



Aproximación al fenómeno de las combustiones espontáneas

SUMARIO

Frente al carácter general de las combustiones que necesitan combustible, comburente y una energía de activación, algunas de ellas no parecen necesitar ese tercer elemento para producirse. Se ha comprobado que la teoría de las explosiones de origen térmico, empezada por N. N. Semenov a mediados de los años veinte y mejorada, posteriormente, con los trabajos de otros científicos permite analizar ese tipo de combustiones, que se conocen generalmente como espontáneas. Se citan otros mecanismos, como el oxidativo y el biológico, que producen efectos similares y se describen algunos casos donde es frecuente que aparezcan estos fenómenos. Para finalizar, se da una pequeña guía que sirva de ayuda a la persona que tiene que trabajar o investigar este tipo de sucesos.

Palabras clave: Incendios, combustiones espontáneas, igniciones, dinámica del fuego.

JOSÉ MIGUEL LACOSTA BERNA
Experto superior en Seguridad

INTRODUCCIÓN

El triángulo del fuego es un elemento muy conocido y empleado en seguridad contra incendios debido a su carácter sencillo y altamente didáctico. En los diferentes vértices del triángulo se colocan cada uno de los factores que se consideran necesarios para que se inicie una combustión. Esos tres factores, ya clásicos, son: combustible, comburente y energía de activación.

Sin embargo, hay una serie de procesos de combustión cuyo comienzo no necesita ninguna llama, o fuente de radiación; es decir, no existe aporte *externo* de calor. Se producen en materiales que están sueltos, o son de naturaleza compuesta, por medio de reacciones químicas exotérmicas o biológicas que generan calor internamente. De este modo, cuando el proceso comienza y el enfriamiento es inadecuado, la temperatura de la sustancia aumentará (particularmente cuando esté bien aislada) hasta alcanzar la temperatura de autoencendido del material, si éste es homogéneo, o la más baja correspondiente a alguno de sus elementos constituyentes, si es de naturaleza compuesta. Los materiales que presentan ese comportamiento se denominan *activos*.

Las expresiones **auto** y **espontánea**, unidas a los términos **ignición**, **inflamación**, **encendido** o **combustión**: *autoignición*, *autoencendido*, *inflamación espontánea*..., son de empleo habitual y, a menudo, intercambiables para describir ese tipo de combustiones y/o sus comienzos, en los que no hay presente una fuente de encendido exterior. Algunas de esas expresiones se han especializado; así, por ejemplo: *autoignición* (y, menos frecuentemente, *ignición espontánea*) se han asociado a este tipo de fenómeno cuando se produce en una mezcla aire/gas inflamable a altas temperaturas. El comienzo de las llamas en una superficie sólida expuesta a altos niveles de calentamiento es conocido comúnmente como *ignición espontánea*. Si bien *combustión espontánea* se puede emplear también para describir tales eventos; de los tres términos, es uno de los más frecuentemente asociados con el comienzo de la combustión latente, sin llama, en el interior de materiales sólidos.

Aunque esos sistemas son físicamente muy diferentes, comparten un mecanismo común por medio del cual se desarrolla la combustión autosostenida, es decir, con calentamiento interior incontrolado.

MECANISMO DE ENCENDIDO

Cuando un material combustible y el oxígeno están en contacto se produce una reacción de oxidación y se desprende calor; lo cual es válido para cualquier mezcla combustible/aire. A temperaturas ambientes normales, la reacción es tan lenta que, en general, puede ser despreciada. Sin embargo, de acuerdo con la ley de Arrhenius, al elevarse la temperatura (T), la veloci-

dad de la reacción aumenta de forma exponencial:

$$\text{Velocidad de la reacción} = c_f \cdot c_o \cdot A \cdot e^{-E_a/RT} \quad [\text{Ec. 1}]$$

siendo c_f la concentración de combustible; c_o , la concentración de oxígeno; A , una constante llamada factor de frecuencia; E_a , la energía de activación, y R , la constante universal de los gases.

A finales del siglo pasado, Van't Hoff reconoció que la acción autocatalítica necesaria para una exposición puede provenir del calentamiento producido por una reacción exotérmica, debido a que la velocidad de las reacciones químicas aumentan muy rápidamente cuando sube la temperatura. El criterio para que se produzca una explosión está relacionado con la velocidad de ganancia o pérdida de calor neta para un volumen dado del sistema que reacciona. Si la velocidad de pérdida de calor debida a la conducción, convección y radiación permanece igual que la de generación de calor por reacción, se establecerá una distribución de temperaturas estable, mientras que si la pérdida de calor no puede equilibrarse con la de generación, entonces se producirá una «avalancha térmica» hasta la ignición.

Unos treinta años después, N. N. Semenov desarrolló un modelo elemental para las explosiones térmicas que sirvió para demostrar las principales características cuantitativas de esos fenómenos (Fig. 1). En ese modelo, la temperatura T de los materiales que

reaccionan se considera uniforme en todo el volumen, pero distinta de la temperatura T_a de las paredes del recipiente que los contiene (Fig. 2a). Esta condición corresponde a fluidos bien mezclados, ya que la conductividad de los sólidos es generalmente demasiado baja para igualar este comportamiento de un modo cuantitativo. Si bien la interpretación cuantitativa completa de la ignición en sólidos necesita tener en cuenta tanto variaciones temporales como espaciales, apenas hay una distinción cualitativa de las predicciones del modelo espacial.

La velocidad de calentamiento como criterio

Si la diferencia de temperaturas no es demasiado grande, la *velocidad de enfriamiento (pérdida de calor) de las sustancias que reaccionan*, (E), a una temperatura uniforme T por unidad de volumen puede escribirse como:

$$E = [h (S/V)] (T - T_a) \quad [\text{Ec. 2}]$$

siendo h el coeficiente de transferencia de calor, S y V , respectivamente, la superficie y el volumen del recipiente donde se produce la reacción. Se considera que el recipiente está a la temperatura T_a .

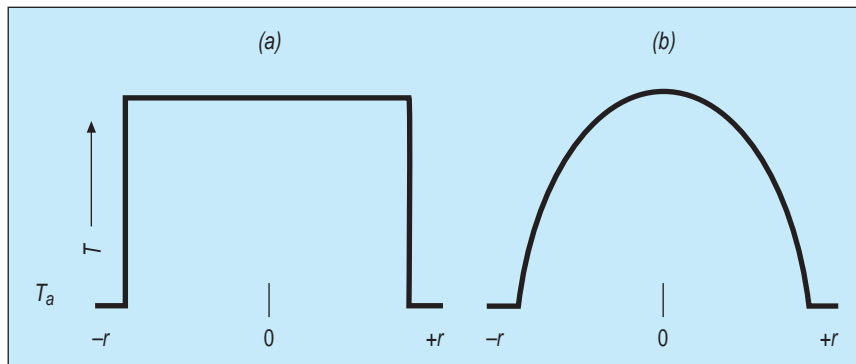
A su vez, la *velocidad de calentamiento (ganancia o generación de calor) por unidad de volumen C* viene dada por:

FIGURA 1. Los estudios sobre explosiones de origen térmico han permitido el estudio de las características de calentamiento espontáneo de diferentes materiales.



FIGURA 2 . Perfiles de temperatura que se consideran en la teoría de la ignición térmica

- a) Condiciones de Semenov. Todas las sustancias que reaccionan están a la temperatura T , transferencia de calor en la superficie ($\pm r$).**
b) Condiciones de Frank-Kamenetskii. Transporte de calor por conducción interna, $T = T_s$ en la superficie ($\pm r$).



$$C = v \cdot q \quad [\text{Ec. 3}]$$

donde v (concentración/tiempo) es la velocidad de reacción por unidad de volumen y q (J/mol) es el calor generado por mol.

Si consideramos, como se ha dicho al principio, que la velocidad de la reacción tiene una relación normal de Arrhenius con la temperatura, entonces:

$$C = -k f(c) q = A e^{-E_a/RT} f(c) q \quad [\text{Ec. 4}]$$

donde $f(c)$ es una función apropiada de la concentración de las sustancias que reaccionan, como se aplica a los gases. Un término de densidad es también necesario si C se expresa en términos de masa que reacciona. La relación entre estos valores de flujo de calor en función de la temperatura se muestra en la Figura 3. La velocidad de pérdida de calor es la línea recta que pasa por T_a , y las de generación de calor forman una familia de curvas relacionadas con la concentración de las sustancias que reaccionan. Este diagrama fue construido inicialmente por Taffanel y Le Floch ya en 1912, antes de la aproximación analítica de Semenov.

En primer lugar consideremos que una sustancia reactiva se introduce en el recipiente, cuya temperatura superficial es T_a , bajo unas condiciones de concentración correspondientes a la curva de calentamiento C_A . La sustancia está también a T_a y, debido a que su curva de calentamiento C_A se encuentra por debajo de la línea de enfriamiento E , el sistema se calentará hasta que se alcance la temperatura T_s . En este punto, las velocidades de calentamiento y de enfriamiento son iguales y la reacción se comportará

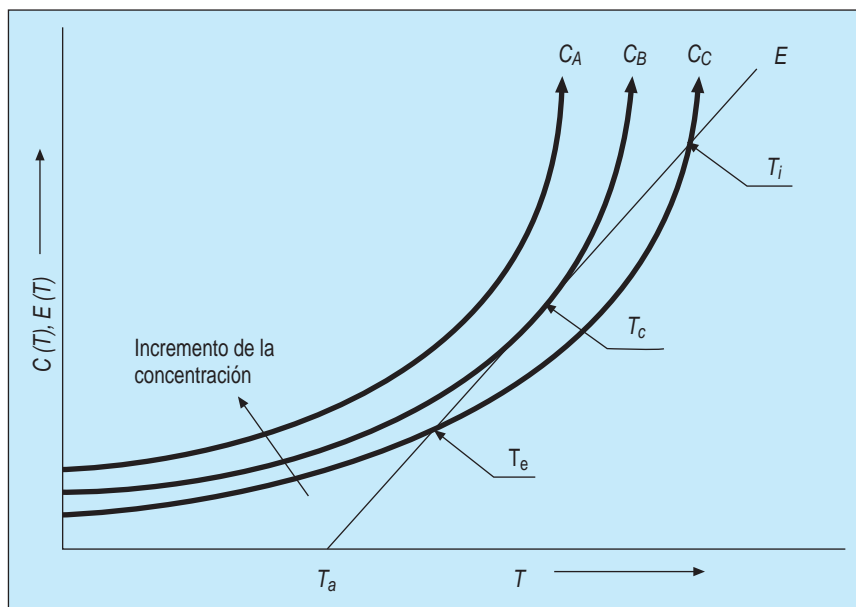
de modo estacionario, sin posterior aceleración. Esta intersección de las dos curvas corresponde a un estado estacionario estable y podría ser llamada *reacción lenta o subcrítica*.

En un segundo punto de intersección, T_i , no puede mantenerse una condición estable del modo que pudiera hacerse en T_s . Si la temperatura sube por encima de T_i , la reacción se acelera ($C > E$), mientras que si baja por debajo de T_s , el sistema tenderá a una condición de reacción estable en T_s ($E > C$). Por consiguiente T_i es un estado estacionario inestable y repre-

senta una línea divisoria en el comportamiento del sistema del siguiente modo: si la *temperatura inicial* de las sustancias que reaccionan, como opuesta a la *temperatura ambiente* del recipiente de la reacción T_a (la condición límite, está por encima de la segunda intersección, T_i , el sistema se convierte en inestable y se produce la ignición. Esto puede ocurrir en la práctica y ha sido la causa de incendios industriales. Se conoce como «el problema del apilamiento en caliente», y se refiere a unas circunstancias en las cuales un producto procedente de un proceso caliente se amontona antes de que se haya enfriado lo necesario.

La curva C_c de la Figura 3 representa un experimento con una concentración inicial mucho más alta. En este caso, la reacción es inmediatamente explosiva debido a que la velocidad de calentamiento supera siempre a la de enfriamiento a temperaturas razonables, y a este hecho lo denominaríamos como *ignición o reacción supercrítica*. La única intersección entre C y E es el hipotético estado de ignición. Las condiciones extremas, que marcan el límite entre los dos tipos de comportamiento, se ilustra en la curva C_b , que es tangente a E , y en la que los puntos de intersección T_s y T_i se han unido en un solo T_c . El sistema se calentará lentamente desde T_a a T_c , a partir del cual se producirá un calentamiento rápido que se acelerará hasta

FIGURA 3. Relación entre la velocidad de calentamiento, $C(T)$, que sigue la ley de Arrhenius, a diferentes concentraciones de reactivos en un recipiente cerrado y $E(T)$ a una temperatura de superficie determinada (T_a). T_s , T_i y T_c se refieren a los estados estable, inestable y crítico. Procedencia: Ref. 4.



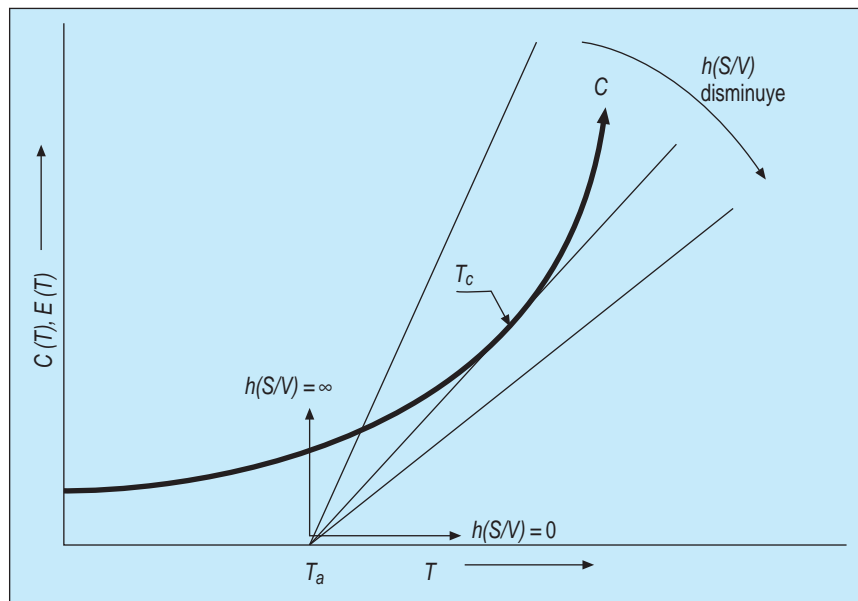
el encendido. Las condiciones de una simultánea igualdad y tangencia entre C y E corresponden a las menores exigencias térmicas para la ignición espontánea y conducen a la mínima concentración de sustancias necesaria para que reaccionen a una temperatura ambiente dada T_a , denominada como *condición crítica*, a la cual es posible la ignición espontánea.

La velocidad de enfriamiento como criterio

Si la temperatura ambiente del recipiente (T_a) varía, entonces la línea que representa la velocidad de enfriamiento, E , será desplazada hacia la izquierda o hacia la derecha (Fig. 4). Para una concentración inicial determinada de sustancias que reaccionan, un aumento en el valor de T_a hasta T_a' desplaza E más allá de la *condición de tangencia*, que marca el punto crítico de la temperatura del recipiente $T_{a,c}$.

Alternativamente, ya que la pendiente de E viene determinada por el valor del término $[h(S/V)]$, si la velocidad de transferencia de calor cambia debido a una modificación en la relación entre la superficie y el volumen del recipiente o en el mismo coeficiente de transferencia de calor, la pendiente de la curva de enfriamiento se modifica, como muestra la Figura 5. Hay una transición de una reacción *subcrítica* a otra *supercrítica* si el ex-

FIGURA 5. Relación entre la velocidad de calentamiento, $C(T)$, en un recipiente cerrado y $E(T)$ cuando disminuye la velocidad de transferencia de calor, que depende de la relación (S/V) . Se muestran también las condiciones límite: $[h(S/V)] = \infty$ (isotérmica) y $[h(S/V)] = 0$ (adiabática). Procedencia: Ref. 4.



perimento es realizado en un recipiente de bajo S/V , incluso aunque no cambie ni la concentración de las sustancias que reaccionan ni la temperatura del recipiente.

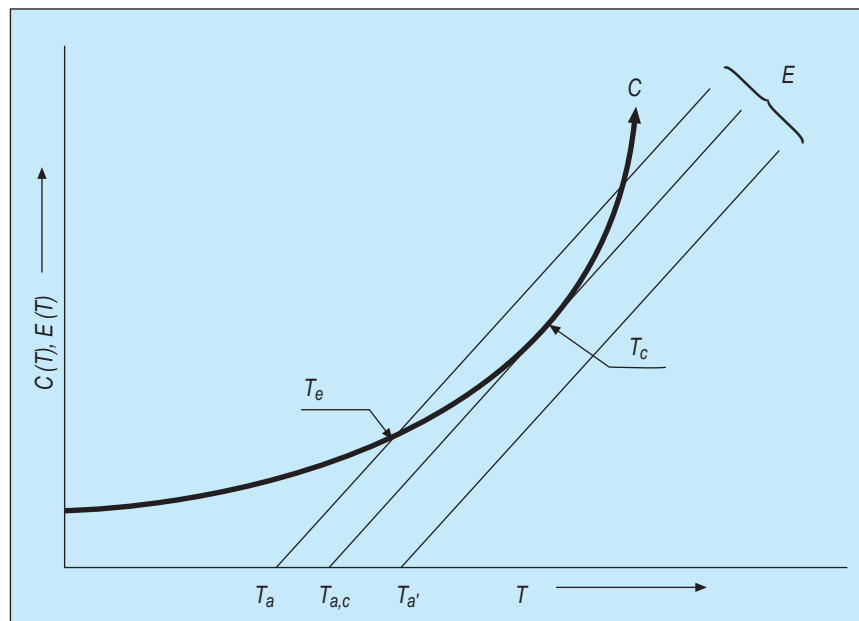
En este caso, la cantidad del material es vista como importante, ya que gobierna la relación superficie/volumen. El ejemplo más sencillo (aunque

no demasiado práctico) es el de la geometría esférica, para la cual $S/V = 3/\text{radio}$, ya que los problemas de la ignición espontánea pueden tratarse en el contexto de materiales apilados, tales como grano, alimentos para animales, carbón, fertilizantes, explosivos; a la pregunta «¿Será seguro almacenar un material X a una temperatura Y?», la respuesta puede ser: «Depende de cuánto material haya».

Con una velocidad de pérdida de calor muy grande, $[h(S/V)] \rightarrow \infty$, las sustancias que reaccionan permanecen siempre a T_a . Esto es, la reacción es isotérmica y no puede nunca mostrar una subida crítica hasta la ignición. Sólo puede haber una intersección entre C y E para un valor dado de T_a , independientemente de su valor. Como contraste, si el sistema es adiabático, $[h(S/V)] \rightarrow 0$, C y E nunca se cruzan y la ignición es inevitable, cualquiera que sea la temperatura ambiente.

Si bien referida estrictamente aquí con respecto a la magnitud de $h(S/V)$, la condición de comportamiento casi isotérmico en una reacción exotérmica se satisface si $E \gg C$, de modo que en un estado estacionario $(T - T_a) \rightarrow 0$. La consecuencia de esto es que si la velocidad constante de una reacción exotérmica se determina en un aparato a temperatura controlada, T_a , hay que asegurar la condición $E \gg C$, si no la temperatura en el interior de las sustancias que reaccionan es distinta de T_a y la reacción se produce a

FIGURA 4. Relación entre la velocidad de calentamiento, $C(T)$, en un recipiente cerrado y $E(T)$ cuando aumenta la temperatura superficial T . El punto crítico se produce en $T_{a,c}$. Procedencia: Ref. 4.



la velocidad correspondiente a la temperatura más alta.

Condiciones para que la ignición térmica sea posible

Las principales características pueden resumirse de la manera siguiente:

- Reacción exotérmica con una energía de activación significativa.
- Los criterios de ignición son gobernados por una interacción entre C y E .
- La ignición sólo es inevitable en condiciones adiabáticas, pero las condiciones críticas para la ignición también se dan en sistemas no adiabáticos; cuando, por ejemplo:
 - El material o sistema reactivo ha sido aislado de alguna manera (h , el coeficiente de transferencia de calor, se reduce).
 - La relación S/V del material o sistema disminuye de valor.
 - La temperatura ambiente T_a , aumenta.
 - El tamaño o forma de los productos son importantes; por ejemplo, la superficie puede reducirse formando una masa grande a partir de varias pequeñas.

Aplicación a los materiales sólidos

Para que se produzcan las combustiones espontáneas en sólidos en masa hay dos criterios básicos:

- a) El sólido debe ser poroso.
- b) Debe producir una carbonilla rígida cuando se calienta.

El significado de estas exigencias es simplemente que el aire debe ser capaz de difundirse a través de la masa del material con el fin de proporcionar oxígeno para el calentamiento inicial, y su posterior combustión. Esta última adopta la forma de fuego latente, que sólo se mantendrá si se forma una carbonilla rígida (o semirrígida).

A pesar de esa segunda condición, en los combustibles líquidos y materiales termoplásticos también puede producirse la combustión espontánea si son absorbidos o mezclados con sustratos rígidos. Éste puede ser inerte –tal como la lana de roca empleada con fines de aislamiento– o un sólido combustible que se carbonice al calentarse –como el algodón.

En la industria textil, las combustiones espontáneas de materiales embalados en pacas resultó ser un serio problema. A finales del pasado siglo se encontró la causa en los aceites

que se empleaban para lubricar las fibras con el fin de mejorar sus características durante el procesado, y se inventó un ensayo sencillo para identificar aquellos aceites que presentaban un riesgo significativo: este ensayo se realizaba empapando una determinada cantidad de algodón con una determinada cantidad de aceite que después se calentaba a $100\text{ }^\circ\text{C}$ durante dos horas. El aceite se consideraba inadecuado si durante ese tiempo la temperatura en el centro de la masa llegaba a los $200\text{ }^\circ\text{C}$.

Ésta fue una solución específica para un problema concreto y presentaba algunas dificultades: por ejemplo, un antioxidante en el aceite podía retrasar el proceso de autocalentamiento lo suficiente como para permitir que pasara un aceite con riesgo; sin embargo, no puede ser aplicado a otros sistemas de combustión espontánea. Un método más general para identificar –y cuantificar– el riesgo tuvo que esperar a que se produjeran desarrollos significativos en la teoría del calentamiento espontáneo.

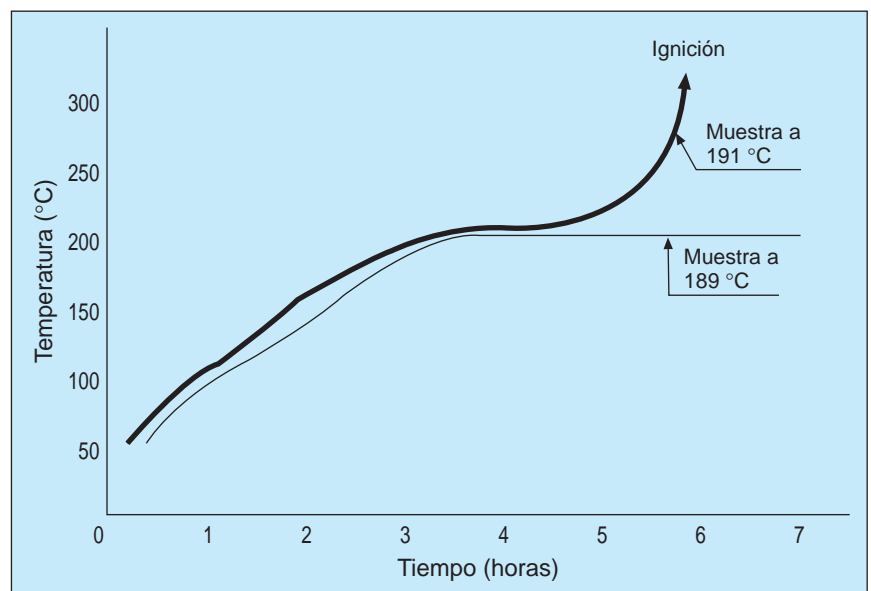
La teoría de Semenov proporcionó un entendimiento cualitativo de la naturaleza de las condiciones críticas para la ignición térmica. Su modelo es simple, ya que considera tácticamente una temperatura uniforme, pero satisfactorio si toda la resistencia al transporte de calor está en las paredes del recipiente (Fig. 2a); sin embargo, no es válido para sistemas que se refieren a combustibles sólidos. A me-

diados de este siglo, D. A. Frank-Kamenetskii desarrolló un modelo (conocido como modelo F-K) en el cual también existe una resistencia al transporte del calor dentro de las propias sustancias que reaccionan debido a una baja conductividad térmica, produciéndose una situación en la que la temperatura es mayor en el centro (en un sistema «ideal»), y cae hacia el exterior, donde es más cercana a la temperatura ambiente (T_a). Un perfil de temperatura teórico para estos sistemas de calentamiento puede verse en la Figura 2b.

El modelo F-K predice matemáticamente la existencia de una temperatura ambiente crítica por encima de la cual la masa del material (de geometría definida) se calentará hasta la ignición, y puede emplearse para predecir las condiciones para la combustión espontánea de una gran cantidad de materiales a partir de los resultados de muestras relativamente pequeñas del mismo material. Los resultados son extrapolados sobre la base del modelo para dar una estimación de la temperatura crítica para una masa grande. El procedimiento requiere la determinación de las temperaturas críticas de una cierta cantidad de diferentes tamaños de muestra (por ejemplo, cubos con lados desde 5 hasta 30 cm o más), como se aprecia en la Fig. 6.

El modelo F-K relaciona el tamaño de la muestra con la temperatura crítica de la misma. Su planteamiento matemático es el siguiente:

FIGURA 6. Determinación de la temperatura crítica de un material mediante cubos de 50 mm de lado. La ignición se produce después de 5 horas a $191\text{ }^\circ\text{C}$ pero no hubo ignición a $189\text{ }^\circ\text{C}$. Por lo tanto $T_{ac} = 190\text{ }^\circ\text{C}$. (Curvas desplazadas para mayor claridad). Procedencia: Ref. 2.



Si sólo se está produciendo una reacción de orden cero, podemos igualar el calor generado con el calor perdido por conducción, de modo que:

$$\lambda \nabla^2 T = -\rho C W \quad [\text{Ec. 5}]$$

donde W es la velocidad de reacción, que puede expresarse del siguiente modo:

$$W = A \cdot e^{-E_a/RT} \quad [\text{Ec. 6}]$$

y, sustituyendo, resulta:

$$\lambda \nabla^2 T = -\rho C A e^{-E_a/RT} \quad [\text{Ec. 7}]$$

Esta ecuación no puede resolverse analíticamente, por lo que emplearemos la expansión:

$$\frac{-E_a}{RT} \approx \frac{-E_a}{RT_A} + (T - T_A) \frac{E_a}{RT_A^2} \quad [\text{Ec. 8}]$$

que es válida si RT/E_a es pequeña y $T \approx T_A$.

T_A es la temperatura de referencia, que en los casos prácticos es la ambiente.

Cambiando a variables adimensionales tenemos:

$$\nabla^2 \theta = -\left[\rho \frac{C}{\lambda} \frac{E_a}{RT_A^2} r^2 A e^{-E_a/RT_A} \right] e^{\theta} \quad [\text{Ec. 9}]$$

donde θ es una variable de temperatura y r es una variable de espacio.

Llamando δ a la expresión dentro del corchete resulta:

$$\nabla^2 \theta = \delta e^{\theta} \quad [\text{Ec. 10}]$$

La distribución de temperatura en estado estacionario en el interior de la masa puede conocerse integrando esta ecuación con unas condiciones límite adecuadas. Sin embargo, para cada geometría y conjunto de condiciones límites existen unos valores límite de δ , a los que llamamos δ_c , por encima de los cuales no hay solución, es decir, no son posibles los estados estacionarios, lo que interpretamos como que se produce la ignición.

A partir de la definición de δ , es decir, del contenido del corchete en la Ec. 9

$$\delta_c = \rho \frac{C}{\lambda} \frac{E_a}{RT_A^2} r^2 e^{-E_a/RT_A} \quad [\text{Ec. 11}]$$

donde T_A es la temperatura ambiente crítica para un volumen de lado medio r (o radio o semiespesor, etc.). Lo que nos da:

$$\ln \left(\frac{\delta_c T_A^2}{r^2} \right) = M - \frac{N}{T_A} \quad [\text{Ec. 12}]$$

siendo M y N constantes relacionadas con las propiedades del material,

$$M = \ln \left(\frac{\rho C E_a A}{\lambda R} \right); N = \frac{E_a}{R}$$

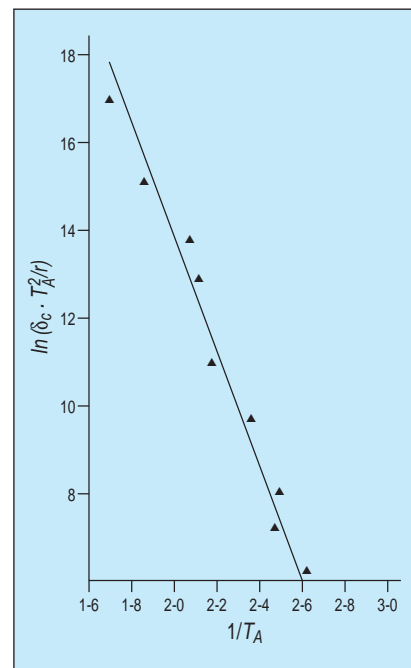
T_c es la temperatura crítica; r es la dimensión característica de la muestra (radio de la esfera, la mitad del lado del cubo, etc. Fig. 7), y δ_c es una constante, cuyo valor depende de la forma de la muestra (Tabla 1). Haciendo un gráfico con los datos puestos en forma $(\delta_c \cdot T_A^2/r^2)$ vs. $1/T_A$ se aprecia una línea recta, como la de la Figura 8. En general, valores obtenidos con muestras con dimensiones lineales superiores a 50 cm pueden ser empleados para estimar temperaturas críticas de capas de unos 3 m de espesor.

OTROS MECANISMOS CON CALENTAMIENTO INTERNO

También pueden encontrarse otros mecanismos con producción interna de calor y que incluyen calentamientos biológicos y descomposición química exotérmica.

El calentamiento como resultado de una actividad biológica se presenta cuando un material de origen vegetal es invadido por bacterias o mohos. Se sabe que este fenómeno se produce en montones de heno y en grandes amontonamientos de otros alimentos vegetales. Si el contenido en humedad es suficientemente alto para que los organismos se establezcan, se generará calor como resultado de la respiración y del desarrollo microbiano, y la temperatura aumentará. Generalmente, la consecuencia de esto será que el material se estropeará, produciéndose unas pérdidas financieras

FIGURA 8. Valores de encendido espontáneo para aislamientos a base de fibras de madera. Procedencia: Ref. 4.



mucho antes de que haya cualquier riesgo de incendio, de manera que protegiendo lo almacenado de tal deterioro también protegemos del fuego.

Para prevenir la invasión de microorganismos hay que mantener un contenido bajo en humedad (siempre inferior al 12%), de este modo el riesgo de producción de calor interno será

FIGURA 7. Geometrías unidimensionales: lamina infinita, cilindro infinito, cubo y esfera. Procedencia: Ref. 9.

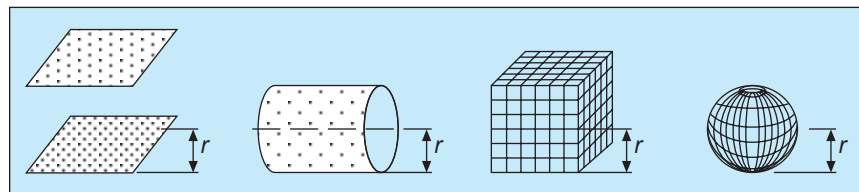


TABLA I. Valores de δ_c , ΔT_c y de la dimensión característica para montones, bloques o aplicamientos de diversas geometrías de acuerdo con la teoría de Frank-Kamenetskii para la ignición térmica.

Forma de pila	Valor de δ_c	ΔT_c (en el centro)	Dimensión característica, r
Placa infinita	0,88	$1,20 RT_A^2/E$	la mitad del espesor
Cilindro infinito	2	$1,39 RT_A^2/E$	radio del cilindro
Cubo	2,52	$1,48 RT_A^2/E$	la mitad del lado
Esfera	3,3	$1,60 RT_A^2/E$	radio de la esfera

virtualmente eliminado. En el heno, la bacteria responsable de la subida de la temperatura puede sobrevivir a temperaturas tan altas como 70 °C, sobrepasados los cuales muere rápidamente. Sin embargo, esta temperatura es suficientemente alta para promover otros procesos químicos exotérmicos que, bajo las condiciones adecuadas, conducirán a una combustión activa. Desgraciadamente, el calentamiento biológico se conoce todavía muy mal y no es posible aplicar el modelo F-K (ni ningún otro) para predecir las condiciones bajo las cuales puede desarrollarse la combustión espontánea.

El autoCALENTAMIENTO de compuestos químicos es un riesgo reconocido en muchas industrias. Hay sustancias químicas que son intrínsecamente inestables y que se descomponen con desprendimiento de calor a veces explosivamente. Su comportamiento puede describirse empleando el modelo F-K, o una modificación, y la relación entre el tamaño de la muestra y la temperatura crítica definida. Este tipo de ignición se presenta en la industria, bien debido a la falta de cuidado en la manipulación del material, del que se sabe que tiene riesgo, o bien porque la naturaleza de riesgo del material no ha sido identificada.

APARICIÓN DE FUEGOS ESPONTÁNEOS

Una vez que se conocen los principios que gobiernan las combustiones espontáneas es posible sugerir circunstancias bajo las cuales puede esperarse que se produzcan los fuegos por este motivo. Los experimentos de laboratorio se realizan para determinar la validez de tales sugerencias, si bien puede ser sólo necesario buscar en la literatura técnica para saber si un material particular tiene, o no, un historial reconocido de ignición espontánea.

Almacenamiento a granel

En cantidades suficientemente grandes, incluso materiales aparentemente inocuos puede calentarse hasta la ignición desde temperaturas muy próximas a la normal ambiente. El proceso es extremadamente lento y la subida de la temperatura en las primeras etapas es pequeña, de modo que el problema permanece sin detectar hasta que es demasiado tarde, cuando la combustión activa ha comenzado. Por ejemplo, son muy bien conocidos los incendios que se producen en los almacenamientos de carbón, a

menos que los montones estén colocados de manera que se evite un autoCALENTAMIENTO significativo.

Materiales calientes

Si se producen acumulaciones estables de materiales que se procesan en caliente existe la posibilidad de que se produzca la ignición. Tales ejemplos se producen muy a menudo en secaderos industriales, donde capas con espesores del orden de varios centímetros, o más gruesas, pueden ser suficientes para ocasionar problemas. El material caliente que se coloca en recipientes o en cajas para su almacenaje o transporte, antes de que se les permita enfriarse, se comportan de alguna de estas dos maneras: o bien el material se enfriará a temperatura ambiente o, si no, de otro modo, empezará un proceso de calentamiento interno y puede llegar a encenderse.

Una vez más la línea divisoria entre los dos tipos de comportamiento está determinada no sólo por la temperatura del material, sino también por el tamaño de la caja, saco o pila. Los incendios en lavanderías de hospitales pueden a menudo, ser atribuidos a combustiones espontáneas de ropas blancas calientes sacadas de las secadoras y colocadas inmediatamente en una caja o en carrito (Fig. 9).

Calentamiento biológico

Como se ha dicho antes, este tipo de material tiende a presentarse en

grandes montones de material húmedo de origen vegetal. Hay que controlar los niveles de humedad para evitar deterioros y problemas, que se presentan cuando el material se humedece accidentalmente, lo que puede ocurrir simplemente como resultado de goteras, o de una fuga, en el almacén. Hay mayor dificultad en conocer las grandes cantidades de humedad que pueden condensarse cuando un material relativamente templado, procedente de climas calientes, es embarcado y almacenado en un clima más frío.

Materiales reactivos

De interés particular son aquellos fuegos que se producen en pequeñas acumulaciones de material a temperatura ambiente normal, ya que suelen ser muy peligrosos. Son producidos, generalmente, por un pequeño grupo de materiales reactivos que pueden encenderse o producir ignición espontánea bajo circunstancias inesperadas (Anexo 1). Esta clase de materiales incluyen barnices y aceites de origen animal o vegetal. Tales líquidos son perfectamente seguros si se almacenan en botellas o bidones donde la superficie en contacto con el oxígeno es pequeña. Los problemas se producen cuando el material se dispersa de modo accidental o deliberado.

Por ejemplo, los trapos que se emplean para limpiar un derrame de aceite presentan una gran superficie expuesta al aire; si esos trapos son posteriormente aplicados en una caja, el aislamiento térmico resultante puede

FIGURA 9. Los incendios en lavanderías de hospitales pueden ser atribuidos a menudo a combustiones espontáneas de ropas blancas calientes sacadas de las secadoras y colocadas amontonadas inmediatamente.



de ser suficiente como para que se produzca la autoignición. Por razones como ésta se recomienda que los tanques conteniendo aceites vegetales no se aislen nunca empleando revestimientos porosos. También se tiene conocimiento de problemas similares con recipientes conteniendo materiales pulverulentos cuyas superficies han sido recientemente pintadas o barnizadas.

Residuos de líquidos, tales como aceites y jabones, también pueden producir un aumento de los incendios incluso después de que la ropa impregnada ha sido lavada. Los fuegos espontáneos en lavanderías no son extraordinarios, y la causa ha sido atribuida, a veces, a material contaminado en el que el residuo no ha sido completamente eliminado por el proceso de lavado. Si el material es posteriormente secado en un tambor giratorio y colocado caliente en un cesto o en un carrito, la ignición puede producirse después de un período de horas. Los fuegos en lavanderías han sido también atribuidos al secado en tambor de algunos tejidos sintéticos, los cuales, si son apilados calientes, pueden reaccionar de modo suficientemente vigoroso como para producir la autoignición.

DIAGNÓSTICO

La evidencia de combustiones espontáneas será casi con seguridad circunstancial. Si bien se ha sugerido ocasionalmente que podrían emplearse medios químicos para diagnosticar las combustiones espontáneas después de sucedidas, hay pocas evidencias que respalden esas intenciones. Sin embargo, hay cuatro cuestiones básicas que pueden ayudar a decidir si un fuego en particular tuvo o no un origen espontáneo.

Naturaleza del material

Puede comprobarse si la combustión espontánea podría producirse en el material afectado bajo las condiciones que eran las ordinarias antes del incendio. Las consultas a la literatura técnica puede revelar si el material es conocido por tener tendencia al autoencendido y dar algunas indicaciones sobre el suceso (Fig. 10). En algunos casos pueden realizarse ensayos con el material, lo que estaría aconsejado en el caso de que se quiera reproducir las condiciones anteriores al fuego tan fielmente como sea posible.

Sin embargo, esto puede ser imposible si el fuego se produjo en una

FIGURA 10. El método de obtención habitual de la espuma de poliuretano en grandes bloques provocó en su origen incendios, ya que se almacenaba sin que se hubiera enfriado suficientemente todo el volumen del bloque. Primero porque la reacción isocianato-poliol es fuertemente exotérmica de la reacción y segundo por la propia naturaleza aislante del material.



gran cantidad de material, o si las condiciones no son conocidas. Como alternativa, realizarán ensayos con el material para conocer sus características, y esa información puede compararse con las predicciones, en condiciones semejantes a las que tienen que haber existido antes del incendio, y realizar una evaluación de las posibilidades de autoencendido.

Cambios de proceso

Si los procesos se han realizado de una forma determinada durante un

largo período de tiempo y si la ignición espontánea aparece de repente, deben buscarse cambios en los procedimientos de operación o combinaciones inusuales de circunstancias. Muy a menudo resulta extremadamente difícil rastrear esos hechos, ya que los operadores de planta pueden tener dificultades para comprender bien la importancia de anotar muchos de tales cambios y los pasan por alto.

Cambios que pueden probar ser significativos son los siguientes:

- Operar a temperaturas más altas.

- Cantidades de materiales mayores.
- Tiempos de almacenamiento mayores, debidos a huelgas, grandes pedidos, etc.
- Cambios en la formulación del producto; por ejemplo, catálisis, antioxidantes, cambio de proveedor, etc.
- Diferentes procesos de rutina diaria, mantenimiento diario.
- Nuevos procedimientos de puesta en marcha, apertura/cierre.

Tiempo de encendido

Muy a menudo es posible agrupar el tiempo en el que la ignición puede producirse. Mientras que no es posible precedir el tiempo para el encendido con gran precisión, la ignición espontánea es un proceso característicamente lento, como puede verse a continuación:

Esto no quiere decir que cualquier palet con sacos de alimentos vaya a arder espontáneamente en una semana, pero si el material tiene riesgo podría producirse la ignición en ese período de tiempo, y no en dos horas ni en diez semanas (a menos que las condiciones ambientales cambien significativamente durante ese tiempo). A veces es posible excluir la posibilidad de ignición espontánea empleando consideraciones de este tipo.

Evidencia física

En algunos casos esto será lo más próximo a la evidencia directa de la combustión espontánea que se puede encontrar. Si se puede encontrar alguna evidencia de este tipo; por ejemplo, profundidad de quemado, esto nos da una indicación razonablemente fuerte que permite considerar la autoigni-

ción, mientras que la posibilidad de pequeñas fuentes de encendido ocultas puede ser excluida.

A veces, una pequeña fuente de calor latente puede permanecer «escondida» en un material combustible durante largos períodos de tiempo sin que haya evidencias de ello en la superficie, y, una vez que la combustión alcanza la superficie, puede parecer que se ha producido espontáneamente. Sin embargo, si pueden ser razonablemente excluidos focos ocultos, entonces la evidencia de que la combustión empezó en el interior del material es probablemente señal de autoignición. Hay que tener en cuenta que la velocidad de propagación en profundidad de los fuegos latentes es muy lenta; como ejemplo se ha descrito que un fuego latente inducido en la base de una capa de serrín mezclado de 0,85 mm de espesor tardó diez días en llegar a la superficie.

Capas de pocos cm de espesor acumulado sobre una superficie caliente.	Unas pocas horas.
Recipientes de trapos empapados en aceite vegetal.	Varias horas.
Sacos, bolsas, de materiales calientes colocados en ambientes más fríos.	Alrededor de un día.
Palet cargado de sacos, bolsas de alimentos amontonados juntos.	Días o semanas.
Silo de alimentación a temperatura ambiente.	Semanas o años.

CONCLUSIONES

Las igniciones espontáneas se presentan en un material cuando el calor generado en su interior no puede ser disipado con velocidad suficientemente alta a sus alrededores. En consecuencia, la aparición de la ignición espontánea no depende únicamente de la naturaleza del material involucrado,



Las igniciones espontáneas se presentan en un material cuando el calor generado en su interior no puede ser disipado con una velocidad lo suficientemente alta.

sino también de la temperatura del local junto con el tamaño y la forma del cuerpo.

Debido a las relativamente altas temperaturas y/o grandes acumulaciones necesarias para el autoencendido, el problema se presenta, generalmente, a nivel industrial. Sin embargo, existen algunos materiales, en particular aceites vegetales, barnices y pinturas, que pueden dar lugar a fuegos espontáneos en cantidades completamente pequeñas a temperatura ambiente. Tales fuegos pueden producirse en situaciones domésticas.

La probabilidad de que se produzcan combustiones espontáneas en una situación dada se puede evaluar a menudo ensayando el material involucrado. Sin embargo, esta evaluación no es posible cuando en el problema está involucrado un calentamiento biológico.

LA APORTACIÓN PARANORMAL

En parapsicología se entiende como *combustión humana espontánea* aquel hecho por el cual una persona empieza a arder sin causa aparente en un momento determinado, quedando el cadáver total o parcialmente carbonizado.

En publicaciones sobre ese campo se describen varios casos de este fenómeno, que se dice fueron dados a

SÍMBOLOS

A: Factor de Arrhenius (s^{-1}).
 C: Velocidad de calentamiento.
 E: Velocidad de enfriamiento.
 Ea: Energía de activación (kJ/mol).
 M: Constante.
 N: Constante.
 R: Constante universal de los gases (= 8,314 J/mol. °K).
 S: Superficie.
 T: Temperatura.
 V: Volumen.
 c: Concentración.
 h: Coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot ^\circ K$).
 r: Dimensión característica lineal.
 ∇ : Operador laplaciano.
 δ : Parámetro de autocalentamiento de Frank-Kamenetski.
 δ_c : Valor crítico de δ .
 λ : Conductividad térmica ($W/m \cdot ^\circ K$).
 ρ : Densidad (kg/m^3).

conocer por el *British Medical Journal*, acerca de personas mayores fallecidas de modo solitario y cuyos cuerpos aparecen carbonizados, de modo casi total o parcialmente. Algunas circunstancias comunes a todos ellos dan un carácter extraño a estos hechos:

– Sólo se queman los tejidos blandos, no siempre todo el cuerpo; a veces, la zona quemada puede ser un lateral del cuerpo. Los huesos suelen quedar calcinados pero intactos.

– La combustión se produce desde el interior hacia el exterior (se cita el caso de un cuerpo ligeramente quemado por su exterior cuya autopsia reveló que las vísceras estaban totalmente carbonizadas).

– Los cuerpos no parecen presentar síntomas de agitación o violencia.

– El calor radiado es muy bajo o nulo (materiales combustibles situados a distancia no superiores un metro permanecen intactos).

En un cuerpo, como el humano, que está compuesto en más de un 70 por 100 por agua (lo que dificulta la incineración de los cadáveres y hace que ésta dure algunas horas), resulta difícil pensar en una fuente de calor de origen interno que produzca efectos como los descritos. Sin embargo, no hay que olvidar el hecho intrínseco de nuestro modo de funcionamiento caracterizado por ser una máquina de combustión interna, que nos permite mantener la temperatura interna del cuerpo alrededor de los 36-37 °C (lo que compartimos con otras especies, formando el grupo denominado «de sangre caliente»).

Para tales fenómenos se han propuesto algunos orígenes: disfunciones del metabolismo, acumulación de electricidad estática, personas dadas a la bebida... Es posible que esos hechos tengan en su momento alguna explicación racional; meditemos sobre los pensamientos que podían asaltar a nuestros mayores al conocer que pajares y graneros ardían solos, fenómenos que ahora son explicables y, lo mejor de todo, evitables.

BIBLIOGRAFÍA

- BEEVER, P. F., y THORNE, P. F. (1982): *Isothermal methods for assessing combustible powders*, Fire Research Station.
- DRYSDALE, D. D. (1999): *An introduction to Fire Dynamics*, Wiley.
- (1995): *Energetic and Spontaneously combustible Substances: identification and safe handling*, HSE Books.
- GRIFFITHS, J. F., y BARNARD, J. A.. (1995): *Flame and Combustion*, Blackie Academic.
- COX, G. (1995): *Combustion Fundamentals of Fire*, Academic Press.
- SHIELDS, T. J., y SILCOCK, G. W. H. (1987): *Buildings and Fire*, Longman Scientific.
- GAYDON, A. G., y WOLFHARD, H. G. (1979): *Flames, their structure, radiation and temperature*, Chapman & Hall.
- BEEVER, P. F.: «Spontaneous combustion - Isothermal test methods» *BRE Information Paper*, IP 23/82.
- WARNATZ, J.; MAAS, U., y DIBBLE, R. W. (1996): *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modelling and Simulation, Experiments, Pollutants Formation*, Springer.



Son bien conocidos los incendios que se producen en los almacenamientos de carbón, a menos que se evite un autocalentamiento significativo.

ANEXO 1. TIPOS DE SUSTANCIAS EN LOS QUE PUEDE PRODUCIRSE LA COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA

Las siguientes clases de materiales proporcionan ejemplos de las sustancias combustibles susceptibles de arder espontáneamente más comunes.

METALES

Los metales finamente divididos presentan una gran superficie capaz de reaccionar con el aire o con la humedad. La reactividad depende de los tamaños de las partículas, naturaleza de la superficie (por ejemplo, tamaño de los poros) y calor de reacción. La humedad puede reducir la reactividad porque ayuda a la transmisión del calor por conducción. Además, algunos metales pueden descomponer el agua al aumentar su temperatura, lo que contribuiría entonces a que se produzca una subida de la temperatura por autooxidación. También puede producirse hidrógeno, que puede arder.

Las aleaciones pueden ser más pirofóricas que sus metales constituyentes.

Los metales, muy a menudo, reaccionan lentamente con el aire, de manera que se forma una capa de óxido que inhibe reacciones posteriores. Sin embargo, si el enfriamiento natural es insuficiente, el metal puede arder todavía.

Los metales en bloque son raramente pirofóricos, pero ese fenómeno se ha producido con uranio, plutonio y torio.

La contaminación con compuestos de azufre puede resultar en la formación de sulfuros pirofóricos. Varios incidentes se han producido al arder recipientes de acero que han contenido compuestos volátiles de azufre.

Algunos óxidos de metales finamente divididos son capaces de una reacción posterior con el oxígeno y pueden arder después de varios días de estar expuestos al aire. Ejemplos de esto son los estados de valencia más baja del hierro, manganeso y uranio.

Muchos catalizadores metálicos empleados en la industria química y actividades relacionadas son pirofóricos. El peligro será mayor si contienen disolventes inflamables, debido a que, por autooxidación, puede generarse calor suficiente para encender los vapores del disolvente. De manera que un catalizador puede ser

más peligroso después de haber sido empleado en una reacción y debería manejarse con mucho cuidado.

Los trapos que se hayan empleado para recoger o limpiar catalizador derramado también pueden inflamarse.

GASES PIROFÓRICOS

Los gases pirofóricos se emplean en industrias de semiconductores. Como ejemplos se citan los siguientes: diborano, fosfina y silano, y sus derivados.

SUSTANCIAS QUE REACCIONAN CON EL AGUA

Algunas sustancias reaccionan con el agua o la humedad atmosférica para producir gases inflamables, por ejemplo: hidrógeno, acetileno, fosfina y amoníaco. El sodio reacciona violentamente con el agua y produce hidrógeno; de modo similar el potasio reacciona con el agua y desprende hidrógeno, que habitualmente se enciende.

Otras sustancias que liberan gases inflamables al contacto con el agua son:

- Metales reactivos.
- Hidruros de boro.
- Hidruros.
- Carburos.
- Nitruro de litio.

COMPUESTOS ORGANOMETÁLICOS

Los compuestos organometálicos contienen enlaces metal-carbón. Pueden ser gases (trimetil boro), líquidos (trimetil aluminio) o sólidos (di-n-butyl magnesio).

Los compuestos de alquil-aluminio se emplean como catalizadores en la industria de polímeros. Estos compuestos, y los trialkil-boranos, sufren autooxidación. El grado de reactividad tiende a disminuir conforme aumenta el peso molecular.

Si bien los órgano-zinc son menos reactivos que los químicamente similares órgano-magnesios, también son pirofóricos.

Los compuestos de alquil-sodio y litio se emplean a menudo en síntesis químicas. De éstos, los butilo-

litios, que son los más importantes comercialmente, reaccionan con la humedad atmosférica y el calor generado es suficiente para encender los vapores inflamables de los disolventes.

FÓSFORO Y SUS DERIVADOS

El fósforo se encuentra en la naturaleza en dos formas: rojo y blanco. El fósforo rojo se oxida lentamente en el aire y tiende a ser no pirofórico, si bien cantidades grandes han ardo debido a la generación de calor en el centro de la masa. También puede arder debido a la fricción. Inversamente, el fósforo blanco arde en aire a 35 °C, aproximadamente, y es normalmente almacenado bajo agua.

Algunos derivados del fósforo arden espontáneamente en el aire. Ejemplos de estos son la difosfina (P_2H_4), algunas halógeno-fosfinas y algunos compuestos órgano-fosforados.

OTROS MATERIALES QUE SE ALMACENAN EN GRANDES CANTIDADES

Algunos materiales que normalmente se consideran como estables pueden encenderse espontáneamente si se almacenan de modo que se permita el autocalentamiento. En estos materiales actúan dos clases de mecanismos: oxidación y acción bacteriológica.

Los materiales susceptibles de sufrir calentamiento por oxidación incluyen celuloide, carbón, pirita de hierro, aceites, plásticos, serrín, trapos, ácido esteárico, madera, productos de soja y algunos tipos de lana. El mecanismo de autocalentamiento en muchos de estos materiales se produce por oxidación de enlaces químicos no saturados.

La acción bacteriológica (por ejemplo, la fermentación) puede hacer subir la temperatura de algunos materiales almacenados a granel. La oxidación puede elevar la temperatura hasta el punto de ignición. La humedad puede aumentar la velocidad de reacción. Ejemplos de materiales que pueden sufrir este fenómeno son: paja, heno, grano, harina y azúcar.