

41

Director del capítulo
Casey C. Grant

Sumario

Conceptos básicos	
<i>Dougal Drysdale</i>	41.2
Fuentes de peligro de incendio	
<i>Tamás Bánky</i>	41.8
Medidas de prevención contra incendios	
<i>Peter F. Johnson</i>	41.15
Medidas de protección pasiva contra incendios	
<i>Yngve Anderberg</i>	41.19
Medidas activas de protección contra incendios	
<i>Gary Taylor</i>	41.23
Organización de la lucha contra incendios	
<i>S. Dheri</i>	41.26

● CONCEPTOS BASICOS

Dougal Drysdale

La química y la física del fuego

Un incendio es la manifestación de una combustión incontrolada. En ella intervienen materiales combustibles que forman parte de los edificios en que vivimos, trabajamos y jugamos o una amplia gama de gases, líquidos y sólidos que se utilizan en la industria y el comercio. Estos materiales, normalmente constituidos por carbono, se agruparán en el contexto de este estudio bajo la denominación de sustancias combustibles. Aunque estas sustancias presentan una gran variedad en cuanto a su estado químico y físico, cuando intervienen en un incendio responden a características comunes, si bien se diferencian en la facilidad con que se inicia éste (ignición), la velocidad con que se desarrolla (propagación de la llama) y la intensidad del mismo (velocidad de liberación de calor). A medida que profundizamos en la ciencia de los incendios, cada vez es posible cuantificar y predecir con mayor exactitud el comportamiento de un incendio, lo que nos permite aplicar nuestros conocimientos a la prevención de los incendios en general. El objetivo de esta sección es revisar algunos principios fundamentales y contribuir a la comprensión del desarrollo de los incendios.

Conceptos básicos

Estamos rodeados de materiales combustibles que, en determinadas condiciones, pueden entrar en combustión si se les aplica una fuente de ignición capaz de iniciar una reacción en cadena. En el marco de este proceso, la "sustancia combustible" reacciona con el oxígeno del aire liberando energía (calor) y generando productos de combustión, algunos de los cuales pueden ser tóxicos. Es necesario comprender con claridad los mecanismos de ignición y combustión.

Normalmente, la mayoría de los incendios se producen en materiales sólidos (p. ej. madera o sus derivados y polímeros sintéticos), pero también, en menor medida, en combustibles líquidos y gaseosos. Antes de estudiar algunos conceptos básicos, es conveniente revisar brevemente la combustión de gases y líquidos.

Llamas de difusión y de premezclado

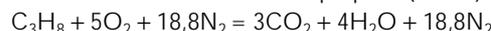
Un gas inflamable (p. ej., el propano, C₃H₈) puede entrar en combustión de dos formas diferentes. Una corriente o chorro de gas de una tubería (un simple mechero Bunsen con la entrada de aire cerrada) puede entrar en ignición y arder como llama de difusión, produciéndose la combustión en aquellas zonas en que el combustible gaseoso y el aire se mezclan mediante un proceso de difusión. Este tipo de llama presenta una luminosidad amarilla característica que indica la presencia de partículas diminutas de hollín formadas como resultado de una combustión incompleta. Algunas de esas partículas arden en la llama, pero otras emergen por la punta de la misma para formar el humo.

Otra forma de combustión tiene lugar cuando el gas y el aire se mezclan antes de la ignición y se produce una combustión de premezclado, siempre que el rango de concentración de la mezcla de gas y aire se encuentre entre los límites de inflamabilidad inferior y superior (véase la Tabla 41.1). Fuera de dichos límites la mezcla no resulta inflamable (recuerde que cuando se abre la entrada de aire de un mechero Bunsen, en la boca se estabiliza una llama de premezclado). Cuando una mezcla es inflamable, la ignición puede provocarse aplicando una fuente de ignición de pequeñas dimensiones (chispa eléctrica). La mezcla de tipo estequiométrica es la que arde con mayor facilidad, pues la proporción de oxígeno presente es la adecuada para quemar toda la sustancia combustible y transformarla en

Tabla 41.1 • Límites inferior y superior de inflamabilidad en el aire.

	Límite inferior de inflamabilidad (% volumen)	Límite superior de inflamabilidad (% volumen)
Monóxido de carbono	12,5	74
Metano	5,0	15
Propano	2,1	9,5
n-Hexano	1,2	7,4
n-Decano	0,75	5,6
Metanol	6,7	36
Etanol	3,3	19
Acetona	2,6	13
Benceno	1,3	7,9

dióxido de carbono y agua (véase la ecuación siguiente, que demuestra que, aunque el nitrógeno está presente en la misma proporción que en el aire, no participa en la reacción). En esta reacción el material de combustión es el propano (C₃H₈):



En este caso, para que arda una mezcla estequiométrica de propano y aire basta una simple descarga eléctrica de 0,3 mJ, es decir, una chispa estática casi imperceptible como la que puede provocar una persona al caminar por una alfombra sintética y tocar un objeto conectado a tierra. Para determinados gases reactivos como el hidrógeno, etileno o etino, bastarían cantidades aún menores de energía. En una atmósfera de oxígeno puro (como en la reacción anterior, pero sin nitrógeno como diluyente) la energía necesaria sería incluso menor.

La llama de difusión asociada a un flujo de combustible gaseoso ilustra la forma de combustión que se observa cuando un combustible líquido o sólido arde con llama. Pero, en este caso, la llama se alimenta de los vapores de la sustancia combustible generados en la superficie de la fase condensada. La velocidad de suministro de estos vapores depende de su velocidad de combustión en la llama de difusión. La energía se transfiere de la llama a la superficie, generando así la energía necesaria para producir los vapores. En los combustibles líquidos se trata de un simple proceso de evaporación, pero en los sólidos debe existir una cantidad suficiente de energía para lograr la descomposición química del combustible y romper las grandes moléculas de polímero en fragmentos más pequeños capaces de evaporarse y escapar de la superficie. Esta reacción térmica es indispensable para mantener el flujo de vapores y, con ello, la llama de difusión (Figura 41.1). Las llamas pueden extinguirse actuando sobre este proceso de diferentes formas (véase más adelante).

Transferencia de calor

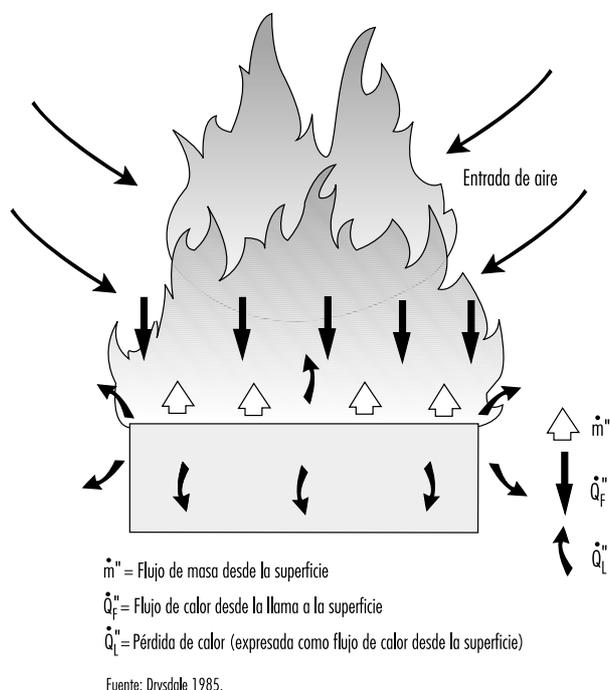
La comprensión del proceso de transferencia del calor (o energía) es clave para estudiar el comportamiento y los procesos de los incendios, por lo que merece un análisis detenido. Hay muchos textos de consulta excelentes (Welty, Wilson y Wicks 1976; DiNenno 1988), pero para estos fines nos bastará estudiar los mecanismos de conducción, convección y radiación. Las ecuaciones básicas para la transferencia de calor en estado estacionario (\dot{q}) son:

$$\text{Conducción: } \dot{q} = \frac{k}{l}(T_1 - T_2) \text{ kW/m}^2$$

$$\text{Convección: } \dot{q} = h(T_1 - T_2) \text{ kW/m}^2$$

$$\text{Radiación: } \dot{q} = \epsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \text{ kW/m}^2$$

Figura 41.1 • Representación esquemática de una superficie en ignición y de los procesos de transferencia de calor y masa en la misma.



La conducción es fundamental en la transferencia de calor a través de sólidos (siendo k una propiedad del material conocida como conductividad térmica (kW/mK) y l la distancia (m) a lo largo de la cual la temperatura desciende de T_1 a T_2 (en grados Kelvin). La convección en este contexto es la transferencia de calor de un fluido (en este caso, aire, llamas o productos de combustión) a una superficie (sólida o líquida), siendo h el coeficiente de transferencia de calor por convección (kW/m²K), que depende de la configuración de la superficie y de la naturaleza del flujo que pasa por ella. La radiación es similar a la luz visible (pero con una longitud de onda mayor) y no necesita un medio de propagación (puede ser el vacío), siendo ϵ la emisividad (eficiencia de radiación de una superficie) y σ la constante de Stefan-Boltzman ($56,7 \times 10^{-12}$ kW/m²K⁴). La radiación térmica viaja a la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) y cualquier objeto sólido que se interponga en su camino proyectará una sombra.

Velocidad de combustión y velocidad de liberación de calor

En la transferencia de calor desde la llama a la superficie de las sustancias combustibles condensadas (líquidas y sólidas) se combinan la convección y la radiación, aunque esta última es la que domina cuando el diámetro efectivo del incendio supera 1 m. La velocidad de combustión [\dot{R} (g/s)] puede expresarse mediante la fórmula siguiente:

$$\dot{R} = \frac{\dot{Q}''_F - \dot{Q}''_L}{L_v} \cdot A_{\text{combustible}} \text{ g/s}$$

\dot{Q}''_F es el flujo de calor desde la llama a la superficie (kW/m²); \dot{Q}''_L es la pérdida de calor de la superficie (p. ej., por radiación o por conducción a través del sólido) expresada como flujo (kW/m²); $A_{\text{combustible}}$ es el área superficial del combustible (m²) y L_v el calor de gasificación (equivalente al calor latente de evaporación de un

líquido) (kJ/g). Cuando se produce un incendio en un espacio cerrado, los gases calientes que emergen del mismo (impulsados por la flotabilidad) se quedan debajo del techo, calentando las superficies superiores del recinto. La capa de humo resultante y las superficies calientes irradian calor hacia la parte inferior del recinto, especialmente hacia la superficie de combustible, y aumentan así la velocidad de combustión:

$$\dot{R} = \frac{\dot{Q}''_F + \dot{Q}''_{\text{ext}} - \dot{Q}''_L}{L_v} \cdot A_{\text{combustible}} \text{ g/s}$$

siendo \dot{Q}''_{ext} el calor adicional suministrado por radiación desde la parte superior del recinto (kW/m²). Esta reacción adicional provoca un aumento considerable de la velocidad de combustión, así como un fenómeno de descarga en los recintos cerrados en que existe un suministro adecuado de aire y una cantidad suficiente de combustible para mantener el incendio (Drysdale 1985).

La velocidad de combustión está moderada por la magnitud del valor de L_v , calor de gasificación, que tiende a ser bajo en los líquidos y relativamente alto en los sólidos, es decir, los sólidos tienden a arder mucho más despacio que los líquidos.

Parece que el parámetro que más influye en el comportamiento de combustión de un material (o de un conjunto de materiales) es la velocidad de liberación de calor (RHR), que está ligada a la velocidad de combustión con arreglo a la ecuación siguiente:

$$\text{RHR} = \dot{R} \Delta H_c \text{ kW}$$

siendo ΔH_c el calor efectivo de combustión de la sustancia combustible (kJ/g). Actualmente disponemos de nuevas técnicas para determinar el RHR de diferentes flujos de calor (p. ej., el Calorímetro de Cono) y medir el RHR de objetos voluminosos, como muebles tapizados y revestimientos de paredes, con calorímetros de gran capacidad basados en los valores de consumo de oxígeno para determinar la velocidad de liberación del calor (Babrauskas y Grayson, 1992).

No hay que olvidar que, a medida que aumentan las proporciones de un incendio, no sólo se incrementa la velocidad de liberación de calor, sino también la velocidad de aparición de los "productos de combustión", que contienen sustancias tóxicas y humo formado por partículas, cuyo volumen aumentará a medida que disminuye la ventilación en el recinto cerrado.

Ignición

La ignición de un líquido o de un sólido requiere el aumento de su temperatura superficial hasta que se desprenden vapores a una velocidad suficiente para, una vez iniciada la ignición de estos, mantener la llama. Los combustibles líquidos pueden clasificarse según su punto de inflamación o temperatura mínima a la que puede existir un vapor o una mezcla de aire inflamable en la superficie (es decir, la presión del vapor corresponde al límite inferior de inflamabilidad). En la Tabla 41.2 se incluyen algunos ejemplos típicos de estas temperaturas, que pueden determinarse con un aparato estándar. Para producir un flujo de vapores capaz de mantener una llama de difusión es necesaria una temperatura ligeramente superior, conocida como punto de ignición. Estos conceptos se aplican asimismo a los sólidos combustibles, aunque en éstos las temperaturas son más altas debido a las exigencias de la descomposición química. El punto de ignición se encuentra normalmente por encima de 300 °C dependiendo del combustible. Por lo general, los materiales ignífugos presentan puntos de ignición bastante más altos (véase la Tabla 41.2).

La facilidad de ignición de un material sólido depende, por tanto, de la facilidad con que se eleva su temperatura superficial hasta alcanzar el punto de ignición, por ejemplo, mediante la exposición a un calor radiante o a un flujo caliente de gases. Este

Tabla 41.2 • Puntos de inflamación y de ignición de combustibles líquidos y sólidos.

	Punto de inflamación en vaso cerrado ¹ (°C)	Punto de ignición ² (°C)
Gasolina (100 Octanos) (l)	-38	-
n-Decano (l)	46	61,5
n-Dodecano (l)	74	103
Polimetilmetacrilato (s)	-	≈310
Polimetilmetacrilato FR (s)	-	≈377
Polipropileno (s)	-	≈330
Polipropileno FR (s)	-	≈397
Poliestireno (s)	-	≈367
Poliestireno FR (s)	-	≈445

l = líquido; s = sólido.

¹Con aparato Pensky-Martens en vaso cerrado.

²Líquidos: con aparato Cleveland en vaso abierto. Sólidos: Drysdale y Thomson (1994) (los resultados de las sustancias ignífugas se refieren a un flujo de calor de 37 kW/m²).

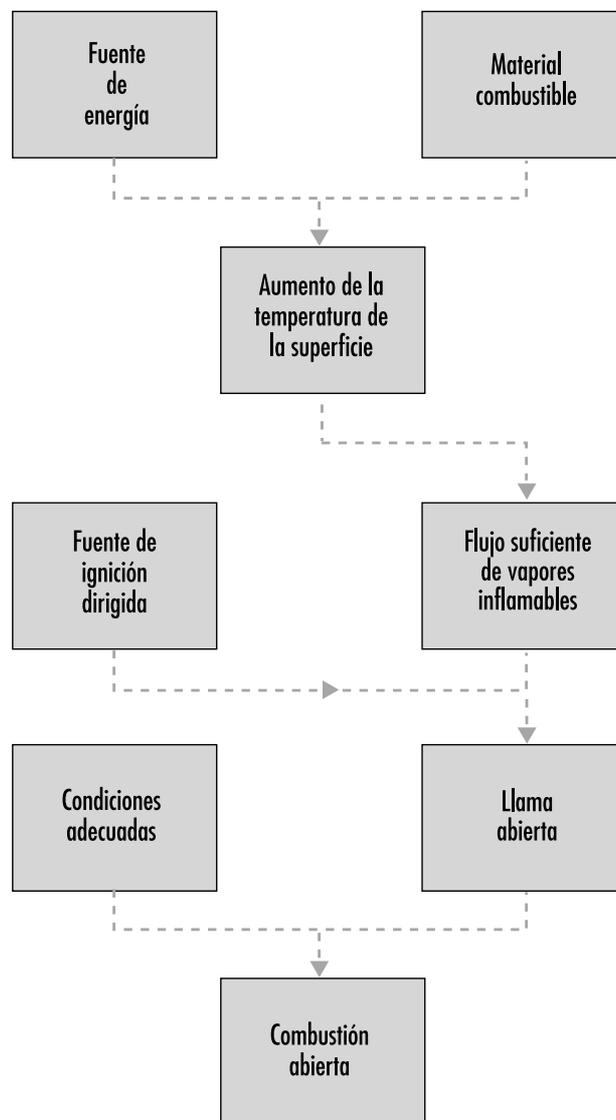
proceso depende menos de las características de la descomposición química que del espesor y las propiedades físicas del sólido, como su conductividad térmica (k), densidad (ρ) y capacidad calorífica (c). Los sólidos de espesores finos, como las virutas de madera, arden con gran facilidad porque tienen una masa térmica baja, es decir, se necesita una cantidad relativamente reducida de calor para aumentar su temperatura hasta el punto de ignición. En cambio, cuando se aplica calor a la superficie de un sólido de gran espesor, parte del calor pasa de la superficie al interior, lo que reduce el aumento de la temperatura en su superficie. Puede demostrarse teóricamente que la velocidad de aumento de la temperatura en la superficie viene determinada por la inercia térmica del material, es decir, el valor $k\rho c$ del producto. La práctica nos lo confirma, pues los materiales gruesos con una inercia térmica alta (p. ej., madera de roble, poliuretano sólido) necesitan un tiempo prolongado para entrar en ignición cuando se les aplica un flujo de calor determinado, mientras que, en idénticas condiciones, los materiales gruesos con una inercia térmica baja (p. ej., tableros de fibra aislante, espuma de poliuretano) arden muy rápidamente (Drysdale 1985).

Fuentes de ignición

En la Figura 41.2 (Ignición dirigida) se muestra de forma esquemática el proceso de ignición. Para que éste tenga lugar, la fuente de ignición no sólo debe ser capaz de elevar la temperatura de la superficie hasta el punto de ignición o por encima del mismo, sino también de conseguir que los vapores entren en combustión. La aplicación de una llama produce ambas cosas, pero un flujo de radiación desde una fuente remota provoca la aparición de vapores a una temperatura superior al punto de ignición sin que lleguen a arder. Ahora bien, si los vapores formados están suficientemente calientes (lo que supone que la temperatura de superficie sea muy superior al punto de ignición) pueden entrar en ignición de forma espontánea al mezclarse con el aire. Este proceso se denomina ignición espontánea.

Existe gran número de fuentes de ignición, que sólo tienen en común el hecho de ser resultado de alguna forma de descuido u omisión. En una lista típica podrían incluirse, por ejemplo, llamas desnudas, "objetos del fumador", calentamiento por

Figura 41.2 • Representación de una ignición dirigida.



fricción o equipos eléctricos (calentadores, planchas, hornillos, etc.) (véase la Tabla 41.3). Cabe mencionar a este respecto el excelente estudio de Cote (1991).

Hay que tener en cuenta que los cigarrillos que arden sin llama no pueden provocar directamente una combustión con llama (ni siquiera en los combustibles gaseosos habituales), pero sí una combustión sin llama en materiales propensos a este tipo de combustión, que se carbonizan al calentarlos. En la combustión sin llama se oxida la superficie carbonizada, generando localmente el calor suficiente para producir una nueva carbonización del combustible adyacente aún sin quemar. Se trata de un proceso muy lento que, en algunos casos, puede llegar a producir llamas y provocar un incendio que se propagará a gran velocidad.

En los materiales propensos a la combustión sin llama puede darse también un fenómeno de autocalentamiento (Bowes 1984), que se produce cuando se guardan grandes cantidades de material, de forma que el calor generado por la lenta oxidación superficial no puede escapar y da lugar a un aumento

Tabla 41.3 • Fuentes de ignición.

	Ejemplos
Equipos eléctricos	Calentadores eléctricos, secadores de pelo, mantas eléctricas, etc.
Fuentes de llama abierta	Cerilla, mechero, equipos de soldadura, etc.
Equipos con combustible gaseoso	Estufa de gas, calefactor, hornillo, etc.
Otros equipos con combustible	Estufa de leña, etc.
Material de fumador	Cigarrillo, pipa, etc.
Objetos calientes	Tubos calientes, chispas mecánicas, etc.
Exposición al calor	Fuego próximo, etc.
Calentamiento espontáneo	Trapos impregnados en aceite de linaza, pila de carbón, etc.
Reacción química	Poco frecuente: p. ej., permanganato potásico con glicerol

de la temperatura dentro de la masa. En determinadas condiciones se inicia un proceso incontrolado que puede conducir a una reacción de combustión sin llama en el interior del material.

Propagación de la llama

Un factor básico del aumento de dimensiones de un incendio es la velocidad de propagación de una llama por las superficies combustibles adyacentes. La propagación de la llama puede representarse como un frente de avance de la ignición en donde el extremo frontal de la llama actúa como fuente de ignición del combustible que todavía no está ardiendo. La velocidad de propagación viene determinada, por un lado, por las propiedades del material, de las que depende la facilidad de ignición y, por otro, por la interacción entre la llama existente y la superficie de avance del frente. La propagación vertical en sentido ascendente es la más rápida, pues la flotabilidad garantiza que las llamas se desplacen hacia arriba, y así la superficie superior al área de combustión queda expuesta a la transferencia directa del calor de las llamas. Compárese esta situación con la propagación en una superficie horizontal, en que las llamas del área de combustión se elevan verticalmente, lejos de la superficie. Realmente, la experiencia demuestra que la propagación vertical es la más peligrosa (p. ej., propagación de llamas en cortinas y sábanas o en ropas sueltas como camiones).

La velocidad de propagación también depende del flujo de calor radiante aplicado. El volumen de un incendio en el interior de una habitación crecerá con mayor rapidez al aumentar el nivel de radiación generado a medida que se extiende el incendio, lo que contribuirá a acelerar su propagación.

Teoría de la extinción de incendios

La extinción y supresión de los incendios puede estudiarse a la luz de la exposición anterior sobre la teoría de los incendios. Los procesos de combustión de fase gaseosa (p. ej., reacciones de llama) son muy sensibles a los inhibidores químicos. Algunas de las sustancias ignífugas empleadas para mejorar el comportamiento ante el fuego de los materiales se basan en el hecho de que la liberación de pequeñas cantidades de un inhibidor entre los vapores del combustible impiden el mantenimiento de la llama. La presencia de una sustancia ignífuga no convierte un material combustible en incombustible, pero dificulta su ignición e incluso puede llegar a impedir la total si la fuente de ignición es pequeña. En cambio, en un incendio ya activo, acabará ardiendo, pues el elevado flujo de calor anula el efecto ignífugo.

Un incendio puede extinguirse de diferentes formas:

1. cortando el suministro de vapores combustibles;
2. apagando la llama con extintores químicos (inhibición);
3. cortando el suministro de aire (oxígeno) del incendio (sofocación),
4. insuflando aire.

Control del flujo de vapores combustibles

El primer método, cortar el suministro de vapores combustibles, es claramente aplicable a los casos de incendio de chorros de gas en que el suministro de combustible puede cortarse fácilmente, pero también es el método más común y seguro para extinguir incendios de combustibles condensados. En los incendios con materiales sólidos, es necesario enfriar la superficie del material combustible por debajo de la temperatura de ignición para reducir el flujo de vapores hasta que ya no pueda mantenerse la llama. La forma más eficaz de conseguirlo es aplicar agua, de forma manual o mediante un sistema automático (rociadores, pulverizadores, etc.). Por lo general, los incendios de materiales líquidos no pueden tratarse de esta forma: no es posible enfriar suficientemente los combustibles líquidos con bajas temperaturas de ignición y, en el caso de combustibles con altas temperaturas de ignición, al entrar en contacto la fuerte evaporación de agua con la superficie caliente del líquido, el combustible en ignición puede resultar expulsado fuera del depósito, lo que tendría consecuencias muy graves para el personal encargado de la extinción del incendio (existen, sin embargo, casos muy especiales en los que se ha diseñado un sistema automático de evaporación de agua a alta presión para este tipo de incendios).

Los incendios de materiales líquidos se extinguen normalmente utilizando espumas contra incendios (Cote, 1991). Se introduce un concentrado de espuma en un chorro de agua y, a continuación, se aplica al incendio a través de una boquilla especial que permite la entrada de aire en el flujo. Se produce así una espuma que flota sobre el líquido y reduce la velocidad de generación de los vapores combustibles mediante un efecto de bloqueo al tiempo que protege la superficie de la transferencia de calor de las llamas. La espuma se aplica con cuidado para que vaya formando una "masa flotante", que aumenta poco a poco de tamaño hasta que cubre toda la superficie del líquido. Por otro lado, el tamaño de las llamas se va reduciendo a medida que crece la masa flotante y, al mismo tiempo, la espuma se va descomponiendo y liberando agua que contribuye a enfriar la superficie. Con este complejo mecanismo se consigue finalmente controlar el flujo de vapores.

De los distintos concentrados de espuma disponibles en el mercado es importante elegir uno compatible con los líquidos que se pretende proteger. Las primeras "espumas de proteínas" se desarrollaron para incendios de hidrocarburos líquidos; su desventaja es que se deshacen rápidamente cuando entran en contacto con combustibles líquidos solubles en agua. Actualmente, se dispone de "espumas sintéticas" para tratar toda la gama posible de incendios con materiales líquidos. Una de ellas, la espuma formadora de película acuosa (AFFF), es una espuma universal que crea una película de agua sobre la superficie del combustible líquido, lo que aumenta su efectividad.

Apagar la llama

Este método consiste en utilizar supresores químicos para extinguir la llama. En las reacciones que se producen en la llama intervienen radicales libres de alta reactividad y existencia efímera pero que se regeneran continuamente a través de un proceso de ramificación de cadenas que conserva una concentración suficientemente alta para alimentar la reacción global (p. ej., una reacción del tipo R1) a alta velocidad. Los supresores químicos

aplicados en cantidad suficiente provocan una fuerte reducción de la concentración de radicales y extinguen de forma eficaz las llamas. Los agentes más comunes de este tipo son los halones y los polvos secos.

Los halones reaccionan en la llama generando unas sustancias intermedias que a su vez reaccionan fácilmente con los radicales de la llama. Se necesitan cantidades relativamente pequeñas de halones para extinguir un incendio, por lo que siempre se les ha considerado muy adecuados. Las concentraciones de extinción son "respirables" (aunque los productos generados al pasar a través de la llama son nocivos). Los polvos secos actúan de forma similar, pero en determinadas circunstancias resultan mucho más efectivos. Las partículas finas se dispersan en la llama y anulan las cadenas de radicales. Es importante que las partículas sean pequeñas y numerosas. Los fabricantes de muchas marcas comerciales de polvos secos eligen para ello un polvo "decrepitante", cuyas partículas, al ser expuestas a las altas temperaturas de la llama, se fragmentan a su vez en partículas más pequeñas.

Cuando empiezan a arder las ropas de una persona, el mejor método para controlar las llamas y brindarle protección es un extintor de polvo seco. Una intervención rápida permite una rápida "extinción", minimizando los daños. Ahora bien, el fuego debe extinguirse por completo, pues las partículas caen rápidamente al suelo y cualquier llama residual puede reavivarlo. De forma similar, los halones sólo son efectivos en tanto se mantiene la concentración local necesaria. Así, cuando se aplica fuera de un recinto cerrado, el vapor de halón se dispersa rápidamente y el incendio se reaviva de nuevo si queda alguna llama residual. Igualmente, la pérdida del supresor produce la reignición del material combustible si las temperaturas de la superficie son suficientemente altas. Ni los halones ni los polvos secos llegan a enfriar de forma efectiva la superficie del combustible.

Cortar el suministro de aire

La descripción que sigue representa una simplificación excesiva del proceso. Aunque al "suprimir el suministro de aire" lógicamente se extingue el incendio, en realidad sólo es necesario reducir la concentración de oxígeno por debajo de un nivel crítico. El "ensayo del índice de oxígeno" permite clasificar los materiales combustibles en función de la concentración mínima de oxígeno necesaria para mantener una llama en una mezcla de oxígeno/nitrógeno. Muchos materiales arden a temperatura ambiente (20 °C aprox.) a partir de concentraciones de oxígeno del 14 % aproximadamente y en ausencia de fuentes de calor. La concentración crítica disminuye a medida que aumenta la temperatura. Así, en un incendio que lleve ardiendo cierto tiempo, la llama se mantendrá aún en concentraciones bajas, próximas al 7 %. Un incendio en una habitación puede ser controlado e incluso llegar a autoextinguirse si se limita el suministro de oxígeno manteniendo puertas y ventanas cerradas. Las llamas se apagarán, pero la combustión sin llama continuará con concentraciones de oxígeno mucho más bajas. Si se deja entrar aire al abrir una puerta o romper una ventana antes de que la habitación se haya enfriado lo suficiente, puede producirse un fuerte reavivamiento del incendio conocido.

La "supresión del aire" es difícil de conseguir. Sin embargo, una atmósfera puede "inertizarse" mediante inundación total con un gas que no favorezca la combustión, como nitrógeno, dióxido de carbono o gases de un proceso de combustión (p. ej., motores de un barco), bajos en oxígeno y altos en dióxido de carbono. Esta técnica sólo puede utilizarse en espacios cerrados, dado que es necesario mantener la concentración del "gas inerte" hasta que se haya extinguido el incendio o hasta que puedan iniciarse las operaciones de extinción del mismo. La inundación total se aplica especialmente en las bodegas de

Tabla 41.4 • Comparación de las concentraciones de inertización de diferentes gases.

Agente	Concentración mínima (% volumen)
Halón 1301	8,0
Halón 1211	8,1
Nitrógeno	≈58
Dióxido de carbono	≈35

buques y en las bibliotecas de libros antiguos. Las concentraciones mínimas necesarias de gas inerte que se ofrecen en la Tabla 41.4 están basadas en el supuesto de que el incendio se detecta en su fase inicial y la inundación se realiza antes de que se haya acumulado un calor excesivo en el recinto.

La "supresión del aire" puede conseguirse en las proximidades de un incendio de pequeñas dimensiones aplicando localmente un supresor con un extintor. El dióxido de carbono es el único gas de este tipo utilizado. Sin embargo, dado que se dispersa rápidamente, es fundamental extinguir bien todas las llamas durante la operación, pues de lo contrario el incendio se reavivará. En la reignición influye también el hecho de que el dióxido de carbono tiene un efecto de enfriamiento prácticamente nulo. Merece la pena señalar que una fina pulverización de agua sobre la llama puede producir su extinción mediante el efecto combinado de la evaporación de las pequeñas gotas (que enfrían la zona de combustión) y la reducción de la concentración de oxígeno al diluirse con el vapor de agua (que actúa de la misma forma que el dióxido de carbono). Entre los posibles sustitutos de los halones se encuentran los pulverizadores finos de agua y los nebulizadores.

Cabe reseñar que no resulta aconsejable extinguir una llama de gas salvo que inmediatamente después pueda cortarse el flujo del mismo. De lo contrario, se formaría un volumen importante de gas inflamable que podría entrar en ignición y producir graves daños.

Insuflar aire

Incluimos este método en la presente enumeración para completar el estudio. Una llama de una cerilla puede apagarse fácilmente aumentando la velocidad del aire en la proximidad de la llama por encima de un valor crítico. El mecanismo funciona desestabilizando la llama en las proximidades del material combustible. En principio, pueden controlarse incendios de mayor volumen de esta misma forma, aunque normalmente se requieren cargas explosivas para generar velocidades suficientemente altas, como en los incendios en pozos de petróleo.

Por último, es importante resaltar que la facilidad de extinción de un incendio disminuye rápidamente a medida que éste progresa. Por tanto, una detección precoz permite su extinción con cantidades mínimas de supresor y limita las pérdidas. Al seleccionar un sistema de supresión hay que tener en cuenta la velocidad potencial de desarrollo del incendio y los sistemas de detección disponibles.

Explosiones

Una explosión se caracteriza por una liberación repentina de energía que produce una onda expansiva capaz de causar un daño remoto. Existen dos tipos de fuentes: la alta explosión y la explosión por presión. La primera fuente es típica de compuestos como el trinitrotolueno (TNT) y la ciclotrimetilentrinitramina (RDX). Se trata de sustancias altamente exotérmicas que se descomponen liberando grandes cantidades de energía. A pesar de que son térmicamente estables (algunos en menor medida, por

lo que deben ser insensibilizados para poderlos manejar de forma segura), pueden llegar a detonar, descomponiéndose y propagándose a la velocidad del sonido a través de los sólidos. Si la cantidad de energía liberada es suficientemente alta, a partir de la fuente se propaga una onda expansiva de gran potencial de destrucción a distancia.

Para valorar el daño remoto, puede estimarse la magnitud de la explosión en términos de "equivalente TNT" (normalmente en toneladas métricas). Esta técnica, basada en los muy numerosos datos recogidos sobre el potencial de destrucción del TNT (en gran parte en tiempo de guerra), se basa en leyes empíricas de escalado desarrolladas a partir de estudios del daño ocasionado por cantidades conocidas de TNT. En tiempos de paz, los explosivos potentes se utilizan en actividades como la minería, las canteras y obras importantes de ingeniería civil. Su utilización representa un riesgo, por lo que requieren un manejo específico.

Sin embargo, la segunda fuente de explosión puede ser igualmente devastadora, especialmente si se desconocen sus riesgos. Las sobrepresiones que dan lugar a explosiones pueden deberse a procesos químicos en instalaciones o simplemente a efectos físicos, como cuando se calienta un recipiente externamente hasta que alcanza una sobrepresión. El término BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion —explosión por vapor en expansión de un líquido hirviendo) tiene su origen aquí, en los problemas de las calderas de vapor. Actualmente, este término se emplea también cuando, en un depósito que contiene un gas licuado a presión, como el LPG (gas de petróleo licuado), se produce un incendio, que libera el contenido inflamable, y éste a su vez entra en combustión produciendo una "bola de fuego".

En otros casos, la sobrepresión se debe a un proceso químico interno. En las industrias de transformación, el autocalentamiento del material puede provocar una reacción incontrolada que genere altas temperaturas y presiones capaces de ocasionar una explosión por presión. Sin embargo, el tipo más común de explosión es el debido a la ignición de una mezcla de gas/aire inflamable confinada en algún aparato de una instalación o en cualquier estructura cerrada. La condición previa es la formación de una mezcla inflamable, evitable con un diseño y una gestión adecuados. Una liberación accidental dará lugar a una atmósfera inflamable si la concentración de gas (o vapor) se encuentra entre los límites superior e inferior de inflamabilidad (Tabla 41.1). Si se introduce una fuente de ignición en una de estas zonas, una llama de premezclado se propagará rápidamente a partir de la misma, convirtiendo la mezcla de combustible/aire en productos de combustión a una temperatura elevada; esta última puede llegar a ser de 2.100 K, lo que demuestra que en un sistema completamente cerrado que se encuentre inicialmente a 300 K, son posibles sobrepresiones de hasta 7 bar. Sólo los depósitos a presión de diseño especial son capaces de soportar estas sobrepresiones. Los edificios normales se derrumbarán, a no ser que estén protegidos por paneles de alivio de presión, discos de ruptura o sistemas de supresión de la explosión. Cuando se forma una mezcla inflamable dentro de un edificio, la explosión puede llegar a ocasionar daños estructurales importantes o incluso su destrucción total, si la explosión no se dirige hacia el exterior a través de aberturas originadas en las primeras fases de la explosión (p. ej. rotura de las ventanas).

Explosiones de este tipo se asocian también a la ignición de suspensiones de polvo en el aire (Palmer, 1973), como las producidas cuando se levanta una nube de polvo "explosivo" procedente de estanterías, vigas y cornisas de un edificio y dicha nube queda expuesta a continuación a una fuente de ignición (p. ej., en molinos de harina, elevadores de grano, etc.). El polvo

debe ser combustible (obviamente), aunque no todos los polvos combustibles pueden explotar a temperatura ambiente.

Se han diseñado ensayos estándar para determinar cuándo es capaz un polvo de producir una explosión. Dichos ensayos se utilizan asimismo para estudiar los "límites de explosividad" de los polvos explosivos, similares conceptualmente a los "límites de inflamabilidad" de gases y vapores. Por lo general, una explosión de polvo ocasiona daños de gran magnitud, porque la primera explosión genera aún más polvo, dando lugar a una nube de polvo aún mayor que, a su vez, entra inevitablemente en ignición y produce una explosión aún mayor.

Los venteos o alivios de explosión sólo son eficaces si la velocidad de desarrollo de ésta es relativamente baja, como ocurre cuando se propaga una llama de premezclado en una mezcla inflamable estacionaria o en una nube de polvo explosivo. Las aberturas de explosión no tienen ninguna utilidad cuando se produce una detonación, ya que dichas aberturas deben originarse en la fase inicial del suceso, cuando la presión todavía es relativamente baja.

Al producirse una detonación, la presión se eleva demasiado rápidamente como para que los alivios sean efectivos, por lo que el recinto cerrado de una planta tendrá que soportar presiones internas tan altas que provocarán su destrucción total. Puede producirse una detonación de una mezcla de gas inflamable cuando está contenida en una tubería o un conducto largo. En determinadas condiciones, la propagación de la llama de premezclado empuja el gas sin arder por delante del frente de la llama a una velocidad que incrementa la turbulencia, lo que a su vez incrementa la velocidad de propagación. Se produce así una reacción recurrente que acelera la llama hasta que se forma una onda de choque.

Esto, combinado con el proceso de combustión, produce una onda de detonación que puede propagarse a velocidades muy por encima de los 1.000 m/s. Es posible comparar este fenómeno con la velocidad fundamental de combustión de una mezcla estequiométrica de propano/aire de 0,45 m/s [velocidad a la que se propaga la llama a través de una mezcla de propano/aire en reposo (es decir, sin turbulencias)].

No debe subestimarse la importancia de la turbulencia en el desarrollo de este tipo de explosiones. Para el éxito de un sistema de seguridad antiexplosión es fundamental que se produzca el venteo rápido de los gases o el tratamiento por supresión en la fase inicial del proceso. Si la velocidad de desarrollo de la explosión es demasiado rápida, el sistema de seguridad no resultará eficaz, pudiendo producirse peligrosas sobrepresiones.

Una alternativa al venteo es la supresión de la explosión. Este tipo de protección requiere una detección de la explosión en su fase inicial, lo más próxima posible a la ignición. El detector se utiliza para activar la rápida liberación de un supresor en el trayecto de la llama de propagación, deteniendo la explosión de forma eficaz antes de que aumente la presión hasta un punto en que la integridad del recinto se vea amenazada. Los halones se han utilizado habitualmente para este fin, pero ahora se encuentran desfasados y se están estudiando sistemas de pulverización de agua a alta presión.

Este tipo de protección resulta muy caro y de aplicación limitada, pues sólo puede utilizarse en volúmenes relativamente reducidos, donde el supresor pueda distribuirse de forma rápida y uniforme (p. ej., tuberías de transporte de vapor inflamable o polvos explosivos)

Análisis de la información para la protección contra incendios

En términos generales, puede decirse que hace poco que la ciencia de los incendios se ha desarrollado lo suficiente para aportar una base informativa que permita tomar decisiones

racionales en materia de diseño industrial y de seguridad. Tradicionalmente, la seguridad contra incendios se desarrollaba sobre una base ad hoc, que respondía de forma eficaz a los accidentes mediante la imposición de normativas o restricciones que evitaran su repetición. Así, por ejemplo, el Gran Incendio de Londres de 1666 dio lugar al establecimiento de la primera normativa (o código) para edificios y al desarrollo de los seguros contra incendios. Accidentes más recientes, como los de bloques de oficinas de São Paulo, Brasil, en 1972 y 1974, han promovido modificaciones en la legislación de construcción para evitar en el futuro incendios múltiples de este tipo. Del mismo modo, en California (EE.UU.), al detectarse el riesgo asociado a determinados tipos de tapizados de mobiliario moderno (especialmente de espuma de poliuretano estándar), se impuso una estricta normativa para su control.

Son sólo algunos casos en los que el estudio de las consecuencias de un incendio llevaron a establecer normativas para mejorar la seguridad del individuo y de la comunidad en caso de incendio. La adopción de cualquier medida al respecto debe estar justificada por un análisis de la información disponible y, además, debe demostrarse que el problema es real. En algunos casos, como en los incendios de São Paulo, no es más que un ejercicio académico, pero en otros, como cuando se intenta "demostrar" que el mobiliario actual puede dar lugar a problemas, hay que asegurarse de que los costes resultantes se gastan de forma coherente. Para ello, es necesario disponer de una base de datos fiable sobre incendios que abarque un periodo significativo de tiempo y permita observar las tendencias en cuanto a número de incendios, número de víctimas, incidencia de un determinado tipo de ignición, etc. Después, podrán utilizarse las técnicas estadísticas para estudiar si una tendencia o cambio es suficientemente significativo como para tomar las medidas correspondientes.

En algunos países, el Cuerpo de Bomberos está obligado a presentar un informe sobre los incendios atendidos. En el Reino Unido y Estados Unidos, el oficial responsable rellena un formulario, que se remite a una organización central [el Home Office en el Reino Unido y la National Fire Protection Association (NFPA) en Estados Unidos] en la que se codifican y procesan los datos. Estos últimos quedan a disposición de las entidades gubernamentales u otras instancias interesadas. Estas bases de datos son fundamentales para analizar (por ejemplo) las principales fuentes de ignición y los objetos con mayor facilidad de combustión. Así, por ejemplo, un análisis del número de víctimas en relación con la fuente de ignición ha demostrado que el número de personas que fallecen en los incendios iniciados por fumadores guarda una clara desproporción con el número de incendios originados de este modo.

La fiabilidad de estas bases de datos depende de la habilidad con que el personal del cuerpo de bomberos realice la investigación, tarea nada sencilla que requiere una gran habilidad y conocimientos, especialmente sobre la ciencia de los incendios. El Fire Service del Reino Unido está obligado estatutariamente a presentar un informe de cada incendio atendido bajo la responsabilidad del oficial encargado. El diseño del formulario es fundamental, y debe incluir la información necesaria con el nivel de detalle requerido. En el Fire Protection Handbook (Cote, 1991) se incluye el "Basic Incident Report Form" recomendado por el NFPA.

Los datos pueden utilizarse de dos formas, bien para identificar un problema de incendio, bien como argumento racional necesario para justificar unas determinadas medidas que requieran un gasto público o privado. Para demostrar el efecto de las medidas adoptadas puede utilizarse una base de datos de cierta antigüedad. De las estadísticas NFPA para el período

comprendido entre 1980 y 1989 (Cote, 1991) se deducen los diez puntos siguientes:

1. Los detectores de humo para el hogar se utilizan mucho y resultan muy eficaces (aunque quedan importantes problemas por resolver en la estrategia de detección).
2. Los rociadores automáticos reducen considerablemente las pérdidas humanas y materiales. El aumento del uso de aparatos de calefacción portátiles ha disparado el número de incendios en el hogar originados por estos equipos.
3. Los incendios provocados siguen una línea descendente desde la punta del decenio de 1970, pero los daños materiales asociados no han disminuido.
4. Un gran porcentaje de las víctimas del cuerpo de bomberos se produce por ataques al corazón y actividades ajenas al trabajo.
5. Las áreas rurales presentan las tasas de mortalidad por incendio más altas.
6. Los objetos del fumador son causa de la máxima mortalidad en los accidentes en el hogar (incendios en tapicerías, colchones o ropa de cama).
7. Las tasas de mortalidad por incendio en EE.UU. y Canadá se encuentran entre las más altas de los países desarrollados.
8. Los Estados del sur de EE.UU. presentan las tasas de mortalidad por incendio más altas.
9. El máximo riesgo de fallecimiento en caso de incendio corresponde a las personas de mayor edad.

Aunque estas conclusiones son, lógicamente, específicas para Estados Unidos, algunas tendencias son comunes al resto de los países. La correcta utilización de estos datos puede aportar los medios necesarios para formular políticas coherentes de seguridad contra incendios. Ahora bien, dichas medidas serán inevitablemente más "reactivas" que "proactivas", pues las últimas sólo pueden implantarse tras un estudio detallado de los riesgos de incendio. Esta metodología se ha ido imponiendo poco a poco, primero en la industria nuclear y después en la química, petroquímica y afines, donde los riesgos son más fácilmente identificables que en las demás industrias. Su aplicación a hoteles y edificios públicos en general suele ser mucho más compleja y requiere la aplicación de técnicas que reproducen en un modelo el incendio para predecir su posible desarrollo y la forma de propagación de los productos de combustión por el edificio, con el consiguiente riesgo para sus ocupantes. Con este tipo de modelos se han realizado grandes progresos, aunque todavía queda un largo camino por recorrer antes de que puedan utilizarse estas técnicas con total fiabilidad. En la ingeniería de seguridad contra incendios es necesario aún ampliar la investigación de base antes de poder comercializar herramientas fiables para el estudio de los peligros de incendio.

FUENTES DE PELIGRO DE INCENDIO ●

Tamás Bánky

Hay varias definiciones para los términos incendio y combustión. Las definiciones del fenómeno de la combustión más interesantes a los fines del presente documento son las siguientes:

- La combustión es un proceso automantenido de reacciones en las que se producen transformaciones físicas y químicas.
- Los materiales que intervienen en la combustión reaccionan con un agente oxidante próximo, que, en la mayoría de los casos, es el oxígeno del aire.

- Para una ignición se requieren unas condiciones favorables de partida, que, por lo general, suelen ser un calentamiento suficiente del sistema para cubrir la demanda inicial de energía de la reacción en cadena.
- Las reacciones suelen ser exotérmicas, es decir, durante la combustión se libera calor, fenómeno que a menudo va acompañado de una llama visible.

La ignición puede considerarse el primer paso del proceso automantenido de combustión, debiendo distinguir entre ignición dirigida (o forzada), si el fenómeno está causado por una fuente de ignición externa, o autoignición, si el fenómeno es resultado de reacciones que se producen en el propio material combustible con liberación de calor.

La facilidad de ignición viene definida por un parámetro empírico, la temperatura de ignición (es decir, la temperatura mínima, determinable mediante ensayo, a la que debe calentarse un material para que se inicie su ignición). Dependiendo de que la determinación de este parámetro (con métodos de ensayo especiales) se realice con o sin fuente de ignición, se distingue entre temperatura de ignición dirigida y temperatura de autoignición.

En el caso de la ignición dirigida, la energía necesaria para activar los materiales que intervienen en la reacción de combustión es suministrada por una fuente de ignición. Ahora bien, no existe una relación directa entre la cantidad de energía necesaria para la ignición y la temperatura de ignición; en efecto, si bien la composición química de los elementos del sistema de combustión es un factor fundamental de la temperatura de ignición, en ella influyen también en gran medida el tamaño y la forma de los materiales, la presión ambiental, las condiciones del flujo de aire, los parámetros de la fuente de ignición, las características geométricas del equipo de ensayo, etc. Por esta razón, los valores de la temperatura de autoignición y de ignición dirigida publicados en la bibliografía pueden diferir considerablemente.

Para analizar el mecanismo de ignición de los materiales, hay que diferenciar entre materiales sólidos, líquidos y gaseosos.

La mayor parte de los sólidos toman la energía de una fuente de ignición externa por conducción, convección o radiación (en la mayoría de los casos por una combinación de todas ellas), o se calientan como resultado de procesos internos que inician la descomposición en sus superficies.

Para que se produzca la ignición en un líquido, es necesario que se forme un espacio de vapor capaz de arder sobre su superficie. Los vapores liberados y los productos gaseosos de descomposición se mezclan con el aire que se encuentra sobre la superficie del material líquido o sólido.

Las turbulencias que se producen en la mezcla y/o en la difusión ayudan al oxígeno a alcanzar las moléculas, átomos y radicales libres dispuestos a reaccionar que se encuentran en y por encima de la superficie. Las partículas inducidas interaccionan y liberan calor. El proceso se va acelerando progresivamente y, cuando se inicia la reacción en cadena, el material entra en ignición y arde.

La combustión en la capa inferior a la superficie de los materiales sólidos combustibles se denomina combustión sin llama y la reacción de combustión que tiene lugar en la interfaz entre el material sólido y el gas, calentamiento al rojo. La combustión con llama es el proceso en cuyo curso la reacción exotérmica de combustión entra en la fase gaseosa. Es típica de la combustión tanto de materiales líquidos como sólidos.

Los gases combustibles arden de forma natural en la fase gaseosa. Un principio empírico importante es que las mezclas de gas y aire sólo pueden entrar en ignición dentro de un determinado rango de concentración, lo que también es válido para los vapores de líquidos. Los límites inferior y superior de

inflamabilidad de gases y vapores dependen de la temperatura y la presión de la mezcla, la fuente de ignición y la concentración de los gases inertes de la mezcla.

Fuentes de ignición

La energía calorífica puede clasificarse en cuatro categorías básicas según su origen (Sax, 1979):

1. energía calorífica generada por reacciones químicas (oxidación, combustión, disolución, calentamiento espontáneo, descomposición, etc.);
2. energía calorífica eléctrica (por resistencia, inducción, arco, chispas eléctricas, descargas electrostáticas, rayos, etc.);
3. energía calorífica mecánica (por fricción, chispas por fricción),
4. calor generado por descomposición nuclear.

A continuación se estudian las fuentes de ignición más frecuentes.

Llama abierta

La llama abierta es la fuente de ignición más sencilla y frecuente. Gran cantidad de herramientas de uso generalizado y de equipos industriales funcionan con llamas desnudas o dan lugar a la formación de llamas desnudas. Encendedores, cerillas, hornos, aparatos de calefacción, equipos de soldadura, tuberías dañadas de gas y petróleo, etc. pueden considerarse fuentes potenciales de ignición. Dado que, en el caso de la llama abierta, la fuente de ignición primaria constituye en sí misma una combustión automantenida, el mecanismo de ignición significa básicamente la propagación de la combustión a otro sistema. La combustión se inicia cuando la fuente de ignición con llama abierta dispone de suficiente energía como para provocar la ignición.

Ignición espontánea

Las reacciones químicas que generan calor de forma espontánea, al ser "fuentes internas de ignición", conllevan un riesgo de ignición y combustión. Materiales propensos al calentamiento y la ignición espontáneos pueden convertirse en fuentes de ignición secundarias y provocar la ignición de materiales combustibles próximos.

Aunque algunos gases (p. ej., fosforo de hidrógeno, hidruro de boro, hidruro de silicio) y líquidos (p. ej., carbonilos metálicos, composiciones organometálicas) son propensos a la ignición espontánea, en la mayoría de los casos ésta tiene lugar como reacción superficial en los materiales sólidos. La ignición espontánea, como todas las igniciones, depende de la estructura química del material, pero su aparición está determinada por el grado de dispersión. La extensa superficie específica permite la acumulación local de calor de reacción y contribuye a aumentar la temperatura del material por encima de la temperatura de ignición espontánea.

La ignición espontánea de líquidos también se ve favorecida cuando entran en contacto con aire o materiales sólidos de gran superficie específica. En condiciones atmosféricas normales, las grasas y los aceites especialmente insaturados con enlaces dobles, al ser absorbidos por materiales fibrosos o sus productos o al impregnarse en textiles de origen vegetal o animal, son propensos a la ignición espontánea en condiciones atmosféricas normales. La ignición espontánea de productos de lana de vidrio y de lana mineral fabricados con fibras no combustibles o materiales inorgánicos con una gran superficie específica y contaminados con grasa han dado origen a gran número de incendios graves.

La ignición espontánea se observa principalmente en polvo de materiales sólidos. En metales con una buena conductividad calorífica, para acumular el calor local necesario para la ignición es necesario que estén muy finamente fragmentados. A medida

que disminuye el tamaño de partícula, aumenta la probabilidad de una ignición espontánea y en algunos polvos metálicos (p. ej., hierro) se produce piroforicidad. Cuando se almacena y maneja polvo de carbón, hollín fino o polvo de lacas y resinas sintéticas, así como durante su procesamiento, debe prestarse especial atención a las medidas preventivas contra incendios para reducir el peligro de una ignición espontánea.

Los materiales propensos a la descomposición espontánea presentan una especial capacidad para entrar en ignición de forma espontánea. Cuando se coloca hidracina sobre cualquier material de gran área superficial, inmediatamente arde con llama. Los peróxidos, muy utilizados en la industria plástica, se descomponen espontáneamente con gran facilidad, convirtiéndose en peligrosas fuentes de ignición y llegando a iniciar en algunos casos una combustión explosiva.

Un caso especial de ignición espontánea es la violenta reacción exotérmica que se produce cuando determinados productos químicos entran en contacto entre sí, como el ácido sulfúrico concentrado con todos los materiales combustibles orgánicos, los cloratos con sales sulfúricas o amónicas, los compuestos orgánicos halogenados con metales alcalinos, etc. La incompatibilidad de estos materiales (materiales incompatibles) exige una especial atención para su almacenamiento, especialmente cuando se hace conjunto, así como a la hora de elaborar la normativa de seguridad contra incendios.

Vale la pena mencionar que esta peligrosa forma de calentamiento altamente espontánea puede verse favorecida, en algunos casos, por unas condiciones técnicas incorrectas (ventilación insuficiente, baja capacidad de enfriamiento, fallos de mantenimiento y limpieza, sobrecalentamiento de la reacción, etc.) o incluso estar causada por ellas.

Algunos productos agrícolas, como piensos de fibra, semillas oleaginosas, cereales germinados, productos finales de la industria de transformación (tiras secas de remolacha, fertilizantes, etc.) son propensos a la ignición espontánea. El calentamiento espontáneo de estos materiales presenta una característica especial: las peligrosas condiciones de temperatura de los sistemas se ven favorecidas por algunos procesos biológicos exotérmicos de difícil control.

Fuentes de ignición eléctrica

La maquinaria mecánica, los instrumentos y equipos de calefacción alimentados con energía eléctrica, así como los equipos de transformación mecánica y de iluminación no suelen suponer un riesgo de incendio para su entorno siempre que se instalen de acuerdo con la correspondiente normativa en materia de seguridad y de instalación y se observen durante su funcionamiento las instrucciones necesarias. Un mantenimiento regular y una supervisión periódica disminuyen considerablemente la probabilidad de incendios y explosiones. Las causas más frecuentes de incendios en equipos eléctricos y cableados son la sobrecarga, los cortocircuitos, las chispas eléctricas y las resistencias de alto contacto.

Se produce una sobrecarga cuando el cableado y los aparatos eléctricos soportan una corriente superior a la fijada por diseño. La sobrecorriente, al pasar a través del cableado y del aparato, provoca un calentamiento excesivo que daña, rompe o carboniza los componentes del sistema eléctrico y funde el recubrimiento del cable; las partes metálicas entran en una combustión sin llama, las unidades estructurales combustibles entran en ignición y, si se dan ciertas condiciones, puede llegarse incluso a la propagación del incendio en el entorno. La causa más frecuente de sobrecarga suele ser la conexión de un número de aparatos superior al permitido o de capacidad superior al valor estipulado.

Desde el punto de vista de la seguridad laboral de los sistemas eléctricos, uno de los mayores peligros son los cortocircuitos. Siempre son consecuencia de un fallo y se producen cuando partes del cableado eléctrico o del equipo aisladas entre sí y a tierra, contactan entre sí o con tierra. Este contacto puede ser directo, como en el contacto metal-metal, o indirecto, a través de un arco eléctrico. Cuando se produce un cortocircuito porque algunas unidades del sistema eléctrico entran en contacto entre sí, la resistencia es mucho menor y, como consecuencia, la intensidad de la corriente es extremadamente alta. La energía calorífica liberada durante una sobrecarga originada por grandes cortocircuitos puede dar lugar a un incendio en el mecanismo afectado, entrando en ignición los materiales y equipos próximos y propagándose el fuego al edificio.

Aunque las chispas eléctricas son fuentes de energía calorífica de naturaleza reducida, en la práctica actúan con frecuencia como fuentes de ignición. En condiciones normales de trabajo, la mayoría de los dispositivos eléctricos no producen chispas, aun cuando el funcionamiento de algunos de ellos suele ir acompañado de ellas.

Las chispas son muy peligrosas cuando en la zona donde se generan existen concentraciones explosivas de gas, vapor o polvo. Por tanto, los equipos que normalmente producen chispas durante su funcionamiento sólo pueden instalarse en lugares en que éstas no puedan provocar un incendio. El contenido energético de las chispas es insuficiente por sí mismo para provocar la ignición de los materiales del entorno o para iniciar una explosión.

Cuando en un sistema eléctrico no existe contacto metálico perfecto entre las unidades estructurales a través de las cuales fluye la corriente, en el punto de fallo aparecerá una resistencia de alto contacto. Este fenómeno se debe, en la mayoría de los casos, a un montaje incorrecto de las juntas o a instalaciones inadecuadas. La separación de las juntas durante el funcionamiento y el desgaste natural también pueden provocar resistencias de alto contacto. Gran parte de la corriente que fluye a través de los puntos con aumento de resistencia se transformará en energía calorífica. Si esa energía no se disipa suficientemente (y no se elimina la causa), se producirá un fuerte incremento de temperatura que puede provocar un peligroso incendio.

Si los mecanismos operan por inducción (motores, dinamos, transformadores, relés, etc.) y no están bien calculados, pueden surgir corrientes parásitas durante el funcionamiento que harán que se calienten las unidades estructurales (las bobinas y sus núcleos de hierro), provocando la ignición de los materiales aislantes y la combustión del equipo. Las corrientes parásitas también pueden surgir (con consecuencias desastrosas) en las unidades estructurales metálicas de equipos de alto voltaje.

Chispas electrostáticas

En el proceso de carga electrostática cualquier material, en principio eléctricamente neutro (y ajeno a cualquier circuito eléctrico), se carga positiva o negativamente. Existen tres tipos de cargas:

1. *cargas separadas*, cuando las cargas de polaridad sustractiva se acumulan en dos cuerpos simultáneamente;
2. *cargas de paso*, cuando las cargas al circular dejan cargas de polaridad opuesta,
3. *cargas de recepción*, cuando el cuerpo recibe las cargas del exterior.

Estos tres tipos de cargas pueden aparecer como consecuencia de diferentes procesos físicos, como la separación después de un contacto, la escisión, la pulverización, el desplazamiento, el frotamiento, el flujo de polvos o fluidos por un conducto, el golpeado, un cambio de presión, un cambio de estado, la

fotoionización, la ionización térmica, la distribución electrostática o una descarga de alto voltaje.

La carga electrostática puede aparecer en los cuerpos conductores y en los aislantes como resultado de cualquiera de los procesos anteriormente mencionados, aunque en la mayoría de los casos son los procesos mecánicos los responsables de la acumulación de estas cargas indeseadas.

De entre el gran número de efectos negativos y riesgos debidos a las cargas electrostáticas y a la consiguiente descarga por chispa, cabe destacar los efectos sobre los equipos electrónicos (p. ej., ordenadores de control de procesos) y los equipos contra incendios y explosiones.

Los equipos electrónicos corren peligro ante todo cuando la energía de la descarga es suficientemente alta para ocasionar la destrucción de la entrada de algún elemento semiconductor. En el último decenio, el desarrollo de las unidades electrónicas ha ido acompañado de un rápido incremento del riesgo asociado.

Para que exista riesgo de incendio o de explosión es necesario que coincidan en el espacio y en el tiempo dos condiciones: la presencia de un medio combustible y la descarga con capacidad de ignición. Este peligro se observa principalmente en la industria química, y puede estimarse tomando como base la denominada *sensibilidad de chispa de los materiales peligrosos* (energía mínima de ignición) y depende de la magnitud de la carga.

Es fundamental reducir estos riesgos y sus múltiples consecuencias, que pueden ir desde problemas operativos a catástrofes con víctimas mortales. Existen dos formas de protección frente a las cargas electrostáticas:

1. impedir que se inicie el proceso de carga (lógico, pero normalmente difícil de percibir),
2. limitar la acumulación de cargas para impedir las descargas peligrosas (o cualquier otro riesgo).

El rayo, fenómeno eléctrico atmosférico de la naturaleza, puede considerarse una fuente de ignición. Las cargas estáticas producidas en las nubes se compensan cayendo hacia la Tierra (rayo) y produciendo una descarga de alta energía. Los materiales combustibles que se encuentran en las proximidades del lugar de caída del rayo pueden llegar a entrar en ignición. En algunos casos, en la caída del rayo se generan impulsos muy fuertes y la energía se compensa en varias fases. En otros, se establece un flujo de corriente de larga duración que puede llegar a alcanzar órdenes de magnitud de 10 A.

Energía calorífica mecánica

En la práctica industrial la fricción está siempre presente. En las operaciones mecánicas se desarrolla calor por fricción y, si la disipación de calor se ve obstaculizada y el calor se acumula en el sistema, la temperatura puede alcanzar valores peligrosos, llegando a originar un incendio.

Las chispas por fricción pueden producirse por la fricción de metales (pulido, troceado, desbastado, corte, golpeado), al caer objetos o herramientas metálicas a un suelo duro o durante las operaciones de pulido, cuando el material presenta contaminaciones metálicas. La temperatura de la chispa generada suele ser superior a la temperatura de ignición de los materiales combustibles convencionales (chispas en acero, 1.400-1.500 °C o chispas en aleaciones de cobre-níquel, 300-400 °C); sin embargo, la capacidad de ignición depende de la cantidad total de calor producido y de la energía de ignición mínima del material. En la práctica, se ha demostrado que las chispas por fricción significan un riesgo real de incendio en espacios abiertos con gases, vapores y polvos combustibles en concentraciones peligrosas. En tales circunstancias debe evitarse la utilización de materiales que produzcan fácilmente chispas o procesos mecánicos con

producción de chispas. Por ello y para mayor seguridad, se utilizarán herramientas de madera, piel o plástico, o de aleaciones de cobre y bronce, que producen chispas de baja energía.

Superficies calientes

En la práctica, las superficies de aparatos y mecanismos pueden calentarse, tanto en condiciones normales como por avería, hasta alcanzar temperaturas peligrosas. Así, hornos, estufas, secadores, salidas de gas residual, conductos de gas, etc., pueden originar incendios en espacios con aire explosivo. Además, las superficies calientes pueden provocar la combustión de materiales combustibles próximos o en contacto con ellas. Como medida preventiva debe mantenerse una distancia de seguridad y realizar una supervisión y un mantenimiento regulares para reducir la probabilidad de que se presente un sobrecalentamiento peligroso.

Peligros de incendio en materiales y productos

Obviamente, para que un sistema sea combustible, es imprescindible la presencia en él de material combustible. Los fenómenos de combustión y las fases de la misma dependen básicamente de las propiedades físicas y químicas del material de que se trate. Parece razonable, por tanto, estudiar el carácter y las propiedades de inflamabilidad de los distintos materiales y productos. En la presente sección se han agrupado los materiales de acuerdo con sus características técnicas, en lugar de utilizar conceptos teóricos (NFPA, 1991).

Productos de madera y derivados

La madera es uno de los materiales más comunes del entorno humano. Casas, estructuras de edificios, muebles y bienes de consumo están fabricados en madera y este material también se utiliza mucho para la fabricación de productos como el papel y en la industria química.

La madera y sus derivados son fácilmente combustibles y, cuando entran en contacto con superficies a alta temperatura o quedan expuestos a una radiación de calor, llama abierta o cualquier otra fuente de ignición, se producen procesos de carbonización, calentamiento al rojo, ignición o combustión, dependiendo de las condiciones del proceso. Para ampliar su ámbito de aplicación, es necesario mejorar sus propiedades anti-combustión. Las unidades estructurales fabricadas en madera suelen tratarse con agentes ignífugos (p. ej., mediante saturación, impregnación o recubrimiento superficial) para conseguir que sean menos combustibles.

La característica más importante de la combustibilidad de los distintos tipos de madera es la temperatura de ignición. Su valor depende principalmente de algunas propiedades de la madera y de las condiciones en que se realiza la prueba, como densidad, humedad, tamaño, y forma de la muestra de madera y de la fuente de ignición, tiempo e intensidad de exposición, y entorno del ensayo. Es interesante observar las diferencias en la temperatura de ignición obtenidas con los distintos métodos de ensayo. La práctica demuestra que los productos limpios y secos presentan una facilidad de ignición extremadamente baja, mientras que en madera polvorienta, impregnada de aceite y almacenada en recintos con una ventilación insuficiente, se han registrado incendios por ignición espontánea. Se ha demostrado empíricamente que un contenido mayor de humedad aumenta la temperatura de ignición y reduce la velocidad de combustión de la madera. La descomposición térmica de la madera es un proceso complejo que consta de las fases siguientes:

- La descomposición térmica con pérdida de masa se inicia ya entre 120 y 200 °C; en esta fase se libera el contenido de humedad y se produce la degradación de los materiales no combustibles en el área de combustión.

- Entre 200 y 280 °C se producen principalmente reacciones endotérmicas y se absorbe la energía calorífica de la fuente de ignición.
- Entre 280 y 500 °C las reacciones exotérmicas de los productos de descomposición se aceleran constantemente dando lugar al proceso primario y, al mismo tiempo, se desarrollan fenómenos de carbonización. En este rango de temperatura tiene lugar ya una combustión sostenida. Después de la ignición, la combustión no es constante debido a la capacidad de las capas carbonizadas para aislar el calor. Por tanto, el calentamiento de las capas más profundas es limitado y lento. Al aumentar la superficie de productos de descomposición combustibles, se completa la combustión.
- A temperaturas superiores a 500 °C, la madera carbonizada forma residuos. Al calentarse al rojo, se producen cenizas que contienen materiales inorgánicos sólidos, y concluye el proceso.

Fibras y textiles

La mayoría de los textiles fabricados a base de fibras que se encuentran en el entorno humano son combustibles. La ropa, el mobiliario y el entorno habitable están constituidos en su totalidad o en parte por textiles, que representan un peligro tanto durante su producción, procesado y conservación como durante su utilización.

Las materias primas de los textiles pueden ser naturales o artificiales; las fibras sintéticas pueden utilizarse solas o mezcladas con fibras naturales. Químicamente, las fibras naturales de origen vegetal (algodón, cáñamo, yute, lino) están formadas por celulosa, que es combustible, y presentan una temperatura de ignición relativamente alta (≈ 400 °C). Una característica positiva de su combustión es que, cuando se eleva su temperatura, se carbonizan pero no se funden. Esto resulta especialmente beneficioso para el tratamiento médico de las quemaduras.

Las características de riesgo de incendio de las fibras basadas en proteínas de origen animal (lana, seda, pelo) todavía son más positivas que las de las fibras vegetales, ya que presentan una temperatura más alta de ignición (500-600 °C) y, en las mismas condiciones, su combustión es menos intensa.

Cada vez adquieren mayor importancia las aplicaciones textiles de la industria de los plásticos, que aprovecha algunas propiedades mecánicas extremadamente positivas de los productos poliméricos. Entre las características de las fibras sintéticas acrílicas, de poliéster y termoplásticas (nylon, polipropileno, polietileno), las relativas a la combustión son las menos positivas. La mayoría de estas fibras, a pesar de su elevada temperatura de ignición ($\approx 400-600$ °C), se funden cuando se exponen al calor, entran fácilmente en ignición, arden con intensidad, gotean o se funden durante la combustión y liberan una cantidad considerable de humo y gases tóxicos. Estas propiedades pueden mejorarse si se mezclan con fibras naturales, dando lugar a los denominados tejidos con mezcla de fibra. También pueden tratarse con agentes ignífugos. En la fabricación de textiles para la industria y de ropa ignífuga ya se están utilizando mucho productos inorgánicos de fibras no combustibles (fibras de vidrio y metálicas).

En los textiles, las propiedades de seguridad más importantes son las relacionadas con la capacidad de ignición, la propagación de la llama y la generación de calor y de productos de combustión tóxicos. Para su determinación, se han desarrollado métodos especiales de ensayo. Los resultados obtenidos se aplican en los lugares donde se utilizan estos productos (vivienda, mobiliario, tapizado de vehículos, ropa, alfombras, cortinas, ropa de protección contra el calor y las inclemencias) y sirven para elaborar la normativa de seguridad contra los riesgos derivados de su uso. Una tarea fundamental de los

investigadores industriales es desarrollar textiles que soporten altas temperaturas mediante un tratamiento ignífugo (difícilmente combustibles, con un tiempo de ignición prolongado, baja velocidad de propagación de la llama, baja velocidad de liberación de calor) y con una producción reducida de productos de combustión tóxicos, a fin de reducir los accidentes por incendio debidos a la combustión de este tipo de materiales.

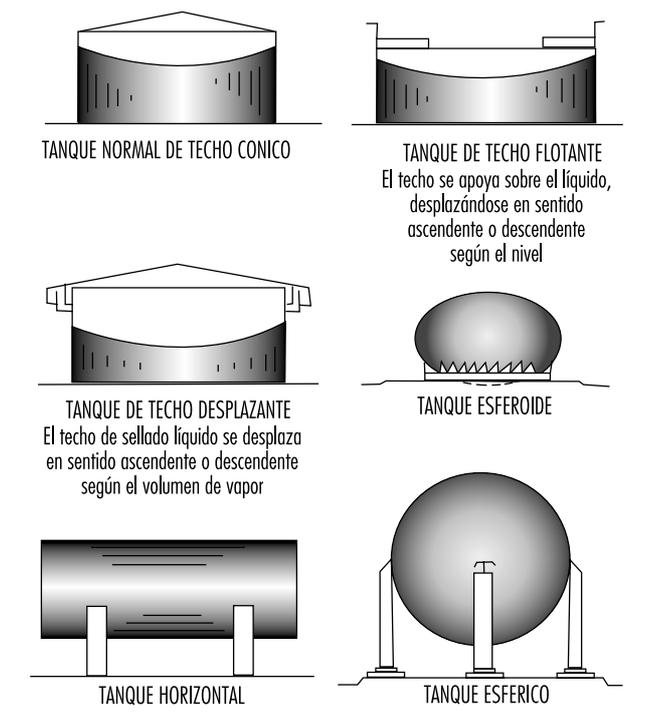
Líquidos combustibles e inflamables

En presencia de una fuente de ignición, los líquidos combustibles e inflamables son fuentes potenciales de riesgo. En primer lugar, el espacio (cerrado o abierto) de vapor formado por encima de estos líquidos representa un peligro de incendio y de explosión y puede dar lugar a una combustión y, con mayor frecuencia, a una explosión, si el material está presente en la mezcla vapor-aire en una determinada concentración. Por lo tanto, la combustión y la explosión de líquidos combustibles e inflamables puede evitarse si:

- se eliminan las fuentes de ignición, el aire y el oxígeno;
- en lugar de oxígeno está presente en el ambiente un gas inerte;
- el líquido se almacena en un depósito o sistema cerrado (véase la Figura 41.3),
- se impide que se alcance la concentración peligrosa de vapor mediante una ventilación adecuada.

En la práctica, se conocen muchas características relacionadas con la naturaleza peligrosa de los líquidos combustibles e inflamables, como puntos de inflamación en vaso cerrado y abierto, punto de ebullición, temperatura de ignición, velocidad de evaporación, límites superior e inferior de la concentración de combustibilidad (límites inflamables o explosivos), o la densidad relativa de vapor en relación con el aire y la energía necesarios para la ignición de vapores. Todos estas características

Figura 41.3 • Tipos más comunes de tanques para el almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles.



proporcionan una gran información sobre la facilidad de ignición de los distintos líquidos.

En casi todo el mundo se utiliza el punto de inflamación, parámetro determinado mediante un ensayo estándar en condiciones atmosféricas, como base para establecer las diferentes categorías de riesgo de los líquidos y las de los materiales que se comportan como líquidos a temperaturas relativamente bajas. Para cada categoría de inflamabilidad y combustibilidad, se fijan los correspondientes requisitos de seguridad en materia de conservación y manipulación, los procesos de operación y el equipo eléctrico que debe instalarse en la zona. También hay que identificar para cada categoría las zonas de riesgo que rodean a los equipos. La experiencia demuestra que se pueden producir incendios y explosiones —dependiendo de la temperatura y la presión del sistema— en un rango de concentración comprendido entre ambos límites de inflamabilidad.

Gases

A pesar de que todos los materiales —a determinada presión y temperatura— pueden pasar a estado gaseoso, los materiales que en la práctica se consideran gases son aquellos que se encuentran en dicho estado en condiciones normales de presión atmosférica (≈ 100 kPa) y temperatura (≈ 20 °C).

Con respecto a los peligros de incendio y explosión, los gases pueden clasificarse en dos grandes grupos: gases combustibles y gases no combustibles. De acuerdo con la definición aceptada en la práctica, los gases combustibles son aquellos que entran en combustión en el aire con una concentración normal de oxígeno, siempre que existan las condiciones adecuadas. La ignición sólo se produce por encima de una determinada temperatura, con la temperatura de ignición necesaria y dentro de un determinado rango de concentración.

Los gases no combustibles son aquellos que no entran en combustión ni en oxígeno ni en aire independientemente de su concentración. Algunos de estos gases favorecen la combustión (p. ej., el oxígeno), mientras que otros la inhiben. Los gases no combustibles y que no favorecen la combustión se denominan gases inertes (nitrógeno, gases nobles, dióxido de carbono, etc.).

Normalmente, y para una mayor eficiencia económica en la conservación y transporte de gases en depósitos o cisternas, éstos se comprimen, licúan o condensan en frío (estado criogénico). Básicamente, existen dos situaciones de peligro cuando se manipulan gases: durante el período de almacenaje y cuando se extraen de los depósitos.

En gases comprimidos en depósitos de almacenamiento, el calor externo puede aumentar considerablemente la presión interior del depósito y, si se alcanza una sobrepresión extrema, llega a producirse una explosión. Los depósitos de almacenamiento de gases incluyen normalmente una fase de vapor y otra líquida. Como resultado de los cambios de presión y temperatura, la extensión de la fase líquida aumenta la compresión del espacio de vapor, mientras que la presión de vapor del líquido aumenta proporcionalmente al aumento de la temperatura. Estos procesos pueden dar lugar a una presión crítica peligrosa. Los depósitos de almacenamiento deben incluir dispositivos de liberación de sobrepresión capaces de mitigar una situación de peligro ocasionada por altas temperaturas.

Si los depósitos de almacenamiento no están bien cerrados o están dañados, el gas saldrá a la atmósfera libre, se mezclará con el aire y, dependiendo de su cantidad y su flujo, puede provocar la formación de una gran atmósfera explosiva. El aire que se encuentra en las proximidades de un depósito con fugas puede ser nocivo para la respiración y para las personas que se encuentran cerca supone un peligro, en parte por el efecto tóxico de algunos gases y en parte por la dilución de la concentración de oxígeno.

Los gases representan un peligro de incendio potencial y hay que manipularlos de un modo seguro. Para ello, y especialmente en el entorno industrial, deben conocerse en detalle las siguientes características: propiedades químicas y físicas de los gases, temperatura de ignición, límites superior e inferior de concentración de inflamabilidad, parámetros peligrosos del gas en el depósito, riesgo ocasionado por la liberación de gases a la atmósfera, dimensiones de las zonas de seguridad necesarias y medidas especiales que deben tomarse en caso de emergencia por incendio.

Productos químicos

Para un trabajo seguro, es fundamental conocer los parámetros de riesgo de los productos químicos. Sólo pueden elaborarse medidas preventivas y normas de seguridad contra incendios si se tienen en cuenta las propiedades químicas y físicas que presentan en relación con el peligro de incendio. De entre esas propiedades las más importantes son: combustibilidad, capacidad de ignición, capacidad de reacción con otros materiales, agua o aire, propensión a la corrosión, toxicidad y radiactividad.

La información sobre estas propiedades de los productos químicos figura en las fichas técnicas elaboradas por los fabricantes y en los manuales sobre productos químicos peligrosos. Se trata no sólo de las características técnicas generales de los materiales, sino también de los valores reales de los parámetros de peligro (temperatura de descomposición, temperatura de ignición, concentraciones límite de combustión, etc.), su comportamiento especial, los requisitos de almacenamiento y de seguridad contra incendios, y recomendaciones de primeros auxilios y asistencia médica.

La toxicidad de los productos químicos puede dar lugar a dos situaciones de riesgo en un incendio potencial. Por un lado, la alta toxicidad de ciertos productos químicos puede resultar peligrosa en caso de incendio y, por otro, su presencia en el área de incendio puede dificultar las operaciones de extinción.

Los agentes oxidantes (nitratos, cloratos, peróxidos inorgánicos, permanganatos, etc.), aunque en sí no son combustibles, contribuyen en gran medida a la ignición de los materiales combustibles, así como a su combustión, que puede ser intensa y en ocasiones explosiva.

En el grupo de materiales inestables se encuentran los productos químicos (acetaldehídos, óxido de etileno, peróxidos orgánicos, cianuro de hidrógeno, cloruro de vinilo) que se polimerizan o se descomponen de forma espontánea o con mucha facilidad dando lugar a reacciones exotérmicas violentas.

Los materiales que reaccionan con el agua y el aire son extremadamente peligrosos. Estos materiales (óxidos, hidróxidos, hidruros, anhídridos, metales alcalinos, fósforo, etc.) interactúan con el agua y el aire de la atmósfera e inician reacciones que van acompañadas de una liberación de calor muy alta. Los materiales combustibles entran en una ignición espontánea. Además, los componentes combustibles que entran en combustión pueden explotar y propagarse a otros materiales combustibles que se encuentren en las proximidades.

La mayoría de los materiales corrosivos (los ácidos inorgánicos —sulfúrico, nítrico, perclórico, etc.— y los halógenos —flúor, cloro, bromo, yodo—) son agentes oxidantes fuertes y tienen efectos muy destructivos sobre los tejidos vivos, por lo que es necesario tomar las necesarias medidas de seguridad contra incendios.

Los elementos y compuestos radiactivos, además de los peligros derivados de la radiación, pueden presentar también un peligro de incendio. Cuando en un incendio resulta dañada la estructura de objetos radiactivos, pueden liberarse materiales que irradian rayos y con un efecto ionizador muy fuerte y provocan la destrucción de los organismos vivos. Los accidentes

nucleares pueden ir acompañados de incendios, cuyos productos de descomposición adsorben contaminantes radiactivos (radiación α y β). Estos últimos pueden producir daños permanentes en las personas que participan en las tareas de rescate si penetran en sus cuerpos. Algunos materiales son extremadamente peligrosos porque las personas afectadas no perciben a través de sus sentidos ninguna radiación, y su estado de salud general no parece quedar afectado. Si materiales radiactivos entran en combustión, deberá supervisarse constantemente la radiactividad del lugar, los productos de descomposición y el agua utilizada en la extinción del incendio con los dispositivos de medición adecuados. Estos factores deben tenerse en cuenta al diseñar la estrategia de intervención. Los edificios donde se manipulan, procesan y almacenan materiales radiactivos deben construirse con materiales no combustibles de alta resistencia al fuego. Es necesario también utilizar equipos automáticos de alta calidad para la detección, señalización y extinción de los incendios.

Explosivos y agentes de voladura

Los materiales explosivos se utilizan para fines militares e industriales. Se trata de productos químicos y mezclas de los mismos que, cuando se les aplica una fuerza mecánica intensa (golpe, choque, fricción) o cuando se inicia la ignición, se transforman súbitamente en gases de gran volumen mediante una reacción de oxidación extremadamente rápida (p. ej., 1.000-10.000 m/s). El volumen de estos gases es mucho mayor que el del material explosionado y ejerce una presión muy alta en sus proximidades. En una explosión pueden alcanzarse temperaturas elevadas (2.500-4.000 °C) que provocan la ignición de los materiales combustibles en la zona de explosión.

La fabricación, el transporte y el almacenamiento de materiales explosivos debe cumplir unos requisitos estrictos, como el NFPA 495, Código de Materiales Explosivos.

Además de los materiales explosivos utilizados para fines militares e industriales, también se incluyen en la categoría de materiales peligrosos los materiales de voladura inductiva y los productos pirotécnicos. Las mezclas más utilizadas son las de materiales explosivos (ácido pícrico, nitroglicerina, hexógeno, etc.), aunque también se utilizan mezclas de materiales que pueden explosionar (polvo negro, dinamita, nitrato amónico, etc.). Los materiales plásticos, conocidos por su utilización en los actos terroristas, constan básicamente de mezclas de materiales de efecto rompedor y plastificante (ceras, vaselina, etc.).

En cuanto a los materiales explosivos, el método más eficaz de protección contra incendios es su alejamiento de las fuentes de ignición. Algunos materiales explosivos reaccionan con el agua o con diversos materiales orgánicos y se oxidan. Para el manejo de estos materiales deben tenerse muy en cuenta los requisitos y la normativa de almacenamiento con otros materiales.

Metales

La práctica nos enseña que casi todos los metales, en las condiciones adecuadas, pueden entrar en combustión en el aire. Por su comportamiento en caso de incendio, el acero y el aluminio de gran espesor estructural se consideran materiales no combustibles. Sin embargo, el polvo de aluminio y de hierro y los algodones metálicos de fibra de metal fina pueden entrar fácilmente en ignición y, por tanto, arder de forma intensa. Los metales alcalinos (litio, sodio, potasio), los metales alcalinotérreos (calcio, magnesio, zinc), el circonio, el hafnio, el titanio, etc. entran en ignición con extrema facilidad cuando están en forma de polvo, limaduras o tiras finas. Algunos metales tienen tal capacidad de reacción que deben almacenarse fuera del contacto con el aire, en una atmósfera de gas inerte o bajo un líquido neutro a los metales.

Los metales combustibles y los propensos a la combustión producen reacciones de combustión extremadamente violentas, con procesos de oxidación de alta velocidad y liberación de cantidades de calor bastante mayores que las observadas en la combustión de líquidos combustibles e inflamables. Tras la fase preliminar de calentamiento e ignición al rojo, la combustión del polvo metálico sedimentado puede convertirse en una combustión rápida. El polvo en movimiento y las nubes de polvo resultantes de la combustión pueden dar lugar a graves explosiones. La capacidad de combustión y la afinidad con el oxígeno de algunos metales (como el magnesio) es tan alta que, después de entrar en ignición, continúan ardiendo en algunos de los medios (p. ej., nitrógeno, dióxido de carbono, atmósfera de vapor) utilizados para extinguir incendios producidos por materiales combustibles, sólidos y líquidos.

La extinción de los incendios de metales representa un desafío especial para los equipos de bomberos, resultando decisiva la elección de un agente extintor adecuado y del procedimiento empleado.

Los incendios de metales pueden controlarse mediante una detección precoz, una intervención rápida y adecuada del equipo de bomberos utilizando el método de extinción más efectivo y, si es posible, el alejamiento de la zona del incendio de metales y otros materiales combustibles o, al menos, la reducción de sus cantidades.

En una combustión con metales radiactivos (plutonio, uranio) debe prestarse especial atención a la protección contra las radiaciones y tomar las medidas preventivas oportunas para evitar la penetración de productos de descomposición tóxicos en los organismos vivos. Así, los metales alcalinos, por su capacidad para reaccionar violentamente con el agua, sólo pueden extinguirse con polvos secos. La combustión del magnesio no debe extinguirse con agua, dióxido de carbono, halones o nitrógeno, porque pueden agravar aún más la situación. Los únicos agentes que pueden aplicarse con éxito en este caso son los gases nobles o, en ocasiones, el trifluoruro de boro.

Plásticos y cauchos

Los plásticos son compuestos orgánicos macromoleculares fabricados sintéticamente o mediante la modificación de materiales naturales. La estructura y forma de estos materiales macromoleculares, que son el resultado de reacciones de polimerización, poliadición o policondensación, influye considerablemente en sus propiedades. Las cadenas moleculares de los termoplásticos (poliamidas, policarbonatos, poliésteres, poliestireno, cloruro de polivinilo, polimetil-metacrilato, etc.) son lineales o ramificadas, los elastómeros (neopreno, polisulfuros, isopreno, etc.) presentan ligeros enlaces cruzados, mientras que los plásticos termoendurecidos (duroplásticos: polialquilos, resinas epoxi, poliuretanos, etc.) presentan fuertes enlaces cruzados.

El caucho natural se utiliza en la industria del mismo nombre como materia prima, y se somete a un proceso de vulcanización. Los cauchos artificiales, cuya estructura es similar a la del caucho natural, son polímeros y copolímeros del butadieno.

El uso de los productos plásticos y del caucho es cada vez más frecuente en todos los campos de la vida cotidiana. La gran variedad y las excelentes propiedades técnicas de estos materiales permiten su aplicación a áreas tan diversas como estructuras de edificios, mobiliario, ropas, mercancías y piezas para vehículos y maquinaria.

Normalmente, los plásticos y el caucho, al igual que los materiales orgánicos, se consideran materiales combustibles. Para analizar su comportamiento en un incendio se utilizan una serie de parámetros que pueden determinarse con métodos especiales. Teniendo en cuenta esos parámetros (combustibilidad, capacidad de ignición, capacidad de producción de humos,

propensión a la producción de gases tóxicos y al goteo en la combustión), se definen sus ámbitos de aplicación y se establecen las condiciones de seguridad necesarias frente a incendios.

En muchos casos, la temperatura de ignición de los plásticos es superior a la de la madera u otros materiales, pero la mayoría de las veces éstos entran en ignición con mayor facilidad y su combustión se realiza con más rapidez e intensidad. Los incendios de materiales plásticos suelen ir acompañados de un desagradable fenómeno de liberación de grandes cantidades de un humo muy denso que puede limitar fuertemente la visibilidad y dar lugar a gases tóxicos (ácido clorhídrico, fosgeno, monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno, gases nitrosos, etc.). Los materiales termoplásticos se funden durante la combustión, después se fluidifican y, según su ubicación, (p. ej., si se encuentran en o sobre un techo) producen goteo en la zona de combustión y pueden provocar la ignición de los materiales combustibles que se encuentran debajo de ellos.

La optimización de las características de combustión es un problema complejo y un "tema clave" de la química de los plásticos. Los agentes ignífugos inhiben la combustibilidad, la ignición es más lenta, la velocidad de combustión disminuye y la propagación de la llama se hace más lenta pero, por otro lado, aumentan la cantidad y densidad del humo y la mezcla de gas producida es más tóxica.

Polvo

Por su estado físico, el polvo se considera un material sólido, pero sus propiedades físicas y químicas difieren de las del mismo material en forma compacta. Es sabido que muchos accidentes industriales y catástrofes están provocados por explosiones de polvo. Materiales que no son combustibles en su estado normal, como los metales, pueden originar una explosión cuando se encuentran en forma de polvo mezclado con aire y se les aplica una fuente de ignición, incluso de baja energía. El peligro de una explosión existe igualmente en el caso de polvo de materiales combustibles.

El polvo representa un peligro de explosión no sólo cuando flota en el aire, sino también cuando está sedimentado. Entre las capas de polvo puede acumularse el calor y desarrollarse una combustión lenta en su interior debido a un aumento de la capacidad de reacción de las partículas y a su menor conductividad térmica. Entonces, el polvo puede ser agitado por ráfagas, lo que aumenta las posibilidades de explosión.

Los partículas flotantes en una distribución fina suponen un riesgo aún más grave. Para los polvos, al igual que para los gases y los vapores combustibles, existe un rango especial de concentración aire-polvo en el que puede producirse una explosión. Los límites superior e inferior de la concentración explosiva y la amplitud del rango de concentración dependen del tamaño y la distribución de las partículas. Si la concentración de polvo es superior a la concentración máxima necesaria para producir una explosión, una parte del polvo no será destruida por el incendio y absorberá el calor; en consecuencia, la presión de explosión desarrollada se mantendrá por debajo del máximo. El contenido de humedad del aire también influye en las posibilidades de explosión, ya que la temperatura de ignición de la nube de polvo aumentará en función de la cantidad de calor necesaria para evaporar la humedad. Cuando se mezcla un polvo inerte extraño con una nube de polvo, se reduce la explosividad de la mezcla polvo-aire. El efecto es el mismo cuando se mezclan gases inertes con la mezcla de polvo-aire, pues se reduce la concentración de oxígeno necesaria para la combustión.

La experiencia demuestra que todas las fuentes de ignición, incluso las de energía mínima, pueden provocar la ignición de una nube de polvo (llama abierta, arco eléctrico, chispa mecánica o electrostática, superficie caliente, etc.). Según los resultados obtenidos en el laboratorio, los requisitos de energía para

la ignición de nubes de polvo son entre 20 y 40 veces mayores que para las mezclas de vapor combustible y aire.

Los factores que influyen en el peligro de explosión de polvo sedimentado son las características físicas y térmicas de la capa de polvo, la temperatura de calentamiento al rojo del polvo y las propiedades de ignición de los productos de descomposición liberados por la capa de polvo.

MEDIDAS DE PREVENCIÓN CONTRA INCENDIOS

Peter F. Johnson

La Historia habla del uso del fuego para calentar y cocinar, pero también de los importantes daños causados por el mismo en muchas ciudades. Casas, edificios y hasta ciudades enteras han quedado destruidas por incendios.

Una de las primeras medidas preventivas que se instauraron fue el decreto que obligaba a apagar todos los fuegos domésticos antes de la caída de la noche. Así, en 872 en Oxford, Inglaterra, las autoridades ordenaron que se tocara una campana de toque de queda a la caída del día para recordar a los ciudadanos que apagasen todos los fuegos (Bugbee, 1978). Realmente, la palabra inglesa *curfew* (toque de queda) se deriva de la francesa *couvre feu*, que significa literalmente "cubre fuego".

La causa de los incendios suele ser un error humano al poner en contacto un combustible con una fuente de ignición (p. ej., papel de desecho almacenado cerca de un calentador o líquidos inflamables que se utilizan cerca de una llama abierta).

Para que se produzca un incendio es necesario un combustible, una fuente de ignición y algún mecanismo que ponga en contacto el combustible con la fuente de ignición en presencia de aire o de otro oxidante. Desarrollando estrategias para reducir los riesgos del combustible, eliminar las fuentes de ignición o impedir la interacción entre combustible e ignición, se pueden reducir las pérdidas personales y materiales causadas por los incendios.

En los últimos años, cada vez es mayor la preocupación por la prevención de los incendios como una de las maneras más efectivas desde el punto de vista económico de tratar este tema. Suele resultar más fácil (y más económico) evitar que se produzca un incendio que controlarlo o extinguirlo una vez iniciado.

Así lo ilustra el Fire Safety Concepts Tree (NFPA 1991; 1995a) desarrollado por el NFPA en Estados Unidos. Este enfoque sistemático de la seguridad contra incendios demuestra que es posible reducir las víctimas mortales por incendio en el lugar de trabajo evitando la ignición de los mismos o controlando su repercusión.

La prevención de incendios exige modificar el comportamiento humano, y para ello es necesario impartir una formación de seguridad frente a incendios a cargo de la dirección, utilizando los últimos avances en materia de formación y normativa, así como otros materiales pedagógicos. En muchos países, estas estrategias son de obligado cumplimiento por ley y las empresas están obligadas a cumplir la normativa legal de prevención de incendios como parte de su compromiso de seguridad frente a los trabajadores.

La formación en prevención de incendios se analiza en la sección siguiente. Actualmente, en los sectores comercial e industrial se reconoce la importancia de la prevención de incendios. A escala internacional se están utilizando mucho las siguientes publicaciones: Lees, *Loss Prevention in the Process Industries*, volúmenes 1 y 2 (1980); NFPA 1—*Fire Prevention Code* (1992); *The Management of Health and Safety at Work Regulations* (ECD, 1992) y *Fire Protection Handbook* del NFPA (Cote, 1991), a las

que hay que añadir gran número de reglamentos y normativas, así como el material de formación desarrollado por gobiernos, empresas y compañías de seguros de distintos países con el fin de minimizar las pérdidas personales y materiales.

Formación sobre seguridad contra incendios

Para que un programa de seguridad contra incendios sea efectivo, debe existir un compromiso de política social en cuanto a la seguridad y poner en marcha un plan efectivo con las fases siguientes: a) planificación (establecimiento de metas y objetivos), b) diseño y aplicación y c) evaluación del programa (para supervisar su efectividad).

Metas y objetivos

Gratton (1991), en un interesante artículo sobre la formación en materia de seguridad contra incendios, definió la diferencia entre metas, objetivos y prácticas de aplicación o estrategias. Las metas son declaraciones generales de intenciones para "reducir el número de incendios y, con ello, el número de muertos y heridos entre los trabajadores, así como su repercusión económica para las empresas".

Los aspectos personales y económicos de la meta general no son incompatibles. Las prácticas modernas de gestión de riesgos demuestran que las mejoras en seguridad para los trabajadores a través de la implantación de prácticas efectivas de control de pérdidas pueden ser positivas desde el punto de vista económico para la empresa, al mismo tiempo que suponen un beneficio para la comunidad.

Estas metas deben traducirse a objetivos específicos de seguridad contra incendios en función de la empresa y de los trabajadores. Los objetivos, que deben ser cuantificables, suelen contemplar aspectos como:

- reducir los accidentes industriales y los incendios asociados;
- reducir el número de muertos y heridos,
- reducir el daño material a la empresa.

En muchas empresas pueden establecerse objetivos adicionales, como la reducción de los costes de interrupción de la actividad o la minimización del riesgo de responsabilidad legal.

Pero, en otras, el cumplimiento de los códigos y normas locales sobre edificios basta para garantizar el cumplimiento de sus objetivos de seguridad contra incendios. Sin embargo, dicha normativa tiende a limitarse a la seguridad personal, dando por hecho que los incendios se van a producir.

La gestión moderna de seguridad contra incendios entiende que, si bien la seguridad absoluta no es un objetivo realista, pueden establecerse objetivos cuantificables para:

- minimizar los accidentes de incendio mediante una prevención efectiva de los mismos;
- limitar el tamaño y las consecuencias de los incendios utilizando equipos y procedimientos de emergencia efectivos,
- utilizar los seguros como salvaguardia en caso de incendios graves e imprevistos, especialmente los provocados por catástrofes naturales como terremotos o incendios en bosques.

Diseño y aplicación

El diseño y la aplicación de los programas de formación en prevención de incendios dependen en gran medida del desarrollo de estrategias bien planificadas, de una gestión efectiva y de la motivación de los individuos. Para que un programa de seguridad contra incendios tenga éxito, debe existir un apoyo social fuerte y decidido a su aplicación.

Entre las estrategias posibles, estudiadas por Koffel (1993) y en el Industrial Fire Hazards Handbook del NFPA (Linville, 1990), cabe citar:

- la promoción de la política y de las estrategias corporativas sobre seguridad contra incendios entre el personal de la empresa;
- la identificación de todos los posibles escenarios de incendio y la aplicación de acciones adecuadas para reducir los riesgos;
- la supervisión de todos los códigos y normativas específicos que definen el nivel de cuidado en una industria concreta;
- la implantación de un programa de gestión de pérdidas para determinar las pérdidas en relación con los objetivos de rendimiento,
- la formación de todo el personal en técnicas adecuadas de prevención de incendios y respuesta a emergencias.

Entre las estrategias de aplicación existentes a escala internacional cabe destacar:

- los cursos de la Fire Protection Association (FPA) en el Reino Unido y su diploma de 'Fire Prevention' (Welch, 1993);
- la fundación SweRisk, compañía subsidiaria de la Swedish Fire Protection Association, que ayuda a las empresas a valorar los riesgos y desarrollar programas de prevención de incendios (Jernberg, 1993);
- la participación masiva en Japón de ciudadanos y trabajadores en la campaña de prevención de incendios desarrollada por la Agencia de Lucha contra Incendios de Japón (Hunter, 1991),
- la formación en seguridad en Estados Unidos a través de la utilización del Firesafety Educator's Handbook (NFPA, 1983) y del Public Fire Education Manual (Osterhout, 1990).

Es de vital importancia determinar la efectividad de los programas formativos de seguridad contra incendios, lo que proporcionará la motivación necesaria para financiar, desarrollar o modificar nuevos programas.

El mejor ejemplo de supervisión de una formación de seguridad contra incendios puede encontrarse tal vez en Estados Unidos. El programa Learn Not to Burn®, ideado para educar a la juventud norteamericana en los peligros de incendio, ha sido coordinado por la División de Educación Pública del NFPA. Según la supervisión y el análisis realizados en 1990, se consiguieron salvar 194 vidas gracias a la utilización de las medidas de seguridad impartidas en programas de seguridad contra incendios. El 30 % de las mismas puede atribuirse directamente al programa Learn Not to Burn®.

En Estados Unidos, la instalación de detectores de humo en las viviendas y los programas formativos de seguridad contra incendios permitieron reducir el número de víctimas mortales producidas en incendios en los hogares, que pasaron de 6.015 muertos en 1978 a 4.050 en 1990 (NFPA 1991).

Prácticas de mantenimiento industrial

En el sector industrial, Lees (1980) está considerado una autoridad internacional. Este autor afirma que, en muchas industrias, el potencial de pérdida masiva de vidas, daños graves o materiales es ahora mucho mayor que en el pasado. Actualmente, y en especial en las industrias petroquímica y nuclear, existe un gran peligro de incendio, explosión y liberación de gases tóxicos.

Por esta razón, la prevención de incendios es la clave para minimizar su ignición. Las plantas industriales modernas pueden conseguir un buen nivel de seguridad contra incendios mediante una buena gestión de los programas de:

- inspección de mantenimiento y seguridad;
- formación del personal en prevención de incendios;
- mantenimiento y reparación de equipos,
- seguridad y prevención de incendios provocados (Blye y Bacon, 1991).

La interesante guía de Higgins (1991) en el Fire Protection Handbook del NFPA analiza la importancia del mantenimiento en la prevención de incendios de instalaciones comerciales e industriales.

Las modernas herramientas informáticas de evaluación del riesgo de incendio en instalaciones industriales conceden gran importancia al mantenimiento para minimizar los riesgos del combustible y prevenir su contacto con fuentes de ignición. El software FREM (Fire Risk Evaluation Method) de Australia considera el mantenimiento como un factor clave en la seguridad contra incendios (Keith, 1994).

Equipos de calefacción

Entre los equipos de calefacción que se utilizan en el comercio y la industria se encuentran las estufas, los hornos convencionales, los hornos de madera, los deshidratadores, los secadores y los tanques de enfriamiento.

En el Industrial Fire Hazards Handbook del NFPA, Simmons (1990) identifica los siguientes riesgos de incendio de los equipos de calefacción:

1. la probabilidad de provocar la ignición de los materiales combustibles almacenados en las proximidades;
2. el peligro derivado de la existencia de combustible sin quemar o de una combustión incompleta;
3. el sobrecalentamiento debido a un fallo del equipo,
4. la ignición de disolventes combustibles, materiales sólidos u otros productos en proceso.

Estos peligros pueden paliarse mediante la combinación, en el marco de un programa efectivo de prevención de incendios, de medidas de gestión y control adecuadas, de formación y prácticas para los trabajadores y de limpieza y mantenimiento.

El Fire Protection Handbook del NFPA (Cote, 1991) incluye recomendaciones detalladas para los distintos tipos de calefacción, que resumimos a continuación.

Hornos y estufas

Los incendios y explosiones en hornos y estufas suelen deberse al combustible utilizado, a las sustancias volátiles generadas o a una combinación de ambos. Muchos hornos y estufas funcionan a temperaturas comprendidas entre 500 y 1.000 °C, que superan la temperatura de ignición de la mayoría de los materiales.

Los hornos y estufas requieren una serie de mandos y bloqueadores para evitar que los gases combustibles sin quemar o los productos de una combustión incompleta se acumulen y entren en ignición. Normalmente, este peligro es mayor al inicio de la combustión o durante las operaciones de apagado. Por tanto, los técnicos deben disponer de una formación especial que garantice una actuación acorde con la normativa de seguridad.

Entre los elementos básicos de un sistema de seguridad contra la propagación de incendios suelen encontrarse la construcción de edificios con materiales incombustibles, su aislamiento de otros equipos y materiales combustibles y un sistema de extinción automática de incendios.

Hornos de madera

Los hornos de madera se utilizan para secar este material (Lataille, 1990) y elaborar o cocer productos de arcilla (Hrbacek, 1984).

Estos equipos de altas temperaturas representan también un peligro para su entorno. Para evitar incendios, es fundamental un diseño que tenga en cuenta su aislamiento y un mantenimiento adecuado.

Los hornos utilizados para secar madera son doblemente peligrosos, porque la madera representa en sí misma un alto riesgo

de incendio y a menudo se calienta a temperaturas cercanas a su punto de ignición. Es fundamental limpiar regularmente las instalaciones para evitar que se acumulen pequeños trozos de madera y serrín que puedan entrar en contacto con el aparato de calefacción. Los mejores hornos de madera son los fabricados con un material resistente al fuego y equipados con rociadores automáticos y sistemas de ventilación/circulación de aire de alta calidad.

Deshidratadores y secadores

Se utilizan para reducir el contenido de humedad de los productos agrícolas, como leche, huevos, granos, semillas y heno. Los secadores pueden ser de caldeo directo, en cuyo caso el material a secar entra en contacto con los mismos, o por caldeo indirecto. En ambos casos, es necesario efectuar controles para cerrar el suministro de calor en caso de que se alcancen temperaturas excesivas, incendio en el secador, en el sistema de escape o en el de transporte, o fallo en la ventilación. También es necesario realizar una limpieza adecuada para impedir la formación de productos que puedan provocar la ignición.

Tanques de enfriamiento

Los principios generales de la seguridad contra incendios en los tanques de enfriamiento han sido estudiados por Ostrowski (1991) y Watts (1990).

El proceso de enfriamiento controlado consiste en la introducción de un metal caliente en un tanque de aceite. La finalidad es endurecer o templar el material mediante un cambio metalúrgico.

La mayoría de los aceites de enfriamiento son minerales y combustibles y deben elegirse con cuidado para cada aplicación de forma que la temperatura de ignición del aceite sea superior a la temperatura de funcionamiento del tanque de inmersión.

Es fundamental que el aceite no rebose de la boca del tanque y se derrame por los laterales. Para ello se realizarán controles del nivel de líquido y drenajes adecuados.

La inmersión parcial de materiales calientes es la causa más común de incendio en los tanques de enfriamiento y puede evitarse controlando que la transferencia y el transporte del material sean los adecuados.

También deben realizarse controles para impedir que se alcancen temperaturas excesivas en el aceite y en la entrada de agua al tanque, que podrían provocar incendios graves por ebullición y derrames de líquido alrededor del tanque.

A menudo se utilizan sistemas de extinción con dióxido de carbono o productos químicos secos para proteger la superficie del tanque. Se recomienda asimismo proteger el edificio con rociadores automáticos de techo. En algunos casos puede ser necesario también disponer una protección especial para los técnicos que trabajen en las proximidades del tanque. A menudo se instalan sistemas de pulverización de agua para proteger a los trabajadores.

Pero, por encima de todo, es fundamental formar adecuadamente a los trabajadores para los casos de emergencia, incluyendo formación sobre el uso de los extintores portátiles.

Equipos de procesos químicos

Las operaciones que se realizan para modificar la naturaleza química de los materiales han sido causa frecuente de importantes catástrofes, ocasionando grandes daños y muertos y heridos entre los trabajadores y las comunidades vecinas. Los peligros que presentan las plantas químicas son los incendios, las explosiones y la liberación de materiales tóxicos. Esta energía destructiva procede a menudo de una reacción química incontrolada en los materiales en proceso o de la combustión de

materiales que producen ondas expansivas, altos niveles de radiación y proyectiles, que pueden causar víctimas a gran distancia.

Operaciones y equipos de procesamiento

La primera fase del diseño es analizar los procesos químicos implicados y su potencial de liberación de energía. Lees (1980), en su obra *Loss Prevention in the Process Industries*, considera las fases siguientes:

- diseño adecuado de los procesos;
- estudio de los mecanismos de fallo y análisis de fiabilidad;
- identificación de los peligros y auditorías de seguridad,
- evaluación de riesgos—causas/consecuencias.

Al estudiar los niveles de peligrosidad debe evaluarse:

- la emisión y dispersión potencial de productos químicos, especialmente de sustancias tóxicas y contaminantes;
- los efectos de la radiación en un incendio y la dispersión de productos combustibles,
- los productos de explosión, especialmente ondas de choque con capacidad para destruir fábricas y edificios.

Puede encontrarse más información sobre los riesgos y su control en *Plant guidelines for technical management of chemical process safety* (AIChE, 1993); *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials* (Lewis, 1979) e *Industrial Fire Hazards Handbook del NFPA* (Linville, 1990).

Localización y protección de las instalaciones

Una vez identificados los peligros y las consecuencias en caso de incendio, explosión o liberación de productos tóxicos, puede estudiarse la localización de la planta química.

Lees (1980) y Bradford (1991) han elaborado unas directrices relativas a la localización de las plantas, que deben estar suficientemente alejadas de las comunidades vecinas para garantizar que no se vean afectadas en caso de accidente industrial. Una técnica ampliamente utilizada para determinar la distancia de separación de las plantas químicas es la QRA, o valoración del riesgo cuantitativo.

En el desastre ocurrido en Bhopal, India, en 1984 se vieron las consecuencias de ubicar una planta química demasiado cerca de una comunidad: más de 1.000 personas resultaron muertas por productos químicos tóxicos en un accidente industrial.

El dejar una zona libre alrededor de la planta química permite un acceso rápido a la misma del equipo de bomberos desde cualquier punto, sea cual sea la dirección del viento.

Las plantas químicas deben disponer de cámaras de control antiexplosión, refugios para los trabajadores y equipos de extinción de incendios que garanticen la seguridad de los trabajadores y permitan una intervención efectiva del equipo de bomberos en caso de accidente.

Control de derrames

Deben minimizarse los derrames de materiales inflamables o peligrosos mediante un adecuado diseño del proceso, con válvulas de seguridad y con equipos de detección/control adecuados. Como medida preventiva de derrames de gran magnitud hay que construir áreas protegidas por muros, a veces de tierra, que eviten su propagación y donde puedan arder sin causar daños en caso de entrar en ignición.

Los incendios en los sistemas de drenaje son habituales, por lo que se les debe prestar especial atención.

Peligros de la transferencia de calor

En las plantas químicas, los equipos de transferencia de calor de un fluido caliente a otro más frío representan una fuente potencial de incendio. Temperaturas locales excesivas pueden

ocasionar la descomposición y combustión de muchas sustancias, dando lugar en algunos casos al fallo del equipo de transferencia de calor de un fluido a otro y provocando una reacción violenta indeseada.

Para un funcionamiento seguro es fundamental establecer unos niveles de inspección y mantenimiento rigurosos, con una limpieza regular del equipo de transferencia de calor.

Reactores

Los reactores son depósitos en los que se realizan determinados procesos químicos. Pueden ser de tipo continuo o discontinuo y requieren un diseño especial para resistir las presiones resultantes de explosiones o reacciones incontroladas, así como disponer de mecanismos de desahogo de presión y aberturas de emergencia.

Entre las medidas de seguridad en los reactores químicos hay que citar:

- instrumentos y controles adecuados (incluida circuitería redundante) para detectar posibles accidentes;
- limpieza, inspección y mantenimiento de alta calidad del equipo y de los controles de seguridad;
- formación adecuada de los técnicos en materia de control y actuación en caso de emergencia,
- equipo adecuado de extinción de incendios y personal contra incendios.

Procesos de soldadura y corte

En las *Fichas de previsión de pérdidas* (1977) de la Factory Mutual Engineering Corporation (FM) se asegura que cerca del 10% de las pérdidas de bienes industriales se deben a accidentes en los que intervienen procesos de soldadura y corte de materiales, por lo general metales. Está claro que las elevadas temperaturas necesarias para fundir los metales pueden provocar un incendio, al igual que las chispas que generan muchos de estos procesos.

Las *Fichas* de la FM (1977) indican que los materiales que más veces se encuentran en los incendios causados por procesos de soldadura y corte son líquidos inflamables, depósitos de aceite, polvos combustibles y madera. Los entornos en que se producen este tipo de accidentes suelen ser instalaciones de almacenamiento, zonas en construcción de edificios, instalaciones en reparación y sistemas de tratamiento de residuos.

Las chispas generadas en procesos de soldadura y corte pueden saltar hasta distancias de 10 m y caer sobre materiales combustibles donde provocan una combustión sin llama y posteriormente un incendio con llama.

Procesos eléctricos

La soldadura y el corte por arco eléctrico son procesos en los que interviene la electricidad para generar el arco, que es la fuente de calor necesaria para fundir y unir metales. Los destellos de chispas son habituales, por lo que es necesario proteger a los trabajadores contra ellos, así como contra la electrocución y la intensa radiación por arco.

Procesos con gas combustible-oxígeno

El calor de combustión del gas y del oxígeno se utiliza para generar llamas de elevada temperatura y fundir metales que se van a unir o cortar. Manz (1991) indica que el acetileno es el gas combustible más utilizado por su elevada temperatura de llama, 3.000 °C aproximadamente.

La presencia de un combustible y de oxígeno a alta presión presenta un peligro adicional: la fuga de estos gases de sus cilindros de almacenamiento. Es importante recordar que muchos materiales que no entran en combustión o lo hacen lentamente en el aire, sí arden violentamente en oxígeno puro.

Medidas de protección y precaución

Manz (1991) en el *Fire Protection Handbook* del NFPA estudia las buenas prácticas de seguridad, entre las que cita:

- diseño, instalación y mantenimiento adecuado de los equipos de soldadura y corte, y en especial control del almacenamiento de los cilindros de combustible y oxígeno y de posibles fugas de los mismos;
- preparación adecuada de las áreas de trabajo para eliminar todos los peligros de ignición accidental de materiales combustibles próximos;
- riguroso control de todos los procesos de soldadura y corte;
- formación de todos los trabajadores en las prácticas de seguridad
- utilización de ropa ignífuga y protección facial de los trabajadores y las personas que trabajen en sus proximidades,
- ventilación adecuada para evitar que los trabajadores y las personas que trabajen en las proximidades estén expuestos a gases y humos nocivos.

Para soldar o cortar tanques u otros depósitos que han contenido materiales inflamables se requieren unas precauciones especiales. Cabe citar a este respecto la guía *Recommended Safe Practices for the Preparation for Welding and Cutting of Containers that have held Hazardous Substances* (1988) de la American Welding Society.

Para las zonas de construcción puede resultar útil la guía inglesa *Fire Prevention on Construction Sites* (1992) del Loss Prevention Council, que contiene un modelo de autorización para controlar las operaciones de corte y soldadura aplicable a cualquier planta o instalación industrial. Un modelo de autorización similar se encuentra en las Fichas de la FM para procesos de corte y soldadura (1977).

Protección contra rayos

El rayo es una de las causas más frecuentes de incendios con víctimas mortales en muchos países del mundo. En Estados Unidos, fallecen cada año unas 240 personas al ser alcanzadas por un rayo.

El rayo es una forma de descarga eléctrica entre las nubes y la Tierra. En la *Ficha* publicada por la FM sobre este tema (1984) se indica que la intensidad del rayo puede oscilar entre 2.000 y 200.000 A y la diferencia de potencial que se establece entre las nubes y la Tierra puede ser de 5 - 50x10⁶ V.

La frecuencia de los rayos varía según los países y las zonas en función, esencialmente, del número de días de tormenta al año. La magnitud de los daños causados por los rayos depende en gran medida del tipo de suelo, y son mayores en zonas donde la tierra presenta una alta resistividad.

Medidas de protección en edificios

En la norma *Standard for the Installation of Lightning Protection Systems* 780 del NFPA (1995b) se recogen los requisitos en materia de diseño para la protección de los edificios contra rayos. Aunque se sigue investigando la causa exacta de la descarga por rayo, la protección se basa en disponer de un medio para que la descarga del rayo pueda penetrar en la tierra o abandonarla sin dañar los edificios.

Los sistemas de pararrayos tienen pues dos funciones:

- interceptar la descarga del rayo antes de que alcance al edificio,
- proporcionar una vía inofensiva de descarga a tierra.

A tal fin, los edificios deben estar equipados con:

- pararrayos;
- conductores de bajada,
- buenas conexiones a tierra, de 10 ohm o inferiores.

Para más detalles sobre el diseño de protecciones antirrayo en edificios, consúltese el artículo de Davis (1991) en el *Fire Protection Handbook* del NFPA (Cote, 1991) y el *Code of Practice* (1992) del British Standards Institute.

Las descargas directas de los rayos pueden dañar cables de transmisión aéreos, transformadores, subestaciones exteriores y otras instalaciones eléctricas. También los equipos de transmisión eléctrica pueden recibir voltajes inducidos y sobrevoltajes que, al penetrar en los edificios, den lugar a incendios, destrucción de instalaciones y graves interrupciones de funcionamiento. Para evitarlo, es necesario disponer de disipadores de sobrevoltajes que desvíen a tierra estos picos de voltaje a través de tomas de tierra efectivas.

Los sobrevoltajes transitorios inducidos en cables eléctricos y de comunicación de muchos edificios pueden causar daños en los equipos informáticos de gran sensibilidad, de creciente utilización en el comercio y en la industria. Por esta razón, hay que disponer de una protección transitoria como la descrita en la obra *The Protection of Structures Against Lightning* del British Standards Institute BS 6651:1992.

Mantenimiento

Para una protección efectiva es esencial un mantenimiento adecuado de los sistemas de protección contra rayos. Especial atención merecen las tomas de tierra, elemento fundamental para la efectividad de los pararrayos.

MEDIDAS DE PROTECCION PASIVA CONTRA INCENDIOS

Yngve Anderberg

Limitación de los incendios por compartimentación**Planificación de la construcción y localización de los edificios**

El trabajo de ingeniería en materia de seguridad debe comenzar en la fase de proyecto del edificio, pues los requisitos de seguridad contra incendios influyen en gran medida en la disposición y trazado del mismo. Así, el proyectista podrá incorporar las medidas de seguridad contra incendios con mayor facilidad y a menor coste. En el enfoque global deben tenerse en cuenta tanto el interior del edificio como la planificación de la zona exterior. Los requisitos normativos obligatorios están siendo sustituidos por requisitos funcionales, lo que se traduce en un aumento de la demanda de expertos en este campo. Desde un principio, el proyectista debe colaborar con expertos en incendios para:

- definir los riesgos específicos de incendio del edificio;
- definir las distintas alternativas para obtener el nivel de seguridad contra incendios más adecuado;
- analizar las alternativas pertinentes desde el punto de vista técnico y económico,
- establecer los criterios para elegir la mejor alternativa técnica.

Una vez determinado el emplazamiento, el arquitecto debe tener en cuenta las características técnicas y funcionales del mismo en el proyecto. Del mismo modo, ha de considerar las características de la ubicación antes de tomar decisiones sobre la protección contra incendios, pues ésta puede influir considerablemente en el tipo de protección activa y pasiva que aconsejen los asesores de incendios. Al elaborar el proyecto, hay que considerar los recursos locales disponibles para la lucha contra incendios y el tiempo que se puede tardar en llegar al edificio. No es posible ni debe esperarse que el cuerpo de bomberos se

responsabilice totalmente de la protección de los ocupantes y los bienes del edificio; ha de contar con la ayuda de protecciones activas y pasivas contra incendios en el edificio capaces de proporcionarle una seguridad razonable en caso de incendio. En un incendio, las operaciones pueden ser de rescate, control del incendio y protección de los bienes, siendo la máxima prioridad en cualquier operación contra incendios la de garantizar la evacuación de todos los ocupantes del edificio antes de la aparición de situaciones críticas.

Diseño estructural basado en clasificaciones y en cálculos

Un buen método para normalizar la protección contra incendios y los requisitos de seguridad de un edificio es clasificar el tipo de construcción según los materiales utilizados en su estructura y el grado de resistencia al fuego de cada elemento. La clasificación puede basarse en ensayos en horno de acuerdo con ISO 834 (el riesgo de incendio viene definido por la curva estándar de temperatura/tiempo), en una combinación de ensayos y cálculos, o sólo en cálculos. Estos procedimientos permiten identificar la resistencia estándar al fuego (capacidad para mantener las funciones necesarias durante 30, 60, 90 minutos, etc.) de un elemento estructural de carga o separación. La clasificación (especialmente si está basada en ensayos) es un método simplificado y conservador, y cada vez se va sustituyendo más por métodos de cálculo funcional que tienen en cuenta el efecto de incendios naturales totalmente desarrollados. Sin embargo, los ensayos de incendio siempre serán necesarios, aunque pueden optimizarse combinándolos con simulaciones por ordenador, lo que permite reducir considerablemente el número de ensayos. Normalmente, en los ensayos de incendios, la carga sobre los elementos estructurales es el 100 % de la proyectada, pero en la realidad el factor de utilización de carga suele ser menor. Los criterios de aceptación son específicos para el conjunto o para el elemento analizado. La resistencia estándar contra incendios es el tiempo que un elemento puede resistir el fuego sin derrumbarse.

Los requisitos estructurales y de protección contra incendios incluidos en las normativas modernas basadas en el rendimiento tienen por objetivo conseguir un diseño de ingeniería óptimo y equilibrado en relación con la gravedad del incendio previsto. Estos estudios han abierto el camino a una ingeniería contra incendios basada en cálculos sobre la temperatura y los efectos estructurales en un proceso completo de incendio (con calentamiento y posterior enfriamiento) dentro de un compartimiento. En los cálculos relativos a incendios naturales se considera que los elementos estructurales (fundamentales para la estabilidad del edificio) y toda la estructura no deben derrumbarse durante todo el proceso de incendio ni durante su enfriamiento posterior.

En los últimos 30 años, se ha investigado mucho en este campo y se han desarrollado modelos informáticos que tienen en cuenta las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales a elevadas temperaturas. Algunos de esos modelos se han validado con gran número de datos experimentales y se han obtenido estimaciones precisas del comportamiento estructural en caso de incendio.

Compartimentación

Un compartimiento contra incendios es un espacio dentro de un edificio que puede comprender uno o varios pisos y que está delimitado por elementos separadores, de forma que, en caso de incendio, éste no pueda propagarse fuera de él. La compartimentación es importante para evitar que el fuego se propague a espacios demasiado grandes o a todo el edificio. Las personas y los bienes materiales que se encuentren fuera del compartimiento quedan protegidos gracias a la extinción del incendio por el cuerpo de bomberos, a su extinción de forma espontánea o, al menos, a los elementos separadores, que retardan la propagación

del incendio y del humo hasta que los ocupantes puedan ser rescatados.

La resistencia al fuego específica de un compartimiento depende de su finalidad y del tipo de incendio potencial. Los elementos separadores que limitan el compartimiento deben resistir el máximo incendio posible o contener el fuego hasta que los ocupantes puedan ser evacuados. Los elementos de carga del compartimiento pueden estar diseñados para resistir todo el proceso de incendio o solamente presentar una determinada resistencia medida en períodos de tiempo iguales o superiores a los exigidos para los elementos separadores.

Integridad estructural durante un incendio

Con la exigencia de mantenimiento de la integridad estructural durante un incendio se trata de evitar el derrumbamiento de la estructura y garantizar la capacidad de los elementos separadores de evitar la ignición y la propagación de la llama a los espacios colindantes. Pueden adoptarse distintos enfoques para los diseños de resistencia contra incendios. Hay clasificaciones de ensayos estándar de resistencia a incendios según ISO 834, combinaciones de ensayos y cálculos o únicamente cálculos, así como una estimación informática sobre los riesgos de incendio.

Acabado interior

El acabado interior comprende los materiales de superficie de paredes, techos y suelo. Existen muchos tipos de acabado interior, como yeso, escayola, madera y plásticos. Entre sus múltiples funciones se encuentran las de aislamiento acústico y térmico o la protección contra el desgaste y la abrasión.

El acabado interior se relaciona con los incendios en cuatro aspectos: puede aumentar la velocidad del incendio hasta alcanzar condiciones de descarga, puede incrementar el incendio propagando la llama, puede aumentar la liberación de calor al añadir combustible y puede producir humo y gases tóxicos. Por lo tanto, deberán evitarse aquellos materiales que presenten altas velocidades de propagación de llama, proporcionen combustible al incendio o produzcan cantidades peligrosas de humo y gases tóxicos.

Propagación del humo

Cuando se declara un incendio en un edificio, el humo puede llegar a extenderse a lugares muy alejados. Los huecos de la escalera y de los ascensores pueden verse invadidos por el humo, bloqueando la evacuación y dificultando la extinción del incendio. Actualmente se considera que, en un incendio, el humo es el máximo factor de riesgo (véase la Figura 41.4).

Entre las fuerzas de desplazamiento del humo se incluyen el tiro natural, la flotabilidad de los gases de combustión, el efecto del viento, los sistemas de ventilación y el efecto de pistón de los ascensores.

Cuando en el exterior el ambiente es frío, se produce un movimiento ascendente de aire en las cajas de los ascensores. En el interior del edificio el aire tiende a flotar, al estar más caliente y ser menos denso que el aire exterior. La fuerza de flotabilidad hace que el aire ascienda por los huecos de los ascensores, fenómeno conocido como tiro natural. La diferencia de presión entre los huecos de los ascensores y el exterior, generadora del movimiento del aire, viene dada por la fórmula siguiente:

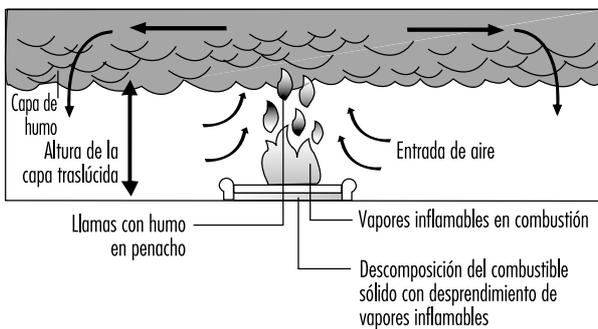
$$\Delta P_{50} = \frac{g P_{atm}}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_5} \right) z$$

siendo

ΔP_{50} = diferencia de presión entre los huecos de los ascensores y el exterior

g = aceleración de la gravedad

Figura 41.4 • Producción de humo en un incendio.



- P_{atm} = presión atmosférica absoluta
 R = constante de gas del aire
 T_o = temperatura absoluta del aire exterior
 T_s = temperatura absoluta del aire dentro de los huecos de los ascensores
 z = elevación

En un incendio, el humo a elevada temperatura flota por su baja densidad. La ecuación de flotabilidad de los gases de combustión es similar a la ecuación del tiro natural.

Además de la flotabilidad, la energía liberada en un incendio también puede producir movimientos de humo por expansión. El aire entrará en el compartimento del incendio y el humo caliente se distribuirá por el mismo. Si despreciamos la masa del combustible, la relación de flujos volumétricos puede expresarse como una relación de temperaturas absolutas.

El viento afecta en gran medida al movimiento del humo. No debe olvidarse el efecto de pistón en los ascensores, pues cuando un ascensor se desplaza en su caja, se producen presiones transitorias.

Durante la formación de un incendio, el sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) actúa como transportador del humo. Cuando se inicia un incendio en una zona desocupada de un edificio, este sistema HVAC puede transportar el humo a otro espacio habitado, por lo que debe diseñarse de forma que, en caso de incendio, la ventilación se apague o el sistema pase a un modo especial de control de humo.

El movimiento del humo puede controlarse mediante mecanismos de compartimentación, dilución, flujo de aire, presurización o flotabilidad.

Evacuación de los ocupantes

Diseño de las vías de escape

El diseño de las vías de escape debe basarse en una evaluación previa del sistema global de protección contra incendios (véase la Figura 41.5).

La evacuación de las personas que se encuentran en un edificio en llamas depende de sus reacciones durante la huida, pues deben tomar diferentes decisiones según la situación. Dichas reacciones varían mucho dependiendo de las capacidades físicas y mentales de cada cual.

El propio edificio influye en las decisiones tomadas por los ocupantes en su huida, a través de la señalización y de los sistemas de seguridad instalados. La propagación del incendio y del humo es el factor que más repercute en la toma de decisiones

de los ocupantes. El humo limita la visibilidad en el edificio y crea un ambiente irrespirable. La radiación del fuego y las llamas afectan a grandes espacios, que dejan de ser utilizables para la evacuación, lo que aumenta el riesgo.

Para diseñar las vías de escape de un edificio es necesario conocer primero la reacción de los ocupantes y sus patrones de movimiento en caso de incendio.

Las tres fases de una evacuación son: aviso, reacción y evacuación. La fase de aviso depende de si existe un sistema de alarma en el edificio, de si los ocupantes pueden comprender o no la situación o de la forma de compartimentación del edificio. La fase de reacción se relaciona con la capacidad de los ocupantes para tomar decisiones, de las características del incendio (como cantidad de calor y de humo) y del sistema de vías de escape del edificio. Por último, en la fase de evacuación influyen los puntos donde se pueden formar aglomeraciones y del comportamiento de los ocupantes en las distintas situaciones.

En edificios concretos donde es habitual la movilidad de sus ocupantes, por ejemplo, se han realizado estudios que muestran algunas características reproducibles de los flujos de personas saliendo de edificios, lo que ha permitido realizar simulaciones y modelizaciones informáticas para diseñar las vías de escape.

Los recorridos de evacuación deben proyectarse en función del peligro del incendio, ya que cuanto mayor sea el peligro, menor debe ser la distancia hasta la salida de emergencia.

Una salida segura de un edificio exige unas vías de escape seguras entre el lugar del incendio y el exterior. Por lo tanto,

Figura 41.5 • Principios básicos de seguridad de escape.



deben existir suficientes vías de escape, estar debidamente proyectadas y tener la capacidad adecuada. Debería haber, como mínimo, una vía de escape alternativa, dado que, por ejemplo, el incendio, el humo y las características de los ocupantes pueden llegar a impedir el uso de las vías de escape. Estas últimas han de estar protegidas del fuego, el calor y el humo durante el tiempo que dure la salida. Así, en los códigos de construcción debe considerarse la protección pasiva para la evacuación y, lógicamente, para la protección contra incendios. Un edificio debe responder a situaciones críticas, tal como se recogen en las normativas sobre evacuación. Por ejemplo, en Suecia, el Código de la construcción establece que la capa de humo no debe descender por debajo de $1,6 + 0,1H$ (siendo H la altura total del compartimiento), la radiación máxima ha de ser de 10 kW/m^2 y de corta duración y la temperatura ambiental no debe exceder los $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

La evacuación será efectiva si el incendio se detecta en su fase inicial y los ocupantes son avisados rápidamente a través de los sistemas de detección y alarma. Una señalización adecuada de las vías de escape facilita considerablemente la evacuación. Asimismo, es importante la organización y realización de simulacros de evacuación.

Comportamiento humano en caso de incendio

La forma en que una persona reacciona en caso de incendio depende del papel que asume, de la experiencia anterior, de la educación, la personalidad, la percepción de amenaza de la situación, las características físicas, las vías de escape disponibles y la actuación de las demás personas que comparten con ella esa experiencia. Entrevistas y estudios realizados a lo largo de 30 años han confirmado que los episodios de comportamiento desadaptado o de pánico se producen raras veces y en condiciones específicas. El comportamiento en caso de incendio suele estar determinado por el análisis de la información, que genera acciones de cooperación y altruistas.

El comportamiento humano pasa por varias fases, y hay varias alternativas para pasar de una a otra. De forma resumida, un incendio presenta tres fases generales:

1. La persona percibe las señales iniciales y las investiga o malinterpreta.
2. Una vez que el incendio ya es visible, la persona intenta obtener más información, ponerse en contacto con otras personas o abandonar el lugar.
3. Después, la persona intenta luchar contra el incendio, interaccionar con otros o escapar.

La actividad previa a la declaración del incendio es un factor importante. Cuando una persona está realizando una actividad habitual, como comer en un restaurante, su comportamiento posterior estará considerablemente condicionado por ella.

La percepción de una señal puede depender de la actividad previa al incendio. Existen diferencias entre el hombre y la mujer, siendo la mujer más receptiva a ruidos y olores, aunque en pequeña medida. También existen diferencias de papel en las respuestas iniciales a la señal. En incendios en el hogar, si la mujer percibe la señal y la investiga, el hombre al ser informado posiblemente irá a "echar un vistazo" y postergará otras acciones. En locales de mayor tamaño, la señal puede ser un aviso de alarma. Se ha observado que, cuando la información llega de otras personas, no propicia la adopción de un comportamiento efectivo.

Las personas pueden percatarse o no de que se ha producido un incendio. Su comportamiento dependerá de que consigan definir su situación correctamente.

Una vez detectado el incendio, se inicia la fase de "preparación". Las características de los ocupantes pueden influir mucho en la forma en que se desarrolla esta fase. La fase de "preparación" incluye, por orden cronológico, los siguientes pasos: "instruir", "explorar" y "abandonar el lugar".

La fase "actuar", que es la fase final, depende del papel, el tipo de ocupación, el comportamiento y la experiencia anterior de la persona y puede dar lugar a una evacuación precoz o a una extinción efectiva.

Sistemas de transporte en edificios

Los sistemas de transporte deben tenerse en cuenta en la fase de diseño e integrarse en el sistema de protección global del edificio. Los peligros asociados a dichos sistemas deben contemplarse en cualquier planificación o estudio contra incendios.

Los sistemas de transporte de los edificios, como los ascensores y escaleras mecánicas, hacen posible la vida en los edificios altos. Los huecos de los ascensores pueden contribuir a la propagación del humo y las llamas. Por otro lado, un ascensor es una herramienta necesaria en las operaciones de lucha contraincendios en los edificios altos.

Los sistemas de transporte pueden agravar los problemas de seguridad, ya que el hueco del ascensor actúa como una chimenea debido al tiro natural del humo caliente y los gases del incendio. Esto suele dar lugar a un ascenso del humo y de los productos de combustión desde los niveles inferiores del edificio a los superiores.

Los edificios con muchos pisos presentan nuevos y diferentes problemas a los equipos de protección contra incendios, como el uso del ascensor en las emergencias. En caso de incendio resulta peligroso utilizar los ascensores por varias razones:

1. Los ocupantes pueden estar pulsando el botón de un ascensor en un descansillo a la espera de que llegue un ascensor que puede no responder en absoluto y perder así un tiempo valioso para huir.
2. Los ascensores no dan prioridad a ninguna llamada, y una de ellas puede ser la del piso del incendio.
3. Los ascensores no pueden ponerse en marcha hasta que no se han cerrado sus puertas, y el pánico puede producir aglomeraciones en el ascensor y bloquear las puertas, impidiendo su cierre.
4. La electricidad puede fallar en cualquier momento durante el incendio, dejando a las personas atrapadas en el ascensor (véase la Figura 41.6.)

Simulacros de incendio y formación de los ocupantes

Una correcta señalización de las vías de escape facilita la evacuación pero no garantiza la seguridad durante un incendio. Los simulacros, necesarios para asegurar una huida organizada, son especialmente importantes en la escuela y en los restaurantes, hospitales, hoteles y grandes empresas, así como en industrias de alto riesgo. Los simulacros de desalojo permiten evitar la confusión y contribuyen a una evacuación correcta de todos los ocupantes del edificio.

Todos los empleados deben ocuparse de comprobar los sistemas disponibles, contar a los ocupantes cuando estén fuera de la zona de incendio, buscar a los rezagados y controlar que no vuelvan a entrar. También deben conocer las señales de evacuación y las rutas de salida. En los simulacros, ha de establecerse una ruta principal y una alternativa, y todos los empleados deben saber utilizar ambas. Después de cada simulacro de evacuación, se celebrará una reunión de responsables para evaluar el éxito de la misma y resolver cualquier posible problema.

● MEDIDAS ACTIVAS DE PROTECCION CONTRA INCENDIOS

Gary Taylor

Seguridad personal y material

Dado que la máxima prioridad de cualquier política de protección contra incendios de un edificio es garantizar un nivel aceptable de seguridad a sus ocupantes, en la mayoría de los países la normativa legal de protección contra incendios se centra en los problemas de seguridad personal. En cuanto a la seguridad material, se intenta limitar los daños al inmueble. En muchos casos, son objetivos complementarios. Cuando existe una preocupación por la pérdida del inmueble, de su función o de su contenido, el propietario puede decidir implantar medidas por encima del mínimo necesario para garantizar la seguridad personal.

Sistemas de detección de incendios y de alarma

Un sistema de detección de incendios y de alarma permite detectar un incendio de forma automática y avisar a los ocupantes del edificio de la amenaza de incendio. La alarma sonora o visible de un sistema de detección de incendios es la primera señal que perciben los ocupantes de un edificio para iniciar la evacuación. Esto es especialmente importante en edificios grandes o de gran altura, donde es difícil para la mayoría de los ocupantes saber si se ha iniciado un incendio en la estructura, y es bastante improbable o imposible que un ocupante pueda avisar a todos los demás.

Elementos básicos de un sistema de detección de incendios y de alarma

Un sistema de detección de incendios y de alarma puede incluir todos o algunos de los elementos siguientes:

1. una unidad de control del sistema;
2. un suministro primario o principal de energía eléctrica;
3. un suministro secundario de energía (stand-by), normalmente alimentado por baterías o por un generador de emergencia;
4. dispositivos de activación de la alarma, como detectores automáticos de incendios, pulsadores manuales y/o dispositivos de flujo de sistemas de rociadores, conectados a "circuitos de activación" de la unidad de control del sistema;
5. dispositivos de alarma, como timbos o luces, conectados a "circuitos indicadores" de la unidad de control del sistema;
6. controles auxiliares, como funciones de apagado de la ventilación, conectados a circuitos de salida de la unidad de control del sistema;
7. alarmas conectadas a un centro de emergencia externo, como el centro de bomberos,
8. circuitos de control para activar un sistema de protección contra incendios o un sistema de control de humos.

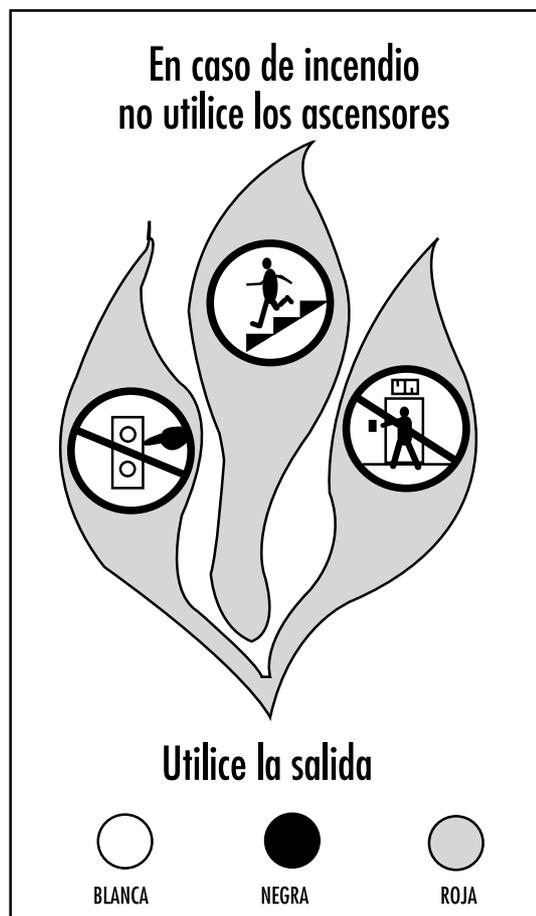
Sistemas de control de humos

Para reducir el peligro de que, en caso de incendio, el humo se introduzca en las vías de escape durante la evacuación, pueden utilizarse sistemas de control de humos. Por lo general, se utilizan sistemas mecánicos de ventilación para introducir aire fresco en las vías de escape. Este método suele utilizarse para presurizar los huecos de la escalera o edificios con patios, y mejorar así el nivel de seguridad personal.

Extintores portátiles y mangueras

Suele dotarse a los edificios de extintores portátiles y mangueras de agua para que los utilicen los ocupantes en la extinción de

Figura 41.6 • Ejemplo de señal pictográfica para ascensores.



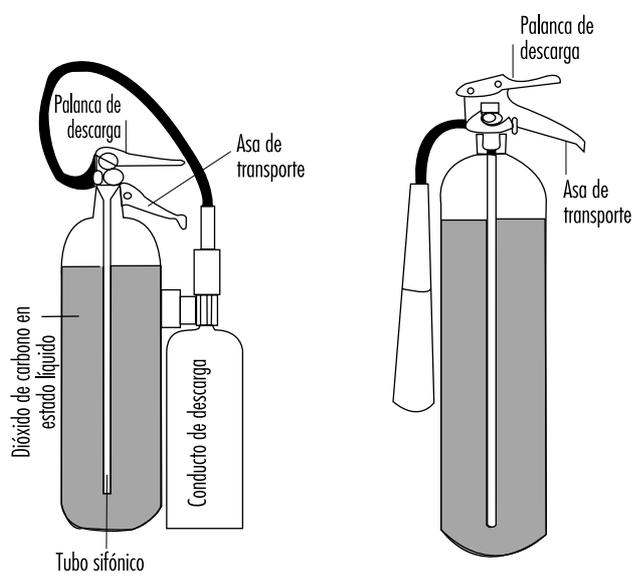
incendios de reducidas dimensiones (véase la Figura 41.7). Los ocupantes de un edificio no deben utilizar los extintores portátiles ni las mangueras sin haber sido formados en su uso. En cualquier caso, al utilizarlos, deben tener mucho cuidado de no situarse de modo que bloqueen una vía de escape. En cualquier incendio, sea cual fuere su tamaño, la primera medida que hay que tomar es siempre avisar a los demás ocupantes del edificio y pedir ayuda a un centro de bomberos profesional.

Sistemas de rociadores de agua

Los sistemas de rociadores de agua constan de un suministro de agua, válvulas de distribución y tuberías conectadas a rociadores automáticos (véase la Figura 41.8). Aunque los sistemas actuales de rociadores están diseñados para controlar la propagación de incendios, en muchas ocasiones se ha logrado incluso extinguirlos totalmente.

Una idea errónea es que en caso de incendio se activan todos los rociadores automáticos. En realidad, cada uno está diseñado para abrirse solamente cuando detecta una cantidad de calor indicativa de incendio. Así pues, sólo fluye agua de los rociadores abiertos por haber detectado calor en sus proximidades. Este diseño garantiza un uso eficiente del agua en la lucha contraincendios y limita los daños por agua.

Figura 41.7 • Extintores portátiles.



Suministro de agua

Un sistema automático de rociadores debe disponer de agua en cantidad, presión y volumen suficientes para garantizar un funcionamiento fiable en cualquier momento. Si el suministro municipal de agua no reúne estos requisitos, deberá instalarse un depósito o bomba que asegure el suministro.

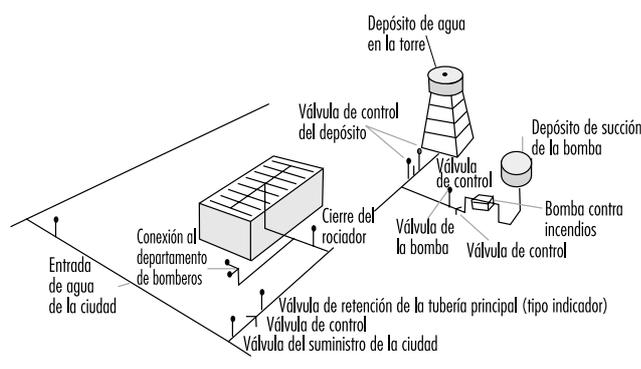
Válvulas de control

Las válvulas de control deben mantenerse siempre en posición abierta. A menudo, la supervisión de las válvulas de control se realiza con un sistema automático de alarma, mediante dispositivos que, cuando detectan una válvula cerrada, activan una señal de aviso en el panel de control del sistema de alarma contra incendios. Si no es posible realizar este tipo de control, deben bloquearse las válvulas en la posición abierta.

Tuberías

El agua fluye a través de una red de tuberías, normalmente suspendidas del techo, dotadas de rociadores cada cierta distancia. Las tuberías de los sistemas de rociadores deben poder

Figura 41.8 • Instalación tipo de rociadores con entradas de agua, tomas de agua exteriores y canalizaciones subterráneas.



resistir una presión de trabajo no inferior a 1.200 kPa. En los sistemas de tuberías al aire, las fijaciones deben ser atornilladas, de pestaña, de junta mecánica o soldada.

Rociadores

Un rociador consta de un orificio, que normalmente se mantiene cerrado por un elemento liberador sensible a la temperatura, y un deflector de pulverización. El diseño de la descarga de agua y los requisitos de espaciado de cada rociador garantizan una cobertura total del riesgo protegido.

Sistemas especiales de extinción

Los sistemas especiales de extinción se utilizan cuando los rociadores de agua no aportan una protección adecuada o cuando resulta inaceptable el riesgo de daño por agua. En muchos casos en que el daño por agua es problemático, pueden utilizarse sistemas especiales de extinción junto con sistemas de rociadores de agua, estando diseñados los primeros para activarse en la fase inicial del incendio.

Sistemas especiales de extinción con agua y con aditivos en el agua

Sistemas de pulverización de agua

Los sistemas de pulverización de agua aumentan la efectividad de ésta al dividirla en gotas pequeñas, lo que genera una mayor superficie de contacto con el fuego y un aumento relativo de la capacidad de absorción de calor. A menudo se opta por este sistema para mantener fríos grandes depósitos a presión, como las esferas de butano, cuando existe peligro de incendio en una zona adyacente. Es similar al sistema de rociadores, aunque aquí todos los rociadores están abiertos y para abrir las válvulas de control se utiliza un sistema independiente de detección o se realiza la operación de forma manual. Esto permite que el agua fluya a través de la red de canalización hasta llegar a todos los dispositivos de pulverización de salida del sistema de tuberías.

Sistemas de espuma

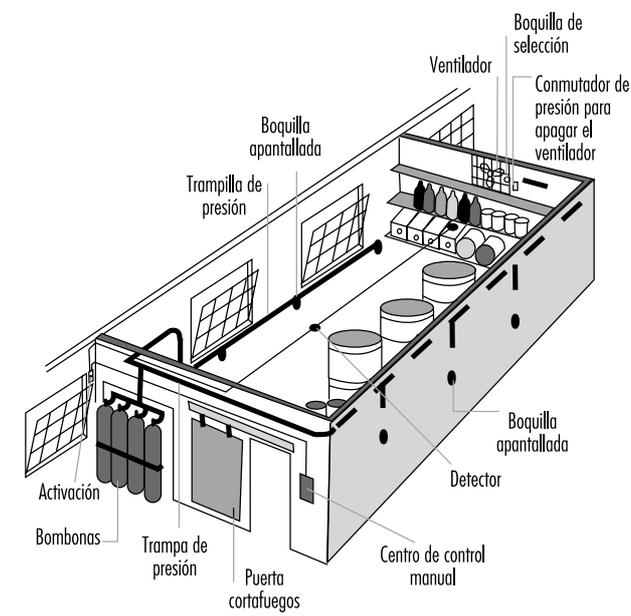
En un sistema de espuma se inyecta un concentrado líquido en el suministro de agua antes de la válvula de control. A continuación, se mezcla el concentrado de espuma con aire, bien mediante una descarga mecánica o aspirando aire en el dispositivo de descarga. El aire que entra en la solución de espuma produce una espuma expandida que, al ser menos densa que la mayoría de los hidrocarburos, forma una capa por encima del líquido inflamable. La capa de espuma reduce la propagación del vapor combustible. El agua, que representa casi el 97 % de la solución de espuma, aporta un efecto de enfriamiento que reduce aún más la propagación del vapor y enfría los objetos calientes que podrían actuar como fuente de reignición.

Sistemas de extinción a base de gases

Sistemas de dióxido de carbono

Estos sistemas utilizan dióxido de carbono, almacenado como gas licuado comprimido en depósitos a presión (véanse las Figuras 41.9 y 41.10). Los depósitos disponen de una válvula automática que se abre en caso de incendio gracias a un sistema de detección independiente o mediante accionamiento manual. El dióxido de carbono, una vez liberado, se aplica al incendio a través de un sistema de tuberías y boquillas de descarga. El gas actúa como extintor al desplazar el oxígeno del incendio. Los sistemas de dióxido de carbono están indicados para su uso en espacios abiertos como imprentas, o recintos cerrados como salas de máquinas de barcos. En la concentración necesaria para la extinción de incendios es tóxico para las personas, por lo que

Figura 41.9 • Esquema de un sistema de dióxido de carbono a alta presión para inundación total.

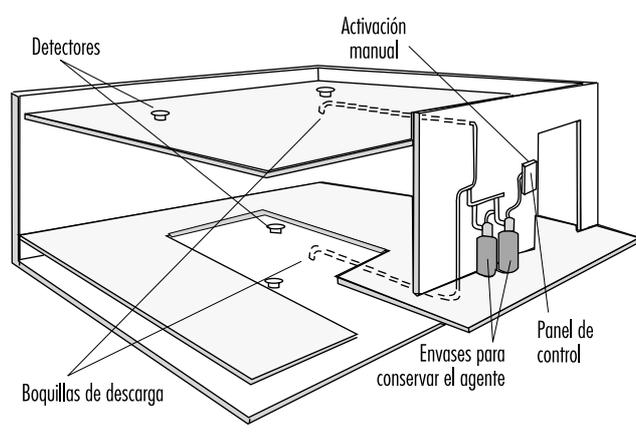


antes de aplicarlo es necesario tomar medidas especiales de evacuación de las personas que se encuentren en la zona protegida. Al diseño del sistema deben incorporarse medidas de seguridad especiales como una alarma predescarga que alerte a las personas que trabajan en la zona protegida. El dióxido de carbono está considerado un producto de extinción limpio porque no produce efectos secundarios y no es conductor de la electricidad.

Sistemas de gas inerte

Por lo general los sistemas de gas inerte utilizan una mezcla de nitrógeno y argón como medio de extinción. En algunos casos en la mezcla de gas también se incluye un reducido porcentaje de dióxido de carbono. Las mezclas de gas inerte extinguen el fuego al reducir la concentración de oxígeno dentro del volumen protegido y su uso está indicado solamente en espacios cerrados. La

Figura 41.10 • Sistema de inundación total instalado en una habitación con doble suelo.



característica de las mezclas de gas inerte es que reducen el oxígeno a una concentración lo suficientemente baja como para extinguir muchos tipos de incendios pero sin llegar a niveles que puedan suponer una amenaza para los ocupantes de la zona protegida. Los gases inertes se comprimen y almacenan en depósitos a presión. La operación del sistema es similar a la del dióxido de carbono pero dado que los gases inertes no pueden ser licuados por compresión, el número de depósitos de almacenamiento necesarios para proteger un determinado recinto cerrado es mayor que en el caso del dióxido de carbono.

Sistemas de halones

Los halones 1301, 1211 y 2402 están clasificados como sustancias que destruyen la capa de ozono. En 1994 se ha abandonado la producción de estos agentes de extinción de acuerdo con lo estipulado en el Protocolo de Montreal, acuerdo internacional para proteger la capa de ozono de la Tierra. El halón 1301 se utilizaba principalmente en sistemas contra incendios fijos y se almacenaba como gas licuado y comprimido en depósitos a presión como los utilizados para el dióxido de carbono. La ventaja del halón 1301 era que sus presiones de almacenamiento eran inferiores y que una concentración muy baja proporcionaba una capacidad de extinción efectiva. Los sistemas de halón 1301 se utilizaban con éxito para incendios en recintos totalmente cerrados donde la concentración de extinción alcanzada puede mantenerse durante un período suficiente de tiempo como para extinguir el incendio. En la mayoría de los casos las concentraciones utilizadas no suponían una amenaza inmediata para los ocupantes. El halón 1301 se sigue utilizando en casos excepcionales para los que no existen alternativas aceptables como, por ejemplo, en incendios en aviones comerciales y militares y en algunos casos especiales en los que se necesitan concentraciones de inertización para evitar explosiones en zonas con ocupantes. El halón de los sistemas existentes ya sustituidos deberá utilizarse para aplicaciones críticas, evitando así tener que seguir produciendo estos productos de extinción que son nocivos para el medio ambiente y se ayudará a proteger la capa de ozono.

Sistemas de hidrocarburos halogenados

Los agentes de hidrocarburos halogenados se desarrollaron como consecuencia de la preocupación ambiental por sustituir a los halones. Estos agentes difieren ampliamente entre sí en cuanto a toxicidad, impacto ambiental, peso de almacenamiento, requisitos de volumen, coste y disponibilidad del equipo aprobado. Todos ellos pueden almacenarse como gases licuados en depósitos a presión. La configuración del sistema es similar a la del dióxido de carbono.

Diseño, instalación y mantenimiento de sistemas activos contra incendio

Este tipo de equipos sólo debería ser diseñado, instalado y mantenido por expertos. Para poder realizar su trabajo con efectividad los encargados de la compra, instalación, inspección, pruebas, homologación y mantenimiento de estos equipos deberían consultar a un especialista competente y experimentado en la lucha contra incendios.

Información adicional

Esta sección de la Enciclopedia presenta una visión de conjunto resumida de los sistemas activos contra incendios existentes en la actualidad en el mercado. El lector podrá encontrar más información en su asociación nacional contra incendios, su agente asegurador o el departamento de prevención de incendios de su localidad.

● ORGANIZACION DE LA LUCHA CONTRA INCENDIOS

S. Dheri

Organización interna de emergencia

Los beneficios son el objetivo principal de cualquier industria y, para alcanzarlos, son fundamentales una gestión eficiente y actualizada y una continuidad en la producción. Cualquier interrupción de la producción, sea cual fuere la razón, afectará de forma negativa a los beneficios. Si la interrupción es resultado de un incendio o una explosión, puede ser muy larga y paralizar la industria.

Con gran frecuencia, la propiedad está asegurada y las pérdidas ocasionadas por el incendio, si las hay, son indemnizadas por la compañía aseguradora. Pero los seguros son sólo una forma de extender el daño causado por un incendio o una explosión al mayor número posible de personas y, al final, la pérdida repercute a escala nacional. Además, el seguro no garantiza la continuidad de la producción ni elimina o minimiza las pérdidas resultantes.

Por lo tanto, la dirección de la empresa debe reunir una información completa sobre los peligros de incendio y explosión, evaluar el potencial de pérdidas e implantar las medidas oportunas para controlar el riesgo, a fin de eliminar o minimizar la incidencia de estas catástrofes y establecer una organización interna de emergencia.

Planificación de emergencias

En la medida de lo posible, la organización de emergencia debe contemplarse ya en la fase de planificación, e irse implantando de forma progresiva, desde la selección del emplazamiento para la empresa hasta el inicio de la producción.

El éxito de una organización de emergencia depende en gran medida de la participación generalizada tanto de los trabajadores como de la dirección, lo que debe tenerse en cuenta a la hora de planificarla.

Seguidamente estudiaremos los diferentes aspectos de una planificación de emergencia. Para más información, consúltese el Fire Protection Handbook del US National Fire Protection Association (NFPA) o cualquier otra publicación de referencia sobre el tema (Cote, 1991).

Fase 1

El plan de emergencia debe iniciarse con las actividades siguientes:

1. Identificar y evaluar los peligros de incendio y explosión asociados al transporte, manipulación y almacenamiento de cada materia prima, producto intermedio, producto terminado y proceso industrial, así como elaborar medidas preventivas detalladas para suprimir o minimizar los peligros.
2. Analizar los requisitos de las instalaciones y los equipos de protección contra incendios, y determinar las fases de actuación de cada uno de ellos.
3. Elaborar las especificaciones de las instalaciones y equipos de protección contra incendios.

Fase 2

Se comprobará:

1. La disponibilidad de un suministro de agua adecuado, que cubra las necesidades de la lucha contra incendios además de las de proceso y uso doméstico;
2. Los riesgos potenciales de catástrofe natural (inundaciones, terremotos, lluvias torrenciales, etc.) en la zona de emplazamiento;

3. El entorno, es decir, naturaleza y extensión de los espacios circundantes, y posibles riesgos en caso de incendio o explosión;
4. La existencia de equipos de protección contra incendios internos o públicos, la distancia a que se encuentran, su idoneidad para proteger de los posibles riesgos y la capacidad de respuesta ante una llamada de emergencia;
5. La capacidad de respuesta del cuerpo de bomberos, teniendo en cuenta los obstáculos existentes, como cruces de vías de ferrocarril, transbordadores, resistencia y/o anchura inadecuada de los puentes existentes para los equipos de protección contra incendios, atascos de tráfico, etc.;
6. El entorno sociopolítico, es decir, las tasas de delincuencia y las actividades políticas que puedan provocar desórdenes de orden público.

Fase 3

Se preparará el proyecto y los planos de edificación, así como las especificaciones del material de construcción. Se realizarán las tareas siguientes:

1. Delimitar el espacio de cada tienda, lugar de trabajo, etc. mediante muros contra incendios, puertas cortafuegos, etc.
2. Especificar el uso de materiales ignífugos en la construcción del edificio o la estructura.
3. Garantizar la protección de las columnas de acero y de otros elementos estructurales.
4. Asegurarse de que existe una separación adecuada entre los edificios, las estructuras y los equipos.
5. Planificar la instalación de bocas de incendios, rociadores, etc.
6. Incluir en el proyecto vías de acceso adecuadas para que los equipos de extinción puedan llegar a cualquier zona de las instalaciones y a todas las fuentes de agua para la extinción de incendios.

Fase 4

Durante la construcción, se deberá:

1. Comunicar al contratista y a sus empleados las políticas de gestión del riesgo de incendio, y asegurarse de que se cumplan.
2. Comprobar exhaustivamente todas las instalaciones y equipos de protección contra incendios antes de aceptar la obra.

Fase 5

Si por las dimensiones de la industria, los peligros asociados o una ubicación alejada se requiere la presencia continua de un cuerpo de bomberos, se deberá organizar, equipar y formar a personal con dedicación exclusiva y nombrar a un jefe de lucha contra incendios también con dedicación exclusiva.

Fase 6

Con el fin de garantizar la plena participación de todos los empleados, se deberá:

1. Formar a todo el personal en las medidas de prevención que deben tomar en su trabajo diario y en el papel que tengan asignado en caso de incendio o explosión. Dicha formación incluirá el manejo de los equipos de protección contra incendios.
2. Garantizar el estricto cumplimiento de las medidas de prevención por parte de todo el personal afectado mediante revisiones periódicas.
3. Inspeccionar regularmente y asegurar un buen mantenimiento de todos los equipos y sistemas de protección contra incendios. Cualquier defecto observado deberá subsanarse lo antes posible.

Actuación en caso de emergencia

Para evitar la confusión durante una emergencia, es fundamental que todas las personas conozcan su papel y el de los demás en caso de emergencia. Deberá elaborarse y divulgarse un plan de emergencia bien estudiado, con el que deberá familiarizarse todo el personal. En dicho plan se indicarán de forma concreta y clara las responsabilidades de cada persona y la correspondiente jerarquía de mando. Un plan de emergencia debe incluir como mínimo:

1. El nombre de la industria
2. La dirección de las instalaciones, con número de teléfono y plano de localización
3. El objetivo del plan de emergencia y la fecha efectiva de su entrada en vigor
4. El área cubierta y un plano de localización
5. La organización de emergencia, indicando la jerarquía de mando encabezada por su director
6. Los sistemas contra incendios y los equipos móviles y portátiles, detallados
7. Detalles de la disponibilidad de asistencia
8. Las alarmas contra incendios y los equipos de comunicación
9. La actuación en caso de emergencia, definiendo por separado y de forma concreta las acciones que debe emprender:
 - la persona que detecta el incendio;
 - el cuerpo de bomberos particular de la empresa;
 - el jefe de la sección implicada en la emergencia;
 - los jefes de otras secciones no implicadas en la emergencia;
 - la organización de seguridad;
 - el jefe de bomberos, en su caso;
 - el director de la empresa,
 - otros.
10. La jerarquía de mando en la escena del accidente. Se considerarán todas las situaciones posibles, indicando claramente la persona que debe asumir el mando en cada caso y las circunstancias en que debe solicitarse ayuda a otra organización.
11. Las medidas que deben tomarse después del incendio. Se indicarán las responsabilidades en materia de:
 - reposición o rellenado de todos los sistemas, equipos y fuentes de agua de protección contra incendios;
 - investigación de la causa del incendio o la explosión;
 - preparación y presentación de los informes,
 - adopción de medidas que eviten que vuelva a producirse una emergencia similar.

Cuando se dispone de un plan de asistencia mutua, debe enviarse a todas las unidades participantes una copia del plan de emergencia y recibir a cambio los planes de sus instalaciones respectivas.

Protocolos de evacuación

Como resultado de una explosión o un incendio pueden producirse situaciones que requieran la ejecución de un plan de emergencia.

Una explosión puede ir seguida o no de incendio, pero en la mayoría de los casos genera un efecto devastador que puede herir e incluso causar la muerte a las personas que se encuentren en sus proximidades y/o causar daños materiales en las instalaciones, según el caso. Una explosión puede producir también una confusión generalizada, que provoque la parada inmediata de los procesos de fabricación o de parte de ellos y el desplazamiento simultáneo de gran cantidad de personas. Si no se consigue controlar y organizar inmediatamente la situación, se crean situaciones de pánico que pueden dar lugar a daños personales y materiales de mayor magnitud.

Cuando en un incendio exista la posibilidad de que el humo liberado por el material en combustión o el propio fuego alcance a otras partes del inmueble y/o deje a personas atrapadas, será necesario realizar evacuaciones u operaciones de rescate masivas.

Siempre que se producen desplazamientos masivos de personas, surgen problemas de tráfico, especialmente si es necesario utilizar carreteras, calles o áreas públicas. Si no se ha previsto este problema y no se han planificado con antelación las medidas oportunas, se producirán cuellos de botella que obstaculizarán e impedirán la extinción del incendio y los trabajos de rescate.

La evacuación de un gran número de personas, especialmente en edificios altos, también puede plantear dificultades. Para una evacuación correcta, no sólo es necesario disponer de vías de escape adecuadas, sino también realizar la evacuación de forma ágil. A este respecto, hay que prestar especial atención a las necesidades de las personas discapacitadas.

Así pues, los métodos de evacuación deben estar incluidos en el plan de emergencia y ser comprobados periódicamente mediante simulacros de incendios en los que también pueden simularse problemas de tráfico. En estos simulacros deberán intervenir todas las organizaciones participantes y afectadas, periódicamente. Después de cada ejercicio, se celebrará una reunión para comentar los fallos detectados y buscar la causa. Habrá que tomar también las medidas oportunas para evitar que los mismos fallos se repitan en ejercicios futuros, suprimiendo todas las dificultades y revisando, en caso necesario, el plan de emergencia.

Deberá guardarse la información pertinente de todos los ejercicios y simulacros de evacuación realizados.

Servicios médicos de emergencia

Los heridos en un incendio o explosión deben recibir ayuda médica inmediata o ser trasladados rápidamente a un hospital una vez suministrados los primeros auxilios.

Es fundamental disponer de uno o más puestos de primeros auxilios y, cuando las dimensiones o el carácter peligroso de la industria lo requieran, uno o más equipos móviles sanitarios, todos ellos dotados permanentemente de personal competente.

En función del tamaño de la industria y del número de trabajadores, habrá que disponer de una o más ambulancias con personal capaces de transportar a los heridos a hospitales. Además, se tomarán las medidas oportunas para garantizar la disposición rápida de más ambulancias en caso necesario.

Cuando así lo requiera el tamaño de la industria o del lugar de trabajo, se contratará a un médico con dedicación exclusiva para cualquier situación de emergencia.

Se celebrarán los acuerdos necesarios con un hospital para dar prioridad al ingreso de los posibles heridos en caso de incendio o explosión. En el plan de emergencia se indicarán estos hospitales con su correspondiente número de teléfono, así como el nombre de la persona responsable de alertarles cuando, caso de producirse la emergencia, se vaya a enviar a heridos a los mismos.

Recuperación de las instalaciones

Es importante que todos los equipos de seguridad y emergencia vuelvan a estar dispuestos lo antes posible una vez pasada la emergencia. En el plan de emergencia se indicará la persona o sección responsable de esta tarea. También se implantará un sistema de control que garantice su realización.

Relaciones con el departamento de bomberos

La dirección de una empresa no puede prever ni hacer frente a todas las posibles contingencias, lo que tampoco resultaría

rentable. Aun habiendo adoptado los métodos más modernos de gestión de incendios, siempre habrá ocasiones en que los equipos de protección contra incendios no cubran las necesidades reales. Para esas ocasiones es conveniente elaborar un programa de asistencia mutua con el departamento de bomberos. La dirección debe mantener una buena relación con el mismo y conocer la asistencia que puede proporcionarle en caso de emergencia en sus instalaciones. A su vez, el departamento de bomberos debe conocer el riesgo específico en caso de emergencia. Para ello es necesaria una relación fluida entre la dirección y el departamento de bomberos.

Manipulación de materiales peligrosos

En un accidente, los bomberos pueden desconocer los peligros asociados a los materiales utilizados en la industria y una descarga accidental o una manipulación o un almacenamiento inadecuados de materiales peligrosos pueden provocar situaciones de riesgo que pongan seriamente en peligro su salud o provoquen un incendio o explosión. No es fácil recordar en esos momentos todos los peligros de cada material. Para ello se han desarrollado medios de identificación rápida de riesgos con etiquetas o marcas.

Identificación de materiales peligrosos

Cada país tiene su propia normativa de etiquetado para el almacenamiento, manipulación y transporte de materiales peligrosos, en la que pueden intervenir varios departamentos. El cumplimiento de la normativa local es esencial, pero también sería deseable utilizar un sistema de identificación de materiales peligrosos reconocido internacionalmente y de aplicación universal. En Estados Unidos, el NFPA ha desarrollado un sistema a tal fin. Estas etiquetas, que se adhieren a los depósitos de materiales peligrosos, incluyen información sobre la naturaleza y el grado de peligrosidad para la salud del material, su inflamabilidad y su reactividad. Además, en ellas pueden incluirse los peligros especiales que puedan presentar para el cuerpo de bomberos. Para más información sobre el grado de peligrosidad, consúltese el NFPA 704, Standard System for the Identification of the Fire Hazards of Materials (1990a), que clasifica los peligros en: peligros para la salud, peligros de inflamabilidad y peligros de reactividad (inestabilidad).

Peligros para la salud

Los peligros para la salud comprenden todos los daños posibles que un material puede ocasionar a una persona por contacto o absorción. Hay peligros para la salud debidos a las propiedades específicas del material o a los productos tóxicos producidos por la combustión o la descomposición del material. El nivel de peligro se asigna tomando como base al máximo peligro posible en caso de incendio o emergencia similar, e indica si los bomberos tienen que trabajar con ropa de protección especial o con equipos de respiración o simplemente con la ropa normal.

El grado de peligro para la salud de un material se determina en una escala de 4 a 0, en donde 4 indica el máximo peligro y 0 un peligro mínimo o inexistente.

Peligro de inflamabilidad

Se trata de la facilidad de combustión del material. Un mismo material se comporta de forma diferente a este respecto según las circunstancias (p. ej., materiales que pueden entrar en combustión en unas determinadas condiciones pueden no hacerlo si éstas se modifican). La forma y características inherentes de los materiales influyen en el peligro de inflamabilidad, que se determina del mismo modo que en el caso anterior.

Peligros de reactividad (inestabilidad)

Los materiales capaces de liberar energía por sí mismos (p. ej., por autorreacción o polimerización) y las sustancias susceptibles de erupción violenta o reacciones explosivas presentan un peligro de reactividad al entrar en contacto con el agua, con otros agentes de extinción o con otros materiales.

La violencia de la reacción puede aumentar si se aplica calor o presión, si la sustancia entra en contacto con determinados materiales formando una combinación combustible-oxidante o si entra en contacto con sustancias incompatibles, contaminantes sensibilizantes o catalizadores.

El peligro de reactividad viene determinado y expresado en términos de facilidad, velocidad y cantidad de energía liberada. Se puede dar una información adicional tal como el peligro de radiactividad o la prohibición del uso de agua u otro medio de extinción en la lucha contra incendios.

La etiqueta de material peligroso es un rombo dividido a su vez en cuatro rombos más pequeños (véase la Figura 41.11).

El rombo superior indica el peligro para la salud, el de la izquierda el peligro de inflamabilidad, el de la derecha el peligro de reactividad y el inferior otros peligros, como la radiactividad o la reactividad especial con el agua.

En esta señalización puede incluirse un código de color, bien para el fondo o para el número que indica el peligro. Los códigos de color son: azul para el peligro para la salud, rojo para el peligro de inflamabilidad, amarillo para el peligro de reactividad y fondo blanco para el peligro especial.

Gestión de materiales peligrosos

En la industria, dependiendo de la naturaleza del material peligroso de que se trate, hay que disponer de equipo de protección y agentes especiales de extinción de incendios, así como del equipo de protección necesario para su aplicación.

Todos los trabajadores han de ser formados en las precauciones y procedimientos que deben adoptar en caso de accidente al manejar los distintos materiales peligrosos. También deben conocer el significado de las señales de identificación.

Todos los miembros del equipo contra incendios y los trabajadores deben saber utilizar correctamente la ropa de protección, los equipos de protección para la respiración y las técnicas especiales de lucha contra incendios. El personal debe estar preparado para afrontar cualquier situación de emergencia gracias a simulacros y ejercicios frecuentes, que serán debidamente grabados.

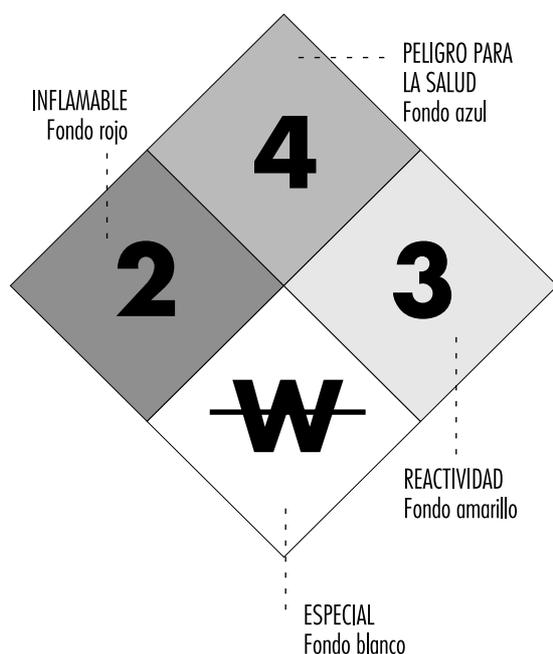
Para hacer frente a riesgos graves para la salud y a los efectos de esos riesgos en los bomberos, es necesaria la presencia de un jefe de servicio médico competente que tome medidas inmediatas cuando una persona resulte expuesta a una contaminación peligrosa. Todas las personas afectadas deben ser inmediatamente atendidas por el médico.

En caso necesario, se tomarán las medidas pertinentes para disponer un centro de descontaminación en las instalaciones y llevar a cabo procesos de descontaminación correctos bajo supervisión médica.

Control de residuos

La industria genera una gran cantidad de residuos que pueden dar lugar a accidentes durante su manipulación, transporte y almacenamiento. Dependiendo de la industria de la que procedan o de la naturaleza de los materiales implicados, pueden ser inflamables, tóxicos, corrosivos, pirofóricos, químicamente reactivos o radiactivos. En la mayoría de los casos, y salvo que se tomen las medidas pertinentes para eliminarlos de forma ecológica, representan un peligro para la vida de personas y animales, contaminan el entorno y ocasionan incendios o explosiones. Es

Figura 41.11 • El diamante NFPA 704.



fundamental, por tanto, conocer en detalle las propiedades físicas y químicas de los materiales residuales y las limitaciones de los distintos métodos de eliminación para garantizar su eficacia económica y su seguridad.

A continuación se resumen las propiedades de los residuos industriales:

1. La mayoría de los residuos industriales son peligrosos y pueden tener efectos inesperados durante su eliminación e incluso posteriormente. En consecuencia, la naturaleza y características de comportamiento de todos los residuos deben examinarse cuidadosamente para evaluar su repercusión a corto y largo plazo y determinar el método de eliminación más adecuado.
2. La mezcla de dos residuos aparentemente inocuos en sí mismos puede suponer un peligro inesperado debido a su interacción química o física.
3. En el caso de líquidos inflamables, se deben evaluar los riesgos asociados, teniendo en cuenta su punto de inflamación, la temperatura de ignición, el límite de inflamabilidad y la energía de ignición necesaria para iniciar la combustión. En el caso de sólidos, también hay que considerar el tamaño de la partícula.
4. La mayoría de los vapores inflamables son más densos que el aire. Durante su recogida, eliminación, manipulación o transporte, pueden liberarse de forma accidental vapores y gases inflamables, y ser trasladados a considerable distancia por el viento. Al entrar en contacto con una fuente de ignición, retornan rápidamente a la fuente. Los derrames importantes de líquidos inflamables son especialmente peligrosos en este sentido y pueden requerir la evacuación de las personas.
5. Los materiales pirofóricos como los alquiles de aluminio, entran en ignición de forma espontánea cuando se les expone al aire. Por esta razón, hay que tener especial cuidado al manipular, transportar, almacenar y eliminar estos materiales, realizando estas operaciones preferiblemente en una atmósfera de nitrógeno.

6. Algunos materiales, como los hidróxidos de potasio, sodio y aluminio reaccionan de forma violenta con el agua o la humedad, y entran en combustión violenta. El polvo de bronce genera un calor considerable en presencia de humedad.
7. El contacto de oxidantes potentes con materiales orgánicos puede iniciar una rápida combustión e incluso una explosión. Los trapos y otros materiales impregnados en aceites vegetales o terpenos presentan un riesgo de combustión espontánea debido a la oxidación de los aceites y la posterior formación de calor hasta alcanzar la temperatura de ignición.
8. Algunas sustancias corrosivas pueden dañar gravemente la piel u otros tejidos vivos o causar la corrosión de materiales de construcción, especialmente metales, debilitando su estructura.
9. Algunas sustancias tóxicas pueden ocasionar el envenenamiento de personas o animales por contacto con la piel, inhalación o contaminación de los alimentos o el agua. Los efectos pueden desarrollarse a corto o largo plazo. Estas sustancias, si se eliminan por vertido o combustión, pueden contaminar las fuentes de agua o alcanzar a trabajadores o animales.
10. Sustancias tóxicas derramadas durante las operaciones de proceso, transporte (incluidos accidentes), manipulación o almacenamiento y gases tóxicos liberados a la atmósfera pueden afectar al personal de emergencia e incluso a la población. Este peligro es máximo cuando las sustancias derramadas se evaporan a temperatura ambiente, porque los vapores pueden ser transportados por el viento a largas distancias.
11. Algunas sustancias pueden desprender un olor fuerte, picante o desagradable, bien por sí mismas o al entrar en combustión en el aire libre. En ambos casos, representan un peligro público aunque no sean tóxicas y, si no es posible su reciclaje, deben eliminarse por incineración. Las sustancias con olor no son necesariamente tóxicas; del mismo modo, sustancias sin olor y algunas sustancias con olor agradable pueden producir efectos fisiológicos negativos.
12. Algunas sustancias como los explosivos, los materiales pirotécnicos, los peróxidos orgánicos y otros productos químicos son sensibles al calor y al choque y pueden explotar con un efecto devastador si no se manipulan con cuidado o si se mezclan con otras sustancias. Por tanto, habrá que separar cuidadosamente estas sustancias y destruirlas con la debida supervisión.
13. Los materiales residuales contaminados con radiactividad pueden ser tan peligrosos como los propios materiales radiactivos. Su eliminación requiere un conocimiento especializado. Puede solicitarse información sobre la eliminación de este tipo de residuos a la organización de la energía nuclear de cada país.

Algunos de los métodos utilizados para eliminar residuos industriales y de emergencia son biodegradación, enterramiento, incineración, vertido controlado, capa de mantillo, combustión al aire libre, pirólisis y eliminación a través de un contratista. A continuación se analizan brevemente todos estos métodos.

Biodegradación

Muchos productos químicos se destruyen totalmente en períodos que oscilan entre 6 y 24 meses si se mezclan con unos 15 cm de la capa superior del suelo. Este fenómeno se conoce como biodegradación y se debe a la acción de las bacterias existentes en el suelo. Pero no todas las sustancias se comportan de esta forma.

Enterramiento

Los residuos, especialmente los químicos, se eliminan a menudo mediante enterramiento. Es una práctica peligrosa tratándose de

productos químicos activos porque, pasado un tiempo, las sustancias enterradas pueden quedar al descubierto o ser desenterradas y arrastradas por la lluvia hasta los cursos de agua. La sustancia expuesta o el material contaminado pueden tener efectos fisiológicos negativos al entrar en contacto con el agua que ingieren personas o animales. Se han registrado casos de contaminación de agua a los 40 años de haber enterrado productos químicos peligrosos.

Incineración

Es uno de los métodos más seguros y satisfactorios de eliminación de residuos, siempre que se utilice un incinerador bien diseñado y bajo control. Ahora bien, hay que vigilar que las sustancias puedan incinerarse de forma segura y sin causar problemas o peligros especiales. Casi todos los incineradores industriales disponen de un equipo de control de la contaminación, que debe ser cuidadosamente elegido e instalado teniendo en cuenta la composición del efluente de carga registrado por el incinerador durante la combustión de los residuos industriales.

Durante el funcionamiento del incinerador, hay que evitar que su temperatura se eleve de forma excesiva debido a la producción de una gran cantidad de gases volátiles o a la naturaleza de los residuos incinerados. Puede producirse un fallo por una temperatura excesiva o, al cabo del tiempo, por corrosión. El depurador de gases también debe ser revisado periódicamente para comprobar si presenta signos de corrosión por el contacto con ácidos, y es necesario realizar un mantenimiento regular del sistema de depuración de gases para garantizar su correcto funcionamiento.

Vertido controlado

Las zonas bajas o depresiones suelen utilizarse como vertedero de materiales residuales hasta que se nivelan con las áreas colindantes. Entonces, se aplastan los residuos, se cubren con tierra y se pasa una apisonadora. A continuación, el terreno puede utilizarse para edificar o con otros fines.

Para que la operación de vertido controlado sea satisfactoria debe elegirse el lugar teniendo en cuenta la proximidad de tuberías, desagües, cables de energía, pozos de petróleo y gas, minas o cualquier otro peligro. Los residuos se mezclan con tierra y se distribuyen de forma homogénea en una depresión o una zanja amplia. Cada capa vertida debe compactarse mecánicamente antes de añadir la siguiente.

Normalmente, se añade una capa de 50 cm de tierra por encima de los residuos y se compacta, dejando suficientes respiraderos en el suelo para que pueda salir el gas producido por la actividad biológica. También debe procurarse un drenaje adecuado del área de vertido controlado.

A veces, los residuos, dependiendo de sus constituyentes, pueden entrar en ignición en el vertedero. Por esta razón, deben vallarse estas áreas adecuadamente y mantener una vigilancia permanente hasta que se considere que ha pasado el peligro de ignición. También hay que tomar las medidas necesarias para extinguir un posible incendio de los residuos en el vertedero.

Acolchado

Se han realizado pruebas con polímeros para reutilizarlos de forma similar al acolchado (material suelto con el que se protegen las raíces de las plantas), cortándolos en virutas o gránulos, pues de esta forma se degradan muy lentamente y su efecto sobre el suelo es puramente físico. Sin embargo, este método no se ha utilizado todavía de forma generalizada.

Combustión al aire libre

La combustión al aire libre de los residuos contamina la atmósfera y existe el peligro de que el fuego se descontrole y se propague a las propiedades o áreas colindantes, que exploten los contenedores o que se produzcan daños debido a los materiales radiactivos que pueden formar parte de los residuos. Este método de eliminación se ha prohibido en algunos países por no considerarse deseable.

Pirólisis

Es posible recuperar determinados compuestos mediante la destilación de los productos obtenidos durante la pirólisis (descomposición mediante calentamiento) de polímeros y sustancias orgánicas, aunque todavía no se ha implantado de forma generalizada.

Eliminación de materiales a través de contratistas

Tal vez sea el método más adecuado. Es importante que para esta tarea sólo se seleccionen contratistas fiables y reconocidos y con experiencia en la eliminación de residuos industriales y materiales peligrosos. Estos últimos deben separarse cuidadosamente para ser eliminados por separado.

Clases específicas de materiales

Entre los materiales peligrosos actualmente utilizados en la industria se encuentran: (1) los metales combustibles y los reactivos, como magnesio, potasio, litio, sodio, titanio y circonio; (2) los residuos combustibles; (3) los aceites de secado; (4) los líquidos inflamables y los disolventes residuales; (5) los materiales oxidantes (líquidos y sólidos); y (6) los materiales radiactivos. Todos estos materiales requieren una manipulación y unas precauciones especiales, que hay que estudiar cuidadosamente. Para más información sobre la identificación de materiales peligrosos y los riesgos asociados a los materiales industriales se remite a las publicaciones siguientes: *Fire Protection Handbook* (Cote, 1991) y *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials* (Lewis, 1979).

Referencias

- American Institute of Chemical Engineers (AIChE). 1993. *Plant Guidelines for Technical Management of Chemical Process Safety*. Nueva York: Center for Chemical Process Safety.
- American Welding Society (AWS). 1988. *Recommended Safe Practices for the Preparation for Welding and Cutting of Containers that have held Hazardous Substances*. Miami: AWS.
- Babrauskas, V, SJ Grayson. 1992. *Heat Release in Fires*. Barking: Elsevier Science.
- Blye, P, P Bacon. 1991. Fire prevention practices in commerce and industry. Capítulo 2, Sección 2 en *Fire Protection Handbook*, 17ª ed., dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Bowes, PC. 1984. *Self-Heating: Evaluating and Controlling the Hazards*. Londres: Her Majesty's Stationary Office.
- Bradford, WJ. 1991. Chemical processing equipment. Capítulo 15, Sección 2 en *Fire Protection Handbook*, 17ª ed., dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- British Standards Institute (BSI). 1992. *The Protection of Structures Against Lightning*. British Standard Code of Practice, BS6651. Londres: BSI.
- Bugbee, P. 1978. *Principles of Fire Protection*. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Cote, AE. 1991. *Fire Protection Handbook*, 17ª ed. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Davis, NH. 1991. Lightning protection systems. Capítulo 32, Sección 2 en *Fire Protection Handbook*, 17ª ed., dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- DiNenno, PJ. 1988. *Handbook of Fire Protection Engineering*. Boston: SFPE.
- Directiva de la Comisión Europea (DCE). 1992. The Management of Health and Safety at Work Regulations.
- Drysdale, DD, HE Thomson. 1994. *Fourth International Symposium on Fire Safety Science*. Ottawa: IAFSS.

- Drysdale, DD. 1985. *Introduction to Fire Dynamics*. Chichester: Wiley.
- Factory Mutual Engineering Corporation (FM). 1977. Cutting and welding. *Loss Prevention Data Sheets 10-15*, junio 1977.
- . 1984. Lightning and surge protection for electrical systems. *Loss Prevention Data Sheets 5-11/14-19*, agosto 1984.
- Gratton, J. 1991. Firesafety education. Capítulo 2, Sección 1 en *Fire Protection Handbook*, 17ª ed., dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Higgins, JT. 1991. Housekeeping practices. Capítulo 34, Sección 2 en *Fire Protection Handbook*, 17ª ed., dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Hrbacek, EM. 1984. Clay products plants. En *Industrial Fire Hazards Handbook*, dirigido por J Linville. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Hunter, K. 1991. Technology distinguishes Japan's fire service. *Natl Fire Prev Agen J* (Septiembre/Octubre).
- Jernberg, LE. 1993. Improving risks in Sweden. *Fire Prev* 257 (Marzo).
- Keith, R. 1994. *FREM-Fire Risk Evaluation Method*. Melbourne: R. Keith & Assoc.
- Koffel, WE. 1993. Establishing industrial fire safety programs. *Natl Fire Prev Agen J* (Marzo/Abril).
- Lataille, JJ. 1990. Lumber kilns and agricultural dehydrators and dryers. En *Industrial Fire Hazards Handbook*, dirigido por J Linville. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Lees, FP. 1980. *Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 1, 2. Londres: Butterworths.
- Lewis, RRJ. 1979. *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.
- Linville, J (dir.). 1990. *Industrial Fire Hazards Handbook*. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Loss Prevention Council. 1992. *Fire Prevention On Construction Sites*. Londres: Loss Prevention Council.
- Manz, A. 1991. Welding and cutting. Capítulo 14, Sección 2 en *Fire Protection Handbook*, 17ª ed., dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- National Fire Protection Association (NFPA). 1983. *Firesafety Educator's Handbook: A Comprehensive Guide to Planning, Designing, and Implementing Firesafety Programs*. FSO-61. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1990a. *Standard System for the Identification of the Fire Hazards of Materials*. NFPA No. 704. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1995a. *Guide to the Fire Safety Concepts Tree*. NFPA No. 550. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1995b. *Standard for the Installation of Lighting Protection Systems*. NFPA No.780. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1992. *Fire Prevention Code*. NFPA No.1. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Osterhous, C. 1990. *Public Fire Education*. IFSTA No. 606. Stillwater, Oklahoma: Asociación Internacional para la Formación del Servicio de Incendios (IFSTA).
- Ostrowski, R. 1991. Oil quenching. *Fire Protection Handbook*, 17ª ed., dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Palmer, KN. 1973. *Dust Explosion and Fires*. Londres: Chapman & Hall.
- Simmons, JM. 1990. Heat processing equipment. En *Industrial Fire Hazards Handbook*. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Watts, KI. 1990. Oil quenching. En *Industrial Fire Hazards Handbook*, dirigido por J Linville. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Welch, J. 1993. The changing face of FPA training: Fire prevention. *Fire Prev* (Julio/Agosto): 261.
- Welty, JR, RE Wilson, CE Wicks. 1976. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. Nueva York: John Wiley & Sons.

Otras lecturas recomendadas

- Barry, TJ, B Newman. 1976. Some problems of synthetic polymers at elevated temperatures. *Fire Technol* 12(3):186-192.
- Berta, I, I Fodor. 1990. Electrostatic ignition sources. En *Fire and Explosion Safety*, dirigido por T Kompolthy. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
- Boddington, T, JF Griffiths, K Hasegawa. 1984. Induction times to thermal ignition in systems with distributed temperatures: An experimental test of theoretical interpretations. *Combust Flame* 55(3):297.
- Boyle, AR, FJ Llewellyn. 1950. The electrostatic ignitability of dust clouds and powders. *J Appl Chem* 69:173-181.
- Bryan, JL. 1991a. Concept of egress design. En *Fire Protection Handbook*, dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1991b. Human behaviour and fire. En *Fire Protection Handbook*, dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1991c. Traffic and exit drill. En *Fire Protection Handbook*, dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Canter, D. 1985. *Studies of Human Behaviour in Fire: Empirical Results and Their Implications for Education and Design*. Herts: Department of Environment, Building Research Establishment, Fire Research Station.
- Chamberlain, DL. 1983. *Heat Release Rate Properties of Wood-Based Materials*. NBSIR 82-2597. Washington, DC: National Bureau of Standards.
- Coffe, RD. 1971. Evaluation of chemical stability. *Fire Technol* 7(1):37-45.
- Dean, JA. 1984. *Lange's Handbook of Chemistry*. Sandusky, Ohio: Handbook Publishers.
- DeHaan, N. 1991. Interior finish. En *Fire Protection Handbook*, dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Donoghue, EA. 1991. Building transportation system. En *Fire Protection Handbook*, dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Eggleston, LA, AJ Pryor. 1967. The limits of dust explosibility. *Fire Technol* 3(2):77-89.
- Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures. Part 2.2: Actions on Structures Exposed to Fire (1991-2-2): CEN, ENV 1991-2-2.
- Goodall, DG, R Ingle. 1967. The ignition of flammable liquids by hot surfaces. *Fire Technol* 3(2):115-128.
- Gordon, BF. 1981. Flame retardants and textile material. *Fire Safety J* 4:109-123.
- Griffith, JF, JR Mullins. 1984. Ignition, self-heating, and the effects of added gases during the thermal decomposition of di-t-butyl peroxide. *Combust Flame* 56(2):135.
- Hanson, RJ, A Thomas. 1984. Flame development in swirling flows in closed vessels. *Combust Flame* 55(3):255.
- Harley, CS. 1991. Building and site planning for firesafety. En *Fire Protection Handbook*, dirigido por AE Cote. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Hilado, CJ, HJ Cumming. 1977. The HC value: A method of estimating the flammability of mixtures of combustible gases. *Fire Technol* 13(3):195.
- Hilado, CJ. 1982. *Flammability Handbook for Plastics*. Lancaster, Pensilvania: Technomic Publishing.
- Hirschler, MM. 1992. Smoke and heat release and ignitability as measures of fire hazard from burning of carpet tiles. *Fire Safety J* 18(4):305.
- Hommel, G. 1987. *Handbuch Der Gefährlichen Güter*. Berlin: Springer Verlag.
- Ihrig, AM, SL Smith. 1994. The role of alkali and alkaline earth metal ions in cellulosic smoldering. *J Fire Sci* 12(4):357.
- Janssens, M. 1991. Piloted ignition of wood: A review. *Fire Mater* 15(4):151.
- Karter, MJJ. 1991. Fire loss in the United States during 1990. *NFPA J* Septiembre/Octubre: 36.
- Klote, JH. 1992. *Design of Smoke Management Systems*. Atlanta.
- Martin, JT, B Miller. 1978. The thermal and flammability behaviour of polyester-wool blends. *Textile Res J* 48:97-103.
- Mizuno, T, K Kawagoe. 1986. Burning behaviour of upholstered chairs: Part 3, Flame and plume characteristics in fire test. *Fire Sci Technol* 6(12):29.
- Nagy, J, HG Dorset, M Jacobson. 1964. *Preventing Ignition of Dust Dispersions By Inerting*. Pittsburgh, Pensilvania: USD1, Bureau of Mines. (R16543)
- Nishimoto, T, M Morita, H Yajima. 1986. Spontaneous combustion of coal (III) (Isothermal Method). *Fire Sci Technol* 6(1 y 2):1.
- Ohlemiller, TJ, FE Rogers. 1978. A survey of several factors influencing smolder combustion in flexible and rigid polymer foams. *J Fire Flamm* 9:489-509.
- Ohtani, H. 1990. Theoretical consideration on the ignition of hot iron in high pressure oxygen. *Fire Sci Technol* 10(1 y 2):1.
- Pál, K, H Macskásy. 1980. *Plastics and their Combustibility*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
- Perry, JH, CH Chilton. 1974. *Chemical Engineers' Handbook*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Purser, DA, WD Woolley. 1983. Biological studies of combustion atmospheres. *J Fire Sci* 1(2):118.
- Rasbash, DJ. 1980. Review of explosion and fire hazard of liquified petroleum gas. *Fire Safety J* 2(4):223-236.
- SFPE y NFPA. 1988. *The SFPA Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy, Massachusetts: SFPE.
- Sharma, TP, S Kumar. 1992. Products of combustion of the metal powders. *Fire Sci Technol* 12(2):29.
- Sugawa, O, H Yamamoto. 1989. Reduction of Smoke Particles from Fire Retarded Wood. *Fire Sci Technol* 9(1):1.
- Tewarson, A, DP Macaion. 1993. Polymers and composites—An examination of fire spread and generation of heat and fire products. *J Fire Sci* 11(5):421.
- Tewarson, A. 1975. *Flammability of Polymers and Organic Liquids, Part 1, Burning Intensity*. Norwood, Massachusetts: Factory Mutual Research Corp.
- . 1994. Flammability parameters of materials: Ignition, combustion, and fire propagation. *Fire Safety J* 12(4):329.
- Thorne, PF. 1976. Flashpoints of mixtures of flammable and non-flammable liquids. *Fire Mater* 1:134-140.
- White, RH, EV Nordheim. 1992. Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. *Fire Technol* 28(1):5.

