

Química aplicada a la seguridad: agentes extintores de fuego

Fernando Ignacio de Prada Pérez de Azpeitia

Resumen: En la vida cotidiana se pueden plantear situaciones de riesgo relacionadas con el fuego que pueden tener graves consecuencias sin una información científica básica. No saber como reaccionar llegado el caso y desconocer el uso adecuado de cada agente extintor, puede hacer que un pequeño fuego acabe en un gran incendio. En consecuencia, la mejor prevención es el conocimiento de las propiedades de los diferentes agentes químicos extintores, para ello se muestran experiencias de sus características y actuación frente a diferentes tipos de fuego.

Palabras clave: Incendios, métodos de extinción, agentes extintores.

Abstract: Dangerous situations connected with fire can be created in daily life and they can have serious consequences without a basic scientific information. Not knowing what to do in these cases, and being unfamiliar with the adequate use of each fire extinguisher, may provoke that a small fire becomes a huge one. In consequence, the best safety measure is the knowledge of the different chemical agents' properties. With this purpose, experiences of their properties as well as their behaviours against different types of fires are shown.

Keywords: Fire, extinction ways, fire extinguisher agents.

1. Introducción

La educación y la prevención son procesos fundamentales para mejorar la actitud y la conducta de las personas ante el fuego. En la vida cotidiana se pueden plantear situaciones de riesgo, que pueden llegar a tener graves consecuencias, personales y materiales, si no se tienen conocimientos sobre el fuego y su formación. No hace falta ser un bombero profesional para actuar de forma segura y eficaz en situaciones de conatos de incendios, para ello es necesario conocer los agentes extintores más adecuados para cada tipo de fuego y la forma de aplicación. Este conocimiento unido a prácticas y experiencias que resultan imprescindibles para cualquier proceso de formación, reducirá el peligro de forma que haga innecesaria o facilite la posterior intervención de los servicios de extinción de incendios.

Para conseguir estos objetivos: –aumentar el conocimiento científico sobre los agentes extintores –conocer las principales formas de extinción de incendios y –saber cómo actuar de forma eficaz frente a pequeños conatos de incendios, el proceso de aprendizaje debe realizarse en los centros de enseñanza estableciéndose las bases de una educación científica que sea eficaz en diferentes entornos: hogar, laboratorios, espacios naturales, etc.

Precisamente la eficacia de algunas sustancias químicas como agentes extintores permite mostrar una aplicación muy útil de la química de cara a la seguridad y con gran interés didáctico para el alumnado, dado la espectacularidad, no exenta de utilidad, de las experiencias relacionadas con la formación y extinción de incendios.



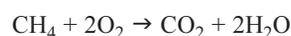
F. I. de Prada
Pérez de Azpeitia

Dpto. Física y Química. IES Las Lagunas
Avda. Gabriel García Márquez s/n. Rivas. Madrid
C-e: fernando.pradaperez@educa.madrid.org
Recibido: 09/02/2009. Aceptado: 11/05/2009.

2. Fundamentos sobre combustión y extinción

El fuego es el resultado de una rápida reacción química de oxidación (combustión) entre un combustible y el oxígeno del aire, produciéndose una energía en forma de calor que se propaga debido a una reacción en cadena. Además de desprenderse calor, se producen diferentes gases junto a la emisión de luz, humo –formado por pequeñas partículas sólidas en suspensión parcialmente quemadas y vapor condensado– y llamas. El tipo de gas generado (dióxido de carbono, monóxido de carbono, amoníaco, ácido cianhídrico, dióxido de azufre, etc), depende de varios factores, entre ellos: la composición química del combustible, la cantidad de oxígeno y la temperatura. El monóxido de carbono es el principal responsable de las intoxicaciones y muertes producidas en los incendios, considerando como tales a los fuegos no controlados ni en el espacio ni en el tiempo. Su presencia se debe a una combustión incompleta por falta de oxígeno, y su toxicidad, a su afinidad por la hemoglobina de la sangre. En concentraciones de 0,4% resulta mortal al cabo de una hora.

La combustión es un proceso de intercambio de electrones (oxidación-reducción) en que interviene un material que puede ser oxidado (combustible - agente reductor, que se oxida cediendo electrones al agente oxidante), y un elemento oxidante, (comburente - que se reduce y oxida al combustible). Por ejemplo, en la combustión completa del principal hidrocarburo presente en el gas natural:



el metano es el agente reductor que es oxidado por el agente oxidante y comburente, el oxígeno, el cual se reduce al captar los electrones que le ha cedido el combustible. Para que el combustible ceda electrones y la reacción de oxidación comience, se necesita de una cierta cantidad de energía (energía de activación), habitualmente en forma de calor. Esta energía se puede aportar por cuatro fuentes principales: química, eléctrica, mecánica y nuclear. En principio, para que se inicie un fuego, sólo hace falta que se combinen estos tres elementos (*triángulo del fuego*) que están presentes en todos los hogares: combustible, aire (comburente) y foco de ignición. Si bien, en algunos casos (hierro o carbón en polvo,

fibras impregnadas en aceites, etc.), se puede producir la ignición de forma espontánea sin aporte de energía inicial.

Todas las sustancias combustibles presentan tres niveles de temperatura característicos, que según la norma española aprobada por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) UNE-EN-ISO13943-2001^[1] son:

- punto de ignición (encendido) o temperatura mínima a la que el combustible emite suficientes vapores que, en presencia de aire (u otro comburente), se inflaman en contacto con una fuente de ignición, pero si se retira se apaga - punto de inflamación o temperatura mínima a la cual el combustible se inflama y sigue ardiendo, aunque se retire la fuente de ignición - punto de autoignición (ignición espontánea) o temperatura mínima a la cual un combustible comienza a arder sin necesidad de una fuente de ignición. Sin embargo, no todas las mezclas combustible-comburente son susceptibles de entrar en combustión, por ello se definen los límites de inflamabilidad como los límites extremos de concentración (% volumen) de un combustible dentro de un medio oxidante en cuyo seno puede producirse una combustión, es decir:
- límite inferior de inflamabilidad o mínima concentración de vapores de combustible, en mezcla con un comburente, por debajo de la cual no se produce la combustión.
- límite superior de inflamabilidad o máxima concentración de vapores de combustible, por encima de la cual no se produce combustión.

Estos valores se miden con aparatos denominados explosímetros, que avisan del peligro cuando la concentración de vapores alcanza el límite inferior de inflamabilidad. A las concentraciones intermedias entre ambos límites se denomina rango o campo de inflamabilidad, y son mezclas capaces de entrar en combustión. Así por ejemplo, el monóxido de carbono es un producto de la combustión presente en todos los incendios y sus límites de inflamabilidad varían del 12,5% al 74% de contenido en una mezcla de aire. Esto significa que si la atmósfera del local contiene 12,5% o más de monóxido de carbono, pero menos de 74%, puede arder o incluso explotar. Si el porcentaje es inferior al 12,5% o superior al 74%, se considera que la mezcla es demasiado pobre o rica en combustible para arder.

Cuando el combustible –sólido o líquido– se calienta, desprende vapores y gases que se combinan con el oxígeno del aire, los cuales en presencia de una fuente de ignición (chispa o llama que proporciona la energía de activación) y al alcanzar la temperatura adecuada arden, liberando gran cantidad de energía en forma de calor. Si el calor desprendido no es suficiente para generar más vapores del material combustibles, el fuego se apaga. En caso contrario, el fuego se retroalimenta absorbiendo parte del calor que genera la reacción, de manera que el combustible sigue descomponiéndose por pirólisis formando productos intermedios muy reactivos (radicales libres) y desprendiendo más vapores que se combinan con el oxígeno y se inflaman, verificándose una reacción en cadena que mantiene el fuego (*tetraedro del fuego*: combustible, comburente, foco de ignición y reacción en cadena).

Aunque algunos combustibles, como el carbón o el azufre, no emiten gases inflamables al quemarse, porque originan una combustión en forma de brasas o incandescencia. Mediante una sencilla demostración se puede comprobar cómo lo que realmente arde son los gases inflamables desprendidos por el propio combustible al ser calentado, y no la fase sólida del combustible (madera, papel). Para ello, se introducen virutas de madera o serrín en el interior de un matraz de destilación y

se calienta bajo la llama de un mechero Bunsen (Figura 1). Al principio, se observa que se desprende vapor de agua que contiene la madera y al poner una llama a la salida del tubo de desprendimiento de gases no sucede nada. Después de varios minutos de calentar el matraz, al poner una cerilla encendida en la salida del tubo (o en una probeta donde se ha recogido los productos gaseosos), se observa como, en este caso, sí se produce la combustión de los gases formados, entre ellos, metanol.^[2]



Figura 1. Destilación seca de la madera realizada por bomberos del Ayuntamiento de Madrid durante la IX Feria Madrid es Ciencia.

Conocidas las condiciones necesarias para iniciar y mantener un fuego, es lógico deducir que los mecanismos de extinción deben basarse en eliminar una o varias de estas condiciones. Según el factor que se pretenda eliminar o reducir, el método de extinción será distinto. En consecuencia, se emplean cuatro técnicas de extinción fundamentales:

2.1. Enfriamiento o refrigeración.

La mayor parte de la energía desprendida en la combustión, sobre el 90%, se disipa en el ambiente, sólo un pequeño porcentaje del calor generado permanece en el foco e inflama nuevas moléculas de combustible propagando el incendio. Si se disminuye o elimina esta energía calorífica, desciende la temperatura de los agentes combustibles por debajo de su temperatura de ignición, dejarán de emitir gases combustibles y se extinguirá el incendio. El calor se consigue disminuir añadiendo un agente que reaccione endotérmicamente absorbiendo calor, como por ejemplo: el agua al evaporarse, la nieve carbónica al sublimar o algunas sales al descomponerse endotérmicamente.

2.2 Dilución o desalimentación del combustible.

El fuego necesita continuamente de combustible para poder propagarse. Si se elimina o retira el combustible de la zona del incendio, el fuego se extingue, como por ejemplo, el cierre de una válvula de gas o el efecto de un cortafuegos en los incendios forestales. En fuegos originados por líquidos solubles en agua, como los alcoholes, el fuego se extingue cuando se alcanza un punto en el que la disolución no emite vapores suficientes para mantener la combustión.

Para comprobar cómo actúan el enfriamiento y la dilución sobre un fuego se prepara una mezcla a partes iguales de etanol de 96°C y agua. A continuación se introduce un papel (billete) en la mezcla y se empapa totalmente. En contacto

con una fuente de ignición se produce la inflamación de la mezcla hidroalcohólica con formación de llama (Figura 2), que a los pocos segundos, cuando ya no se generan suficientes vapores de alcohol, se apaga. El agua que impregna el papel absorbe el calor generado, impidiendo que alcance su punto de ignición (230°C) y se queme el billete.^[3]



Figura 2. Efecto del enfriamiento y dilución sobre un fuego.

2.3. Sofocación

La combustión consume mucho oxígeno y precisa de la afluencia continua de oxígeno a la zona de fuego. Este método trata de reducir el oxígeno, ya que por debajo de una concentración del 14% en volumen de oxígeno la combustión no es posible, por eso se llama sofocación. Este mecanismo está basado en desplazar el oxígeno para eliminar o reducir la cantidad de moléculas de comburente en contacto con las moléculas de combustible. La asfixia del fuego se puede conseguir de diferentes formas:

- Ruptura del contacto entre combustible-aire, recubriendo la superficie del material en combustión con alguna sustancia no combustible como: arena, espuma, bicarbonatos de sales alcalinas y fosfatos amónicos, manta ignífuga, tapa de sartén, etc.
- Dificultando el acceso de oxígeno a la zona de fuego, cerrando puertas y ventanas.
- Proyectando un gas inerte en suficiente cantidad para disminuir la concentración de oxígeno por debajo de una concentración mínima.
- Proyectando agua sobre el fuego, que al evaporarse disminuye la concentración de oxígeno, sobre todo si se proyecta pulverizada.

En el caso particular de incendios de pozos petrolíferos se utilizan explosivos que en los pocos milisegundos que dura la detonación consumen casi todo el oxígeno de las inmediaciones sofocando el incendio.

2.4. Inhibición o rotura de la reacción en cadena

Las reacciones de combustión progresan a nivel molecular por un mecanismo en que intervienen radicales libres de alta reactividad. La reacción en cadena originada puede ser inhibida por la presencia de sustancias generadas en la descomposición térmica del polvo extintor, que actúa neutralizando a los radicales libres. La aplicación de agentes pulverizados, también impiden la transmisión de calor entre las partículas de la materia combustible, dificultando su propagación a modo de "cortafuegos". Puesto que la reacción en cadena solo se produce en fuegos con llamas, los fuegos de brasas no podrán extinguirse de esta forma.

3. Clasificación de los fuegos

Para clasificar a los fuegos son muchos los factores que se pueden tomar como referencia: tamaño, extensión, distribución del combustible, etc. Con miras a la aplicación práctica de determinados agentes extintores, los fuegos se clasifican por grupos en función del tipo de combustible. En España el criterio vigente es el recogido por la norma: UNE-EN 2:1994/A1:2005^[5] que clasifica los fuegos en los siguientes grupos:

Clase A: fuegos que se desarrollan sobre combustibles sólidos como madera, carbón, papel, plástico, fibras, productos textiles (según las estadísticas, el combustible inicial de la mayoría de los incendios), etc. Su combustión requiere la volatilización de parte del combustible sólido y posterior pirólisis, para lo cual es necesario aplicar gran cantidad de energía en su superficie. Se trata de materiales carbonizables cuya combustión provoca un gran porcentaje de cenizas y elevadas temperaturas. Pueden arder sin formación de llama (en forma de brasa), reteniendo oxígeno en su interior. Para su extinción son efectivas las propiedades refrigerantes, humectantes y penetrantes del agua.

Clase B: fuegos originados por líquidos inflamables y combustibles líquidos como gasolinas, gasóleos, aceites, alcoholes, grasas, pinturas, etc. Solamente arden los gases o vapores desprendidos de la superficie que está en contacto con el oxígeno del aire, y dentro de un límite inferior y superior de inflamabilidad del combustible. Para que la cantidad de vapor producido en la superficie libre del líquido sea suficiente como para que dé lugar a una mezcla combustible con el oxígeno del aire, dentro del rango de inflamabilidad, debe existir una determinada temperatura en la que se evapore suficiente cantidad de líquido, a este valor se le denomina punto de inflamación. Si la temperatura alcanza dicho punto, no significa que se inicie la combustión, sino que la mezcla solo necesita de la energía de activación para que se alcance la temperatura de ignición y se produzca el fuego.

Los líquidos pueden clasificarse en función de su punto de inflamación como: inflamables, cuando se encuentra por debajo de los 38°C, son los más peligrosos, (gasolina, -43°C; etanol, 18°C; aguarrás, 33°C) y combustibles, cuando se encuentra por encima de los 38°C (gasóleo, 65°C)

En general, este tipo de fuegos pueden apagarse con espuma, polvo químico, dióxido de carbono (en ambientes cerrados únicamente) o agua (niebla o vapor). En este último caso, hay que tener en cuenta que cuando el incendio se origina por un líquido inmisible y menos denso que el agua, como el aceite, su aplicación en forma de chorro es particularmente peligrosa. Por esta razón se incluyen en una clase diferente, la clase F.

Clase C: fuegos producidos cuando se produce la combustión de sustancias gaseosas como el butano, el propano, el metano, el gas natural, etc. Si bien los gases no necesitan cambiar de estado para iniciar la combustión, sin embargo, no arden en cualquier concentración, existe un rango de inflamabilidad para la mezcla combustible-aire^[4] del cual depende su peligrosidad. Por ejemplo, el hidrógeno tiene un rango muy amplio en el que la mezcla es combustible, (4%-75%), por eso es mucho más peligroso que otros gases de menor rango como el gas natural (5%-15%) o el propano (2%-10%)

Clase D: fuegos generados por metales combustibles, como el magnesio, titanio, potasio, sodio, aluminio en polvo, circo-

nio, uranio, etc. Para su extinción debe recurrirse a agentes específicos para cada caso, entre ellos la arena seca, el grafito, el talco, la ceniza y polvos químicos especiales, ya que por otros medios estos metales pueden reaccionar violentamente y no ser sofocados. Por ejemplo, los metales alcalinos se oxidan rápidamente en presencia de humedad y pueden producir explosiones al contacto con el agua. Sin embargo, en el caso del magnesio, si el foco es pequeño, se puede apagar con grandes cantidades de agua a chorro.

Clase E: incluye los fuegos producidos en presencia de corriente eléctrica. Oficialmente no existe tal categoría, han desaparecido de la normativa vigente porque, según los expertos, en el momento en que se corta la corriente, el fuego ya no sería de clase E sino de la clase que corresponde al combustible implicado.

Clase F: son los fuegos derivados de la utilización de ingredientes para cocinar (aceites y grasas vegetales o animales) en los aparatos de cocina. Esta clase fue introducida en 2005 por el hecho de que uno de los accidentes más frecuentes en los hogares es el producido por la inflamación del aceite en una sartén debido a su excesivo calentamiento. Este es el origen de muchos incendios y quemaduras producidas al intentar sofocar las llamas colocando la sartén bajo un chorro de agua. Las moléculas de aceite, menos densas que las de agua, sobrenadan y sigue ardiendo su vapor, expandiendo las llamas en vez de extinguirlas. Para comprobar con seguridad este efecto, añadimos heptano líquido simulando ser aceite (inmiscible en agua y también menos denso) a un pequeño cazo, seguidamente se prende fuego e intenta apagar mediante un pequeño extintor de agua (Figura 3), observándose como el fuego se aviva en lugar de apagarse. Para sofocar este tipo de fuegos es suficiente con apagar la fuente de calor y utilizar una tapadera o un paño húmedo colocándolo desde un lado, no desde arriba, en la zona en combustión para apagarlo por asfixia. Existen extintores específicos para este tipo de fuego que contienen una solución a base de acetato de potasio, el cual reacciona con el aceite produciendo un efecto de saponificación que sella la superficie aislándola del oxígeno. Curiosamente, los bomberos recomiendan apagar el incendio de aceite inflamado en una sartén, añadiendo más aceite, con la finalidad de disminuir la temperatura del mismo por debajo del punto de inflamación (250°C).



Figura 3. Expansión de las llamas al añadir agua a un fuego de heptano que simula al típico de aceite inflamado en una sartén.

La normativa vigente en Estados Unidos y numerosos países del continente americano, está regulada por la NFPA (National Fire Protection Association), presenta algunas diferencias respecto a las normas europeas, por ejemplo, los fuegos originados por gases se engloban en la clase B, incluyen-

dose en la clase C los fuegos producidos en instalaciones o equipos sometidos a la acción de la corriente eléctrica.

4. Agentes extintores

Los agentes extintores son sustancias químicas que se utilizan para apagar los incendios debido a sus propiedades específicas que actúan según los mecanismos de extinción del fuego. Estas propiedades son susceptibles de ser analizadas y aplicadas en cualquier nivel de química, ya que existen diversas conexiones con los contenidos y competencias del currículo a nivel preuniversitario.

En la actualidad se utilizan fundamentalmente cuatro agentes extintores –agua, dióxido de carbono, polvo polivalente y espuma– cada uno de los cuales actúa de una forma principal –y otras secundarias– que lo hace más eficaz que los demás, según sea el tipo y condiciones del fuego.

4.1 El agua

El agua es el agente extintor más conocido y empleado a lo largo de la historia para apagar fuegos comunes (combustibles sólidos, líquidos y gases), tanto por su bajo coste y fácil obtención como por sus propiedades de extinción. Cuando se le añade al fuego absorbe rápidamente el calor que éste desprende, la energía cinética de sus moléculas aumenta y se mueven cada vez más rápido distanciándose unas de otras, de manera que se transforman en vapor de agua cuando disponen de la energía suficiente para el cambio de estado. En este proceso absorbe gran cantidad de calor y, en consecuencia, disminuye la temperatura del fuego, lo enfría; evitando así la reacción entre el combustible y el oxígeno. Empleando un sifón, de los utilizados para elaborar bebidas, que se carga con dióxido de carbono (Figura 4) se pueden realizar sencillas demostraciones de extinción de pequeños incendios en el laboratorio, tanto si se llena de agua como si se utiliza solamente con el gas propulsor en su interior.



Figura 4. Estudiante de bachillerato transmitiendo el conocimiento adquirido sobre la extinción de fuegos a visitantes de la IX Feria Madrid es Ciencia.

El agua actúa principalmente por enfriamiento del combustible al disminuir la temperatura necesaria para mantener la combustión. La capacidad del agua de absorber calor se debe a la existencia de fuertes enlaces intermoleculares de hidrógeno, necesiándose una gran cantidad de energía para romper estos enlaces y separar las moléculas de agua. Para transformar un litro ($m = 1\text{ kg}$) de agua a 0°C en vapor de agua a 100°C se necesitan 2.675 kJ (aproximadamente, ya que la capacidad calorífica del agua depende de la temperatura), de los que 418 kJ se invierten en elevar la temperatura del agua

de cero a cien grados centígrados ($\Delta T = 100 \text{ K}$), según la ecuación^[6] (calor específico del agua a 25°C: $c_e = 4.180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$):

$$Q = m \cdot c_e \cdot \Delta T = 1 \text{ kg} \cdot (4.180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}) \cdot 100 \text{ K} = 418 \text{ kJ}$$

y el resto, se consumen en la formación de vapor de agua (calor latente de vaporización: $L_v = 2.257 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$).

$$Q = m \cdot L_v = 1 \text{ kg} \cdot 2.257 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} = 2.257 \text{ kJ}$$

Por tanto, en la formación de vapor por contacto del agua con el fuego, se produce un efecto de enfriamiento más de cinco veces superior al conseguido por el calentamiento del agua. Cuanto mayor sea la superficie de contacto con el fuego, más fácilmente puede vaporizarse el agua y mayor será la absorción de calor que produzca, por esta razón se recomienda utilizarla lo más pulverizada posible (atomizada) para una extinción más rápida del fuego. Los bomberos utilizan unas bocas especiales en sus mangueras que lanzan el agua en forma de neblina, lo que facilita que el agua se convierta en vapor y el proceso de extinción se acelere. En el caso de refrigeración de materiales a larga distancia el agua lanzada a chorro tiene mucho más alcance y eficacia que en forma pulverizada.

La elevada capacidad del agua de absorber calor se puede comprobar poniendo directamente a la llama de un mechero de gas un globo lleno de agua (Figura 5). El punto de ignición del caucho (látex) constituyente del globo, es superior a 200°C, como el agua hierve a 100°C, el polímero no superará esta temperatura mientras esté en contacto con el agua. En cambio, cuando el globo se coloca directamente al fuego, rodeado de aire y sin la presencia de agua, la temperatura sube rápidamente hasta que la goma se reblandece y el globo arde.^[7]



Figura 5. Absorción del calor generado en una combustión por el agua contenida en un globo.

El agua también actúa mediante otros mecanismos:

- Sofocación: si el fuego sucede en recintos cerrados el agua tiene una ventaja adicional, en su vaporización aumenta unas 1.700 veces su volumen a presión atmosférica, desplazando el oxígeno del aire.
- Dilución: disminuyendo la concentración de los materiales combustibles solubles en agua (metanol, alcohol) e impidiendo que se mantenga la reacción
- Emulsificación: cuando se aplica en forma pulverizada a líquidos viscosos enfría su superficie, generando espuma que evita la producción de vapores inflamables, extinguiéndose el fuego.

Con el fin de mejorar su capacidad extintora, se le añaden diferentes aditivos que mejoran sus propiedades; agentes tensioactivos o humectantes, como el ácido láurico, que disminuyen la tensión superficial mejorando su penetración en el combustible sólido; espesantes que mejoran la adherencia al material; anticongelantes para evitar su congelación que impediría su utilización, y aditivos que reducen el rozamiento del agua con la manguera para evitar la disminución de presión y, como consecuencia, su caudal.

El agua se aplica en extintores portátiles de presión permanente que contienen un gas impulsor (nitrógeno o dióxido de carbono) o mediante bocas de incendio equipadas (BIE), que son equipos de extinción totalmente equipados y conectados a un suministro de agua con caudal y presión suficiente para transportar y proyectar el agua hasta el fuego. En el interior de los grandes edificios e industrias la normativa exige, además, sistemas fijos, como las redes interiores de *sprinklers* automáticos, rociadores que llevan incorporado un detector de temperatura que a determinado valor provoca la descarga del agua. Los más eficaces utilizan agua nebulizada a alta presión con el fin de incrementar la superficie de vaporización. En el exterior, los puntos de captación de agua (red de hidrantes) están distribuidos en la vía pública como suministro de agua suficiente, en caudal y presión, para los vehículos de extinción de incendios.

4.2. El dióxido de carbono

El dióxido de carbono es un gas incoloro, inodoro, inerte, más denso que el aire, y al no ser buen conductor de la corriente, el agente más eficaz para la extinción mediante barrido de fuegos de líquidos o gases inflamables y de aparatos eléctricos de baja tensión (Figura 6). Es menos eficaz frente a fuegos de combustibles sólidos, debido a su reducida capacidad de enfriamiento y penetración, por lo que debe acompañarse por una segunda extinción de agua.

La principal propiedad de este agente extintor radica en la capacidad de reducir el nivel de oxígeno.^[8] El dióxido de carbono tiene una densidad 1,5 veces superior a la del aire a la misma temperatura, por lo que al ser aplicada sobre una superficie en ignición, desplaza al aire existente en la zona, ejerciendo un efecto sofocante y como consecuencia la combustión se dificulta hasta llegar a detenerse totalmente. Este efecto, unido a que al expandirse el gas durante su descarga, una parte del mismo cambia a estado sólido a una temperatura próxima a -79°C, hace que, aplicado localmente, las partículas de nieve carbónica formadas contribuyan a enfriar el combustible, evitando las posibles reigniciones del combustible cuando cese la descarga del gas y el oxígeno de la atmósfera entre de nuevo en contacto con el combustible.

Además de ser una sustancia no inflamable y poco reactiva químicamente, no mancha ni deja residuos después aplicarse, lo que la hace recomendable en locales donde existen materiales de alto valor (equipos electrónicos, ordenadores, archivos, obras de arte, etc.).

Su efectividad queda bastante limitada en fuegos al aire libre, en estos casos si no se aplica muy cerca del foco de fuego el efecto de dilución no llega a ser eficaz a causa de la constante renovación del aire. Por otro lado, al reducir la concentración de oxígeno produce un efecto asfixiante, por lo que no es recomendable su uso en lugares cerrados y poco ventilados sin haber sido desalojados previamente.



Figura 6. Descarga de dióxido de carbono frente a fuego simulado de tipo eléctrico en el laboratorio.

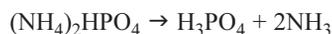
El dióxido de carbono se aplica desde extintores portátiles fabricados de acero estirado de una sola pieza, con el doble de espesor (4mm) que los extintores de polvo químico debido a la elevada presión que deben soportar: la presión de prueba es de 250 kg/cm² frente a 35kg/cm² de los extintores de polvo. Es el único agente de los utilizados habitualmente, que no necesita de gas impulsor para su aplicación. Para productos químicos y materiales que generan en la combustión su propio suministro de oxígeno (nitrocelulosa, bengalas, materiales pirotécnicos) el uso de dióxido de carbono no es efectivo.

4.3 Polvos químicos secos

Los polvos químicos polivalentes (polvos ABC) son los contenidos generalmente en la mayoría de extintores portátiles porque son eficaces frente a fuegos de sólidos, líquidos y gases, además de ser efectivos en fuegos de baja tensión eléctrica (hasta 50 kV), debido a su baja conductividad. Básicamente, están formados por fosfatos (y sulfatos) amónicos, al que se añaden aditivos que favorecen su aplicación y conservación (resinas termoplásticas, antiapelmazantes y antihumectantes).

Uno de los efectos del polvo químico radica en que, a causa del pequeño tamaño de sus partículas (20µm), se interponen entre los radicales libres que se forman inhibiendo las reacciones en cadena necesarias para que se mantenga la combustión.^[9] Aunque no tienen gran capacidad de absorción de calor, su descomposición es un proceso endotérmico, presentando un ligero efecto enfriador y otro, más importante, de sofocación, causado por depositarse un residuo sobre el material incendiado, que actúa desplazando al oxígeno.

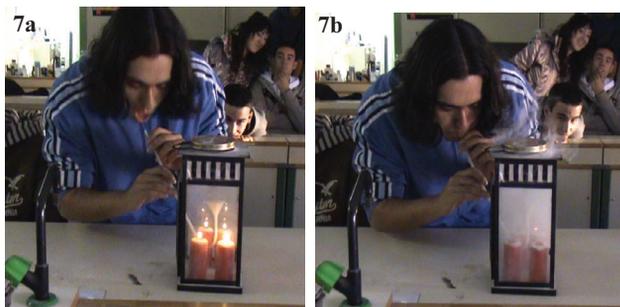
Por ejemplo, la descomposición por el calor del hidrógeno fosfato de amonio produce ácido fosfórico y gases de amoníaco:



Por encima de 300°C, progresa la deshidratación del ácido fosfórico con formación de ácidos polifosfóricos y, en último término, cadenas de longitud indefinida, de ácido metafosfórico.^[10] La alta polimerización explica su elevada viscosidad y que llegue a formar una capa en estado vítreo que aísla las brasas del oxígeno atmosférico y dificulta la transferencia de calor por radiación.

El pequeño tamaño de las partículas y el que sean ligeramente corrosivas, hace que su aplicación deje residuos difícilmente eliminables, que dificultan la visión durante la extinción del fuego. No siendo recomendable contra fuegos donde sus residuos puedan afectar a equipos delicados como los electrónicos.

Es fácil comprobar el efecto extintor de este agente químico, bien mediante un simulacro de extinción en el exterior, o en el interior (Figuras 7a y 7b). En este último caso, se colocan unas velas encendidas en el interior de un recipiente hermético que contiene un pequeño embudo cargado de polvo químico, el cual se encuentra conectado a un tubo de goma por el que se puede insuflar el polvo (soplando o apretando una pera de goma) para que inunde el interior del recipiente y extinga las llamas de las velas.



Figuras 7a y 7b. Práctica de extinción de una llama en interior mediante polvos químicos ABC.

Los polvos químicos polivalentes se pueden encontrar tanto en extintores de presión incorporada (Figura 8) o permanente, con el agente impulsor (nitrógeno o dióxido de carbono) contenido en el interior del cuerpo del extintor, como en extintores con cartucho de presión adosada, en los que es necesario previamente abrir el botellín de gas perforando la válvula que lo cierra, mediante una palanca, para que el gas pase al interior del extintor y comunique la presión adecuada.

La eficacia de un extintor indica la capacidad de extinción frente a las distintas clases de fuego, viene reflejada en la etiqueta exterior con un número seguido de una letra. La letra corresponde al tipo de fuego y el número al grado de eficacia relativo a pruebas de laboratorio realizadas sobre listones de madera (Clase A) o litros de gasolina (Clase B), este número define las dimensiones del mayor fuego que ha sido capaz de extinguir durante los ensayos normalizados, según los hogares tipo definidos por la norma UNE 23-110 96.^[11] Para los fuegos de clase C, únicamente se evalúa si son aptos o no aptos, por lo que el número solo precederá a las letras A y B. Por ejemplo, si en la etiqueta de un extintor de 6kg que contiene polvo ABC aparece el código 34A 183B, el número 34 corresponde a la longitud en decímetros del lado de un entramado de madera ardiendo de sección transversal constante y sobre un pedestal metálico que el extintor es capaz de apagar, y el número 183 corresponde a los litros de combustible normalizado (gasolina de aviación) ardiendo sobre bandejas circu-



Figura 8. Práctica de extinción de fuego simulado en exterior con extintor de polvo químico polivalente.

lares de diámetros especificados que el extintor puede sofocar.

Menos utilizados son los polvos químicos secos BC (Figuras 9a y 9b) por ser de eficacia más limitada. Se caracterizan por no ser corrosivos y poder utilizarse por debajo de una tensión de 1.000V. Están compuestos principalmente por hidrogenocarbonato de sodio o de potasio (95%-98%), siendo el resto aditivos para evitar el apelmazamiento, favorecer la fluidez y proteger contra la humedad, que se descompone absorbiendo calor y generando dióxido de carbono, según la reacción:

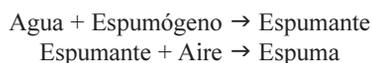


Figuras 9a y 9b. Extinción de la llama de una vela mediante hidrogenocarbonato de sodio en polvo.

4.4 Espumas

La espuma es una emulsión inestable de burbujas de aire y agua que puede disolverse fácilmente por fuerzas mecánicas o físicas.

La espuma física se obtiene a partir de la mezcla formada por agua y un espumógeno. La disolución formada se denomina espumante que al mezclarse y agitarse con aire inyectado origina la espuma:^[12]



Según el agente espumógeno utilizado se pueden formar espumas con diferente grado de expansión; entre 30 y 900 volúmenes. Por ejemplo, las de baja expansión se aplican a fuegos causados por derrames de líquidos inflamables en superficie horizontal, cuando se cubren con espuma, debido a su baja densidad, forma una capa continua y sella toda la superficie, aislando el líquido del oxígeno del aire y dejando de ser peligrosos.

Las espumas de alta expansión se emplean para llenar sótanos o bodegas, donde resulta difícil el acceso hasta el incendio. En estos casos, las espumas detienen la convección y el acceso de aire, su contenido en agua enfría la zona y el oxígeno disminuye por desplazamiento.

En consecuencia, las propiedades extintoras de las espumas son semejantes a las del agua, actúan por enfriamiento, sofocación, emulsificación y dilución. Por la misma razón, debido a su conductividad, no deben utilizarse las espumas sobre equipos con tensión eléctrica.

Las primeras espumas contenían polímeros proteínicos naturales de alto peso molecular, derivados de la transformación e hidrólisis de proteínas sólidas naturales, que dan a la espuma elasticidad, resistencia mecánica y capacidad de retención del agua. Actualmente, se dispone de espumas sintéticas, una de las más utilizadas es la espuma formadora de película acuosa AFFF (*Aqueous Film Forming Foam*) que contiene hidrocarburos fluorados de cadena larga con propiedades tensioactivas, a la que se añade diversos aditivos

y detergentes sintéticos para mejorar su eficacia. Este tipo de espumas se denominan físicas o mecánicas.

Otro tipo de espuma, la llamada espuma química, que se encuentra actualmente en desuso, se forma mezclando una solución ácida (ácido sulfúrico o sulfato de aluminio) con otra alcalina (hidrogenocarbonato de sodio) en el interior de un recipiente y en presencia de un agente espumante. La reacción entre ambas soluciones genera dióxido de carbono, que proporciona la presión necesaria para la salida de una espesa espuma, corrosiva y conductora de la corriente:



4.5 Otros agentes extintores

Para fuegos específicos, como los originados por algunos metales muy activos, no se deben utilizar los agentes generales, siendo eficaces otro tipo de sustancias. Algunas de estas se indican acompañadas de sus principales características y aplicaciones:

- Polvo de cloruro de sodio: adecuado para incendios en los que están involucrados metales como el magnesio, el sodio, el potasio y las aleaciones de sodio y de potasio. Se le añade como aditivo un material termoplástico para aglutinar las partículas de cloruro de sodio en una masa sólida bajo las condiciones de incendio.
- Polvo de carbonato de sodio: indicado para combatir los incendios de sodio metálico. Tiene una base de carbonato sódico con varios aditivos que se incorporan para hacerlo higroscópico y fácilmente fluido para su empleo en extintores de precisión. También se le incorpora un aditivo que se ablanda y forma una costra por encima de la superficie expuesta de sodio metálico incendiado.
- Polvo de grafito: actúa como termoconductor y absorbe el calor del fuego reduciendo la temperatura del metal por debajo de su punto de ignición, lo que produce la extinción. El grafito muy compactado también actúa por sofocación. Es efectivo contra fuegos de magnesio, sodio, potasio, titanio, litio, calcio, zirconio, hafnio, ttorio, uranio y plutonio y también se recomienda para aplicaciones especiales sobre fuegos de aluminio, zinc y hierro pulverizados.
- Polvo de cloruro eutéctico ternario (TEC): es una mezcla de cloruro de potasio, cloruro sódico y cloruro bórico que es eficaz en la extinción de fuegos de ciertos metales combustibles. El polvo tiene que recubrir el metal impidiendo su contacto con el aire. En los fuegos de polvo de magnesio su acción consiste en la exclusión del aire por la formación de sales fundidas que recubren la superficie del metal. Con este polvo se han logrado extinguir pequeños fuegos de uranio y plutonio.
- Polvo de cobre: consigue apagar los fuegos de litio con mayor rapidez y eficacia que otros agentes existentes. En el proceso de la extinción se origina una aleación no reactiva de cobre y litio que se forma en la superficie del litio fundido. La aleación se convierte en una barrera de exclusión entre el aire y el metal fundido, lo que impide la reignición y favorece el enfriamiento del litio que queda sin reaccionar.
- Nitrógeno: presenta propiedades extintoras semejantes al dióxido de carbono, pudiendo reemplazarlo en incendios de metales como el magnesio. Aunque químicamente es inactivo, a elevadas temperaturas puede reaccionar formando nitruros metálicos, que generalmente son incombustibles.

4.6 Halones o derivados halogenados

Los halones (del inglés *halogenated hydrocarbon*) son gases o líquidos que resultan de sustituir en un hidrocarburo, uno o varios átomos de hidrógeno por átomos de halógenos. Se evaporan muy rápidamente, comportándose frente al fuego de forma semejante a los polvos químicos secos, apagan el fuego por inhibición de la reacción en cadena. Han sido empleados eficazmente para apagar fuegos de sólidos, líquidos y gases. No son conductores de la corriente eléctrica ni dejan residuo alguno, pero al ser ligeramente tóxicos (por encima del 5% V) deben ventilarse los locales después de su uso. Generalmente se identifican con un número de tres o cuatro cifras para distinguirlos entre sí. La primera cifra significa el número de átomos de carbono, la segunda, el número de átomos de flúor, la tercera, los átomos de cloro, y la cuarta, los átomos de bromo en la molécula. Entre los más eficaces se encuentran el 1301 (bromotrifluorometano), el 1211 (bromoclorodifluorometano) y el 2402 (dibromotetrafluorometano).

La exposición a estas sustancias por corto tiempo durante la evacuación de un edificio incendiado no es nociva para las personas. Sin embargo, en la zona alta de la atmósfera, aproximadamente entre los 20-50km (estratosfera), destruyen más ozono que los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs). Debido a este deterioro de la capa de ozono, se impusieron una serie de medidas restrictivas respecto a su producción y utilización, en cumplimiento con el Protocolo de Montreal^[13] (Plan para reducir, eliminar el consumo y producción de sustancias agotadoras del ozono), vigente desde 1989 y ratificado por 29 naciones más la Unión Europea. Actualmente, de manera general, los halones han sido retirados como agentes químicos de extinción en la mayoría de los países, si bien en el año 2003 la Comisión de las Comunidades Europeas^[14] autoriza el uso del halón 1301 y del halón 1211, en determinados usos críticos, como la inertización de los depósitos de combustible de aviones, industria petroquímica y usos militares principalmente.

Los fabricantes de gases halogenados,^[15] investigan y desarrollan nuevos productos alternativos que no presenten problemas medioambientales, con un potencial destructor de ozono (ODP) nulo. Entre ellos se encuentran los agentes hidrocarburos halogenados; HCFC-124 (clorotetrafluorometano: CHClCF_2), HFC-23 (trifluorometano: CHF_3), HCFC-22 (clorodifluorometano) y los gases inertes; IG-01 (Ar 100%), IG-100 (N_2 100%), IG-55 (N_2 50%, Ar 50%).

5. Normas de seguridad

Todas las experiencias que se muestran han sido realizadas por estudiantes de diferentes niveles, ya sea en el aula, en el laboratorio o en ferias de divulgación científica, siempre bajo la supervisión directa del profesor. Así mismo, se han mostrado en jornadas de intercambio de experiencias didácticas para profesores. En ningún caso se ha producido incidente alguno, siguiendo unas normas básicas de seguridad, como utilizar pequeñas cantidades de reactivos junto a guantes, pinzas y gafas de seguridad. Es recomendable, como medida de precaución, tener siempre a mano un pequeño extintor.

6. Conclusión

La química es una ciencia con numerosas e interesantes aplicaciones que son de gran utilidad en la seguridad de nuestra vida cotidiana, por ello, no es difícil cumplir los principales

objetivos didácticos propuestos en este trabajo: -mostrar la química como una ciencia eminentemente útil y aplicada -aumentar el interés del estudiante hacia la química -generar vocaciones científicas. Todas las experiencias que aparecen resumidas son susceptibles de ser aprovechadas tanto en el bachillerato como en el segundo ciclo de la ESO, sin más que ajustar los contenidos desarrollados a cada nivel.

En el aspecto divulgativo, la difusión de las actividades sobre prevención y extinción de incendios, llevada a cabo en ferias científicas - Feria Madrid es Ciencia y Ciencia en Acción - muestra el gran interés que tiene la ciencia aplicada en los ciudadanos de todo nivel y condición.

7. Agradecimientos

A los estudiantes y profesores del IES Las Lagunas que han participado en la realización y en la divulgación de las actividades.

A la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid, por la organización de la IX Feria Madrid es Ciencia, y por las actividades de formación dirigidas al profesorado que forma parte del equipo de intervención dentro del Plan de Autoprotección de centros de enseñanza.

Bibliografía

- [1] Dirección de Política Tecnológica. (BOE 232 de 27/9/2001), Ref. 2001/18.172, 35.978.
- [2] P. Atkins en *Las Moléculas de Atkins*. Ed. Akal Ciencia. **2007**, 48-49.
- [3] L. Ford. *Chemical Magic*. 2ª Ed. Dover Publications. New York. **1993**, 48.
- [4] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (BOE 24 de 28/1/2006), Ref. 2006/01362, 3.615-3.621.
- [5] M. Martínez en *Manual de Química para Bomberos*. Escuela de Protección Civil y Bomberos del Ayto de Madrid. **2008**, 63-65.
- [6] P. Tipler, G. Mosca en *Física para la Ciencia y Tecnología. Vol.1 C-Termodinámica*. Ed.Reverté. Barcelona. **2005**, 521-523.
- [7] Royal Society of Chemistry. *Experimentos de Química Clásica*. Ed.Sintesis. Madrid. **2002**, 151-152.
- [8] D. Drysdale en *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*. OIT. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. 3ªed. **2001**, 41.2-41.8.
- [9] V. Pons en *Dinámica del Fuego*. Ed. Bullens. Valencia. **2003**, 55-58.
- [10] E. Gutierrez en *Química Inorgánica*. Ed. Reverté. Barcelona. **1978**, 516.
- [11] Dirección General de Tecnología y Seguridad Industrial. (BOE 234 de 27/9/1996), Ref. 1996/21503, 3.8901.
- [12] C. Hernando en *Manual de Formación de Fuego*. Escuela Bomberos del Ayto de Madrid. **2008**, 99-102.
- [13] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. **2000**. Art. 2B.
- [14] Diario Oficial de la Unión Europea. EU bookshop H. nº L065 de 08/03/2003, 0029-0030 .
- [15] R. Tapscott. *Halon Fire Extinguishing substitutes*. Fire and Safety World. **2001**, 6-11.