



**Bombero I**

**Contenido del capítulo**

<b>Ciencia del fuego</b> .....	<b>117</b>	Etapa de decaimiento.....	159
Terminología de ciencias físicas.....	118	<b>Desarrollo del fuego en estructuras</b> .....	<b>161</b>
Triángulo y tetraedro del fuego .....	120	Trayectoria de flujo .....	161
Ignición.....	120	Ventilación y consideraciones de viento .....	163
Combustión .....	122	Explosiones de humo.....	165
Diferencias de presión .....	126	Efectos de las operaciones de lucha contra incendios.....	165
<b>Energía térmica (calor)</b> .....	<b>127</b>	<b>Reacción del tipo de construcción de la edificación al fuego</b> .....	<b>165</b>
Diferencias entre tasa de liberación de calor y temperatura.....	127	Tipo de construcción y lapso de la integridad estructural .....	165
Fuentes de energía térmica .....	128	Carga de combustible de los elementos estructurales y contenidos.....	167
Transferencia de calor.....	131	Compartimentación de edificaciones .....	170
<b>Combustible</b> .....	<b>135</b>	Efectos de las características de construcción de las edificaciones .....	171
Gases.....	137	Peligros en la construcción, renovación y demolición .....	175
Líquidos.....	138	<b>Revisión del capítulo</b> .....	<b>176</b>
Sólidos.....	139	<b>Preguntas de discusión</b> .....	<b>177</b>
<b>Oxígeno</b> .....	<b>140</b>	<b>Notas finales del capítulo 4</b> .....	<b>177</b>
<b>Reacción química autosostenida</b> .....	<b>144</b>	<b>Términos clave</b> .....	<b>177</b>
<b>Desarrollo del fuego en un compartimento</b> .....	<b>144</b>		
Etapas de desarrollo del fuego.....	146		
Etapa incipiente.....	146		
Etapa de crecimiento.....	148		
Etapa de desarrollo pleno o totalmente desarrollado .....	157		

**Requisitos de desempeño del trabajo (RDT)  
abordados en este capítulo**

Este capítulo provee información sobre los requisitos de desempeño del trabajo estipulados en NFPA 1001, *Estándar para calificaciones profesionales de bomberos*, edición 2019.

- 4.3.10
- 4.3.11
- 4.3.12

## Objetivos de aprendizaje

1. Explicar los principios básicos de la ciencia del fuego. [4.3.11]
2. Describir cómo la energía térmica afecta el comportamiento del fuego. [4.3.11, 4.3.12]
3. Explicar la función del combustible dentro del proceso de combustión. [4.3.10, 4.3.11]
4. Explicar la función del oxígeno dentro del proceso de combustión. [4.3.11]
5. Explicar la reacción química autosostenida involucrada en la combustión con llamas. [4.3.11]
6. Diferenciar las etapas de desarrollo del fuego. [4.3.11, 4.3.12]
7. Explicar cómo las operaciones de extinción de incendios pueden influir en el comportamiento del fuego en una estructura. [4.3.11]
8. Describir cómo la construcción y el diseño de una edificación afectan el desarrollo del fuego. [4.3.10, 4.3.11]

# Capítulo 4 Dinámica del fuego



La dinámica del fuego describe el punto de encuentro entre la ciencia del fuego, la ciencia de los materiales, la dinámica de fluidos de los gases y la transferencia de calor. Comprender la física básica de estas ciencias puede dar a los bomberos el conocimiento necesario para prever el crecimiento del fuego en una escena y predecir las posibles consecuencias de varias opciones tácticas disponibles para controlar un incendio. Todo lo siguiente proporciona a los bomberos partes del panorama total sobre el probable comportamiento del fuego durante las operaciones en el lugar del incendio:

- Ciencia del fuego
- Proceso de combustión
- Comportamiento del fuego y su relación con diversos materiales y ambientes.
- Clasificaciones de fuegos y sus correspondientes agentes extintores.
- Reconocimiento de indicadores de comportamiento del fuego, patrones de desarrollo del fuego y el potencial de desarrollo rápido del fuego.
- Varias tácticas de supresión y ventilación utilizadas como herramientas para controlar incendios.

## Ciencia del fuego

Los bomberos deberían tener un conocimiento científico de **la combustión, el fuego, el calor y la temperatura**. El fuego puede tomar varias formas, pero todos los fuegos implican una reacción química que produce calor entre algún tipo de **combustible** y un **oxidante**, más comúnmente el oxígeno en el aire. Los oxidantes no son combustibles, pero apoyarán o mejorarán la combustión. La **Tabla 4.1** enumera algunos oxidantes comunes.

Tabla 4.1  
Oxidantes comunes

Sustancia	Uso común
Hipoclorito de calcio (sólido granular)	Cloración de agua en piscinas
Cloro (gas)	Purificación de agua
Nitrato de amonio (sólido granular)	Fertilizante
Peróxido de hidrógeno (líquido)	Blanqueo industrial (pulpa, papel y fabricación de productos químicos)
Peróxido de metil etil cetona	Catalizador en la fabricación de plásticos

*Cortesía de Ed Hartin*



**Imagen 4.1** Las condiciones en la escena de un incendio ofrecen indicaciones del comportamiento presente y del potencial comportamiento en el futuro del fuego. *Cortesía de UL FSRI.*

## Terminología de ciencias físicas

La ciencia física es el estudio de la **materia** y la **energía** e incluye la química y la física. Este fundamento teórico debe ser traducido en un conocimiento práctico de la dinámica del fuego. Para mantenerse seguro, usted necesita poder identificar la dinámica del fuego presente en una situación determinada y anticipar cuáles serán las próximas etapas, junto con la forma en que las operaciones de extinción de incendios pueden afectar el comportamiento del fuego (**Imagen 4.1**).

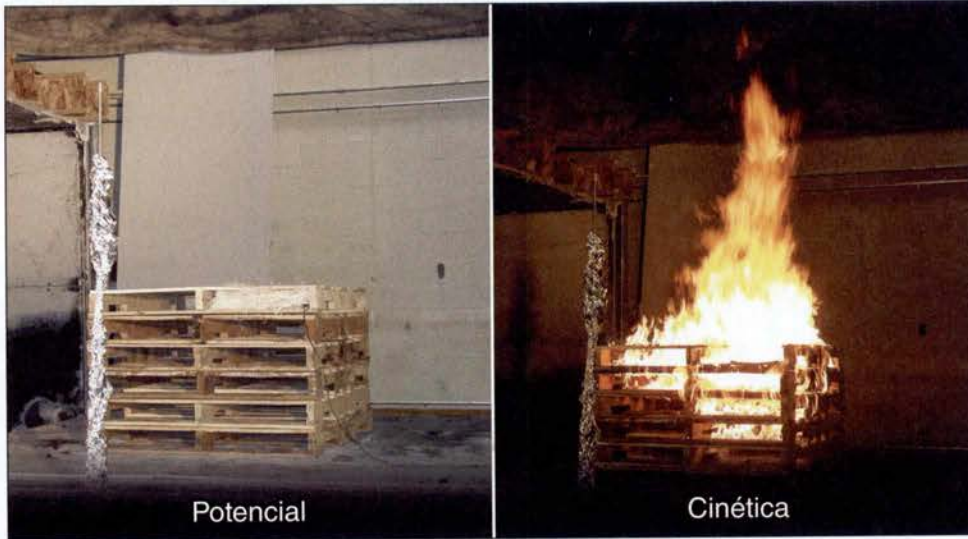
El mundo alrededor de usted está hecho de materia en forma de elementos físicos que ocupan espacio y tienen masa. La materia puede someterse a muchos tipos de cambios físicos y químicos, y este capítulo se concentrará en los cambios relacionados con el fuego.

Un cambio físico ocurre cuando una sustancia permanece químicamente igual, pero cambia de tamaño, forma o apariencia. Ejemplos de cambios físicos son la congelación del agua (líquido a sólido) y la ebullición (líquido a gas).

Una reacción química ocurre cuando una sustancia cambia de un tipo de materia a otra, como cuando dos o más elementos se combinan para formar compuestos. La **oxidación** es una reacción química que implica la combinación de un oxidante, como el oxígeno en el aire, con otros materiales. Esta reacción puede ser lenta, como la combinación de oxígeno con hierro para formar óxido, o rápida, como en la combustión de metano (gas natural) (**Imagen 4.2**).

**Imagen 4.2** La cronología de la oxidación ilustra las diferencias de velocidad entre cada tipo.





**Imagen 4.3** La energía potencial es energía almacenada, mientras que la energía cinética se libera activamente. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*

La energía es la capacidad de realizar un trabajo. El trabajo ocurre cuando una fuerza es aplicada a un objeto a distancia o cuando una sustancia sufre un cambio químico, biológico o físico. En el caso del calor, el trabajo significa incrementar la temperatura de una sustancia.

Las formas de energía se clasifican como potencial o cinética (**Imagen 4.3**). La **energía potencial** representa la cantidad de energía que un objeto puede liberar en algún momento en el futuro. Los combustibles tienen una cierta cantidad de energía potencial antes de que ellos se enciendan, basada en su composición química. Esta energía potencial disponible para su liberación en el proceso de combustión es conocida como **calor de combustión**. La velocidad a la cual un combustible libera energía a lo largo del tiempo depende de muchas variables, como:

- Composición química
- Disposición
- Densidad del combustible
- Disponibilidad de oxígeno para la combustión

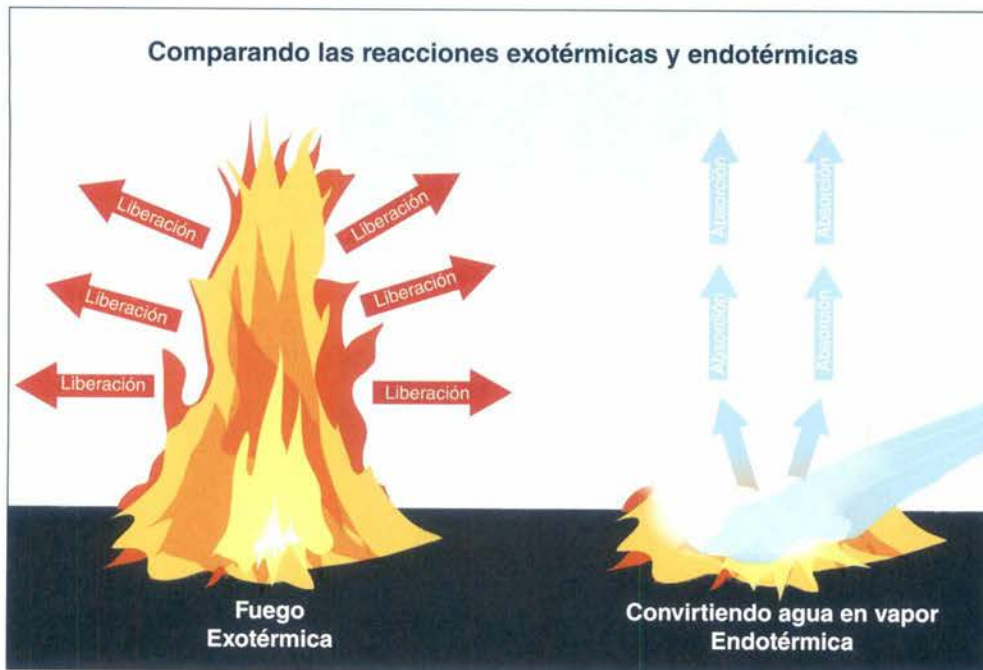
La **energía cinética** es la que posee un objeto en movimiento. Si bien un combustible, como la madera, no se «mueve» en el estricto sentido de la palabra, cuando el calor es introducido las moléculas dentro del combustible comienzan a vibrar. A medida que aumenta el calor (**energía térmica**), estas moléculas vibran más y más rápidamente. La energía cinética del combustible es el resultado de estas vibraciones en las moléculas.

Hay muchos tipos de energía, incluidas:

- Química
- Térmica
- Mecánica
- Eléctrica
- Luminosa
- Nuclear
- Sonora

Toda la energía puede cambiar de un tipo a otro. Por ejemplo, la energía mecánica de una máquina puede convertirse en energía térmica cuando la fricción entre las partes móviles genera calor. En términos de comportamiento del fuego, la energía química potencial de un combustible se convierte en calor y luz durante la combustión.

En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la energía es medida en **joules/julios (J)**. La cantidad de calor requerida para cambiar la temperatura de 1 gramo de agua por 1 grado Celsius es 4,2 julios. En el sistema tradicional, la unidad de medida del calor es la unidad térmica británica (Btu), que es la cantidad de calor requerida para elevar la



**Imagen 4.4** Las reacciones exotérmicas liberan energía mientras que las reacciones endotérmicas la absorben.

temperatura de 1 libra de agua en 1 grado Fahrenheit. Si bien no se utiliza en textos científicos y de ingeniería, el Btu todavía se emplea con frecuencia en el servicio de bomberos. Cuando se compara julios y Btu,  $1055 \text{ J} = 1 \text{ Btu}$ .

Los cambios físicos y químicos casi siempre involucran un intercambio de energía. La energía potencial de un combustible liberada durante la combustión es convertida en energía cinética. Las reacciones que emiten energía a medida que ocurren son **reacciones exotérmicas**. El fuego es una reacción química exotérmica que libera energía en forma de calor y, a veces, de luz.

Las reacciones que absorben energía a medida que ocurren son **reacciones endotérmicas** (Imagen 4.4). Por ejemplo, convertir el agua de su fase líquida a gas (vapor) requiere la entrada de energía que resulta en una reacción endotérmica. Convertir el agua en vapor es una táctica para controlar y extinguir algunos tipos de incendios.

## Triángulo y tetraedro del fuego

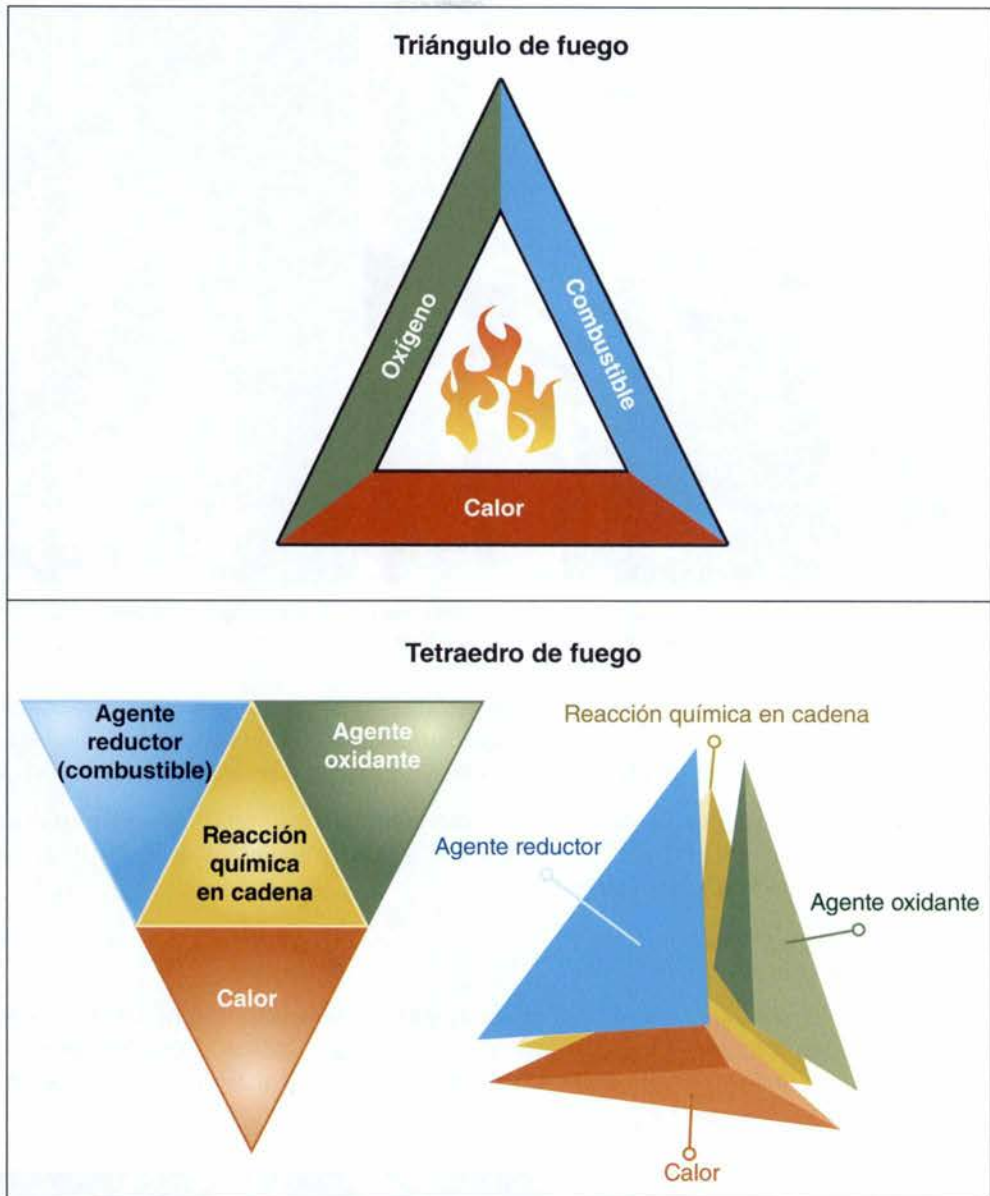
Los modelos del **triángulo del fuego** y el **tetraedro del fuego** son utilizados para explicar los elementos del fuego y cómo los incendios pueden ser extinguidos (Imagen 4.5). El modelo más simple y antiguo, el triángulo del fuego, muestra tres elementos necesarios para que ocurra la combustión: combustible, oxígeno y calor. Remueva cualquiera de estos elementos y el fuego se extinguirá. El triángulo del fuego fue usado antes de la adaptación del tetraedro del fuego, el cual incluye una reacción química en cadena.

Una reacción química en cadena no inhibida también debe estar presente para que ocurra un fuego. El modelo de tetraedro del fuego incluye la reacción química en cadena para explicar la combustión en fase gaseosa y con llamas (el fuego es un ejemplo de combustión en fase gaseosa).

## Ignición

Los combustibles deben estar en estado gaseoso para quemarse; por lo tanto, los sólidos y los líquidos deben volverse gaseosos para que ocurra la ignición. Cuando el calor es transferido a un líquido o sólido, la temperatura de la sustancia aumenta y comienza a transformarse en un estado gaseoso (liberación de gases). En los sólidos, la liberación de gases es un cambio químico conocido como **pirólisis**; en líquidos, es un cambio físico llamado **vaporización** (Imagen 4.6).

La **ignición pilotada** (dirigida) es la forma más común de ignición y ocurre cuando una mezcla de combustible y oxígeno encuentra una fuente de calor externa con suficiente energía térmica para iniciar la reacción de combustión. Contrario a la **autoignición** que ocurre sin chispa o llama externa que enciende los vapores o gases combustibles; la superficie del combustible es calentada hasta el punto en que ocurre la reacción de combustión (Imagen 4.7).



**Imagen 4.5** El triángulo del fuego ilustra los tres componentes necesarios para un fuego, mientras que el tetraedro del fuego muestra los cuatro componentes necesarios para que un fuego sea autosostenible.



**Imagen 4.6** La pirólisis ocurre cuando un combustible sólido se convierte en gaseoso. La vaporización es la conversión de un líquido en vapor mediante energía térmica. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST*



**Imagen 4.7** La ignición pilotada (dirigida) implica la introducción de una fuente de ignición externa, mientras que la autoignición ocurre bajo condiciones especiales sin el calor de una chispa u otra fuente.

Una vez que el combustible es encendido, la energía liberada por la combustión se transfiere al combustible sólido remanente, lo que resulta en la producción e ignición de gases o vapores combustibles adicionales. Este intercambio de energía desde los gases de combustión al combustible da como resultado una reacción de combustión sostenida.

**Temperatura de autoignición** es la temperatura mínima a la cual un combustible en el aire debe ser calentado para comenzar una combustión autosostenida. La temperatura de autoignición de una sustancia es siempre más alta que su temperatura de ignición pilotada (dirigida).

## Combustión

El fuego y la combustión son condiciones similares, por lo que ambas palabras se usan comúnmente para significar lo mismo. La combustión, sin embargo, es una reacción química, mientras que la combustión con llama es solo una forma posible de combustión, pues también puede ocurrir sin llamas visibles. Hay dos modos de combustión: sin llamas y con llamas (**Imagen 4.8**).



**Imagen 4.8** La combustión sin llama (izquierda) presenta temperaturas más bajas. La combustión llameante (derecha) muestra llamas visibles sobre el combustible ardiendo.

### Combustión sin llamas

La combustión sin llamas ocurre más lentamente y a una temperatura más baja, y produce incandescencia en la superficie del material. La quema puede estar localizada sobre o cerca de la superficie del combustible que está en contacto con el oxígeno. Ejemplos de combustión incandescente o sin llamas incluyen la quema de carbón vegetal, madera o tela incandescente. El triángulo del fuego ilustra los elementos/condiciones requeridas para este modo de combustión.

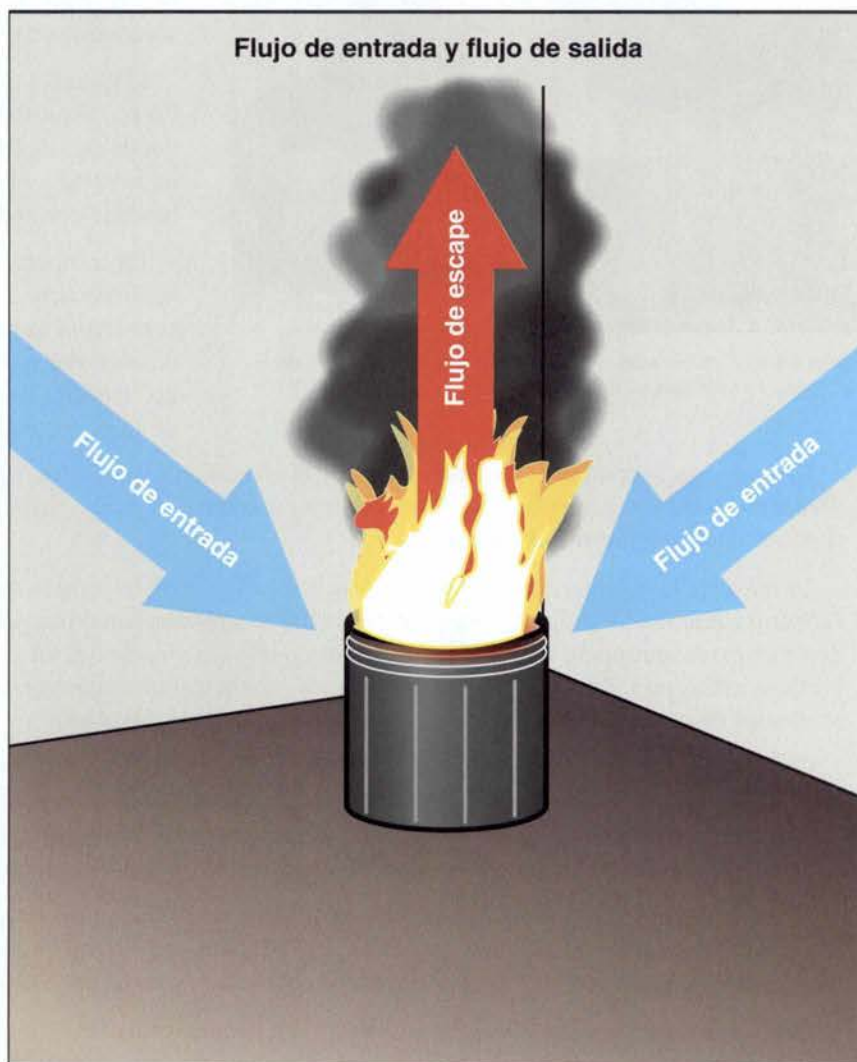
### Combustión con llamas

La combustión con llamas se conoce comúnmente como fuego. Produce una llama visible sobre la superficie del material. Ocurre cuando un combustible gaseoso se mezcla con oxígeno en la proporción correcta y se calienta a la temperatura de ignición. La combustión con llamas requiere que los combustibles líquidos o sólidos se conviertan a la fase gaseosa a través de la adición de calor (vaporización o pirólisis, respectivamente). Cuando se calientan, tanto los combustibles sólidos como los líquidos emiten vapores que se mezclan con el oxígeno, produciendo llamas por encima de la superficie del material si los gases se encienden. El tetraedro del fuego refleja con precisión las condiciones requeridas para la combustión con llamas.

Cada elemento del tetraedro debe estar en la proporción apropiada y en estrecha proximidad física para que la combustión con llama ocurra. Remover cualquier elemento del tetraedro interrumpe la reacción química en cadena y detiene la combustión con llamas. Sin embargo, el fuego puede continuar ardiendo, dependiendo de las características del combustible.

La ignición es donde comienza el proceso de combustión. Una fuente de calor genera pirólisis o vaporización, según corresponda, a un combustible, creando gases combustibles. Esos gases se mezclan con el oxígeno y se encienden, generando un fuego. El fuego puede ser comparado con una bomba. El oxígeno fresco es «bombeado hacia adentro» y mezclado con los gases combustibles. Luego, a medida que se quema, el fuego «bombea hacia afuera» productos de combustión que tienen mayor cantidad de masa y un nivel de energía más alto que el aire de entrada. En el caso de una quema abierta, la «bomba» no tiene una entrada o salida definida, ya que el aire está siendo **arrastrado** (aspirado) desde todos los lados alrededor del combustible que se quema. La **Imagen 4.9** ilustra el flujo de entrada y el flujo de escape.

El fuego también genera calor. A medida que el calor se transfiere a los productos de combustión



**Imagen 4.9** Esta ilustración demuestra los conceptos de flujo de entrada y flujo de escape.



**Imagen 4.10** El humo está compuesto por una amplia gama de partículas y gases tóxicos e inflamables.

Sin embargo, la combustión es incompleta en el incendio de una estructura, lo que significa que parte del combustible no se quema, es arrastrado con gases calientes y se eleva en el aire. Este combustible no quemado es humo y tiene el potencial de quemarse (**Imagen 4.10**).

La mayoría de los incendios de estructuras involucran múltiples tipos de combustibles (**combustibles a base de carbono** como madera, algodón, **combustibles hidrocarburos** como plásticos o telas sintéticas y otros tipos), y tienden a tener un suministro de aire limitado. Cuando esto ocurre, el nivel de combustión incompleta es más alto, lo cual produce más humo. Estos factores resultan en reacciones químicas complejas las cuales generan una amplia gama de productos de la combustión, incluidos gases inflamables y tóxicos, vapores y partículas que componen el humo.

Gases como el monóxido de carbono (CO) son generalmente incoloros, mientras que el vapor y las partículas dan al humo sus diferentes colores. La mayoría de los componentes del humo son tóxicos y peligrosos para la vida humana. Los materiales que forman el humo varían de un combustible a otro, en general todo humo es tóxico. Los efectos tóxicos de la inhalación de humo son el resultado de la interrelación de todos los productos tóxicos presentes.

Tenga en mente que el proceso de combustión consume oxígeno del aire, removiéndolo efectivamente del medio ambiente. Como parte de la reacción química, el oxígeno consumido se combina con el carbono en el humo para formar productos de combustión como el CO o el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Las bajas concentraciones de oxígeno por sí solas pueden provocar hipoxia o muerte. Los gases tóxicos en combinación con una baja concentración de oxígeno pueden reducir el tiempo de sobrevivencia de una víctima. La **Tabla 4.2** enumera algunos de los productos más comunes de la combustión y sus efectos tóxicos. Las concentraciones de los productos de combustión y las bajas concentraciones de oxígeno pueden causar **asfixia** (hipoxemia, nivel fatal de deficiencia de oxígeno en la sangre).

El **monóxido de carbono (CO)** es un producto tóxico e inflamable de la combustión incompleta de materiales orgánicos (que contienen carbono). Es un gas incoloro e inodoro presente en casi todos los fuegos y es liberado cuando

gaseosos, ellos se expanden y comienzan a elevarse y a alejarse del fuego debido a la flotabilidad. En otras palabras, la densidad de los productos calientes de la combustión es menor que la del aire circundante, y los productos de la combustión «flotan» en el denso aire frío que rodea el combustible, creando las capas de humo y gases combustibles que llenan un compartimento durante un incendio.

### **Productos de la combustión**

A medida que el combustible se quema, su composición química cambia, lo que produce nuevas sustancias. Estos **productos de la combustión** a menudo son descritos simplemente como humo y calor. Mientras que el calor del fuego es un peligro para cualquier persona directamente expuesta a él, la exposición a gases tóxicos encontrados en el humo y la falta de oxígeno causan la mayoría de las muertes en incendios. El humo es una mezcla compuesta de gases, vapor y partículas sólidas.

El humo es el producto de la **combustión incompleta**. En pocas palabras, la combustión es incompleta cuando queda algo de combustible después de que la combustión ha ocurrido. El humo y la ceniza son ejemplos de combustible que han quedado de la combustión incompleta.

En comparación, bajo condiciones ideales, a partir de su forma actual todo el combustible experimentaría una conversión química a una cantidad igual de nuevos materiales. Por ejemplo, la combustión completa del metano en el aire resulta en la producción de calor, luz, vapor de agua y dióxido de carbono.

**Tabla 4.2**  
**Productos comunes de la combustión y sus efectos tóxicos**

Monóxido de carbono	Gas incoloro e inodoro. Su inhalación causa dolor de cabeza, mareos, debilidad, confusión, náuseas, pérdida del conocimiento y muerte. La exposición a tan solo un 0,2 % puede provocar, en 30 minutos, la pérdida del conocimiento. La inhalación de concentraciones elevadas puede provocar un colapso inmediato y la pérdida del conocimiento.
Formaldehído	Gas incoloro con un olor penetrante que es muy irritante para la nariz. 50-100 ppm pueden causar irritación severa del tracto respiratorio y lesiones graves. La exposición a altas concentraciones puede provocar lesiones en la piel. Se sospecha que el formaldehído es carcinógeno.
Cianuro de hidrógeno	Líquido incoloro, tóxico e inflamable por debajo de los 79 °F (26 °C), producido por la combustión de sustancias que contienen nitrógeno. Es un asfixiante que actúa para evitar que el cuerpo utilice oxígeno. Se encuentra comúnmente en el humo en concentraciones más bajas que el monóxido de carbono.
Dióxido de nitrógeno	Gas de color marrón rojizo o líquido de color marrón amarillento, que es altamente tóxico y corrosivo.
Partículas	Pequeños fragmentos de material que se pueden inhalar y depositar en la boca, la tráquea o los pulmones. La exposición a partículas puede causar irritación ocular y dificultad respiratoria (además de peligros para la salud relacionados con las sustancias específicas involucradas).
Dióxido de azufre	Gas incoloro con olor asfixiante o sofocante. Es tóxico y corrosivo; puede irritar los ojos y las membranas mucosas.

**Fuente:** *Gestión de Operaciones de Emergencia Asistida por Computador (CAMEO) y Perfil toxicológico de hidrocarburos aromáticos policíclicos.*

un material orgánico se quema en una atmósfera con un suministro limitado de oxígeno. La exposición al CO es identificada frecuentemente como la causa de muerte de víctimas civiles.

El CO actúa como asfixiante. La intoxicación por CO es algunas veces una condición letal en la que las moléculas de carbono se adhieren a la hemoglobina, lo que disminuye la capacidad de la sangre de transportar oxígeno. El CO se combina con la hemoglobina unas 200 veces más efectivamente que el oxígeno, el CO no actúa en el cuerpo, pero excluye el oxígeno de la sangre, lo que lleva a la hipoxia del cerebro y los tejidos. La muerte seguirá si el proceso no es revertido. La **Tabla 4.3** ilustra los efectos del CO en los humanos.

El **cianuro de hidrógeno (HCN)**, una sustancia tóxica e inflamable producida en la combustión incompleta de materiales que contienen nitrógeno y carbono, también se encuentra comúnmente en el humo, aunque en concentraciones más bajas que el CO.

Los siguientes materiales producen HCN:

- Fibras naturales como lana, algodón y seda
- Resinas como fibra de carbono o fibra de vidrio
- Polímeros sintéticos como el nylon o el poliéster
- Caucho sintético como neopreno, silicona y látex

Estos materiales son encontrados en:

- Muebles tapizados
- Ropa de cama
- Aislantes
- Alfombras
- Ropa
- Otros materiales de construcción comunes y artículos para el hogar.

**Tabla 4.3**  
**Efectos del CO sobre la salud**

CO-monóxido de carbono	
Exposición a corto plazo	
Según como aumenta la concentración	↑ Muerte
	Inconsciencia
	Náusea
	Vómitos
	Mareo
	Dolor de cabeza
Exposición a largo plazo	
Enfermedad cardiovascular	
Posibles problemas de salud mental	

El HCN también es liberado a medida que se calienta un objeto. Es un subproducto importante de la combustión de espuma de poliuretano utilizada en muchos muebles para el hogar. También se puede encontrar en incendios de vehículos, donde los nuevos materiales de aislamiento emiten grandes cantidades de gases y hacen que los incendios duren más tiempo. El HCN es 35 veces más tóxico que el CO; actúa como un asfixiante, pero con un mecanismo de acción diferente al del CO: evita que el cuerpo use oxígeno a nivel celular. Puede ser inhalado, ingerido o absorbido por el cuerpo, donde se dirige al corazón y al cerebro. El HCN inhalado entra en el torrente sanguíneo y evita que las células de la sangre utilicen el oxígeno adecuadamente, por lo que las células mueren. Las grandes cantidades, las altas concentraciones y las exposiciones prolongadas pueden causar efectos más graves, incluidos daño permanente al corazón y al cerebro o la muerte. La **Tabla 4.4** ilustra los efectos del HCN en el cuerpo humano.

**PRECAUCIÓN:** Use EPP completo y SCBA en cualquier momento en que usted pueda estar expuesto a humo, calor o gases tóxicos.

**Tabla 4.4**  
**Efectos del HCN sobre la salud**

HCN-cyanide	
<b>Baja concentración</b>	
Irritación ocular	
Dolor de cabeza	
Confusión	
Náusea	
Vómitos	
Estado de coma (en algunos casos)	
Muerte (en algunos casos)	
<b>Alta concentración</b>	
Dificultad inmediata del sistema nervioso central, cardiovascular y respiratorio que conduce a la muerte en minutos.	

El **dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)** es un producto de la combustión completa de materiales orgánicos. No es tóxico de la misma manera que el CO o el HCN, pero crea una atmósfera deficiente de oxígeno ya que lo desplaza. El CO<sub>2</sub> también incrementa la frecuencia respiratoria.

**NOTA:** Los gases del fuego también contienen muchos otros gases distintos a los tres resaltados en esta sección. Estos gases adicionales tienen sus propios efectos y tiempos de exposición; estos tiempos de exposición están basados en la combinación de gases o la dosis efectiva letal.

Los irritantes en el humo son sustancias que causan malestar respiratorio e inflamación de los ojos, el tracto respiratorio y la piel. El humo puede contener una amplia gama de sustancias irritantes dependiendo de los combustibles involucrados. Más de 20 irritantes en el humo han sido identificados, incluidos cloruro de hidrógeno, formaldehído y acroleína.

El humo también contiene cantidades significativas de combustibles sin quemar en forma de partículas líquidas, sólidas y gases. El humo debe tratarse con el mismo respeto que cualquier otro gas inflamable porque puede quemarse o explotar. Las partículas pueden interferir con la visión y la respiración.

**ADVERTENCIA:** El humo es combustible y potencialmente inflamable. Puede ser deficiente en oxígeno y contener químicos muy tóxicos y/o carcinógenos.

## Diferencias de presión

**Presión** es la fuerza por unidad de área aplicada de manera perpendicular a una superficie. Por ejemplo, la presión atmosférica (1 atmósfera [aprox. 101 kPa]), a temperatura estándar (68 °F [20 °C]), indica la cantidad de presión que la atmósfera aplica a la superficie de la tierra. A temperatura y presión atmosférica estándar, los gases permanecen en calma y se mueven muy poco. Las diferencias por encima o por debajo de la presión estándar crean movimiento en los gases. Los gases siempre se mueven desde áreas de mayor presión a áreas de menor presión. Incluso pequeñas diferencias, como las de 0,1 kPa o menos creadas en la mayoría de los incendios de compartimentos, crean este movimiento.

El calor de un incendio incrementa la presión de los gases circundantes. Este incremento buscará expandirse e igualarse con áreas de presión más baja. Los gases calientes se elevarán, permanecerán en el aire (**flotando**) y generalmente viajarán hacia arriba y hacia afuera. Al mismo tiempo, el aire frío y fresco generalmente viajará hacia el interior del



**Imagen 4.11** Los gases calientes se desplazarán hacia arriba y hacia afuera de un fuego, mientras que el aire más frío se atraerá hacia el fuego creando un flujo convectivo.

incendio. Este intercambio de aire crea un flujo convectivo. A medida que la diferencia entre las áreas de alta y baja presión se incrementa, la velocidad con la cual los gases se moverán también aumenta. Es crítico para los bomberos entender cómo los pequeños cambios en la presión del gas dentro de una estructura pueden afectar dramáticamente el comportamiento del fuego (**Imagen 4.11**).

## Energía térmica (calor)

Un conocimiento práctico de la dinámica del fuego requiere una comprensión de la temperatura, la energía y la potencia o **tasa de liberación de calor**. Los bomberos a menudo usan estos términos de manera intercambiable, debido a que las diferencias entre sí no siempre son entendidas.

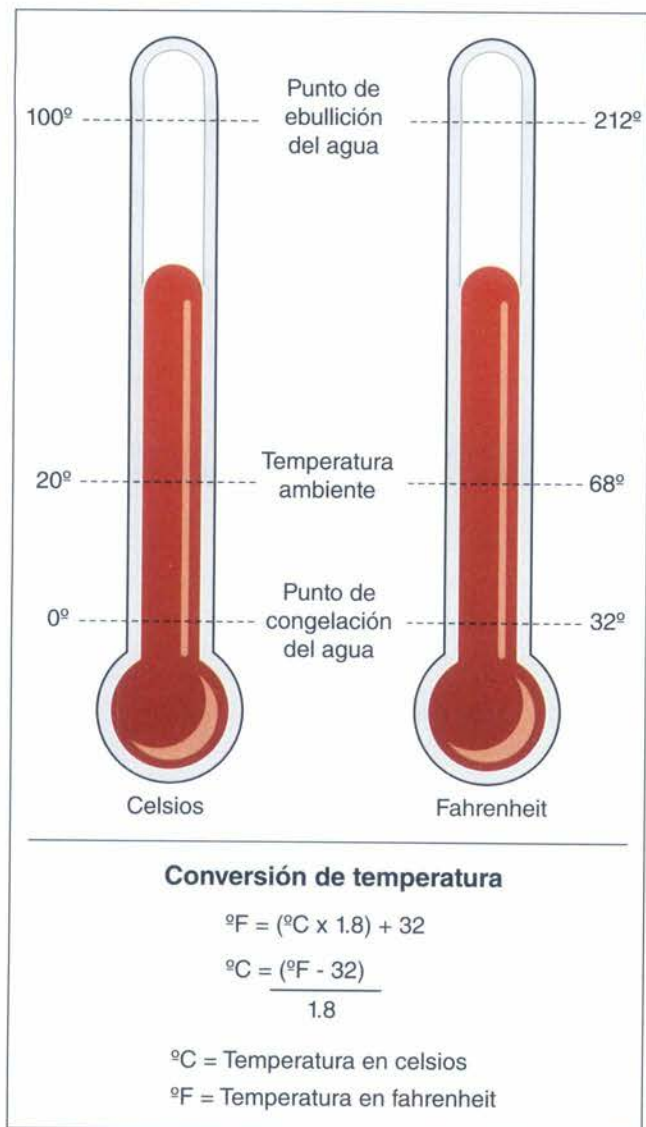
### Diferencias entre tasa de liberación de calor y temperatura

El calor es la energía cinética térmica necesaria para liberar la energía química potencial en un combustible. A medida que el calor comienza a hacer vibrar las moléculas en un combustible, este comienza un cambio físico de sólido a líquido o de líquido a gas. El combustible emite vapores inflamables que pueden encenderse y liberar energía térmica. Esta nueva fuente de energía comienza a calentar otros combustibles no involucrados convirtiendo su energía y propagando el fuego.

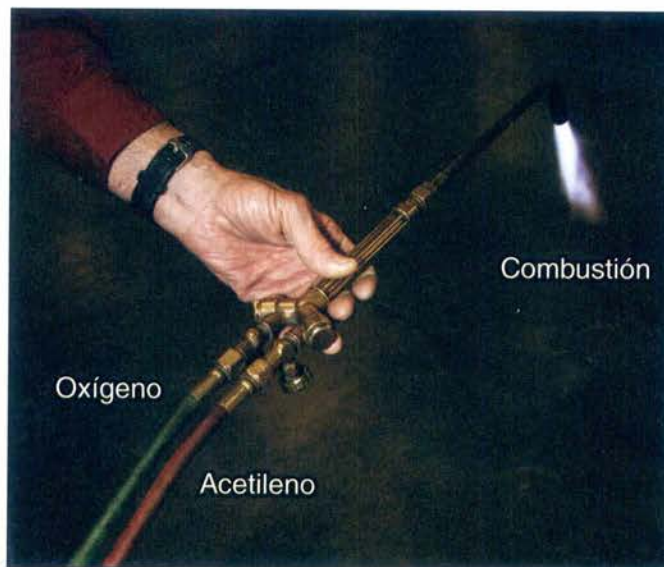
La temperatura es la medida del calor. Más específicamente, la temperatura es la medida de la energía cinética promedio en las partículas de una muestra de materia. Un bloque de madera a temperatura ambiente tiene moléculas estables y no está en peligro de ignición. Cuando la energía térmica es transferida a la madera, esta se calienta y su temperatura se eleva porque las moléculas han empezado a vibrar y moverse más libres y rápidamente.

La temperatura puede ser medida utilizando varias escalas diferentes. Las más comunes son la Celsius, utilizada en el Sistema Internacional de Unidades (SI) (sistema métrico), y la Fahrenheit, utilizada en el sistema tradicional. Los puntos de ebullición y congelación del agua proporcionan una forma simple de comparar estas dos escalas (**Imagen 4.12**).

Una peligrosa concepción errónea es que la temperatura es un predictor preciso o una medida de la transferencia de calor. No lo es. Por ejemplo, una vela arde a la misma temperatura que diez velas. Sin embargo, la tasa de liberación de calor (kW) de las diez velas es diez veces mayor que la de una vela a la misma temperatura. El incremento de la tasa de liberación de calor da como resultado una mayor tasa de transferencia de calor a un objeto. Este flujo de energía a una unidad de área (**flujo de calor**) es medida en kilovatios por metro cuadrado. Traducido a un ambiente de fuego en interior, la temperatura en la estructura puede estar dentro de las tolerancias de los equipos de protección personal,



**Imagen 4.12** Las dos escalas comunes que se utilizan para medir la temperatura son la Celsius (Sistema Internacional de Unidades [SI] o sistema métrico) y la Fahrenheit, utilizada en el sistema tradicional.



**Imagen 4.13** La llama de un soplete de corte ilustra la generación de calor a partir de una reacción química.

sin embargo, el flujo de calor desde el fuego indica la medida real de cuánto tiempo el EPP lo protegerá a usted. En otras palabras, la temperatura le dice a usted cuándo es seguro ingresar, pero la tasa de transferencia de calor es la que le indica cuánto tiempo puede permanecer adentro.

## Fuentes de energía térmica

Las energías química, eléctrica y mecánica son fuentes comunes de calor que dan como resultado la ignición de un combustible. Todas ellas pueden transferir calor, causar que la temperatura de una sustancia aumente y son, con mayor frecuencia, las fuentes de ignición de los incendios estructurales.

### *Energía química*

La energía química es la fuente de calor más común en las reacciones de combustión. El potencial de oxidación existe cuando cualquier combustible está en contacto con el oxígeno. El proceso de oxidación casi siempre resulta en la producción de energía térmica (**Imagen 4.13**).

El **autocalentamiento**, una forma de oxidación, es una reacción química que incrementa la temperatura de un material sin la adición de calor externo. Puede provocar una **ignición espontánea**.

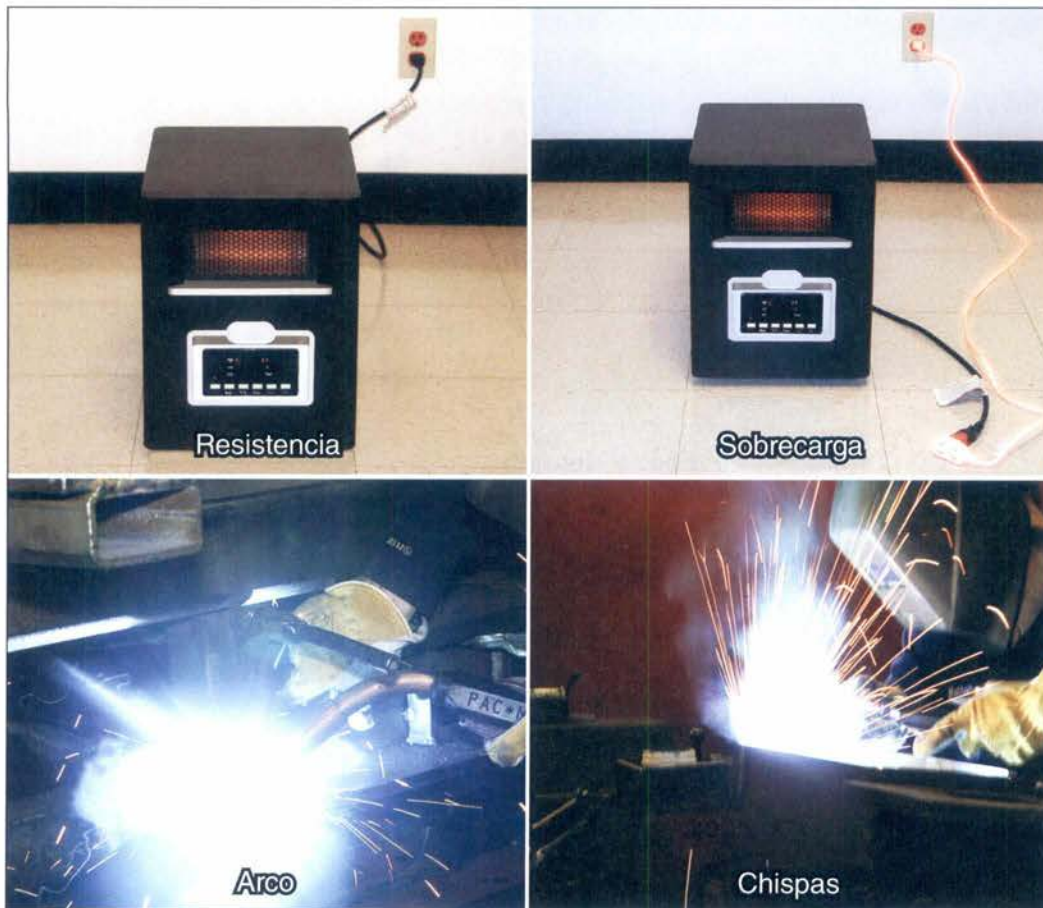
Por lo general, la oxidación produce energía térmica lentamente. La energía se disipa casi tan rápido como se produce. Una fuente de calor externa, como la luz solar, puede iniciar o acelerar el proceso. Para que el autocalentamiento progrese a una ignición espontánea se requieren los siguientes factores:

- Las propiedades de aislamiento del material que rodea inmediatamente al combustible deben ser tales que el calor no pueda disiparse tan rápido como se genera.
- La tasa de producción de calor debe ser lo suficientemente grande como para elevar el material a su temperatura de autoignición.
- El suministro de aire disponible dentro y alrededor del material calentado debe ser adecuado para soportar la combustión.

Paños empapados en aceite de linaza, enrollados en una bola y arrojados a una esquina, tienen el potencial de una ignición espontánea. La oxidación natural de este aceite vegetal y el paño generarán calor si algún método de transferencia, como el movimiento de aire alrededor de los trapos, no lo disipa. El paño podría eventualmente aumentar la temperatura lo suficiente como para causar la ignición.

La velocidad de la mayoría de las reacciones químicas aumenta a medida que se eleva la temperatura de los materiales. La reacción de oxidación que causa la generación de calor se acelera a medida que el combustible genera y absorbe más calor. Cuando el calor generado excede el calor que se está perdiendo, el material puede alcanzar su temperatura de autoignición y encenderse espontáneamente. La **Tabla 4.5** enumera algunos materiales comunes que están sujetos a autocalentamiento.

<b>Tipo de material</b>	<b>Ubicaciones posibles</b>
Carbón	Tiendas Ferreterías Plantas industriales Restaurantes Residencias
Trapos empapados con aceite de linaza	Talleres de carpintería Astilleros de madera Talleres de reparación de muebles Marquetería Sitios de construcción/ remodelaciones Residenciales/comerciales
Heno y estiércol	Granjas Tiendas de alimentos Arenas Corral de engorde



**Imagen 4.14** Ejemplos de calentamiento por resistencia, por sobrecorriente o sobrecarga, arcos y chispas.

### ***Energía eléctrica***

La energía eléctrica puede generar temperaturas lo suficientemente altas como para encender cualquier material combustible cerca del área calentada. El calentamiento eléctrico puede ocurrir de varias maneras, incluidas las siguientes (**Imagen 4.14**):

- **Calentamiento por resistencia.** La corriente eléctrica que fluye a través de un conductor produce calor. Algunos aparatos eléctricos, como lámparas incandescentes, estufas, hornos o calentadores portátiles, están diseñados para utilizar el calentamiento por resistencia. Otros equipos eléctricos están diseñados para limitar el calentamiento por resistencia bajo condiciones normales de operación.
- **Sobrecorriente o sobrecarga.** Cuando la corriente fluye a través de un conductor y excede sus límites de diseño, puede sobrecalentarse y presentar un peligro de ignición. Sobrecorriente o sobrecarga es calentamiento por resistencia no deseada.
- **Arcos.** En general, un arco es una descarga eléctrica luminosa de alta temperatura a través de un hueco o de un medio como un aislamiento carbonizado. Los arcos pueden generarse cuando hay un hueco en un conductor, como un cable cortado o desgastado, o cuando hay un alto voltaje, electricidad estática o rayos.
- **Chispas.** Cuando un arco eléctrico ocurre, se pueden formar partículas luminosas (brillantes) y salpicar lejos del punto de arco.

### ***Energía mecánica***

La fricción y la compresión generan energía mecánica (**Imagen 4.15**). El movimiento de dos superficies entre sí puede crear fricción que genera chispas como las usadas en los motores diésel para encender los vapores del combustible sin bujías, o el calor de la compresión de un gas, razón por la cual los cilindros de SCBA se sienten calientes al tacto después de ser llenados. Esta absorción explica la forma en que se enfría el cilindro cuando un extintor de CO<sub>2</sub> es descargado.

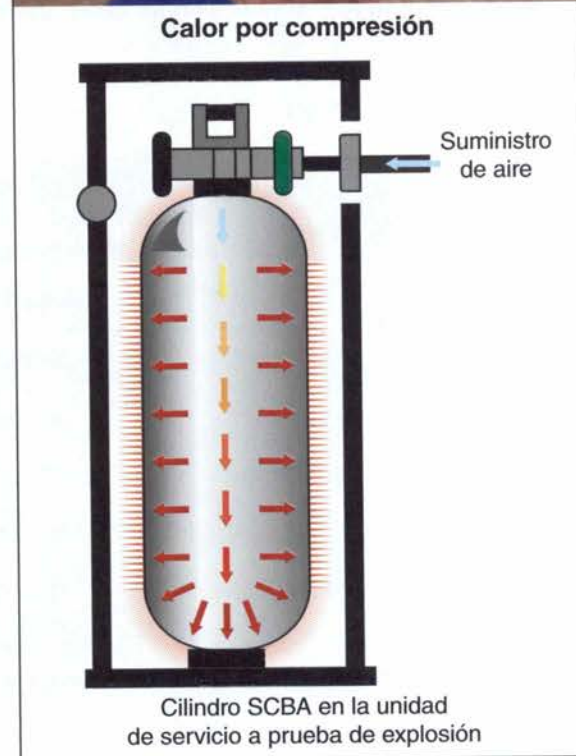
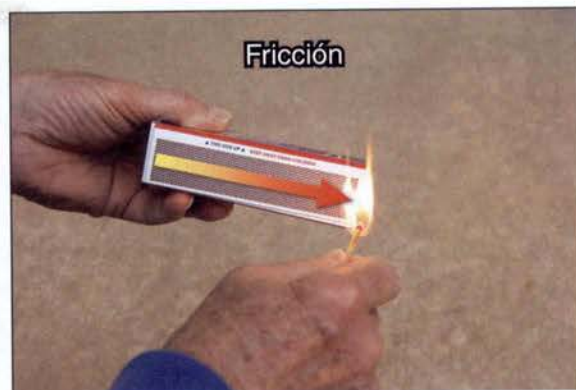
## Transferencia de calor

La transferencia de calor de un punto u objeto a otro es parte del estudio de la termodinámica. La transferencia de calor desde la carga de combustible inicial (objeto que se quema) a otros combustibles en el área y más allá del área de origen del fuego afecta el crecimiento de cualquier incendio y es parte del estudio de la dinámica del fuego. El calor se transfiere de objetos más calientes a otros más fríos porque los materiales calentados retornarán naturalmente a un estado de **equilibrio térmico** en el que todas las áreas tienen una temperatura uniforme. Los objetos a la misma temperatura no transfieren calor.

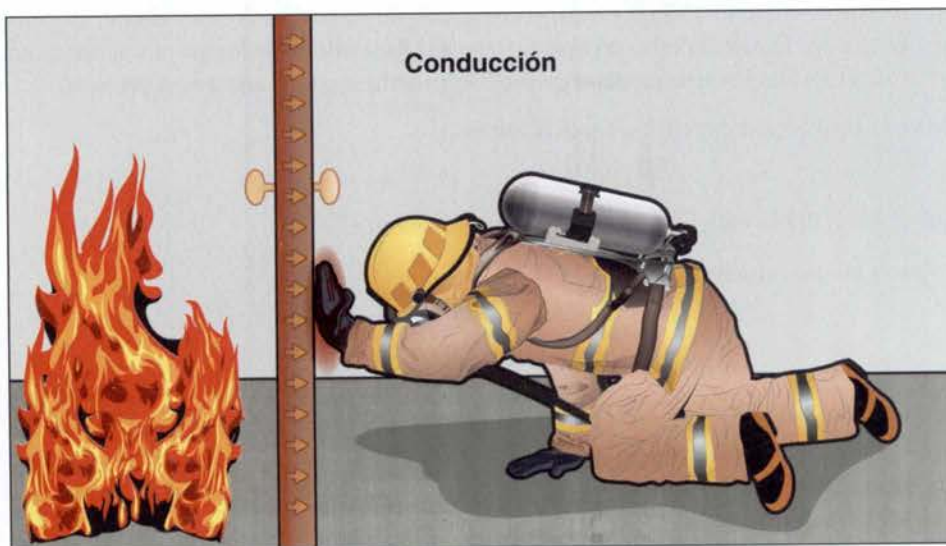
La velocidad a la que se transfiere el calor está relacionada con la diferencia de temperatura de los cuerpos y la **conductividad térmica** de los materiales involucrados. Cuanto mayor sean las diferencias de temperatura entre los cuerpos, mayor será la tasa de transferencia. Un material con una conductividad térmica más alta transferirá el calor más rápidamente. El calor se transfiere de un cuerpo a otro por tres mecanismos: **conducción, convección y radiación**.

### Conducción

La conducción es la transferencia de calor entre y a través de los sólidos. Ocurre cuando un material se calienta como resultado del contacto directo con una fuente de calor (**Imagen 4.16**). La conducción resulta del incremento del movimiento molecular y las colisiones entre las moléculas de una sustancia, lo que resulta en la transferencia de energía a través de la sustancia. Cuanto más cerca y comprimidas estén las moléculas de una sustancia, más fácilmente conducirá el calor. Por ejemplo, si un fuego calienta una tubería de metal en un lado de una pared, el calor conducido a través de la tubería puede encender componentes de estructuras de madera en la pared o combustibles cercanos en el otro lado de la pared.



**Imagen 4.15** La fricción de la cabeza del fósforo al rozar la parte delantera de la caja genera el calor necesario para encenderlo. Cuando se comprime el gas, genera calor.



**Imagen 4.16** La conducción ocurre cuando el calor se transfiere entre objetos sólidos, en este caso, entre la puerta y la mano del bombero.

La transferencia de calor debida a la conducción depende de tres factores:

- Área que se calienta
- Diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el material que se calienta
- Conductividad térmica del material calentado

La **Tabla 4.6** muestra la conductividad térmica de varios materiales comunes a la misma temperatura ambiente (68 °F [20 °C]). Por ejemplo, el cobre conducirá el calor siete veces más rápido que el acero. Del mismo modo, el acero es casi cuarenta veces más conductor térmico que el concreto. El aire es el que menos capacidad tiene de conducir el calor de la mayoría de las sustancias, por lo que es muy buen aislante.

Los materiales aislantes reducen la conducción del calor de un sólido a otro. Los buenos aislantes son materiales que no conducen bien el calor porque su composición física interrumpe la transferencia punto a punto. Los mejores aislantes comerciales utilizados en la construcción de edificaciones son aquellos hechos de partículas finas o fibras con espacios vacíos entre ellos llenos de un gas como el aire. Los gases no conducen muy bien el calor porque sus moléculas están relativamente separadas.

**Tabla 4.6**  
**Conductividad térmica de sustancias comunes**

Sustancia	Temperatura	Conductividad térmica (W/mK)
Cobre	68°F (20°C)	38,00
Acero	68°F (20°C)	36.00 – 54.00
Hormigón	68°F (20°C)	0.8 – 1.28
Panel de yeso	68°F (20°C)	0.50
Madera (pino)	68°F (20°C)	0.13
Aire	68°F (20°C)	0.13

### **Convección**

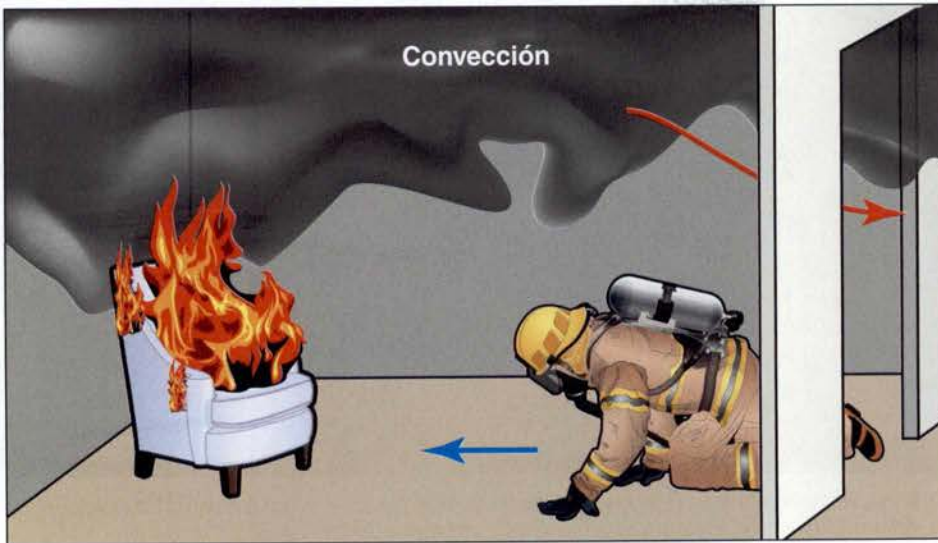
La convección es la transferencia de energía térmica por la circulación o el movimiento de un fluido (líquido o gas) (**Imagen 4.17**). Durante un incendio, la convección generalmente implica la transferencia de calor a través del movimiento de humo caliente y gases del fuego. Al igual que todas las formas de transferencia del calor, este fluye desde los gases calientes del fuego hacia las superficies estructurales más frías, el contenido de las edificaciones y el aire. La convección puede ocurrir en cualquier dirección. El movimiento vertical se debe a la flotabilidad de los gases y el humo en el fuego. El movimiento lateral suele ser el resultado de diferencias de presión (movimiento de alta a baja presión).

La transferencia de calor debida a la convección depende de tres factores:

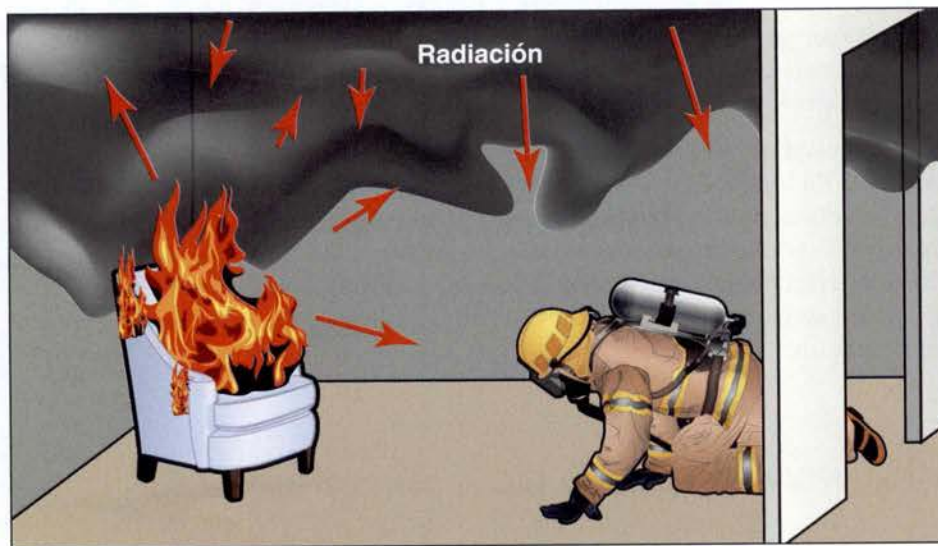
- Área que se calienta
- Diferencia de temperatura entre el gas o fluido caliente y el material que se calienta
- Turbulencia y velocidad de los gases en movimiento

### **Radiación**

La radiación es la transmisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, como ondas de luz, ondas de radio o rayos X, sin un medio de intervención (**Imagen 4.18**). El calor radiante puede convertirse en el modo dominante de transferencia de calor a medida que el fuego crece de tamaño y puede tener un efecto significativo en la ignición de objetos ubicados a cierta distancia. La transferencia de calor radiante también es un factor importante en el desarrollo del incendio y en su propagación en los compartimentos.



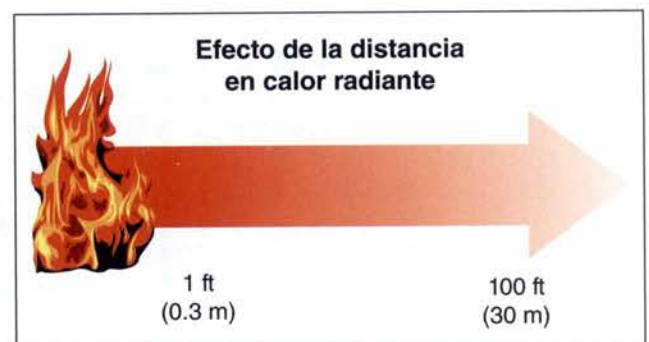
**Imagen 4.17** La convección es la transferencia de calor por la circulación de líquidos o gases.



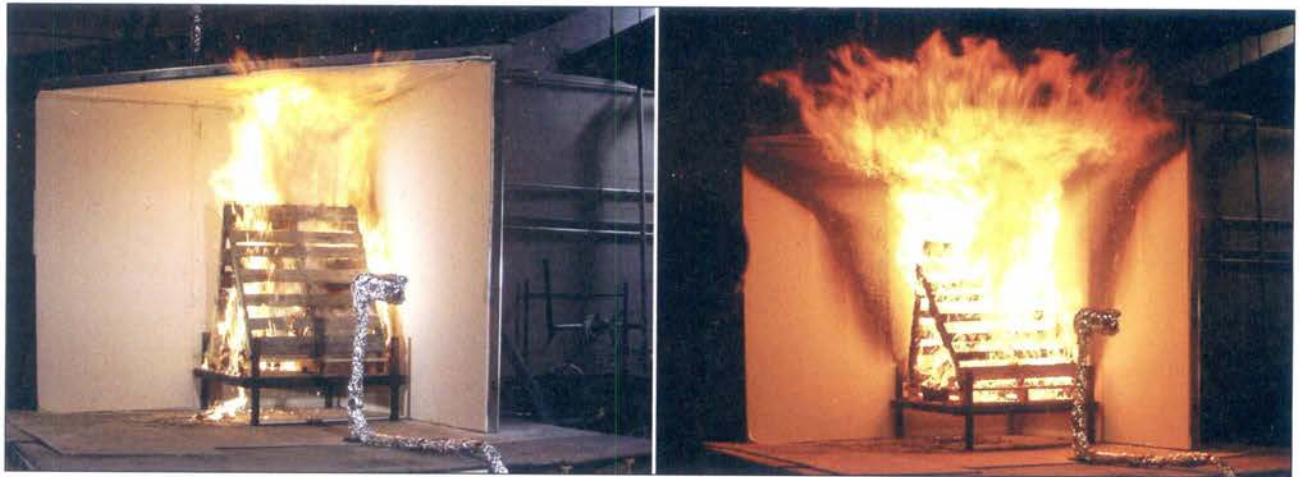
**Imagen 4.18** La radiación es la transferencia de calor por ondas electromagnéticas sin otro medio para transferir la energía térmica.

Numerosos factores influyen en la transferencia de calor radiante, incluyendo:

- **Naturaleza de las superficies expuestas.** Los materiales de color oscuro emiten y absorben el calor con mayor eficacia que los materiales de color claro. Las superficies lisas o altamente pulidas reflejan más calor radiante que las superficies rugosas.
- **Distancia entre la fuente de calor y las superficies expuestas.** El incremento de las distancias reduce el efecto del calor radiante (**Imagen 4.19**).
- **Temperatura de la fuente de calor.** A diferencia de otros métodos de transferencia de calor que dependen de la temperatura tanto de la fuente de calor como de la superficie expuesta, la transferencia de calor radiante depende principalmente de la temperatura de la fuente de calor. A medida que la temperatura y la tasa de liberación de calor de la fuente aumenta, la energía radiante también aumenta (**Imagen 4.20**).



**Imagen 4.19** Los efectos del calor radiante disminuyen a medida que aumenta la distancia entre el punto de origen y la exposición.



**Imagen 4.20** A medida que aumenta la velocidad de liberación de calor o la temperatura de la fuente, también aumentará la radiación térmica emitida. El fuego de la derecha emite más radiación térmica que el fuego de la izquierda. *Cortesía de NIST.*

Como una onda electromagnética, la energía calórica irradiada viaja en línea recta a la velocidad de la luz. El calor del sol es el mejor ejemplo de transferencia de calor irradiado. La energía viaja a la velocidad de la luz desde el Sol a través del espacio (un vacío) hasta que golpea y calienta la superficie de la Tierra.

La radiación es una causa común de **incendios por exposición**. A medida que el fuego crece, irradia más energía a otros objetos que lo absorben como calor. En incendios grandes, es posible que el calor irradiado encienda edificaciones u otras cargas de combustible a una distancia considerable. El calor radiado viaja a través de espacios de aire y vacíos que normalmente interrumpirían la conducción o la convección. Sin embargo, los materiales que reflejan, absorben o dispersan la energía radiada interrumpirán la transmisión de calor. Mientras que las llamas tienen una temperatura alta, se produce una emisión de energía radiante significativa; el humo caliente o las llamas en la capa superior también pueden irradiar calor significativo.



### La importancia de entender la temperatura y la tasa de transferencia de calor

El flujo de calor radiante ( $\text{kW/m}^2$ ) emitido desde las llamas o las superficies calientes, como las paredes y el cielo raso, puede causar una falla del EPP incluso cuando la temperatura de los gases dentro de un compartimento se encuentra dentro de los límites aceptables. Tradicionalmente, los bomberos se han centrado en la temperatura del gas, expresada en grados en las escalas Fahrenheit o Celsius, dentro de un compartimento que se encuentra en llamas como el mejor indicador del peligro térmico. Sin embargo, las pruebas de laboratorio del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) muestran que estas mediciones de temperatura pueden no tener en cuenta de manera precisa el calor irradiado. Especialmente, las piezas faciales del SCBA son susceptibles al flujo de calor irradiado (Putorti, 2013).

El EPP está diseñado para aislar al usuario de una cantidad específica de calor durante el tiempo suficiente para extinguir el fuego o salir del compartimento bajo un conjunto limitado de condiciones. Sin embargo, el EPP no lo protegerá indefinidamente. Si bien las mediciones de temperatura son una herramienta útil, confiar en la conciencia situacional y personal «en el momento» sigue siendo esencial para monitorear el desempeño del EPP durante las operaciones.

### *Interacción entre los métodos de transferencia de calor*

Los métodos de transferencia de calor rara vez ocurren individualmente durante un incendio. El fuego irradia calor, causando la convección de calor a través de gases combustibles calientes y conduce el calor a través de materiales o metales que están involucrados en el incendio.

El calor por convección y el irradiado llegan a las paredes y cielos rasos, calientan estas superficies que comienzan a conducir el calor donde sea posible, basado en la conductividad térmica del material. Un lado del objeto está caliente y lentamente se va calentando el lado opuesto, hasta que alcance su misma temperatura.

Una superficie calentada, a su vez, comenzará a irradiar calor que podría llevar a la ignición, a la combustión, la convección, y así sucesivamente. Este ciclo continúa hasta ser interrumpido.

Un buen ejemplo de esta interacción es cómo su EPP absorbe el calor durante las operaciones interiores. El calor irradiado y la convección comenzarán a calentar el exterior de su EPP. Cuanto más tiempo permanezca usted en el ambiente caliente, más calor absorberá la superficie del EPP. Este tiene una baja conductividad térmica, por lo que conducirá el calor lentamente. Sin embargo, eventualmente, la superficie interior del EPP se calentará al mismo nivel que el exterior. Dondequiera que el equipo esté comprimido contra la piel o la ropa interior, el calor se conducirá más rápido. La **Tabla 4.7** muestra varias reacciones de la piel humana y del EPP a medida que son calentados.

Cuando el EPP no está en contacto con la piel, se irradiará calor a la capa de aire aislante entre su cuerpo y la superficie interior de la ropa de protección. Este calor transferido puede causar estrés por calor y eventualmente hará que el EPP falle. La absorción y acumulación de calor en el EPP es el resultado directo de todos los métodos de transferencia que actúan al mismo tiempo.

<b>Temperatura °F (°C)</b>	<b>Respuesta</b>
98,6 °F (37 °C)	Temperatura oral/corporal normal humana
111 °F (44 °C)	La piel humana comienza a sentir dolor.
118 °F (48 °C)	La piel humana recibe una quemadura de primer grado.
131°F (55 °C)	La piel humana recibe una quemadura de segundo grado.
140 °F (62 °C)	Fase en la que el tejido humano quemado se adormece.
162 °F (72 °C)	La piel humana se destruye instantáneamente.
212 °F (100 °C)	El agua hierve y produce vapor.
284 °F (140 °C)	Temperatura de transición vítrea del policarbonato.
446 °F (230 °C)	Temperatura de fusión del policarbonato.
482 °F (250 °C)	Comienza la carbonización del algodón natural.
>572 °F (>300 °C)	Comienza la carbonización de las telas modernas de prendas protectoras.
>1.112 °F (>600 °C)	Temperatura dentro de una habitación después de un <i>flashover</i> .

**Fuente:** Underwriter's Laboratories, Inc.

## Combustible

El combustible es el material o sustancia que se oxida o quema en el proceso de la combustión. Un combustible se puede encontrar en cualquiera de los tres estados físicos de la materia: gaseoso, líquido o sólido.

El combustible en una reacción de combustión se conoce como el **agente reductor**. Los combustibles pueden ser inorgánicos, como el hidrógeno o el magnesio, que no contienen carbono, u orgánicos, que son los más comunes y contienen carbono y otros elementos. Los combustibles orgánicos se pueden dividir en combustibles a base de hidrocarbóno, tales como:

- Gasolina
- Aceite
- Plásticos
- Materiales a base de celulosa (madera y papel)

**Tabla 4.8**  
**Picos representativos en la tasa de liberación de calor durante una quema no confinada**

Material combustible	Pico en kilovatios	Ubicaciones comunes del material
Papelera pequeña	4-50	Hogares, negocios, tiendas
Colchón de algodón	40-970	Hogares, tiendas de muebles, moteles
Silla de algodón	290-370	Hogares, tiendas de muebles, edificios de oficinas
Pequeño apozamiento de gasolina	400	Accidente de tráfico, gasolineras
Árbol de navidad seco	3.000-5.000	Hogares, depósitos de basura, contenedores de basura, sitios para reciclaje
Colchón de poliuretano	810-2630	Hogares, tiendas de muebles, moteles, dormitorios, cárceles
Silla de poliuretano	1.350-1.990	Hogares, tiendas de muebles, moteles
Sofá de poliuretano	3.120	Hogares, tiendas de muebles, moteles, dormitorios, edificios de oficinas

*Adaptado de NFPA® 921, edición 2014*

El contenido químico de un combustible influye tanto en el calor de combustión como en la tasa de liberación de calor (**Tabla 4.8**). El calor de combustión es la cantidad total de energía térmica liberada cuando se quema una cantidad específica de combustible. En otras palabras, diferentes materiales liberan más o menos calor que otros en función de su composición química. Muchos plásticos, líquidos y gases inflamables contienen más energía térmica potencial que la madera.

Los materiales sintéticos son comunes en la construcción y el mobiliario moderno. Estos se sintetizan a partir de productos derivados del petróleo y, como resultado, tienen mayores niveles de combustión y pueden generar mayores tasas de liberación de calor que la madera en una relación superficie/masa.

**Potencia** es la tasa a la que se transfiere la energía. Otra forma de describir la potencia es la tasa en que una energía se convierte de una forma a otra. La unidad internacional estándar (SI) para la potencia es el **vatio** (W). Un vatio es 1 julio por segundo (J/s).

En términos del comportamiento del fuego, la potencia es la tasa de liberación de calor durante la combustión. Cuando se calienta un combustible, se está realizando un trabajo (se está transfiriendo energía). La velocidad con la que se produce este trabajo y la tasa de liberación de calor es la cantidad de potencia generada. La tasa de liberación de calor es la energía liberada por unidad de tiempo a medida que se quema el combustible y generalmente se expresa en kilovatios (kW) o megavatios (MW). La tasa de liberación de calor depende del tipo, la cantidad y la orientación del combustible, y se relaciona directamente con el consumo de oxígeno porque el proceso de combustión requiere para ser sostenible un suministro continuo de oxígeno. Normalmente, cuanto más oxígeno hay disponible, mayor es la tasa de liberación de calor. De manera similar, la tasa de liberación de calor disminuye si se consume todo el oxígeno disponible y no se repone. La **Imagen 4.21** muestra un ejemplo de la tasa de liberación de calor producida por varios tamaños de fuegos.



**Imagen 4.21** Ejemplos de condiciones de tasa de liberación de calor que pueden medirse en vatios, kilovatios o megavatios.

**i** **Prefijos para unidades de medida: kilo y mega**

El SI especifica un conjunto de prefijos que preceden a las unidades de medida para indicar un múltiplo o fracción de esa unidad. Dos prefijos comunes que se encuentran al analizar la energía (julios) y la tasa de liberación de calor (vatios) son kilo y mega. El prefijo kilo indica un múltiplo de 1.000 y mega indica un múltiplo de 1.000.000. Por ejemplo, un kilovatio es 1.000 vatios y un megavatio es 1.000.000 de vatios. Un megavatio también se define como 1.000 kilovatios.

## Gases

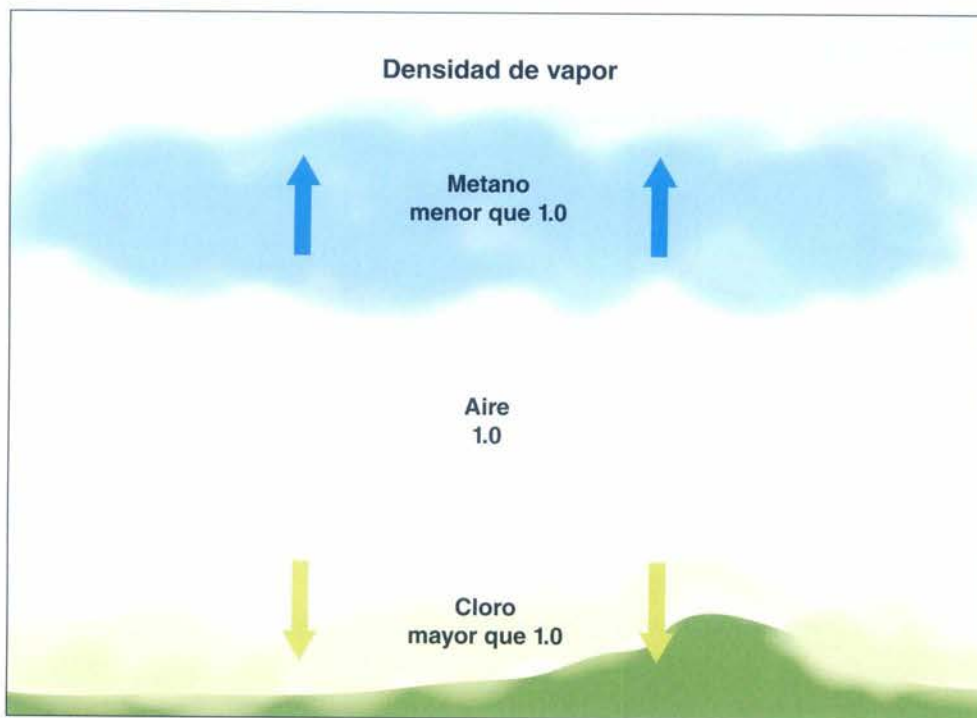
Para que ocurra la combustión con llamas, los combustibles deben estar en estado gaseoso. Como se describió anteriormente, la energía térmica es requerida para transformar sólidos y líquidos al estado gaseoso. *Vapor* es el término que se usa comúnmente para describir el estado gaseoso de un combustible que existiría normalmente como líquido o sólido a una temperatura y presión estándar.

Los combustibles gaseosos, como el metano (gas natural), el hidrógeno y el acetileno, pueden ser los más peligrosos entre todos los tipos puesto que ya se encuentran en el estado físico requerido para la ignición. Cuando la madera se quema ineficazmente, los productos de la combustión pueden contener metano, acetileno y otros gases. La **Tabla 4.9** muestra características de los gases inflamables comunes.

**Tabla 4.9**  
**Características de los gases inflamables comunes**

Material	Densidad de vapor	Temperatura de ignición
Metano (gas natural)	0,55	(1.004 °F) 540 °C
Propano (gas licuado de petróleo)	1,52	(842 °F) 450 °C
Monóxido de carbono	0,96	(1.128 °F) 620 °C

**Fuente:** *Gestión de Operaciones de Emergencia Asistida por Computador (CAMEO)*



**Imagen 4.22** La densidad de vapor de un gas da una indicación de dónde se acumulará durante un incidente.

La **densidad de vapor** describe la densidad de los gases con relación al aire. El aire tiene una densidad de vapor de 1. Los gases con densidad de vapor inferior a 1, como el metano, se elevarán, mientras que aquellos que cuentan con una densidad de vapor superior a 1, como el propano, caerán (**Imagen 4.22**). Las densidades de vapor están basadas en la suposición según la cual la densidad se mide a una temperatura y una presión estándar. Al calentarse los gases, estos se expanden y se vuelven menos densos; cuando se enfrían, se contraen y se vuelven más densos.

## Líquidos

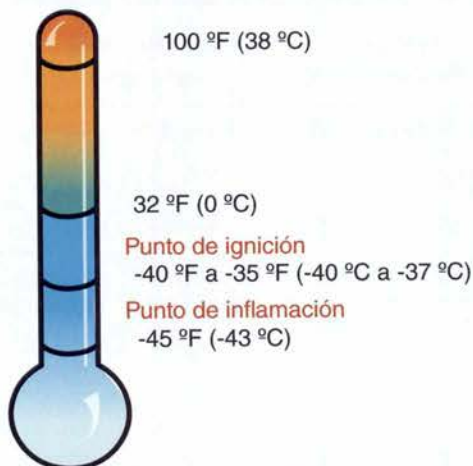
Los líquidos tienen masa y volumen, pero no una forma definida, excepto en una superficie plana o por la forma del envase que los contenga. Cuando se liberan en el suelo, los líquidos fluyen cuesta abajo y se estancan en áreas bajas. Así como la densidad de un gas es comparada con el aire, la densidad de un líquido se compara con el agua. La **gravedad específica** es la proporción de masa de un volumen dado de un líquido comparado con la masa de un mismo volumen de agua a la misma temperatura. Al agua se le asigna una gravedad específica de 1. Líquidos con una gravedad específica inferior a 1, como la gasolina y muchos otros líquidos inflamables, son más ligeros que el agua y flotan en la superficie. Líquidos con una gravedad específica superior a 1, como el jarabe de maíz, son más pesados que el agua y se hundirán (**Imagen 4.23**).

Para quemarse, los líquidos deben evaporarse. La vaporización es la transformación de un líquido en vapor o a un estado gaseoso. Contrario a los sólidos, los líquidos conservan su estado de materia parcialmente debido a la presión atmosférica estándar. Para que la evaporación ocurra, los vapores que se escapan deben estar a una presión mayor que la atmosférica. La presión que ejercen los vapores cuando escapan de un líquido es conocida como **presión de vapor** e indica qué tan fácil se evapora una sustancia en el aire. Los líquidos inflamables con una alta presión de vapor representan un peligro especial para los bomberos.



**Imagen 4.23** La gravedad específica de un líquido indica si flotará en la superficie del agua o se hundirá.

### Punto de inflamación (*flash point*) vs. punto de ignición (*fires point*) de la gasolina



**Imagen 4.24** El punto de inflamación de un líquido indica la temperatura a la que este se encenderá temporalmente, mientras que el punto de ignición indica la temperatura a la que el líquido seguirá ardiendo una vez encendido.

La presión de vapor de una sustancia y la cantidad de energía térmica aplicada a ella determinan el índice de vaporización. Por ejemplo, un charco de agua puede llegar a evaporarse debido a una lenta transferencia de calor generada por el sol. Cuando la misma cantidad de agua es calentada en un fogón, se vaporiza mucho más rápido puesto que hay más energía térmica aplicada. La volatilidad o facilidad con la que un líquido desprende vapor determina qué tan fácil puede encenderse. El tamaño de la superficie de un líquido también determina la extensión en la cual desprende vapor. En muchos contenedores abiertos, el área de la superficie del líquido expuesto a la atmósfera es limitada.

**Punto de inflamabilidad (*flash point*)** es la temperatura mínima a la cual un líquido desprende suficientes vapores para encenderse pero sin mantener la combustión, en presencia de una fuente de ignición pilotada (dirigida). **Punto de ignición (*fire point*)** es la temperatura a la cual una ignición pilotada proporciona suficientes vapores para comenzar una reacción de combustión sostenida (**Imagen 4.24**). El punto de inflamabilidad es comúnmente usado para indicar el peligro de inflamabilidad de combustibles líquidos. Aquellos que vaporizan lo suficiente para quemarse a temperaturas por debajo de 100 °F (38 °C) representan un peligro de inflamabilidad significativo.

Los bomberos deben saber cómo reaccionan los combustibles líquidos con el agua. La **solubilidad** describe el alcance al que una sustancia (en este caso un líquido) se mezcla con agua. La solubilidad puede expresarse en términos cualitativos (parcial o completamente) o en porcentaje (20 % soluble). Los materiales que son **miscibles** en agua se mezclarán en cualquier proporción. Algunos líquidos son más ligeros que el agua y no se mezclarán con esta, como los combustibles de hidrocarburos (gasolina, diésel y aceites). Los líquidos inflamables llamados **solventes polares**, como alcoholes (metanol, etanol), se mezclarán inmediatamente con el agua.

Los líquidos que son menos densos (más ligeros) que el agua se extinguen con mayor dificultad usando agua como único agente extintor. Puesto que el combustible líquido es menos denso y no se mezcla con el agua, añadirla puede conllevar a una dispersión del líquido inflamable en lugar de extinguirlo, lo que puede resultar en la propagación del fuego hacia otras áreas. Los bomberos suelen usar espuma o agentes químicos apropiados para extinguir los combustibles líquidos que son solubles en agua.

Los líquidos solubles en agua se mezclarán con otros agentes extintores a base de agua, como muchos tipos de espumas contra incendios. El agente extintor se mezclará con el líquido inflamable y se volverá menos efectivo para extinguir el fuego. Para evitar esta mezcla, los bomberos deberían usar espumas contra incendios resistentes al alcohol, que han sido específicamente diseñadas para solventes polares. La **Tabla 4.10** señala las características de líquidos combustibles e inflamables comunes.

## Sólidos

Los sólidos cuentan con un tamaño y una forma definidos. Diferentes sólidos reaccionan de manera distinta cuando son expuestos al calor. Algunos como la cera y los metales cambiarán su estado y se derretirán, mientras que otros como la madera y el plástico no lo harán. Cuando los combustibles sólidos se calientan, empiezan un proceso de pirólisis (gasificar) y a desprender vapores combustibles. Si hay suficiente combustible y calor, la pirólisis genera suficientes vapores inflamables para provocar la ignición en presencia de suficiente oxígeno o de otro oxidante.

**Tabla 4.10**  
**Características de los líquidos inflamables y combustibles comunes**

Material	Soluble en agua	Gravedad específica	Punto de inflamabilidad	Temperatura de autoignición
Gasolina	No	0,72	(-36 °F) -38 °C	(853 °F) 486 °C
Diésel	No	<1.00	(125 °F) 52 °C	(410 °F) 210 °C
Etanol	Sí	0,78	(55 °F) 13 °C	(689 °F) 365 °C
Metanol	Sí	0,79	(52 °F) 11 °C	(867 °F) 464 °C

*Fuente: Gestión de Operaciones de Emergencia Asistida por Computador (CAMEO)*

Cuando la madera se calienta, comienza el proceso de pirólisis y a descomponerse en sus componentes volátiles y carbono. Estos vapores suelen ser de color blanco. La pirólisis de la madera comienza a una temperatura menor a los 400 °F (204 °C), que es inferior a la temperatura requerida para la ignición de los vapores desprendidos. En la construcción de viviendas se siguen usando productos basados en madera para las estructuras de paredes, como base de pisos y techos. Sin embargo, el aislamiento, los materiales de acabados en interiores y el contenido son construidos o contienen materiales sintéticos como cloruro de polivinilo, polietileno, poliestireno, polipropileno y poliuretano. Hoy en día la espuma de poliuretano flexible es uno de los materiales más usados en muebles tapizados. La **Tabla 4.11** muestra cómo el proceso de pirólisis de la madera y el de la espuma de poliuretano es diferente.

Los combustibles sólidos tienen una forma y un tamaño definidos, lo que afecta significativamente la facilidad con que ellos se encienden. La primera consideración es el área de la superficie del combustible en proporción con su masa, lo que se llama **relación de superficie/masa**. Uno de los mejores ejemplos de esto es un árbol grande:

1. Para producir madera, el árbol debe ser talado y cortado en troncos. El área de la superficie de este tronco es baja en comparación con su masa; por lo tanto, el índice de superficie-masa es bajo.
2. El tronco es luego cortado en tablas. Esto reduce la masa de las tablas individuales en comparación con el tronco. El área de la superficie resultante aumenta, de modo que aumenta el índice de superficie-masa.
3. Las astillas y el aserrín producidos cuando las tablas son cortadas en tablones adquieren un índice de superficie-masa aún mayor.
4. Si los tablones son pulidos o lijados, las virutas o el aserrín tienen el mayor índice de superficie-masa en comparación con los demás ejemplos.

A medida que el índice aumenta, las partículas del combustible se dividen más finamente, así como la viruta o el aserrín. Por lo tanto, la capacidad de las partículas para encenderse aumenta enormemente. A medida que el área de la superficie aumenta, mayor parte del material queda expuesto al calor, lo que genera con mayor rapidez productos de la pirólisis en el combustible (**Imagen 4.25**).

La proximidad y orientación de un combustible sólido con respecto a la fuente de calor también afecta la manera en que se quema (**Imagen 4.26**). Por ejemplo, si se prende una esquina de un tablero de madera contrachapada (*plywood*) de 1/8-pulgada (3 mm) que se encuentra horizontalmente (a nivel plano), el fuego consumirá el combustible a un índice relativamente bajo. El mismo tipo de tablero en una posición vertical (en un borde) se quemará mucho más rápido puesto que los vapores calientes suben a través de un área de superficie mayor y transfiere más calor al tablero.

## Oxígeno

El oxígeno en el aire es el principal agente oxidante en muchos fuegos. Por lo regular, el aire cuenta con aproximadamente 21 % de oxígeno. La energía liberada en el fuego es directamente proporcional a la cantidad de oxígeno disponible para la combustión. Cuando un fuego se enciende en un área abierta en la que el aire es abundante liberará energía basada en un área de superficie dada. En cambio, cuando un fuego se enciende en un compartimento con aire limitado solo puede reaccionar con el oxígeno contenido allí y cualquier otro provisto a través de aperturas.

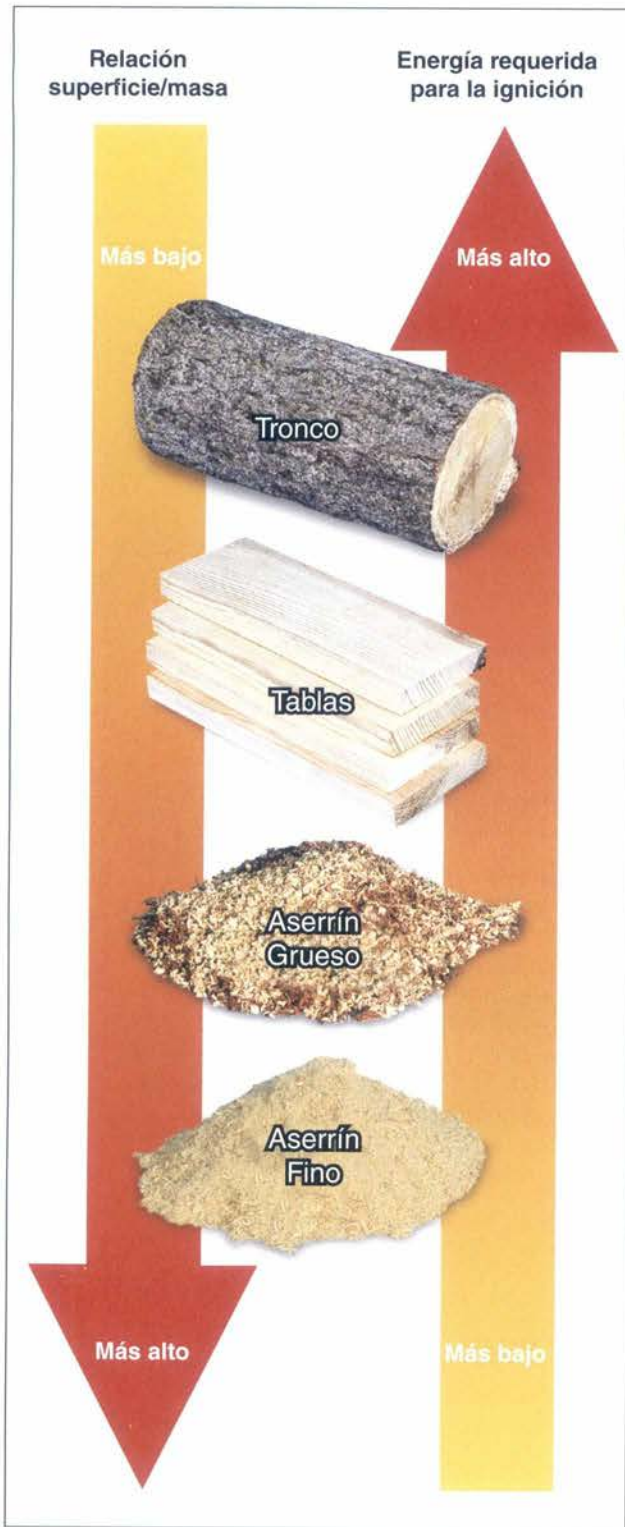
**Tabla 4.11**  
**Pirólisis de la madera y de la espuma de poliuretano**

Madera	Espuma de poliuretano (PUF)
<p align="center"><b>Nivel 1</b></p> <p><b>Temperatura:</b> menos de 392 °F (200 °C)</p> <p><b>Cambios físicos y químicos:</b> la humedad se libera cuando la madera comienza a secarse; los materiales combustibles y no combustibles se liberan a la atmósfera, aunque no hay calor suficiente para encenderlos.</p>	<p align="center"><b>Nivel 1</b></p> <p><b>Temperatura:</b> menos de 392 °F (200 °C)</p> <p><b>Cambios físicos y químicos:</b> a medida que la espuma de poliuretano flexible (PUF) se degrada térmicamente (piroliza), se transforma en gases y líquidos combustibles.</p>
<p align="center"><b>Nivel 2</b></p> <p><b>Temperatura:</b> 392 °F – 536 °F (200 °C) - (280 °C)</p> <p><b>Cambios físicos y químicos:</b> se ha liberado la mayor parte de la humedad; ha comenzado la carbonización; el compuesto principal que se libera es el monóxido de carbono (CO); la ignición aún no ha ocurrido.</p>	<p align="center"><b>Nivel 2</b></p> <p><b>Temperatura:</b> 392 °F – 536 °F (200 °C) - (280 °C)</p> <p><b>Cambios físicos y químicos:</b> a medida que los polioles líquidos continúan calentándose, también se vaporizan en gases combustibles. La ignición de estos gases puede ocurrir en esta etapa.</p>
<p align="center"><b>Nivel 3</b></p> <p><b>Temperatura:</b> 536 °F – 932 °F (280 °C) - (500 °C)</p> <p><b>Cambios físicos y químicos:</b> tiene lugar una pirólisis rápida; se liberan compuestos combustibles y puede ocurrir ignición. El carbón vegetal se forma mediante el proceso de combustión.</p>	<p align="center"><b>Nivel 3</b></p> <p><b>Temperatura:</b> 536 °F – 932 °F (280 °C) - (500 °C)</p> <p><b>Cambios físicos y químicos:</b> la pirólisis continúa a un ritmo mayor. La ignición de PUF ocurre a 698 °F (370 °C). La autoignición de PUF puede ocurrir a temperaturas en el rango de 797 °F a 833 °F (425 °C a 445 °C). No se forma una capa de carbón.</p>
<p align="center"><b>Nivel 4</b></p> <p><b>Temperatura:</b> mayor que 932 °F (500 °C)</p> <p><b>Cambios físicos y químicos:</b> la combustión libre existe cuando el material de madera se convierte en gases inflamables.</p>	

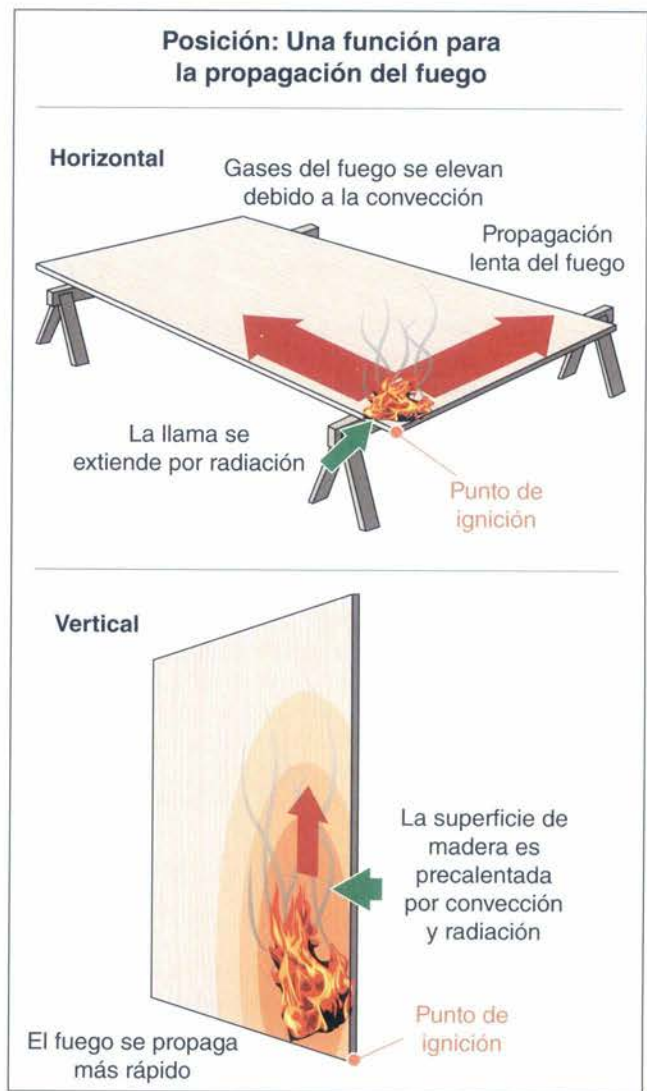
**Fuente:** Datos sobre la madera adaptados de NFPA *Fire Protection Handbook*®, 19ª edición, Volumen II, páginas 8-35 y 36. Datos sobre espuma de poliuretano de UL-FSRI, prueba ASTM 1929 (NIST NCSTAR 2); *Manual SFPE de Ingeniería de protección contra incendios*, 4a edición, Volumen II, and *The Ignition Handbook* (V. Babrauskas).

Por ende, en muchos fuegos en compartimentos, la energía liberada es proporcional a la cantidad limitada de oxígeno disponible y no a la cantidad de combustible disponible para quemar.

A temperaturas ambientales normales (68 °F [20 °C]), los materiales pueden prenderse y quemarse con concentraciones de oxígeno tan bajas como 15 %. Cuando la concentración de oxígeno es limitada, la combustión con llamas disminuirá causando una combustión sin llama. La no inflamabilidad o la combustión a fuego lento puede continuar con concentraciones extremadamente bajas de oxígeno aun cuando la temperatura del ambiente cercano sea relativamente baja. Sin embargo, a temperaturas de ambiente altas, la combustión inflamable puede continuar con concentraciones de oxígeno más bajas.



**Imagen 4.25** A medida que la relación superficie/masa de un combustible es mayor (aumenta), la energía requerida para la ignición es menor (disminuye).



**Imagen 4.26** Esta ilustración demuestra cómo la posición (orientación) de un combustible impacta la propagación del fuego.



## Efectos de la concentración de oxígeno

La concentración de oxígeno en la atmósfera tiene un efecto significativo tanto en el comportamiento del fuego como en nuestra capacidad para sobrevivir. Típicamente, una atmósfera se considera deficiente de oxígeno cuando tiene menos de 19,5 % de oxígeno y representa un peligro para las personas que no usan protección respiratoria, como un SCBA, para proporcionar aire fresco. Incluso si no son lo suficientemente bajos para activar una alarma, los niveles reducidos de oxígeno representan un peligro significativo en forma de contaminantes tóxicos. Los que responden deberían usar un SCBA en estas circunstancias, incluso si los niveles de oxígeno están por encima del 19,5 %. Cuando la concentración de oxígeno en la atmósfera supera el 23,5 %, se considera que está enriquecida y presenta un mayor riesgo de incendio.

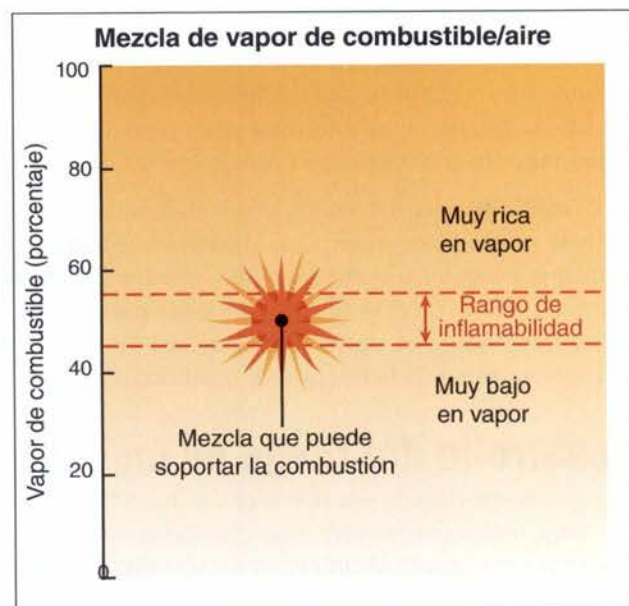
Cuando la concentración de oxígeno es más alta de lo normal, los materiales presentan diferentes características de combustión: los que se queman a niveles normales de oxígeno se consumen más intensamente y pueden encenderse con mayor facilidad en atmósferas enriquecidas con oxígeno. Algunos materiales derivados del petróleo entrarán en auto ignición en atmósferas enriquecidas con oxígeno.

Muchos materiales que no se queman a niveles normales de oxígeno lo hacen en atmósferas enriquecidas con oxígeno. Uno de estos materiales es el tejido resistente al fuego Nomex®, que se utiliza en muchos tipos de ropa protectora. A niveles normales de oxígeno, el Nomex no se quema. Pero cuando se coloca en una atmósfera enriquecida de aproximadamente 31 % de oxígeno, el Nomex se enciende y se quema vigorosamente.

Los incendios en atmósferas enriquecidas con oxígeno son más difíciles de extinguir y presentan un peligro potencial para la seguridad. Los bomberos pueden encontrar estas condiciones en hospitales y otros centros de salud, en algunas instalaciones industriales e incluso en hogares privados donde los ocupantes usan equipos de respiración que contienen oxígeno puro.

Para que la combustión ocurra después de que un combustible se convierta en un estado gaseoso, debe mezclarse con aire (un oxidante) en la proporción adecuada. El rango de concentraciones de vapor de combustible y aire se denomina **rango de inflamabilidad**. Este se determina utilizando el porcentaje por volumen de gas o vapor en el aire para el **límite inferior de explosividad (inflamabilidad) (LEL)** y para el **límite superior de explosividad (inflamabilidad) (UEL)**. El LEL es la concentración mínima de vapor de combustible y aire que soporta la combustión. Se dice que las concentraciones por debajo del LEL son demasiado pobres para quemar. La UEL es la concentración por encima de la cual no puede tener lugar la combustión. Se dice que las concentraciones sobre la UEL son demasiado ricas para quemar. Dentro del rango de inflamabilidad, hay una concentración ideal en la que hay exactamente la cantidad correcta de combustible y de oxígeno requeridos para la combustión (**Imagen 4.27**).

**Imagen 4.27** El rango de inflamabilidad es una banda relativamente estrecha de condiciones en las que arderá una mezcla de vapores de combustible y aire.



**Tabla 4.12**  
**Rangos de inflamabilidad de gases y líquidos inflamables comunes (vapor)**

Sustancia	Rango inflamable
Metano	5 % - 15 %
Propano	2,1 % - 9,5 %
Monóxido de carbono	12 % - 75 %
Gasolina	1,4 % - 7,4 %
Diésel	1,3 % - 6 %
Etanol	3,3 % - 19 %
Metanol	6 % - 35,5 %

*Fuente: Gestión de Operaciones de Emergencia Asistida por Computador (CAMEO)*

La **Tabla 4.12** presenta los rangos de inflamabilidad de algunos materiales comunes. Los manuales y documentos sobre sustancias químicas, como la *Guía de protección contra incendios de materiales peligrosos* de la NFPA, presentan los límites de inflamabilidad para gases combustibles. Esta guía y otras fuentes normalmente indican los límites a la temperatura y las presiones atmosféricas estándar. Las variaciones de temperatura y presión pueden hacer que el rango de inflamabilidad varíe considerablemente.

## Reacción química autosostenida

La reacción química autosostenida involucrada en la combustión con llamas es compleja. A medida que se produce la combustión con llamas, las moléculas de un gas combustible y oxígeno ( $O_2$ ) se separan para formar **radicales libres** (partes de moléculas con carga eléctrica, altamente reactivas). Estos se combinan con el oxígeno o con los elementos liberados del gas combustible para formar nuevas sustancias (moléculas) e incluso más radicales libres. El proceso también aumenta la velocidad de la reacción de oxidación.

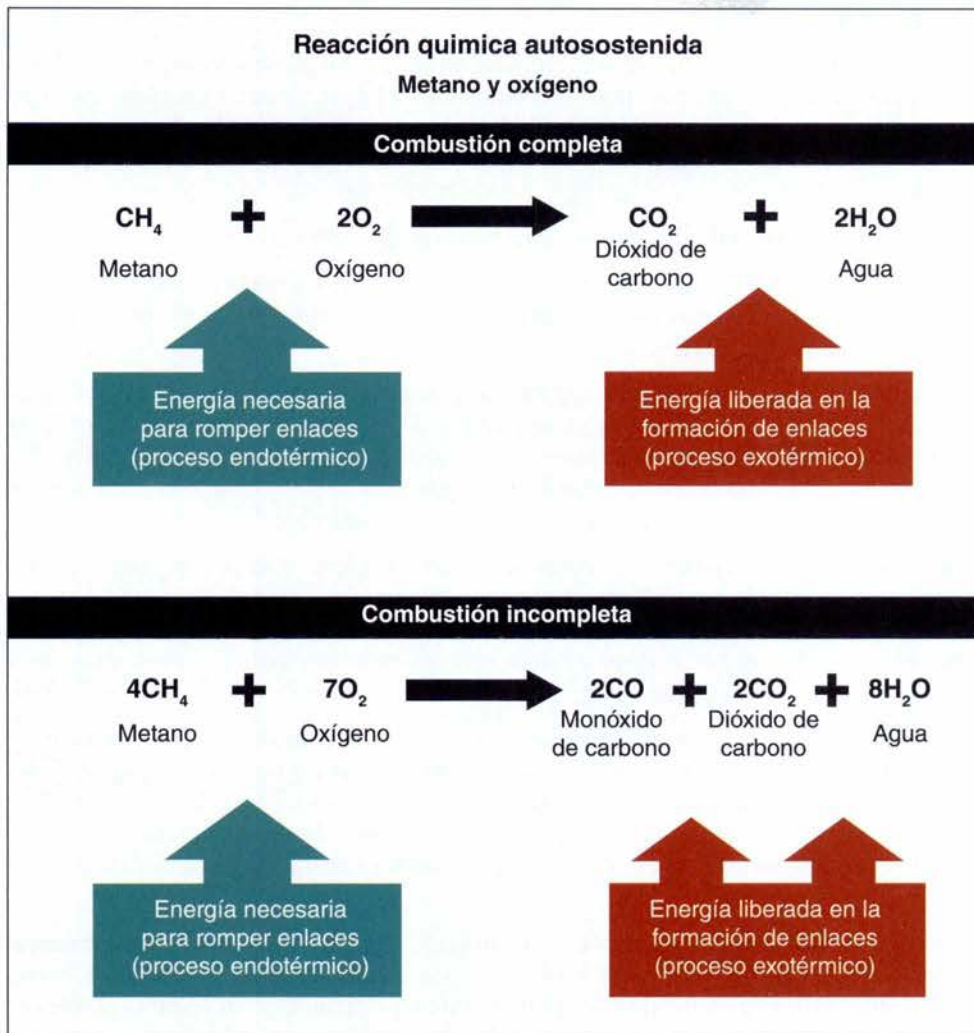
La combustión de un combustible simple como el metano o el oxígeno es un buen ejemplo. La oxidación completa del metano libera los elementos necesarios para crear dióxido de carbono y agua, además de liberar energía en forma de calor y luz. Los elementos liberados cuando las moléculas de metano se descomponen (carbono e hidrógeno) se recombinan con el oxígeno en el aire para formar  $CO_2$  y  $H_2O$  (dióxido de carbono y agua) (**Imagen 4.28**).

En varios puntos de la combustión del metano, este proceso da como resultado la producción de monóxido de carbono y formaldehído, que son inflamables y tóxicos. Cuando se queman combustibles químicamente más complejos, su combustión crea diferentes tipos de radicales libres y productos de combustión intermedia, muchos de los cuales también son inflamables y tóxicos.

La combustión con llamas es un ejemplo de una reacción química en cadena. El calor suficiente hará que el combustible y el oxígeno formen radicales libres e inicien la reacción química autosostenida. El fuego continuará ardiendo hasta que se consuma el combustible o el oxígeno, o hasta que un agente de extinción aplicado en cantidad suficiente interfiera con la reacción en curso. La **inhibición química de las llamas** se produce cuando un agente extintor, como un químico seco o un agente de reemplazo del halón, interfiere con esta reacción química, formando un producto estable y terminando la reacción de combustión.

## Desarrollo del fuego en un compartimento

Normalmente, cuando pensamos en un incendio, tendemos a limitar nuestra perspectiva a la quema del combustible. Sin embargo, en las secciones que siguen veremos que el compartimento que rodea el combustible que se quema tiene un impacto significativo en la ventilación disponible, el acceso a combustible adicional y las pérdidas o ganancias de calor.



**Imagen 4.28** Ilustración de los conceptos de combustión completa e incompleta del metano.

El desarrollo del fuego en un compartimento depende de si el fuego es **limitado por combustible** o **limitado por ventilación**. Cuando hay suficiente oxígeno disponible para la combustión con llamas, se dice que el fuego es limitado por combustible. Bajo estas condiciones, sus características, como la tasa de liberación de calor y la configuración, controlan el desarrollo del fuego. Mientras el fuego alcance más combustible inflamable, seguirá ardiendo.

Por el contrario, los incendios limitados por ventilación tienen acceso a todo el combustible necesario para mantener la combustión. Sin embargo, el fuego no tiene acceso a suficiente oxígeno para continuar quemándose o para extenderse a todos los combustibles disponibles.

Todos los incendios de compartimentos, comienzan en la etapa incipiente, como incendios limitados por combustible. Una vez que el fuego alcanza la etapa de crecimiento, seguirá siendo una de las dos: limitado por combustible, si hay suficiente oxígeno para soportar el crecimiento continuo, o limitado por ventilación, si el fuego consumiera todo el oxígeno disponible. Un incendio limitado por combustible generalmente avanzará en orden a través de las etapas de desarrollo del fuego. Los fuegos limitados por ventilación tienden a entrar en un estado temprano de decaimiento al final de la etapa de crecimiento porque ya no hay suficiente oxígeno disponible para que el fuego se desarrolle por completo.

La siguiente sección define las etapas de desarrollo del fuego y luego describe la progresión de un fuego en un compartimento. Los ejemplos en los cuadros de información describen el comportamiento de un fuego en una habitación con una ventana exterior, una puerta exterior y los muebles modernos típicos que se encuentran en una sala de estar residencial.

## Etapas de desarrollo del fuego

Los incendios se desarrollan a través de cuatro etapas: incipiente, crecimiento, desarrollo pleno o totalmente desarrollado y decaimiento. Estas etapas pueden ocurrir con cualquier incendio; sin embargo, hay tres factores clave que controlan cómo se desarrolla el incendio: las propiedades del combustible, la ventilación disponible y la conservación del calor. Dependiendo de estos factores, las etapas de desarrollo del fuego exhiben características diferentes o pueden ocurrir en una secuencia diferente.

Las cuatro etapas de desarrollo del fuego pueden definirse generalmente de la siguiente manera:

- **Etapas incipiente.** La etapa incipiente comienza con la ignición cuando los tres elementos del triángulo del fuego se juntan y comienza el proceso de combustión. En este punto, el fuego es pequeño y está limitado a una pequeña porción del combustible que se enciende por primera vez.
- **Etapas de crecimiento.** A medida que el fuego pasa de ser incipiente a la etapa de crecimiento, se involucra más cantidad de combustible inicial y aumenta la producción de calor y humo. Si hay otros combustibles cerca de la carga de combustible inicial, el calor radiante del fuego puede comenzar a generar pirólisis, lo que podría extender el fuego a nuevas cargas de combustible. El fuego puede continuar creciendo para desarrollarse completamente o puede entrar en un estado temprano de decaimiento, dependiendo del oxígeno disponible.
- **Etapas de desarrollo pleno o totalmente desarrollado.** La etapa de desarrollo pleno o totalmente desarrollado ocurre cuando todos los materiales combustibles en el compartimento se queman a su tasa de liberación de calor máxima en función del oxígeno disponible. El fuego está consumiendo la máxima cantidad de oxígeno que puede. Si el fuego está limitado a una carga de combustible, la etapa de desarrollo pleno ocurre cuando toda la carga está en llamas y el fuego ha alcanzado su tasa máxima de liberación de calor.
- **Etapas de decaimiento.** A medida que el fuego consume el combustible u oxígeno disponible y la velocidad de liberación de calor comienza a disminuir, el fuego entra en la etapa de decaimiento. Los fuegos limitados por combustible pueden auto extinguirse en esta etapa o reducirse a combustión incandescente o sin llama. Los fuegos limitados por ventilación también pueden auto extinguirse. Sin embargo, si el oxígeno está disponible durante la etapa de decaimiento antes de la extinción completa, es probable que estos fuegos vuelvan a entrar en etapa de crecimiento y se desarrollen rápidamente.

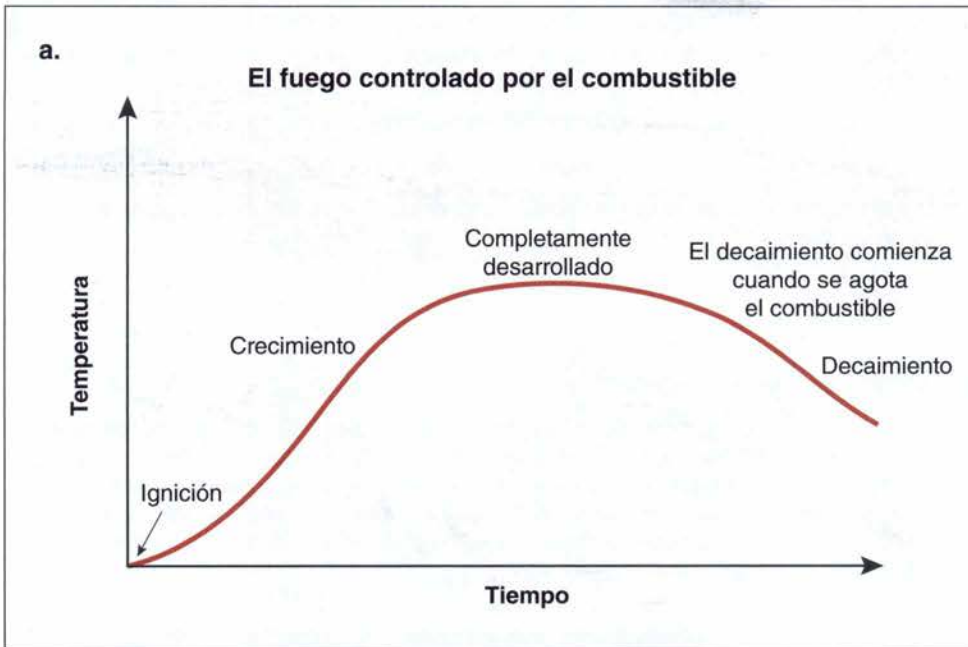
**Quema a cielo abierto** o una *quema libre* proporciona la curva de crecimiento de fuego más básica, como se muestra en la **Imagen 4.29a y b**. La quema a cielo abierto es representativa de un incendio limitado por combustible, como una fogata, una pila de estibas de madera o un sofá en un almacén grande, abierto y vacío. Este incendio se considera limitado por combustible, porque un solo elemento se quema, ya sea en el exterior o en un espacio grande y bien ventilado, lo que significa que hay suficiente oxígeno disponible para quemar el combustible hasta que ya no pueda sostener la combustión. A medida que se producen calor y gases del fuego, se alejan del combustible y se dispersan en todo el entorno, lejos del combustible que se quema. El único límite o control sobre la tasa de liberación de calor de un fuego que se quema al aire libre es el combustible en sí.

## Etapas incipiente

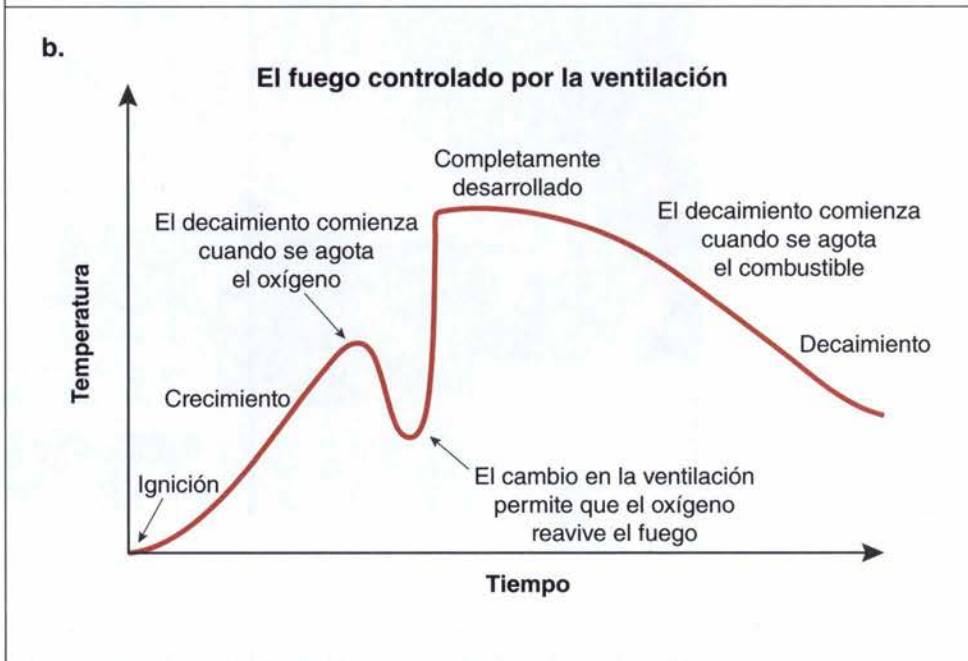
La etapa incipiente es cuando comienza un incendio (**Imagen 4.30**). Una vez que se produce la ignición y comienza el proceso de combustión, el desarrollo en esta etapa depende en gran medida de las características y la configuración del combustible involucrado (fuego limitado por combustible). El aire en el compartimento proporciona oxígeno adecuado para continuar el desarrollo del fuego. A continuación, se describe lo que ocurre cuando un incendio de compartimento entra en etapa incipiente:

- El calor radiante calienta el combustible adyacente y continúa el proceso de pirólisis. Una delgada columna de gases calientes y llamas se eleva y se mezcla con el aire más frío en el compartimento.
- Los gases calientes en el penacho aumentan hasta que encuentran el cielo raso y comienzan a extenderse horizontalmente. Este flujo de gases del fuego se llama **chorro fluido de techo**.
- Los gases calientes en contacto con las superficies del compartimento y su contenido transfieren calor a otros materiales.

En esta etapa temprana del desarrollo del incendio, el fuego aún no ha influido de manera significativa en el ambiente dentro del compartimento. La temperatura, aunque aumenta, es solo ligeramente superior a la ambiental en áreas a las que afectan directamente el fuego, el penacho y el chorro fluido de techo. Durante la etapa incipiente, los ocupantes pueden escapar del compartimento de manera segura, y un extintor portátil o una línea de manguera pequeña pueden extinguir el incendio de manera segura.



**Imagen 4.29a** Gráfico de líneas que muestra la progresión de un incendio controlado por combustible. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*



**Imagen 4.29b** Gráfico de líneas que muestra la progresión de un incendio controlado por ventilación. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*



**Imagen 4.30** Ejemplo de incendio incipiente en un sofá. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*

La transición de la etapa incipiente a la de crecimiento puede ocurrir rápidamente (en algunos casos, en segundos), dependiendo del tipo y la configuración del combustible involucrado. Un indicador visual de que un incendio está saliendo de la etapa incipiente es la altura de la llama. Cuando las llamas alcanzan los 2,5 ft (750 mm) de altura, el calor irradiado comienza a transferir más calor que la convección. El incendio entrará entonces en la etapa de crecimiento.

**PRECAUCIÓN:** La transición de la etapa incipiente a la de crecimiento puede ocurrir en cuestión de segundos, según el tipo y la configuración del combustible.



### Ejemplo de compartimento: etapa incipiente

Para comenzar nuestro ejemplo del desarrollo de un incendio en un compartimento, supongamos que se inició un incendio en los cojines de una silla en la esquina de una habitación. La ventana y la puerta están cerradas. Dentro de la habitación hay suficiente oxígeno para que el fuego incipiente arrastre el aire («bombee hacia adentro») y cree gases combustibles y el humo («bombee hacia afuera»). El fuego comienza a extenderse desde los cojines al resto de la silla. La espuma de poliuretano de los cojines se quema rápidamente creando un humo negro y rico en combustible que comienza a formar un penacho sobre la silla (**Imagen 4.31**).

**Imagen 4.31** El gráfico de la parte inferior izquierda muestra la progresión del incendio en su etapa incipiente. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*



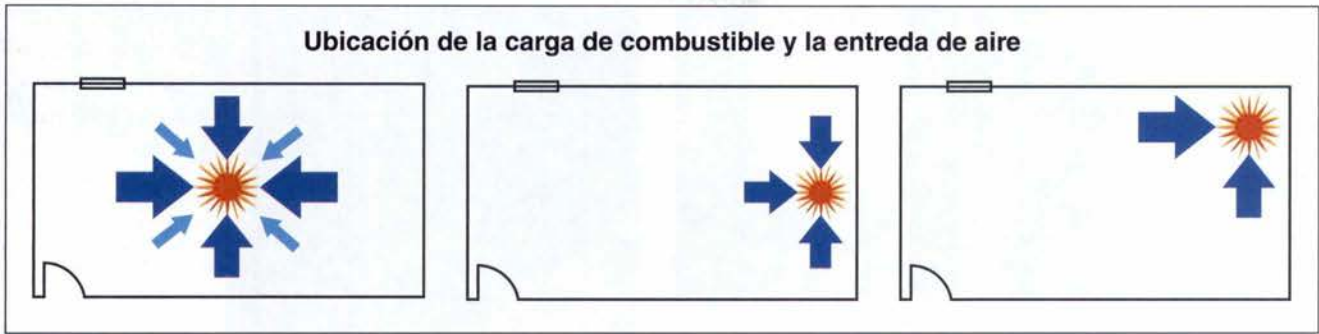
## Etapa de crecimiento

Dentro de la etapa de crecimiento, pueden ocurrir una variedad de comportamientos en el fuego, dependiendo del número de fuentes de ventilación. El fuego puede consumir todo el oxígeno disponible y entrar en un estado de decaimiento limitado por ventilación o la ventilación puede proporcionar suficiente oxígeno para un rápido crecimiento y alcanzar la etapa de desarrollo pleno. El rápido desarrollo del incendio usualmente ocurre durante la etapa de crecimiento. Comprender la dinámica del fuego es, en gran medida, entender todo lo que puede suceder durante la etapa de crecimiento.

**NOTA:** Tenga en cuenta que si el fuego entra en etapa de decaimiento limitado por ventilación no necesariamente indica que esté en su etapa final de desarrollo.

A medida que el fuego pasa de ser incipiente a una etapa de crecimiento, comienza a influir en el entorno y a crecer lo suficiente para que la configuración del compartimento y la cantidad de ventilación influyan en él. El primer efecto es la cantidad de aire que es arrastrado hacia el fuego.

Los incendios no confinados extraen aire de todos lados y el **arrastre** de este enfría los gases calientes del penacho, lo que reduce la longitud de la llama y la extensión vertical (**Imagen 4.32**). En un incendio de compartimento, la ubicación de la carga de combustible en relación con las paredes afecta la cantidad de aire que se arrastra y, por lo tanto, la cantidad de enfriamiento que tiene a lugar. Los siguientes principios describen el arrastre basado en el posicionamiento de las cargas de combustible:



**Imagen 4.32** La ubicación del fuego en un compartimento influye en la incorporación de aire al fuego.

- El fuego en las cargas de combustible ubicadas en el centro de la habitación puede arrastrar el aire desde todos los lados.
- El fuego en las cargas de combustible ubicadas cerca de las paredes solo puede arrastrar el aire desde tres lados.
- El fuego en las cargas de combustible ubicadas en las esquinas solo puede arrastrar el aire desde dos lados.

Por lo tanto, cuando la carga de combustible no está en el centro de la habitación, la **zona de combustión** (el área donde hay suficiente aire para alimentar el fuego) se expande verticalmente y se obtiene un penacho más grande. Un penacho más alto aumenta la temperatura en la capa de gas caliente a nivel del cielo raso y aumenta la velocidad de desarrollo del fuego. Además, las superficies calientes alrededor del fuego irradian calor hacia el combustible ardiente, lo que aumenta aún más la velocidad de desarrollo del fuego.

Se dice que un incendio está en la etapa de crecimiento hasta que la tasa de liberación de calor del fuego haya alcanzado su punto máximo, ya sea por falta de combustible o de oxígeno. En otras palabras, cuando un incendio no puede crecer más, sin la introducción de una nueva fuente de combustible o una nueva fuente de oxígeno, ha abandonado la etapa de crecimiento y se ha desarrollado completamente. Dos rutas comunes para el desarrollo completo son las siguientes:

- Incendios que consumen todo el oxígeno disponible y la transición a un estado de decaimiento limitado por ventilación.
- Incendios que tienen suficiente oxígeno y pasan a través de la etapa de crecimiento y posiblemente a un rápido desarrollo del fuego.

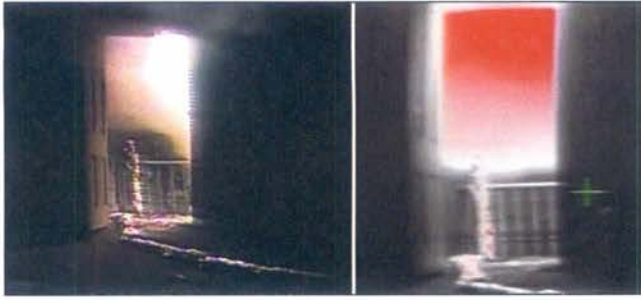


### **Ejemplo de compartimento: etapa de crecimiento - transición desde la etapa incipiente**

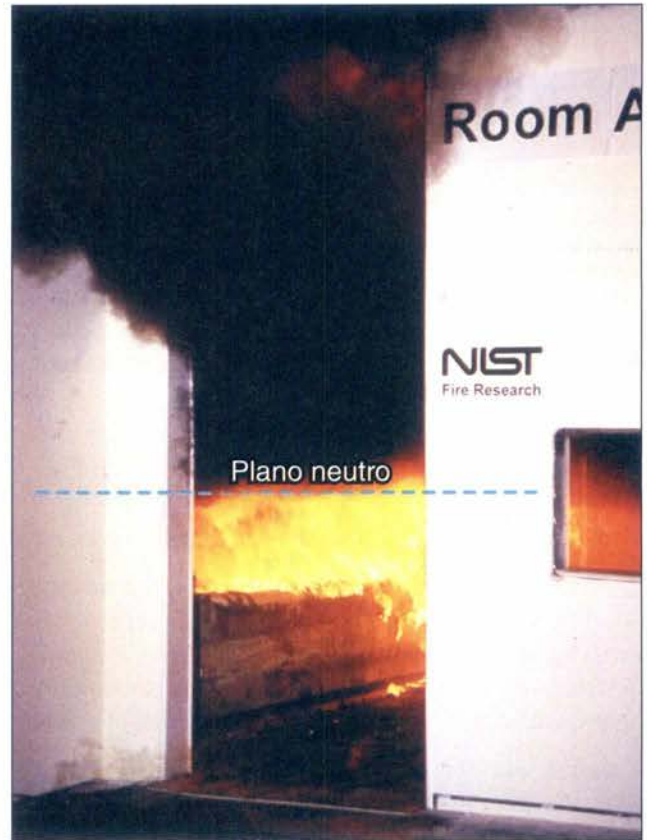
A medida que el fuego se extiende a la silla, toda se involucra. El aire entra solo por dos lados, así el fuego libera más energía que si estuviera en medio de la habitación, por lo tanto, acelera el crecimiento del fuego. La mesa auxiliar junto a la silla comienza a calentarse y a general pirólisis. El cielo raso sobre la silla comienza a ennegrecerse a medida que el penacho crece y transfiere calor al cielo raso y a las paredes circundantes. Un chorro fluido de techo comienza a formarse (**Imagen 4.33**).

**Imagen 4.33** El gráfico de esta imagen muestra la transición de un incendio desde la etapa incipiente a la etapa de crecimiento. Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.





**Imagen 4.34** La imagen de la izquierda muestra las condiciones visibles dentro de un compartimento que está en llamas. La imagen infrarroja de la derecha muestra las capas térmicas de los gases desde la parte superior (más caliente) del compartimento hasta la parte inferior (más fría). *Cortesía de NIST.*



**Imagen 4.35** Ilustración de la ubicación del plano neutro en un incendio en un compartimento. Los gases calientes están saliendo a través de la parte superior de la abertura de la puerta mientras que el aire frío entra a través de su parte inferior. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*

### Capas térmicas

Una vez que el chorro fluido del techo alcanza las paredes del compartimento, la capa de gas caliente comienza a desarrollarse. Las **capas térmicas** son la tendencia de los gases a formar estratos según la temperatura, la densidad del gas y la presión. Siempre que no haya una mezcla mecánica producida por un ventilador o un chorro de agua, los gases más calientes formarán la capa más alta, mientras que los gases más fríos formarán las capas más bajas (**Imagen 4.34**). Además de los efectos de la transferencia de calor a través de la radiación y la convección descritos anteriormente, la radiación de la capa de gas caliente también actúa para calentar las superficies interiores del compartimento y su contenido. Los cambios en la ventilación y la **trayectoria del flujo** pueden alterar significativamente las capas térmicas. La trayectoria de flujo se define como el espacio entre la entrada de aire y la salida de gases. Las aberturas múltiples (entradas y salidas) crean variadas rutas de flujo.

Los productos de la combustión del fuego comienzan a afectar el medioambiente dentro del compartimento. A medida que el fuego continúa creciendo, la capa de gas caliente dentro del compartimento gana masa y energía. Y a medida que esto sucede, también aumenta la presión. Una presión más alta hace que la capa de gas caliente se propague hacia abajo dentro del compartimento y lateralmente a través de cualquier abertura, como puertas o ventanas. Si no hay aberturas para el movimiento lateral, los gases con presión más alta no tienen una vía para seguir a un área de presión más baja. Como resultado, los gases calientes comenzarán a llenar el compartimento comenzando en el cielo raso y llenándolo hacia abajo.

Las **llamas aisladas** o intermitentes pueden moverse a través de la capa de gas caliente. La combustión de estos gases calientes indica que partes de la capa de gas caliente están dentro de su rango de inflamabilidad y que hay suficiente calor para causar la ignición. A medida que estos gases calientes circulan hacia los bordes exteriores del penacho o hacia los bordes inferiores de la capa de gas caliente, encuentran suficiente oxígeno para encenderse. Este fenómeno ocurre con frecuencia antes de una participación más importante de los productos de combustión inflamables en la capa de gas caliente. La aparición de llamas aisladas es a veces un indicador inmediato de *flashover*.

La interfaz entre las capas de gas caliente y la capa de aire más fría se conoce comúnmente como el **plano neutro** porque la presión neta es cero, o neutra, donde las capas se encuentran. El plano neutro existe en las aberturas por donde salen los gases calientes y el aire más frío ingresa al compartimento. En estas aberturas, los gases calientes a una presión superior a la ambiental salen por la parte superior de la abertura sobre el plano neutro. El aire de baja presión desde el exterior del compartimento entra en la abertura debajo del plano neutro (**Imagen 4.35**).

**Imagen 4.36** Esta imagen muestra la etapa de crecimiento de un incendio cuando comienzan a producirse capas térmicas dentro del compartimento. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*



### Ejemplo de compartimento: etapa de crecimiento - capas térmicas

El penacho proveniente de la silla ahora ha alcanzado el cielo raso y se ha convertido en un chorro fluido de techo. Los gases calientes y el humo rico en combustible comienzan a extenderse horizontalmente a través del cielo raso. Tanto la puerta como la ventana están cerradas, por lo que el humo no tiene forma de salir. El compartimento comienza a llenarse de gases calientes y humo. La línea divisoria entre el aire menguante y la creciente cantidad de humo en el compartimento baja constantemente hacia el piso. La mesa al fondo ahora está completamente involucrada con las llamas. Las paredes y el cielo raso también se han calentado y están irradiando calor hacia la habitación. La mesa de café ha comenzado la pirólisis y el televisor de pantalla plana ha comenzado a fundirse. Los materiales de hidrocarburos en el compartimento se queman de forma rápida e ineficiente creando un humo negro rico en combustible. La tasa de liberación de calor es alta, aunque el ambiente cerca del piso donde todavía hay aire podría ser sostenible para los bomberos (**Imagen 4.36**).

### *Transición a la etapa de decaimiento limitado por ventilación*

La mayoría de los incendios residenciales que se desarrollan más allá de la etapa incipiente son limitados por ventilación. Incluso cuando las puertas y ventanas están abiertas, el arrastre de aire insuficiente puede impedir que se desarrolle el fuego en función del combustible disponible. Cuando las ventanas están intactas y las puertas están cerradas, el fuego puede moverse aún más rápido a un estado de decaimiento limitado por ventilación. Mientras que un compartimento cerrado reduce la velocidad de liberación de calor, el combustible puede continuar la pirólisis y crear un humo rico en combustible.

A medida que la altura de la interfaz de la capa de gas caliente desciende hacia el piso, el mayor volumen de humo comienza a interrumpir el arrastre de aire fresco y oxígeno a la base del fuego y al penacho. Esta interrupción hace que el fuego arda con menos eficiencia. A medida que disminuye la eficiencia de la combustión (combustión incompleta), la tasa de liberación de calor disminuye y la cantidad de combustible sin quemar en la capa de gas caliente aumenta.

El fuego se encuentra ahora en un estado de decaimiento limitado por ventilación debido a que:

- No hay suficiente oxígeno para mantener la combustión.
- La tasa de liberación de calor ha disminuido hasta el punto de que los gases combustibles no se encenderán.

Aunque la tasa de liberación de calor disminuye cuando el fuego está limitado por ventilación, la temperatura en la habitación puede permanecer alta. Debido a que no hay suficiente oxígeno para mantener la combustión, el fuego tiene una menor tasa de liberación de calor, pero eso no significa que el ambiente sea sostenible. El compartimento se llena con gases ricos en combustible que solo necesitan más oxígeno para encenderse debido a las altas temperaturas.

Incluso si las temperaturas disminuyen, la pirólisis puede continuar. En estas condiciones, se puede acumular un gran volumen de productos inflamables de combustión dentro del compartimento. Estos gases son combustibles que pueden encenderse con una nueva fuente de oxígeno.

Si no existe otra fuente de oxígeno, el compartimento se llenará de humo negro y se enfriarán lentamente los gases combustibles. El compartimento no mostrará llamas visibles. Las características del combustible y la carga de combustible en los incendios típicos de hoy causan que se conviertan rápidamente en limitados por ventilación.

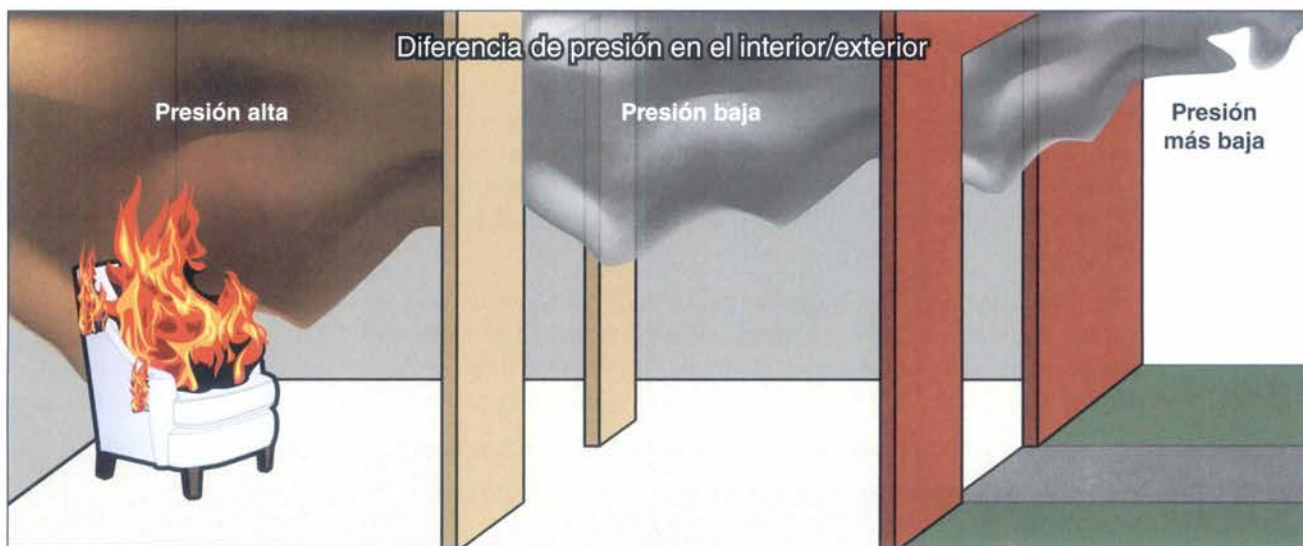
Para que crezca un fuego limitado por ventilación, se necesita un nuevo suministro de oxígeno. La ventilación introduce el aire exterior al fuego como esta nueva fuente de oxígeno. Si las ventanas o puertas fallan, la repentina introducción de aire fresco crea un rápido aumento en la velocidad de liberación de calor y el crecimiento del fuego. Este rápido aumento también puede ocurrir cuando los bomberos abren una puerta o una ventana para ingresar al compartimento para extinguir el fuego, lo que crea una nueva ruta de flujo (**Imagen 4.37**).



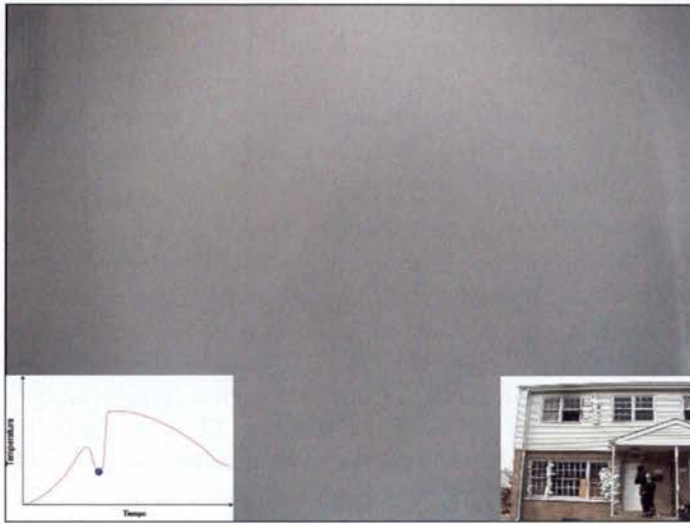
**Imagen 4.37** Al romper la ventana, el bombero introduce nuevo oxígeno en el compartimento, lo que aumenta la tasa de liberación de calor y el crecimiento del fuego. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*

**ADVERTENCIA:** Incluso la ventilación táctica coordinada aumenta la tasa de combustión en incendios limitados por ventilación.

La presión fuera del compartimento es más baja que la de adentro (**Imagen 4.38**). Debido a estas diferencias de presión, cualquier ventilación hacia el exterior (abrir una puerta interior o exterior, o romper o abrir una ventana) proporciona una ruta de flujo a lo largo de la cual los gases calientes pueden moverse desde el área de alta presión interior al área de baja presión exterior.



**Imagen 4.38** Las diferencias de presión entre el interior de un compartimento (más alta) y el exterior (más baja) proporcionan una ruta de flujo por la que pueden moverse los gases calientes.



**Imagen 4.39** Esta imagen muestra la transición de un incendio a la etapa de decaimiento limitada por ventilación. Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.



### Ejemplo de compartimento: etapa de crecimiento - transición a decaimiento limitado por ventilación

La ventana del compartimento no ha fallado y la puerta aún está cerrada. La capa de gas caliente en la habitación ha descendido a aproximadamente 2 ft (600 mm) del piso. La pequeña cantidad de oxígeno que queda debajo de la capa de gas ya no es suficiente para sostener la combustión en llamas (**Imagen 4.39**). No se ven llamas, pero el resto de los muebles de la habitación continúan lentamente la pirólisis, lo que agrega gases combustibles al compartimento. Las paredes y el techo aún irradian calor. Aunque la tasa de liberación de calor es baja, el uso de una cámara termográfica desde afuera del compartimento muestra temperaturas lo suficientemente altas como para encender gases inflamables. Desde afuera de la ventana solo se ve humo y hay pulsos de humo en las grietas alrededor de la puerta.

### Rápido desarrollo del fuego

El rápido desarrollo del fuego se refiere a la veloz transición desde la etapa de crecimiento o de decaimiento temprano a una de desarrollo pleno limitada por ventilación (**Imagen 4.40**). Entre estos eventos están el *flashover* y el *backdraft*.

**NOTA:** Las explosiones de humo también son incidentes de rápido desarrollo de incendios, pero implican más de un compartimento de la estructura. Estas se describirán más adelante en este capítulo.

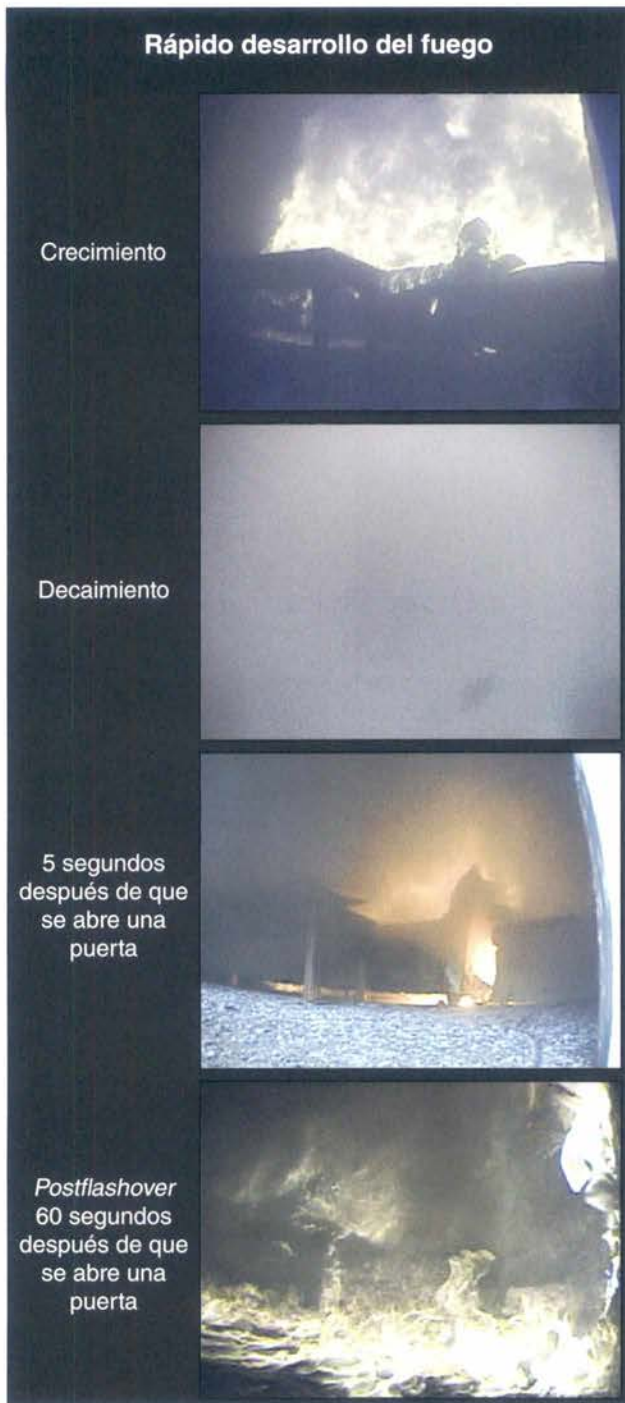
El rápido desarrollo de incendios ha sido responsable de numerosas muertes y lesiones de bomberos. Para protegerse y proteger a su tripulación, usted debe poder:

- Reconocer los indicadores del rápido desarrollo del fuego.
- Conocer las condiciones creadas por cada una de estas situaciones.
- Determinar la mejor acción a tomar antes de que ocurra.

En esta sección, se describen las condiciones de desarrollo pleno del fuego junto con sus indicadores.

**Flashover.** La transición rápida desde la etapa de crecimiento a la de desarrollo pleno se conoce como *flashover*. Cuando se produce un incendio, los materiales y gases combustibles en el compartimento se encienden casi simultáneamente; el resultado es la presencia de fuego en toda la sala. El *flashover* suele ocurrir durante la etapa de crecimiento del fuego, pero también se puede dar durante la etapa de desarrollo pleno como resultado de un cambio en la ventilación.

Las condiciones del *flashover* son definidas de varias formas; sin embargo, durante el *flashover*, el ambiente de la habitación cambia de una condición de dos capas (caliente en la parte superior, más fría en la parte inferior) a una, con gas caliente bien mezclado desde el piso al cielo raso. El ambiente es insostenible, incluso para bomberos totalmente protegidos. A medida que se produce un incendio, las temperaturas del gas en la habitación alcanzan 1.100 ° F (593 ° C) o más.



**Imagen 4.40** Esta serie de imágenes muestra la evolución de un incendio desde la etapa de crecimiento hasta la de decaimiento y, luego, muestra el rápido desarrollo del fuego que ocurre una vez que se abre una puerta. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*

Un indicador significativo de *flashover* es el *rollover*. El *rollover* describe una condición en la que los gases no quemados del incendio que se han acumulado en la parte superior de un compartimento se encienden y las llamas se propagan a través de la capa de gas caliente o a lo largo del cielo raso.

El *rollover* puede ocurrir durante la etapa de crecimiento a medida que la capa de gas caliente se forma en el cielo raso del compartimento. Pueden aparecer llamas en la capa superior cuando los gases combustibles alcanzan su temperatura de ignición. Mientras que las llamas suman al calor total generado en el compartimento, esta condición no es de *flashover*. El *rollover* generalmente precederá a un *flashover*, pero no siempre resultará en él. El *rollover* contribuye a las condiciones de ignición porque los gases que arden en los niveles superiores de la sala generan enormes cantidades de calor radiante que se transfiere a otros combustibles en la sala. Los nuevos combustibles comienzan la pirólisis y liberan los gases adicionales necesarios para el *flashover*.

El período de transición entre las condiciones de incendio antes del *flashover* (etapa de crecimiento/decaimiento limitada por ventilación) y después del *flashover* (etapa de desarrollo pleno) puede ocurrir rápidamente. La radiación de la capa superior calienta el contenido del compartimento hasta que alcanzan su temperatura de ignición simultáneamente. Cuando se enciende la capa superior, la cantidad de radiación aumenta a niveles que encienden rápidamente los contenidos en la habitación, incluso si están alejados del fuego. Durante el *flashover*, el volumen de los gases quemados puede aumentar aproximadamente  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  del volumen superior de la habitación para llenarla por completo y extenderse hacia afuera por las aberturas. Cuando se produce un *flashover*, los gases de la combustión son empujados hacia afuera por las aberturas del compartimento (como una puerta a otra habitación) a una velocidad sustancial.

Hay cuatro elementos comunes de *flashover*:

- **Transición en el desarrollo del fuego.** El *flashover* representa una transición desde la etapa de crecimiento a la etapa de desarrollo pleno.
- **Rapidez.** Aunque no es un evento instantáneo, el *flashover* ocurre rápidamente, a menudo en cuestión de segundos, para propagar el fuego completamente en todo el compartimento.
- **Compartimento.** Debe haber un espacio cerrado, como una habitación o un recinto.
- **Pirólisis de todas las superficies de combustible expuestas.** Los gases de todas las superficies combustibles en el espacio cerrado se encienden, siempre que haya suficiente oxígeno para soportar la combustión con llamas.

Dos factores interrelacionados determinan si un incendio dentro de un compartimento progresará a *flashover*. Primero, debe haber suficiente combustible y la tasa de liberación de calor debe ser suficiente para desarrollar las condiciones de *flashover*. Por ejemplo, la ignición del papel desechado en una pequeña papelerera de metal puede no tener suficiente calor para desarrollar condiciones de *flashover* en una habitación grande revestida con paneles de yeso (*drywall*). Pero por otro lado, la ignición de un sofá con cojines de espuma de poliuretano probablemente resultará en un *flashover* siempre que el fuego tenga suficiente oxígeno.

El segundo factor es la ventilación. Independientemente del tipo, la cantidad o la configuración del combustible, la liberación de calor depende del oxígeno. Un incendio en desarrollo debe tener suficiente oxígeno para alcanzar un *flashover*, una cantidad que una habitación sellada puede no proporcionar. El suministro de aire disponible limita la liberación de calor. Si no hay ventilación natural suficiente, el fuego puede entrar en la etapa de crecimiento pero no alcanzar la tasa de liberación de calor o la producción de combustible gaseoso para pasar a través de un *flashover* a un incendio totalmente desarrollado.

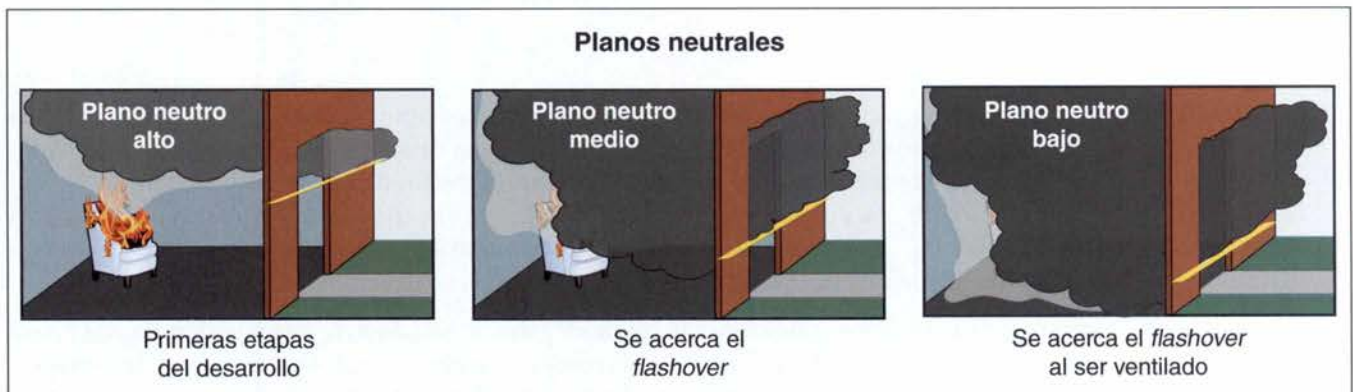
**NOTA:** La temperatura de autoignición del CO, el gas combustible más abundante creado en la mayoría de los incendios, es aproximadamente de 1.100 °F (595 °C).

La tasa de supervivencia de los bomberos es extremadamente baja en un *flashover*. Al nivel del piso, un flujo de calor de aproximadamente 20 kW/m<sup>2</sup> también es típico de las condiciones de un *rollover* al inicio del *flashover*. Una vez que las llamas comienzan a afectar una superficie, el flujo de calor puede oscilar entre 60 y 200 kW/m<sup>2</sup>. Como marco de referencia sobre el flujo de calor, tenga en cuenta que las pruebas de NIST realizadas en 2013 (Putorti, 2013) han demostrado que las piezas de la máscara del SCBA comienzan a fallar después de 5 minutos de exposición a un flujo de calor de 15 kW/m<sup>2</sup>. Usted debe tener en cuenta los siguientes indicadores de *flashover* para protegerse:

- **Indicadores de la construcción:** configuración interior, carga de combustible, propiedades térmicas y ventilación.
- **Indicadores del humo:** volumen, turbulencia, color de oscurecimiento, densidad óptica y descenso rápido de la capa de gas caliente o plano neutro.
- **Indicadores del calor:** aumento rápido de la temperatura en el compartimento, pirólisis del contenido o de la carga de combustible ubicada a alguna distancia del fuego, o superficies calientes.
- **Indicadores de la llama:** llamas aisladas o *rollover* en las capas de gas caliente o cerca del cielo raso.

Los niveles del plano neutro observados desde el exterior también son buenos indicadores del comportamiento del fuego dentro de la estructura, de la siguiente manera (**Imagen 4.41**):

- **Plano neutro alto.** Puede indicar que el fuego se encuentra en las primeras etapas de desarrollo. Recuerde que los cielos rasos altos pueden ocultar un incendio que ha alcanzado una etapa de desarrollo avanzada. Un plano neutro alto también puede indicar un incendio por encima del nivel donde usted se encuentra.
- **Plano neutro a nivel medio.** Podría indicar que el compartimento aún no está ventilado o que se está acercando el *flashover*.
- **Plano neutro a muy bajo nivel.** Puede indicar que el fuego está alcanzando condiciones de retroceso (*backdraft*). También podría indicar que un incendio está debajo de usted (incendio en un sótano o piso inferior).



**Imagen 4.41** Observar el plano neutral desde el exterior de una estructura puede dar indicaciones del comportamiento del fuego en el interior.

Cuando un fuego está en decaimiento limitado por ventilación, la introducción de nuevo oxígeno puede desencadenar un *flashover* rápidamente. Se puede producir un *flashover* cuando se dispone de suficiente oxígeno y ventilación para el crecimiento del fuego. Sin embargo, en una situación no controlada, puede ser difícil identificar en qué etapa se encuentra un incendio, por lo que los bomberos deberían asumir que puede producirse un *flashover* en cualquier momento siempre que las condiciones sean las adecuadas.

Un *flashover* puede que no ocurra en todos los compartimentos de un incendio, como en los compartimentos de áreas grandes o los de cielos rasos altos. Antes de que la energía térmica pueda acumularse dentro del compartimento, el desarrollo del fuego puede tomar una ruta alternativa y convertirse rápidamente en un incendio limitado por ventilación, lo que restringe la velocidad de liberación de calor y hace que el fuego ingrese en la etapa de decaimiento mientras continúa el proceso de pirólisis y aumenta el contenido de combustible del humo.



**Imagen 4.42** En esta imagen, el fuego crece rápidamente a medida que se introduce oxígeno fresco en el compartimento. Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.



### Ejemplo de compartimento: etapa de crecimiento - *flashover*

Retrocedamos un momento y cambiemos las condiciones de nuestro ejemplo. Cuando la capa de gas caliente alcanza aproximadamente la mitad del compartimento, un bombero abre la puerta para ventilar la habitación. Cuando se cerró la puerta, el fuego estaba en proceso de decaimiento limitado por ventilación. Con la introducción de aire fresco desde el exterior, el fuego crece rápidamente (**Imagen 4.42**). Los bomberos pueden observar el plano neutro con humo saliendo de la mitad superior de la puerta. La cantidad de humo aumenta y el plano neutro baja en la puerta a medida que más superficies de la habitación entran en pirólisis. Los bomberos observan las llamas que se mueven a través de la parte superior de la capa de gas caliente. Estas llamas irradian una gran cantidad de energía al contenido del compartimento, lo que hace que el contenido comience la pirólisis y libere más combustible mientras se calienta rápidamente a su temperatura de ignición. De repente, los gases calientes y el oxígeno entrante alcanzan la mezcla correcta y las llamas aisladas se convierten en una habitación llena de llamas. Todos los gases calientes se encienden a la vez. La tasa de liberación de calor aumenta dramáticamente y enciende todos los combustibles inflamables dentro del compartimento. Las llamas se extienden hacia arriba y alrededor del marco de la puerta abierta.

**Backdraft.** Un fuego en un compartimento limitado por ventilación puede producir un gran volumen de humo inflamable y otros gases debido a una combustión incompleta. Si bien la tasa de liberación de calor de un fuego limitado por ventilación disminuye, es posible que aún existan temperaturas elevadas dentro del compartimento. Un aumento en la ventilación, como abrir una puerta o ventana, puede resultar en una combustión explosiva y rápida de los gases inflamables, llamada *backdraft*. Este se produce en un espacio que contiene una alta concentración de gases inflamables calentados que carecen de suficiente oxígeno para la combustión con llamas.

Cuando en un compartimento existen condiciones potenciales para un *backdraft*, la introducción de una nueva fuente de oxígeno devolverá rápidamente el fuego a un estado completamente desarrollado (a menudo de forma explosiva). Un *backdraft* puede ocurrir con la creación de una apertura horizontal o vertical. Todo lo que se requiere es la mezcla de humo caliente y rico en combustible con el aire. Las condiciones de un *backdraft* pueden desarrollarse

dentro de una habitación, un espacio vacío o una edificación completa. Siempre que un compartimento o espacio contenga productos de combustión calientes, los bomberos deben considerar la posibilidad de un *backdraft* antes de hacer cualquier abertura en el compartimento. Los indicadores de *backdraft* incluyen:

- **Indicadores en la edificación:** configuración interior, carga de combustible, propiedades térmicas, cantidad de gases de combustible atrapados y la ventilación.
- **Indicadores del humo:** movimiento de humo pulsante alrededor de pequeñas aberturas en la edificación; ventanas manchadas por el humo.
- **Indicadores en el flujo de aire:** entrada de aire de alta velocidad.
- **Indicadores del calor:** alta temperatura, ruidos crepitantes o de rotura.
- **Indicadores de la llama:** llamas poco o nada visibles.

Los efectos de un *backdraft* pueden variar considerablemente dependiendo de varios factores, entre ellos:

- Volumen de humo
- Grado de confinamiento
- Temperatura del ambiente
- Presión
- Velocidad con la que se mezclan el combustible y el aire

No asuma que siempre se producirá un *backdraft* inmediatamente después de que se haga una abertura en la edificación o en el compartimento involucrado. Usted debe observar el humo en busca de indicadores de posible desarrollo rápido del incendio, incluidas las corrientes de aire que cambian de dirección o el humo que entra o sale. Hasta cierto punto, la violencia de un *backdraft* depende de la medida en que la mezcla de combustible/aire está confinada en el compartimento. Cuanto más confinado, más violento será el *backdraft*.



### **Ejemplo de compartimento: etapa de crecimiento - *backdraft***

Cambiemos de nuevo las condiciones en nuestro compartimento. Este está limitado por ventilación, y todos los productos derivados del petróleo en la habitación (cojines de sillas, plástico en el televisor de pantalla plana) han producido grandes cantidades de humo negro rico en combustible. La parte inferior de la capa de gas caliente está muy cerca del piso. No hay nada visible sino humo denso y negro a través de la ventana. En este momento, la ventana falla. El alto volumen de humo confinado se precipita hacia la nueva área de baja presión y se eleva por la ventana. El aire del exterior se precipita a la misma velocidad. Los gases calientes y el aire se mezclan tan rápidamente que alcanzan su límite explosivo casi de inmediato. Las llamas se propagan a través de los gases calientes aparentemente a la vez y una explosión de fuego surge de la ventana abierta.

## **Etapa de desarrollo pleno o totalmente desarrollado**

La etapa de desarrollo pleno ocurre cuando la tasa de liberación de calor del fuego ha alcanzado su máximo punto, debido a la falta de combustible u oxígeno. Hay dos tipos principales de incendios en esta etapa: los limitados por ventilación y los limitados por combustible. El factor que limita la velocidad máxima de liberación de calor se utiliza para identificar qué tipo de fuego desarrollado completamente existe.

Los bomberos a menudo usan de manera inadecuada el término «desarrollo pleno» para decir que el incendio ya no puede crecer. Una descripción más precisa sería que el incendio ha crecido tanto como pudo. Las nuevas fuentes de combustible introducidas después del desarrollo pleno permitirán que los incendios limitados por combustible crezcan. De la misma forma, las nuevas fuentes de oxígeno introducidas después del desarrollo pleno permitirán que crezcan los incendios limitados por ventilación.

### ***Condiciones limitadas por combustible***

El combustible disponible restringe el pico de liberación de calor en un incendio con desarrollo pleno limitado por combustible. Para aumentar la velocidad de liberación de calor, el método más eficaz es proporcionar más combustible.

Una fogata ubicada en un círculo para quemar es un buen ejemplo de condiciones limitadas por combustible. El fuego alcanza su punto máximo cuando todo el combustible se involucra.

Técnicamente hablando, la mayoría de los incendios compartimentales, incluso aquellos que están ventilados y tienen ambientes interiores insostenibles, son limitados por ventilación. Agregar puntos de ventilación a un incendio de un compartimento que ya está ventilado agregará oxígeno que permitirá que el fuego crezca. El desarrollo pleno limitado por combustible, por lo general, ocurre cuando los incendios no están contenidos dentro de compartimentos, como incendios forestales, incendios en vehículos o incendios de estructuras colapsadas.



### Ejemplo de compartimento: desarrollo pleno - condiciones limitadas por combustible

Supongamos que el *flashover* ocurrió en el compartimento un poco después de que un bombero abriera la puerta para ventilar. Como resultado, todos los combustibles disponibles en el compartimento se quemaron. Supongamos además que el compartimento se quemó hasta que una de las paredes y la parte contigua del cielo raso colapsaron. El fuego tuvo acceso directamente al aire exterior sin las limitaciones de ventilación de la puerta. Ahora el fuego tiene acceso sin restricciones a un suministro ilimitado de oxígeno y está consumiéndolo a la mayor capacidad que puede. Cualquier combustible disponible se quema, y las llamas, el humo, los gases calientes y las brasas salen del compartimento a través de la abertura. En este punto, los bomberos no tienen más remedio que proteger las exposiciones circundantes (edificaciones vecinas o vegetación) y contener el fuego desde el exterior.

### Condiciones limitadas por ventilación

En contraste, un fuego desarrollado completamente y limitado por ventilación carece del oxígeno para crecer debido a que la cantidad y el tamaño de las aberturas en el compartimento limitan el arrastre de aire. El fuego alcanza un pico cuando consume todo el oxígeno disponible de la entrada de aire, típicamente con combustión incompleta. Hay combustible adicional disponible y el combustible gaseoso está saliendo del compartimento en el humo; sin embargo, el fuego no puede liberar más energía. Permitir que entre aire adicional en el compartimento a través de una nueva abertura o agrandar la existente suministrará más oxígeno, lo que resultará en una mayor tasa de liberación de calor.

**ADVERTENCIA:** Incluso la ventilación táctica coordinada aumenta la tasa de combustión en incendios limitados por ventilación.

Los incendios desarrollados completamente limitados por ventilación representan una situación peligrosa para los bomberos. El potencial de falla de una ventana para proporcionar oxígeno fresco y aumentar la tasa de liberación de calor máxima puede poner en peligro tanto a los bomberos como a las posibles víctimas. Para reducir el riesgo de la falla impredecible de la ventana, los bomberos deben llevar el incendio limitado por ventilación a uno limitado por combustible. Con el alto calor de combustión que se encuentra en los muebles modernos, el único mecanismo para la transición del incendio es extinguir parte del combustible que se quema. No es posible hacer suficientes aberturas en un compartimento para pasar un incendio de condiciones limitadas por combustible a uno de condiciones limitadas por ventilación.

**ADVERTENCIA:** La ventilación adicional por sí sola no hará que un fuego limitado por ventilación se convierta en un fuego limitado por combustible.



### Ejemplo de compartimento: desarrollo pleno - condiciones limitadas por ventilación

Nuevamente, demos un paso atrás en el desarrollo de nuestro incendio. Asumamos esta vez que la ventana ya está ventilada y que los bomberos planean ingresar al compartimento a través de la puerta para un ataque interior. La cantidad de humo que sale de la ventana es significativa y más grande que antes, pero la cantidad de humo ya no aumenta; es un indicador de que el fuego está consumiendo la mayor cantidad de oxígeno posible a través de la abertura de la ventana (Imagen 4.43).

Los bomberos tienen dos opciones para controlar este tipo de fuego. Primero, podrían entrar por la puerta manteniéndose abajo y por debajo del humo para atacar directamente al fuego. Sin embargo, saben que abrir la puerta introducirá una nueva ruta de flujo para el aire que podría permitir que el fuego crezca. Entonces eligen su segunda opción. Un equipo enfría la capa de gas caliente utilizando un chorro directo desde afuera de la ventana, lo que disminuye la temperatura en el compartimento. Una vez que esta táctica reduce la tasa de liberación de calor, otro equipo toma una línea cargada a través de la puerta. El equipo exterior interrumpe las condiciones de desarrollo pleno del incendio, minimizando el impacto de una nueva fuente de ventilación en la puerta. El equipo de ataque interior encuentra un entorno con una tasa de liberación de calor menor y más condiciones sostenibles de las que tendría en la opción uno. Ellos son capaces de lograr la extinción total del incendio con mayor facilidad.



**Imagen 4.43** En esta imagen, el fuego alcanza la etapa de pleno desarrollo. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*

## Etapa de decaimiento

Se dice que un incendio está en la etapa de decaimiento cuando se queda sin combustible u oxígeno disponible, ya que ambos son parte integral del triángulo del fuego. Sin los tres componentes del triángulo, el fuego decaerá y se extinguirá.

En incendios limitados por combustible, la etapa de decaimiento suele ser la etapa final del incendio, lo que lleva a la autoextinción del fuego cuando se queda sin combustible disponible. Los incendios limitados por ventilación también pueden auto extinguirse debido a la falta de oxígeno. Ambas situaciones pueden dar lugar a la terminación de la reacción de combustión. Sin embargo, así como cuando se lanza otro tronco sobre una fogata incandescente, la introducción de nuevo oxígeno en un fuego limitado por ventilación puede hacer que vuelva a entrar en la etapa de crecimiento.

### *Decaimiento limitado por combustible*

Después de que un incendio limitado por combustible alcanza la etapa de desarrollo pleno, el fuego entrará en etapa de decaimiento a medida que el combustible es consumido. A medida que esto sucede y la tasa de liberación de calor comienza a disminuir, el fuego entra en la etapa de decaimiento. La tasa de liberación de calor disminuirá, pero la temperatura de los objetos circundantes puede permanecer alta durante algún tiempo debido al calor absorbido.

A menos que el compartimento se queme hasta el suelo, estos incendios rara vez entran en una etapa de decaimiento limitada por combustible. Si el compartimento falla y el fuego se abre a la atmósfera, entonces la cantidad de combustible disponible limitaría su capacidad para crecer.



**Imagen 4.44** Después de la aplicación de agua, el calor del fuego se ha reducido de modo que ya no se producirá la pirólisis del contenido y de los elementos estructurales. *Cortesía de Ron Moore, Departamento de Bomberos de McKinney (TX).*



### Ejemplo de compartimento: decaimiento limitado por combustible

Después de que la pared y el cielo raso fallan y el fuego continúa ardiendo, el compartimento ahora se colapsa en una pila de combustible y brasas que se enfrían lentamente. Todavía se ven algunas llamas, pero ya no hay suficiente combustible para sostener la combustión con llamas. Hay brasas y pequeñas cantidades de humo, pero el fuego básicamente se ha terminado.

Suponiendo que hubiera bomberos en la escena, el fuego podría haber llegado a la etapa de decaimiento cuando los bomberos aplicaron suficiente agua a los combustibles para que el calor ya no permitiera la pirólisis del contenido o la estructura. El agua también habría reducido en gran medida la tasa de liberación de calor a niveles sostenibles o incluso insignificantes (**Imagen 4.44**).

### *Decaimiento limitado por ventilación*

Cuando un incendio entra en estado de decaimiento limitado por ventilación, no necesariamente está en su última etapa de desarrollo. Como se dijo anteriormente, el fuego espera un nuevo suministro de oxígeno para volver a la etapa de crecimiento. Esta afirmación sucede incluso si ya se ha producido ventilación en el compartimento.

Para garantizar que la etapa de decaimiento de un incendio limitado por ventilación sea la etapa final, se debe llevar a cabo una transición controlada desde un incendio limitado por ventilación a uno limitado por combustible. Para obtener este control, los bomberos deben enfriar los gases calientes antes de que ocurra cualquier ventilación adicional o inmediatamente después de cualquier entrada forzada. Esta táctica disminuirá la probabilidad de que los gases se enciendan cuando se les suministre oxígeno fresco.

Si el compartimento no tiene aberturas de ventilación, la tasa de liberación de calor eventualmente disminuirá hasta el punto en que el calor se transfiera de manera natural hacia el exterior. Este proceso lleva tiempo y rara vez es una estrategia viable de lucha contra incendios porque los bomberos deben asegurarse de que no se produzca ventilación hasta que el compartimento transfiera todo el calor.



### Ejemplo de compartimento: decaimiento limitado por ventilación

Volvamos al punto donde el compartimento estaba en etapa de decaimiento limitado por ventilación. Recuerde, las temperaturas en el compartimento indican si los niveles de calor son suficientemente altos como para encender los gases combustibles, pero no hay suficiente oxígeno para soportar la combustión.

Los bomberos en la escena esperan hasta que las líneas de manguera estén listas y cargadas en el lugar antes de abrir la puerta para ingresar al incendio. El CI asigna un bombero para el control de la puerta, dos más al ataque y dos más como equipo de intervención rápida. El bombero que controla la puerta la abre. La tasa de liberación de calor aumenta por un momento, pero los bomberos de ataque abren la boquilla de la manguera y utilizan un chorro

directo para enfriar los gases. El humo cambia de color (se blanquea) y, después de unos momentos, aparece un plano neutro alto en la puerta. Las cámaras termográficas muestran una reducción de la temperatura en el compartimento. El equipo de la línea de mangueras avanza lentamente por la puerta y aplica agua al lugar del incendio (**Imagen 4.45**).

La coordinación en el equipo de bomberos ha controlado la transición de un entorno limitado por ventilación a uno limitado por combustible. Como resultado, el compartimento sigue en pie, está ventilado y libre de humo, desprende muy poco calor y presenta una temperatura sostenible.

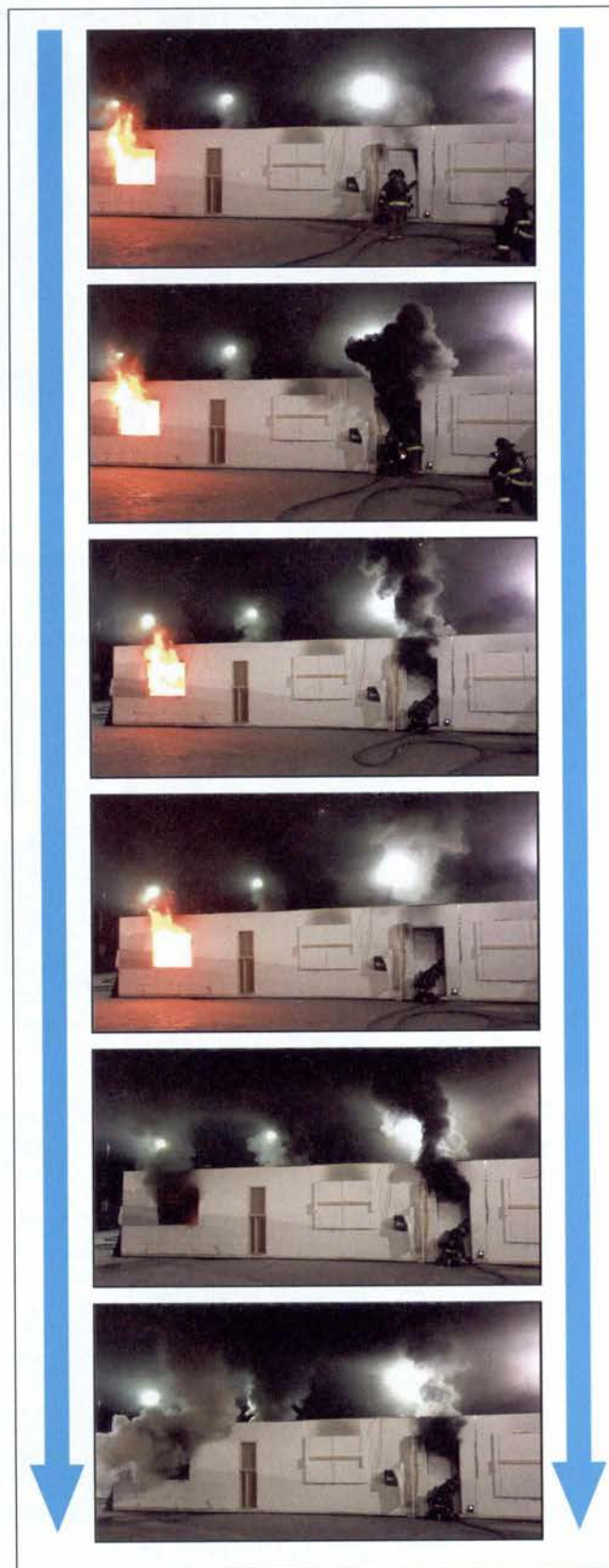
## Desarrollo del fuego en estructuras

Las estructuras se componen esencialmente de compartimentos individuales conectados por pasillos, escaleras o aberturas como puertas. Si un incendio comienza dentro de un compartimento, la forma en que crece o decae se basa en las curvas de crecimiento del modelo presentado en las secciones anteriores. Sin embargo, en una estructura, el fuego tiene el potencial de involucrar más de un compartimento o podría extenderse más allá del contenido de un compartimento e involucrar los elementos estructurales de la edificación en sí. Combatir un incendio en una estructura, a diferencia de un solo compartimento, es un desafío porque los bomberos necesitarán dimensionar la edificación, localizar el incendio y luego encontrar una manera de atacarlo.

### Trayectoria de flujo

En una estructura incendiada, el método por el cual el fuego recibe el oxígeno necesario para sostener la reacción de combustión se produce a través de una o varias vías de flujo. La trayectoria del flujo se compone de dos regiones: el flujo de aire ambiente hacia adentro y el escape de aire caliente hacia afuera (**Imagen 4.46**). El flujo es siempre unidireccional debido a las diferencias de presión donde el aire ambiente fluye hacia el lugar del incendio y reacciona con el combustible. Los productos de la combustión fluyen desde el fuego hacia la salida con baja presión.

En un incendio estructural, el plano del piso y las aberturas dentro de la estructura determinan la trayectoria de flujo disponible. Por ejemplo, los gases calientes de un incendio en un dormitorio saldrán por la puerta si está abierta y entrarán al pasillo. Si otras puertas en la estructura también están abiertas, las habitaciones contiguas se convierten en posibles partes de la trayectoria del flujo. La presión en estas otras habitaciones es más baja que la de la sala del incendio; por lo tanto, los gases calientes y el humo viajarán hacia esas



**Imagen 4.45** Esta secuencia de imágenes muestra los efectos del agua cuando enfría los gases calientes del fuego dentro de la estructura. *Cortesía de Dan Madrzykowski, UL-FSRI.*



Imagen 4.46 Ilustrando los conceptos de flujo de aire y flujo de escape.



Imagen 4.47 Esta imagen ilustra cómo el plano del piso y las aberturas dentro de la estructura determinan la trayectoria disponible de flujo de los gases calientes.

áreas a menos que se altere la dirección del flujo, por ejemplo, a través de la ventilación táctica o el control de la puerta (Imagen 4.47). El aire en esas habitaciones se arrastrará hacia el fuego cuando la estructura se llene de gases combustibles y el fuego crezca y se extienda.

La efectividad de una trayectoria de flujo para transportar el aire ambiente al lugar del incendio se basa en lo siguiente:

- Tamaño de la abertura de ventilación
- Longitud del camino recorrido
- Número de obstrucciones
- Diferencias de elevación entre la base del incendio y la apertura

Cuando los bomberos avanzan una línea de manguera o ventilan por ventanas para ingresar a la edificación, establecen nuevas trayectorias de flujo entre el compartimento del incendio y las aberturas exteriores de ventilación de la edificación. Estas nuevas trayectorias de flujo pueden permitir que el aire y, por lo tanto, el oxígeno alcancen el fuego, lo que aumenta la tasa de liberación de calor. Además, los gases calientes y ricos en combustible pueden fluir hacia una ventilación abierta al exterior de la edificación debido a que estos están a una presión más alta que el aire de afuera. Cuando los gases calientes se mezclan con el oxígeno del exterior, pueden estar lo suficientemente calientes como para la autoignición. Dado que cualquier ventilación crea nuevas vías de flujo

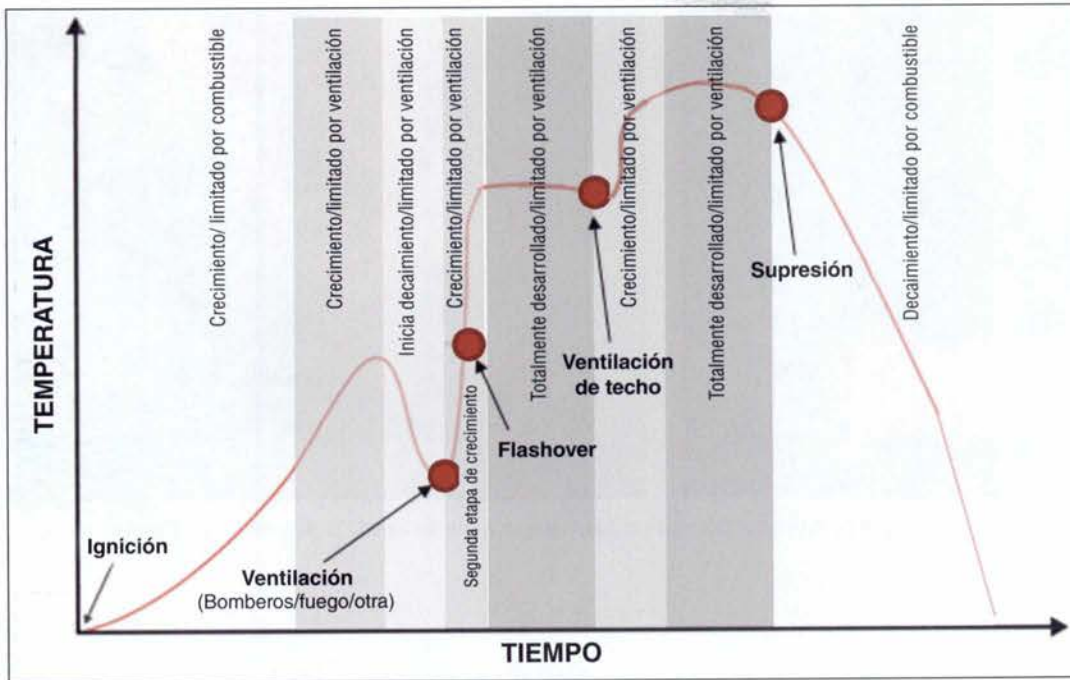


Imagen 4.48 Un modelo que muestra la evolución de un incendio en un compartimento. Cortesía de UL FSRI.

para el oxígeno y los gases calientes, los bomberos deben usar tácticas que controlan el oxígeno disponible y el calor generado para evitar la propagación de incendios no deseados.

Cuando los gases calientes siguen la trayectoria del flujo desde áreas de alta a baja presión, transfieren calor a una porción más grande de la estructura. También llevan los productos de la combustión a nuevas áreas de la estructura. Dado que estos gases también son combustibles, el fuego puede propagarse a través de ellos, más allá del área incendiada. Como resultado, los bomberos deberían conocer la ubicación de la trayectoria del flujo de los gases en la estructura y coordinar su ventilación y otras actividades en el interior.

Los bomberos que trabajan al lado del escape de la trayectoria de flujo sentirán la elevación de la temperatura a medida que aumenta la velocidad y la turbulencia, lo que acrecienta la transferencia de calor por convección. Esta transferencia es un fenómeno similar al enfriamiento por viento, excepto que la energía se transfiere de un flujo caliente (gas) a una superficie sólida (su EPP), en lugar de una superficie caliente (su piel) a un fluido más frío (aire). Si la ventilación no está bien coordinada, esta transferencia de calor, como la asociada con el *flashover* o el *backdraft*, puede ser insostenible incluso cuando se usa EPP. Si usted debe realizar operaciones en la trayectoria de flujo, reconozca que son riesgosas y potencialmente mortales. El tiempo que los bomberos están operando en la ruta de flujo debería estar estrictamente limitado. Ellos no deberían estar en el área más tiempo del necesario.

Un incendio estructural que se extiende más allá del lugar de origen puede tener dos compartimentos involucrados, cada uno en diferentes etapas de desarrollo. El lugar de origen puede estar en la etapa de desarrollo pleno limitado por ventilación, mientras que el compartimento adyacente puede estar en la etapa de crecimiento y próximo a un *flashover*. Comprender las curvas de crecimiento y las condiciones que se pueden esperar en función de la dinámica del fuego ayudará a los bomberos a encontrar o establecer un entorno sostenible para sus operaciones interiores. Las tácticas empleadas para la extinción de incendios, la ventilación, la búsqueda y el rescate se relacionan directamente con la dinámica del fuego que se produce en un incidente determinado.

## Ventilación y consideraciones del viento

Al comenzar un ataque en un incendio estructural limitado por ventilación, con solo ventilar aumentará progresivamente la tasa de liberación de calor y se propagará a medida que se realicen ventilaciones adicionales. Una vez que el fuego ha llenado los compartimentos de la estructura con combustible gaseoso caliente y sin quemar, utilizar la ventilación como única táctica no le permitirá adelantarse al fuego para limitar su crecimiento y propagación (Imagen 4.48).



**Imagen 4.49** La ventilación repentina de un incendio en un compartimento puede provocar un desarrollo rápido del fuego. *Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.*

### ***Ventilación no planificada***

La ventilación no planificada ocurre cuando una parte de la estructura falla, generalmente debido a la exposición al calor, lo que introduce una nueva fuente de oxígeno al incendio. Esta nueva fuente de oxígeno podría resultar por falla de:

- Ventanas (**Imagen 4.49**)
- Techos
- Puertas de acceso
- Paredes

La nueva fuente de oxígeno no tiene que originarse desde afuera de la edificación. Cuando los pisos fallan sobre los incendios de sótano, el aire interior de la estructura se convierte en una nueva fuente de oxígeno.

La ventilación no planificada es a menudo el resultado de:

- Acción de los ocupantes
- Efectos del incendio en la edificación (como acristalamiento de ventanas)
- Otras acciones distintas a la ventilación planificada, sistemática y coordinada

La ventilación no planificada, por definición, es inesperada. Cuando ocurre, la conciencia situacional es esencial para garantizar su seguridad y la de otros miembros de la tripulación.

### ***Condiciones del viento***

El viento puede aumentar la presión dentro de la estructura, conducir el humo y las llamas a otras partes de la estructura sin quemar o hacia el avance de los bomberos o alterar los esfuerzos de ventilación táctica. Usted debe tener en cuenta la dirección y velocidad del viento y utilizarlo a su favor para ayudar en la ventilación.

**ADVERTENCIA:** Las condiciones creadas por el viento pueden ocurrir en cualquier tipo de estructura. Velocidades del viento tan bajas como 10 mph (16 km/h) pueden crear condiciones de incendio.

Las condiciones del viento también pueden crear diferencias en la presión que pueden hacer fallar las ventanas. La presión exterior del lado de una estructura que se encuentra contra el viento será mayor que la presión sobre el lado a favor del viento. Como resultado, el aire en el exterior estará tratando constantemente de moverse a través de la estructura a lo largo de la trayectoria de alta a baja presión. Si la exposición al calor debilita las ventanas en este trayecto, la presión del viento podría causar que estas se quiebren, lo que produciría una nueva trayectoria de flujo para el oxígeno y los gases calientes.

**PRECAUCIÓN:** Un viento fuerte puede sobrepasar el efecto convectivo natural de un incendio y hacer que el humo y los gases calientes regresen a la edificación.

## Explosiones de humo

Una **explosión de humo** ocurre cuando una mezcla de gases combustibles no quemados y oxígeno entra en contacto con una fuente de ignición. Cuando el humo se aleja del fuego, puede acumularse en otras áreas y mezclarse con el aire. Cuando el combustible y el oxígeno están dentro del rango de inflamabilidad y entran en contacto con una fuente de ignición, el resultado será una combustión rápida y explosiva. Las explosiones de humo son violentas porque involucran combustible premezclado y oxígeno.

## Efectos de las operaciones de lucha contra incendios

Limitar o interrumpir uno o más de los elementos esenciales en el proceso de combustión representado en el tetraedro del fuego controla y apaga el fuego. Los bomberos pueden influir en la dinámica del fuego de varias maneras:

- **Reduciendo la temperatura** con el uso de agua o un agente espumante que enfríe los gases del incendio y las superficies calientes con el fin de extinguirlos.
- **Eliminando las fuentes de combustible** en el trayecto de propagación del incendio, típicamente, una táctica en incendios forestales o incendios de líquidos y gases.
- **Controlando la trayectoria de flujo/exclusión de oxígeno** con técnicas de control de puertas y ventilación táctica para controlar la cantidad de aire disponible para el fuego.
- **Inhibiendo de manera química la llama** con el uso de agentes de extinción que no sean agua y espuma, como algunos químicos secos, agentes halogenados (halones) y agentes 'limpios' que reemplazan el halón, para interrumpir la reacción de combustión y detener la producción de llamas.

**NOTA:** Las tácticas para estos métodos y las descripciones adicionales de sus beneficios se exponen en el capítulo 14, Control de incendios.

## Reacción del tipo de construcción de la edificación al fuego

A medida que las edificaciones se queman, el fuego crea una variedad de condiciones peligrosas. Usted debe tener en cuenta estas condiciones para mantenerse a salvo durante un incidente de emergencia. Una situación ya grave puede empeorar si los bomberos no reconocen el potencial de la situación y toman las acciones incorrectas.

Dos tipos principales de condiciones peligrosas en las edificaciones son:

- Condiciones que contribuyen a la propagación e intensidad del fuego
- Condiciones que hacen que la edificación sea susceptible al colapso

Estas dos condiciones están relacionadas. Las condiciones que contribuyen a la propagación y la intensidad del fuego aumentarán las probabilidades de colapso estructural. Las siguientes secciones describen algunas de estas condiciones.

## Tipo de construcción y lapso de integridad estructural

La mayoría de los códigos clasifican los distintos tipos de construcción según el tiempo que cada uno mantenga su integridad estructural. La **Tabla 4.13** muestra algunos ejemplos de la resistencia al fuego esperada de los cinco tipos de construcción. Cuánto tiempo una edificación mantendrá la integridad estructural no es una ciencia exacta. Las observaciones realizadas en la escena del incendio deben usarse para reevaluar las estimaciones basadas en el tipo de construcción de la edificación. Cuando usted responde a un incendio, hay muchos factores desconocidos que no se reflejan en las estimaciones de resistencia al fuego, como las siguientes:

- Duración del incendio hasta la hora de llegada
- Contenidos de la edificación
- Forma en que el contenido de la edificación afecta la tasa de liberación de calor
- Tasa de liberación de calor e intensidad del fuego
- Renovaciones al interior que pueden haber comprometido la resistencia al fuego

**Tabla 4.13**  
**Características de los líquidos inflamables y combustibles comunes**

	Tipo I		Tipo II			Tipo III		Tipo IV	Tipo V	
	442	332	222	111	000	211	200	2HH	111	000
<b>Paredes exteriores de carga</b>										
Soporta más de un piso, columnas u otros muros de carga.	4	3	2	1	0	2	2	2	1	0
Apoyando solo un piso.	4	3	2	1	0	2	2	2	1	0
Apoyando solo un techo.	4	3	1	1	0	2	2	2	1	0
<b>Paredes exteriores de carga</b>										
Soporta más de un piso, columnas u otros muros de carga.	4	3	2	1	0	1	0	2	1	0
Apoyando solo un piso.	3	2	2	1	0	1	0	1	1	0
Apoyando solo un techo.	3	2	1	1	0	1	0	1	1	
<b>Columnas</b>										
Soporta más de un piso, columnas u otros muros de carga.	4	3	2	1	0	1	0	H	1	0
Apoyando solo un piso.	3	2	2	1	0	1	0	H	1	0
Apoyando solo un techo.	3	2	1	1	0	1	0	H	1	0
<b>Vigas, soportes, cerchas y arcos</b>										
Soporta más de un piso, columnas u otros muros de carga.	4	3	2	1	0	1	0	H	1	0
Apoyando solo un piso.	2	2	2	1	0	1	0	H	1	0
Apoyando solo un techo.	2	2	1	1	0	1	0	H	1	0
<b>Ensamble de piso-cielo raso</b>	2	2	2	1	0	1	0	H	1	0
<b>Ensamblados de techo-cielo raso</b>	2	1 1/2	1	1	0	1	0	H	1	0
<b>Paredes interiores separadoras</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Paredes exteriores separadoras</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

H: Elementos de madera pesada  
Adaptado de la tabla 4.1.1 de NFPA 220.

Reimpreso con permiso de NFPA 220-2015, *Estándar sobre tipos de construcción de edificaciones*, Copyright© 2014, Asociación Nacional de Protección contra Incendios, Quincy, MA. Este material reimpreso no es la posición oficial y completa de la NFPA sobre el tema de referencia, el cual solo está representado por el estándar en su totalidad.

La información reunida en la escena brinda los mejores indicadores de integridad estructural. Para formarse opiniones sobre la seguridad en el incendio, usted puede comparar este conocimiento inmediato con cualquier información conocida sobre la estructura, como su tipo de construcción.



### Lo que esto significa para usted

Usted y su compañía responden a un incendio residencial en una casa moderna de una planta con un plano de piso abierto. A su llegada, usted puede ver a través de las ventanas del frente el fuego que arde en la sala de estar. Todas las ventanas están intactas, por lo que el fuego aún no ha sido ventilado en la estructura. La casa está empezando a llenarse de humo.

El oficial de su compañía le da instrucciones para que prepare escaleras, mangueras y equipos mientras realiza una evaluación de 360 grados de la estructura. Mientras él está ausente, usted nota un humo bronceado o marrón saliendo de los aleros bajo el techo. Cuando el oficial de la compañía regresa, él les ordena a usted y a otro bombero que se muevan a la parte trasera de la casa y realicen ventilación vertical en el techo para liberar el humo y así pueda ingresar un segundo equipo por la puerta principal. Usted señala el humo que sale por debajo de los aleros del techo. El oficial de la compañía cambia inmediatamente sus órdenes. Advierte a toda la tripulación que el fuego puede estar en el ático o en el espacio vacío de la casa y que no se permite a nadie en el techo ni en la estructura hasta que se haya aplicado agua al fuego desde el exterior.

Durante la evaluación inicial de la escena (*size up*), el oficial de la compañía no había visto el humo de los aleros porque apareció en su ausencia. Como no había humo saliendo de los aleros en la parte trasera de la casa, asumió que el techo podría no estar involucrado todavía y que podría ventilar la estructura rápidamente con un corte en él. Una vez supo que el fuego había alcanzado el espacio del ático, ya no tenía confianza en predecir la integridad estructural del techo y cambió sus órdenes. Las observaciones de las condiciones cambiantes en la escena le hicieron revisar sus prioridades tácticas.

## Carga de combustible de los elementos estructurales y contenidos

La cantidad total de contenido combustible de una edificación, espacio o área de incendio se conoce como **carga de combustible** (algunos documentos pueden usar el término carga de incendio). Todos los materiales combustibles en la construcción de edificaciones comprenden la carga de combustible, como:

- Estructura de madera
- Pisos
- Cielos rasos
- Mobiliario
- Materiales combustibles dentro de la edificación

Cuanto más materiales son combustibles, más combustibles hay disponibles para la pirólisis o para vaporizarse y quemarse. Su conocimiento y experiencia sobre la construcción y los tipos de edificaciones será esencial para determinar las cargas de combustible en una escena. Por ejemplo, una estructura de bloques de hormigón con un conjunto de techo de acero que contiene una tubería de acero almacenada tendrá una carga de combustible mucho más pequeña que una estructura de madera utilizada para almacenar líquidos inflamables. Los materiales de construcción que son inflamables se agregan a la carga de combustible de la estructura. Por ejemplo, en las edificaciones con estructura de madera, esta en sí misma es una fuente de combustible (**Imagen 4.50**).



**Imagen 4.50** El marco de madera de esta casa sirvió de combustible al fuego. Cortesía de Mike Wieder.



**Imagen 4.51** Estas imágenes demuestran cómo la espuma de poliuretano de la silla hace pirólisis rápidamente en condiciones de fuego. Cortesía de Dan Madrzykowski, NIST.

La orientación de los combustibles, así como su relación superficie/masa, también influyen en la velocidad e intensidad de la propagación del fuego. El contenido de una estructura suele ser la fuente de combustible más disponible, lo que en un incendio de compartimento influye significativamente para el desarrollo del fuego. Cuando los contenidos liberan rápidamente gran cantidad de calor, tanto la intensidad como la velocidad de desarrollo del fuego aumentarán. Por ejemplo, en condiciones de fuego, los muebles sintéticos, como los de espuma de poliuretano, comienzan a hacer pirólisis rápidamente, incluso cuando se encuentran a cierta distancia del origen del incendio. La composición química de la espuma y su alta relación superficie/masa aceleran el proceso de desarrollo del fuego (**Imagen 4.51**).

La proximidad y continuidad de los contenidos y combustibles estructurales también influyen en el desarrollo del fuego. La pirólisis de los combustibles ubicados en el nivel superior se produce más rápidamente que en los compartimentos adyacentes, debido al calor que irradia la capa de gas caliente. Los combustibles continuos, como los acabados interiores, propagarán rápidamente el fuego a través de los compartimentos.

Del mismo modo, la ubicación del fuego dentro de la edificación influirá en el desarrollo del incendio. Los incendios originados en niveles superiores generalmente se extienden hacia abajo mucho más lentamente siguiendo la trayectoria del combustible o como resultado de un colapso estructural. Cuando el fuego se origina en un nivel bajo de la edificación, como en el sótano o en el primer piso, el calor causará por convección la propagación vertical a través de:

- Atrios
- Escaleras
- Ejes verticales
- Espacios ocultos

Además, si los elementos estructurales de la edificación se involucran en el fuego, no solo la estructura en sí misma proporciona una nueva fuente de combustible, sino que el fuego puede estar ardiendo en cavidades ocultas en toda la edificación. Estos espacios hacen que sea más difícil encontrar y extinguir el fuego y aumentan el riesgo potencial de colapso de la construcción.

En instalaciones comerciales, industriales y de almacenamiento con grandes cargas de combustible, el fuego puede abrumar las capacidades del sistema de supresión de incendios y dificultar el acceso de los bomberos durante las operaciones de extinción (**Imagen 4.52**). Realizar y actualizar las encuestas pre incidentes es el medio más eficaz para establecer conciencia sobre estos peligros.



**Imagen 4.52** Estos rollos de papel de impresión son un ejemplo de carga pesada de combustible.

Cuanto mayor sea la carga de combustible, suponiendo que haya oxígeno disponible, más probable será que el fuego se comporte de las siguientes maneras:

- Si los elementos estructurales forman parte de la carga de combustible, la integridad estructural de la edificación se deteriora más rápidamente.
- Cuanto más tiempo arde el fuego, más se acelera la propagación del incendio.
- El fuego puede tener una mayor tasa de liberación de calor.
- La estructura puede auto ventilarse e introducir más oxígeno al incendio limitado por combustible, lo que acelera el desarrollo del fuego involucrando los elementos estructurales combustibles.

Si los incendios están limitados por ventilación, cargas más grandes de combustible indican una mayor cantidad de combustible sin quemar que podría reavivarse con la introducción de una nueva fuente de oxígeno. También puede haber en el aire una mayor cantidad de gases combustibles sin quemar por las cargas de combustible pirolizadas, pero no entrarán en combustión antes que la edificación se convierta en limitada por oxígeno. Si los bomberos no coordinan la ventilación, dicha edificación estará sujeta a *backdraft* y *flashover*.

### ***Mobiliarios y acabados***

Además de los elementos estructurales, los acabados interiores y muebles combustibles pueden ser un factor importante que influya en la propagación del incendio y son un elemento significativo en la pérdida de vidas en incendios. Los acabados interiores incluyen los revestimientos de ventanas, paredes y pisos, como cortinas, papel tapiz y alfombras. Los muebles pueden incluir:

- Mesas
- Sofás
- Escritorios
- Camas
- Otros artículos encontrados en las áreas ocupadas

### ***Revestimientos combustibles de paredes exteriores***

El material inflamable que contribuye a la carga de combustible de la estructura a menudo cubre las paredes exteriores. Los revestimientos de las paredes exteriores pueden agregar combustibles de carbono (revestimiento de madera) o derivados del petróleo (revestimiento de vinilo) a la carga de combustible. Pueden instalarse sobre un aislamiento exterior que, a su vez, es otra fuente de combustible. Cuando los revestimientos exteriores se exponen al calor y se incendian, pueden propagar el fuego a otras áreas de la estructura o a exposiciones adyacentes, como la vegetación o las edificaciones vecinas (**Imagen 4.53**).



**Imagen 4.53** El revestimiento de vinilo en el exterior de esta edificación proporcionó combustible para el fuego que se extendió por sus lados. *Cortesía de Ron Jeffers, Union City, NJ.*

### ***Materiales combustibles del techo***

La capacidad de combustión de la superficie de un techo es una preocupación básica para la seguridad contra incendios de toda una comunidad. Algunas de las regulaciones de incendio más recientes impuestas en América del Norte se relacionaron con cubiertas de techo combustibles pues fueron culpadas de causar varios incendios por las brasas en llamas que volaban de un techo a otro.

Tablillas de madera para techo (*shingle*), incluso cuando se tratan con productos ignífugos, pueden contribuir significativamente a la propagación del fuego. Este es un problema en incendios forestales de interfaz, donde los techos de madera sacudida han contribuido a grandes incendios. Los bomberos deben usar tácticas de protección contra la exposición para proteger techos combustibles en estructuras adyacentes al incendio estructural o forestal.

El entablado metálico del techo resistente al fuego pueden cubrirse con capas combustibles de aislamiento de espuma y papel de fieltro impermeabilizado con asfalto. Un incendio debajo de la plataforma de metal puede derretir y encender estos materiales combustibles, causando un segundo incendio sobre el techo.

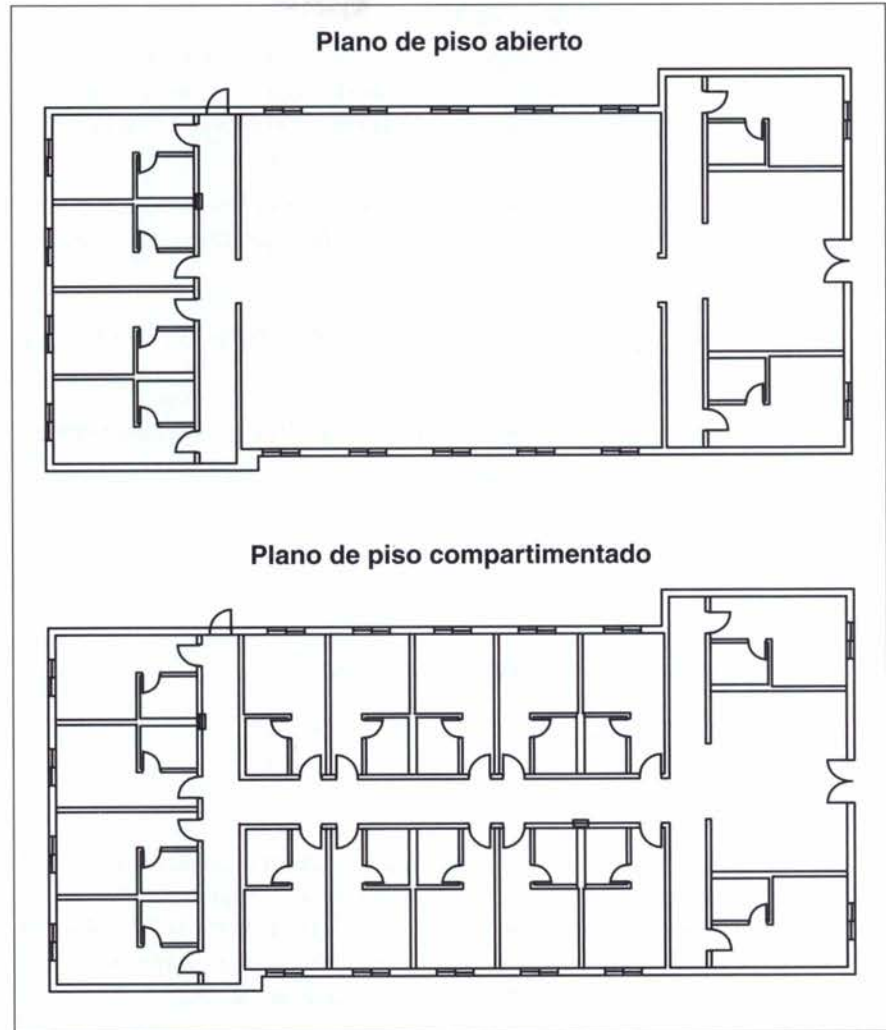
## **Compartimentación de edificaciones**

La disposición de los compartimentos en una edificación afecta directamente el desarrollo del incendio, la severidad, la posible duración y la intensidad. La **compartimentación** es el diseño de los diversos espacios abiertos en una estructura e incluye:

- Número de niveles por encima o por debajo del suelo
- Planta baja
- Aberturas entrepisos
- Vacíos contiguos o espacios ocultos
- Barreras contra el fuego

Cada uno de estos elementos puede contribuir a la propagación o contención del incendio. Por ejemplo, un espacio abierto de la planta baja puede contener muebles que proporcionen fuentes de combustible en todos los lados de un

**Imagen 4.54** Los planos de planta abierta tienen menos barreras contra incendios que los planos de planta compartimentada. La falta de barreras contra incendios puede contribuir a la propagación del fuego.



punto de ignición. A la inversa, una estructura compartimentada puede tener barreras contra incendios, como paredes, cielos rasos y puertas, que separan las fuentes de combustible y limitan el desarrollo del fuego a un compartimento individual (**Imagen 4.54**).

Cualquier espacio abierto sin una barrera completa contra fuego que lo divida se considera un compartimento. Dos habitaciones que se conectan con una puerta se consideran compartimentos independientes solo si la puerta entre ellas está cerrada. Cuando la puerta está abierta, un incendio en cualquiera de las habitaciones puede acceder al oxígeno de la habitación contigua y se afectarán entre sí más lentamente que si la pared intermedia no existiera en absoluto, pero una puerta cerrada retardará aún más el efecto del incendio a la habitación contigua. Durante las operaciones interiores, los bomberos deberían usar las puertas a su favor cerrándolas cuando sea apropiado, para controlar las fuentes de oxígeno disponibles.

En una edificación, a lo largo de cualquier trayectoria de flujo, el fuego seguirá al oxígeno si cuenta con suficiente combustible disponible. Los bomberos pueden aprovechar la compartimentación para controlar la trayectoria del flujo y así generar un comportamiento del fuego más predecible durante las operaciones.

## Efectos de las características de construcción de las edificaciones

Las características de construcción de la edificación, como los materiales livianos o los planos de planta abierta, tienen efectos directos sobre cómo se propagará el fuego en la estructura. Si usted no tiene en cuenta estas características, las actividades de lucha contra incendios pueden empeorar una emergencia, posiblemente de forma catastrófica, en lugar de ayudar a extinguir el fuego. Recuerde: una estructura incendiada es el lugar donde interactúan la dinámica del fuego y la construcción de edificaciones. Las siguientes secciones resaltan algunas de las características de construcción que los bomberos deberían considerar al combatir incendios estructurales.

### *Construcciones modernas vs. antiguas*

En los últimos 50 años, la construcción de edificaciones en América del Norte ha cambiado drásticamente. Los metros cuadrados de estructuras residenciales unifamiliares aumentaron más del 150 % entre 1973 y 2008. Al mismo tiempo, los tamaños de los lotes se han reducido, lo que reduce el acceso de los bomberos y aumenta los riesgos potenciales de exposición (Kerber, 2012a).

Los diseños interiores residenciales y los materiales de construcción también han cambiado. Las estructuras más antiguas (antes de 1990 aproximadamente) tenían las siguientes características:

- Compartimentos más pequeños
- Más compartimentos dentro de los mismos pies cuadrados que las casas modernas
- Ventanas que se pueden abrir para ventilación
- Bolsas de aire en cavidades vacías en la pared. Esta técnica de construcción utilizó el aire como aislamiento.

Las estructuras unifamiliares modernas pueden presentar:

- Planos de planta abierta
- Cielo rasos altos
- Atrios
- Componentes estructurales de fabricación ligera
- Ventanas selladas
- Cavidades en la pared
- Aislamiento sintético

Los materiales de construcción y los acabados interiores con elementos sintéticos y componentes livianos de madera compuesta aumentan la carga de combustible de la estructura y contribuyen a la creación de gases tóxicos durante un incendio. En los diseños que ahorran energía, las estructuras también tienden a contener incendios durante un período de tiempo más largo, lo que facilita ambientes ricos en combustible y limitados por ventilación. Estos problemas se magnifican en estructuras residenciales de grandes áreas.

Las estructuras residenciales comerciales, institucionales, educativas y multifamiliares también se basan en medidas de conservación de energía que aumentan la intensidad de un incendio y dificultan el uso de la ventilación táctica. Las estructuras comerciales de plano abierto, como las tiendas en bodegas, tienen una gran carga de combustible en el contenido y no tienen barreras físicas para evitar la propagación del fuego y el humo en el espacio (**Imagen 4.55**).

**Imagen 4.55** Un ejemplo de una estructura comercial con plano de planta abierta y alta carga combustible.



El uso de plásticos y otros materiales sintéticos también ha aumentado dramáticamente la carga de combustible en todos los tipos de ocupaciones. Estos materiales sintéticos producen grandes cantidades de gases tóxicos y combustibles. Los incendios en estos tipos de combustible pueden escalar rápidamente, alcanzar altas temperaturas y consumir rápidamente el oxígeno disponible de la estructura.

El conocimiento de la edificación es un gran activo cuando los bomberos toman decisiones relacionadas con la ventilación táctica. Esta información puede provenir de los planes preincidentes, informes de inspección u observaciones de tipos de estructuras similares. Las características a considerar en las edificaciones incluyen lo siguiente:

- Clasificación de la ocupación
- Tipo de construcción
- Tamaño del área y compartimentación
- Altura del cielo raso
- Número de plantas por encima y por debajo del nivel del suelo
- Número y tamaño de ventanas exteriores, puertas y otras aberturas en la pared
- Número y ubicación de escaleras, huecos de ascensores, ascensores para comidas, ductos y aberturas en los techos
- Exposiciones externas
- Extensión que conecta una edificación con estructuras contiguas
- Tipo y diseño de la construcción del techo
- Tipo y ubicación de los sistemas de protección contra incendios
- Contenidos
- Sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)

### ***Volumen del compartimento y altura del cielo raso***

Un incendio en un compartimento grande normalmente se desarrolla más lentamente que en uno pequeño. El desarrollo más lento del fuego se debe al mayor volumen de aire y al aumento de la distancia que el calor irradiado debe recorrer desde el fuego hasta el contenido que debe calentarse. Sin embargo, un gran volumen de aire apoyará el desarrollo de un incendio más grande antes de que la falta de ventilación se convierta en el factor limitante.

Un cielo raso alto también puede ser determinante para dificultar el desarrollo del fuego. En estructuras con esta característica, un gran volumen de humo caliente y gases pueden acumularse a este nivel, mientras que las condiciones en el piso permanecen relativamente sin cambios. Los bomberos pueden confundir las condiciones a nivel del piso con el estado real del desarrollo del fuego. Si la gran capa de gas caliente se enciende, la situación se vuelve inmediatamente peligrosa.

Los grandes espacios abiertos en las edificaciones contribuyen a la propagación del fuego hacia todas partes. Tales espacios se pueden encontrar en (**Imagen 4.56**):

- Almacenes/bodegas
- Iglesias
- Atrios grandes
- Edificaciones mercantiles de gran superficie
- Teatros



**Imagen 4.56** Los grandes espacios abiertos son comunes en almacenes, iglesias y estructuras mercantiles. Fotos de iglesias y locales comerciales cortesía de Ron Moore, McKinney (TX) FD.

También pueden existir grandes espacios entre techos y cielo rasos y bajo techos de lluvia. En estos espacios ocultos, el fuego puede viajar sin ser detectado, alimentándose de vigas de madera expuesta y otros combustibles. Cuando aparece humo a través de las aberturas en el techo o alrededor de los aleros, el punto de origen exacto puede ser engañoso.

### ***Propiedades térmicas de una edificación***

Las propiedades térmicas de una edificación pueden contribuir a un rápido desarrollo del fuego. También pueden hacer que la extinción sea más difícil y la reignición sea posible. Entre ellas están:

- **Aislamiento.** Mantiene el calor dentro de la edificación, lo que causa un aumento localizado de la temperatura y el crecimiento del fuego, y puede ser una fuente de combustible adicional.
- **Reflectividad del calor.** Aumenta la propagación del fuego a través de la transferencia de calor radiante desde las superficies de las paredes a las fuentes de combustible adyacentes.
- **Retención.** Mantiene la temperatura absorbiendo y liberando lentamente grandes cantidades de calor.



**Imagen 4.57** Partes del techo de esta casa moderna fallaron durante un incendio y cayeron dentro de la edificación.

### ***Falla de vigas ligeras y viguetas***

El aumento en el uso de sistemas ligeros de construcción o de ingeniería y sistemas de soporte con cerchas representan un peligro para los bomberos. Las armaduras de madera y acero no protegidas pueden fallar luego de 5 a 10 minutos de exposición al fuego (Kerber et al, 2012b). Estas cerchas pueden fallar por la exposición al calor sin el contacto con la llama. La temperatura crítica para vigas de acero es de 1.000 °F (538 °C), temperatura en la que el acero comienza a debilitarse (SFPE 2016). Las placas metálicas de refuerzo en las vigas de madera pueden fallar rápidamente cuando se exponen al calor. Aunque los tratamientos de protección contra el fuego pueden mejorar la resistencia de las cerchas de madera y acero, la mayoría carecen de esta protección.

El techo tradicional de vigas de madera utiliza piezas macizas que tienden a perder fuerza gradualmente cuando se exponen al fuego. Esta pérdida de resistencia hace que un techo se vuelva blando o «esponjoso» antes de fallar. Si bien un techo blando o hundido es una indicación obvia de falla estructural, no debería considerarse el único signo de colapso inminente.

Las casas más modernas pueden usar viguetas de ingeniería que se queman más rápidamente y fallan antes de que el fuego afecte el entablado del techo, por lo que la madera contrachapada u OSB utilizada para el revestimiento del techo puede no mostrar signos de hundimiento durante un incendio. Cuando las cerchas fallan primero, piezas enteras de la plataforma pueden caer en el fuego (**Imagen 4.57**). Hasta que se caigan, puede que no haya indicios de que un bombero esté en peligro de caerse al «sondear» el techo o incluso estar parado en él. Las observaciones sobre la ubicación del incendio, su comportamiento y actividad, y la ubicación del humo generado son claves para establecer

la seguridad del techo. Las observaciones visuales del exterior del techo pueden no ser suficientes. Las cuadrillas del exterior, el interior y el techo deberían comunicarse entre sí durante un incidente para vigilar la seguridad del techo.

**NOTA:** Las viguetas utilizadas para soportar pisos en estructuras de varios niveles pueden reaccionar al fuego de la misma manera que las vigas del techo. Los pisos sobre los incendios de un sótano son especialmente propensos a fallas en las viguetas.

**ADVERTENCIA:** Piezas enteras de entablado pueden caer al fuego cuando fallan cerchas ligeras. Es posible que desde el exterior no haya indicaciones que nos digan si las cerchas ya no soportan el entablado del techo.

Un contorno arqueado o curvo a menudo indica un techo con cerchas de «arco tenzado». Antes de 1960, el diseño del techo con este tipo de cerchas era uno de los más comunes para grandes estructuras comerciales e industriales. Se usaba en instalaciones donde se necesitaban grandes espacios de piso abierto con pocos soportes interiores, como:

- Concesionarios de automóviles e instalaciones de reparación
- Pistas de bolos
- Tiendas de comestibles
- Complejos industriales

Los principios de la construcción con cerchas de arco tenzado son similares a otros tipos de construcción. Los elementos de la red forman una serie de triángulos que transfieren la tensión de la cuerda inferior y la compresión de la cuerda superior de la cercha a los muros de carga (**Imagen 4.58**). Sin embargo, una diferencia con la cercha de arco tenzado es que las fuerzas de compresión dentro de la cuerda superior actúan para forzar los muros de carga hacia afuera y hacia abajo. Otra diferencia es que el espacio entre las cerchas es mayor. Los sistemas de techo con cercha de arco tenzado construidos antes de finales de la década de 1960 tienen un código común de deficiencia: los elementos de la cuerda inferior pueden tener una inadecuada resistencia a la tracción para soportar las cargas del techo prescritas por el código.



**Imagen 4.58** Un ejemplo de arco tenzado.

Algunas características de la construcción, como los parapetos, obstruyen la capacidad de identificar fácilmente los sistemas de cerchas de arco tenzado. Las inspecciones preincidentes deberían brindar información sobre las características de construcción ocultas y se deberían consultar durante la evaluación de la escena 360° (*size-up*) y las operaciones. El mapeo aéreo o las fotografías también pueden ayudar a identificar las estructuras de la armadura con cerchas de arco tenzado.

## Peligros en la construcción, renovación y demolición

El riesgo de incendio aumenta considerablemente cuando una estructura está en construcción, se está renovando o en espera de demolición. Los factores que contribuyen en estos casos son las cargas de combustible adicionales y las fuentes de ignición, como las llamas de antorchas de corte y las chispas de las operaciones de esmerilado o soldadura.

Algunos códigos de incendio locales exigen que los sistemas de montantes deben permanecer en funcionamiento durante la demolición de edificios de varios pisos. Desafortunadamente, los contratistas no siempre cumplen con estos requisitos. El resultado es que los sistemas de montantes y rociadores inoperantes se han convertido en un factor que contribuye a los incendios en edificios en demolición.

Las edificaciones en construcción están sujetas a una rápida propagación del incendio cuando están parcialmente terminadas debido a que muchas de las características de protección, tales como paneles de yeso y sistemas automáticos de extinción de incendios, aún no están en su lugar.



**Imagen 4.59** La madera expuesta en esta construcción contribuiría a la rápida propagación del fuego.



**Imagen 4.60** Durante la renovación de este hospital podría surgir una serie de situaciones peligrosas que contribuirían a la propagación del fuego. *Cortesía de Ron Moore, McKinney (TX) FD.*

Las edificaciones en construcción con estructuras de madera expuestas a menudo se consideran el equivalente a un almacén de madera vertical (**Imagen 4.59**). La falta de puertas u otras barreras que normalmente retardarían la propagación del fuego también contribuyen a su rápido crecimiento.

Las edificaciones abandonadas o las estructuras en proceso de renovación o demolición también están sujetas a un crecimiento del fuego más rápido de lo normal. Las paredes rotas, las escaleras abiertas, las puertas faltantes y los sistemas de extinción de incendios desactivados son contribuyentes potenciales. Las estructuras abandonadas pueden tener componentes faltantes o alterados, pueden estar muy deterioradas y pueden ser más susceptibles al colapso estructural. Otro factor a considerar son los incendios provocados en los sitios de construcción o demolición debido a su fácil acceso.

Durante una renovación podrían surgir situaciones peligrosas porque los ocupantes y sus pertenencias pueden permanecer en una parte de la edificación mientras el trabajo continúa en otra (**Imagen 4.60**). Los sistemas de detección o alarma de incendios pueden ser retirados del servicio o dañados durante la renovación. Si no se mantiene una buena limpieza, las acumulaciones de escombros y materiales de construcción pueden bloquear las salidas e impedir que los ocupantes puedan escapar de la edificación en una emergencia. También pueden dificultar la entrada de bomberos. Los contratistas o propietarios/ocupantes que realizan renovaciones no siempre siguen los códigos de construcción locales.

## Revisión del capítulo

1. ¿Cuál es la diferencia entre un cambio físico y una reacción química?
2. ¿Cuál es la diferencia entre el triángulo del fuego y el tetraedro del fuego?
3. ¿Cuál es la diferencia entre la ignición pilotada (dirigida) y la autoignición?
4. Enumere los diversos productos de combustión que se pueden encontrar en un incendio.
5. ¿Cómo influye el fuego en la presión de los gases circundantes?
6. ¿Cuál es la diferencia entre calor y temperatura?
7. Contraste los tres métodos de transferencia de calor.
8. ¿En qué se diferencian los combustibles gaseosos, líquidos y sólidos?
9. ¿Cómo se relaciona la concentración de oxígeno con la inflamabilidad?
10. ¿Cómo se producen los radicales libres en la reacción química que tiene lugar durante la combustión con llamas?
11. ¿Cómo difieren las cuatro etapas de desarrollo del fuego?
12. ¿Cómo pueden los bomberos afectar el comportamiento del fuego durante las operaciones de lucha contra incendios?
13. ¿Cómo afecta la construcción o configuración de una edificación al desarrollo de un incendio dentro de ella?

## Preguntas de discusión

1. ¿Por qué es importante que los bomberos comprendan los principios de la ciencia del fuego?
2. Dé un ejemplo de cada uno de los métodos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.
3. ¿Por qué es importante que los bomberos comprendan las propiedades de los combustibles?
4. ¿De qué manera la comprensión de las etapas de desarrollo del fuego ayuda a los bomberos durante las operaciones de extinción de incendios estructurales?
5. Haga una lista de cinco edificaciones en su jurisdicción. ¿Cómo afectarán las características de construcción de esas estructuras al desarrollo del fuego dentro de ellas?

## Notas finales del capítulo 4

Kerber, S. (2012a). *Análisis de los cambios en la dinámica de incendios residenciales y sus implicaciones en los marcos de tiempo operacionales de los bomberos*. Underwriters Laboratories, Inc.

Kerber, S., Madrzykowski D., Dalton J. y Backstrom B. (2012b). *Mejora de la seguridad contra incendios mediante la comprensión del rendimiento contra incendios de los sistemas de piso de ingeniería y el suministro de información al servicio de bomberos para la toma de decisiones tácticas*. Underwriters Laboratories, Inc.

Putorti, A. Jr., Mensch, A., Bryner, N. y Braga, G. (2013). *Rendimiento térmico del visor de la máscara de los equipos de respiración autocontenido expuestos al flujo de calor radiante, nota técnica de NIST 1785 (NIST.TN 1785)*.

*SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Hurley, M.J. et al. editors, Springer.

## Términos clave

**Agente reductor.** Combustible que se oxida o quema durante la combustión.

**Arrastre.** Extracción y transporte de partículas sólidas o gases por el flujo de un fluido.

**Asfixia.** Condición fatal causada por una deficiencia grave de oxígeno y un exceso de monóxido de carbono y/u otros gases en la sangre.

**Autocalentamiento.** Resultado de reacciones exotérmicas que ocurren espontáneamente en algunos materiales bajo ciertas condiciones, por lo que se genera calor a una velocidad suficiente para elevar la temperatura del material (reproducido con permiso de NFPA 921-2011, *Guía para investigaciones de incendios y explosiones*, Copyright 2011, NFPA).

**Autoignición.** Inicio de la combustión por calor pero sin chispa o llama (reproducido con permiso de NFPA 921-2011, *Guía para investigaciones de incendios y explosiones*, Copyright 2011, NFPA).

**Backdraft.** Explosión instantánea o quema rápida de gases sobrecalentados que se produce cuando se introduce oxígeno en un espacio confinado donde se ha agotado. La combustión detenida se reanuda con fuerza explosiva. Puede ocurrir debido a procedimientos impropios o inadecuados de ventilación.

**Calor.** Forma de energía asociada con el movimiento de los átomos o moléculas dentro de un combustible que se transfiere de un cuerpo a otro como resultado de una diferencia de temperatura entre los cuerpos, como la del Sol a la Tierra. Su intensidad se mide en grados de temperatura.

**Calor de la combustión.** Cantidad total de energía térmica (calor) que podría generarse por la reacción de combustión (oxidación), si el combustible se quemara por completo. El calor de combustión se mide típicamente en kilojulios por gramo (kJ/g) o megajulios por kilogramo (MJ/kg).

**Capa de techo.** Movimiento horizontal de una capa de gases calientes y productos derivados de la combustión desde el punto central del penacho, cuando una superficie horizontal, como un cielo raso, redirige el desarrollo vertical del penacho ascendente.

**Capas térmicas.** Resultado de la combustión en un espacio confinado en el que los gases tienden a formarse en capas, de acuerdo con la temperatura, la densidad del gas y la presión; los gases más calientes se encuentran en el cielo raso y los más fríos, al nivel del piso.

**Carga de combustible.** La cantidad total de contenido combustible de una edificación, espacio o área donde está ubicado el fuego, incluidos los marcos y el acabado interior, expresados en unidades de calor.

**Cianuro de hidrógeno (HCN).** Líquido incoloro, tóxico e inflamable hasta que alcanza los 79 °F (26 °C). Por encima de esa temperatura, se convierte en un gas con un ligero olor similar al de las almendras amargas. Producido por la combustión de sustancias portadoras de nitrógeno.

**Combustible.** Material que mantendrá la combustión en condiciones ambientales específicas (reproducido con permiso de NFPA 921-2011, *Guía para investigaciones de incendios y explosiones*, Copyright 2011, NFPA).

**Combustibles a base de carbono.** Combustibles en los que la energía de combustión se deriva principalmente del carbono. Incluyen materiales como madera, algodón, carbón o petróleo.

**Combustible hidrocarburo.** Compuesto orgánico a base de petróleo que contiene solo hidrógeno y carbono. También puede ser utilizado para describir aquellos materiales en una carga combustible en la que fueron creados utilizando hidrocarburos como plásticos o telas sintéticas.

**Combustión.** Proceso químico de oxidación que se produce a una velocidad lo suficientemente rápida como para producir calor y, por lo general, luz en forma de resplandor o llama (reproducido con permiso de NFPA 921-2011, *Guía para investigaciones de incendios y explosiones*, Copyright 2011, NFPA).

**Combustión incompleta.** Resultado de la combustión ineficiente de un combustible; cuanto menos eficiente es, más productos de la combustión se producen en vez de quemarse.

**Compartimentación.** Forma en que la disposición de los compartimentos crea o no una serie de barreras diseñadas para evitar que las llamas, el humo y el calor se propaguen de una habitación o piso a otro.

**Conducción.** Flujo físico o transferencia de calor de un cuerpo a otro, a través del contacto directo o la intervención de un medio, desde el punto donde se produce el calor a otro, o desde una región de alta temperatura a una región de baja temperatura.

**Conductividad térmica.** Propensión de un material a conducir calor dentro de su volumen. Medido en transferencia de energía a través de la distancia por grado de temperatura.

**Convección.** Transferencia de calor por el movimiento de fluidos o gases calientes, generalmente en dirección ascendente.

**Chorro fluido de techo.** Movimiento horizontal de una capa de gases calientes y productos derivados de la

combustión desde el punto central del penacho, cuando una superficie horizontal, como un techo, dirige el desarrollo vertical del penacho ascendente.

**Densidad de vapor.** Peso de vapor puro o gas comparado con el peso de un volumen igual de aire seco a la misma temperatura y presión. Una densidad de vapor inferior a 1 indica un vapor más ligero que el aire; una densidad de vapor mayor que 1 indica un vapor más pesado que el aire.

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).** Gas incoloro, inodoro, más pesado que el aire, que no soporta la combustión ni las llamas; utilizado en extintores de incendios portátiles como agente para extinguir fuegos clase B o C por sofocación o desplazando el oxígeno. El CO<sub>2</sub> es un producto residual del metabolismo aeróbico.

**Energía.** Capacidad para realizar un trabajo; ocurre cuando se aplica una fuerza a un objeto sobre una distancia, o cuando una sustancia sufre una transformación química, biológica o física.

**Energía cinética.** Energía que posee un objeto cuando está en movimiento.

**Energía potencial.** Energía almacenada que posee un objeto y que se puede liberar en el futuro para realizar un trabajo.

**Energía térmica.** Energía cinética asociada con los movimientos aleatorios de las moléculas de un material u objeto. A menudo se usa indistintamente con los términos calor y energía térmica.

**Equilibrio térmico.** Punto en el que dos regiones que están en contacto térmico ya no transfieren calor entre ellas porque han alcanzado la misma temperatura.

**Evaporación.** Proceso físico que convierte un líquido en un estado gaseoso. La velocidad de evaporación depende de la sustancia involucrada, el calor, la presión y el área de la superficie expuesta.

**Explosión de humo.** Forma de ignición de un gas. La ignición de productos de la combustión inflamables acumulados y aire que están dentro de su rango inflamabilidad.

**Flashover.** Transición rápida desde la etapa de crecimiento a la etapa de desarrollo pleno de un fuego.

**Flotante.** Tendencia o capacidad de un líquido o gas para mantenerse a flote o elevarse.

**Flujo de calor.** Medida de la tasa de transferencia de calor hacia o desde una superficie, generalmente expresada en kilovatios por metro cuadrado (kW/m<sup>2</sup>).

**Fuego.** Proceso de oxidación rápida. Reacción química en fase gaseosa que produce la evolución de luz y calor en intensidades variables.

**Gravedad específica.** Masa (peso) de una sustancia en comparación con el peso de un volumen igual de agua a una temperatura dada. Una gravedad específica menor que 1 indica una sustancia más liviana que el agua; una gravedad específica mayor que 1 indica una sustancia más pesada que el agua.

**Incendio de exposición.** Incendio que se inicia en cargas de combustible o edificaciones que están adyacentes o retiradas de la carga de combustible inicial o de la construcción donde se originan.

**Ignición espontánea.** Inicio de la combustión de un material por una reacción química o biológica interna que ha producido suficiente calor para encenderlo (reproducido con permiso de NFPA 921-2011, *Guía para investigaciones de incendios y explosiones*, Copyright 2011, NFPA).

**Ignición pilotada (dirigida).** Momento en el que una mezcla de combustible y oxígeno encuentra una fuente externa con suficiente calor o energía térmica para iniciar la reacción de combustión.

**Inhibición química de las llamas.** Extinción del fuego por interrupción de la reacción química en cadena.

**Joule/Julio (J).** Unidad de trabajo o energía en el Sistema Internacional de Unidades; energía (o trabajo) cuando una unidad de fuerza (1 newton) mueve un cuerpo a través de una unidad de distancia (1 m). Los julios se definen en términos de energía mecánica. En términos de energía térmica, los julios se refieren a la cantidad de calor adicional necesaria para elevar la temperatura de una sustancia, como los 4,2 julios necesarios para elevar la temperatura 1 grado centígrado de 1 gramo de agua. Ocupa el lugar de las calorías para la medición del calor (1 caloría = 4,19 J).

**Llamas aisladas.** Llamas en la capa de gas caliente que indican que la capa está dentro de su rango inflamable y ha comenzado a encenderse; a menudo se observa inmediatamente antes de un *flashover*.

**Limitado por combustible.** Fuego con oxígeno adecuado en el que la tasa de liberación de calor y la tasa de crecimiento están determinadas por las características del combustible, como la cantidad y la geometría. También conocido como controlado por combustible (reproducido con permiso de NFPA 921-2011, *Guía para investigaciones de incendios y explosiones*, Copyright 2011, NFPA).

**Limitado por ventilación.** Fuego con ventilación limitada en el que la velocidad de liberación de calor o el crecimiento están restringidos por la cantidad de oxígeno disponible. También conocido como controlado por

ventilación (reproducido con permiso de NFPA 921-2011, *Guía para investigaciones de incendios y explosiones*, Copyright 2011, NFPA).

**Límite inferior de explosividad (inflamabilidad) (LEL).** Límite inferior en el que un gas o vapor inflamable se inflama y soporta la combustión; por debajo de este límite, el gas o el vapor es demasiado pobre o delgado para quemar (carece de la cantidad adecuada de combustible). También conocido como Límite Inferior de Inflamabilidad (LII).

**Límite superior de explosividad (inflamabilidad) (UEL).** Límite superior en el que se enciende un gas o vapor inflamable. Por encima de este límite, el gas o el vapor es demasiado rico para quemar (carece de la cantidad adecuada de oxígeno). También conocido como Límite Inflamable Superior (LIS).

**Materia.** Cualquier cosa que ocupe espacio y tenga masa.

**Miscible.** Materiales que se pueden mezclar en todas las proporciones.

**Monóxido de carbono (CO).** Gas incoloro, inodoro y peligroso (tanto tóxico como inflamable) formado por la combustión incompleta del carbono. Se combina con la hemoglobina 200 veces más rápido que el oxígeno, disminuyendo la capacidad de la sangre para transportarlo.

**Oxidación.** Proceso químico que ocurre cuando una sustancia se combina con un oxidante como el oxígeno en el aire. Un ejemplo común es la formación de óxido en el metal.

**Oxidante.** Cualquier material que produzca fácilmente oxígeno u otro gas oxidante, o que reaccione fácilmente para promover o iniciar la combustión de materiales combustibles (reproducido con permiso de NFPA 400-2010, *Código de materiales peligrosos*, Copyright 2010, NFPA).

**Pirólisis.** Descomposición química de un material sólido por calentamiento. Precede a la combustión de un combustible sólido.

**Plano neutral.** Separación donde se igualan las presiones de la zona caliente, por donde sale temperatura, gases, vapores y partículas suspendidas en el aire (humo), y la zona fría por donde entra aire fresco y hay buena visibilidad.

**Potencia.** Cantidad de energía entregada en un período de tiempo determinado.

**Presión.** Fuerza por unidad de área ejercida por un líquido o gas medido en libras por pulgada cuadrada (psi) o kilopascales (kPa).

**Presión de vapor.** Presión en la que un vapor está en equilibrio con su fase líquida a una temperatura dada. Los líquidos que tienen una mayor tendencia a evaporarse tienen mayores presiones de vapor a una temperatura dada.

**Productos de la combustión.** Materiales producidos y liberados durante la quema.

**Punto de ignición (*fire point*).** Temperatura a la que el combustible líquido produce suficientes vapores para soportar la combustión una vez que el combustible se enciende. El punto de ignición es generalmente unos pocos grados por encima del punto de inflamación (*flash point*).

**Punto de inflamación (*flash point*).** Temperatura mínima a la que un líquido emite vapores suficientes para formar una mezcla inflamable con el aire, cerca de la superficie del líquido.

**Quema a cielo abierto.** Descripción de un fuego que se quema al aire libre sin restricciones en el suministro de oxígeno.

**Radiación.** Transmisión o transferencia de energía térmica de un cuerpo a otro a una temperatura más baja, a través del espacio intermedio mediante ondas electromagnéticas.

**Radicales libres.** Partes de moléculas altamente reactivas, cargadas eléctricamente, liberadas durante las reacciones de combustión.

**Rango de inflamabilidad (explosivo).** Rango entre el límite inflamable superior y el inferior en el que una sustancia puede inflamarse.

**Reacción endotérmica.** Reacción química en la que una sustancia absorbe calor.

**Reacción exotérmica.** Reacción química entre dos o más materiales que produce cambios en ellos y genera calor.

**Relación superficie/masa.** Relación entre el área de superficie del combustible y su masa.

**Rollover.** Condición en la que los gases de fuego no quemados que se han acumulado en la parte superior de un compartimento se encienden y las llamas se propagan a través de la capa de gas caliente o a través del cielo raso.

**Solubilidad.** Grado en que un sólido, líquido o gas se disuelve en un solvente (generalmente agua).

**Solventes polares.** Líquidos inflamables que atraen el agua, como un polo magnético positivo atrae a un polo negativo; los ejemplos incluyen alcoholes, ésteres, cetonas, aminas y lacas.

**Tasa de liberación de calor.** Cantidad total de calor liberado por unidad de tiempo. Generalmente se mide en kilovatios (kW) o megavatios (MW) de salida.

**Temperatura.** Medida de la energía cinética promedio de las partículas en una muestra de materia, expresada en términos de unidades o grados designados en una escala estándar.

**Temperatura de autoignición.** La temperatura más baja a la cual el material combustible se enciende en el aire sin chispa o llama (reproducido con permiso de NFPA 921-2011, *Guía para investigaciones de incendios y explosiones*, Copyright 2011, NFPA).

**Tetraedro del fuego.** Modelo de los cuatro elementos/condiciones requeridos para tener un fuego. Los cuatro lados del tetraedro representan combustible, calor, oxígeno y reacción química autosostenida en cadena.

**Trayectoria de flujo.** Espacio entre al menos una entrada de aire y una salida de escape de gases calientes. La diferencia de presión determina la dirección del flujo de gases a través de este espacio. El calor y el humo en un área de alta presión fluirán hacia áreas de menor presión.

**Triángulo del fuego.** Modelo geométrico plano de un triángulo equilátero que se utiliza para explicar las condiciones/elementos necesarios para la combustión. Los lados del triángulo representan calor, oxígeno y combustible.

**Vatio (W).** Unidad de potencia o tasa de trabajo del SI igual a 1 julio por segundo (J/s).

**Zona de combustión.** Área que rodea una fuente de calor en la que hay suficiente aire disponible para alimentar un fuego.