

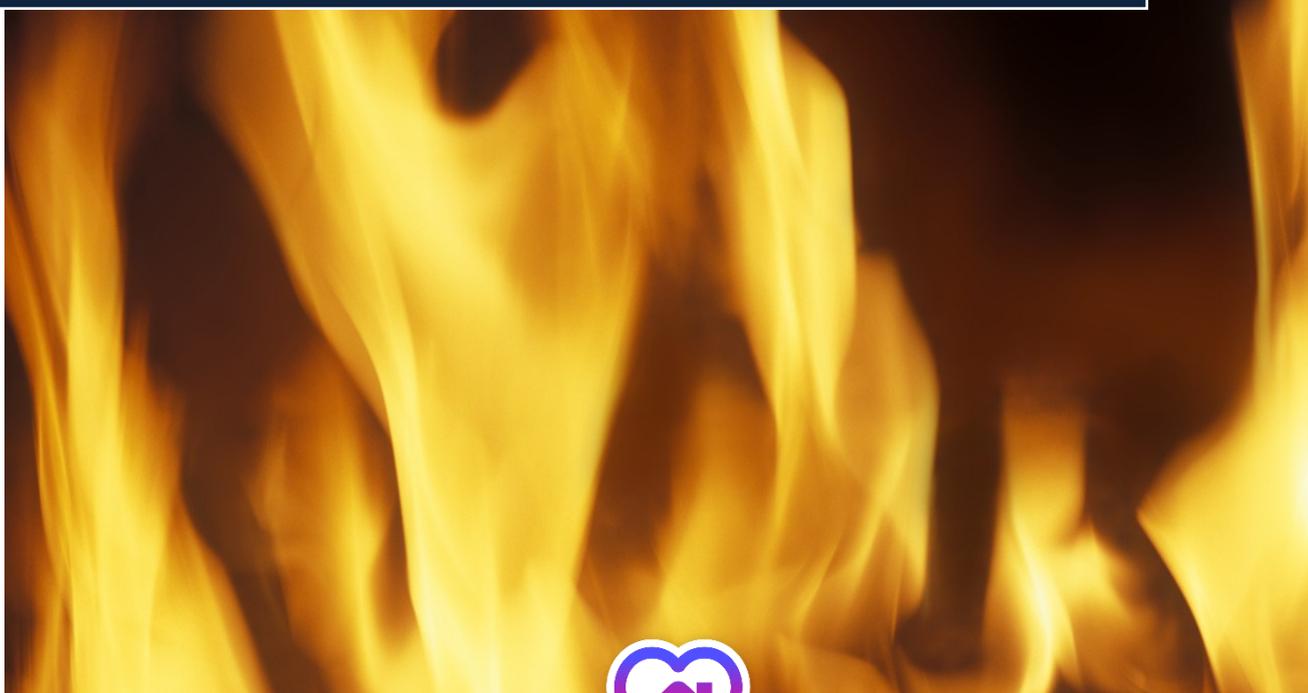
ISBN 978-987-4035-35-6



3^a edición
2^a edición registrada
Agosto 2021

EL FUEGO

Dinámica de los Incendios



Material no apto para la venta.



Ing. Néstor Adolfo BOTTA



www.redproteger.com.ar

ISBN 978-987-4035-35-6

EL AUTOR

Néstor Adolfo BOTTA es Ingeniero Mecánico recibido en el año 1992 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata; Ingeniero Laboral recibido en el año 1995 en la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata y Diplomado en Ergonomía recibido en el año 2018 en la Facultad de Química e Ingeniería del Rosario de la Pontificia Universidad Católica Argentina.

Es el Titular de la empresa Red Proteger, empresa dedicada a la Capacitación y Divulgación de conocimientos en materia de seguridad e higiene en el trabajo (www.redproteger.com.ar).

Desarrolló funciones como Responsable de Higiene y Seguridad en el Trabajo en empresas como SOIME SRL, TRADIGRAIN ARGENTINA SA, AMANCO ARGENTINA SA, MOLINOS RÍO DE LA PLATA SA y SEVEL ARGENTINA SA.

Asesoró a diversas empresas entre las que se destacan AKZO NOBEL SA, CERVECERÍA Y MALTERÍA QUILMES SAICAYG y APACHE ENERGÍA ARGENTINA SRL.

Su extensa actividad docente lo ubica como:

- Profesor en la UCA de Ing. de Rosario para la Carrera de Posgrado de Higiene y Seguridad en el Trabajo en la asignatura de Riesgo y Protección de Incendios y Explosiones.
- Profesor Titular en la Universidad Nacional del Litoral para la Carrera de Técnico en Seguridad Contra Incendios en la asignatura de Seguridad Contra Incendios III. Sistema de educación a distancia.
- Profesor en la Universidad Nacional del Litoral - Sede Rosario, para la Carrera de Lic. en Seguridad y Salud Ocupacional en la asignatura de Práctica Profesional.
- Profesor Titular en el Instituto Superior Federico Grote (Rosario – Santa Fe) para la Carrera de “Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo” para las asignaturas de Higiene y Seguridad en el Trabajo I, Seminario Profesional, Prevención y Control de Incendios II, y Prevención y Control de Incendios I.
- Profesor Interino Cátedra “Elementos de Mecánica”. Carrera “Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo”. ISFD Nro. 12 La Plata – 1.996
- Ayudante Alumno Cátedra “Termodinámica”. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ingeniería.
- Ayudante Alumno Cátedra “Análisis Matemático”. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencia Económicas.

Datos de Contacto

e-mail: nestor.botta@redproteger.com.ar

Botta, Néstor Adolfo
El fuego : dinámica de los incendios / Néstor Adolfo Botta. - 2a ed. - Rosario : Red Proteger, 2021.
Libro digital, PDF/A

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-4035-35-6

1. Incendios. I. Título.
CDD 363.37

©Todos los derechos reservados.

El derecho de propiedad de esta obra comprende para su autor la facultad exclusiva de disponer de ella, publicarla, traducirla, adaptarla o autorizar su traducción y reproducirla en cualquier forma, total o parcial, por medios electrónicos o mecánicos, incluyendo fotocopia, copia xerográfica, grabación magnetofónica y cualquier sistema de almacenamiento de información. Por consiguiente, ninguna persona física o jurídica está facultada para ejercitar los derechos precitados sin permiso escrito del Autor.

Editorial Red Proteger®
Rosario – Argentina
info@redproteger.com.ar
www.redproteger.com.ar

*“¡Nunca permitas que la lealtad ni la bondad
te abandonen!
Átalas alrededor de tu cuello como un
recordatorio.
Escríbelas en lo profundo de tu corazón.”*



ÍNDICE

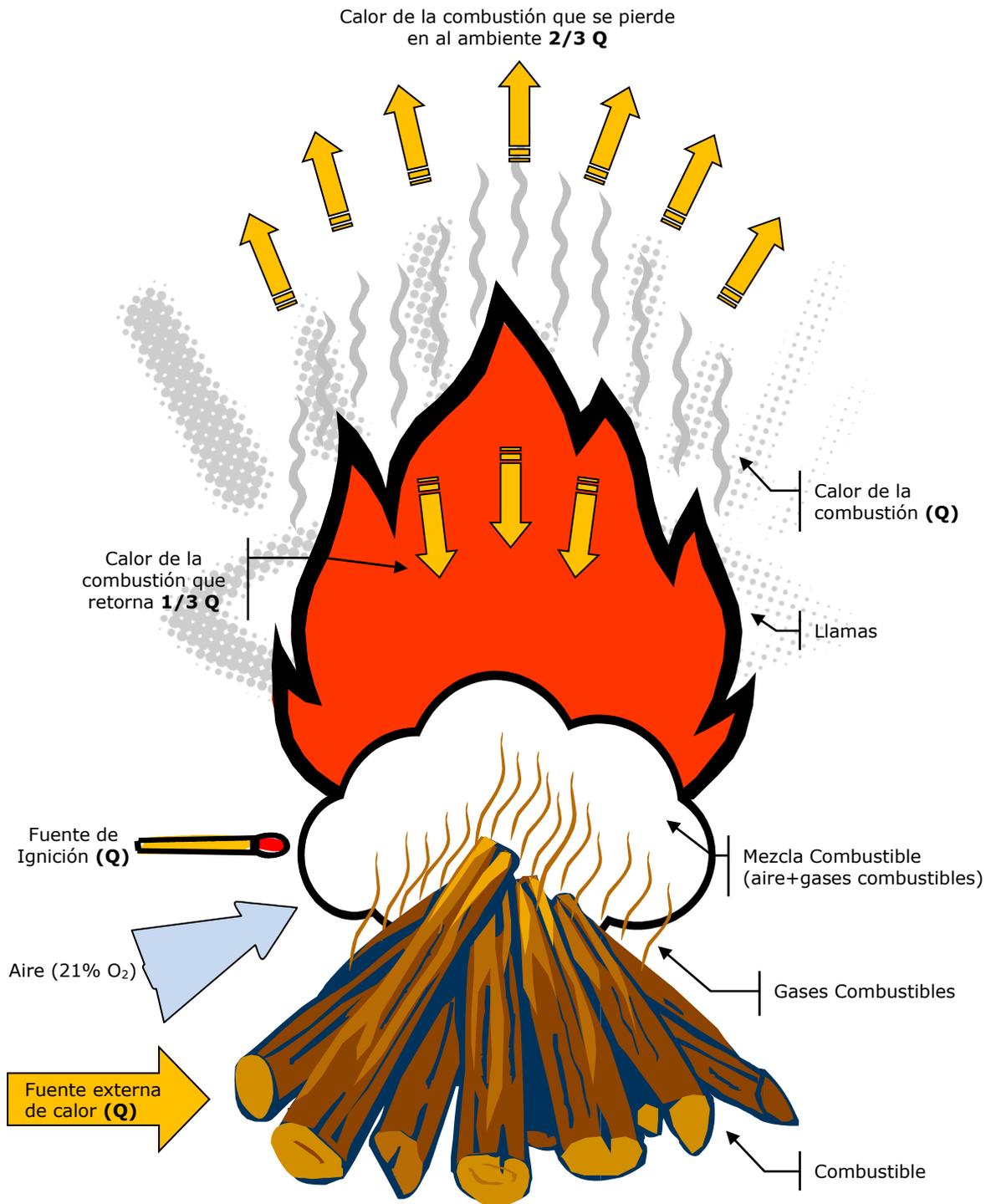
- 1) INTRODUCCIÓN
- 2) EL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN
- 3) ¿QUE ES LA COMBUSTIÓN?
 - 3.1) La Energía en la Combustión
 - 3.2) El Proceso Químico de Oxido-Reducción
 - 3.3) ¿Dónde se produce la reacción química de la combustión?
 - 3.4) Reacciones Oxidantes
 - 3.5) Velocidad de Oxidación
- 4) TEMPERATURAS DEL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN
 - 4.1) Temperatura de Ignición
 - 4.2) Temperatura de Inflamación
 - 4.3) Temperatura de Autoignición o Ignición Espontánea
- 5) LÍMITES DE INFLAMABILIDAD
 - 5.1) Los Límites de Inflamabilidad y la Relación con la Combustión
 - 5.2) ¿Cómo Entender los Límites Inferior y Superior de Inflamabilidad?
 - 5.3) ¿Qué son los Límites Inferior y Superior de Inflamabilidad?
 - 5.4) Variación de los Límites de Inflamabilidad
- 6) CONDICIONES Y ELEMENTOS PARA QUE SE INICIE LA COMBUSTIÓN
- 7) LA NATURALEZA DEL FUEGO
- 8) CURIOSIDAD MATEMÁTICA: COMBUSTIÓN SIN LLAMA NI CALOR, POR HUMBERTO SÁNCHEZ
- 9) EL TRIANGULO DEL FUEGO
- 10) EL TETRAEDRO O CUADRADO DE FUEGO. LA TEORÍA MODERNA DE LA COMBUSTIÓN
- 11) COMBUSTIBLE O AGENTE REDUCTOR
- 12) COMBURENTE O AGENTE OXIDANTE
- 13) FUENTE DE CALOR Y FUENTE DE IGNICIÓN
 - 13.1) Energía Mínima de Activación
 - 13.2) Clasificación de las Fuentes de Ignición
 - 13.3) Calor Generado Mecánicamente
 - 13.4) Energía Solar
 - 13.5) Calor Generado Químicamente
 - 13.6) Combustión Espontánea
 - 13.7) Sustancias Incompatibles
 - 13.8) Calor Generado Eléctricamente
 - 13.9) Otras Fuentes
 - 13.10) Incendios Ocasionados por Rayos

- 14) LA REACCIÓN EN CADENA
 - 14.1) Los Radicales Libres
 - 14.2) Los Radicales Libres y la Combustión
 - 14.3) Más sobre los Radicales Libres y la Combustión
 - 14.4) La Combustión Explicada desde los Radicales Libres
- 15) EL ESTADO DEL ARTE DE LA COMBUSTIÓN
- 16) PARA ENTENDER LA COMBUSTIÓN
- 17) TIPOS DE FUEGO
 - 17.1) De Superficie o Sin Llama
 - 17.2) Espacial o Con Llama
- 18) PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN
 - 18.1) Monóxido de Carbono
 - 18.2) Anhídrido Carbónico
 - 18.3) Cianuro de Hidrógeno
 - 18.4) Acroleína
 - 18.5) Ácido Clorhídrico (Cloruro de Hidrógeno)
 - 18.6) Óxidos de Nitrógeno
 - 18.7) Oxígeno Insuficiente
 - 18.8) Humo Visible
 - 18.9) Calor
- 19) TIPOS DE COMBUSTIÓN
 - 19.1) Combustión Completa, Teórica o Estequiométrica
 - 19.2) Combustión Incompleta o con Defecto de Aire
 - 19.3) Combustión con Exceso de Aire
 - 19.4) Combustión con Exceso de Oxígeno. Aire Enriquecido con Oxígeno
- 20) FORMAS DE TRANSMISIÓN DEL CALOR
 - 20.1) Contacto Directo
 - 20.2) Convección
 - 20.3) Conducción
 - 20.4) Radiación
 - 20.5) La Transmisión del Calor en el Proceso de la Combustión por Difusión
- 21) MODOS DE PROPAGACIÓN DEL FUEGO
 - 21.1) Vertical
 - 21.2) Horizontal
 - 21.3) Descendente
- 22) CLASIFICACIÓN DE COMBUSTIBLES

1) INTRODUCCIÓN

Para entender el proceso de la combustión y especialmente la dinámica de los incendios es necesario dividir el estudio en dos enfoques interrelacionados:

- ¿Cómo se quema un combustible? El proceso de la combustión.
- ¿Qué es la combustión?



Otro enfoque pasa por entender el esquema o dibujo precedente. Todo lo explicado en este material de estudio está relacionado directa o indirectamente en el esquema de la figura. Si se logra comprender lo que pasa en esta figura, se logra tener una base para seguir comprendiendo aspectos más complejos de los incendios.

La idea de entender la dinámica de los incendios es en principio hacer prevención, es decir, evitar que se produzca un incendio dado que el mismo viene acompañado de daños, además, saber las variables que gobiernan o manejan el proceso de la combustión, para posteriormente intervenir en un incendio con el objetivo de controlarlo y/o apagarlo.

2) EL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN

Para entender el proceso de la combustión se parte de la combustión de un leño de madera en una situación típica como, por ejemplo, una chimenea, o todavía más tradicional, la parrilla para el asado.

- a-** Supóngase que la madera se encuentra a temperatura ambiente. Esta madera se somete a un calentamiento por medio de una fuente de calor externa, no importa por el momento porque medios y motivos.

Conforme la temperatura de la madera se va aproximando a la temperatura de ebullición del agua (100 °C) empieza a desprender vapor de agua. Estos vapores de agua tienen casi nulos vapores combustibles. A medida que prosigue este calentamiento, se incrementa la temperatura y al sobrepasar la de ebullición del agua el proceso de desecación avanza hacia el interior de la madera.

- b-** Con el calentamiento continuo producto de la fuente de calor externa, la superficie de la madera empieza a decolorarse cuando la temperatura de la superficie de la madera sobrepasa los 250 °C.

Esta decoloración es evidencia de la pirólisis¹ que se inicia. Cuando la madera se piroliza desprende gases combustibles dejando un residuo negro carbonoso llamado carbón. Este proceso de pirólisis penetra más profundamente en el bloque de madera a medida que el calentamiento continúa.

c- Zonas de pirólisis

Zona A. Hasta 200 °C: La madera se seca y comienza una leve descomposición.

Zona B. 200 °C – 280 °C: Se crea una gran cantidad de productos secundarios producto de la descomposición y comienza la carbonización.

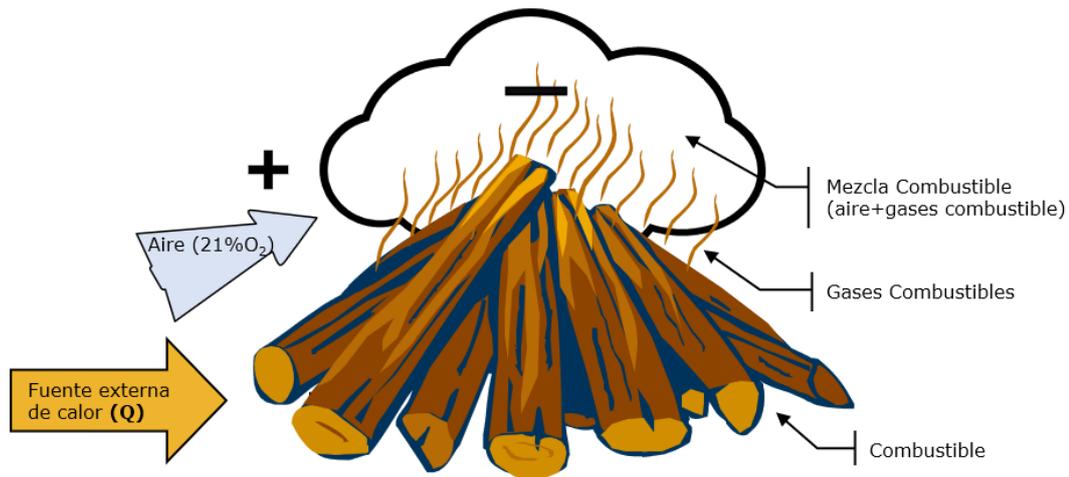
Zona C. 280 °C – 500 °C: Ocurre una pirólisis rápida, liberando o generando una amplia gama de compuestos químicos complejos. Hay reacciones entre estos productos y se forma carbón.

Zona D. Mayor a 500 °C: La temperatura de la superficie del carbón es suficiente para inducir reacciones secundarias como la combinación de carbono libre y dióxido de carbono para producir una gran cantidad de monóxido de carbono.

- d-** Inmediatamente después de comenzar la pirólisis activa (zona C), se producen rápidamente suficientes gases combustibles como para alimentar una combustión en fase gaseosa.

A medida que los gases se calientan ascienden por efecto chimenea dado que al estar calientes se vuelven más livianos que el aire que los rodea; a medida que estos gases ascienden ingresa aire por un efecto denominado de "difusión".

¹ *Pirólisis: Descomposición de un compuesto químico por acción del calor.*



¿Cómo ingresa el aire?

Una masa de gases a medida que se calienta no sólo disminuye su densidad y se vuelve más liviana, sino que también disminuye su presión; además, los fluidos se mueven siempre de ambientes de mayor presión a ambientes de menor presión. Jamás lo hacen al revés.

Por consiguiente, si la presión dentro de la masa de gases combustibles calientes disminuye, el aire ingresa sin ayuda externa por efecto de la mayor presión que tienen respecto de la presión interna de la masa de gases calientes.

También se suele decir, que los gases calientes en su ascenso arrastran y se mezclan con el aire que los rodea. El aire que ingresa más el aire que los gases combustibles calientes van encontrando en su ascenso, se mezclan, conformando así una mezcla combustible, que es la que alimenta la combustión.

Mientras el aire está ingresando la temperatura sigue en franco aumento producto de la fuente de calor externa, cuando se llega al nivel de temperatura denominada "*temperatura de ignición*", sólo va a hacer falta, para que surja la combustión, una "*fuerza de ignición de energía suficiente*" que la provoque, y que la mezcla combustible o inflamable esté dentro del "*rango de inflamabilidad*".

Si no existe esta fuente de ignición, la superficie de la madera necesitará alcanzar una temperatura mucho más elevada denominada "*temperatura de autoignición o de ignición espontánea*".

Para que se dé inicio al proceso de la combustión se necesita que la mezcla combustible o inflamable alcance la temperatura de ignición, como mínimo, que la mezcla combustible esté dentro del rango de inflamabilidad, y que aparezca una fuente de ignición que incida sobre esta mezcla combustible.

- e- Una vez producida la ignición de la mezcla combustible, la llama cubre rápidamente toda la superficie pirolizada. Esta llama genera una gran cantidad de calor, parte de este calor se pierde (2/3 del producido) en el medio ambiente, calienta el aire, las estructuras, las paredes, etc., y otra parte retorna (1/3 del producido) al proceso de la combustión calentando al combustible, a los gases combustibles, al aire que ingresa a la mezcla combustible y a la propia mezcla combustible. Este calor que retorna e incide sobre la madera, calienta la superficie y produce un aumento en la velocidad de la pirólisis, por ende, produce un aumento en la cantidad de gases combustibles.

- f-** Por cuestiones didácticas, el tiempo se detiene en el momento que se llega al punto de la temperatura de ignición. ¿Qué sucede con el calor puesto en juego y los gases combustibles?

Se tiene una combustión que está consumiendo gases combustible y oxígeno del aire, es decir, consume mezcla combustible; y también se tiene un combustible que está generando gases combustibles, pero para poder generar estos gases combustibles, el combustible necesita calor, no importa de dónde provenga, pero si no tiene calor suficiente no podrá generar la cantidad de gases combustibles necesarios para mantener a la mezcla combustible dentro del "rango inflamable".

Entonces, para mantener la combustión se debe dar la siguiente situación:

$$\text{Calor}_{\text{externo}} + \text{Calor}_{\text{f.ig}} + \text{Calor}_{1/3 \text{ llama}} \geq \text{Calor}_{\text{producir gases comb.}}$$

Es decir, que la cantidad de calor generada debe ser mayor a la cantidad de calor que necesita el combustible para generar suficiente cantidad de gases combustibles.

- g-** Si, cuando se llega a la temperatura de ignición se retira la fuente de ignición que proporciona el calor para producir la ignición o se modifica el balance térmico, las llamas se apagan porque la superficie de la madera pierde demasiado calor por radiación térmica y por conducción hacia su interior, la fuente de ignición aporta un diferencial muy pequeño de calor, pero suficiente para mantener el equilibrio térmico necesario.

Se puede decir que la combustión se apaga porque no hay la suficiente cantidad de gases combustibles para mantener la combustión dentro del rango de inflamabilidad.

El combustible sigue caliente y sigue emitiendo gases combustibles, pero éstos no alcanzan para mantener una combustión.

- h-** También puede suceder que la combustión continúe, si existiera una superficie de madera situada frente a la madera inflamada, que pueda captar y devolver parte de la pérdida de calor por radiación superficial, en este caso, no es que no se necesite la fuente de ignición, sino, que ésta se reemplazó.

Este fenómeno de captación y devolución de calor por parte de los materiales vecinos está presente en todo el proceso de la combustión. Lo dicho anteriormente explica por qué no se puede quemar un solo tronco de madera en la chimenea o parrilla, sino varios capaces de captar las pérdidas de calor radiante unos de los otros.

También esto explica porque es más fácil y económico prender la madera en la esquina de la parrilla, donde hay dos paredes que captan y devuelven parte del calor que reciben.

- i-** El tiempo transcurre nuevamente y se mantiene la fuente de ignición en su lugar. En este caso la combustión continúa y se produce, tal como se dijo anteriormente, un aumento progresivo y muy violento de la temperatura, cuando se llega a la temperatura de inflamación, se produce otro fenómeno, en este caso la combustión genera tanto calor que logra alimentarse por si misma (de calor), se vuelve independiente de la fuente externa de calor y de la fuente de ignición, la combustión se autosostiene, "vive" por si misma.

El Balance

Otra manera de explicar el fenómeno de la autoalimentación de calor por parte de la combustión, o entender por qué la combustión pasa de necesitar de la colaboración de una fuente de calor externa a ser autosuficiente, es la siguiente:

Cuando un combustible se calienta comienza a desprender gases combustibles (en algunos casos esto pasa a temperatura ambiente), estos gases combustibles mezclados con el oxígeno del aire forman una mezcla inflamable o combustible; si en estas condiciones se le acerca una fuente de ignición a esta mezcla combustible, se enciende.

En el momento que la mezcla se enciende el fuego ahí formado comienza a consumir gases combustible y oxígeno, para que la combustión pueda proseguir es necesario seguir alimentando el frente de combustión con gases combustibles y oxígeno.

Se puede decir que una combustión pasa a autoalimentarse cuando la cantidad de gases combustibles que genera el combustible es al menos igual o mayor que la cantidad de gases combustible que está consumiendo el frente de llamas. También se puede decir que, si la cantidad de calor generada por la combustión y los elementos adyacentes no es suficiente para generar el desprendimiento de la cantidad de gases combustibles necesarios para mantener el frente de llama, esta se apaga; o sea, la cantidad de calor generada por la combustión de los gases combustibles y los elementos adyacentes deben ser suficientes para generar el desprendimiento de la cantidad de gases combustibles que está consumiendo el frente de llama.

Conclusión 1: el combustible debe generar una cantidad de gases combustibles mayor o al menos igual que la cantidad de gases combustibles que está consumiendo el frente de llama.

Conclusión 2: la cantidad de calor generado por la combustión tiene que ser mayor o al menos igual a la cantidad de calor que necesita el combustible para desprender gases combustibles más las pérdidas de calor por radiación, convección y transmisión.

- j-** Es fácil observar que la propagación ascendente de las llamas es mucho más rápida que en el sentido descendente u horizontal. Ello es debido a que el calor se desplaza normalmente hacia arriba, y proporciona calor a una zona mucho mayor en sentido ascendente.
- k-** La combustión de llama o de tipo espacial continúa mientras la madera siga emitiendo gases combustibles, pero como se trata de un cuerpo finito, tiene limitada capacidad de emitir gases.

El grosor de la capa carbonizada aumenta al continuar la combustión. Dicha capa, que posee buenas propiedades como aislante térmico, limita el caudal de calor que penetra hacia el interior de la madera y, por lo tanto, tiende a reducir la intensidad de la pirólisis, la cual disminuye también al agotarse el volumen de madera sin pirolizar.

Cuando se agota la madera sin pirolizar o mejor dicho, cuando la cantidad de gases que emite la madera no alcanza para mantener la mezcla combustible dentro del rango inflamable, se produce un cambio en el tipo de combustión, se llega a una etapa donde no se puede mantener la combustión de la fase gaseosa o espacial (por falta de suficiente cantidad de gases combustible o nula), el oxígeno del aire entra en contacto directo con la capa carbonizada y facilita que continúe directamente la combustión del tipo sin llama, incandescente, de brasa, de masa o de superficie, donde lo que se está quemando es el sólido propiamente dicho.

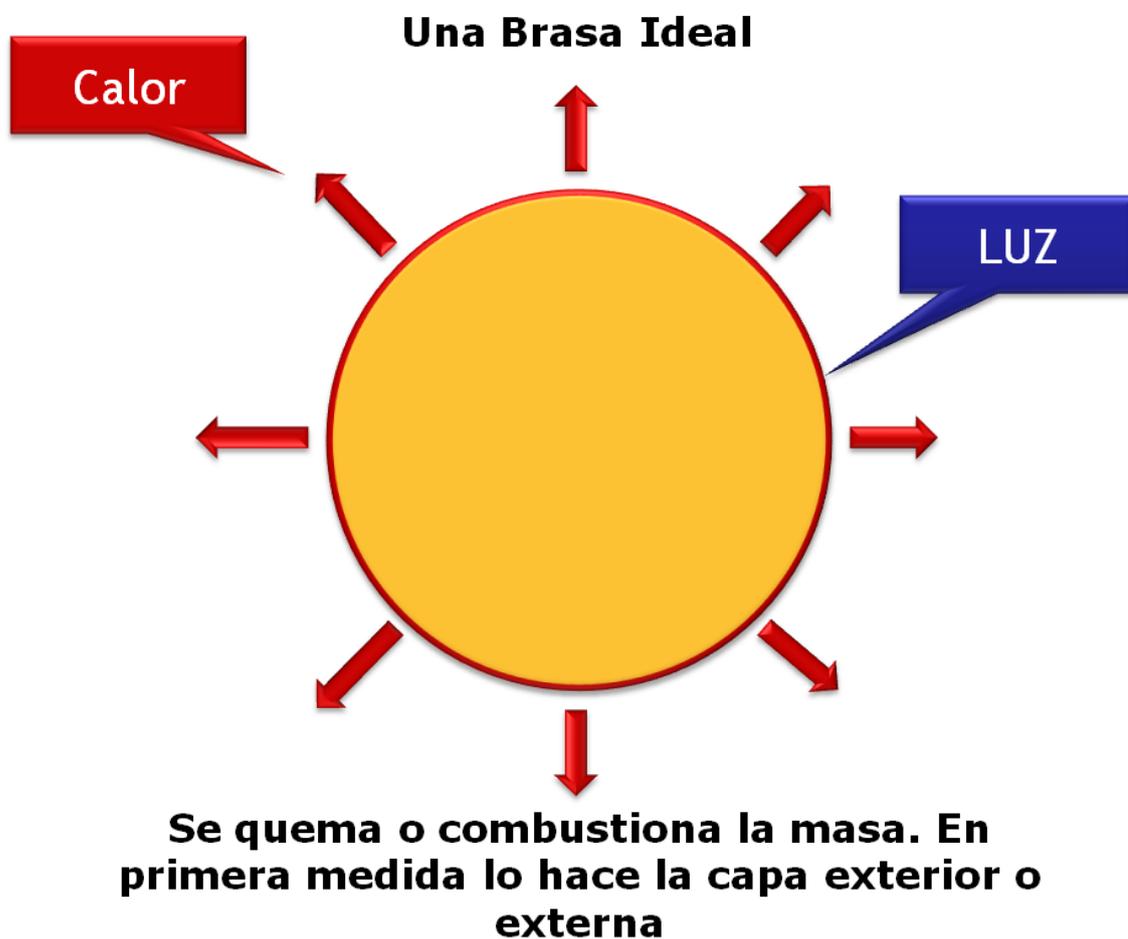
- l-** La primera etapa de la combustión de masa se da en el exterior del combustible sólido, en este caso se tiene una combustión que emite luz, pero no llama, y lo que se está quemando es precisamente la primera capa de celulosa.

Terminada la combustión de esta primera capa de combustible se produce una capa de carbón vegetal que recubre todo el combustible, produciendo dos fenómenos ya mencionados, por un lado, al ser el carbón un material aislante térmico, evita la pérdida de calor del interior de material combustible y por el otro desaparece la luminosidad de la combustión, transformándose en una combustión invisible, lo que se está quemando es el interior del sólido.

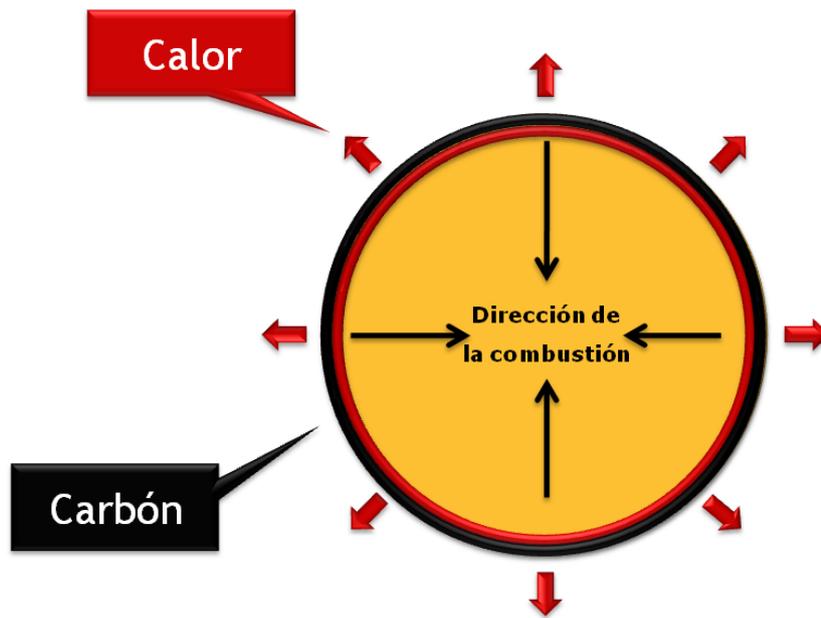
Esta aislación que produce el carbón y que recubre el combustible que se quema en el interior, hace que la combustión sea lenta. Además, como este tipo de combustión se da únicamente en materiales poroso, los poros permiten el ingreso del aire suficiente para que se mantenga la reacción de oxido reducción necesaria.

Más allá de que en este material de lectura el fenómeno de la combustión espacial o de llama y el la de masa o brasa se explican como uno a continuación del otro, en la realidad es que ambos fenómenos, al menos en los combustibles sólidos porosos, se suelen dar en forma conjunta.

La combustión empieza como un proceso de combustión espacial o de llama por la pirolización del combustible (salvo casos especiales), y en la medida que se da la carbonización de la madera se le suma la combustión de masa o brasa, que termina siendo el último proceso de combustión que "sobrevive" cuando a la madera no le alcanza la cantidad de gases combustibles que piroliza como para mantener una combustión espacial. La combustión termina como una combustión de masa o brasa.

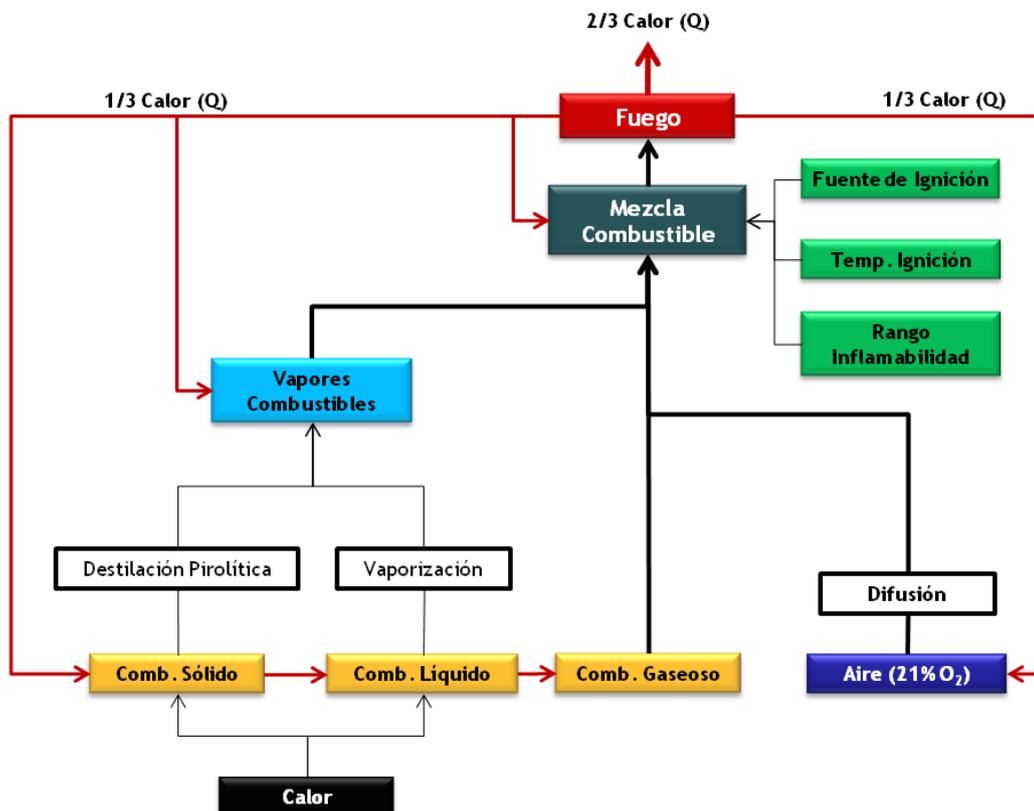


Una Brasa Ideal



Después de la combustión de la capa exterior, se produce una capa de carbón.

El siguiente es un esquema que representa los elementos del proceso de la combustión y sus relaciones.



3) ¿QUE ES LA COMBUSTIÓN?

La combustión es una reacción química de óxido-reducción exotérmica y autoalimentada con presencia de un combustible en fase sólida, líquida y/o gaseosa, que se desarrolla a alta temperatura y con una alta velocidad de reacción.

Una combustión puede describirse de una manera muy general como una reacción química de oxido-reducción que se desarrolla con generación de suficiente calor como para mantener la mínima temperatura necesaria para que la reacción prosiga.

El proceso está generalmente (aunque no necesariamente) asociado con la oxidación de un combustible por el oxígeno atmosférico del aire, con emisión de luz.

La combustión necesita altas temperaturas y las reacciones deben sucederse de modo tan rápido que generan calor a mayor velocidad de la que se disipa. De este modo, la zona de reacción no se enfría. Si se hace algo para alterar ese equilibrio de calor, como aplicar un refrigerante, es posible que se apague la combustión. No es necesario que el refrigerante elimine el calor con la misma velocidad con que se genera, pues la zona de combustión pierde durante el incendio parte del calor, que se transmite a los alrededores más fríos. En algunos casos sólo se necesita una pequeña pérdida adicional de calor para inclinar el proceso hacia la extinción.

La extinción se puede conseguir enfriando la zona de combustión gaseosa o el combustible sólido o líquido. En este último caso, el enfriamiento evita la producción de vapores combustibles.

Como alternativa a la eliminación del calor de la zona de combustión para ralentizar las reacciones, también se puede reducir la temperatura de la llama modificando el aire que suministra el oxígeno. El aire contiene un 21% de oxígeno en volumen, siendo el resto prácticamente sólo nitrógeno, que es un gas inerte. El nitrógeno que llega a la llama junto con el oxígeno absorbe el calor, con el resultado de que la temperatura de la llama es mucho menor de lo que sería si se quemara sólo oxígeno. Si se añade al aire aplicado a la llama más nitrógeno o algún otro gas que no reaccione químicamente, como el vapor de agua, dióxido de carbono o una mezcla de productos de la combustión, el calor absorbido por estos gases inertes reduciría aún más la temperatura de la llama.

3.1) La Energía en la Combustión

De la energía puede decirse, que es la capacidad que se tiene para realizar un trabajo. De acuerdo con la fuente y forma de ésta podemos encontrar la energía química, mecánica, cinética, potencial, nuclear, etc.

La energía en los materiales es almacenada en su interior mediante la interacción de los átomos que componen las diferentes moléculas, en forma de energías de enlace, es decir, que la unión entre dos átomos constituyentes de un combustible, requiere una cantidad de energía necesaria para mantenerlos unidos y cuando estos son separados o reorganizados por algún motivo (como en una combustión), se puede liberar o requerir energía (calor), dando lugar a los procesos exotérmicos o endotérmicos respectivamente.

3.2) El Proceso Químico de Oxido-Reducción

Es bastante común pensar que la combustión es la llama y es un error, porque ésta es un producto de la combustión. La combustión es una reacción química que se desarrolla en el seno de la mezcla combustible o inflamable.

Para entender el proceso de la combustión con mayores detalles, es necesario manejar el modelo de oxidación-reducción de los materiales involucrados en una reacción química como la combustión; en el cual hay una transferencia de electrones de uno a otro, denominándose oxidación a la pérdida de electrones y reducción al fenómeno sufrido por el material que los recibió. Entonces en una combustión siempre habrá una parte que “dona” sus electrones y otra que los “recibe”, a las cuales se les llama Agente Reductor y Agente Oxidante respectivamente. Por lo tanto, en una combustión, el agente reductor es el combustible al ceder electrones y sufre una oxidación por la pérdida de estos; que son recibidos por el oxígeno generándole una reducción, lo que se puede resumir en el siguiente cuadro.

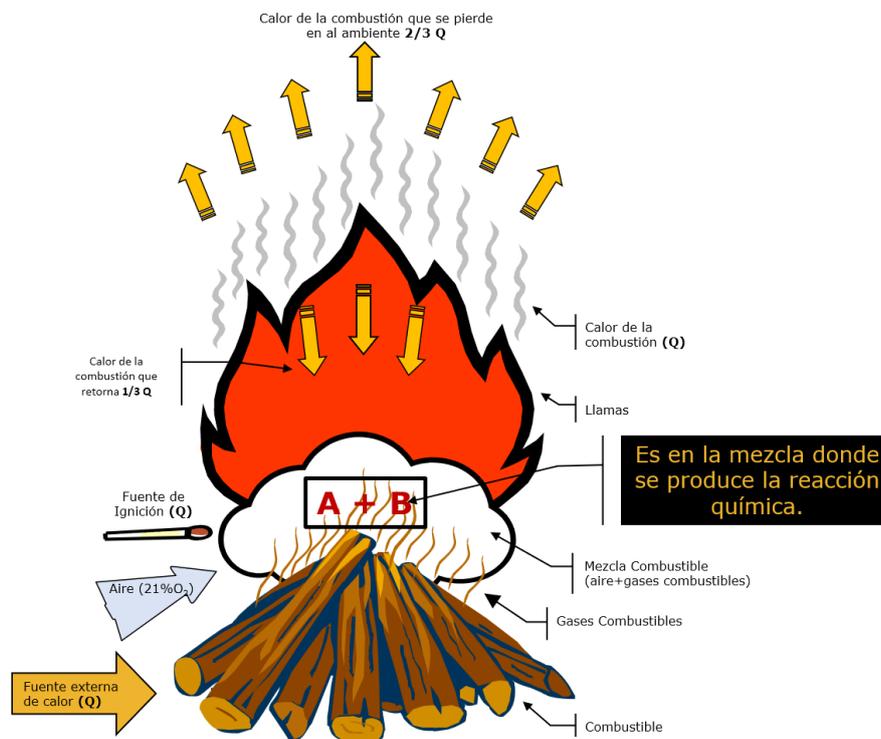
TIPO	AGENTE	ELECTRONES	FENÓMENO
Comburente	Oxidante	Gana	Reducción
Combustible	Reductor	Pierde	Oxidación

Si se modela la combustión según el intercambio de electrones o modelo de oxidación-reducción, se puede decir, por ejemplo, que el propano (combustible) es el agente reductor y el oxidante es el oxígeno del aire.

3.3) ¿Dónde se produce la reacción química de la combustión?

Quizás parezca una pregunta banal, pero es importante para comprender el proceso de la combustión.

Es en el seno de la mezcla combustible, donde se encuentran el aire con los gases combustibles, donde se produce la reacción química de la combustión.



3.4) Reacciones Oxidantes

Las reacciones oxidantes relacionadas con los incendios son exotérmicas, lo que significa que el calor es uno de sus productos. A menudo son reacciones complejas y no se conocen por completo. Sin embargo, se pueden formular algunas observaciones consideradas útiles.

Una reacción de oxidación exige la presencia de un material combustible y de un agente oxidante. Los combustibles son innumerables materiales que, debido a su composición química, se pueden oxidar para producir otros compuestos relativamente estables, como dióxido de carbono y agua. Por ejemplo:



Los hidrocarburos, como el propano (C_3H_8), constan únicamente de carbono e hidrógeno y se pueden considerar "combustibles prototipos". Prácticamente todos los combustibles corrientes, sean sólidos, líquidos o gaseosos, contienen importantes proporciones de carbono e hidrógeno.

El agente oxidante más corriente es el oxígeno molecular O_2 del aire, que consta aproximadamente 21% oxígeno y 79% de nitrógeno. A pesar de que el oxígeno juega un papel muy importante en la mayoría de los procesos de combustión, debe mencionarse que ciertos metales, tales como el calcio y el aluminio, pueden quemar en nitrógeno; que el óxido nitroso alimenta la combustión del fósforo, del carbón y de muchos otros elementos y aun hace que una ascua (chispa) se convierta en llama, del mismo modo que lo hace el oxígeno; y que los vapores del ácido nítrico causan que un ovillo de lana se envuelva en llamas.

Hay también un número de sustancias que se descomponen directamente al ser expuestas a temperaturas suficientemente elevadas en la ausencia de cualquier otro material. Ejemplos de estos materiales son la hidrazina (N_2H_4), el nitrometano (CH_3NO_2), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el ozono (O_3). Estos elementos incluyen algunos de los combustibles más conocidos para cohetes.

Aunque existen muchos ejemplos de reacciones exotérmicas en las que el oxígeno no se encuentra presente, no nos ocuparemos de ellas, sino que trataremos directamente con la forma más usual de fuego, es decir, aquel que involucra aire con varios combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

Hay ciertos productos químicos que son potentes oxidantes, como el nitrato sódico ($NaNO_3$) y el clorato potásico ($KClO_3$), que, si se mezclan íntimamente con un combustible sólido o líquido, producen una mezcla que reacciona fuertemente. Así, la pólvora es una mezcla física de carbono y azufre (el combustible) con nitrato sódico (el oxidante). Si los grupos reactivos, como el de los nitratos, se incorporan químicamente a un combustible, como el nitrato de celulosa o el trinitrotolueno (TNT), la mezcla resultante puede ser muy inestable y, en condiciones adecuadas, se descompondrá violentamente.

Hay circunstancias en las que intervienen especies reactivas en las que la combustión puede dar lugar sin oxígeno. Así, los hidrocarburos pueden "quemarse" en una atmósfera de cloro o el polvo de zirconio puede arder en dióxido de carbono puro.

3.5) Velocidad de Oxidación

La oxidación es un fenómeno muy común. A temperaturas ordinarias podemos observar que éste sucede a nuestro alrededor; por ejemplo, la oxidación de los metales, el secado de la pintura, el sostenimiento de muchas acciones bacterianas, la descomposición de sustancias vegetales, el deterioro de los alimentos, la fermentación del vino, y muchos otros. Por encima de todo, somos extremadamente conscientes de su importante papel en el asunto del metabolismo humano.

A temperaturas elevadas aumenta rápidamente la velocidad de oxidación, produciendo cantidades cada vez mayores de calor por unidad de tiempo, hasta alcanzar el nivel en que se sostiene a sí misma en el medio de reacción por el calor que produce.

Los niveles hasta los que se elevan las temperaturas de combustión dependen en gran parte de la naturaleza de los combustibles utilizados, los que pueden variar desde 1.093 °C para algunos alcoholes y hasta más de 1.700 °C para algunos metales combustibles, tales como magnesio, aluminio, etc.

Las distintas velocidades de oxidación hacen que estas se puedan agrupar en los siguientes tipos:

- **Oxidación Extremadamente Lenta:** Caso del papel que con el tiempo amarillenta.
- **Oxidación Lenta:** Una reacción lenta es una reacción entre el oxígeno y cualquier sustancia, que se produce a lo largo de semanas o meses. Esta reacción, que no es una combustión, produce calor, pero lentamente, de modo que la temperatura nunca sobrepasa en más de 6 a 7 grados la del entorno. Caso de una pieza de hierro que se recubre de óxido pardo rojizo.

Estas dos primeras no representan una combustión, aunque sean reacciones de óxido-reducción, dado que se producen a baja temperatura y a baja velocidad de reacción.

- **Oxidación rápida:** Sus efectos se perciben con emisión de calor, luz, gases, humos, entonces lo llamamos combustión. La diferencia entre una reacción de oxidación lenta y una reacción de combustión es que esta última ocurre tan rápidamente que genera calor más velozmente de lo que se disipa, causando una importante elevación de la temperatura de hasta centenares de grados, y a veces de miles. Con frecuencia, la temperatura es tan alta que en la zona de la combustión se produce una luz visible. Se produce con fuerte emisión de luz y de calor en forma de llamas y con una velocidad de propagación inferior a 1 metro por segundo.

- **Oxidación muy rápida:** La reacción se propaga a una velocidad que se acerca a la del sonido, generando calor, luz, humos, llamas y abundantes gases como producto de la reacción. Se llaman deflagración.

Se produce cuando existe una masa de gas combustible mezclada con una cantidad de aire que asegura su combustión, por la inflamación de polvos combustibles en suspensión, o también por líquidos combustibles nebulizados.

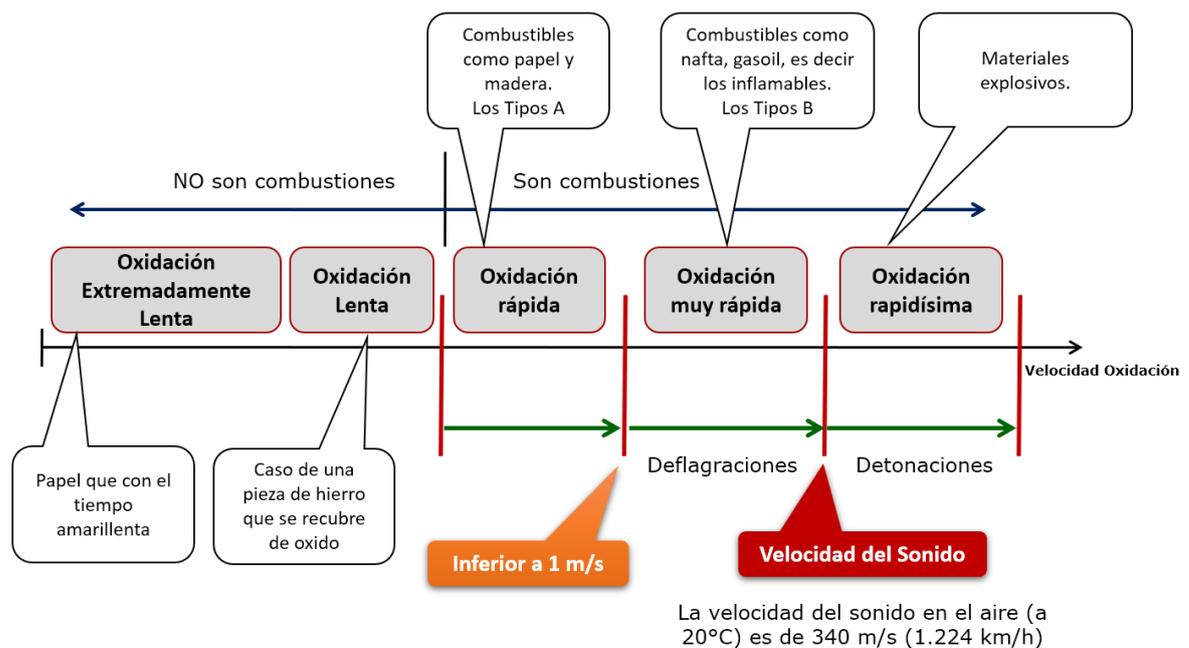
En la deflagración, la masa de gas arde súbitamente dando un frente de llama de alta temperatura (aproximadamente 1.700 °C - 1.800 °C) que se propaga como una bola de fuego a velocidad superior a 1 m/s e inferior a la velocidad del sonido (333 m/s).

Provoca la aparición de fenómenos de presión con valores comprendidos entre 1 y 10 veces la presión inicial, generando efectos sonoros o "flashes". Sus efectos sobre las personas no protegidas son de quemaduras graves causadas por la onda de radiación del frente de la llama.

- **Oxidación rapidísima:** La reacción se propaga a una velocidad superior a la del sonido (333 m/s).

Se llaman detonación y va acompañada por una onda de choque, es decir, una onda de presión mecánica que se produce como consecuencia de la propagación a la velocidad supersónica y se asocia y desplaza con el frente de llama.

En este caso, la combustión de la masa de gas se realiza en décimas de segundo, estando acompañada de la onda de choque de la explosión la cual, por su elevada presión (con valores que pueden superar en 100 veces la presión inicial), ocasiona daños sobre las estructuras próximas a ella, con pérdidas de bienes y vidas.



4) TEMPERATURAS DEL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN

Los nombres usados en este material de lectura pueden variar según el autor y las normas de referencia en la materia.

Las temperaturas que aparecen en el proceso de la combustión son las siguientes:

4.1) Temperatura de Ignición

Es la menor temperatura a la que hay que elevar un material combustible para que los vapores combustibles desprendidos formen con el aire una mezcla inflamable que se enciende al acercársele una fuente de ignición.

La combustión no continúa al retirar la fuente de ignición.

La ignición constituye el fenómeno que inicia la combustión. La ignición producida al introducir una pequeña llama externa, chispa o brasa incandescente (fuente de energía), constituye la denominada ignición provocada. Si la ignición no la provoca un foco externo, se denomina autoignición.

4.2) Temperatura de Inflamación

Si se continúa calentando el líquido combustible sobre la temperatura de ignición se encontrará una temperatura a la cual la velocidad de desprendimiento de vapores es tal que una vez que se inicia la combustión, la misma continúa sin necesidad de acercarse nuevamente la llama.

La temperatura más baja que necesita alcanzar un combustible para emitir vapores en proporción suficiente para permitir la combustión continua.

Puede definirse como la mínima temperatura a que una sustancia (sólida, líquida o gaseosa) debe ser calentada a fin de iniciar una combustión que se sostenga por sí misma, independientemente de las fuentes externas de calor.

4.3) Temperatura de Autoignición o Ignición Espontánea

Es la mínima temperatura a la cual debe elevarse una mezcla de vapores inflamables y aire, para que se encienda espontáneamente sin necesidad de la presencia de una fuente de ignición externa. Esta temperatura suele ser muy superior a las anteriores.

A título de ejemplo se transcribe una pequeña tabla con algunos valores de las temperaturas de ignición y autoignición:

PRODUCTO	Temperatura Ignición (°C)	Temperatura Autoignición (°C)
Aldehído acético	27	185
Alcohol etílico	21	378
Aceite castor	229	448
Kerosene	37	254
Nafta	7	260
Éter isopropílico	27	463
Acetato de metilo	9	501

La importancia de esta temperatura radica en que, si en una industria se procesa material combustible por encima de la temperatura de autoignición, un escape accidental de producto se enciende sólo sin que sea necesaria la presencia conjunta de la fuente de ignición, lo que convierte a este tipo de proceso en una situación en extremo peligrosa.

5) LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

5.1) Los Límites de Inflamabilidad y la Relación con la Combustión

Una de las condiciones necesarias para que se pueda dar inicio al proceso de la combustión es que la mezcla combustible o inflamable esté dentro del rango de inflamabilidad.

En la mezcla combustible o inflamable se encuentra el aire y los vapores o gases combustible que emite el combustible, llamados comburente y combustible, o agente

reductor y agente oxidante, que son los dos elementos que se necesitan para que se pueda dar la reacción química de combustión.

Para que éstas dos sustancias puedan reaccionar entre sí, es indispensable que ambas se encuentren en determinadas proporciones, y esas proporciones adecuadas se encuentran dentro del rango de inflamabilidad, definido por el Límite Inferior de Inflamabilidad y Límite Superior de Inflamabilidad.

Aunque hay mucha bibliografía que los denomina como "Límite Inferior de Explosividad, LIE" y "Límite Superior de Explosividad, LSE", ésta es un idea equivocada, dado que no se trata de productos explosivos, sino de materiales combustibles sólidos o líquidos que al calentarse emiten gases combustibles, o simplemente materiales en estado gaseoso combustibles en CNPT, que deben estar en determinadas proporciones con el aire para que se puedan combustionar.

Los límites inferior y superior de inflamabilidad no están solamente relacionados al concepto de materiales explosivos y/o explosiones, sino como ya se dijo, a una situación que deben reunir los materiales combustibles para poder dar inicio al proceso de la combustión.

5.2) ¿Cómo Entender los Límites Inferior y Superior de Inflamabilidad?

El gráfico o diagrama de inflamabilidad es una construcción muy particular de dos ejes, uno que representa a los gases combustibles y el otro al aire, que en vez de estar a 90° como una gráfico tradicional, están en forma paralela pero que se mueven en sentido contrario. El eje que representa a los gases combustibles empieza en el 0% y termina en el 100% y donde termina el 100% de gases combustibles, en forma paralela, comienza el 0% de aire que termina en el 100% coincidiendo con el 0% de gases combustibles.

Este gráfico representa todas las combinaciones posibles de aire y gases combustibles que pueden existir dentro de la mezcla combustible, empezando por un ambiente donde hay 0% de gases combustibles y 100% de aire, por ejemplo, cualquier habitación normal de una casa (parte izquierda del diagrama); hasta el otro extremo donde hay 100% de gases combustibles y 0% de aire, por ejemplo, el interior de un tanque de GNC (parte derecha del mismo diagrama).

Entre estos dos extremos están todas las combinaciones posibles que pueden darse dentro de la mezcla combustible, y su crecimiento o decrecimiento se representa con una línea diagonal, y dentro de estos extremos se encuentran ubicados los límites inferior y superior de inflamabilidad.

5.3) ¿Qué son los Límites Inferior y Superior de Inflamabilidad?

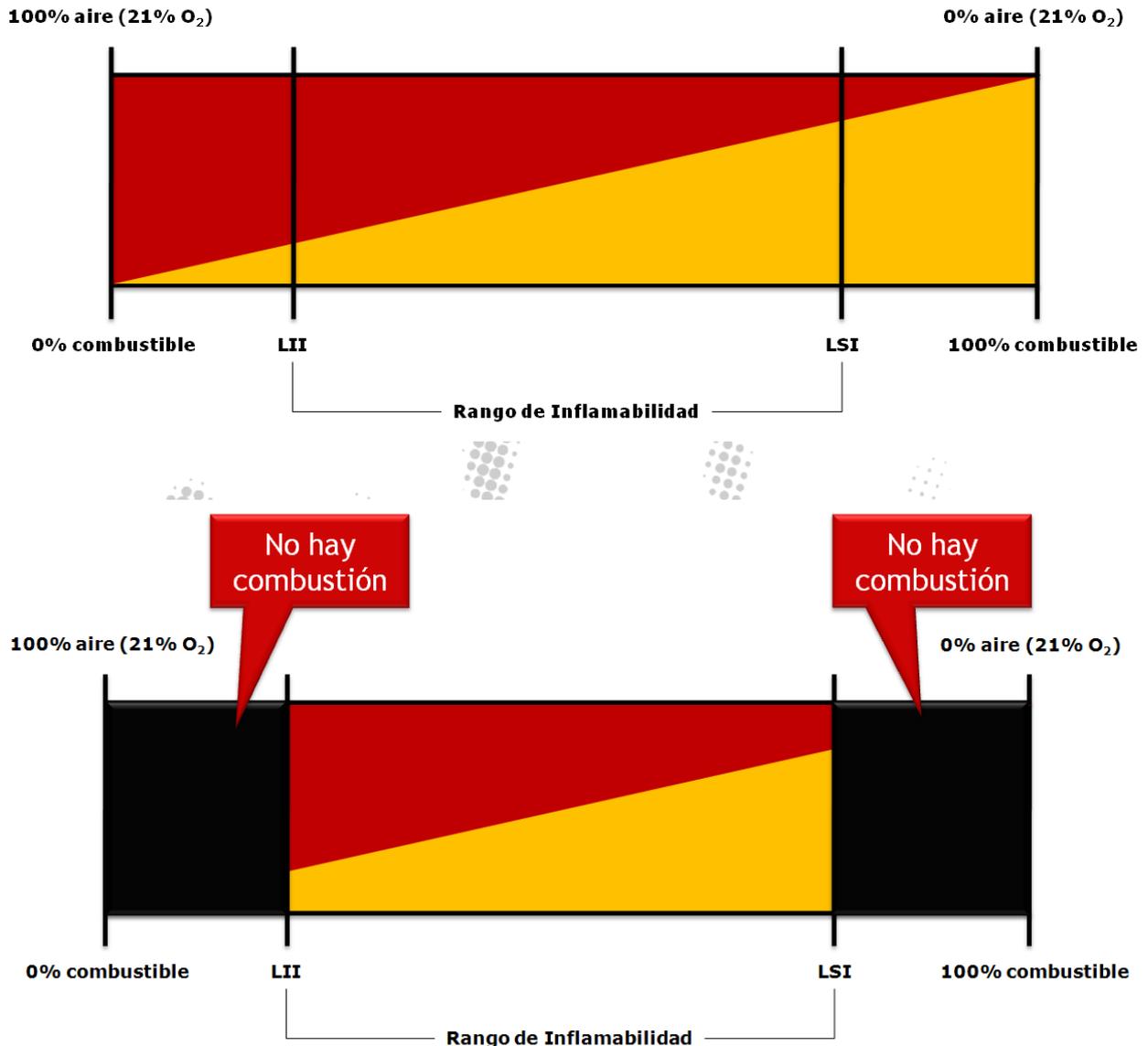
Son los límites mínimo y máximo de la concentración de un gas combustible dentro de un medio oxidante (oxígeno del aire), necesarios para que se pueda dar inicio al proceso de la combustión.

Por ejemplo, la mezcla de aire e hidrógeno que permite la combustión se da si la concentración de hidrógeno se encuentra entre el 4% y 74% en volumen, a 21° C y a presión atmosférica. La cifra menor corresponde al valor límite mínimo y la mayor al límite máximo de la inflamabilidad.

Así como el calor debe ser suficiente para que la mezcla combustible alcance la temperatura de ignición, la relación combustible-comburente (aire) debe estar dentro de los límites de inflamabilidad.

Estas proporciones se determinan como porcentajes en volumen de gas en aire. Por lo tanto, los porcentajes mínimos y máximos de gas o vapor combustible necesario para

formar la mezcla inflamable constituye el *límite inferior inflamabilidad (LII)* y *límite superior de inflamabilidad (LSI)*. La diferencia entre ambos límites define lo que se conoce como *rango inflamable*.



Si la concentración de gas metano en aire es menor de 2,2% no se produce la ignición por resultar la cantidad de gases combustibles insuficiente y por encima de 9,5% tampoco se produce la ignición por resultar la concentración con demasiados gases combustibles.

Se puede hablar en el mismo sentido, pero haciendo referencia al aire. Si la concentración de gas metano en aire es menor de 2,2% no se produce la ignición por resultar una excesiva cantidad de aire y por encima de 9,5% tampoco se produce la ignición por resultar la concentración con escasa cantidad de aire.

Es posible impedir la propagación de una llama en una mezcla de gases combustibles mediante un exceso de cualquiera de sus componentes.

En la práctica, si no se puede controlar la posibilidad de inflamación en una mezcla de gases, se puede prevenirla asegurando que la mezcla esté fuera de rango de inflamabilidad. La técnica de inertización constituye un ejemplo del tema que se está tratando.

Inertización significa el uso de un gas inerte para hacer que la atmósfera de un ambiente sea no inflamable. La inertización, en efecto, reduce el contenido de oxígeno a un porcentaje por debajo del cual no puede ocurrir la ignición, reemplazando el oxígeno con un gas inerte.

La técnica de trabajar en ambientes con exceso de combustibles, es decir, por encima del LSI, aunque teóricamente segura, no se emplea en la práctica por producir un ambiente NO seguro, dado que cualquier ingreso accidental de aire, que siempre existe en exceso introduciría nuevamente al ambiente dentro del rango de inflamabilidad; es más fácil controlar la ausencia de gases combustibles, que la presencia de aire.

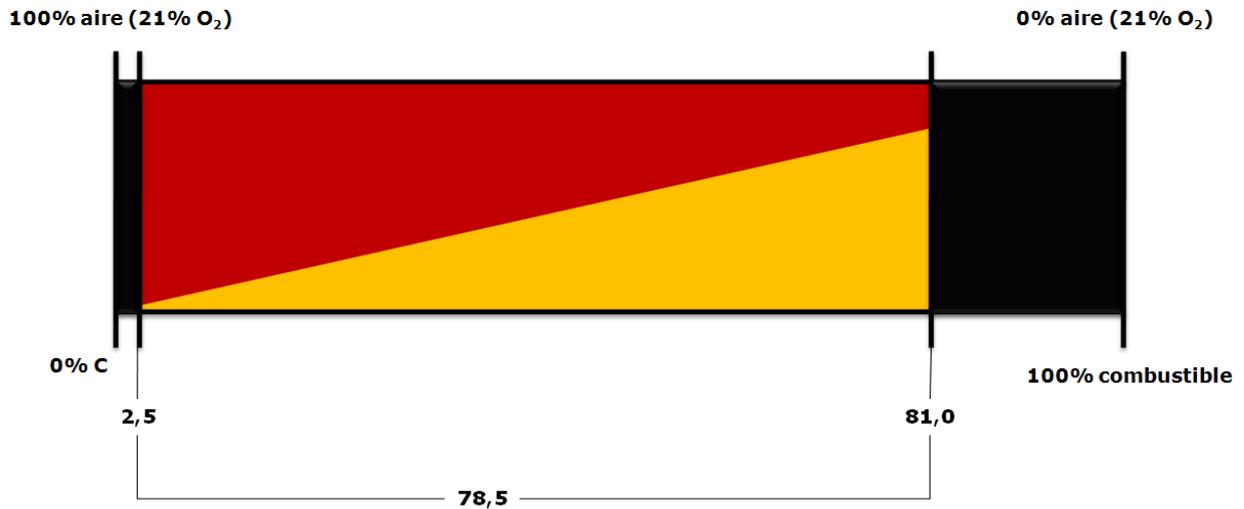
Limites Inferior y Superior de Inflamabilidad

SUSTANCIA	LII % en aire	LSI % en aire
Acetona	2,6	12,8
Acetileno	2,5	81,0
Alcohol Etílico	3,3	19,0
Gasolina	1,4	7,6
Gas Natural	3,8	13,0
Hidrógeno	4,0	75,0
Monóxido de carbono	12,5	74,0
Propano	2,2	9,5
Kerosene	0,7	5,0

Acetona



Acetileno



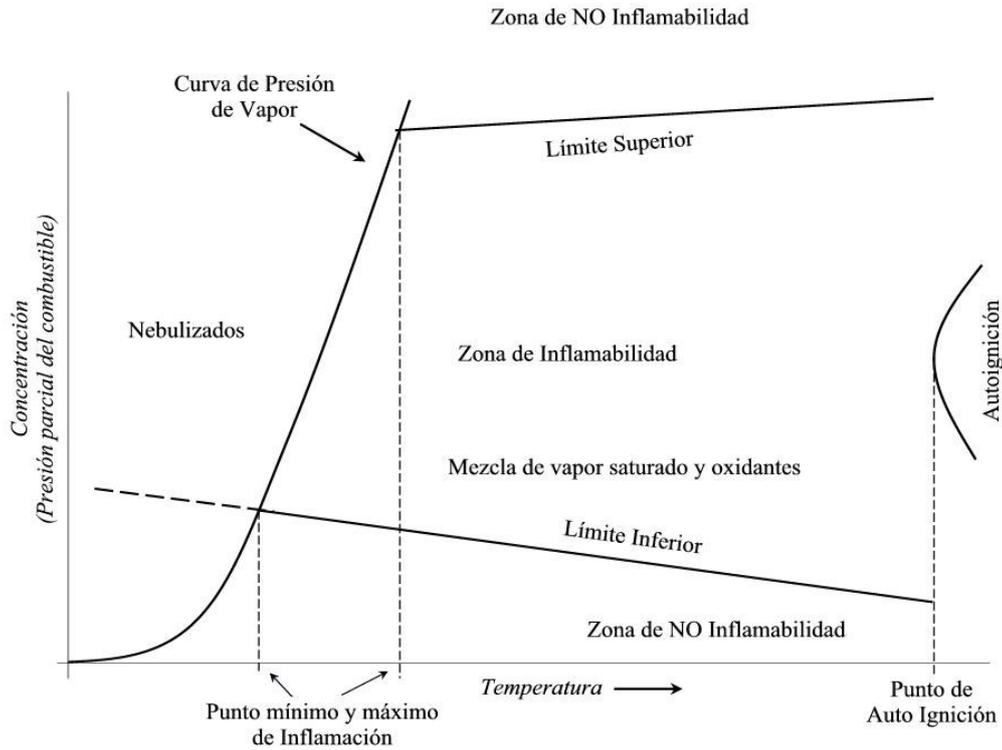
5.4) Variación de los Límites de Inflamabilidad

Al disminuir la temperatura, una mezcla combustible puede dejar de serlo, al quedar situada por encima o por debajo de los límites de inflamabilidad.

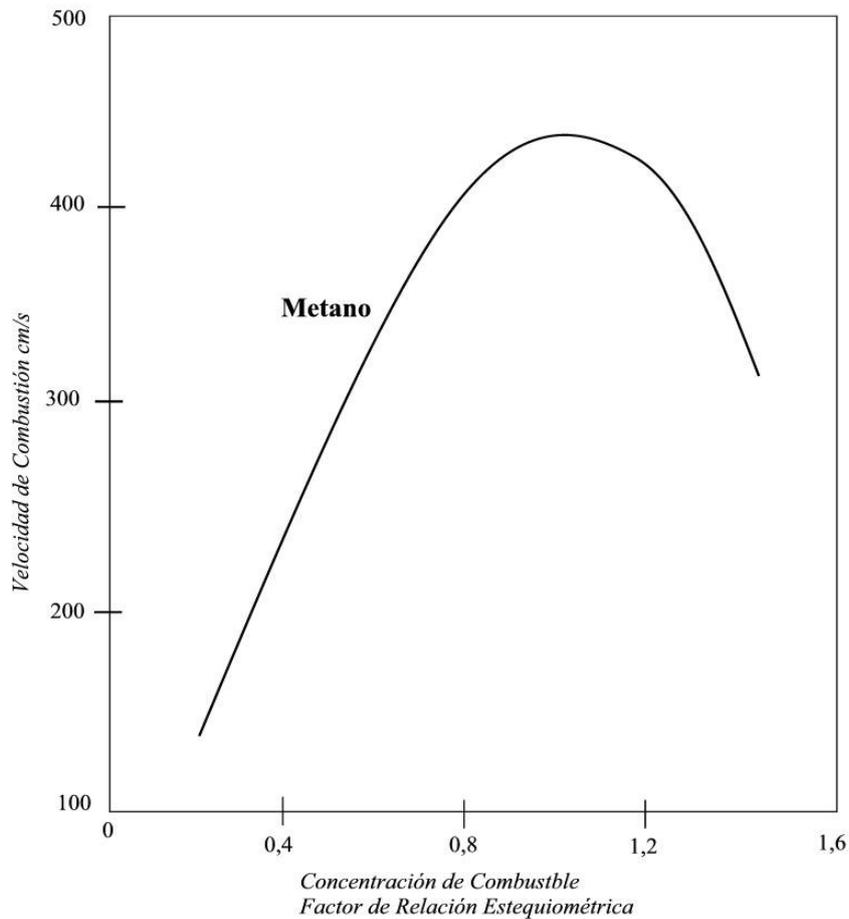
En general, al aumentar la temperatura y/o presión de la mezcla se ensancha el rango de inflamabilidad y aumenta la velocidad de combustión en el mismo.

Si los combustibles líquidos están en equilibrio con sus vapores en el aire, cada combustible presenta una temperatura mínima por encima de la cual hay vapores en cantidad suficiente para formar una mezcla inflamable de vapor-aire. Asimismo, hay una temperatura máxima por encima de la cual la concentración del vapor combustible es demasiado elevada para propagar la llama. Estas temperaturas mínimas y máximas son denominadas, respectivamente, temperatura mínima y máxima de inflamación en el aire. Si las temperaturas son inferiores a la temperatura más baja de inflamación, el vapor del combustible en la fase gaseosa no es suficiente para permitir la ignición homogénea. Las temperaturas de inflamación de un líquido combustible aumentan al hacerlo la presión ambiente.

En general, las mezclas de gases son más difíciles de encender cerca de los límites de inflamabilidad. La inflamación más fácil se obtiene un poco por encima de la relación estequiométrica. Dentro del rango de inflamabilidad se encienden con bastante facilidad.



Límites de Inflamabilidad en Función de la Temperatura



Velocidad de Combustión en función de la concentración

6) CONDICIONES Y ELEMENTOS PARA QUE SE INICIE LA COMBUSTIÓN

Las condiciones y elementos necesarios para que se produzca una combustión son los siguientes:

- Material comburente o agente oxidante.
- Material combustible o agente reductor.
- Calor suficiente para lograr que el material combustible desprenda gases o vapores combustibles, esto puede suceder a temperatura ambiente como en el caso de los líquidos inflamables.
- Lograr que la mezcla de los gases o vapores combustibles con el agente oxidante, llamada mezcla inflamable o combustible, alcance como mínimo la temperatura de ignición.
- Esta mezcla inflamable debe estar dentro del rango inflamable.
- Una fuente de ignición de energía suficiente para encender la mezcla inflamable.

7) LA NATURALEZA DEL FUEGO

Cuando se ponen en contacto dos o más sustancias en ciertas condiciones, éstas pueden combinarse entre sí obteniéndose sustancias diferentes. Se dice entonces que se ha producido una reacción química. Las reacciones químicas pueden ser de muy diferentes tipos o clases, siendo la reacción de oxidación la más importante al estudiar la naturaleza del fuego. Básicamente se define la reacción de oxidación como aquella que se produce al combinarse cualquier sustancia con el oxígeno. La corrosión es un ejemplo de reacción de oxidación.

Las reacciones químicas pueden ir acompañadas de fenómenos energéticos tales como luz, electricidad, etc., de todos estos fenómenos el más importante y evidente es el calor. Al producirse algunas reacciones éstas desprenden calor y reciben el nombre de exotérmicas. Por el contrario, existen reacciones que sólo se producen si reciben una determinada cantidad de calor, a éstas se las denomina endotérmicas.

El fuego no es más que la manifestación energética de la reacción química conocida con el nombre de COMBUSTIÓN. Se define la combustión como una reacción química de oxidación muy viva en la cual se desprende una gran cantidad de calor.

El proceso de la combustión es complejo. Cuando una sustancia combustible se calienta ésta desprende vapores o gases. Este fenómeno se conoce con el nombre de pirolisis. Estos vapores se combinan con el oxígeno del aire que en presencia de una fuente de ignición arden. Hasta este momento la combustión se ha comportado como una reacción endotérmica, es decir, necesita el aporte de calor para que pueda iniciarse. Una vez que estos vapores empiezan a arder, se desprende calor y la reacción es exotérmica. Si la cantidad de calor desprendida no es suficiente para generar más vapores del material combustible, el fuego se apagará, por el contrario, si la cantidad de calor desprendida es elevada, el material combustible seguirá descomponiéndose y desprenderá más vapores que se combinarán con el oxígeno, se inflamarán y el fuego aumentará.

Esta descripción del proceso de combustión es válida tanto si el combustible se encuentra en estado sólido como líquido. Los gases no necesitan calentarse, por este motivo los gases combustibles son muy peligrosos y su combustión muy rápida.

² *Extraído del Material de Estudio de la Materia Ingeniería de la Seguridad contra Incendios y Explosiones, de la Universidad de Cantabria, autor: Prof. Jorge A. Capote Abreu.*

En algunos combustibles sólidos, se observa que su combustión pasa por fases claramente distintas. Así, por ejemplo, al hacer arder un trozo de madera, durante un cierto tiempo su combustión se produce con llama, después la llama desaparece, si bien, la combustión continúa. A este tipo de combustión sin llama se la conoce con el nombre de incandescencia, también se la suele denominar combustión en fase sólida y se explica sobre la base del fenómeno de carbonización que experimentan algunos sólidos después de estar sometidos a un calentamiento durante cierto tiempo. Este tipo de combustión es muy lento, por el contrario, la combustión con llama es más rápida.

8) CURIOSIDAD MATEMÁTICA: COMBUSTIÓN SIN LLAMA NI CALOR, POR HUMBERTO SÁNCHEZ

Si se pregunta a un químico ¿Por qué la leña o el carbón arden únicamente a elevada temperatura? contestará que la combustión del carbono y el oxígeno tiene lugar a cualquier temperatura, pero cuando ésta es baja, dicho proceso transcurre con excesiva lentitud (es decir, en la reacción toma en parte un número insuficiente de moléculas), y por ello escapa a nuestra observación.

La ley que rige la velocidad de las reacciones químicas enseña que, al descender la temperatura en 10 °C, la velocidad de la reacción (el número de moléculas que forman parte de ella) se reduce a la mitad. Si se aplica ley a la reacción que se produce al oxigenarse la madera, esto es, el proceso de combustión de la madera ocurrirá la siguiente:

Un gramo de madera sometido a una temperatura de 600 °C se consume en un segundo. ¿Cuánto tardará en consumirse 1 gr de leña a la temperatura de 20 °C? Es sabido que con una temperatura de 580 °C = 58x10 grados menor, su reacción será 2^{58} veces más lenta, o lo que es lo mismo, un gramo de leña se consumirá en 2^{58} segundos.

¿A cuántos años equivale este lapso? Se puede calcularlo sin efectuar 57 multiplicaciones consecutivas en las que el multiplicador sea 2, y sin recurrir a una tabla de logaritmos. Es notorio que $2^{10} = 1024 \cong 10^3$ de lo que se deduce que:

$$2^{58} = 2^{60-2} = \frac{2^{60}}{2^2} = \frac{1}{4} \times 2^{60} = \frac{1}{4} (2^{10})^6 = \frac{1}{4} \times 10^{18}$$

es decir, aproximadamente la cuarta parte de un trillón de segundos, el año tiene cerca de 30 millones de segundos, o lo que es igual,

$$3 \times 10^7 \text{ segundos}$$

$$\frac{4}{3 \times 10^7} = \frac{1}{12} \times 10^{11} \cong 10^{10}$$

¡Diez mil millones de años!, esto es aproximadamente el tiempo que tomaría en consumirse un gramo de madera sin llama ni calor. Así pues, la madera y el carbón arden a la temperatura ordinaria, sin la intervención de instrumentos para obtener el fuego, aceleró este proceso, de enorme lentitud, en miles de millones de años.

9) EL TRIANGULO DEL FUEGO

El triángulo de fuego no explica cómo se produce la combustión, es un elemento didáctico que se usa para enseñar, y simboliza los mecanismos de acción sobre el fuego de los distintos agentes extintores.

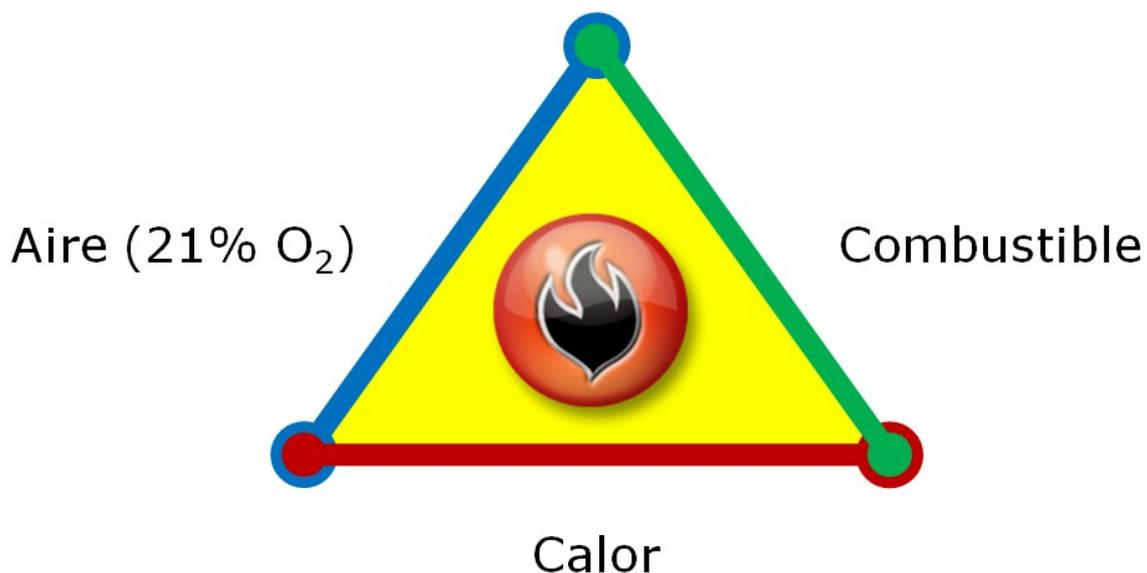
La combustión es representada por un triángulo equilátero en el que cada lado simboliza cada uno de los elementos básicos que se necesita.

Los lados de este triángulo son:

- 1.- Combustible
- 2.- Comburente/oxidante (oxígeno)
- 3.- Calor (no confundir con fuente de ignición)

De acuerdo con esta construcción el fuego se extingue si se destruye o rompe el triángulo, eliminando o cortando uno o más de sus lados.

La teoría de la combustión enseña que no es necesario eliminar o destruir los lados, sino, que alcanza con reducirlos, limitarlos o acortarlos.



Una llama de difusión puede extinguirse si el combustible se aísla del comburente (oxígeno), o sea, por medios físicos. El CO₂ es un ejemplo de agente que actúa fundamentalmente por su efecto bloqueador o sofocante.

Otro medio físico de extinguir un fuego lo provee el enfriamiento. Si la zona de la llama se enfría, la reacción que genera el calor pierde velocidad y puede llevarse hasta una condición tal que sea incapaz de generar suficiente calor como para mantenerse, lo cual produce la extinción.

Si se trata de un líquido en combustión, también el enfriamiento directo del líquido puede hacer disminuir su temperatura en grado suficiente como para que la producción de vapor

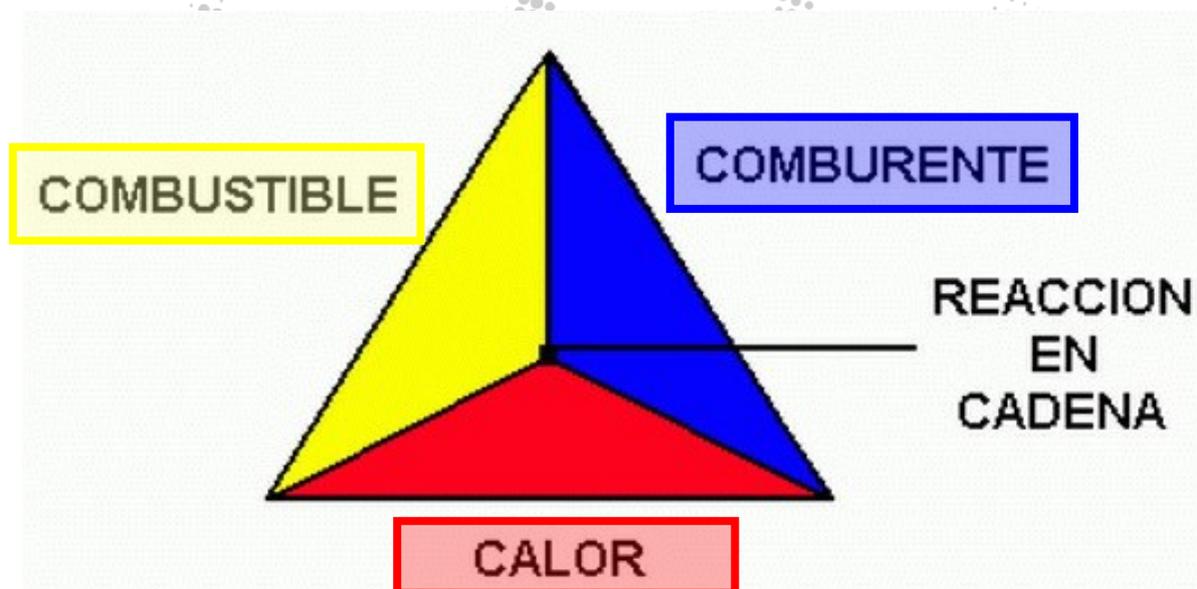
disminuya, lo que trae como consecuencia una disminución de la velocidad de evaporación del líquido hacia la zona de la llama. Este es asimismo un ejemplo de extinción física.

No obstante ser el triángulo de fuego de indudable valor didáctico, con el mismo no podían explicarse completamente algunas de las observaciones hechas en la práctica diaria. Por lo tanto, se estimó ampliar el modelo anterior incorporando un cuarto factor que contemplara la naturaleza química del fuego.

10) EL TETRAEDRO O CUADRADO DE FUEGO. LA TEORÍA MODERNA DE LA COMBUSTIÓN

En el año 1960 se propuso abandonar el popular concepto de triángulo de fuego cuyos tres lados: *calor*, *combustible* y *oxígeno*, prestó y presta excelente servicios como material didáctico utilizado para enseñar a combatir un fuego, y reemplazarlo por un tetraedro o cuadrado. El cuarto lado del cuadrado o la cuarta cara que aporta el tetraedro es "la reacción química en cadena".

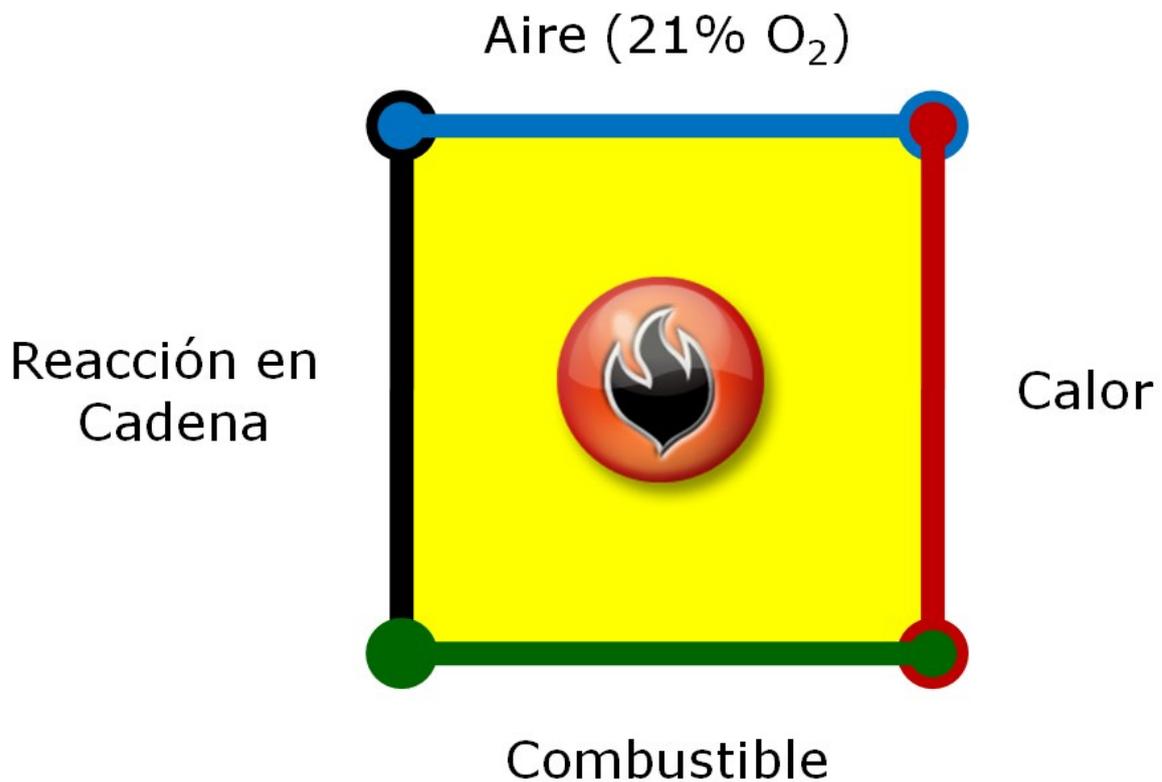
Sin suprimir el combustible, ni el calor, ni el oxígeno, es posible controlar un fuego. ¿Cómo? ¿Por qué?



Había muchos fenómenos anómalos que no podían ser completamente explicados, como las observaciones de que, en los agentes halogenados, el yodo es un agente extintor más eficaz que el bromo, que a su vez es más efectivo que el cloro. También se observó definitivamente que, entre las sales metálicas alcalinas, las de potasio son más efectivas que las de sodio. Otras observaciones revelaron que ciertos combustibles queman a una velocidad mucho mayor cuando están sometidos a emanaciones radioactivas. La amplia gama de velocidades de llama entre los diferentes combustibles, que van desde los alquitranes que queman a una velocidad baja hasta la extraordinaria naturaleza explosiva de las reacciones de hidrógeno y oxígeno, presentan problemas adicionales.

La variación de las energías mínimas de ignición, la existencia de llamas frías, la sensibilidad de las llamas a ciertas vibraciones sónicas y supersónicas, la acción extintora de las ondas de detonación y la inhibición de las reacciones explosivas por la presencia de algunos polvos inorgánicos en un estado suficientemente denso de suspensión de aire, son todos asuntos de la mayor importancia que deben ser explicados por medio de un "cuarto factor".

Muchos investigadores han llegado a muchas conclusiones, algunas de común acuerdo, otras contradictorias. En general, se ha descubierto la existencia de una reacción en cadena, tanto ramificada como sin ramificar, las que pueden llamarse la "sangre de la vida" del fuego. Lo mismo que el cuerpo humano necesita aire, alimento, temperatura normal del cuerpo y un sistema circulatorio, así el fuego necesita aire, combustible, temperatura de llama adecuada y un sistema de reacciones en cadena.



Por consiguiente, se necesita de una nueva representación que comprenda las condiciones necesarias para tener fuego, en la forma de un tetraedro.

Como el tetraedro es también una construcción didáctica, se puede utilizar la figura de un cuadrado que es mucho más fácil de dibujar en plano y por consiguiente de visualizar. El objetivo didáctico queda igualmente cumplido: el fuego se extingue si se destruye o desarma el cuadrado, eliminando o cortando algunos de sus lados.

11) COMBUSTIBLE O AGENTE REDUCTOR

Un combustible es en sí un material que puede ser oxidado, por lo tanto, en la terminología química es un agente reductor, puesto que reduce a un agente oxidante cediéndole electrones a este último.

Se denomina combustible a toda sustancia que es capaz de experimentar una reacción de combustión reduciendo a una sustancia oxidante.

Son todas aquellas sustancias capaces de arder por medio de una reacción química con un comburente. Pueden ser sólidos, líquidos o gases.

Los combustibles pueden clasificarse, por su origen, en naturales y artificiales, y según su estado físico en sólidos, líquidos y gaseosos. No obstante, la combustión tiene lugar, normalmente, en fase gaseosa, por la vaporización previa de los combustibles (si no eran ya gases) o por su descomposición por el calor (pirólisis), dando sustancias combustibles en estado gaseoso. Es decir, el combustible como tal no arde, no arde el papel, ni la gasolina, sino que arden los gases desprendidos por el propio combustible al suministrarle calor.

Como ejemplos podemos mencionar:

- Carbón.
- Monóxido de carbono.
- Muchos compuestos ricos en carbón e hidrógeno (Hidrocarburos).
- Elementos no metálicos fácilmente oxidables tales como el azufre y el fósforo.
- Sustancias celulósicas, como madera, textiles, papel.
- Metales como aluminio, magnesio, titanio, sodio, etc.
- Los metales alcalinos como el sodio, potasio, etc.
- Solventes orgánicos y alcoholes en general.

12) COMBURENTE O AGENTE OXIDANTE

El comburente es un agente que puede oxidar a un combustible (agente reductor) y al hacer esto se reduce a sí mismo. En este proceso el agente oxidante obtiene electrones tomándolos de los combustibles.

La importancia de este elemento se centra fundamentalmente en la violencia con que se produce la combustión.

Como comburente típico se considera al oxígeno que se encuentra en el aire en una proporción próxima al 21% en volumen, pero cerca de depósitos de oxígeno o en almacenes donde existan botellas o botellones de oxígeno, en caso de fugas esta concentración puede aumentar.

Desde el punto de vista de incendio, el oxígeno del aire es el comburente principal, pues en casi todos los siniestros, el aire es el agente que alimenta el fuego.

Algunos ejemplos son:

- Oxígeno y ozono (generalmente del aire).
- Peróxido de hidrógeno.
- Los halógenos tales como el flúor, cloro, bromo y yodo (disminuyen según lo ordenado).
- Ácidos nítrico y sulfúricos concentrados.
- Óxidos de metales pesados, particularmente de aquellos que tienen valencia alta, tales como el dióxido de manganeso, dióxido de plomo, etc.
- Nitratos clorados, perclorados y peróxidos.
- Cromatos, dicromatos, permanganatos, hipocloritos e hipodromitos.

Incluso existen determinados combustibles que incluyen oxígeno como parte de su composición como por ejemplo la nitrocelulosa y otros que pueden liberar fácilmente

oxígeno en condiciones adecuadas como el nitrato de sodio, clorato de potasio y peróxido de hidrógeno, y que, por tanto, pueden arder sin contacto con el aire.

En una atmósfera pura de oxígeno se consigue hacer arder el hierro.

A pesar de que el oxígeno representa un papel muy importante en la mayoría de los procesos de combustión, se destaca que ciertos metales como el *calcio* y *aluminio*, por ejemplo, pueden quemar en una atmósfera de *nitrógeno* que ordinariamente es inerte.

También el *óxido nitroso* alimenta la combustión del *fósforo*, del *carbón* y de muchos otros elementos.

El *polvo de magnesio* puede arder en una atmósfera de *anhídrido carbónico* (otro gas inerte usado en la extinción de incendios), del mismo modo los vapores de ácido nítrico hacen que un ovillo de lana se envuelva en llamas.

13) FUENTE DE CALOR Y FUENTE DE IGNICIÓN

El calor es un tipo de energía. Su contribución al inicio de un fuego es tan importante que se dice que todo fuego comienza por el calor.

A la fuente de calor y de ignición por lo general se la subestima en los procesos de prevención de incendios, pero sin embargo juega uno de los papeles más importantes si se piensa que normalmente las empresas tienen por razones de producción, mantenimiento o simplemente decoración, materiales combustibles por doquier, y que este material combustible está rodeado del mismo aire que se respira, por consiguiente en esta situación sólo hace falta la presencia de una fuente de calor y de ignición en los momentos adecuados.

Hay que recordar que para que una combustión se inicie se necesita que el combustible desprenda vapores combustibles, esto se consigue mediante el calor. Para que la mezcla de vapores combustibles y oxígeno comience a combustionar se necesita una fuente de ignición que puede ser, un fuego, una chispa, un cigarrillo encendido, etc., es decir calor.

No hay que confundir entre *fuentes de calor* y *fuentes de ignición*, las funciones que cumplen ambas en el proceso de combustión son distintas e intervienen, además, en etapas diferentes del proceso; aunque una misma fuente pueda cumplir ambas funciones a la vez.

En ambos casos estamos hablando de elementos capaces de generar energía, que para el caso de una *fuentes de calor*, tendrá que ser la suficiente como por ejemplo para evaporar un líquido o pirolizar un sólido, mientras que si se trata de una *fuentes de ignición*, solo tendrá que tener energía suficiente para encender la mezcla de gases inflamables, y, por consiguiente, podrá ser de un valor energético mucho menor.

Para que un fuego se desencadene, el combustible ha de recibir calor para poder generar gases combustibles, y llegado el momento la mezcla inflamable necesitará de una fuente de ignición para encender. La mayoría de los edificios contienen de estos dos tipos de fuentes. Algunas son obvias, por ejemplo, cerillas o cocinas; otras la son menos, por ejemplo determinados productos químicos de uso doméstico.

Desde un punto de vista práctico, estas fuentes pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Fuentes mecánicas.
- Energía solar.
- Fuentes químicas.
- Combustión espontánea.
- Fuentes eléctricas.

- Contacto directo con gases calientes.
- Contacto directo con superficies incandescentes.
- Calentamiento gradual del combustible.
- Causas naturales.

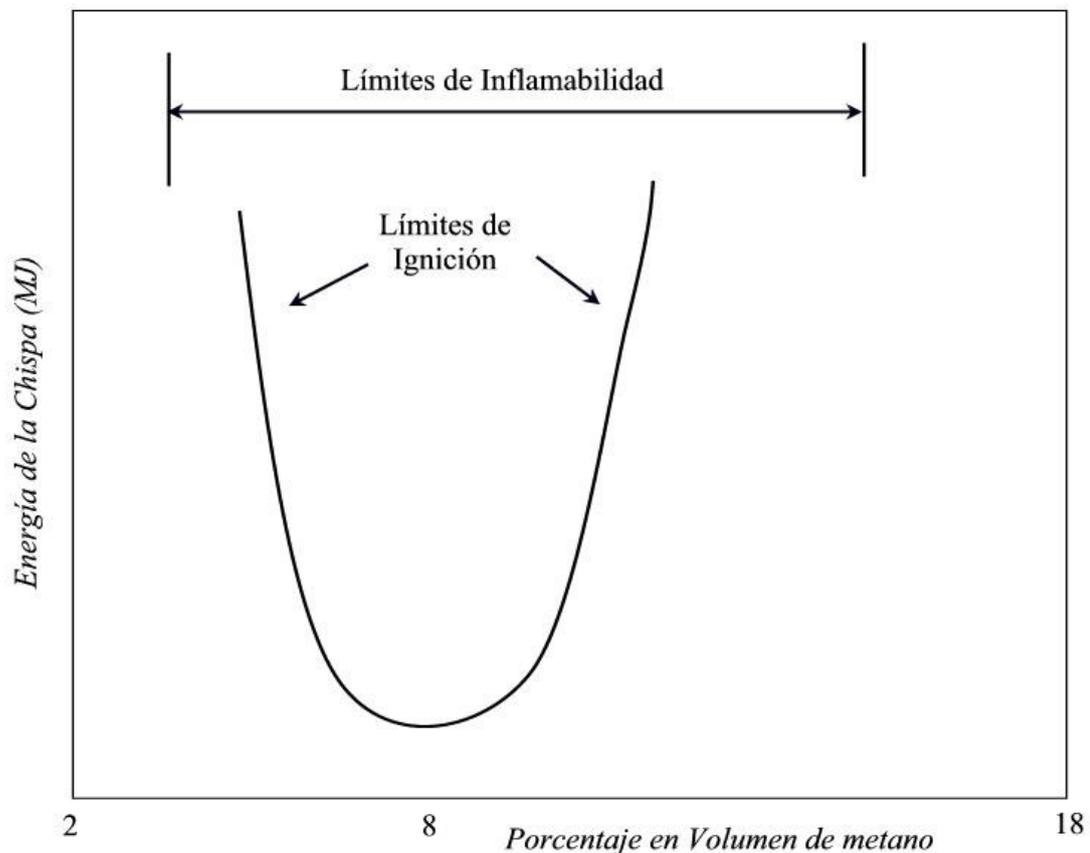
La identificación de las distintas fuentes de ignición es fundamental para prevenir el comienzo de un fuego, además, que constituye uno de los objetivos básicos de la investigación de un incendio.

13.1) Energía Mínima de Activación

Para que los vapores combustibles una vez mezclados con el oxígeno comiencen a combustionar se necesita una fuente de ignición que produzca una cantidad mínima de energía. A esta cantidad mínima de energía se la denomina energía mínima de activación.

La energía de activación es la que provoca la liberación de los electrones del combustible para compartirlos con los de oxígeno más próximo.

Esta energía puede producirse de diversas formas, por sobrecargas eléctricas, rozamientos, radiaciones, reacciones químicas, choques, etc., que pueden suministrar a los combustibles la suficiente energía, generalmente en forma de calor, para producir el fuego.



Energía de ignición en función de la concentración

13.2) Clasificación de las Fuentes de Ignición

Las fuentes de ignición se pueden clasificar en aquellas que son del tipo permanentes o fijas como por ejemplo una instalación eléctrica, un motor, una amoladora de banco; y las del tipo móvil como por ejemplo las chipas que genera una amoladora portátil, o el corte de acero con un equipo de oxicorte, etc.; y están las de los tipos transitorios no habituales o del tipo accidentales como por ejemplo un fumador en un área prohibida o un trabajo de soldadura sin autorización.

13.3) Calor Generado Mecánicamente

El calor generado mecánicamente se debe al calor de fricción. Se genera cuando dos superficies rozan entre sí. Por ejemplo, al frotarse las manos éstas se calientan porque el rozamiento produce calor mecánico.

La fricción, resistencia al movimiento, transforma la energía mecánica en energía calorífica. Dentro de este tipo de fuentes se pueden citar:

- Amoladoras.
- Cierras circulares.
- Lijadoras.
- Torneado de metales.
- Perforado de metales.
- Trabajos sobre metales en general.

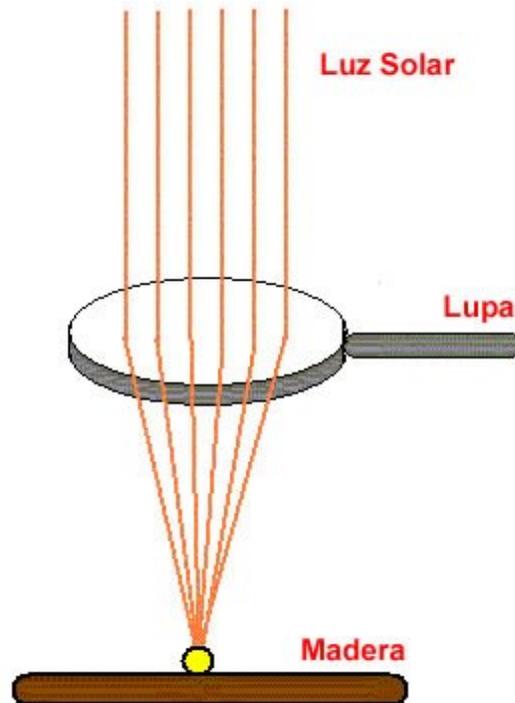
También dentro de este grupo se pueden catalogar o agrupar a las situaciones donde se producen chispas por impacto, como, por ejemplo:

- Uso de cortafrío, martillo, etc.
- El trabajo de los martillos metálicos sobre hormigón o acero.
- Todo elemento que genere chispa producto de golpes o rozamientos.

13.4) Energía Solar

Sólo existe una fuente de calor de este tipo: el Sol. El calor radiante de los rayos solares puede concentrarse sobre materiales combustibles mediante una lupa, una botella, un vaso de agua, el cristal de una ventana y prácticamente a través de cualquier objeto transparente que produzca el efecto lupa.

El efecto lupa es la concentración de los rayos solares en un determinado punto de un material combustibles por un elemento "óptico" como una lupa o cualquier objeto transparente o semitransparente que produzca la misma situación. Esta concentración de los rayos solares en un solo punto minúsculo aumenta la temperatura de ese punto, dando lugar al inicio del proceso de pirolización de un sólido combustible como el pasto seco en una pradera o bosque.



13.5) Calor Generado Químicamente

En una reacción química se combinan o reaccionan dos o más sustancias para formar otras nuevas. Algunas reacciones químicas, para que tengan lugar, requieren aportación de calor (endotérmicas). Otras desprenden calor cuando tienen lugar (exotérmicas). En este caso, puede generarse calor suficiente para calentar o encender mezclas inflamables en su proximidad. Adicionalmente, si cualquiera de las sustancias originales o productos de la reacción es combustible, también pueden resultar inflamados.

13.6) Combustión Espontánea

La combustión espontánea tiene origen en una coexistencia simultánea de agentes oxidantes y reductores en un medio térmicamente aislado que sirve para retardar la pérdida del calor de la reacción y favorece la elevación de temperatura la que, por medio de los bien conocidos axiomas químicos de que, las reacciones son dobladas en velocidad por la elevación de cada 5,6 °C, aumenta el calor y la temperatura de una manera continuamente creciente hasta alcanzar suficiente intensidad para pirolizar al combustibles y dando lugar a un incendio cuando ese combustible se expone al aire..

Una serie de materiales comunes están sujetos a combustión espontánea. Aceites naturales como los de vegetales y pescado (no los derivados del petróleo), algunos tipos de carbones vegetales y bituminosos, heno, forraje, cereales, semillas, etc. Estos materiales reaccionan lentamente con el oxígeno produciendo calor (la reacción es una combustión extremadamente lenta). Si la aportación de oxígeno no se limita, por ejemplo, almacenando el material en un contenedor metálico cerrado, y la zona no se ventila para eliminar el calor, se acumulará suficiente calor para inflamar el material.

Los trapos grasientos, situados en espacios abiertos y en calma, son particularmente propensos a la combustión espontánea; la grasa reacciona con el oxígeno generando calor, que termina por prender los trapos combustibles.

El césped recién cortado, colocado en un contenedor en una zona caliente, emite suficiente calor para auto inflamarse (incluso el contenedor, si fuese de material combustible).

13.7) Sustancias Incompatibles

El aceite de pino y el blanqueador clorado seco son productos químicos muy comunes en el hogar. El primero se utiliza para desodorizar cuartos, sótanos, zonas reservadas a animales, etc. El segundo es un aditivo que se utiliza en el lavado de la ropa. En muchas casas, todos los productos de la limpieza se almacenan en el mismo sitio. Cuando los dos productos mencionados se mezclan, reaccionan espontáneamente. Se genera calor y cloro, un gas muy tóxico y altamente oxidante. El calor desprendido en la reacción es suficiente para inflamar el cloro acelera la combustión de los combustibles adyacentes.

Muchos de los productos químicos frecuentes en edificios comerciales e industriales reaccionan violentamente entre sí. El potasio y el sodio reaccionan con el agua, desprendiendo suficiente calor para provocar la autoignición. Un cierto número de polvos metálicos pueden prenderse en contacto con aire húmedo.

Los productos químicos disponibles se cuentan por miles y sus combinaciones por millones. Resulta imposible recordar todas las mezclas que pueden provocar fuegos o explosiones. En estos casos es necesario solicitar la asistencia de un especialista en químico.

13.8) Calor Generado Eléctricamente

El calor producido por cableado, aparatos y equipos eléctricos provoca un gran número de fuegos. Sin embargo, en muchos otros casos se culpa, equivocadamente, a componentes eléctricos.

Las fuentes eléctricas se las puede dividir o clasificar desde el punto de vista de fuente de calor o de ignición en las siguientes:

- Equipos que producen descargas disruptivas.
- Cualquier proceso o equipos que genere electricidad estática.
- Calor producido por el paso de corriente eléctrica.
- Calor generado por equipos de iluminación.

Dentro de los equipos para tener en cuenta podemos citar:

- Transformadores.
- Tableros eléctricos.
- Cables.
- Interruptores.
- Lámparas eléctricas.
- Cortos circuitos.

- Motores eléctricos.
- Soldadoras eléctricas.
- Herramientas portátiles.
- Aparatos electrodomésticos.
- Resistencias.

El cableado eléctrico frecuentemente se ve envuelto en incendios, sobre todo porque abundan en la mayoría de los edificios. Cuando la fuente de energía es el cableado, el calor desprendido por los hilos conductores se transmite a través del aislamiento, inflamando combustibles próximos. Cuando un cableado se ve afectado por un fuego, pero no constituye la fuente de calor, el fuego le ataca desde el exterior. Esta situación genera dos tipos de daños distintos.

Indicios de ataque por fuego: Cuando un cableado eléctrico resulta atacado por un fuego, el aislamiento se funde o se quema. Cuando se enfría, se endurece y se adhiere al hilo, de forma que éste no puede girarse en el interior. Cuando el aislamiento se quema, el hilo de cobre adelgaza. Esto se debe al calor y posterior alargamiento o a la flexión ocasionada por su propio peso. Si el fuego resulto particularmente intenso, pueden observarse bolitas de cobre sobre el cable. El cobre fluye a una temperatura próxima de 1.082 °C y forma bolitas al enfriarse.

Indicios de calentamiento interno: El cableado instalado cuidadosamente según las normas establecidas, desprende muy poco calor. No obstante, puede sobrecalentar y provocar un fuego si está dañado, sobrecargado, el tamaño del hilo o fusible utilizados no son los correctos o se produce un cortocircuito. Cuando un cableado resulta dañado por calentamiento interno, el aislamiento empieza a quemarse desde el interior. En este caso queda suelto y desliza en sentido axial sobre el hilo de cobre; en este caso pueden verse burbujas sobre el aislamiento. El intenso calor en el interior del cableado provoca la formación de burbujas en el cobre. Estas dilatan y estallan, formando pequeñas bolitas de cobre que dejan perforaciones y puntos rugosos en el hilo conductor. Puede que los dos hilos se suelden entre sí. Los hilos de cobre que hayan perdido el aislamiento sufren cierta decoloración debido al calor. Esta varía del naranja al rojo, este último color indica la mayor generación de calor.

13.9) Otras Fuentes

- Instalaciones de gas como cocinas, calefones o calefactores.
- Calentadores de combustibles sólidos.
- Calentadores de gas.
- Calentadores de gasoil y kerosene.
- Calentadores de agua.

13.10) ³Incendios Ocasionados por Rayos

Este año se cumple el quinto aniversario de la catástrofe en la mina de carbón de Sago, West Virginia, donde fallecieron 12 mineros en el incendio con mayor mortalidad de los iniciados por un rayo en los Estados Unidos en casi 40 años.

Según la edición con fecha 3 de enero de 2006, de The Charleston Gazette, la explosión tuvo lugar alrededor de las 6:30 a.m., a sólo media hora de abierta la mina. De los 29 hombres que trabajaban en la mina, uno pereció en la explosión. Dieciséis pudieron escapar ilesos, y los 12 restantes, atrapados por el colapso, se resguardaron detrás de una barricada que construyeron para aguardar el rescate, según el informe de investigación elaborado por la Administración de Salud y Seguridad Minera (MSHA) del Departamento de Trabajo de los EEUU, División de Salud y Seguridad en Minas de Carbón.

Unas 41 horas luego de la explosión, los rescatistas finalmente pudieron alcanzar a los mineros atrapados, de los cuales solo uno sobrevivió.

El informe de la MSHA dice que la explosión ocurrió aproximadamente a 2 millas (3,2 kilómetros) de la entrada de la mina cuando un rayo impactó en un cable y lo siguió hasta adentro de la mina, donde encendió gas metano.

Este es sólo uno de los 24.600 incendios iniciados por un rayo que fueron reportados anualmente a los departamentos de bomberos de los EEUU en los cinco años desde 2004 hasta 2008, según un nuevo informe de investigación de la NFPA, Incendios Ocasionados por Rayos e Impacto de Rayos. Estos incendios causan en promedio, la muerte de 12 civiles, 47 lesiones a civiles, y \$407 millones de dólares de daños a la propiedad cada año.

“A pesar de que los incendios por rayos representan una porción relativamente pequeña del problema general de los incendios, las cifras aún continúan siendo importantes,” dice Ben Evarts, el autor del estudio. “Esto es importante para que la gente sepa, que, aunque el término se utilice habitualmente en conversaciones para hacer referencia a algo que es poco probable, es de hecho, un evento bastante común.”

No hay necesidad de decir que, los incendios que se inician con el impacto de un rayo en las profundidades de una mina son muy poco habituales. En promedio, el 74 por ciento de los incendios causados por rayos y que son informados anualmente a los departamentos de bomberos locales desde el año 2004 al 2008, ocurrieron en espacios exteriores. Los incendios forestales que se iniciaron por el impacto de rayos alcanzaron en promedio a unos 5,5 millones de acres (2.225.771 hectáreas) por año, o al 66 por ciento de los 8,2 millones de acres alcanzados por incendios forestales (3.318.422 hectáreas) al año, según el Centro Nacional de Incendios Interinstitucional. El incendio forestal promedio ocasionado por un rayo alcanzó los 500 acres (202 hectáreas), mientras que el incendio promedio iniciado por humanos alcanzó casi los 40 acres (16 hectáreas).

Sólo el 18 por ciento de los incendios iniciados por rayos desde 2004 a 2008 ocurrieron en el hogar. No obstante, dieron por resultado el 88 por ciento de las muertes asociadas de civiles en situación de incendio, el 77 por ciento de las lesiones por incendio a civiles, y el 70 por ciento del daño directo a la propiedad, cifras informadas anualmente a los departamentos de bomberos locales.

“Los incendios exteriores iniciados por rayos son mucho más destructivos en promedio, en términos del alcance de acres, que aquellos iniciados por causas humanas,” dice Evarts.

No sorprende, que los incendios por rayos y los impactos de rayos que no resultaron en incendios, son más comunes durante el verano que en cualquier otra época del año.

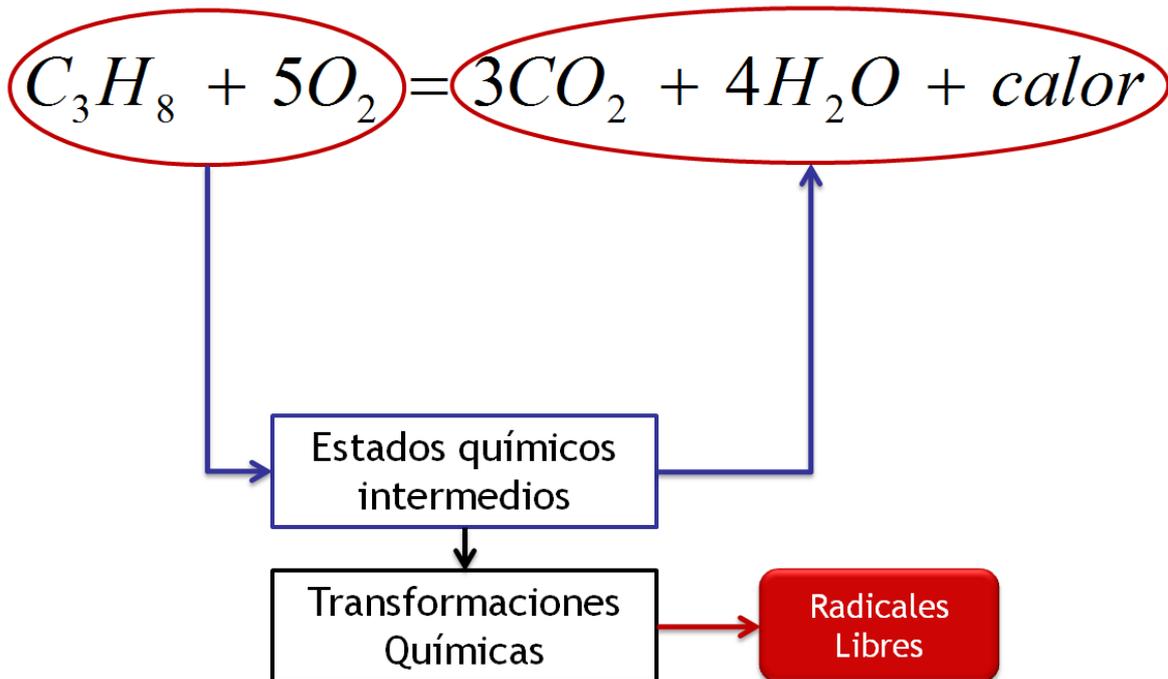
Alrededor de la mitad de todos los incendios ocasionados por rayos y casi tres quintos de los impactos de rayos que no causan incendios, se reportaron entre julio y agosto, y los

³ Extraído de www.nfpajournal-latino.com. Autor: Kathleen Robinson.

incendios por rayos tienen su pico hacia el final de la tarde y al anochecer. Un poco más de la mitad de todos los incendios iniciados por rayos ocurren entre las 3 y 9 p.m.

14) LA REACCIÓN EN CADENA

Entre el combustible o mejor dicho entre los gases combustibles sin quemar y el aire (21% de O₂) en sus estados primitivos y los productos de la combustión, hay, por decirlo de alguna manera, una serie de estados químicos intermedios.



El combustible sólo puede ser combustionado cuando llegue a zonas propicias por su temperatura y disponibilidad de aire (oxígeno), pero antes de acercarse al momento culminante en que debe ser combustionado, sufre una serie de transformaciones químicas que lo ponen en condiciones óptimas para la combustión.

Entre las diferentes transformaciones que sufre el combustible antes de llegar al seno de la combustión, hay una que vale la pena tener en cuenta por su importancia.

En la proximidad del frente de llama el combustible y el comburente (oxígeno) se transforman en lo que se denomina *radicales libres*, éstos reaccionan entre sí, y a su vez, reaccionan con combustibles nuevos. Este mecanismo es el que se llama *reacción en cadena*.

Si alguien se dedicase a capturar estos radicales detrás del frente de llama (o en el mismo frente), no llegarían a la zona de combustión en cantidad suficiente como para que la combustión mantenga su ritmo. Es decir, no sería necesario capturarlos a todos sino a un número importante para controlar el fuego.

Se comprende, entonces, que si existe la posibilidad de inhibir por este mecanismo las reacciones en cadenas previas a la combustión se abra encontrado un recurso químico de extinción del fuego.

14.1) ⁴Los Radicales Libres

El concepto de radicales libres se originó en el siglo pasado, cuando por primera vez los químicos orgánicos observaron que ciertos grupos de átomos dentro de una molécula, durante las reacciones químicas, parecían saltar de una molécula a otra. Cuando un radical se salía de una molécula, llegaba a ser libre. De allí su nombre. Pero al fin del siglo, en la medida que mejoraron los métodos analíticos, y no se pudo comprobar la existencia real de estos radicales libres, los científicos llegaron a dudar de su existencia.

Fue en el año 1900, que el químico Moisés Gomber, que trabajaba en la Universidad de Michigan, afirmó que había descubierto el primer radical libre. Mientras trataba de sintetizar un nuevo compuesto, había creado un radical libre, el radical trifenilmetil. A diferencia de todos los radicales que ahora sabemos que tienen una vida muy corta, este extraño radical era más estable, por lo que pudo estudiarse por los métodos químicos convencionales. Con todo, como sucede muchas veces en la investigación científica, este anuncio no tuvo mayor eco, sepultándose de nuevo los radicales libres por otros 30 años.

Fue durante la Segunda Guerra Mundial, en que Estados Unidos dejó de tener acceso al caucho natural del Sudeste Asiático y de la India, que los radicales libres tomaron de nuevo actualidad. Ello debido al rol clave de los radicales en la química de los polímeros. A partir de entonces se comenzaron a conocer las propiedades básicas de los radicales libres y las tremendas posibilidades en sus aplicaciones industriales. El desarrollo de polímeros, como el neopren (una goma sintética) y la química de los plásticos, dieron un gran soporte a la investigación de esta área, y el rol que los radicales libres jugaban en el proceso de polimerización.

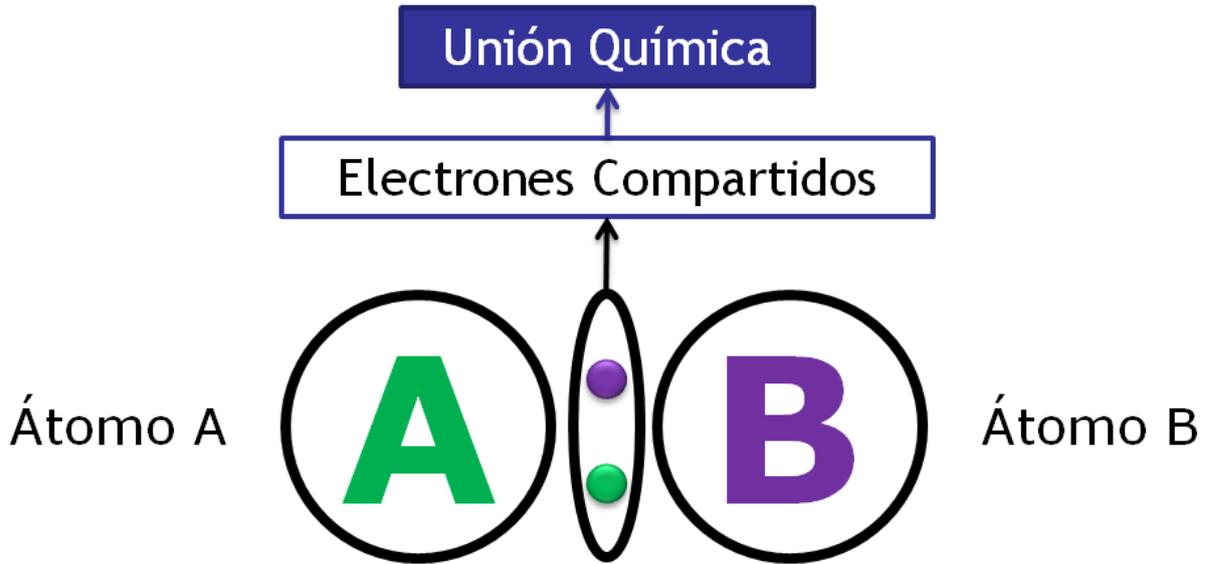
Entre los años 1940 y 1960, con el desarrollo de la energía nuclear y el estudio del efecto de las radiaciones (que son mediadas por reacciones de radicales libres), despertó un enorme interés por conocer más acerca de ellos. De allí comenzó el interés por conocer las funciones de estos radicales en toda la biología celular. Más tarde, el fantástico desarrollo de la electrónica permitió fabricar instrumental que pudo detectar lo efímero de los radicales libres, que existían por tiempos tan cortos como mil millonésimas de segundos. ¡Con razón antes nadie los había podido detectar!

La Naturaleza Efímera de los Radicales Libres

¿Qué son los radicales libres? ¿Es efectivo que están en todas partes de nuestro medio ambiente? ¿Cómo es que están ellos comprometidos en tantos procesos diferentes? Ha sido el conocimiento de las propiedades básicas de estos radicales lo que nos han ayudado a contestar estas preguntas.

Por ejemplo, consideremos una molécula hipotética, consistente en un átomo A y un átomo B, expresada en esta forma **A:B**, en este caso, los dos puntos entre los dos átomos indican la unión química entre ellos, compuestas por un par de electrones que los comparten ambos átomos.

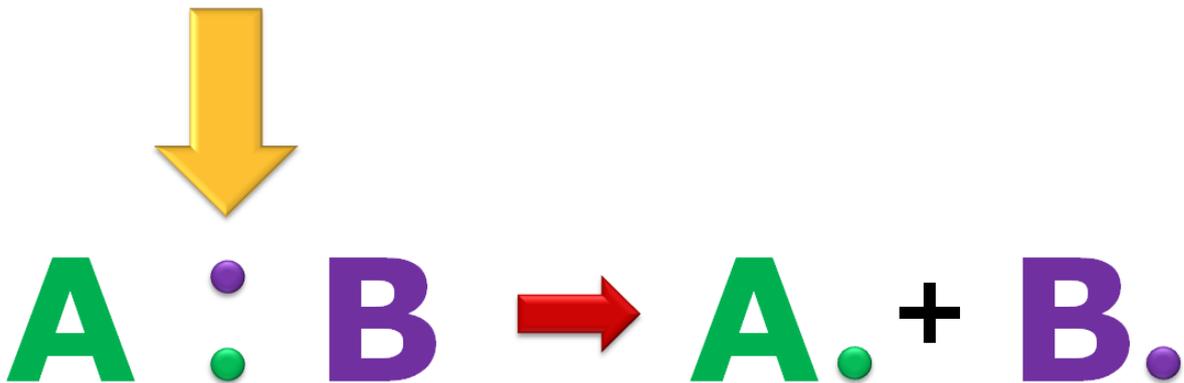
⁴ Resumen y adaptación realizado del artículo “Los Radicales Libres: Los Manipuladores de la Química”, material extraído de www.creces.cl (Publicado en Revista Creces, Enero 1998).



Molécula Hipotética

Bajo condiciones muy extremas, como una temperatura muy alta o una exposición a radiaciones, esta unión puede quebrarse, produciéndose así dos radicales libres separados: **A.** y **B.**, en que cada uno queda con un electrón no apareado.

Fuente de Calor



¿Qué significa un electrón no apareado? Todo átomo a molécula estable tiene electrones apareados, y el número total de electrones que participan en las uniones son siempre así. Los radicales libres, por el contrario, tienen un número inusual de electrones y son inestables, en un estado de alta energía. El radical libre, en estas condiciones, busca a toda costa otro electrón para poder aparearse. Es esta intensa búsqueda la que hace a estos radicales libres extremadamente reactivos. Tan pronto como este radical choca con una molécula u otro radical, captura o comparte un electrón y desaparece rápidamente de la reacción.

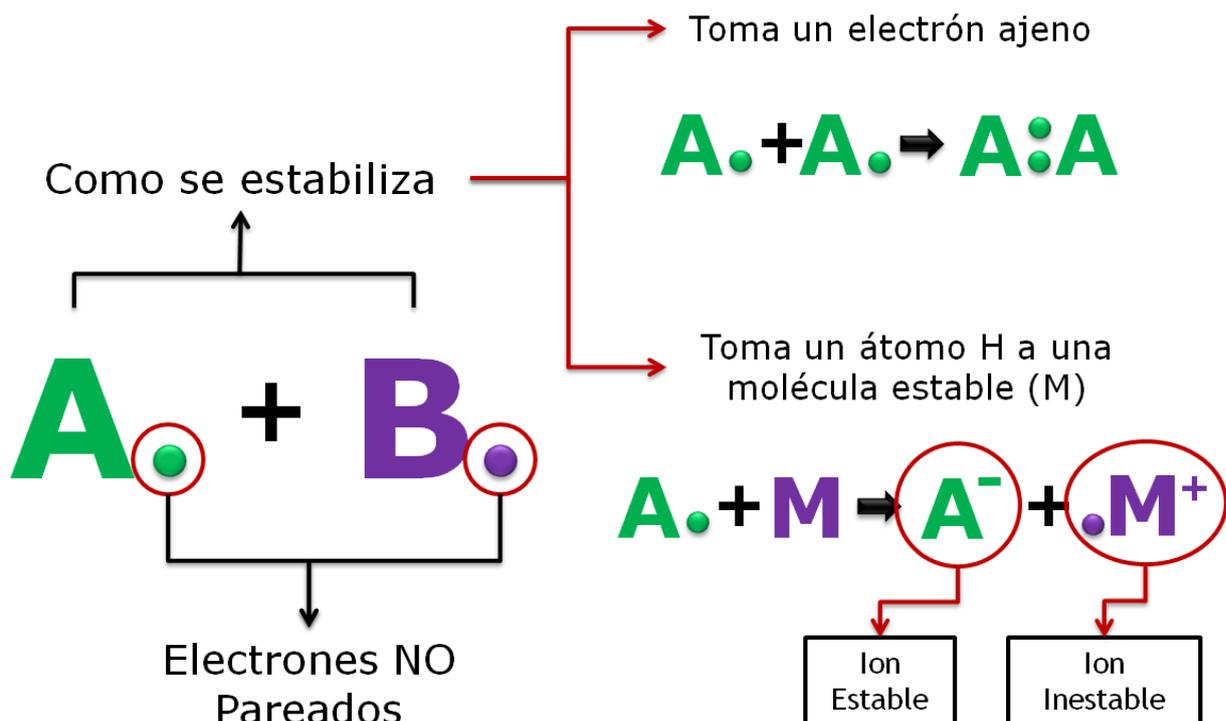
En otros tipos de reacciones, los radicales libres pueden combinarse entre sí y de este modo se quedan tranquilos, porque forman una molécula estable, al combinar ambos electrones no apareados.



Pero el poder destructivo de estas reacciones se manifiesta cuando un radical libre actúa robando un electrón. En esta forma, él se estabiliza tomando un electrón ajeno o un átomo H a una molécula estable (**M**), que puede tener uno o muchos átomos de hidrógeno.



En esta reacción, el radical **A.** llega a ser un ion estable, y la molécula **M** pasa a ser inestable, es decir un radical ion **M.** muy reactivo. Este tipo de proceso de auto perpetuación es el que hace especialmente dañino a los radicales libres.



En resumen, podríamos definir un radical libre "como un átomo o una molécula que presenta uno o más electrones desapareados". Debido a la necesidad de los radicales libres de alcanzar el pareamiento de los electrones, se considera que ellos pueden comportarse como agentes "oxidantes" o "reductores", ya sea que actúen substrayendo o aportando electrones a otro átomo o molécula.

Otras reacciones en cadena semejantes se producen en las llamas de cualquier elemento que contenga hidrógeno. El hidrógeno se encuentra en la gran mayoría de los combustibles, excepto en los metales y el carbono puro.

La capacidad de los átomos de hidrógeno de multiplicarse rápidamente en una llama depende de la temperatura de esta, que se modifica debido a la pérdida de calor o a los gases inertes. Este proceso es el que lleva a la extinción. También es posible eliminar átomos de hidrógeno u otros elementos activos de la llama, por medios puramente químicos, es decir, aplicando otro elemento capaz de producir una inhibición química.

Según todo esto, hay dos medios fundamentales de reducir la intensidad de la combustión de una llama y, en último término, producir su extinción: reducir la temperatura de la llama o aplicar un inhibidor químico que interrumpa la reacción en cadena.

La temperatura de la llama es muy importante, porque la velocidad a la que se produce esta reacción en cadena es muy sensible a la temperatura. Un pequeño descenso de la temperatura causa una reducción proporcionalmente mucho mayor en la velocidad de la reacción, según la Ley de Arrhenius.

14.3) Más sobre los Radicales Libres y la Combustión

En un FORO de debate denominado [ASASI] cuya dirección de e-mail es asasi-colombia@gruposyaho.com se produjo un debate denominado "La reacción en cadena y los extintores", y de ahí se han sacado algunos aportes interesantes que amplían y pueden ayudar a entender mejor el tema.

"El inicio de la combustión en presencia de oxígeno es difícil ya que requiere de mucho aporte de energía por la configuración atómica del O_2 que es muy estable (por los spines alineados). Entonces, cuando se suministra la energía apropiada, se forma un estado de oxígeno molecular excitado que reacciona fácilmente con las moléculas del combustible, que generalmente se encuentran en el mismo estado cuántico. Cuando este oxígeno excitado reacciona con las moléculas del combustible se genera calor, lo cual sirve de energía de excitación para otras moléculas de oxígeno presente en el aire y para liberar las moléculas del combustible, creándose una cadena. Ésta es la famosa reacción en cadena que nombramos en la teoría del fuego.

Resulta que los agentes extintores, como el bicarbonato de sodio, el monofosfato de amonio, el bicarbonato de potasio, los HCFCs y otros, lo que hacen es interferir en la reacción al inhibir la reacción, por reaccionar químicamente con el oxígeno excitado, no permitiendo que lo haga con las moléculas del combustible. Esta reacción no genera el calor requerido para la excitación del oxígeno y se rompe la cadena." Aportado por: Luis A. Jordan.

"Las reacciones en cadena como su nombre lo indica no son más que una serie creciente (dependiendo de los factores) de pequeñas reacciones químicas que se dan en la llama y que realmente se fundamenta en la producción final de hidrógenos. La reacción en cadena no es la que produce el calor, esta requiere el calor para producirse, lo que si permite es la liberación creciente de 3 átomos de hidrógeno que son la base para iniciar la siguiente reacción, valga la pena aclarar con O_2 , O , además, de OH , y como subproducto encontramos agua en estas pequeñas reacciones.

La reacción en cadena se puede detener mediante la introducción de otros elementos que permitan una reacción distinta y que finalmente termine en otro resultado distinto a la liberación de los tres hidrógenos que normalmente encontraríamos en esta (que es lo que hacen la mayoría de los extintores como el de HCFC, el Halon y los demás halogenados);

pero no es del todo erróneo pensar que estos agentes extintores con su poca capacidad de enfriamiento, de cierta manera pueden actuar en la reacción en cadena enfriándola, el cual es otro método para detenerla, (recordemos que es una reacción y además requiere calor) esto explicado mejor en la ley de Arrhenius y ese ejercicio es fácil de verificar enfriando la llama que es donde se está produciendo la reacción en cadena." Aportado por: Juan Carlos Caicedo.

14.4) La Combustión Explicada desde los Radicales Libres

Para que el proceso de combustión se convierta en autosostenido, las moléculas de combustible y oxígeno se deben excitar hasta un estado activado, lo que resulta en la formación de especies intermedias altamente reactivas llamados radicales libres.

Estos radicales libres inician reacciones rápidas en cadena ramificadas, que convierten el combustible y el oxígeno en productos de la combustión, con la liberación de calor. La reacción en cadena se autosostendrá en tanto la velocidad de formación de los radicales iguale o exceda su velocidad natural de eliminación o descomposición.

15) EL ESTADO DEL ARTE DE LA COMBUSTIÓN

Del mismo FORO y del mismo debate mencionado anteriormente, un colega escribió un excelente resumen sobre el tema combustión, el que se transcribe parcialmente:

"Revisando la literatura se llega a la conclusión (expresada por ellos mismos) que si bien es cierto se ha avanzado muchísimo en el conocimiento del fenómeno de la combustión todavía hay aspectos soportados por hipótesis bien estructuradas, pero no definitivas en su comprobación científica, pero todos ellos están de acuerdo en que hay elementos comunes de alta credibilidad basada en la investigación y las evidencias. En algunos de ellos se tiene claro el QUE, pero aún hay dudas en el COMO. Podemos resumir el "estado del arte" con algunos paradigmas:

- a) Un incendio es un fuego fuera de control.
- b) El fuego es una combustión.
- c) La combustión es una oxidación rápida exotérmica.
- d) La oxidación es un proceso de intercambio de cargas eléctricas (REDOX) donde el reductor suministra electrones y el oxidante capta los electrones (se reduce).
- e) Aunque en la mayoría de las veces una reacción REDOX se efectúa en presencia de oxígeno (por ser un elemento predominante en la atmósfera) puede llevarse a cabo en ausencia de Oxígeno.
- f) Aunque una gran mayoría de combustibles son ORGÁNICOS (Contienen carbono) muchos otros no lo son, por lo tanto, los mecanismos y productos de combustión varían.
- g) Hay combustiones superficiales (Incandescencia) y hay combustión de gases en el aire (Llamas).
- h) Las temperaturas de las llamas no son necesariamente proporcionales al calor de combustión de los elementos que se queman.
- i) La llama se inicia y mantiene a través de las "Reacciones Químicas en Cadena" entre los RADICALES LIBRES presentes. Estos radicales varían en función de los agentes

reductores y oxidantes que participan en el proceso por lo que no siempre se incluye H u O.

- j) Hay múltiples maneras de “apagar” un fuego dependiendo de sus condiciones y de los elementos que usemos para ello: Eliminar el combustible, eliminar el Oxidante (ya sea aislándolo, o diluyéndolo a proporciones menores a las requeridas para una mezcla estequiométrica), disminuyendo el calor ya sea del elemento que arde o de la llama (dos efectos distintos), o interrumpiendo (inhibiendo) la reacción química en cadena.
- k) Los procesos de extinción pueden ser tanto de orden físico como de orden químico.
- l) Para muchos de los llamados agentes extintores la manera en que actúen no es completamente conocida, aunque hay bases y modelos que plantean hoy de manera creíble como se supone que lo hacen (Estado del Arte, a sea la verdad relativa al nivel actual el conocimiento).
- m) Los polvos químicos secos extinguen el fuego por una mezcla de efectos primarios y secundarios: Se plantea que el método primario de extinción es la INHIBICIÓN de las reacciones químicas en cadena interfiriendo con los radicales libres de la llama; esta inhibición no necesariamente se debe a que los componentes activos del PQS (Sodio, Potasio, etc.) reaccionan con los radicales pues generalmente actúan como CATALIZADORES NEGATIVOS.

Como complemento a lo anterior el PQS tiene efectos secundarios menores en la extinción absorbiendo calor y diluyendo la concentración de oxígeno mediante la nube de polvo. Pero la acción mayor y efectiva de extinción es mediante INHIBICIÓN de las reacciones químicas y por eso apagan tan rápido.

- n) Los HALONES actúan fundamentalmente por INHIBICIÓN de reacciones y esto es lo que hace la diferencia entre este agente y los demás. La capacidad de interferir con las reacciones dependerá en gran parte del HALÓGENO contenido en su molécula (Flúor, Cloro, Bromo, Iodo, etc.) siendo el Bromo el que mayor capacidad ha demostrado en su acción inhibidora.
- o) Los llamados “Agentes Limpios” (Debe cumplir requisitos: Que sean gases o sean líquidos vaporizantes, que no tengan acción dañina sobre la atmósfera – ODP -, que sean no conductores de electricidad, que tengan toxicidad limitada y que no dejen residuos) actúan de diferente manera sobre el fuego dependiendo de su composición: Algunos como el INERGEN (Mezcla de gases inertes) tienen efecto físico de ahogar el fuego; otros tienen acción similar a los HALONES (Inhibición de reacciones) mientras otros enfrían la llama como resultado de reacciones químicas endotérmicas de tal manera que el nivel de energía requerido para mantener el proceso no se tenga. La manera como actúe cada agente se refleja en la relación de masa-volumen requerida para extinguir el fuego. Mientras en algunos casos la concentración de agente a aplicar supera el 60% en otros se puede lograr con proporciones del 7 o 10%.

Como colofón vale la pena contar que la INHIBICIÓN de la reacciones químicas no solo se puede lograr mediante agentes químicos, sino que también se ha demostrado en pruebas de laboratorio que puede llevarse a cabo mediante ondas de detonación, ondas sonoras o campos eléctricos.”

Autor: César A. Duque

16) ⁵PARA ENTENDER LA COMBUSTIÓN

Desde el momento en que los seres humanos se dieron cuenta que tenían que quemar unas ramas para calentarse o para cocinar sus alimentos, el fuego pasó a ser imprescindible en sus vidas. Hoy más del 90% del calor y del poder que se necesita, es generado por combustión, y prácticamente todo el sistema de transporte depende de ello. Cada año, las estufas y los hornos del mundo consumen más de mil millones de toneladas de carbón. En el año 2000, sólo las líneas aéreas de Estados Unidos quemaron cada día más de 250 millones de litros de kerosene de aviación.

Pero las necesidades de satisfacer las demandas masivas de energía entran en conflicto con la preocupación del medio ambiente. Es así como quemando combustible fósil se producen grandes cantidades de dióxido de carbono, el que incrementa el efecto global de calentamiento de la Tierra. También se liberan contaminantes peligrosos, como óxido de nitrógeno y hollín. Los científicos, para poner límite a estas emisiones, están tratando de comprender la complejidad de la combustión, para llegar a desarrollar nuevas tecnologías que aseguren un uso del combustible más limpio y eficiente.

La combustión es un proceso químico que, para que ocurra, requiere de dos ingredientes básicos: un combustible, como el gas, el petróleo o el carbón, y un oxidador, generalmente oxígeno del aire. A ellos se le agrega una pequeña cantidad de energía (como por ejemplo una llama o una chispa) y así se puede gatillar una reacción exotérmica (que libera calor), con lo que rápidamente se libera la energía atrapada en las uniones químicas del combustible.

Pero la combustión no es un proceso químico ordinario. Una vez que se inicia, se mantiene a sí misma. Esto la distingue de la mayor parte de las reacciones químicas, y se debe principalmente al hecho de que parte de la energía liberada por la combustión, calienta el combustible a su alrededor. Este proceso de "feedback" incrementa el ritmo de la reacción y mantiene la combustión en marcha.

También, a diferencia de otras reacciones químicas, la reacción de combustión es visible, gracias al humo y las llamas. Las llamas se producen cuando una gran cantidad de energía liberada genera luz. El ejemplo más familiar de una llama es probablemente la que se produce en una vela encendida. Esta clase de llama se denomina "llama de difusión" porque el oxígeno del aire se debe difundir a través de la región de combustión, mientras el vapor del hidrocarburo tiene que difundir hacia fuera de la mecha.

A principio del siglo XIX, el científico inglés Michael Faraday, hizo uno de los primeros estudios detallados de la llama de la vela. Observó que el calor irradiado de la llama fundía la cera, permitiendo que ésta, como un líquido empapara la mecha. Una vez dentro de la mecha, el calor vaporizaba la cera líquida. Aquí la temperatura de alrededor de 1.000 °C rápidamente descomponía la cera en fragmentos más pequeños y reactivos.

Estos fragmentos comienzan a reaccionar con oxígeno, descomponiéndose cada vez a cadenas más y más pequeñas, generando gases, vapor de agua y pequeñas partículas sólidas, constituidas por carbón no quemado u hollín, al que llamamos "humo". En esta llama, el mayor ritmo de reacción, como también la zona de mayor calor y emisión de luz, ocurre cerca de la superficie externa de ella, ya que es allí donde el combustible hidrocarbonado se encuentra con el oxígeno.

Parte de la luz, principalmente la naranja y la amarilla, se produce por partículas de hollín incandescente que se generan durante la combustión. El área más roja, cerca del centro de la llama, alcanza una temperatura de 800 °C. La región naranja y la amarilla son más calientes que eso, alcanzando una temperatura sobre 1.400 °C.

⁵ Resumen y adaptación realizado con material extraído de www.creces.cl (Publicado en Revista Creces, Junio 2002). Autor: John Griffiths. Profesor de Química de la Combustión. Universidad de Leeds.



Además, algunas de las moléculas creadas por la combustión, cuando se forman, ganan considerable energía. Esta energía es absorbida por sus electrones, que luego la remiten como fotones. El resultado es el color azul visto en la base de la llama de la vela, revelando que, en esta región, el oxígeno se está mezclando con el combustible para causar una elevada reacción exotérmica.

Algunas de las formas de combustión más comúnmente usadas se basan en llamas de difusión, como las estaciones generadoras eléctricas que queman partículas de carbón pulverizado, o los motores diésel en los autos y camiones, que queman combustible dispersado como un aerosol de finas gotas. Este tipo de llama también se produce en la superficie de combustibles sólidos como el coque, la turba y la madera cuando se queman en estufas o en fogatas abiertas.

Con todo, las llamas de difusión no son muy eficientes en el uso del combustible. Para optimizar la eficiencia de la combustión, maximizando la liberación de calor, y manteniendo la producción de humo y contaminantes en un mínimo, deben previamente mezclarse el combustible con el oxígeno, antes que comience la combustión, a un nivel molecular.

A mediados del siglo XIX, un químico alemán llamado Robert Bunsen tuvo una idea para mejorar la eficiencia de la combustión. Se le ocurrió combinar un chorro de gas inflamable con el aire, antes que se prendiera. El concepto fue concretado en el "Mechero Bunsen", que produce una llama extremadamente caliente. En la actualidad, la premezcla de aire dentro de un chorro de gas natural (que consiste principalmente de metano) es la mejor forma de lograr quemadores eficientes para las cocinas domésticas, sistemas de quemadores y hornos industriales.

La estructura de una "llama de premezclado", es muy diferente de una llama de difusión. La zona de reacción principal y la región que quema azul más brillante está dentro de la llama. La llama misma es cónica, ya que su forma está determinada por la moldura circular del quemador. La reacción de combustión se mantiene a sí misma debido tanto a la conducción del calor, como a la difusión de especies químicas reactivas como radicales libres, desde la llama en el interior de la mezcla más fría y el aire que circula hacia arriba. Ya que el combustible se quema más eficientemente en la llama de premezcla, se forma menos hollín y produce muy poca incandescencia amarilla.

Máxima Eficiencia. Receta para la Combustión Compuesta

Para la máxima eficiencia, el vapor de petróleo debe estar mezclado con la cantidad precisa de aire para así permitir la combustión completa hasta dióxido de carbono y agua. Si no hay suficiente aire, no se quema todo el combustible, reduciendo la producción total de calor, el nivel de quemado y la fuerza del pistón. Por otra parte, si hay mucho aire, entonces el exceso absorbe algo del calor causando otra vez que disminuya la fuerza del motor.

En la práctica, la llama de un combustible dado puede sólo sostenerse bajo un rango estricto de condiciones. Este rango está determinado por la temperatura, la presión y la relación combustible-aire. Los dos extremos de este rango, dependiente de esas condiciones, se llaman límites de inflamabilidad, que puede variar de "pobre" a "rico". Es pobre, cuando hay suficiente combustible como para encender la llama y es rico cuando hay suficiente presencia de aire. Para la mezcla octano en aire, estos límites son por volúmenes, entre 1 y 6% respectivamente.

Los límites de la inflamabilidad no sólo determinan lo más ancho del rango de la relación combustible-aire en la que un motor puede operar, sino también ayuda a evaluar el riesgo de fuego o explosión en los procesos industriales o manufactureros que usan líquidos o gases inflamables. Así, por ejemplo, dejando caer un fósforo encendido en el estanque cerrado de un automóvil, es muy poco probable que este explote, porque en este caso la mezcla de vapor y aire es demasiado rica en combustible como para que explote, a pesar de lo que se ve en las películas.

17) TIPOS DE FUEGO

Desde el punto de vista de la forma en que se exteriorizan, los fuegos pueden tipificarse en dos grupos a saber:

17.1) De Superficie o Sin Llama

Según lo implica su nombre, no es una combustión en el espacio, sino estrictamente una combustión de la superficie que tiene lugar a los mismos niveles de temperatura como si se tratara de llamas abiertas.

Este tipo de fuego también recibe el nombre de brasa, superficie (porque se quema la superficie del combustible sólido), de masa (porque se quema la propia masa del combustible), incandescencia, rescoldo, etc., su característica fundamental es la ausencia de llamas. Así es como se quema un cigarrillo. Los muebles tapizados con relleno de borra de algodón o espuma de poliuretano pueden arder también de esta manera. Un montón grande de virutas, aserrín o carbón puede estar ardiendo así durante semanas o meses.

La combustión de superficie se limita generalmente a materiales porosos que pueden formar una escoria carbonosa al calentarse. El oxígeno del aire se propaga lentamente entre los poros del material y dentro del mismo se produce una zona de reacción brillante, aunque este brillo no se vea siempre desde el exterior. Estos materiales porosos son malos conductores del calor, de modo que, aunque la reacción de combustión se produce lentamente, conservan suficiente calor en la zona de reacción para mantener la temperatura elevada necesaria para que la reacción continúe.

No es raro que, si un mueble tapizado se quema, se produzca una combustión incandescente que dure varias horas. Durante ese tiempo la zona de reacción se extiende sólo entre 5 y 10 cm desde el punto de ignición y después, de repente, el mueble se puede

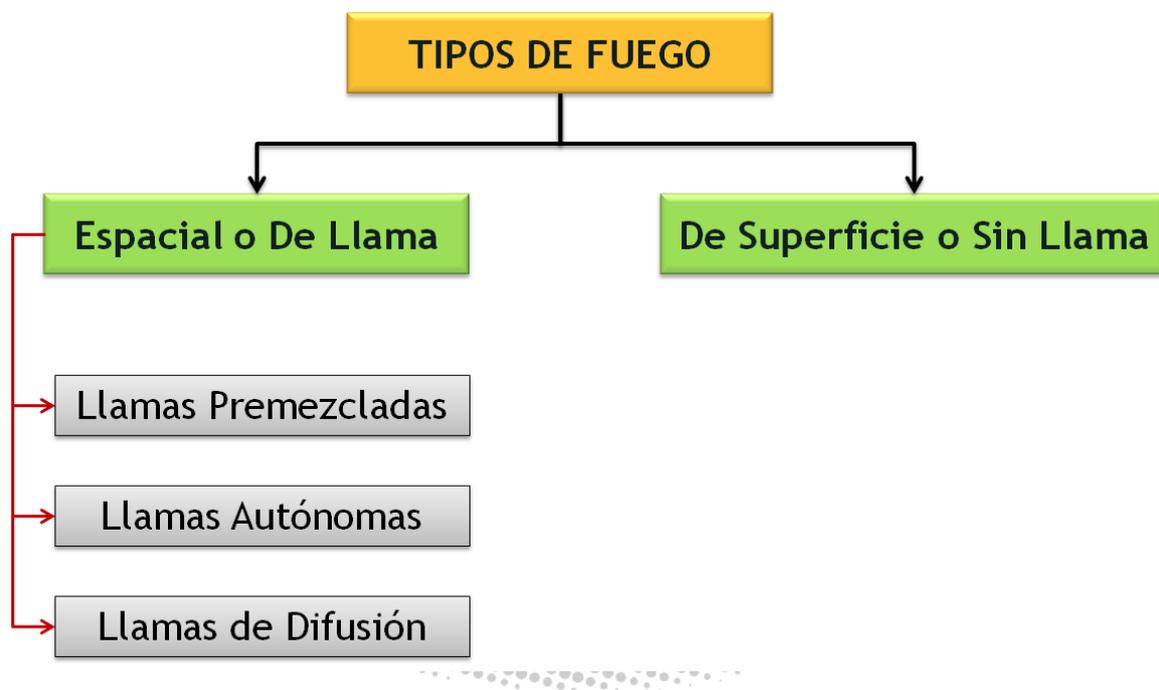
ver envuelto en llamas. La velocidad de la combustión a partir del momento en que se ha producido la llama es muy superior a la de la combustión incandescente.

Para su extinción se requieren agentes refrigerantes como por ejemplo agua o agua y aditivos humectantes.

17.2) Espacial o Con Llama

Se denominan fuego espacial porque el mismo se desarrolla en el espacio o volumen en la zona por encima del combustible. Son la evidencia directa de la combustión de gases o vapores de líquidos inflamables que a su vez pueden ser luminosos.

Se pueden ser clasificadas según como la mezcla combustible obtiene el aire para la combustión de la siguiente manera:



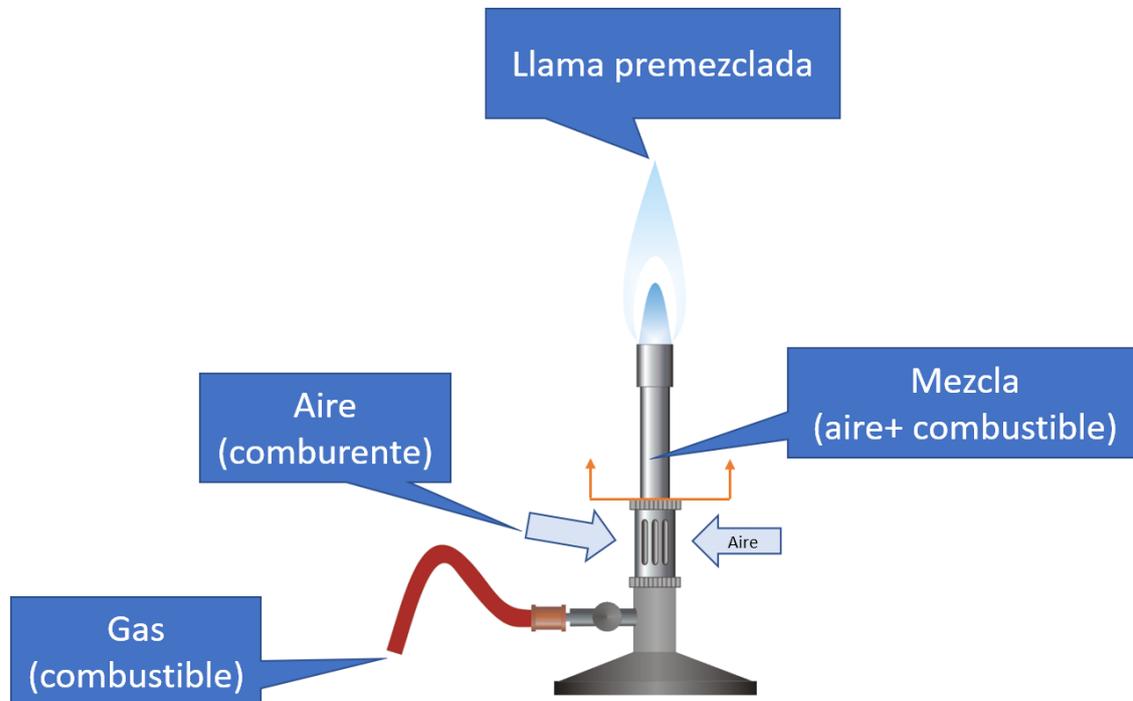
Llamas Autónomas: La descomposición de las moléculas del combustible suministra el oxígeno necesario para mantener la combustión por sí sola, por ejemplo, la combustión de nitrocelulosa.

Llamas de Difusión: El aire ingresa a la mezcla combustible en forma automática por el llamado proceso de difusión donde, la presión de la mezcla combustible es menor que la presión del aire exterior que la rodea. La combustión tiene lugar en las regiones donde se están mezclando el combustible y el aire. Los gases o vapores no han sido previamente mezclados y se queman en la medida que le aire le llega y hace entrar a la mezcla en rango inflamable. En estos casos el oxígeno (aire) es un agente externo que difunde hacia la zona de llama. Este es el tipo de llama más común y la que se presenta en forma general en todos los incendios.

Llamas Premezcladas: El combustible que debe estar en estado gaseoso se mezcla íntimamente con aire antes de llegar a la zonas de la combustión. El combustible fluye con

aire (u oxígeno) antes de llegar a la zona de la combustión como las que se obtienen en un soplete oxiacetilénico, quemadores de gas, estufas, mechero bunsen, etc.

Como el aire llega a la zona de la combustión mezclado junto con los gases combustibles la llama no consume aire del exterior que la rodea, sino, de la que traen los gases combustibles.



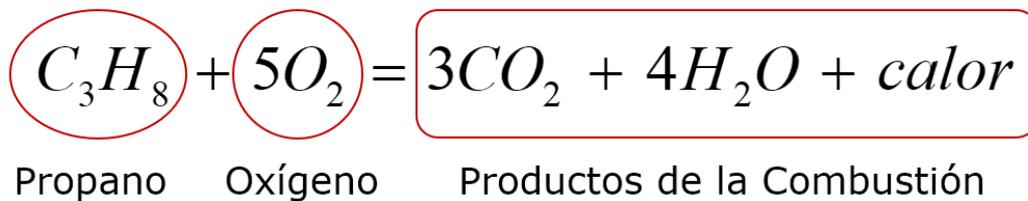
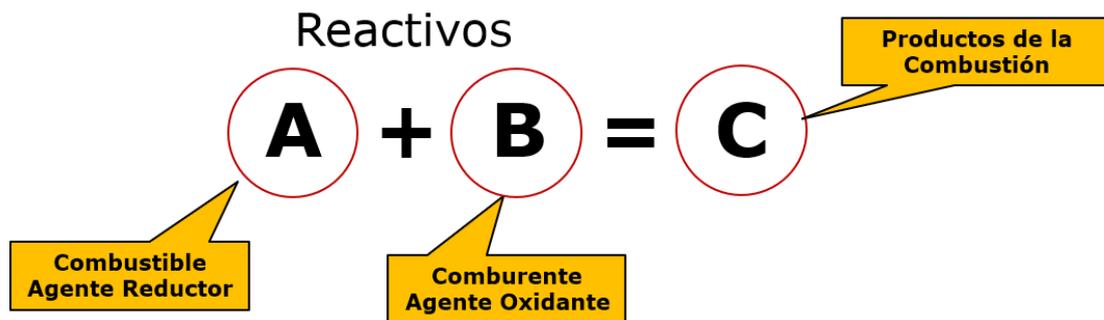
En una combustión premezclada la reacción de combustión ocurre muy rápidamente sin que se vea afectada por el retraso debido a la necesidad de mezclar primero el combustible y el oxidante como sucede en una combustión de difusión.

Si se encienden gases premezclados, su tendencia a expandirse al incendiarse puede causar una rápida elevación de presión y con ello una posible explosión si se desarrolla en un ambiente cerrado. Esto contrasta con los incendios cuyos combustibles y oxidantes están separados inicialmente y la velocidad de combustión es controlada por la velocidad a la cual se pueden mezclar. En consecuencia, la velocidad de combustión por unidad de volumen de la llama es mucho menor en los incendios, y no se presenta el aumento muy rápido en la presión característico de las explosiones.

Los incendios suceden en situaciones en las que el vapor de combustible y el aire no están mezclados inicialmente. Sus velocidades de combustión están limitadas principalmente por el suministro de vapor de combustible y aire a las llamas y no por las velocidades de las reacciones químicas elementales dentro de las llamas.

18) PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

Como en toda reacción química, las sustancias reaccionantes, combustible y comburente en una combustión, dan lugar a otras totalmente distintas denominadas productos de la combustión.



La combustión emite importantes productos, de entre ellos los más sobresalientes son el humo y los gases, pero hay otros más que se deben considerar como:

- Calor, generado por la reacción química.
- Llamas, formadas por vapores del combustible ardiendo y por partículas incandescentes del combustible.
- Humo, formado por diminutas partículas sólidas y vapor condensado. Estas partículas pueden ser de color, dimensiones o cantidad tales, que dificultan la visibilidad, impidiendo la identificación de las salidas o su señalización.
- Gases, productos invisibles de la combustión completa e incompleta. Los gases que se desprenden en una combustión son muy diversos dependiendo del material combustible. Los más comunes son el monóxido de carbono y el anhídrido carbónico.

Es importante hacer notar que el combustible sólo reacciona con el oxígeno del aire. La composición del aire es 20,99% de O₂, 78,03% de N₂, 0,94% de Ar (argón), 0,03% de CO₂ y 0,01% de H₂. Debido a que ni el N₂ ni el Ar reaccionan durante la combustión, se los suele agrupar considerando que el aire está formado por 21% de O₂ y 79% de N₂. Por lo tanto, el N₂ pasará íntegramente a los humos.

Se puede dar el caso en que el combustible esté formado por una mezcla de sustancias entre las cuales hay una o más que no reaccionan con el O₂, por ejemplo, SO₂. En este caso, estas sustancias también pasarán en forma completa a los humos.

Otro caso en que parte de algún reactivo pasa al producto es cuando hay más aire del que se necesita para la combustión; el O₂ que no se utiliza en la reacción formará parte de los humos. Se habla entonces de reacciones con exceso de aire.

Por último, es útil indicar que los humos pueden contener parte del combustible que no haya reaccionado y sustancias con un grado de oxidación incompleto, como el CO.

Cuando el O₂ que se necesita para la reacción no es suficiente, se habla de reacciones con defecto de aire.

Sustancias más Comunes que se Pueden Encontrar en los Humos

Fórmula Química	Nombre	Procedencia principal	Otras procedencias
CO ₂	Dióxido de carbono	Combustión de sustancias que contienen C.	Componente no combustible del combustible.
H ₂ O	Vapor de agua	Combustión de sustancias que contienen H ₂ .	Combustible húmedo.
N ₂	Nitrógeno	Aire.	Componente no combustible del combustible.
O ₂	Oxígeno	Combustión realizada con aire en exceso.	Un gas combustible puede tener O ₂ en su composición.
CO	Monóxido de carbono	Combustión realizada con aire en defecto.	Un gas combustible puede tener CO en su composición.
H ₂	Hidrógeno	Combustión realizada con aire en defecto.	
C	Carbono (hollín)	Combustión realizada con aire en defecto.	
SO ₂	Dióxido de Azufre	Presencia de S en el combustible.	Un gas combustible puede tener SO ₂ en su composición.

18.1) Monóxido de Carbono

La gran mayoría de las muertes por incendios ocurren a causa del monóxido de carbono (CO) más que por cualquier otro producto tóxico de combustión. Este gas incolore e inodoro está presente en cada incendio, y mientras más deficiente el aire es la ventilación más incompleta se vuelve la combustión y más grande es la cantidad de monóxido de carbono formado.

Un método empírico de determinación, aunque sujeto a mucha variación, es que mientras más oscuro es el humo más alto son los niveles de monóxido de carbono presentes. El humo negro tiene un alto contenido de partículas de carbono y monóxido de carbono a causa de la combustión incompleta.

Aunque el monóxido de carbono (CO) no es el más tóxico de los gases desprendidos en un incendio, sí es uno de los más abundantes y constituye la mayor amenaza en la mayoría de los fuegos. En condiciones de combustión controlada, el carbono de la mayoría de los compuestos orgánicos puede oxidarse totalmente si se suministra oxígeno suficiente. En las condiciones incontroladas de un fuego accidental, la disponibilidad de oxígeno no es siempre óptima y parte del carbono se transforma en monóxido de carbono por combustión incompleta. En un fuego confinado de rescoldos, la relación de monóxido de carbono (CO) respecto al anhídrido carbónico (CO₂) es mayor que un fuego con llamas y bien ventilado.

La toxicidad del CO se debe fundamentalmente a su afinidad con la hemoglobina de la sangre. La hemoglobina de la sangre se combina con el oxígeno y lo lleva a una combinación química denominada oxihemoglobina. Las características más significativas del monóxido de carbono son que el mismo se combina tan fácilmente con la hemoglobina de la

sangre que el oxígeno disponible es excluido. La combinación de la oxihemoglobina se convierte en una combinación más fuerte llamada carboxihemoglobina (COHb). En efecto, el monóxido de carbono se combina con la hemoglobina alrededor de 200 veces más fácilmente que al oxígeno. El monóxido de carbono actúa sobre el cuerpo, desplaza el oxígeno de la sangre y conduce a una eventual hipoxia del cerebro y tejidos, seguida por la muerte si el proceso no es invertido.

Las concentraciones de monóxido de carbono en el aire, superiores a 0,05%, pueden ser peligrosas. Cuando el nivel es mayor que el 1% no hay aviso sensorial a tiempo que permita escapar. A niveles más bajos hay dolor de cabeza y vértigo antes de la inhabilitación, de modo que es posible un aviso.

Efectos potenciales de la exposición al monóxido de carbono (CO)

ppm	TIEMPO	EFFECTOS Y SÍNTOMAS
35	8 hs	Nivel permisible de exposición
200	3 hs	Dolor de cabeza y leve malestar
400	2 hs	Dolor de cabeza y malestar
600	1 hs	Dolor de cabeza y malestar confusión,
1.000/2.000	2 hs	Dolor de cabeza y nauseas
1.000/2.000	1/2 - 1 hs	Tendencia a la incoordinación de movimientos
1.000/2.000	30 min	Moderada palpitación del corazón y somnolencia
2.000/2.500	30 min	Inconsciencia
4.000	Menos de 1 min	Muerte

Estos valores son aproximados y varían de acuerdo al estado de salud y actividad física del trabajador.

La combinación estable del monóxido de carbono con la sangre es eliminada sólo lentamente por la respiración normal. La aplicación de oxígeno puro es el elemento más importante dentro de la atención en primeros auxilios. Después de la convalecencia como consecuencia de una exposición severa, en cualquier ocasión pueden aparecer ciertas señales de lesión del cerebro o nervios, dentro de un lapso de aproximadamente tres semanas. De nuevo, ésta es una razón del por qué un bombero agotado, quien por lo demás se recupera rápidamente, no se le debe permitir que reingrese a una atmósfera humeante.

18.2) Anhídrido Carbónico

El dióxido de carbono (CO₂) debe tomarse en cuenta debido a que es uno de los resultantes de la combustión completa de materiales carboníferos. El dióxido de carbono es incoloro, inodoro y no inflamable.

El aire normalmente contiene alrededor de 0,03% de dióxido de carbono. A una concentración de 5% en el aire, hay un notable incremento en la respiración, acompañado de dolor de cabeza, vértigo, transpiración, excitación mental. Las concentraciones de 10 a 12% causan la muerte casi a unos pocos minutos por parálisis del centro respiratorio cerebral.

Desdichadamente, al incrementar la respiración aumenta la inhalación de otros gases tóxicos. A medida que el gas aumenta, la función respiratoria inicialmente estimulada disminuye antes que ocurra la parálisis total.

18.3) Cianuro de Hidrógeno

El cianuro de hidrógeno (HCN) interfiere con la respiración a nivel celular y de los tejidos. El cianuro de hidrógeno es clasificado como asfixiante químico. El gas inhibe las enzimas por medio de las cuales los tejidos toman y usan el oxígeno. El cianuro de hidrógeno puede absorberse también a través de la piel.

El cianuro de hidrógeno es un producto tóxico que actúa rápidamente. Es aproximadamente 20 veces más tóxico que el monóxido de carbono. No se mezcla apreciablemente con la hemoglobina, pero inhibe la absorción de oxígeno por las células (hipoxia histotóxica). No hay evidencia de que haya sinergia entre el cianuro de hidrógeno y el monóxido de carbono, sino que estos gases tóxicos suelen actuar sumando sus efectos.

La exposición a este gas incoloro que tiene un notable olor a almendra puede causar respiración entrecortada, espasmos musculares e incremento en el ritmo cardíaco, posiblemente hasta 100 latidos por minuto.

La asfixia con cianuro es uno de los asesinos más veloces en un incendio. Según la opinión de expertos la muerte es rápida y sin dolor.

El cianuro de hidrógeno (HCN) se produce por la combustión de materiales que contienen nitrógeno. Estos materiales pueden ser naturales o sintéticos, como la lana, seda, polímeros de acrilonitrilo, nylon, poliuretano y resinas de urea.

Entre los materiales que emiten cianuro de hidrógeno se incluyen el nylon, la lona, la espuma de poliuretano, el caucho y el papel. Raramente se encuentran atmósferas peligrosas en incendios de tiendas de ropa o alfombras.

18.4) Acroleína

La acroleína es un irritante sensorial y pulmonar, particularmente potente que se presenta en muchos incendios. Se emite por los rescoldos de todos los materiales celulósicos y también en la pirolisis del polietileno. Resulta irritante en extremo, y en concentraciones muy bajas de unas cuantas ppm produce irritación de ojos y a veces incapacidad psíquica. Sorprendentemente, en experiencias realizadas con simios, concentraciones de hasta 2.780 ppm durante 5 minutos no llegaron a producir incapacidad física. Sin embargo, las complicaciones pulmonares causadas por concentraciones incluso inferiores producían la muerte al cabo de unas horas.

18.5) Ácido Clorhídrico (Cloruro de Hidrógeno)

El cloruro de hidrógeno (HCL) es incoloro, pero fácilmente detectado por su olor penetrante y la intensa irritación que produce en los ojos y las vías respiratorias. Es un gas más denso que el aire.

Se forma en la combustión de materiales con contenido en cloro, siendo el más destacado el cloruro de polivinilo (PVC). También constituye como el anterior un potente irritante sensorial y pulmonar.

Los otros gases que se producen cuando esos plásticos son calentados son: el monóxido de carbono y el dióxido de carbono. Un investigador que se dedicó al estudio de cómo son afectados los bomberos expuestos al cloruro de hidrógeno, comenzó su estudio después de que un incendio relativamente pequeño y humeante ocurrido en una oficina fotocopidora, causara la muerte de un bombero y el envío al hospital de otros. Finalmente encontró que el cloruro de hidrógeno actúa como irritante de los músculos del corazón y causó la alteración del ritmo cardíaco.

18.6) Óxidos de Nitrógeno

Hay dos óxidos de nitrógeno peligrosos: el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el óxido nítrico (NO). El dióxido de nitrógeno es el más significativo debido a que el óxido nítrico se convierte fácilmente en dióxido de nitrógeno con la sola presencia de oxígeno y humedad.

El dióxido de nitrógeno (NO_2) y el óxido nítrico (NO) forma por lo general una mezcla que se conoce como NO_x . Los óxidos de nitrógeno proceden de la oxidación de materiales que contienen nitrógeno, siendo el HCN también una fuente de NO_x a partir de su combustión a alta temperatura. La "fijación" del nitrógeno del aire es otra posibilidad.

La potencia letal del óxido nítrico es sólo la quinta parte de la del NO_2 . Al contrario de lo que sucede con el HCL, la toxicidad del NO_x se debe fundamentalmente a su propiedad como irritante pulmonar, habiéndose producido la mortandad de las ratas después de la exposición, generalmente al día siguiente.

Aunque un estudio da cuenta de que la producción de NO_x a partir de combustibles que contienen nitrógeno, es mucho menor que la de HCN (y, por tanto, de menos importancia toxicológica), la literatura presenta datos contradictorios. Son necesarios nuevos estudios para poder determinar el papel de los óxidos de nitrógeno en la toxicología de la combustión.

El dióxido de nitrógeno es un irritante pulmonar que tiene un color castaño rojizo. Cuando es inhalada en suficientes concentraciones causa edema pulmonar, el cual bloquea los procesos naturales de respiración del cuerpo y conduce a la muerte por asfixia.

El dióxido de nitrógeno es un gas que requiere sumo cuidado debido a que sus efectos irritantes en la nariz y garganta pueden tolerarse aun cuando sea inhalada una dosis letal. Por lo tanto, los efectos peligrosos de su acción como irritante pulmonar o reacción química puede no ser aparentes sino hasta varias horas después de haber estado expuesto.

18.7) Oxígeno Insuficiente

El aire contiene aproximadamente un 21% de oxígeno al nivel del mar. Los peligros con el oxígeno se presentan cuando está en defecto o en exceso.

- El oxígeno es consumido por la combustión, y también por otros procesos naturales o artificiales.
- El oxígeno puede ser desplazado por otros gases o vapores.
- Las altas y bajas concentraciones de oxígeno pueden afectar las mediciones de inflamabilidad.
- La falta de oxígeno puede causar la muerte o daños cerebrales.
- La deficiencia de oxígeno inicialmente puede producir sensación de felicidad o bienestar (euforia) y la persona olvida que se encuentra en "PELIGRO".

Efectos potenciales de atmósferas con deficiencia de oxígeno

% por volumen	Efectos y síntomas a presión atmosférica
19,5 %	Nivel mínimo permisible de oxígeno
15 - 19 %	Decrece la habilidad para trabajar arduamente
12 - 14 %	La respiración aumenta con el trabajo, se acelera el pulso y se afecta la coordinación, percepción o juicio.
10 - 12 %	Incrementa la tasa de respiración, juicio pobre y labios azules (cianosis).
8 - 10 %	Pérdida mental, desmayo, pérdida del conocimiento, rostro pálido y labios azules.
6 - 8 %	8 minutos 100% fatal, 6 minutos 50% fatal, 4-5 minutos se recupera con tratamiento.
4 - 6 %	Coma en 40 segundos, convulsiones, cesa la respiración y sobreviene la muerte.

Estos valores son aproximados y varían de acuerdo con el estado de salud y actividad física del trabajador.

18.8) Humo Visible

El humo se compone de partículas sólidas de diferentes tamaños y color, y finamente divididas, además, de líquido atomizado en suspensión en el aire, conocido como aerosol, con tamaños comprendidos entre 0,005 y 0,01 mili micrones, que son arrastradas por corrientes de convección y se hacen visibles obstaculizando el paso de la luz hasta impedirlo por completo.

Esta materia carbonosa se genera al arder en condiciones de combustión incompleta la mayor parte de los materiales.

Dado que el tamaño medio de las partículas y aerosoles es aproximadamente igual a la longitud de onda de la luz visible, se produce dispersión de la luz y se oscurece la visión a través del humo. Su color depende de las sustancias que arden y de la cantidad de oxígeno presente, pero no se pueden establecer relaciones ciertas entre el color del humo y la toxicidad de los gases presentes.

Dado que el humo oscurece el paso de la luz, dificulta la visibilidad de las salidas. La producción de cantidad de humo suficiente para dificultar la salida puede ser muy rápida y normalmente es el primer problema que se presenta en un incendio.

Las partículas y los aerosoles aspirados pueden ser nocivos y la exposición prolongada puede afectar al sistema respiratorio. A veces las partículas son tan pequeñas que penetran hasta los pulmones, dañándolos.

18.9) Calor

La combustión es una reacción química exotérmica, es decir, emite calor. La energía que genera se emite en forma de calor, por convección (gases calientes) y radiación. Esta última representa la energía liberada en las zonas visibles e infrarrojo del espectro, que se manifiesta como llamas o luminosidad de un fuego.

El calor representa un peligro para las personas. Si la energía calorífica que incide sobre el cuerpo supera la capacidad de defensa de este, provoca desde lesiones leves hasta la muerte.

Las consecuencias de la exposición al aire caliente se ven amplificadas si la atmósfera del fuego contiene humedad. A mayor contenido, mejora la eficiencia de transmisión de calor y el cuerpo pierde facultades para liberarse de la carga calorífica. El entorno del incendio puede contener humedad como consecuencia de las condiciones climatológicas, de la propia combustión y de la aplicación de agua para la extinción.

Si un exceso de calor alcanza rápidamente los pulmones, puede producir una drástica caída de la presión sanguínea, junto con el colapso de vasos sanguíneos, que conduzcan a un fallo circulatorio. Asimismo, el calor intenso puede originar la acumulación de fluido en los pulmones.

Ensayos realizados revelaron que 140 °C es la máxima temperatura del aire respirado que permite sobrevivir. Una temperatura de esta magnitud sólo puede tolerarse durante un breve período de tiempo y en ningún caso con presencia de humedad.

Según estudios realizados, si la temperatura superficial de la piel alcanza un valor de 71 °C, manteniéndose durante un minuto, se producirán quemaduras de segundo grado. A medida que aumenta la temperatura de la piel, disminuye el tiempo necesario para producir quemaduras de segundo grado. Por ejemplo, a 82 °C bastan 30 segundos para producir las y a 100 °C sólo 15 segundos.

Para que aumente la temperatura superficial, la piel humana tiene que absorber calor suficiente para anular las defensas de que dispone el cuerpo para disipar el calor. El mecanismo de disipación actúa mediante enfriamiento por evaporación (transpiración) y por circulación de la sangre. La evaporación de la humedad de la piel puede contrarrestar el efecto del calor sobre ella hasta 60 °C o más, en aire seco. Este valor es más bajo en aire húmedo.

La exposición a un exceso de calor puede originar la muerte por hipertermia sin producir quemaduras. La hipertermia acontece cuando el cuerpo absorbe calor con mayor rapidez que lo que elimina por evaporación de la humedad superficial y por radiación. Entonces se eleva la temperatura de todo el cuerpo, hasta un nivel bastante superior al normal originando lesiones y, posiblemente, la muerte.

19) TIPOS DE COMBUSTIÓN

La combustión se inicia y se mantiene si la mezcla combustible se encuentra dentro del rango de inflamabilidad, además de otros parámetros necesarios.

Dentro de la zona del rango de inflamabilidad las características de la combustión cambian según en qué zona o punto de este rango se encuentra la misma.

Desde esta óptica, los procesos de la combustión se pueden clasificar en:

- Combustión completa, teórica o estequiométrica.
- Combustión incompleta o con defecto de aire.
- Combustión con exceso de aire.

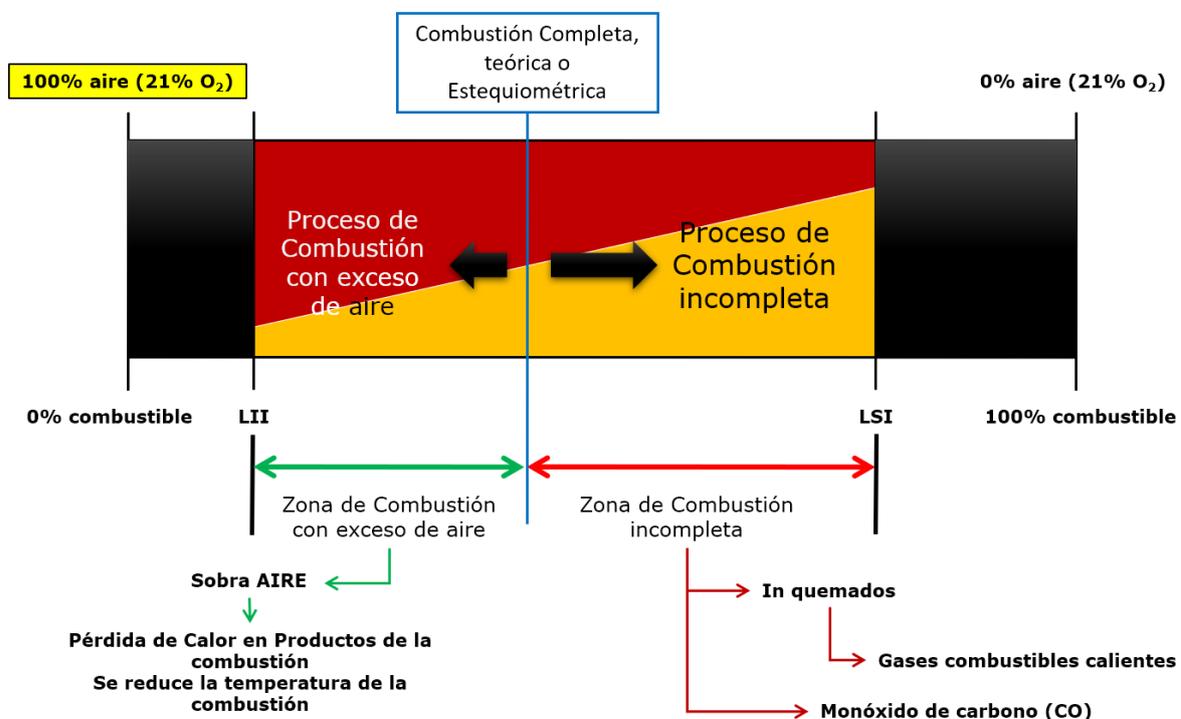
19.1) Combustión Completa, Teórica o ⁶Estequiométrica

Es la combustión que se realiza con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible. En consecuencia, no se encuentra O₂ en el humo, ya que dicho O₂ se consumió totalmente durante la combustión.

Las sustancias combustibles del combustible se queman hasta el máximo grado posible de oxidación. En consecuencia, no habrá sustancias combustibles en el humo. En los productos de la combustión se puede encontrar N₂, CO₂, H₂O.

La combustión de este tipo es la que se produce en los procesos de combustión controlada como, por ejemplo, el quemador de la cocina, donde es necesario obtener el máximo rendimiento del proceso de la combustión para obtener como consecuencia el máximo calor posible.

En teoría, o sobra ni falta ninguno de los dos elementos de la reacción química de la combustión.



19.2) Combustión Incompleta o con Defecto de Aire

Sucede lo contrario que en la combustión completa. El combustible no se oxida completamente, se forman sustancias que todavía pueden seguir oxidándose; por ejemplo, CO. Estas sustancias se denominan inquemados. La presencia de inquemados indica que la combustión se está realizando en forma incompleta.

Otros inquemados pueden ser H₂, C_nH_m, H₂S y C. Estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión.

⁶Estequiométrica: Una mezcla estequiométrica de combustible y aire es aquella donde hay una proporción equivalente exacta de combustible y oxígeno en el aire de manera que después de la combustión todo el combustible se ha consumido y no queda oxígeno.

En esta combustión, el aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible. Por lo tanto, se producen inquemados.

Los inquemados son gases combustibles que no han logrado quemarse por ausencia de aire en la mezcla, pero la particularidad es que se desprenden del seno de la combustión en condiciones de alta temperatura, se mueven con el humo en forma ascendente y en cuanto encuentra aire se encienden en forma espontánea. Son grandes propagadores de incendios.

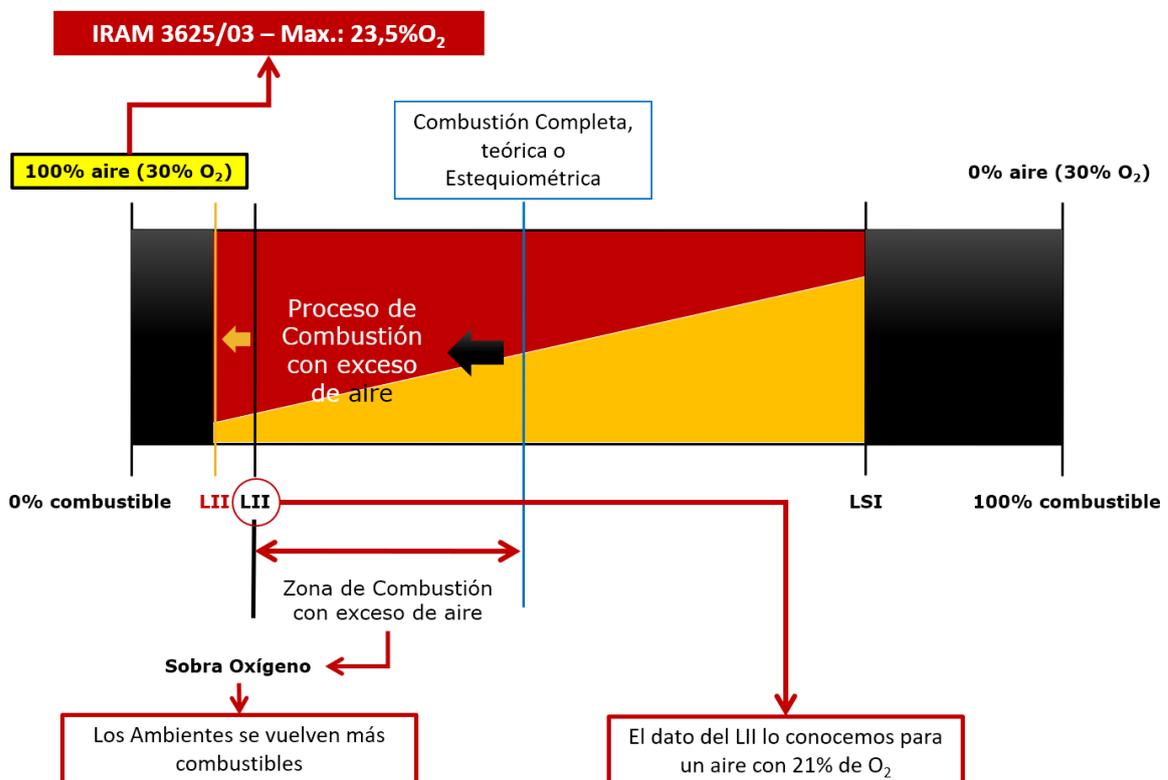
19.3) Combustión con Exceso de Aire

Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Esta combustión, en teoría, tiende a no producir inquemados. Es típica la presencia de aire en los humos.

Si bien la incorporación de aire permite evitar la combustión incompleta y la formación de inquemados, trae aparejada la pérdida de calor en los productos de combustión, reduciendo la temperatura de combustión, la eficiencia y la longitud de llama.

19.4) Combustión con Exceso de Oxígeno. Aire Enriquecido con Oxígeno

En el mundo el aire contiene aproximadamente un 21% O₂. a nivel del mar y disminuye menos a medida que se asciende.



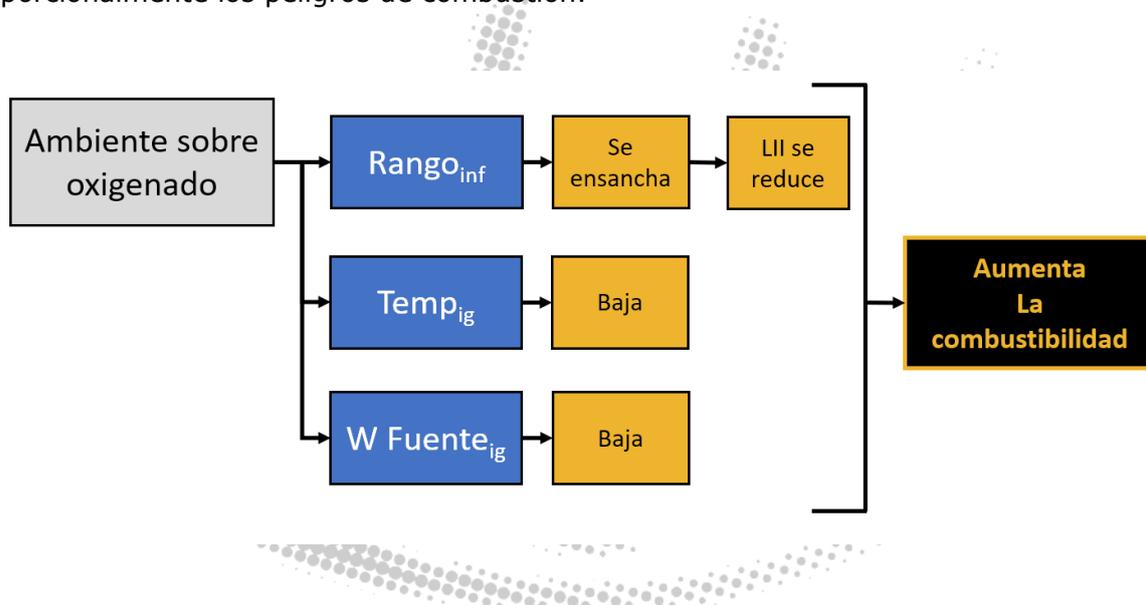
Hay situaciones en la actividad industrial, que, por diferentes motivos, se puede encontrar aire con un porcentaje mayor de oxígeno. Un caso típico de esto resulta del proceso de corte de acero con el equipo oxiacetilénico, en este caso parte del oxígeno se usa para

remover el acero fundido de la zona de corte. También en el área de salud donde el oxígeno puro es parte del proceso, si razones operativas o fallas en los equipos o instalaciones se produjeran pérdidas, este oxígeno sobrante se acumula en el ambiente. En un ambiente cerrado o con pobre ventilación este sobrante de oxígeno se puede concentrar y aumentar la cantidad a valores mayores al 21%.

Los fuegos que se producen en atmósferas ricas en oxígeno alcanzan mayores temperaturas de llama, incrementan la fracción de calor liberado por radiación y aumentan las velocidades de combustión por unidad de superficie combustible. Las mayores temperaturas de llama, generalmente, causan una mayor transformación de vapores en hollín, aumentando significativamente la velocidad de emisión de humo.

El aumento de la concentración de oxígeno ambiental aumenta significativamente la radiación de la llama y la velocidad de combustión. También esto afecta a todos los parámetros básicos de la combustión, excepto al calor de combustión. Al aumentar la concentración de oxígeno, la temperatura y la energía de ignición disminuyen, el rango de inflamabilidad se amplía, el LII disminuye y la velocidad de combustión aumenta, dándose los efectos máximos en una concentración de oxígeno del 100%.

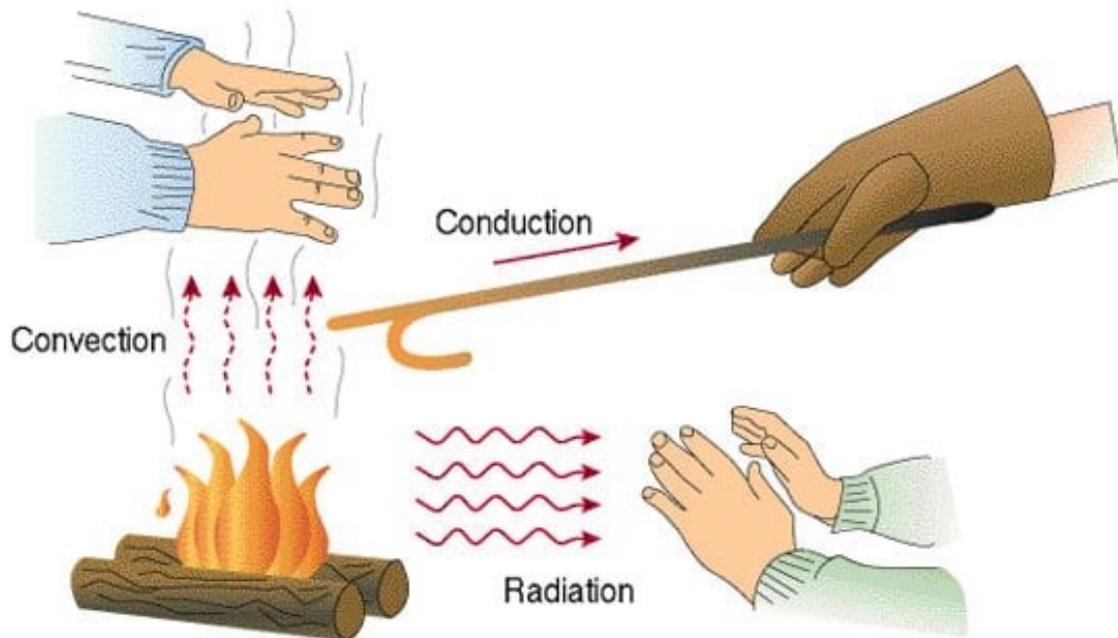
Las concentraciones de oxígeno mayores que las normales en el aire aumentan proporcionalmente los peligros de combustión.



20) FORMAS DE TRANSMISIÓN DEL CALOR

El calor se transmite de cuatro maneras distintas:

- Contacto directo.
- Convección.
- Conducción.
- Radiación.



20.1) Contacto Directo

El calor se transmite por contacto directo cuando una llama o ascua alcanza un objeto combustible; estas ascuas son llevadas por la corriente del humo lejos del fuego primario. Si el contacto se mantiene durante suficiente tiempo, el objeto puede arder. Las llamas producidas por cerillas causan ignición por contacto directo.

Este mecanismo no participa del proceso de la combustión propiamente dicho, sí lo hace en el proceso de propagación de los incendios.

20.2) Convección

La convección es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido. Transmisión del calor a través del movimiento del humo, gases, aire y partículas calientes. Cuando un líquido o un gas se calientan, se expande y así se vuelve menos denso, tendiendo a subir de nivel y desplazar al volumen más frío hacia abajo. El aire cercano al fuego se calienta y también sube (al ser más ligero que las capas superiores más frías). Al ascender el aire, el humo y los gases transportan ascuas y partículas calientes lejos del incendio. A medida que estos gases y sólidos calientes se alejan, el aire más frío se mueve hacia el fuego. Esto genera corrientes que aceleran el proceso de convección que, a su vez, se va acelerando al aumentar la velocidad de combustión.

Si el desplazamiento vertical de las corrientes calientes de convección se ve frenado, por ejemplo, por un techo, los gases y partículas se desplazan horizontalmente y a través de cualquier abertura. En cuanto puedan subir volverán a moverse en sentido vertical.

Las partículas y ascuas calientes pueden ser transportadas a cierta distancia por el humo y los gases. Si posteriormente caen sobre materiales combustibles, pueden ocasionar fuegos colaterales y producirá entonces un punto de origen muy similar al inicial.

Uno de los "1/3" del calor que se pierda hacia la atmósfera en el proceso de la combustión se da precisamente por este medio.

Interviene como mecanismo de propagación de incendios fundamentalmente en áreas superiores al incendio.

20.3) Conducción

Es la transmisión de calor a través de un sólido. En la conducción, la energía calorífica se transmite desde una molécula a la contigua. Las moléculas vibran alrededor de su posición media y transmiten la energía calorífica por choque con sus vecinas.

La capacidad de conducción de calor (conductividad térmica) varía con los materiales. Los mejores conductores son la plata y el cobre. Los sólidos no metálicos son poco conductores y todos los líquidos (excepto el mercurio) y los gases, son muy poco conductores del calor. En general, los buenos conductores de la electricidad son buenos conductores del calor y viceversa.

La capacidad de un material para conducir calor se puede medir experimentalmente y se denomina "conductividad térmica".

Los objetos metálicos, tales como vigas, columnas, tuberías, clavos y cables son excelentes conductores del calor y pueden conducirlo de una habitación ardiendo a otra adyacente a través, por ejemplo, de una tubería de metal. Combustibles presentes en la habitación adyacente pueden inflamarse, a pesar de que las dos habitaciones parecían aisladas entre sí.

La madera no es buen conductor del calor, sin embargo, si está en contacto con un objeto o superficie caliente, como por ejemplo una viga metálica, puede *pirolizarse* después de un tiempo.

Este mecanismo no participa del proceso de la combustión propiamente dicho, sí lo hace en el proceso de propagación de los incendios.

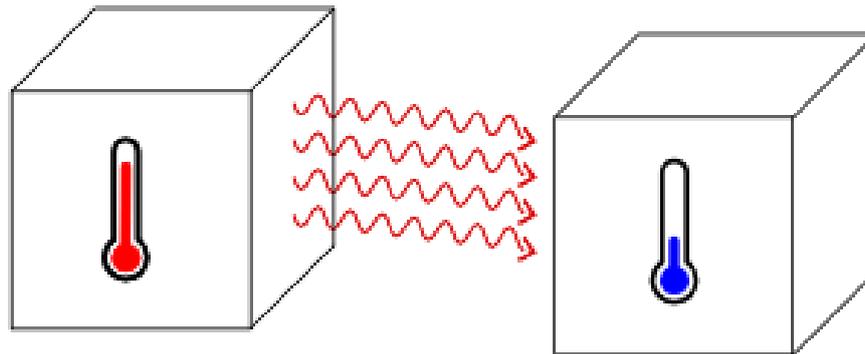
Además, una estructura sometida al calor de un incendio se ve afectada de dos maneras distintas: por un lado, los materiales, como por ejemplo el acero, se dilatan y por el otro se reduce la capacidad de resistir carga; como conclusión, una estructura sometida a un incendio se ve reducida o afectada su estabilidad estructural y puede colapsar toda o parte de esta.

20.4) Radiación

Es la transmisión de calor a través de ondas invisibles que se propagan por el espacio al igual que la luz, ésta viaja a través del espacio sin necesidad de un medio como sólido o fluido. La conducción de calor necesita de un sólido para moverse de un lado al otro y en la convección, el calor necesita de un fluido como el aire.

Radiación es el calor emitido por un cuerpo debido a su temperatura, y para que este fenómeno se pueda percibir es necesario un cuerpo a una temperatura bastante elevada.

Cuando dos cuerpos se sitúan frente a frente y uno tiene mayor temperatura que el otro, la energía radiante pasará del más caliente al más frío hasta que los dos alcancen la misma temperatura. La capacidad de absorber calor radiado está en función de la clase de superficie del cuerpo más caliente. Si la superficie receptora es brillante o pulida, reflejará la mayor parte del calor radiante: si es negra u oscura, absorberá la mayor parte del calor.



Radiación

En los fuegos pequeños, como, por ejemplo, el originado por una vela, la mayor parte del calor abandona la zona de la combustión debido a la convección, como detectamos al situar la mano sobre la llama en vez de a un lado. Sin embargo, los incendios liberan cantidades de energía aproximadamente iguales por radiación y por convección. La energía irradiada es de consideración porque las superficies estáticas próximas al fuego absorben fundamentalmente toda la radiación que incide sobre las mismas, mientras que la mayoría de la energía transmitida por convección se escapa del fuego arrastrada por el flujo de gases calientes que ascienden.

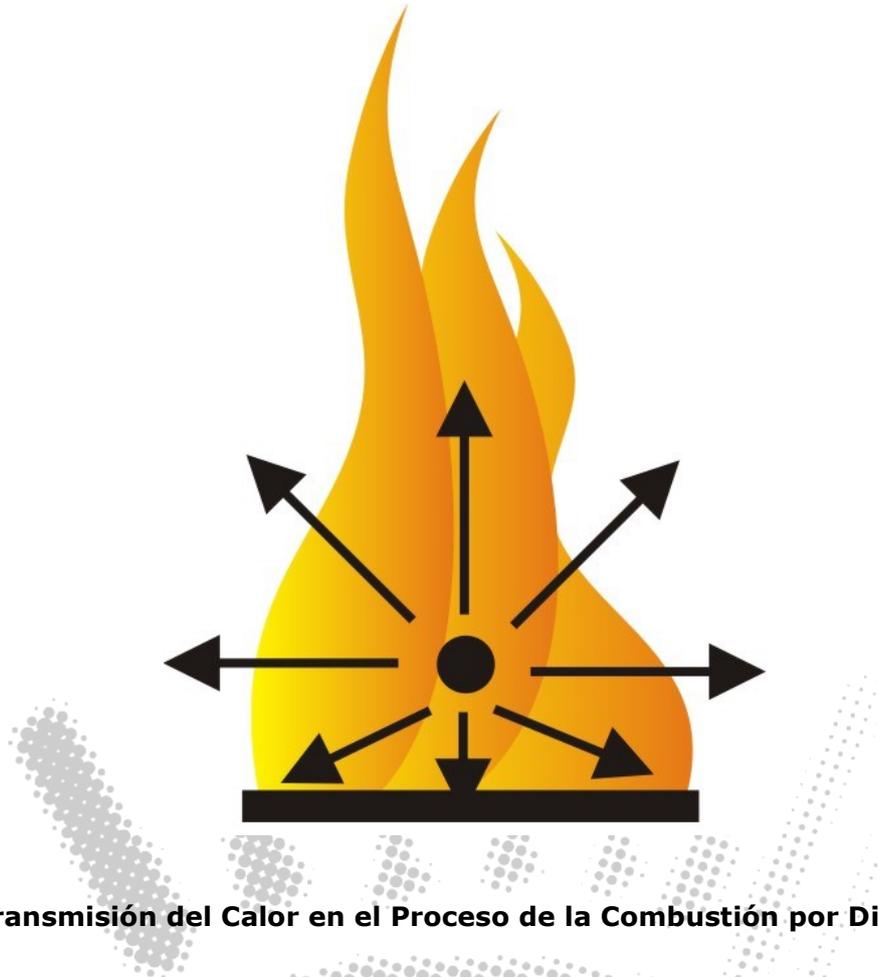
Las características en relación con los incendios son:

- Las ondas de radiaciones se transmiten en línea recta en todas las direcciones.
- El calor radiado de un foco pequeño será menor que el de una superficie irradiante grande.
- Las radiaciones se mueven a través del aire y no se ven afectadas por el viento; penetran superficies transparentes y translúcidas, incluyendo el cristal y el agua.
- Las radiaciones que han atravesado ventanas han causado la ignición de objetos expuestos. El calor radiado de las llamas, transmitido a través de conductos de aire acondicionado en el techo ha llegado, en ciertos casos, a inflamar papeles colocados encima de mesas de oficina.

Algunas sustancias como el agua o el vidrio son transparentes a la radiación visible y permiten su paso; sin embargo, tanto el agua líquida como el vidrio son opacos para la mayor parte de las longitudes de onda infrarrojas. Los materiales metálicos brillantes son reflectores excelentes de la energía radiante.

La ignición por radiación enfrenta al investigador con un problema puesto que no existe contacto visible entre la fuente calorífica y el combustible. No obstante, ha de existir una trayectoria vista entre la fuente de radiación y el material que se inflama.

Uno de los "1/3" del calor que se pierda hacia la atmósfera en el proceso de la combustión se da precisamente por este medio, y lo más importante, es que el "1/3" del calor que retorna al proceso de la combustión lo hace por este mecanismo. Además, al moverse en todas direcciones, es el calor que reciben los bomberos cuando se aproximan a un fuego.



20.5) La Transmisión del Calor en el Proceso de la Combustión por Difusión

En el proceso de la combustión $\frac{2}{3}$ del calor se eleva y pierde en el medio ambiente y $\frac{1}{3}$ retorna al proceso de la combustión.

De los $\frac{2}{3}$ que se elevan y pierden, $\frac{1}{3}$ lo hace debido al calor que se mueve por convección y el otro $\frac{1}{3}$ al calor que se mueve por radiación.

El $\frac{1}{3}$ del calor que baja y retorna al proceso se debe a la fracción del calor de la combustión que se mueve por radiación.

La conducción del calor no está presente en el proceso de la combustión, pero si puede estarlo en la propagación de un incendio de un lugar a otro, al igual que el contacto directo por las llamas.

21) MODOS DE PROPAGACIÓN DEL FUEGO

Un fuego se propagara desde el punto de origen si existe suficiente combustible y oxígeno. La propagación se produce mediante un simple mecanismo: la transmisión del calor a los combustibles adyacentes en el lugar.

21.1) Vertical

El fuego se propaga mediante la transmisión de calor en el aire, el humo y los gases calientes que tienden a subir.

Un fuego se propaga en sentido ascendente cuando se lo permiten las características constructivas del edificio. Los huecos de escaleras, ascensores y conducciones y los espacios entre paredes interiores y exteriores proporcionan un paso vertical para la ascensión de los productos de la combustión.

Los materiales combustibles que se encuentran en las cercanías del trayecto resultarán afectados si los productos de la combustión están lo suficientemente calientes para causar la pirólisis o la vaporización de estos combustibles y encender sus vapores.

21.2) Horizontal

Cuando se impide el movimiento ascendente de los productos de la combustión, por ejemplo, por un techo, éstos se dispersan en todas las direcciones. Se desplazan entonces lateralmente a la altura del techo hasta encontrar otros obstáculos, tal como una pared. Si no hay aberturas en ésta, los productos de la combustión se acumulan hasta que son forzados a bajar a lo largo de la pared.

Si en el desplazamiento lateral de los productos de la combustión se encuentra una abertura penetrarán en zonas no afectadas por el incendio. Entonces subirán si ello es posible o se moverán horizontalmente si no existiese ningún camino ascendente. Nuevamente, los materiales combustibles que se encuentran en la trayectoria se inflamarán y el fuego continuará propagándose. De esta forma, un fuego puede desplazarse horizontalmente, pegado al techo, a través de un largo pasillo sin afectar prácticamente a las paredes.

21.3) Descendente

El fuego desciende cuando caen materiales ardiendo desde una zona superior a un nivel inferior. También puede descender el fuego a través de recubrimientos de paredes, tales como barnices, pintura, papel y paneles combustibles. Sin embargo, este proceso es muy lento y produce una propagación poco importante.

22) CLASIFICACIÓN DE COMBUSTIBLES

Esta es la llamada Clasificación Universal (y es la adoptada en la República Argentina). La mayoría de la bibliografía se refiere a este tema como clasificación de fuegos, pero en realidad se trata de la clasificación de los combustibles, necesaria para poder realizar una correcta elección del agente extintor.

CLASE A: Fuegos que se desarrollan sobre combustibles sólidos.

Ejemplo: madera, tela, carbón, goma, papel, plástico termo endurecibles, etc.

CLASE B: Fuegos sobre líquidos inflamables y combustible, y gases inflamables.

Ejemplo: pinturas, ceras, grasas, alcohol, parafinas, gasolina, asfalto, aceite, plásticos termofusibles; acetileno, metano, propano, butano, gas natural.

CLASE C: Fuegos sobre materiales, instalaciones o equipos sometidos a la acción de la corriente eléctrica.

Se trata de la situación de un combustible en un entorno de riesgo eléctrico. El combustible clase C en realidad no existe, sino que se trata de una condición.

CLASE D: Fuego sobre metales combustibles.

Ejemplo: magnesio, titanio, potasio, plutonio, sodio, circonio, uranio, etc.

CLASE K: Fuego que involucra aceites y grasas de cocción combustibles, ya sean vegetales o animales, contenidos en artefactos de cocina. IRAM 35001 y 36972.

Son fuegos en aparatos de cocina que involucran medios de cocción combustibles (aceites y grasas vegetales o animales). NFPA 10/2018

Nota: El fuego clase K también se conoce como clase F en el Reino Unido y Australia.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Manual NFPA de Protección Contra Incendios – Editorial MAPFRE NFPA - Cuarta Edición en castellano – 1993.
- Protección Contra Incendios. Ing. Oscar Marucci. Edición UTN
- Manual del Bombero. Técnicas de actuación en siniestros. Edición MAPFRE 1997