se encuentran en habitaciones que no son donde se originó el incendio. Entonces, las víctimas mueren principalmente debido a los efectos del humo. El profesor David Purser desarrolló un modelo para calcular los efectos del humo. Presenta una aproximación de la dosis que absorbe una persona denominada *fractional effective dose (FED)*. Con él, afirma que medio segundo en un entorno de 1000 ppm de CO no es tan malo como 10 minutos en un entorno de 100 ppm. Tan pronto como el FED se eleva por encima de un valor establecido, las víctimas pierden el conocimiento. Cuando la FED aumenta aún más, mueren.

5 ¿Primero salvar a las víctimas, luego extinguir el fuego?

Los diferentes párrafos anteriores explican cómo las víctimas se ven comprometidas por los efectos del humo. La forma más rápida de aumentar sus probabilidades de supervivencia es sacar a las víctimas del humo. Para lograr eso, primero hay que encontrar a las víctimas. Esto suele ser muy difícil, especialmente en compartimentos muy grandes.

Una segunda forma de mejorar las probabilidades de supervivencia de las víctimas es eliminar el humo. Para lograr este objetivo, el servicio de bomberos tiene que ventilar. Al diluir el humo con aire fresco, la concentración de gases irritantes y tóxicos disminuirá mientras que la concentración de oxígeno aumentará. Sin embargo, ese oxígeno adicional podría tener consecuencias drásticas para el fuego, especialmente cuando aún no se ha apagado.

Por lo tanto, la ventilación puede convertirse en una táctica peligrosa en el campo de los incendios modernos. Solo cuando se trata de incendios (pequeños) latentes, se puede hacer con relativa seguridad. Para otros incendios (ventilados y poco ventilados) es importante que antes de la ventilación, se inicie la extinción. A menudo es difícil garantizar que el esfuerzo de extinción sea exitoso. A menudo, al comienzo del ataque al fuego, la ubicación exacta de este no está (completamente) clara. Entonces es imposible ventilar sin primero hacer algo con respecto al fuego. De lo contrario, es posible que el fuego crezca de tal manera que las víctimas perezcan debido a los efectos del calor.



Para salvar vidas humanas, se debe eliminar el humo. La ventilación es la solución a ese problema. Pero para poder ventilar sin que el fuego crezca significativamente debido al oxígeno añadido, primero se debe apagar el fuego. Así es como podemos salvar vidas. Debido a las condiciones cambiantes del fuego (a diferencia de hace 50 años) ya no podemos salvar antes de extinguir. El fuego debe apagarse primero para que podamos ventilar y salvar vidas (o salvar vidas y ventilar).

Primero, ¡apaga el fuego!

6 Bibliografía

- [1] *Merci B (2010) Active fire protection: Smoke and heat control, course of the Post graduate Studies in Fire Safety Engineering, UGent*
- [2] *Gottuk D, Lattimer B (2016) Effect of combustion conditions on species production, in SFPE Handbook of fire protection engineering*
- [3] *Purser D (2016) Combustion toxicity, in SFPE Handbook of fire protection engineering*
- [4] *Galea E (2011) Human behavior in fire, course of the Postgraduate Studies in Fire Safety Engineering, UGent*
- [5] *Lambert K, Baaij S (2018) Brandverloop: Technisch bekeken, tactisch toegepast, 2^{de} editie*

