

Índice de contenidos

PRÓLOGO

1. CONCEPTOS BÁSICOS DEL FUEGO
 - 1.1. DEFINICIONES BÁSICAS Y PROPIEDADES
 - 1.2. REACCIONES QUÍMICAS: ENDOTÉRMICAS, EXOTÉRMICAS, OXIDACIÓN
 - 1.2.1. REACCIONES ENDOTÉRMICAS Y EXOTÉRMICAS
 - 1.2.2. REACCIONES DE OXIDACIÓN
2. PROCESOS QUÍMICOS DE LA COMBUSTIÓN
 - 2.1. COMBUSTIÓN
 - 2.1.1. CONDICIONES
 - 2.1.2. VELOCIDAD
 - 2.2. PIRÓLISIS
3. PROCESOS FÍSICOS DE LA COMBUSTIÓN
 - 3.1. COMPORTAMIENTO DE LA MATERIA SEGÚN SU ESTADO FÍSICO
 - 3.1.1. ESTADO GASEOSO
 - 3.1.2. ESTADO LÍQUIDO
 - 3.1.3. ESTADO SÓLIDO
 - 3.2. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS
 - 3.2.1. EL PROCESO DE FUSIÓN
 - 3.2.2. EL PROCESO DE EVAPORACIÓN
 - 3.2.3. EL PROCESO DE SUBLIMACIÓN
 - 3.2.4. DESPRENDIMIENTO DE ENERGÍA EN UN INCENDIO
 - 3.3. TRANSMISIÓN DE CALOR
 - 3.3.1. CONDUCCIÓN:

3.3.2. CONVECCIÓN:

3.3.3. RADIACIÓN:

4. PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

4.1. GASES DE LA COMBUSTIÓN

4.1.1. TOXICIDAD

4.1.2. AGENTES PASIVOS

4.2. LLAMAS

4.2.1. LLAMAS DE DIFUSIÓN

4.2.1.1. LLAMAS DE DIFUSIÓN LAMINARES

4.2.1.2. LLAMAS DE DIFUSIÓN TURBULENTAS

4.2.2. LLAMAS PREMEZCLADAS

4.3. ENERGÍA

5. INFLAMABILIDAD DE LOS GASES DE INCENDIO

5.1. TEMPERATURAS DE IGNICIÓN Y AUTO-IGNICIÓN

5.2. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

5.2.1. LÍMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD

5.2.2. LÍMITE SUPERIOR DE INFLAMABILIDAD

5.3. RANGO DE INFLAMABILIDAD

5.3.1. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD PARA MEZCLAS DE GASES

5.3.2. ENERGÍA DE IGNICIÓN

5.3.3. VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN Y VELOCIDAD DE LA LLAMA

5.4. FACTORES DE INFLUENCIA SOBRE LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

5.4.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

5.4.2. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN

DE OXÍGENO EN LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

5.5. INFLUENCIA DE LAS FUENTES DE IGNICIÓN

5.5.1. FUENTES DE IGNICIÓN ABIERTAS

5.5.2. FUENTES DE IGNICIÓN OCULTAS

5.5.3. FUENTES DE IGNICIÓN INTERMITENTES

6. EXTINCIÓN DE INCENDIOS

6.1. MECANISMOS DE EXTINCIÓN

6.1.1. ENFRIAMIENTO

6.1.2. SOFOCACIÓN

6.1.3. ELIMINACIÓN DEL COMBUSTIBLE

6.1.4. INHIBICIÓN QUÍMICA

6.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMBUSTIBLES

6.2.1. FUEGOS TIPO A:

6.2.2. FUEGOS TIPO B:

6.2.3. FUEGOS TIPO C:

6.2.4. FUEGOS TIPO D:

6.2.5. FUEGOS TIPO F:

6.3. AGENTES EXTINTORES

6.3.1. AGUA:

6.3.2. ESPUMA

6.3.3. POLVO SECO

6.3.4. DIÓXIDO DE CARBONO

6.3.5. NITRÓGENO Y OTROS GASES INERTES

6.3.6. HALÓN Y SUSTITUTIVOS DE LOS HALONES

6.3.7. OTROS AGENTES GASEOSOS

7. BIBLIOGRAFÍA

1. CONCEPTOS BÁSICOS DEL FUEGO

El fuego es un proceso de combustión que se caracteriza por la emisión de calor y que además viene acompañado por la aparición de humo, llamas y/o brasas. Este proceso químico, también implica una serie de efectos físicos como son la emisión de luz, y los cambios en el estado de agregación de las materias involucradas en el proceso.

Antes de entrar a analizar en profundidad la naturaleza del fuego, vamos a establecer una serie de definiciones que nos van a resultar útiles a lo largo de nuestra exposición.

1.1. DEFINICIONES BÁSICAS Y PROPIEDADES

Una de las formas más extendidas de definir un proceso de incendio es hacerlo bajo el enfoque que el fuego es un proceso de combustión, caracterizado por el desprendimiento de calor, acompañado de humo, llamas o luz. Sin embargo, este proceso químico también está asociado a ciertos aspectos físicos como pueden ser los cambios del estado de agregación y los procesos de cinética molecular previos a la aparición del proceso químico propiamente dicho.

El proceso de combustión que tiene lugar en un incendio es el resultado de un complejo proceso químico entre sustancias, denominadas combustibles, y el oxígeno del aire. El proceso que tiene lugar es capaz de mantenerse por sí mismo, gracias al desprendimiento de calor, y en la mayoría de los casos luz o llamas. La energía liberada por la combustión normalmente genera el calor suficiente para que el resto del material combustible o incluso otros combustibles que se encuentren a la distancia adecuada alcancen su temperatura de ignición. Cuando se alcanza esta condición, el proceso entra en una fase que se puede denominar como reacción en cadena.

La definición que la norma ISO hace de la combustión es: "Reacción exotérmica de una sustancia con un agente oxidante (exotérmico significa que desprende energía)".

Otra posible definición puede ser: "Reacción de un material al combinarse con el oxígeno u otro oxidante con desprendimiento de calor, a menudo con presencia de llama".

Se necesitan tres condiciones básicas para que tenga lugar un proceso de combustión:

- Suficiente material combustible.
- Suficiente oxígeno disponible.
- Temperatura suficientemente alta.

Finalmente, en un proceso de incendio, las moléculas que componen el material combustible deben adquirir una velocidad suficientemente alta para que los choques producidos entre ellas sean lo suficientemente violentos como para poder romperse y de esta manera dar lugar a átomos y/o radicales libres (los radicales libres son partes o "fragmentos" de moléculas cargadas eléctricamente lo que los hace susceptibles de reaccionar). Este es un requisito previo para que una reacción química como es el fuego pueda producirse.

En el apartado anterior, hemos comenzado utilizando un lenguaje donde aparecen una serie de términos que proceden directamente del campo de la química o de la física, a continuación vamos

a establecer una serie de conceptos/definiciones con el fin de poder abordar de manera adecuada el resto del documento.

- **Átomos:** Son las partículas más elementales en la composición química de los materiales. Las sustancias que se componen de un solo tipo de átomos se denominan elementos. Los átomos se componen de un núcleo central compacto, alrededor del cual se mueven los electrones (unidades de materia cargadas negativamente) en orbitales. Los núcleos se componen de protones (unidades de materia cargadas positivamente) y neutrones (los cuales poseen masa pero no carga).
- **Moléculas:** Se denominan así a las agrupaciones de átomos combinados en proporciones fijas. Las sustancias compuestas por moléculas que contienen dos o más tipos de átomos diferentes se denominan compuestos.
- **Formula química:** La fórmula química indica el número de átomos de los diferentes elementos que componen la molécula. Por ejemplo la fórmula del propano es C_3H_8 , donde C indica los átomos de carbono y H los de hidrógeno.
- **Peso molecular:** Indica el peso de una molécula expresado en gramos.
- **Densidad relativa:** Es la relación entre el peso de una sustancia sólida o líquida y el peso de un volumen igual de agua. El valor de la densidad del agua se establece como la unidad.
- **Densidad relativa de un gas:** Es la relación entre el peso de un gas y el peso de un volumen de igual de aire seco a la misma temperatura y presión. También se puede expresar como la relación entre el peso molecular del gas dividido por 29, siendo este valor el del peso molecular de la composición del aire.
- **Presión de vapor:** Es una medida del grado de volatilidad de las sustancias. La presión de vapor es la presión de equilibrio de un líquido o un sólido a una temperatura dada. Se mide en Pascales (Pa), y la unidad usual es el kilo-Pascal (kPa). Las tablas de valores de la presión de vapor, se miden normalmente a una temperatura de +20°C.
- **Temperatura de ebullición:** Es la temperatura (°C) a la que una sustancia se transforma del estado líquido a estado gaseoso. En el punto de ebullición, la presión de vapor de la sustancia y la presión ambiente son iguales (normalmente es igual a la presión atmosférica es 101,3 kPa).
- **Pirolisis:** Consiste en el proceso de descomposición química o cualquier otra conversión química donde materiales compuestos se transforman en simples por efecto del calor. La palabra deriva del Griego "piro" = fuego y "lisis" = romper.

1.2. REACCIONES QUÍMICAS: ENDOTÉRMICAS, EXOTÉRMICAS, OXIDACIÓN

Se entiende por reacción química cuando dos materias interactúan entre sí dando como resultado productos con propiedades diferentes a los que originalmente formaron parte del proceso, pudiendo o no generar o absorber energía durante la duración del proceso.

Dentro de las reacciones químicas existen varios tipos, y en concreto las que nos interesan desde el punto de vista del desarrollo de incendios son las reacciones químicas de carácter endotérmico, las de carácter exotérmico y las de oxidación.

1.2.1. REACCIONES ENDOTÉRMICAS Y EXOTÉRMICAS

- El calor de reacción, es la cantidad de energía absorbida o liberada cuando una reacción química tiene lugar. En las reacciones endotérmicas, las nuevas sustancias generadas contienen más energía que las materias reaccionantes, de manera que en estos casos se precisa una absorción de energía para que esta se produzca. En las reacciones exotérmicas, se generan nuevas sustancias las cuales contienen menos energía que las materias reaccionantes, de manera que en este tipo de reacciones se desprende energía. En general, la energía puede adoptar diferentes formas, pero en los procesos químicos lo habitual es que se manifieste en forma de absorción o desprendimiento de calor.

1.2.2. REACCIONES DE OXIDACIÓN

- En los procesos de incendio, las reacciones que tienen lugar son reacciones de oxidación exotérmicas. Este tipo de reacciones son complejas y no se conocen en su totalidad, sin embargo podemos hacer algunas consideraciones de carácter general.
- Para que una reacción de oxidación tenga lugar, deben estar presentes un material combustible (combustible) y un agente oxidante. Los combustibles forman parte de un gran número de materiales los cuales, debido a sus propiedades químicas, pueden ser oxidados para generar especies estables, tales como dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O).

2. PROCESOS QUÍMICOS DE LA COMBUSTIÓN

2.1. COMBUSTIÓN

La combustión, se define como una reacción química exotérmica de oxidación auto-mantenida en la cual intervienen materiales combustibles y generalmente el oxígeno del aire, que es quién actúa como agente oxidante. Como resultado del proceso químico, se obtiene un desprendimiento de energía en forma de calor y en la mayoría de los casos de luz. La combustión generalmente desprende el suficiente calor como para que los materiales combustibles adyacentes alcancen su temperatura de ignición.

2.1.1. CONDICIONES

Tal como especificábamos al principio, para que un proceso de combustión tenga lugar, es preciso que se den tres condiciones básicas:

- Suficiente material combustible.** Lógicamente debe disponerse de algún material susceptible de arder, es decir, de comenzar una reacción con el oxígeno del aire. Sin embargo esta es condición necesaria pero no suficiente, debemos tener en cuenta que toda sustancia combustible sólida o líquida debe transformarse en gas (y los gases de las sustancias combustibles lo son también) para arder, en ese sentido, la cantidad de gas inflamable (que puede estar en el proceso si el combustible ya es un gas y en caso contrario deberá generarlo como consecuencia de un proceso de pirólisis) debe estar en la cantidad suficiente (concentración) para que se produzca la ignición.

- **Suficiente oxígeno disponible.** Los factores del entorno donde se desarrolla un incendio pueden con el tiempo, reducir la cantidad de oxígeno disponible, especialmente si este es consumido por el incendio. El oxígeno es un componente básico del aire (21%). Además del oxígeno, el aire está compuesto por: Nitrógeno (79%), así como de trazas de dióxido de carbono y otros gases nobles. A la mínima concentración de oxígeno necesaria (en una mezcla de oxígeno y nitrógeno), para mantener una combustión con llama bajo determinadas condiciones de ensayo, se le denomina índice de oxígeno y se expresa en porcentaje de O₂. Algunas sustancias contienen oxígeno en su estructura, por lo que no necesitan oxígeno de la atmósfera (por ejemplo, los explosivos).
- **Temperatura suficientemente alta.** Para alcanzar el nivel de energía necesario, en la mayoría de los casos se requiere una fuente de ignición externa. Existen diferentes tipos de fuentes de ignición que pueden iniciar un incendio, por ejemplo una chispa o una llama. La temperatura que se requiere para la ignición de un combustible se denomina temperatura crítica (no confundir esta temperatura con la temperatura crítica de un gas). Normalmente la temperatura en la superficie de una sustancia sólida combustible debe ser del orden de 300-400°C para que se produzca su ignición cuando se le aproxima una llama.

2.1.2. VELOCIDAD

Basados en la velocidad a la que puede tener lugar la combustión podemos clasificarlas en tres tipos diferentes: combustión sin llama, combustión con llama y combustiones rápidas (explosiones)

- **Combustión sin llama:** También recibe el nombre de "combustión latente" sólo se da en materiales combustibles sólidos, el proceso es relativamente lento en comparación con la combustión con llama. Tiene lugar en la superficie o en el interior de materiales combustibles porosos cuando estos no se encuentran en el mismo estado de agregación que el agente oxidante, por ejemplo cuando el combustible es un sólido y el agente oxidante un gas. Mientras exista acceso de oxígeno al proceso la oxidación continuará. El calor puede permanecer en el interior de un material poroso y mantener el proceso de pirólisis hasta el momento en que posiblemente se produzca una auto-ignición.

La capa de carbón sobre el residuo de un material carbonizado es un material poroso, el cual normalmente arde sin llama. Por lo general una combustión sin llama genera grandes cantidades de productos de pirólisis los cuales no se oxidan todos a la vez.

La combustión sin llama es frecuente en muebles tapizados. El fuego puede comenzar con el algodón o la trama de viscosa comenzando a arder de forma latente en la capa de relleno de poliuretano durante la etapa inicial de la fase de ignición. En estas condiciones de falta de oxígeno, no se obtiene llama (luz), pero los gases combustibles pueden trasladarse a otros lugares posteriormente incendiarse. Se producirá un humo tóxico, blanco y amarillo. En este tipo de incendios se observa como el material de poliuretano se va ennegreciendo debido al proceso de carbonización, generándose alquitrán y otras sustancias ricas en carbono.

En ocasiones, los incendios latentes pueden tener lugar en el interior de estructuras (entramados de madera dentro de las paredes de un edificio, silos y apilamientos de material orgánico), lo que hace que sean muy difíciles de detectar y en la mayoría de los casos es difícil detectar un aumento en la temperatura. Si a este proceso se le aporta oxígeno, se pueden desarrollar llamas.

- **Combustión con llama:** Este es el tipo de combustión que estamos acostumbrados a ver –incendios con presencia de llamas-. Como mencionamos anteriormente, solo la fase gaseosa arde en este tipo de combustiones.

A diferencia que en el caso anterior, este tipo de combustión se puede dar en combustibles líquidos, sólidos o gaseosos.

Combustiones con llama en gases: las moléculas de los gases tienen la facultad de moverse libremente. Si hacemos que la temperatura aumente, estas se moverán aún con mayor velocidad, lo cual se traducirá en un aumento del volumen/presión del gas. Desde el punto de vista de un incendio, esto se traduce en que las moléculas que componen el combustible colisionan violentamente provocando su ruptura. Para que un incendio se inicie y se mantenga es necesario disponer de determinadas concentraciones de oxígeno y de gases combustibles, si estas proporciones no se alcanzan, la combustión simplemente no se producirá.

Combustiones con llama en líquidos: Como resulta evidente, por lo expuesto anteriormente, los líquidos no arden por sí mismos, son los gases generados sobre la superficie del líquido los que lo hacen, la cantidad de gases emitidos dependerá directamente de su presión de vapor. La temperatura en este caso debe ser lo suficientemente alta para que se produzca la suficiente cantidad de gas como para que se produzca la inflamación. A esta temperatura, que es específica para cada líquido, se le denomina temperatura de ignición.

Combustiones con llama en sólidos: al igual que los líquidos, los sólidos no arden por sí mismos. Deben ser como en el caso anterior convertidos en gases para que ardan. Normalmente la temperatura en la superficie de una sustancia sólida combustible debe ser del orden de 300-400°C para que se produzca su ignición en presencia de una llama piloto. Si no existe una llama cerca de la superficie la temperatura debe alcanzar valores comprendidos entre los 500 y 600°C (caso de la madera).

- **Combustiones rápidas (explosiones):** Este tipo de reacciones son más rápidas que las combustiones con llama y van acompañadas de otros efectos peligrosos, como es la liberación de presión. Normalmente pensamos que solo los explosivos son capaces de reaccionar de esta manera, pero existen muchas otras sustancias que en algunas condiciones pueden explotar – por ejemplo, los gases inflamables–.

Cuando una masa gaseosa se inflama, la llama puede propagarse de dos modos diferentes a través de esta masa, estos modos se denominan: deflagraciones y detonaciones.

La **deflagración** es una reacción cuya **velocidad de reacción va desde 1 m/s a la velocidad del sonido**, en los casos en que la temperatura de la masa gaseosa sea superior a los 20°C, **la velocidad de propagación de la llama puede alcanzar los 1000 m/s**.

Las **detonaciones** tienen lugar cuando la **velocidad de la reacción de combustión es superior a la del sonido** (tomando como referencia la velocidad del sonido en la masa gaseosa no quemada situada en la parte frontal de la onda). En estos casos la velocidad de propagación de la llama alcanza velocidades del orden de **1500 a 2000 m/s**.

2.2. PIRÓLISIS

Cuando se calienta un material sólido, este comienza a emitir gases, a este proceso se le denomina pirólisis. Por lo general la pirólisis comienza a temperaturas comprendidas entre los **100 a 250°C**. Los gases procedentes de la pirólisis son los que comienzan a arden cuando se mezclan con el oxígeno del aire. **El proceso de pirólisis implica una descomposición o transformación química de sustancias complejas a constituyentes simples**. Algunos de los gases que se acumulan sobre la superficie del combustible no arderán en la llama, estos gases no quemados se incorporarán al cojín de gases de incendio. El contenido y estructura (pintura, madera, plásticos, productos textiles, etc.) incluidos en un recinto, producirán gases inflamables debidos a la pirolisis, los cuales aumentaran su concentración en la medida en que la temperatura aumente.

3. PROCESOS FÍSICOS DE LA COMBUSTIÓN

Hemos analizado los aspectos químicos fundamentales que intervienen en el proceso de la combustión. Sin embargo, tanto el estado de agregación de los materiales combustibles como otros factores tales como la energía característica que cada uno de ellos precisa para iniciar el proceso de combustión como la cantidad de calor liberada por los mismos, establecen unas reglas físicas que debemos conocer.

3.1. COMPORTAMIENTO DE LA MATERIA SEGÚN SU ESTADO FÍSICO

3.1.1. ESTADO GASEOSO

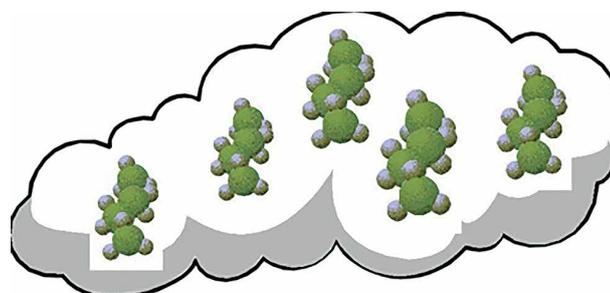
Resulta complicado intentar explicar cómo se comporta la materia en estado gaseoso, fundamentalmente porque en este estado la materia, en la mayoría de los casos, no es perceptible a simple vista, y por tanto si ya de por sí resulta complicado imaginarse unas partículas que hemos convenido en denominar como átomos o moléculas las cuales aunque no vemos convenimos en que son los componentes de los materiales, tanto más difícil resulta entender cuando la propia materia ni tan siquiera se puede ver.

Para resolver este aparente "dogma de fe", podemos hacer un ejercicio de aproximación a la realidad que nos resultará bastante efectivo y que nos dará una idea más clara de cómo se comportan los gases. Para ello vamos a considerar que se comportan como si fuesen líquidos, y de hecho así es, al fin y al cabo en ambos casos se trata de fluidos y en base a ello les podemos aplicar las mismas reglas.

Nuestro ejercicio va a consistir en analizar lo que ocurre con dos fluidos líquidos muy comunes y conocidos por todos: el agua y el aceite. Algo que podemos observar y entender perfectamente es el hecho que el aceite flota sobre el agua, ya que se trata de líquidos con diferentes densidades y en ese sentido los puedo agitar cuanto quiera ya que cuando este efecto mecánico desaparezca cada líquido tenderá a ocupar su espacio determinado por su densidad: los más pesados se depositarán en el fondo ocupando progresivamente todo el espacio disponible, mientras que los más ligeros ocuparán la parte superior de igual forma.

Si aplicamos este mismo concepto a gases que tengan diferentes densidades y extrapolamos su comportamiento al de los líquidos unos deben flotar sobre los otros (como es el caso del aire sobre el butano, ya que éste lo buscamos a ras del suelo cuando existe una fuga) o bien unos son capaces de disolverse o mezclarse en seno de otros (como puede ser el caso del propio aire donde coexisten el nitrógeno y el oxígeno fundamentalmente).

Hecha esta pequeña pero necesaria comparación, la primera idea que nos puede surgir a la hora de analizar el comportamiento de los gases, es que si estos tienden a ocupar todo el espacio disponible (puede observarse la vaporización del agua, o el efecto de un extintor de CO₂) puede ser debido a que las partículas que los componen no están unidas entre sí con demasiada fuerza (o energía), y por lo tanto estas partículas tienden a dispersarse en el entorno donde se les deja



CARACTERÍSTICAS

- Enlaces entre partículas débiles (de poca energía)
- Gran capacidad de movilidad y difusión
- Tendencia a ocupar todo el espacio disponible

y que precisamente es por esta razón que la movilidad de las partículas que los componen así como su capacidad de difusión son en general grandes.

La forma en que la aplicación de una fuente de calor (energía) puede afectar a la materia que se encuentra en este estado seguiría el siguiente proceso:

Si admitimos que la energía que mantiene unidas las moléculas de un gas no es excesivamente grande, resulta lógico suponer que con una fuente de energía relativamente baja podamos vencer la fuerza que mantiene unidas estas moléculas entre sí, y de hecho en lo que a los gases inflamables se refiere así es. Debemos pensar que al encontrarse la materia en estado gaseoso, no precisamos de un aporte "extra" de energía para alcanzar esta fase.

Si consideramos el proceso definido para el desarrollo de un incendio, tras el aporte inicial de energía al compuesto original, obtendremos unos productos secundarios que denominamos "productos activados" que en el caso de los gases serán moléculas de gas activadas, estas son altamente energéticas o visto desde otro punto de vista reactivas, y como sabemos, estas tenderán a alcanzar un estado de equilibrio, lo cual van a conseguir uniéndose o combinándose con el oxígeno del aire y generando como resultado una gran cantidad de energía, debido a que los productos generados van a ser mucho más estables que los originales (por lo general dióxido de carbono y agua).

Si tomamos como ejemplo la combustión del metano (CH_4), el esquema del proceso que tiene lugar sería el siguiente:



Donde ΔE representa la energía liberada por la reacción.

Para hacernos una idea de los valores de los que estamos hablando, diremos que la energía necesaria para activar un gramo (aproximadamente 1,4 litros en condiciones normales) de metano es de unas 750 calorías mientras que la energía liberada por la misma cantidad en el proceso de combustión, ΔE , es de 11.875 calorías.

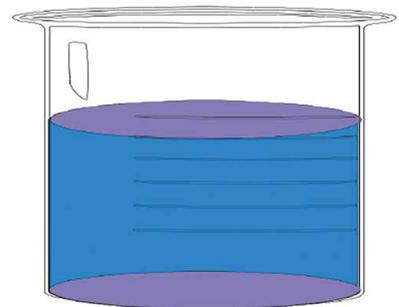
Finalmente, debemos decir también que en estado gaseoso la velocidad a la que transcurre el proceso es muy alta con lo cual el desprendimiento de energía puede llegar a aparecer en forma de onda de choque.

3.1.2. ESTADO LÍQUIDO

El estado líquido de la materia es más asequible a nuestro entendimiento, ya que desde el punto de vista del trabajo de campo podemos verlo y apreciar sus cambios.

La primera apreciación que nos podemos plantear acerca de la materia en este estado, es que, a diferencia que en el estado gaseoso, las partículas se encuentran unidas entre sí con mayor energía, ya que la materia en este estado presenta una movilidad menor y su capacidad de difundirse queda limitada a su tensión superficial, lo cual se observa fácilmente ya que los líquidos tienden a permanecer con la forma del contenedor donde se les aloja.

En consecuencia, la energía que necesitaremos para activar un combustible líquido será mayor que en el caso de los gases, ya que



CARACTERÍSTICAS

- Enlaces entre partículas más fuertes
- Menor capacidad de movilidad y difusión limitada a su tensión superficial
- Tendencia a adquirir la forma del recipiente

deberemos conseguir como paso previo convertir al menos una cantidad mínima del material en estado gaseoso rompiendo así su cohesión molecular, lo cual supone un aporte extra de energía para provocar el cambio de estado.

La energía que deberemos aplicar será como mínimo la suficiente como para conseguir transformar el mínimo número de moléculas gaseosas activadas del producto para que pueda tener lugar el proceso de combinación con el oxígeno.

A partir de este momento el proceso se desarrollará igual que si de un gas se tratase, aunque las reacciones son menos energéticas que con los gases.

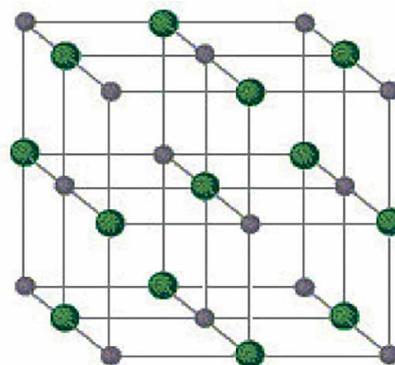
3.1.3. ESTADO SÓLIDO

Desde un punto de vista energético, se precisa aportar una cantidad de energía mayor que en los casos anteriores para conseguir la activación del producto sólido y romper así su cohesión molecular.

La energía aplicada debe ser la suficiente como para hacer que las partículas abandonen las posiciones que ocupan en la estructura del material y pasen a la fase gaseosa.

Una vez en fase gaseosa, deberá existir una concentración mínima necesaria para que comience la reacción. A partir de este momento el proceso de desarrollará igual que si se tratase de un gas.

La cantidad de energía necesaria en este estado, es mayor que en los casos de los líquidos y de los gases. Normalmente las reacciones son menos energéticas que con líquidos o gases, debido básicamente al carácter de los productos obtenidos como consecuencia de la transformación en gases, ya que estos por lo general no suelen ser altamente energéticos, salvo en los casos de productos sólidos sintéticos.



CARACTERÍSTICAS

- Enlaces entre partículas muy fuertes
- Capacidad de movilidad de partículas prácticamente nula.
- Tienen forma propia y definida

3.2. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS

Para que el proceso de la combustión tenga lugar, los componentes que lo hacen posible (combustible y comburente) deben encontrarse en el mismo estado de agregación (gaseoso). En algunos casos la sustancia sólida debe ser calentada primero para transformarla en líquido y posteriormente seguir calentando para que pase a fase gaseosa. Sin embargo, dependiendo del estado inicial del material combustible el aporte energético necesario variará considerablemente. Vamos a analizar estos casos.

3.2.1. EL PROCESO DE FUSIÓN

Cuando aportamos calor a un sólido, éste primero se expande (manteniendo su estado sólido) debido al incremento de la movilidad de sus moléculas. En la medida en que se aporta más calor, las fuerzas de atracción intermoleculares se debilitan llegando a modificar su estructura y de este modo pasar al estado líquido. Mientras se produce la fusión, la temperatura permanece constante (punto de fusión) hasta que

todo el sólido se funde. La temperatura no variará, independientemente del calor añadido, porque toda la energía que se aporta es utilizada para romper la estructura molecular.

3.2.2. EL PROCESO DE EVAPORACIÓN

En la superficie de un líquido, las moléculas tienden a abandonar el mismo en forma de gas o vapor. Esta tendencia aumenta con el incremento de la temperatura. Este proceso es lo que conocemos como evaporación de un líquido. En la medida en que se aporta calor a un líquido, se observa un incremento de su temperatura hasta que se alcanza un cierto valor (temperatura de ebullición). Si se aporta más calor, la temperatura del líquido se mantendrá en este valor hasta que todo el líquido se haya evaporado. Esto ocurre porque toda la energía aportada es utilizada para evaporar el líquido.

3.2.3. EL PROCESO DE SUBLIMACIÓN

La transformación de una sustancia sólida (rompiendo la estructura molecular del combustible) directamente a gas y la evaporación procedente de la superficie del sólido recibe el nombre de sublimación. Es por tanto, una transformación directa de sólido a gas sin existir una fase líquida previa.

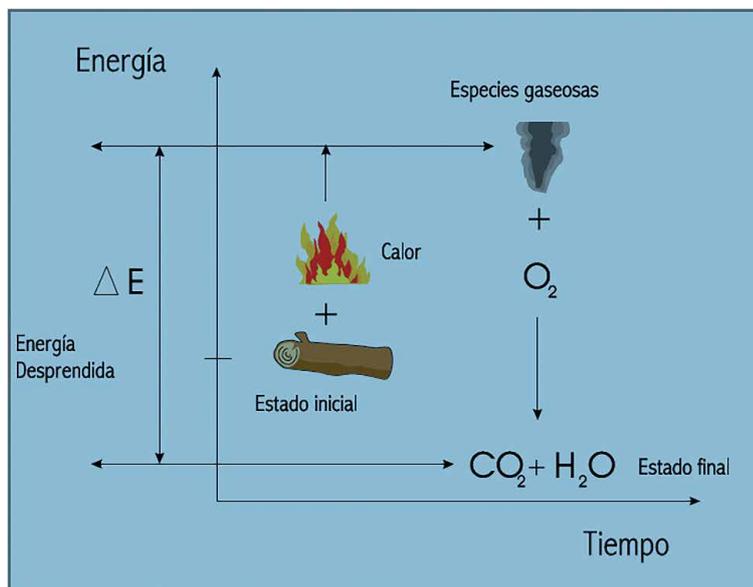
3.2.4. DESPRENDIMIENTO DE ENERGÍA EN UN INCENDIO

Todos los procesos de combustión generan calor; se dice por tanto que son *exotérmicos* (de los prefijos griegos "exo" que significa fuera y "térmico" que significa calor). La cantidad de calor que se desprende depende de la cantidad de combustible que se ha consumido y del tipo de material. Esta cantidad de calor se denomina "*calor de combustión*" (poder calorífico). El calor desprendido puede transmitirse por radiación, convección, conducción o por una combinación de las anteriores. Desde el punto de vista de un balance energético, una parte del calor generado en el proceso de combustión, se emplea en descomponer el material generando así más combustible y de esta forma permitir la reacción en cadena de la que hablaremos más adelante.

"La tasa de calor" puede definirse como la cantidad de calor /energía desprendida por unidad de tiempo, normalmente medida en J/s "julios/segundo" o en W "Watios". Esta tasa depende de diferentes factores, por ejemplo el tipo de material disponible, la distribución/dispersión del material, su superficie, el aporte de aire/oxígeno y otros factores del entorno. Ambos, el calor total liberado en la combustión y la tasa de calor liberado, influyen en el desarrollo de un incendio. La tasa de calor liberado (poder calorífico) es una importante herramienta que nos proporciona la oportunidad de medir el tamaño de un incendio. La tasa de calor liberado no permanecerá constante a lo largo de un incendio, sino que variará. Al principio del incendio la tasa de calor liberado será más pequeña y se irá incrementando, alcanzado su máximo valor en un determinado periodo de tiempo.

ALGUNOS EJEMPLOS DE TASA MÁXIMA DE CALOR LIBERADO	
Una papelera ardiendo	100 kW
Un charco de gasolina de 1 m ²	2.5 MW
Palés de madera ardiendo apilados hasta una altura de 3 m	7 MW
Sofá ardiendo	1-3 MW

Un sencillo esquema donde podemos apreciar la evolución de un incendio en función de los aportes energéticos y sus consecuentes transformaciones, pueden ayudar a acabar del comprender el proceso:



Incendio y energía

3.3. TRANSMISIÓN DE CALOR

La transferencia de calor en un incendio determina las etapas de ignición, propagación del incendio incluso la extinción de los materiales combustibles en la mayoría de los casos. Normalmente se reconocen tres formas o mecanismos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación.

En un incendio se suelen dar varios de estos mecanismos de forma simultánea favoreciendo la propagación del mismo.

3.3.1. CONDUCCIÓN:

Se conoce como el mecanismo de transmisión mediante el cual el calor se transfiere por contacto directo de un cuerpo a otro. La cantidad de energía calorífica transferida por conducción a través de un cuerpo en un tiempo determinado es función de la **diferencia de temperatura y de la capacidad de conducir el calor** entre los dos cuerpos implicados.

3.3.2. CONVECCIÓN:

La transmisión de calor por convección implica la **transferencia de calor a través de un medio –puede tratarse de un medio gaseoso o líquido–**. De esta manera, el calor generado por una estufa se distribuye

a lo largo de una habitación inicialmente calentando el aire en contacto con la estufa por conducción; como consecuencia se genera una diferencia de densidades entre el aire frío y el caliente dando lugar a un movimiento de la masa de aire mediante el cual se desplaza por la toda la habitación calentado los objetos distantes del foco inicial, es decir, transfiriendo el calor por convección. En general solemos entender que el aire caliente se expande y asciende y por esta razón, el calor transferido por conducción a menudo se produce en dirección ascendente, sin embargo las corrientes de aire pueden transportar el calor por convección en cualquier dirección.

3.3.3. RADIACIÓN:

La transmisión de calor por radiación es la forma en que la energía viaja a través del espacio o a través de los materiales como ondas electromagnéticas, al igual que la luz, las ondas de radio o los rayos X. En el vacío, todas las ondas de energía radiante se desplazan a la misma velocidad, la de la luz. Al alcanzar un cuerpo, esta es absorbida, reflejada o transmitida.

La llama de una vela es un ejemplo común de radiación. El aire calentado por la llama asciende mientras que el aire frío se desplaza hacia la vela para proporcionar más oxígeno a la llama, manteniendo el proceso de la combustión. Si colocamos la mano frente a la llama, experimentaremos sensación de calor. Esta energía se denomina calor radiante o radiación.

4. PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

En los procesos de combustión, como es el caso de un incendio, las especies gaseosas procedentes de la descomposición o del cambio de estado (según el estado de agregación de los materiales combustibles) están presentes en los gases generados por el incendio, los cuales, por lo general vienen acompañados de partículas de carbón no quemado y de diferentes especies gaseosas que en definitiva vienen a componer lo que denominamos humo. Debido precisamente al carácter variable de los materiales involucrados en un proceso de combustión, los productos de la misma van a ser de diferente tipo, aunque no por ello van a dejar de seguir las mismas leyes físicas que definen el comportamiento de un gas.

4.1. GASES DE LA COMBUSTIÓN

Los productos de la combustión generados por un incendio pueden afectar a las personas y sus pertenencias, al equipamiento y en general a las operaciones de extinción. Resulta sorprendente el hecho de que pequeños incendios pueden producir la suficiente cantidad de hollín como para dañar objetos que se encuentran a mucha distancia del foco inicial, y que un aparentemente inofensivo incendio latente puede generar la suficiente concentración de monóxido de carbono como para matar a las personas que se encuentren en una habitación cercana. Otros productos de la combustión, como por ejemplo, el cloruro de hidrógeno, pueden provocar corrosión hasta el punto de provocar el fallo de componentes electrónicos esenciales. También los nuevos materiales que se van añadiendo a nuestro entorno cotidiano van aportando riesgos adicionales debido a sus productos de combustión.

La comprensión acerca de los productos generados por la combustión implica disponer de un conocimiento detallado de cada proceso químico. Pero como cabe imaginarse, esto es muy complejo, hasta el punto que tan sólo analizando de forma experimental estos gases en cada caso podremos

efectuar una predicción fiable, lejos de procesos teóricos que probablemente resulten en resultados engañosos debido a la cantidad de variables que concurren y a las circunstancias específicas que se dan en cada incendio.

Para un producto determinado, la naturaleza de los productos de combustión que pueda desprender dependerá de los siguientes factores:

- Tipo de combustión (con llama, sin llama, degradación térmica (pirólisis) o evaporación)
- Disponibilidad de aire
- Adición de agentes químicos retardantes

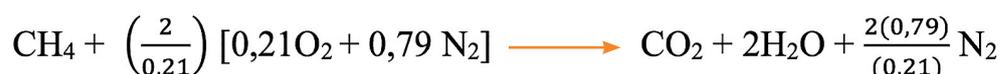
Todos estos factores afectan al tipo de oxidación que va a tener lugar, es decir, a si esta va a ser completa, incompleta o incluso si se va a detener. Los gases que más nos va a interesar conocer a efectos de su producción y/o participación en un incendio son el CO, CO₂, y O₂, así como las concentraciones de los hidrocarburos no quemados y del hollín.

Con el fin de hacernos una idea de la complejidad del proceso, vamos a analizar la combustión del metano, pero en este caso con una perspectiva más amplia.

Si recordamos la estequiometría de la combustión completa del metano (CH₄) tenemos que:



Sin embargo, en este proceso no solo intervienen los productos que hemos dispuesto en nuestra ecuación, ya que en un proceso de combustión al aire, este no sólo se compone de oxígeno, sino que también habrá presente N₂, en consecuencia nuestra ecuación quedaría de la siguiente forma:



Aquí podemos ver que la cantidad de átomos de cada especie se conservan, y que el proceso de oxidación es completo, generando CO₂ y H₂O. Sin embargo, cualquier modificación de estas condiciones (falta de aire, p.e.) en el proceso hará que los productos finales sean CO, hidrógeno (H₂), hollín (en su mayor parte C) y diferentes hidrocarburos (HCs) como resultado de procesos de recombinación en la degradación térmica y la oxidación. La aparición de estos productos aumenta en la medida en que el proceso de combustión se hace más incompleto. Resulta curioso comprobar, que mientras que la mayoría de estos productos son gases (al menos en la región de alta temperatura de reacción), uno de ellos, el hollín, es un sólido que se forma como consecuencia del proceso.

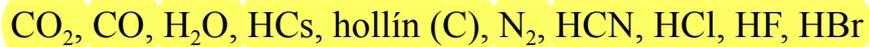
Para un proceso de incendio cualquiera (con llama, sin llama, oxidación a alta temperatura, etc.) las ecuaciones químicas para cada material son muy específicas. También llama particularmente la atención, el efecto que tiene sobre la ecuación química la adición de retardantes químicos. Inicialmente, la disponibilidad de aire puede ser un factor significativo. El criterio de "suficiente aire", se basa en el requerimiento del mismo para que la reacción de combustión sea completa. Cuando la cantidad de aire es suficiente se puede decir que el proceso está "sobre-ventilado" o que es "pobre en combustible", y cuando es insuficiente que está "infra-ventilado" o que es "rico en combustible". Cuando la mezcla de combustible y aire (u oxígeno) es perfecta y como consecuencia se da una combustión completa se dice

que la mezcla es **estequiométrica**. Los términos químicos estequiométrico o estequiometria se aplican en general a cualquier ecuación química.

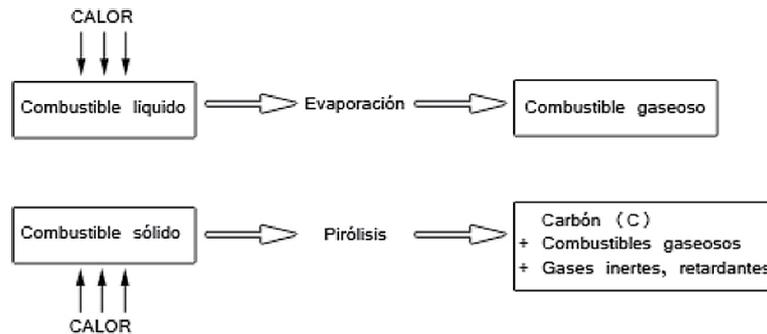
En general podemos definir una reacción de combustión completa, cuando un combustible en función de sus componentes genera los siguientes productos:



Este es un proceso ideal que puede ser representativo para las condiciones de incendio de algunos productos. Sin embargo, en condiciones reales de incendio, los productos que se formarían, probablemente serían los siguientes:



En un proceso de combustión bajo condiciones de **"bien ventilado"** los productos generados CO₂, H₂O, y N₂, estarían próximos a los valores de sus valores ideales. En procesos en condiciones de **"infra ventilados", combustión sin llama, y de degradación térmica se incrementará la cantidad de CO, hollín, e hidrocarburos.** La generación de Cianuro de Hidrógeno (gas) y de gases halógenos sólo se producirá cuando el combustible contenga Nitrógeno o elementos halógenados. Para los procesos de incendios reales con combustible complejos, las ecuaciones químicas particulares o las condiciones de estequiometria deben establecerse de manera experimental.



Proceso de combustión en diferentes estados

Según lo expuesto hasta aquí, queda claro que los productos generados por la combustión van a quedar condicionados tanto por los componentes del propio combustible como de las condiciones de ventilación presentes en el proceso de incendio.

Con el fin de efectuar **predicciones cuantitativas de las especies generadas** en los productos de la combustión, resulta útil establecer la relación entre la masa de las especies individuales resultantes del proceso (el oxígeno tendrá un rendimiento negativo ya que se consume) y la masa total de combustible gaseoso generado desde el combustible primario (el cual contiene especies inertes y retardantes), esta relación recibe el nombre de **"rendimiento de especies"** y se expresa como:

$$y_i = \frac{m_i}{m_f}$$

Donde m_i es la masa de las especies i producidas y m_f la masa de combustible gaseoso aportado, o la pérdida de masa en la gasificación.

A continuación, se presenta una tabla donde se observa el rendimiento en la formación de especies como consecuencia de la combustión de diferentes materiales en condiciones de “buena ventilación” y de “ventilación controlada”.

Combustible	BUENA VENTILACIÓN				VENTILACIÓN CONTROLADA	
	y_{CO_2}	y_{CO}	y_S	y_{HCl}	y_{CO}	y_{H_2}
Propano	2,85	0,005	0,024	NA	0,23	0,011
Acetileno	2,6	0,042	0,096	NA	–	–
Etanol	1,77	0,001	0,008	NA	0,22	0,0098
Heptano	2,85	0,01	0,037	NA	–	–
Poliestireno	2,3	0,06	0,16	NA	–	–
Nylon	2,06	0,038	0,075	NA	–	–
Poliuretano flexible	1,5	0,031	0,23	NA	–	–
Polimetil Metacrilato	2,1	0,01	0,022	NA	0,19	0,032
Madera (Pino)	1,33	0,005	0,015	NA	0,14	0,0024
Cloruro de Polivinilo (PVC)	0,46	0,063	0,14	0,5	0,4	–

Notas: NA= No Aplicable; – = No medido

4.1.1. TOXICIDAD

Como es lógico suponer, no se dispone de muchos datos acerca de la incidencia que los productos tóxicos generados en el proceso del incendio tienen directamente sobre el organismo de los seres humanos, dado el riesgo que comporta efectuar estos estudios de forma directa. Los datos disponibles son, como en la mayoría de los casos, sobre animales que posteriormente se extrapolan a los seres humanos. No obstante se dispone de algunos datos acerca de los umbrales para el lagrimeo, y tablas específicas basadas en experimentación a pequeña escala

Como hemos visto, dependiendo de que el incendio esté controlado por el combustible o por ventilación, y del tipo de combustible que participa, se pueden generar diferentes productos. Durante una combustión completa con el aporte de oxígeno adecuado, se producirán grandes cantidades de dióxido de carbono y agua.

Durante una combustión **incompleta**, los gases tóxicos generados más probables serán:

- **Monóxido de Carbono (CO)**: es el producto más común después de dióxido de carbono y el agua, y además es inflamable con un rango de inflamabilidad muy amplio. Suele ser el causante de las víctimas en los incendios. Es un gas incoloro e inodoro, lo cual lo hace difícil de detectar. En un incendio se acumulan grandes cantidades de este gas en el cojín de gases de incendio del techo cuando estos proceden de la pirólisis de la madera. En la tabla siguiente se muestran algunos de sus efectos en base a su concentración en aire.
- **Ácido cianhídrico (HCN)**: el cual se produce por la combustión incompleta de la **lana, seda, nylon y poliuretano**. Es un gas altamente combustible y muy letal, causando la muerte rápidamente por asfixia. Es un gas incoloro.

- **Dióxido de nitrógeno (NO₂):** junto con otros óxidos de nitrógeno se producen en pequeñas cantidades en incendios de tejidos y en mayor cantidad en incendios de viscosa. Causa irritaciones severas en los pulmones y puede producir la muerte inmediata. Es un gas inodoro y de color normalmente marrón. Tanto el HCN como el NO₂ a menudo, se suelen formar al mismo tiempo
- **Amoniaco (NH₃):** el cual se genera en los incendios de lana, seda y nylon. Los niveles de concentración habitualmente suelen ser pequeños en los incendios de edificios. Su olor y características son conocidos, causa irritación aún en pequeñas cantidades, es incoloro y las concentraciones presentes en un incendio raramente provocan efectos en la gente.
- **Ácido clorhídrico (HCl):** Se forma durante el proceso de pirólisis de determinados materiales aislantes como puede ser el recubrimiento del cableado eléctrico, el cual básicamente se compone de PVC, así como de materiales que han sido tratados con retardantes para el fuego y compuestos acrílicos clorados.
- **Compuestos hidrocarbonados:** Compuestos de diferentes especies de cadenas de hidrocarburos no quemados, entre los que se encuentran las partículas de carbono no quemadas, etc.
- La toxicidad de los productos de la combustión se puede asociar, casi en su totalidad, al monóxido de carbono. El monóxido de carbono es uno de los mayores causantes de muertes en incendios ya que es tóxico e inflamable.

En algunos manuales ingleses, al monóxido de carbono también se le denomina como “veneno de la sangre”, debido a que al inhalarlo pasa al torrente sanguíneo en lugar del oxígeno, y los procesos de oxidación en nuestro cuerpo se ven alterados. Cantidades muy pequeñas de monóxido de carbono pueden ser peligrosas para el organismo humano. Algunos síntomas de intoxicación por monóxido son: dolor de cabeza, mareos, vómitos.

A continuación, se presenta una tabla con los diferentes síntomas que pueden sobrevenir al inhalar CO según diferentes concentraciones.

PPM	% EN AIRE	SINTOMAS
100	0,01	SIN DAÑOS
200	0,02	LIGERO DOLOR DE CABEZA
400	0,04	DOLOR DE CABEZA DESPUES DE 1 O 2 HORAS
800	0,08	DOLOR DE CABEZA DESPUES DE 45 MINUTOS, NAUSEAS, Y POSIBLE INCONSCIENCIA DESPUES DE 2 HORAS
1000	0,10	PELIGROSO/INCONSCIENCIA DESPÚES DE 1 HORA
1600	0,16	DOLOR DE CABEZA Y VERTIGO DESPÚES DE 20 MINUTOS
3200	0,32	DOLOR DE CABEZA, VERTIGO Y NAUSEAS DESPUES DE 5 A 10 MINUTOS INCONSCIENCIA DESPUES DE 30 MINUTOS
6400	0,64	DOLOR DE CABEZA, VERTIGO Y NAUSEAS DESPUES DE 1 O 2 MINUTOS / INCONSCIENCIA DESPUES DE 10 A 15 MINUTOS
12800	1,26	INCONSCIENCIA INMEDIATA / PELIGRO DE MUERTE SUBITA EN 1 A 3 MINUTOS

4.1.2. AGENTES PASIVOS

Hasta este momento nos hemos centrado en los componentes “activos” en un proceso de incendio, aunque de alguna manera, ya hemos hecho alguna apreciación sobre otros “participantes” que aunque

no intervienen de hecho en la reacción química que tiene lugar, están presentes en ella y tal como hemos visto en el caso del nitrógeno, deben ser tenidos en cuenta a la hora de valorar el proceso en su totalidad.

Pero no solamente nos encontramos con productos que no toman parte en proceso químico que tiene lugar. También existen otros que una formados van a condicionar con su sola presencia el comportamiento del incendio, es este caso estamos haciendo referencia a productos generados por la propia combustión, como pueden ser el dióxido de carbono o el vapor de agua. A este conjunto de elementos o productos presentes en el proceso del incendio, pero que no obstante o no “participan” en él, al menos en los aspectos químicos del proceso, o permanecen inalterables una vez se han producido, se les denomina **“agentes pasivos”** de la combustión.

Estos agentes interfieren en la parte física del proceso, es decir, en todos aquellos aspectos relacionados con el intercambio o absorción de calor, e incluso en la propia densidad de los gases resultantes, como es el caso del vapor de agua producido por el incendio al condensarse, lo cual provoca un aumento de la de la densidad de los gases de la combustión.

En cualquier caso, en unas ocasiones por efecto de restar parte de la energía necesaria que se debe aplicar para el que proceso tenga lugar, o bien como consecuencia del comportamiento físico de algunos de estos productos, lo cierto es que van a incidir en la dinámica del desarrollo del incendio.

Ejemplos de Agentes Pasivos son:

Gases no Inflamables	Dióxido de carbono, vapor de agua
Hollín	Partículas de carbón
Agua	En función de la temperatura y humedad del aire
Nitrógeno	Componente del aire (79%) que permanece invariable a través de la combustión

4.2. LLAMAS

Las llamas se describen normalmente como **la región del espacio donde tiene lugar la reacción del combustible con el aire**. Generalmente, en esta zona se suele emitir algún tipo de **radiación** que habitualmente se manifiesta **en forma de una luz brillante de color amarillo**. No obstante, algunas sustancias no producen este color amarillo, sino más bien un color azul como en el caso de ciertos **alcoholes**, esto es debido a que el rendimiento de la combustión en estos productos es extremadamente elevada (**próxima al 100%**) y como resultado la generación de hollín es muy pequeña y esto hace que la llama sea de color azul en lugar del color amarillo provocado por la incandescencia de las partículas de hollín provocado por reacciones de bajo rendimiento (por ejemplo en una **vela** el rendimiento no supera el **25%**).

Existen dos tipos diferentes de llamas: llamas de difusión y premezcladas. Ambas tienen propiedades diferentes. Para comprender los fenómenos que ocurren en un incendio de interior, es necesario comprender las propiedades de las llamas. Recordemos que una llama es el resultado de una reacción química entre el combustible y el aire y para que esto suceda se precisa una cierta cantidad de energía.

“Las llamas premezcladas” tienen lugar cuando el combustible y el aire se mezclado de forma previa y la mezcla se encuentra dentro del rango de inflamabilidad antes de que se produzca la ignición. Se necesita una fuente de ignición, como por ejemplo una chispa, para que la llama se origine. En algunos

caso, los gases se pueden inflamar sin esta fuente de energía, cuando esto ocurre normalmente recibe el nombre de auto-ignición. Pero es difícil que los gases de incendio se auto-inflamen.

Las llamas de difusión tienen lugar cuando se encuentran el combustible y el aire. El aire y el combustible no se han mezclado previamente a que se produzca la ignición. En este caso lo que ocurre es que en lugar de mezclarse se produce una difusión molecular, lo cual es un proceso bastante lento, incluso aunque el proceso se vea afectado por altas temperaturas.

Para comprender mejor lo que estamos diciendo, supongamos que disponemos de una bandeja con una pequeña cantidad de líquido combustible en el fondo. La temperatura ambiente es superior a la de la temperatura de inflamación del líquido, lo cual implica que los gases que se encuentran sobre la superficie del líquido se encuentran dentro del rango de inflamabilidad. Si arrojamos una cerilla sobre la bandeja, se puede producir una pequeña deflagración. Habremos obtenido una llama de difusión.

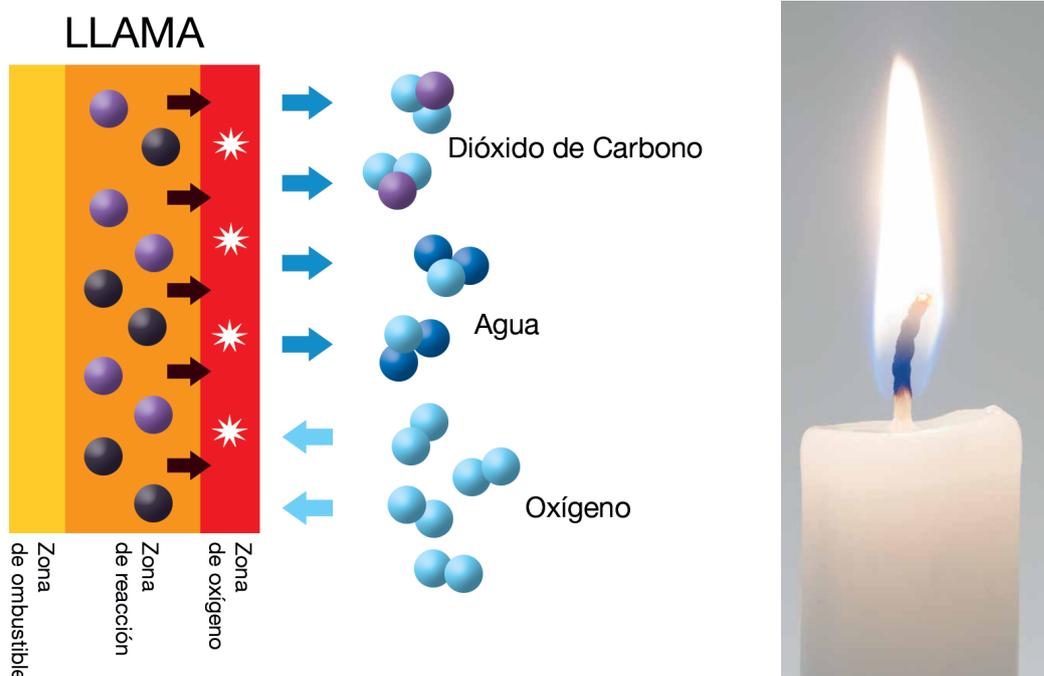
A continuación, se citan algunos ejemplos de la vida cotidiana con el fin de comprender mejor los diferentes tipos de llama:

- a. La llama de una vela es un ejemplo típico de llama de difusión, donde el combustible y el aire se combinan en una capa muy fina alrededor de la mecha.
- b. Un charco de combustible es un ejemplo donde coexisten los dos tipos de llamas. En el momento de la ignición los vapores procedentes de la superficie del líquido se mezclan con el oxígeno del aire, dando lugar a una llama de pre-mezcla que se extenderá rápidamente sobre la superficie. A continuación, se produce una llama de difusión, la cual hace que la combustión se mantenga.
- c. Se puede producir una bola de fuego cuando una nube de gas que contiene una pequeña cantidad de aire se inflama. La concentración en el interior de la nube es con mucho demasiado grande para que se produzca una llama de difusión (en su interior prácticamente todo es gas). Sin embargo, en la periferia de la nube existirá una zona de pre-mezcla en la cual puede producirse la combustión de la pre-mezcla.
- d. Si se produce una fuga de gas de una tubería de alta presión se producirá una mezcla muy rápidamente, lo cual puede provocar que una parte de la mezcla entre en el rango de inflamabilidad. Si existe una fuente de ignición se producirá una llama pre-mezclada.
- e. En el cojín de gases generado en un recinto, a menudo existe una gran cantidad de combustible y aire con un contenido bajo en oxígeno. Esto quiere decir que es muy poco probable que se desarrolle una llama pre-mezclada en esta región. En este caso lo más probable es que se produzca una llama de difusión que se expande bajo la capa de gases de incendio o por encima de esta.
- f. En algunas ocasiones, los gases del incendio y el aire se mezclan cuando se introduce una corriente de aire en un recinto incendiado donde tenía lugar una combustión con deficiencia de oxígeno. Entonces puede tener lugar una pre-mezcla de aire y combustible y se puede producir una ignición rápidamente.
- g. Existe la posibilidad de que en una habitación anexa a la que se está produciendo un incendio, se introduzcan gases procedentes de esta última y que estos se mezclen con el aire en proporciones que queden dentro del rango de inflamabilidad. Si esta mezcla se inflama se producirá la combustión provocando una llama de pre-mezcla que se extenderá rápidamente. A este fenómeno se le denomina habitualmente como una "explosión de gases de incendio".

Dependiendo de la forma en que se mezclen los gases del incendio, tendremos un tipo de llama u otro, por lo que resulta muy importante ser capaz de diferenciar unas de otras.

4.2.1. LLAMAS DE DIFUSIÓN

Si tomamos como ejemplo de una combustión la de una vela, podemos analizar los principios básicos de la combustión. En este caso el combustible procede de la parafina fundida de la vela que se genera en el pequeño charco alrededor de la mecha. Este combustible es absorbido por la mecha donde se convierte en gas. Las velas son un ejemplo muy común de cómo se produce una llama de difusión.



Proceso de combustión de una vela

El calor de la llama hace que la parafina de la vela se funda, pero este no es suficiente como para que se evapore. La parafina debe de desplazarse a lo largo de la mecha hacia la zona de la llama donde la temperatura es mayor. Las cadenas hidrocarbonadas que componen la parafina se rompen en sus componentes simples en el centro de la llama de la vela.

Las moléculas de combustible se transportan de esta manera a la zona de reacción. Esta zona a veces recibe el nombre de "zona de combustión". Aquí es donde las moléculas del combustible se mezclan con las del oxígeno del aire circundante. Este proceso de transferencia es el que se denomina como "difusión" e implica la mezcla de dos o más gases. Cuando el combustible y el oxígeno se han mezclado en las proporciones suficientes y hay el calor suficiente para su ignición, se produce una reacción química exotérmica. La energía liberada se utiliza para calentar los productos formados durante la reacción. El oxígeno y el combustible continúan el proceso de difusión en la zona de reacción dando lugar a una llama de difusión continua.

La parte visible de la llama tiene lugar por el calor de reacción de las partículas de hollín incandescentes. Cuando la oxidación tiene lugar en la zona de reacción se producen compuestos de óxido de carbón (monóxido y dióxido de carbono) junto con agua y calor. La parte interna de la llama, la cual está compuesta por moléculas de combustible, contiene muy poco oxígeno para que pueda tener lugar la combustión. Sin embargo, la atmósfera rica en combustible no es auto-inflamable. En lugar de esto, la combustión tiene lugar en la periferia, donde el combustible y el oxígeno se difunden uno en el otro. La zona de reacción es donde se mezclan en las proporciones adecuadas, el combustible y el aire se mezclan perfectamente en esta fina zona.

Las llamas de difusión son de color amarillo habitualmente, debido a la incandescencia del hollín que se forma. Las llamas de difusión difieren en función de que el combustible y el oxígeno se difundan entre ellos en proporciones similares. Las llamas de difusión son el resultado de un proceso de combustión donde las moléculas de combustible se pueden mezclar con el oxígeno de forma laminar o turbulenta. La turbulencia ayuda a que aumente la velocidad en el proceso de mezcla.

4.2.1.1. LLAMAS DE DIFUSIÓN LAMINARES

Cuando una vela arde se produce una típica llama de difusión, en la cual el combustible y el oxígeno procedente de la corriente de aire se mezclan cara a cara a una velocidad baja. La mezcla tiene lugar de forma laminar y la combustión se produce uniformemente en la zona de reacción. Si la difusión tiene lugar lentamente, el oxígeno y el combustible necesitan mezclarse durante un periodo de tiempo largo para conseguir arder. La propagación de los incendios en los edificios tiene lugar de forma similar a la descrita. Una mezcla de oxígeno y combustible puede incendiarse muy lejos del foco inicial del incendio.

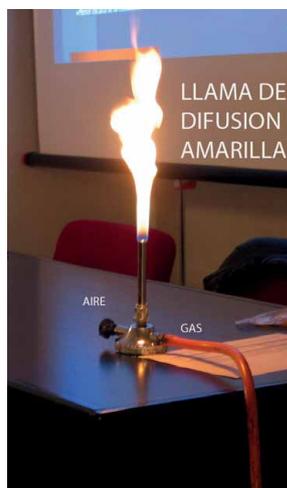


4.2.1.2. LLAMAS DE DIFUSIÓN TURBULENTAS

Vamos a poner como ejemplo un mechero de gas. Si hacemos que la velocidad de paso del combustible aumente, la llama gradualmente cambiará de un régimen laminar a turbulento. Cuando la relación entre el flujo de combustible aumente con respecto a la que éste mezcla con el oxígeno del aire, el proceso de mezcla formará remolinos. Esto se conoce como mezcla turbulenta. En este caso la mezcla con el oxígeno también tiene lugar como una difusión, pero el proceso de combustión es desigual e irregular. No obstante a pesar de que la turbulencia provoca un aumento de la velocidad de combustión, este es mucho menor para llamas de difusión turbulentas que para llamas premezcladas.

Las llamas turbulentas presentan las siguientes características:

- Movimiento irregular arremolinado
- Difusión rápida
- Zona de reacción irregular y delgada



Quemador Bunsen cerrado



Llama de difusión turbulenta

A diferencia de las llamas laminares, en las llamas turbulentas a menudo se aprecia sonido y cambios rápidos de su forma. La turbulencia puede tener lugar en cualquier medio gaseoso.

Las llamas de difusión se producen en el límite formado entre la capa de combustible y el aire. Con esto queda claro, que no podemos utilizar los límites de inflamabilidad para describir las llamas de difusión o conceptos tales como los de "pobre" o "rico", asociados con las llamas premezcladas.

Cuando el cojín de gases de incendio comienza a arder, el tipo de llamas que podemos ver son prácticamente siempre llamas de difusión.

En la mayoría de los casos en un compartimento incendiado, el cojín de gases de incendio que se forma no es homogéneo. Esto puede deberse al hecho, por ejemplo, del fuerte efecto de pirólisis con el material del techo. La concentración de combustible no se distribuye por igual a lo largo de todo el cojín de gases. El oxígeno debe difundirse en el combustible para que la combustión pueda tener lugar.

4.2.2. LLAMAS PREMEZCLADAS

Arranquemos de la hipótesis de que el cojín de gases ha inundado totalmente una estancia, la masa gaseosa se ha premezclado y se encuentra dentro del rango de inflamabilidad. El término "premezclado" se utiliza para indicar que el combustible se ha mezclado con aire y se ha distribuido de manera uniforme. En el momento en que el cojín de gases comienza a arder se formarán llamas premezcladas.

Posiblemente la forma más intuitiva de definir una llama premezclada sea recurrir de nuevo al mechero de gas o quemador Bunsen, en este caso, cuando la corriente de gas se mezcla con el oxígeno del aire en la base del mechero de forma previa a su inflamación, daría como resultado una llama premezclada.



Quemador Bunsen cerrado



Acuario demostración

La forma más adecuada de entender cómo reaccionan las mezclas aire-combustible y en consecuencia el comportamiento de las llamas premezcladas, es mediante el estudio de los límites de inflamabilidad. Dado que el cojín de gases de incendio contiene diferentes sustancias gaseosas en su composición,

y que algunas de ellas son inflamables necesitamos entender que ocurre cuando una masa gaseosa que contiene combustible y aire se inflama.

A continuación, trataremos los conceptos de límites de inflamabilidad y velocidad de combustión. Utilizaremos las reacciones de combustión para describir las llamas premezcladas, lo que nos permitirá ofrecer algunos ejemplos ilustrativos sobre mezclas.

4.3. ENERGÍA

Si recordamos la expresión de la reacción química de combustión del metano, observamos que además de los productos químicos que se generan como consecuencia de esta combustión hablábamos de un DE, es decir, de **incremento de energía, este incremento de energía es inherente a todos los procesos de combustión como consecuencia de su carácter exotérmico.**

En términos del incendio de un compartimento, la proporción de la energía liberada controla una parte considerable de las variables que afectan al incendio, tales como el flujo de gases de se genera, las altas temperaturas de estos gases, y la velocidad en que la capa de gases calientes desciende.

Estos parámetros pueden estimarse mediante el cálculo de la cantidad o tasa de energía liberada por el incendio. En el capítulo dedicado al desarrollo del incendio en un compartimento, entraremos en mayor profundidad en la comprensión del cómo estos valores junto con la velocidad de propagación de la llama a lo largo de una superficie, la inercia térmica de los materiales, la geometría de estos y los materiales alrededor del foco inicial influyen en el desarrollo del incendio.

No obstante, vamos a introducir una serie de términos que nos facilitaran la comprensión de estos conceptos:

- **Tasa de combustión o relación de pérdida de masa:** Es la proporción másica del combustible sólido o líquido que se vaporiza y se quema. Se expresa como caudal másico por unidad de tiempo, normalmente en kg/s o g/s se representa con el término m . También se puede expresar como caudal másico o proporción de masa quemada por unidad de área, normalmente expresado en kg/(m²s). En este caso se expresa con el término m'' . Debe distinguirse entre la proporción de masa quemada y la proporción de pérdida de masa (aportada por el combustible), ya que toda la cantidad de combustible aportado puede no quemarse. Cuando la cantidad de aire suministrada los objetos que se queman es ilimitada, ambos términos son sinónimos.
- **Eficacia de la combustión:** Es la relación entre el **calor efectivo y el calor total de la combustión** se representa con el término χ .
- **Tasa de Energía liberada o tasa de calor liberado:** Cuando un objeto arde este desprende una cierta cantidad de energía por unidad de tiempo, usualmente se expresa como kW (=kJ/s) y se representa por el término Q . Para la mayoría de los materiales la tasa de energía liberada varía con el tiempo. Este término también se conoce como la tasa de calor liberado.

5. INFLAMABILIDAD DE LOS GASES DE INCENDIO

Los principios aplicados a la inflamabilidad de un gas son los mismos, tanto si son aplicados a un gas puro como si se aplican a los gases procedentes de la pirolisis, sin embargo, existe un factor que diferencia claramente unos de otros, mientras los gases de pirolisis son una mezcla de diferentes componentes, los cuales son función de los materiales que intervienen en el proceso de incendio y de las propias condiciones del entorno (cantidad de oxígeno presente, temperatura, etc.), el resto suelen ser gases de composición simple, es decir, de un solo componente (butano, propano, etc.).

En cualquier caso, estos valores se calculan de forma experimental para cada producto. También es posible aproximar estos valores mediante métodos de cálculo.

Vamos a analizar en qué consisten estos límites y como varían en función de las condiciones del incendio.

5.1. TEMPERATURAS DE IGNICIÓN Y AUTO-IGNICIÓN

La temperatura de ignición es la mínima temperatura (en °C) a la cual una sustancia inflamable emite los suficientes vapores en el aire, los cuales en presencia de una llama pueden inflamarse. En los procesos de combustión los gases generados por las sustancias inflamables tanto sólidas como líquidas deben alcanzar esta temperatura para poder comenzar el proceso de combustión.

Además de la temperatura de ignición debemos hacer mención a la temperatura de auto-ignición la cual es la mínima temperatura (en °C) requerida para que una mezcla combustible/aire se inflame, sin necesidad de que exista una llama o cualquier otra fuente de ignición presente.

Desde el punto de vista de los procesos de combustión estas temperaturas son importantes, ya que marcan la posibilidad de que los materiales afectados por el proceso ardan o no, así como que se produzcan cierto tipo de fenómenos.

5.2. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

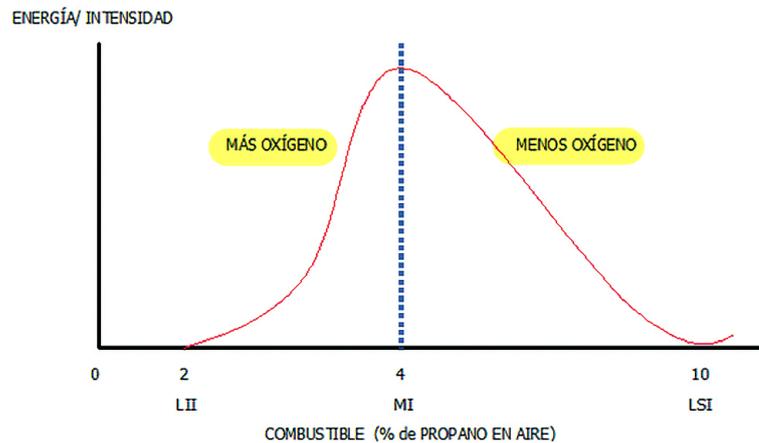
Para que una masa gaseosa premezclada comience a arder, es necesario que la concentración de combustible se mantenga entre ciertos límites conocidos como límites de inflamabilidad. En este sentido se definen dos límites: el límite inferior y el superior de inflamabilidad.

5.2.1. LÍMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD

Se define como límite inferior de inflamabilidad (LII) a la mínima concentración a la cual un gas inflamable mezclado con aire puede arder. Por debajo del límite inferior de inflamabilidad, la concentración de vapores en aire es demasiado baja para permitir la combustión del producto.

5.2.2. LÍMITE SUPERIOR DE INFLAMABILIDAD

Se define como **límite superior de inflamabilidad (LSI)** a la máxima concentración a la cual un gas inflamable mezclado con el aire puede arder. Por encima del límite superior de inflamabilidad, la concentración de vapores en aire es demasiado alta para permitir la combustión del producto.



Límites de inflamabilidad

En la figura se puede observar el efecto producido por la inflamación de la mezcla de combustible a diferentes concentraciones.

5.3. RANGO DE INFLAMABILIDAD

La zona de valores donde la mezcla combustible aire es inflamable, es decir la comprendida entre los valores correspondientes al L.I.I. y el L.S.I. se le denomina Rango de Inflamabilidad. El tamaño del rango varía dependiendo de cada sustancia, de manera que para cada una de ellas el tamaño del rango de inflamabilidad es diferente.

En la tabla, se muestran los valores correspondientes a los límites de inflamabilidad y sus rangos respectivos para algunas sustancias. Los principios que se aplican al rango de inflamabilidad, son los mismos, con independencia que se trate de un gas puro o de los gases procedentes de la pirólisis de una sustancia sólida. Estos valores, se miden experimentalmente. Sin embargo, también se pueden calcular. Tal como puede observarse en la tabla, los rangos de inflamabilidad varían de manera considerable dependiendo de cada gas.

Para cada gas, o mezcla de gases, existe una cierta concentración que es exactamente la necesaria para que su combinación con el oxígeno produzca una reacción al 100% efectiva o de rendimiento total, en este punto es donde mayor y más notable se hace la intensidad con que se da el efecto de la ignición, y se le denomina punto de **Mezcla Ideal (M.I.)**, también se le suele identificar como punto estequiométrico de la mezcla ya que es aquí donde la mezcla combustible-aire arde a la perfección, mientras que en los límites lo hace con cierta dificultad.

La cuestión que se nos plantea es porque una sustancia solo arde entre ciertos valores de concentraciones y porque cuando la mezcla es estequiométrica alcanza los valores más altos de liberación de energía.

Para entender un poco mejor que es lo que ocurre, vamos a recurrir una vez más al proceso de combustión del metano, pero en esta ocasión vamos a tener en cuenta a todos los productos que intervienen en la reacción, de esta manera tendremos:



Si la mezcla es estequiométrica la temperatura será elevada y esto es debido a que la energía liberada se utiliza para calentar pocos productos (los pasivos son los mínimos ya que sólo existen las cantidades justas). Al valor de la mayor temperatura que se puede alcanzar se le denomina como "temperatura adiabática de la llama" normalmente representada por T_f . Aquí es donde toda la energía liberada se utiliza para calentar los productos.

En base a los experimentos realizados, se ha comprobado que los gases combustibles necesitan alcanzar temperaturas del orden de los 1500 a 1600 K (1300° C) para que la combustión sea capaz de mantenerse, lo cual quiere decir que la temperatura adiabática de la llama en el límite inferior de inflamabilidad es de este orden de magnitud.

En el caso de una mezcla estequiométrica (ideal), la temperatura de la llama es unos 200 grados superior a la del límite inferior de inflamabilidad. También se ha observado mediante experimentación, que en la zona del límite superior de inflamabilidad, en teoría, se necesitan alcanzar los 1600 K para que la combustión pueda continuar. Debemos añadir, que la temperatura adiabática de la llama, varía según las sustancias, pero que a efectos de cálculos esto no se tiene en cuenta.

Mediante la ecuación $\Delta H_c = \Sigma(C_p \times \Delta T)$ podemos calcular los grados (ΔT) que se alcanzan cuando una masa gaseosa con una capacidad calorífica $\Sigma(C_p)$ se calienta, conociendo el valor de la energía que libera (ΔH_c).

Cuando vamos a calcular el límite inferior de inflamabilidad, asumimos que la temperatura de los productos debe alcanzar los 1600 K para que la combustión continúe. Vamos a analizar qué es lo que ocurre cuando se produce la combustión en aire, donde lógicamente existirá un exceso de aire en ambas partes de la ecuación:



Donde X indica el exceso de aire. Este exceso actúa como un lastre térmico y absorbe parte del calor generado (las llamas se enfrían). Esta ecuación es una expresión simplificada de lo que ocurre en la realidad. De hecho, hay un gran número de etapas a través de las cuales se producen las reacciones de combustión hasta llegar al resultado final, es decir, a lo que aparece en la parte derecha de la ecuación. El dióxido de carbono y el agua no aparecen hasta la última etapa de la reacción.

Para calcular el límite superior de inflamabilidad, se utiliza el mismo método. En este caso lo que tendremos es un exceso de combustible. Este exceso deberá calentarse también sobre los 1600 K, ya que como hemos dicho, en teoría, también debe alcanzarse esta temperatura para mantener la combustión. En este caso la siguiente ecuación, describe el proceso de combustión resumido, ya que el proceso real, en este caso, es mucho más complejo que en el anterior, de hecho, se formará C, CO, CO_2 y H_2 . Para hacernos una idea de su complejidad, podemos decir que en algunos casos el proceso tiene lugar a través de varios centenares de sub-reacciones antes de que el proceso concluya.

En este caso X, representa el exceso de combustible. La ecuación la ajustamos añadiendo $X\text{CH}_4$ en ambos lados de la ecuación para representar el exceso de moléculas de metano.



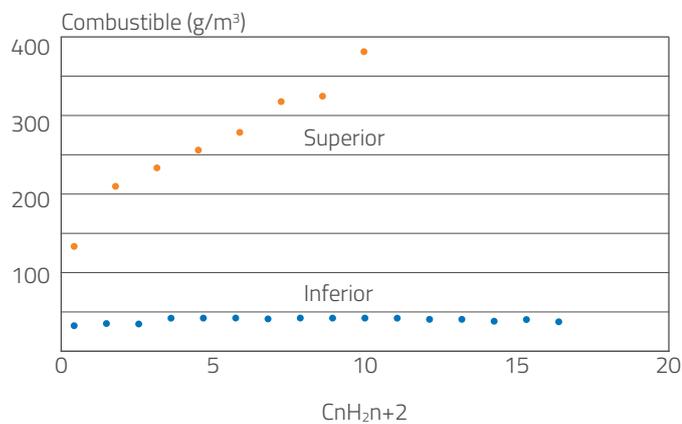
Con el fin de ilustrar lo expuesto en este apartado, a continuación se presenta una tabla donde se pueden apreciar los valores de los límites de inflamabilidad, mezcla ideal y rango de algunos gases:

PRODUCTO	LÍMITE INFERIOR	MEZCLA IDEAL	LÍMITE SUPERIOR
Acetato de etilo	2.2	4.0	11.4
Acetileno	2.0	7.4	80.0
Acetona	2.0	4.8	13.0
Amoniaco	15.0	21.0	27.0
Benceno	1.4	2.6	7.0
Butano	1.8	3.0	9.0
Etano	3.0	5.4	12.5
Etanol	3.0	6.0	19.0
Gasolina	0.7	1.6	7.0
Hidrogeno	4.0	28.8	76.0
Metano	5.0	9.0	15.0
Metanol	6.0	12.0	37.0
Monóxido Carbono	12.0	28.8	74.0
Pentano	1.4	2.4	7.8
Propano	2.0	4.0	10.0
Tolueno	1.2	2.2	7.0

5.3.1. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD PARA MEZCLAS DE GASES

Hasta aquí hemos estado hablando de los criterios de inflamabilidad aplicados a gases puros. Sin embargo, los gases de combustión que componen el cojín de gases en un incendio contienen diversos gases. Los principios de los límites de inflamabilidad vistos hasta aquí, se aplican exactamente igual a las mezclas de gases también.

Los hidrocarburos puros, por ejemplo el metano, el propano y el butano, son casos especiales. La cantidad de combustible en g/m^3 necesarios para que los gases se inflamen prácticamente no depende del peso molecular. La figura muestra los límites de inflamabilidad para hidrocarburos con diferente peso molecular. Parece evidente que el límite inferior de inflamabilidad es casi constante para la mayoría de hidrocarburos.



Variación del LSI y LII según el peso molecular

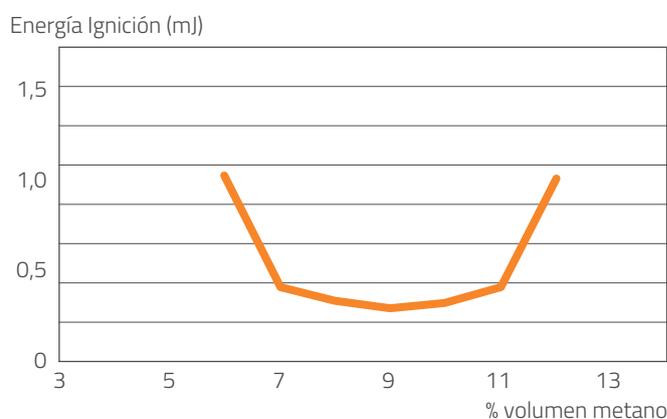
En cambio, el límite superior, varía considerablemente con el peso molecular del hidrocarburo.

Para determinadas sustancias el punto de mezcla ideal o estequiométrico se desplaza significativamente hacia el límite inferior de inflamabilidad. Esto se debe al hecho de que el aire y el combustible en cuestión tienen capacidades caloríficas muy diferentes (lastre térmico). Esto se traduce en que los límites de inflamabilidad se ven afectados. También afecta, por supuesto, al contenido energético de la sustancia. Los excesos de aire o de combustible sólo son tolerados hasta un cierto nivel. Cuando esta cantidad de combustible/aire se excede, la temperatura cae por debajo de los 1600 K y la llama se extingue.

La figura muestra que el límite inferior de inflamabilidad es prácticamente constante para la mayoría de los hidrocarburos y está alrededor de 50 g/m^3 . Un cojín de gases de incendio, siempre está compuesto de cantidades variables de diferentes productos, así es que no podemos afirmar de forma categórica que 50 g/m^3 va a ser siempre un valor razonable. El LII puede variar desde los 50 g/m^3 hasta varios centenares de g/m^3 .

5.3.2. ENERGÍA DE IGNICIÓN

Si partimos de la base de una masa gaseosa dentro del rango de inflamabilidad, supone que existen aire y combustible disponibles en las proporciones necesarias para la combustión. Se requiere un tercer componente para la ignición, una fuente de ignición. La cantidad de energía necesaria para que la masa gaseosa entre en ignición varía a lo largo del rango de inflamabilidad del metano, tal como se observa en la figura.



Energía de ignición y concentración

Desde un punto de vista estequiométrico, se necesita la cantidad más pequeña de energía, lo cual puede tener su explicación en el hecho de que la energía aportada sólo se utilizará en calentar los productos, el dióxido de carbono y el agua. En el LII la energía aplicada, también deberá calentar el exceso de aire, mientras que en el LSI la energía aplicada calentará parcialmente el exceso de combustible.

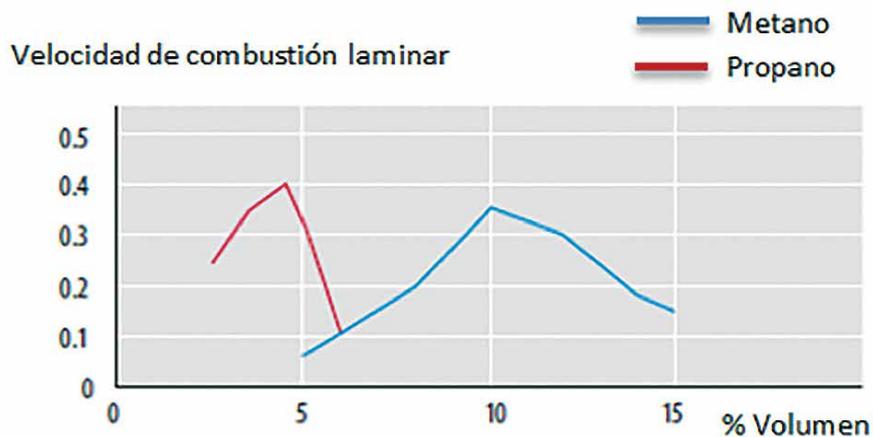
Resulta particularmente complejo estimar la energía crítica de la chispa. En términos generales, la energía desprendida por la chispa de luna llave de la luz cuando se enciende una lámpara en una habitación o las chispas generadas por el cebador de un tubo fluorescente son suficientes para hacer que la mezcla se inflame.

Otro tipo de ignición es la espontánea o la auto-ignición. En este caso, el medio combustible, por ejemplo una mezcla de gas, se inflama mediante un proceso espontáneo. La temperatura de auto-ignición para el mismo sistema es siempre superior a la de ignición para forzar la ignición, esta suele estar entre los 500 y 600°C. En cualquier caso, resulta bastante raro que los gases se auto-inflamen en situaciones cotidianas de la vida real.

5.3.3. VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN Y VELOCIDAD DE LA LLAMA

Partiendo de la hipótesis de una pre-mezcla de gases, la velocidad laminar de combustión variará de acuerdo en función de donde entre exactamente la mezcla en el rango de inflamabilidad. La velocidad laminar de la llama es la velocidad a la cual los gases no quemados fríos se mueven o viajan en el interior de la llama. Este es un concepto bastante indefinido ya que no podemos "ver" esta velocidad.

Si la mezcla se encuentra en la proximidad de los límites de inflamabilidad, la velocidad de combustión será bastante lenta. Si la mezcla se encuentra próxima al punto de mezcla ideal o estequiométrico la combustión ocurrirá más rápidamente ya que se libera mayor cantidad de energía.



Velocidad de combustión laminar

De esta manera, la velocidad de combustión aumentará en la medida en que aumenta la concentración del gas, hasta alcanzar su máximo valor en el punto de mezcla estequiométrica, para comenzar a descender a partir de este punto en la medida en que se aproxima al límite superior de inflamabilidad.

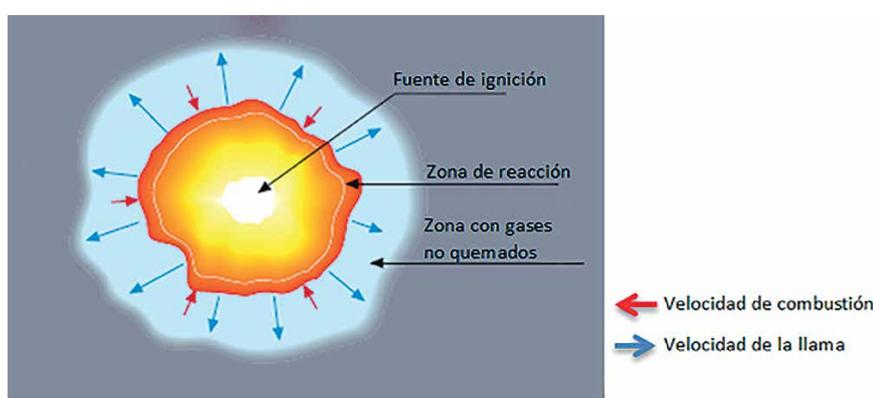
La figura anterior, muestra los valores de la velocidad de combustión laminar para el metano y el propano respectivamente. La velocidad de combustión, provocará un aumento de la presión en la habitación. Cuanto más próximos nos encontremos al punto estequiométrico mayor será la velocidad de combustión.

Si comparamos el calor liberado en el límite inferior de inflamabilidad y cuando se alcanza el punto estequiométrico, es en este último donde mayor energía se libera, ya que aquí el porcentaje de

combustible quemado es mayor. Esto indica que la velocidad de combustión será mayor para una mezcla estequiométrica que para otra que se encuentre en el límite inferior de inflamabilidad.

La comparación con lo que ocurre entre el punto estequiométrico y el límite superior de inflamabilidad, es similar. Cuando nos encontramos en la zona superior del rango de inflamabilidad, es la cantidad de oxígeno la que determina la cantidad de energía que se desprenderá. Cuanto más ricos en energía sean los gases (materiales sintéticos), mayor será la velocidad de combustión. La velocidad de combustión (S_u) depende de la energía liberada.

Algunos plásticos tienen un nivel energético elevado, lo cual implica que los gases desprendidos pueden contener potencialmente mucha energía si se produce su combustión en condiciones de escasa ventilación o sub-ventiladas. Cuando los gases de la combustión se inflaman, la combustión tendrá lugar rápidamente.



Velocidad de combustión y velocidad de llama

La velocidad de la llama o la velocidad del frente de llama, es la velocidad a la cual la estrecha zona de reacción, mostrada en la figura anterior, viaja a través de la masa gaseosa. Esta estimación se basa sobre un punto fijo, tal como la propia fuente de ignición mostrada en la figura. La velocidad de la llama está relacionada con la velocidad de combustión laminar S_u .

5.4. FACTORES DE INFLUENCIA SOBRE LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

Hemos expuesto las ecuaciones que resumen el comportamiento de la combustión de los productos gaseosos. Como a cualquier proceso químico, las condiciones del medio en el que transcurren estos procesos van a afectar a su comportamiento, y tal como hemos visto esto afectará directamente sobre los límites de inflamabilidad. En cualquier proceso químico, los factores ambientales que pueden influir sobre él son dos, la temperatura y la presión, en nuestro caso, dado que las reacciones que estamos analizando se producen a temperatura constante, es decir, a presión atmosférica, este factor no va a ser significativo. Sin embargo, existe un factor que no dependiendo directamente de las condiciones atmosféricas, también va a contribuir en el comportamiento de la reacción y este es la concentración de oxígeno durante el proceso.

5.4.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

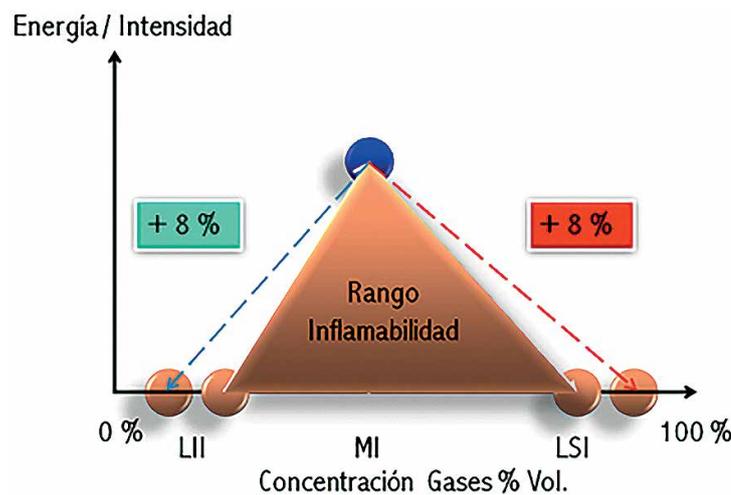
Si tomamos los ejemplos anteriores, donde hablábamos de una masa gaseosa que se encuentra a la temperatura ambiente al comienzo del proceso de combustión. Sus límites de inflamabilidad cambian en la medida en que la temperatura aumenta.

TEMPERATURA EN °C	LÍMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD %
027	5,7
127	5,2
227	4,8
327	4,3
427	3,8

Influencia de la temperatura en el límite inferior de inflamabilidad del metano

El límite inferior de inflamabilidad desciende conforme la temperatura aumenta. Se necesita liberar menos energía durante la combustión para que la masa gaseosa se incendie y arda con una llama. Esto indica indirectamente que se necesita una cantidad menor de combustible para que la combustión sea capaz de continuar. Con respecto al límite superior podemos decir que le afecta en igual medida y en consecuencia lo que ocurre en un incendio, donde la temperatura es elevada, es que los gases de la combustión aumentan su rango de inflamabilidad.

Según datos experimentales, se estima que un aumento de temperatura de alrededor de 100° C. es capaz de hacer disminuir el L.I.I. en un 8% y de hacer aumentar el L.S.I. en la misma proporción.



Variación del rango de inflamabilidad

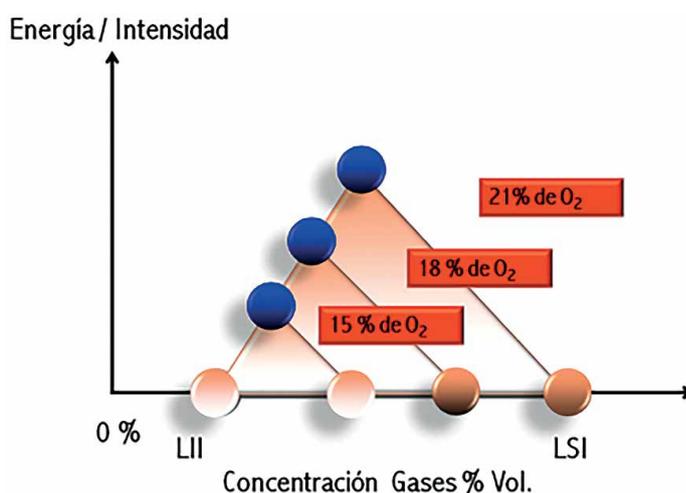
La temperatura es un factor crucial cuando se evalúa el riesgo de que la capa de humo se incendie. A mayor temperatura mayor cantidad de gases de pirólisis se formarán, y por lo tanto harán que sea más fácil su ignición.

5.4.2. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO EN LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

La variación en la concentración de oxígeno afecta a los límites de inflamabilidad de forma distinta, y la implicación es clara, si hemos definido la mezcla ideal como la cantidad de combustible que un volumen concreto de aire puede quemar, si el volumen de oxígeno contenido en el mismo se reduce, lógicamente la cantidad de combustible que pueda arder será menor, es decir el valor de la mezcla ideal se reduce.

Este efecto afecta de manera distinta a los dos límites. Por una parte en el L.I.I. la mezcla apenas es combustible, debido principalmente al efecto refrigerante del aire circundante en exceso, si el contenido de oxígeno en el aire es normal o bajo, apenas va a influir en el inicio de la combustión ya que las concentraciones de oxígeno en las proximidades de este límite están en exceso, todo se limitará a que una cantidad mínima de oxígeno esté presente para que la pequeña cantidad de combustible existente comience a arder.

Desde el punto de vista del L.S.I., el descenso de la concentración de oxígeno provocará un descenso del valor de la mezcla ideal de forma lineal, es decir contra menor sea la cantidad de oxígeno disponible más descenderá el valor de la mezcla ideal y en consecuencia el descenso del L.S.I. será aún más rápido, de tal forma que cuando la mezcla ideal y el L.S.I. coincidan con el L.I.I., no se producirá la inflamación, expresado en otros términos, la saturación o exceso de combustible producido por el incendio cuando existe una carencia de oxígeno, alcanzará antes los valores superiores en el rango que si la cantidad de oxígeno es la normalmente requerida. De hecho mezclas de combustible aire donde la concentración de este último descienda por debajo del 14% son difíciles de mantener. Sin embargo, tal y como hemos dicho, la temperatura modifica los límites de inflamabilidad y esto afecta asimismo a la disponibilidad mínima de oxígeno para mantener la combustión. Según pruebas llevadas a cabo en incendios en compartimentos, en condiciones de incendio totalmente desarrollado se ha detectado combustión con llama con bajas concentraciones de oxígeno, según se indica en algunas de las pruebas efectuadas se han dado combustiones con llama a concentraciones de oxígeno inferiores al 2%.



Variación del RI con la concentración del comburente

5.5. INFLUENCIA DE LAS FUENTES DE IGNICIÓN

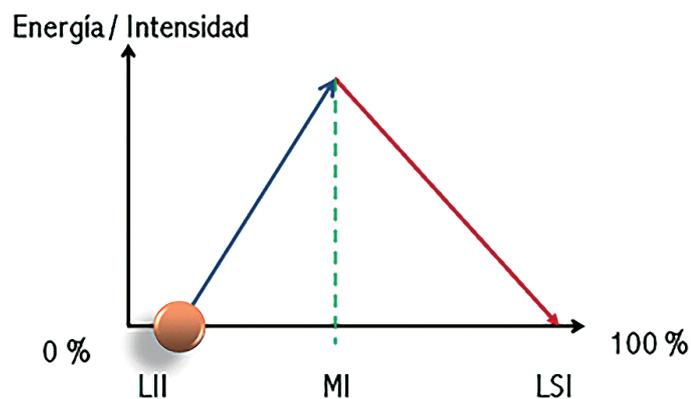
Las fuentes de ignición juegan un papel importante en el efecto del incendio, ya que dependiendo del tipo de fuente el efecto alcanzará una mayor o menor magnitud.

Así mismo el momento en el tiempo en el que la fuente actúe va a ser determinante de la magnitud del efecto ocasionado.

Podemos distinguir tres clases de fuentes:

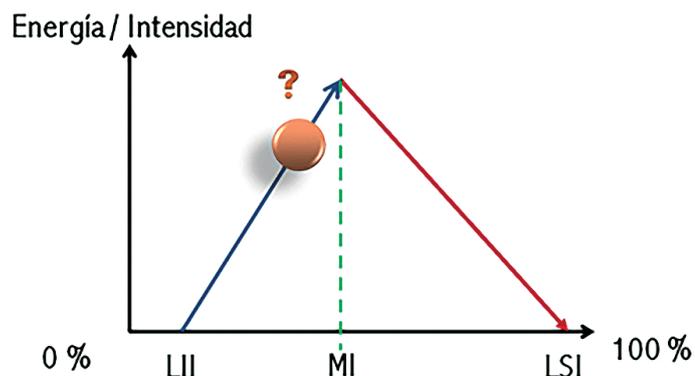
- Abiertas
- Ocultas
- Intermitentes

5.5.1. Fuentes de Ignición Abiertas: son aquellas que permanecen constantemente activas en presencia de una fuga de gas o de una mezcla de gases, como puede ser el caso del propio foco del incendio durante la evolución del mismo, con **este tipo de fuentes la ignición siempre tiene lugar en el L.I.I.**



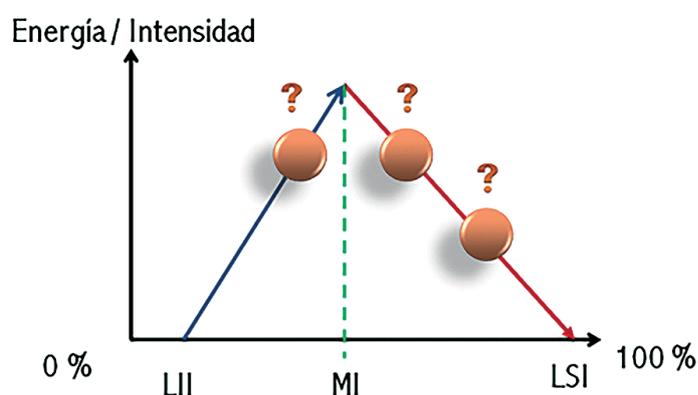
Ignición con fuente abierta

5.5.2. Fuentes de Ignición Ocultas: son aquellas que permaneciendo constantemente activas, no actúan directamente sobre la capa de gases, este puede ser el caso de un quemador de gas que permanece dentro de su hornacina, o cualquier fuente de ignición en alguna habitación contigua a la incendiada. Como consecuencia permanece un poco al margen de la concentración de gases del foco principal. **Por lo general este tipo de fuente retrasará la ignición de la mezcla** y en consecuencia cuando esta se inflama se producirá un efecto más o menos grande dependiendo del punto del rango de inflamabilidad donde se encuentre en ese momento la concentración de gases.



Ignición con fuente oculta

5.5.3 Fuentes de Ignición Intermitentes: son aquellas que se activan de forma esporádica, como puede ser la puesta en marcha de una nevera, o el zumbador de un timbre, al igual que en el caso anterior el tipo de efecto a que dan lugar será función de la concentración de gases en el momento en que esta se active.



Ignición con fuente intermitente

En el caso que nos ocupa, tal como hemos analizado, el momento en que se produzca la ignición del cojín de gases de incendio y la concentración de esos gases en un momento determinado, van a marcar las características de velocidad de propagación y de liberación de energía del incendio.

6. EXTINCIÓN DE INCENDIOS

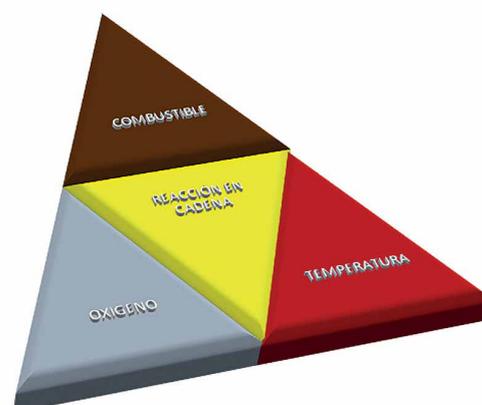
En los capítulos previos, hemos definido los conceptos y los principios mediante los que se desarrollan los incendios. En el presente capítulo vamos a tratar el aspecto de la extinción de incendios, para ello analizaremos cuales son los mecanismos de extinción más habituales, los agentes extintores que disponemos y cómo podemos conjugar todos estos factores de forma que sean lo más eficaces posibles.

6.1. MECANISMOS DE EXTINCIÓN

Con frecuencia se suele recurrir al "triángulo del fuego" o al "tetraedro del fuego" para representar los elementos necesarios para que se produzca un incendio.

El triángulo del fuego nos muestra tres de estos elementos: el combustible, el comburente y la energía de activación.

El tetraedro del fuego añade como cuarto elemento la reacción en cadena. Mediante el triángulo del fuego sólo se consigue ofrecer una idea acerca de los elementos deben concurrir para que se produzca una combustión. Sin embargo, no ofrece información alguna acerca de los mecanismos que hacen que el incendio se desarrolle o se extinga.



Tradicionalmente se suele decir, haciendo alusión a estas figuras geométricas, que para extinguir un incendio tan sólo es necesario eliminar uno de estos elementos: combustible, comburente, energía o bien detener la reacción en cadena.

Los efectos que pueden provocar las diferentes acciones que se apliquen, normalmente no son aislados, inevitablemente, cuando se actúa sobre un componente el resto se ve afectado también en alguna medida.

El agua proyectada sobre una superficie incendiada, provocará un descenso de la temperatura en su superficie y la producción de gases combustibles también disminuirá. La cantidad de combustible disponible en la llama y la tasa de calor liberado también disminuyen. Al mismo tiempo disminuye la concentración de oxígeno debido al vapor de agua generado. Al aplicar agua sobre una superficie incendiada estamos afectando a los tres lados del triángulo: energía, combustible y comburente.

En general, podemos decir que la consecuencia directa de la extinción del incendio es el efecto refrigerante, sin que el tipo de agente extintor que estemos utilizando tenga una importancia trascendente (agua, espuma, agente gaseoso, etc.).

El enfriamiento que tiene lugar actúa a nivel molecular y el agente extintor actúa como un "absorbente" de calor. Sin embargo, existen excepciones, por ejemplo, cuando se utiliza dióxido de carbono para inertizar un recinto. En este caso estaremos hablando de sofocación y estaremos creando una atmósfera en la que no puede tener lugar una combustión.

Por tanto, en base a lo que hemos expuesto, nos encontraremos con cuatro mecanismos de extinción:

- **Enfriamiento.** Consiste en reducir la temperatura del combustible o de las llamas (es el principal mecanismo de extinción)
- **Sofocación.** Se trata de impedir la mezcla entre el combustible y el comburente
- **Eliminación del combustible.** Para ello se debe separar el combustible del incendio.
- **Inhibición química.** Se consigue mediante la interrupción de la reacción química necesaria para mantener el incendio.

Vamos a analizar cada uno de estos mecanismos.

6.1.1. ENFRIAMIENTO

Consiste en conseguir restar calor/energía del incendio (de las llamas y/o del combustible). El incendio se extinguirá si las llamas o el combustible no tienen suficiente energía para mantener el proceso de la combustión que está teniendo lugar, ya que no se producirán suficientes vapores combustibles o gases de incendio (pudiendo salir del rango de inflamabilidad). La extinción por enfriamiento de las llamas o del combustible puede realizarse con todos los agentes extintores.

6.1.2. SOFOCACIÓN

Haciendo disminuir la cantidad de oxígeno aportado al proceso de combustión, estaremos sofocando el incendio.

Habitualmente, la sofocación se lleva a cabo mediante la **adición de un agente gaseoso que reemplaza al oxígeno o bien cubriendo el foco del incendio** con la ayuda de una manta, arena, tierra, etc.

El efecto de sofocación, también se puede conseguir mediante la dilución de la cantidad de oxígeno presente en un volumen cerrado, utilizando vapor de agua o un agente gaseoso.

6.1.3. ELIMINACIÓN DEL COMBUSTIBLE

Al reducir de forma gradual la alimentación de combustible, el fuego se extinguirá. Un ejemplo de esta situación es cuando retiramos los materiales combustibles de una habitación incendiada, o simplemente cerramos una válvula de paso de combustible en el caso de líquidos o gases inflamables.

6.1.4. INHIBICIÓN QUÍMICA

El proceso de la pirólisis implica la ruptura de los enlaces químicos que mantienen unidos los átomos del combustible. En este proceso, **los enlaces más débiles son los primeros en romperse y serán los que den lugar a los llamados radicales libres**. Estos radicales libres en realidad son estructuras moleculares con electrones disponibles para su recombinación con otras sustancias. **Los radicales libres tienen la capacidad de recombinarse dando lugar a productos nuevos y más estables que de los que proceden.**

La inhibición química se encuentra estrechamente ligada con unos productos que se denominan los **halones**. Los halones son compuestos gaseosos que contienen Bromo, Cloro, Iodo y Flúor. **El bromo, el iodo y los átomos de cloro pueden actuar en el proceso como catalizadores, cada átomo puede unirse múltiples veces** a los radicales libres presentes en el proceso de la combustión. El cloro y el bromo son mucho más activos que el flúor en este aspecto. **El flúor reacciona con los radicales libres, pero también forma enlaces químicos fuertes, puesto que los átomos de flúor reaccionan una única vez desapareciendo como tales y dando lugar a moléculas.**

6.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMBUSTIBLES

Para abordar el proceso de la extinción, se establece una clasificación de los materiales combustibles en base a una serie de afinidades, de tal forma que posteriormente permita su tratamiento en base a esta clasificación. Una posible clasificación es aquella que utiliza como criterio el tipo de combustible que alimenta el incendio. A continuación, se describe la clasificación de los tipos de fuego según las normativas europeas más extendidas. Como es evidente, es importante identificar el tipo de combustible con el que se va a tratar, para poder seleccionar el agente extintor adecuado o el método de extinción.

6.2.1. FUEGOS TIPO A:

Son aquellos en los que los materiales combustibles son **sólidos ordinarios**, tales como:

- Papel
- Ropa
- Madera
- Goma
- La mayoría de los plásticos

6.2.2. FUEGOS TIPO B:

Se trata de incendios donde los combustibles son líquidos:

- Líquidos inflamables, tales como el aceite y la gasolina.
- Líquidos combustibles, tales como el queroseno.

Estos combustibles arden solamente en la superficie del charco que generan, puesto que el oxígeno no puede penetrar en el interior del fluido. Cuando se inflaman, sólo arden los vapores que se desprenden de la superficie del líquido.

6.2.3. FUEGOS TIPO C:

Son aquellos en los que participan gases inflamables. Estos combustibles, en algunos casos, arden de forma explosiva, incluso produciendo detonaciones.

6.2.4. FUEGOS TIPO D:

Son incendios donde arden determinado tipo de metales tales como: Aluminio, Magnesio, Titanio, Potasio y Zirconio. Estos incendios son frecuentes en los incendios de vehículos al arder los elementos con aleaciones tales como llantas o bloques motores. También en plantas de reciclaje de residuos.

6.2.5. FUEGOS TIPO F:

Esta es una clasificación relativamente reciente y recoge aquellos incendios donde el combustible son grasas y aceites de cocina. Las altas temperaturas de los aceites cuando arden, exceden en mucho a las del resto de líquidos inflamables, lo que provoca que los agentes extintores normales no sean efectivos.

(Aunque en algún momento existió la clasificación de Fuegos Tipo E, la cual incluía los incendios en componentes eléctricos, está desapareció hace mucho tiempo)

6.3. AGENTES EXTINTORES

Se denomina como agente extintor, a aquella sustancia capaz de extinguir un incendio mediante alguno de los mecanismos antes mencionados.

Algunos ejemplos de los agentes extintores son:

- Agua
- Espuma
- Polvo seco
- Agentes gaseosos (dióxido de carbono, nitrógeno, gases inertes, halón)
- Otros extintores (arena, cemento, nieve, tierra)

Los más comunes son: el agua, la espuma y el polvo seco.

6.3.1. AGUA:

El agua es el agente extintor más común y barato. Es un agente extintor no tóxico, aunque conduce la electricidad. Se necesita una cantidad de energía importante para evaporar el agua, para elevar la temperatura de un litro de agua líquida en un grado son necesarios 4,2 kJulios. Pero si finalmente se consigue evaporar el agua, se necesitan 2,2 MJulios para evaporar un litro de agua.

El agua es un medio ideal de extinción ya que esta se encuentra disponible en abundancia y cuando se aplica a un incendio esta **incide sobre todos los lados del triángulo del fuego, es decir:**

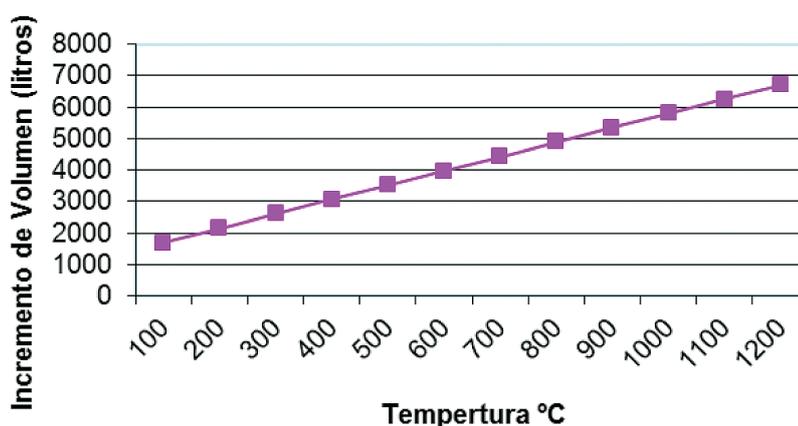
Reduce la concentración de COMBUSTIBLE	La rápida conversión del agua a vapor y su expansión, diluye los gases inflamables. Además reduce la producción de gases inflamables por efecto de la pirolisis, ya que se reduce el calor. La expansión del agua a vapor empuja al exterior algunos de los gases existentes.
Reduce el CALOR	Absorbe el calor cuando el agua líquida se convierte en vapor.
Reduce la concentración de OXÍGENO	El vapor limita la cantidad de oxígeno que llega al incendio sofocándolo.



Cuando el agua se transforma en vapor, expande su volumen a razón de 1:1.700 veces, es decir que un litro de agua se transforma en 1.700 litros de vapor a la temperatura de 100°C. Si la temperatura aumenta hasta los 450°C el vapor duplicará su expansión, es decir, 1:3.500. El volumen del vapor depende de la temperatura.

En la siguiente tabla podemos observar como aumenta la expansión del vapor de agua en función de la temperatura

Cantidad de Vapor Vs Tempertura



En el proceso de transformación del agua líquida en agua vapor se puede llegar a absorber el 80 % de la energía de un incendio.

Uno de los riesgos asociados a la aplicación de agua a un incendio durante las labores de extinción, es precisamente la expansión del vapor de agua provoca. Ésta provoca la salida del calor y los gases del incendio al exterior aumentando el riesgo de sufrir quemaduras, tanto a las víctimas como a los bomberos.

¿Cómo actúa el agua como agente extintor?

Al igual que otros agentes extintores, el agua extingue mediante varios mecanismos. El principal mecanismo de extinción que actúa cuando utilizamos el agua es fundamentalmente el de enfriamiento y en menor medida el de sofocación. Cuando el agua se calienta por la acción del calor liberado por el incendio, se transforma de su estado líquido a vapor. Al producirse este cambio de estado, al agua absorbe energía del incendio y el vapor generado provoca en la fase gaseosa hace que la concentración de oxígeno disponible en las inmediaciones disminuya.

Ventajas e inconvenientes de la utilización del agua

Ventajas:

- Absorbe calor
- Efectiva en Fuegos Tipo A
- Barata
- Abundante
- No tóxica

Inconvenientes:

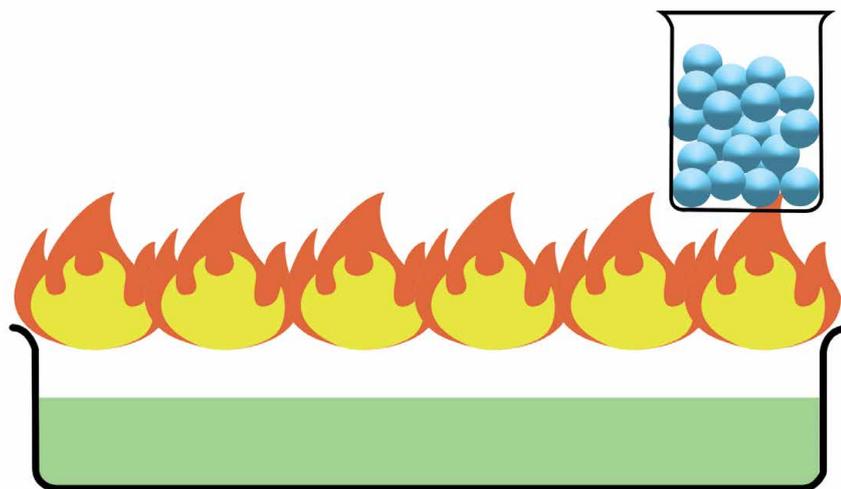
- Conductora de la electricidad
- Puede propagar los Fuegos Tipo B
- Se congela en climas fríos
- Puede arrastrar contaminantes por escorrentía
- Peligrosa en incendios de metales
- Puede provocar daños secundarios (daños por agua, inestabilidad si se utiliza en barcos, colapso si se utiliza en silos)

6.3.2. ESPUMA

La espuma está formada por tres componentes: agua, espumógeno concentrado y gas. El gas normalmente es el aire. La espuma es una solución acuosa de burbujas aplicada sobre la superficie del combustible incendiado. Las burbujas se forman por la entrada o aspiración de aire en una solución acuosa de baja tensión superficial (el espumógeno concentrado se utiliza para disminuir la tensión superficial del agua).

¿Cómo extingue la espuma?

La espuma extingue mediante los mecanismos de **sofocación y enfriamiento** del combustible. La capa de espuma separa el combustible del comburente, limitando la radiación disponible entre el incendio y los vapores combustibles, limitando la evaporación de los gases y disminuyendo la temperatura del combustible. Con el transcurso del tiempo el agua se drenará de la espuma, disminuyendo la temperatura del combustible.



Extinción con espuma. La espuma separa el incendio de los vapores combustibles

Equipamiento necesario para la utilización de la espuma

El equipamiento necesario para generar espuma normalmente consiste en: **una bomba para impulsar agua a presión, mangueras, un proporcionador de espumógeno y un generador de espuma**. El proporcionador de espumógeno y el generador de espuma pueden ser de diferentes tipos dependiendo, por ejemplo, del tipo de espuma que se desee obtener.

El equipamiento puede ser móvil como el utilizado por los bomberos en los vehículos o estático como el utilizado en naves, tanques, etc.

Diferentes tipos de espumas

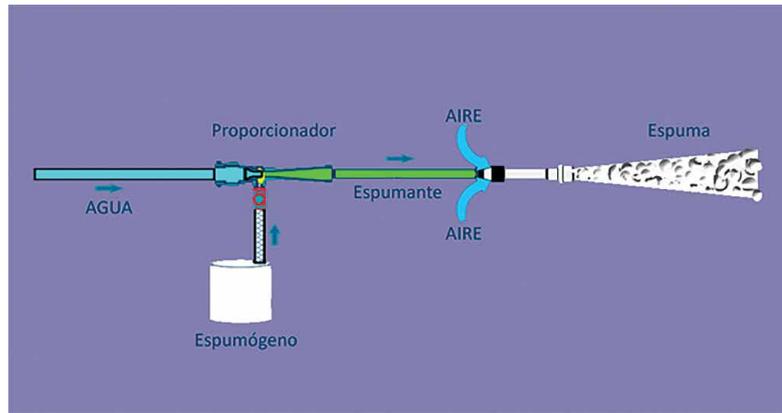
Es posible utilizar tres tipos diferentes de espuma para los incendios: espuma de baja expansión, espuma de media expansión y espuma de alta expansión.

- La espuma de **baja** expansión tiene un alcance de **diez** metros aproximadamente
- La espuma de **media** expansión tiene un alcance de **pocos metros**
- La espuma de **alta** expansión apenas tiene alcance, se proyecta por **escorrentía**

Si estamos atacando un incendio en un recinto pequeño, se puede utilizar espuma de media o alta expansión para llenar dicho espacio. La espuma de baja expansión formará únicamente una fina cobertura de espuma.

Los diferentes tipos de espuma se distinguen por la cantidad de gas (aire normalmente) que es inyectada en la pre-mezcla de espumógeno y agua, lo cual se conoce como coeficiente de expansión de la espuma.

Por ejemplo, si el espumante se expande 700 veces en volumen, la espuma será clasificada como de alta expansión. Si la expansión es de 70 veces, será clasificada como espuma de media expansión, y como espuma de baja expansión si su expansión es de 7 veces el volumen.



Esquema Generación Espumas

En función del tipo de expansión que se desee obtener, se utilizará un sistema de aplicación u otro.

El espesor de la capa de espuma proyectada depende del tipo de espumógeno elegido.



Proporcionadores de 200 y 400 l/min

Pueden utilizarse varios tipos de generadores de espuma dependiendo del tipo de espuma que necesitemos. Si por ejemplo, queremos una espuma de baja expansión, utilizaremos una lanza como generador de espuma y si lo que queremos es una espuma de alta expansión utilizaremos un ventilador como generador de la espuma.



Lanzas de baja y media expansión (izquierda y centro) y generador de alta expansión (derecha)

Diferentes tipos de espumógeno

Dependiendo del tipo de incendio frente al que nos encontremos y del combustible que arde, elegiremos alguno de los diferentes tipos de espumógeno. Los espumógenos actuales son de base sintética o de base proteínica. Los espumógenos de base sintética generalmente producen una espuma que se extiende rápidamente sobre la superficie y son de fácil expansión. Pueden utilizarse para producir espuma de baja, media y alta expansión. Los espumógenos de base proteínica producen una espuma consistente, pegajosa y resistente al calor. Pueden ser utilizados para producir espuma de baja y media expansión.

Los espumógenos tienen asociada una tasa de dosificación, o concentración de uso que es la relación entre el volumen de espumógeno y la cantidad de agua. Las concentraciones habituales están entre el 1 y el 6 % en volumen del espumógeno. Es necesario seguir las instrucciones facilitadas por el fabricante para utilizar la concentración apropiada para cada tipo de espumógeno. 

La tasa de dosificación más frecuentemente utilizada para charcos de líquidos combustibles, es la que se establece en el estándar NFPA 11, donde la tasa de aplicación recomendada es de 4 l/m² min durante un tiempo de 15 minutos. De esta forma dada una superficie concreta, podremos calcular la cantidad de espumógeno necesaria para poder extinguir con éxito el derrame, y tomar las acciones necesarias para ello. 

Ventajas e inconvenientes en la utilización de espuma

Ventajas:

- Absorbe calor
- Forma una capa entre el combustible y el comburente
- Efectiva en Fuegos Tipo A y B
- No propaga los Fuegos Tipo B

Inconvenientes:

- Puede ser conductora de la electricidad
- Se congela o es difícil de manejar en climas fríos y con fuerte viento
- Puede contaminar o arrastrar contaminantes por escorrentía
- Peligrosa en fuegos de metales

6.3.3. POLVO SECO

El polvo seco puede estar compuesto por cualquiera de las siguientes sustancias: bicarbonato sódico, bicarbonato potásico, y cloruro potásico. Dependiendo de los productos químicos específicos que se utilicen en su fabricación su uso variará, pudiendo utilizarse algunos de ellos en fuegos de metales o en equipos eléctricos.

¿Cómo extingue el polvo seco?

Los productos químicos utilizados como agentes secos están compuestos por partículas muy pequeñas. De este modo la superficie total expuesta al incendio o a los gases del incendio será muy grande. Los productos químicos extinguen por enfriamiento de las llamas, así como por la importante cantidad de energía que le restan y por la inhibición química sobre el combustible y el oxígeno.

Los diferentes tipos de polvo químico seco se dividen normalmente en dos grupos principales: polvo universal y polvos especiales. La diferencia entre estos dos tipos de polvos es que el polvo universal es adecuado para los fuegos en materiales fibrosos, líquidos y gases inflamables y para equipos bajo tensión eléctrica; el polvo especial es adecuado para incendios en líquidos inflamables, equipamiento eléctrico o metales combustibles. Los polvos químicos no son conductores eléctricos, por lo que es posible su utilización en maquinaria eléctrica. Cuando el polvo seco se utiliza para extinguir fuegos en equipos con tensión eléctrica debemos tener en cuenta el voltaje, puesto que su utilización está establecida para un rango entre 1 y 35 KV, dependiendo del tipo de polvo que se utilice. Al utilizar el polvo seco también deberemos considerar la posterior limpieza de aquellas instalaciones con equipamiento sensible a la suciedad en las que su utilización puede no ser recomendable.

Equipamiento

El polvo seco se aplica desde extintores portátiles. También es posible encontrarlo en extintores móviles y fijos en instalaciones contra incendios industriales. Algunas máquinas también pueden estar equipadas con sistemas fijos de extinción donde es necesaria la utilización de polvo químico.

Ventajas e inconvenientes en la utilización del polvo químico seco

Ventajas:

- Interrumpe las reacciones químicas
- Rápida extinción de las llamas
- Existen diferentes polvos químicos
- Muy efectivo en Fuegos Tipo B y C
- Considerado no tóxico

Inconvenientes:

- Deja residuos
- Dificulta la visión
- No recomendable en fuegos de Tipo A desarrollados en el interior de los materiales
- Absorben humedad y pueden apelmazarse en el interior del recipiente

- Pueden ser irritantes
- La presión de la boquilla puede causar la salpicadura de los líquidos inflamados

6.3.4. DIÓXIDO DE CARBONO

¿Cómo extingue el dióxido de carbono?

El principal mecanismo de extinción es el de la dilución del oxígeno alrededor del incendio, al desplazar el aire circundante. El efecto de enfriamiento provocado por el dióxido de carbono viene determinado por la expansión del gas cuando es liberado, por lo que también enfría las llamas y sustrae una importante cantidad de energía de la reacción.

Equipamiento

Como en el caso del polvo químico seco, el dióxido de carbono se encuentra normalmente en extintores portátiles. También es posible encontrarlo en sistemas automáticos de extinción por ejemplo en grandes naves de pintura, centros de servidores informáticos o salas de almacenamiento de líquidos inflamables, equipados con sistemas de rociadores. Cuando accedemos a un recinto cerrado donde ha sido activado el sistema automático de extinción por CO₂ es necesario tomar precauciones. El peligro reside en que la mayoría del aire habrá sido desplazado del recinto.

Ventajas e Inconvenientes en la utilización del dióxido de carbono

Ventajas:

- Efectivo en Fuegos Tipo B y C
- Sin residuos
- Relativamente inerte
- No conduce la electricidad

Inconvenientes:

- Requiere una concentración por volumen generalmente >35% para los sistemas de inundación total
- Provoca la asfixia en las personas con concentraciones >4% en volumen
- No es buen agente para sofocar fuegos en el interior de materiales (mantenimiento concentración durante >20 minutos)
- Tiene un efecto refrigerante/congelación en algunos componentes electrónicos
- Densidad vapor = 1,5 (se acumula en pozos y zonas bajas)
- Básicamente no tiene distancia de proyección
- Se disipa rápidamente y tiene pequeño efecto en los fuegos de exterior

6.3.5. NITRÓGENO Y OTROS GASES INERTES

Junto al dióxido de carbono, es posible la utilización de otros agentes extintores gaseosos tales como el nitrógeno. Se utilizan principalmente tanto en instalaciones industriales como en estaciones transformadoras, centros de ordenadores, etc. donde se encontrarán como sistemas de extinción automáticos.

¿Cómo extinguen?

Como el dióxido de carbono, extinguen el incendio por enfriamiento y sofocación. Es conveniente estar alerta cuando entremos en un recinto donde ha sido activado el sistema automático de extinción por agentes gaseosos, puesto que la mayor parte del aire del recinto habrá sido desplazado del mismo. También hay que tener precaución con los gases que tienen una densidad de vapor mayor que el aire, puesto que se acumulan en los pozos y zonas bajas.

6.3.6. HALÓN Y SUSTITUTIVOS DE LOS HALONES

Halones

Los agentes extintores a base de halones son conocidos como los mejores. El más común y eficaz de los halones es el Halón 1301, el cual abrió una nueva era en la extinción de incendios cuando fue desarrollado. Es un excelente agente extintor gaseoso, el cual todavía se encuentra disponible en algunas instalaciones militares y en aeronaves. Sin embargo, cuando se comprobó que los derivados halogenados contribuían en la destrucción de la capa de ozono, supuso el comienzo de su progresiva retirada.

Sustitutos de los halones

Ciertos análisis han identificado varios candidatos como sustitutos de los halones. Algunos de los agentes sustitutos en diferentes países son todavía halo-carbonados, con similares efectos de extinción que los halones pero con un potencial de destrucción de la capa de ozono mucho menor.

Ventajas e inconvenientes de la utilización de halo-carbonados

Ventajas:

- Inhibición de la reacción química
- Efectivo en Fuegos Tipo A, B, y C
- No extremadamente tóxico en concentraciones <10% en volumen
- Utilización general en concentraciones <7% en volumen
- Sin residuo
- No conduce la electricidad

Inconvenientes:

- Algunos son tóxicos en concentraciones >10% en volumen (efectos cardíacos y anestésicos)

- Desconocimiento de los efectos secundarios y por exposición crónica
- Generan productos tóxicos en su descomposición
- Densidad de vapor alta (se acumula en pozos y zonas bajas)
- Producción controlada por el Protocolo de Montreal debido a la destrucción de la capa de ozono

6.3.7. OTROS AGENTES GASEOSOS

Además de los agentes gaseosos mencionados, existen otros agentes. Por ejemplo la mezcla de argón y nitrógeno. Otro ejemplo de sustituto es la mezcla de nitrógeno, argón y dióxido de carbono. Los mecanismos de extinción de estos agentes son el enfriamiento y la sofocación.

7. BIBLIOGRAFÍA:

COTE, ARTHURE, LINVILLE, JIM L., NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (1993). Manual de protección contra incendios. Madrid: Editorial MAPFRE. 4ª ed. en castellano, correspondiente a la 17ª ed. de los EEUU

RICHARD L. TUVE (1993). Principios de la química de protección contra incendios. Barcelona: CEPREVEN.

SANVICENTE CALLEJO, E. (1997). Prevención, protección y lucha contra el fuego. Madrid: Ed. Paraninfo.

