EL FENÓMENO DE LA COMBUSTIÓN EN SUSTANCIAS PELIGROSAS INFLAMABLES Y SU ALMACENAMIENTO SEGURO

Autor: Fernando Antonio Medina Zúñiga
Ingeniero Civil Químico. Chile

Departamento de Prevención y Protección contra Incendios
ASOCIACIÓN CHILENA DE SEGURIDAD

RESUMEN

Las edificaciones destinadas al almacenamiento de importantes cantidades de productos o materiales requieren, normalmente, de la incorporación de medidas de prevención y protección contra incendios, especialmente cuando corresponden a materiales o sustancias clasificadas como peligrosas. No obstante, en la práctica, se observa, que muchas de las soluciones adoptadas no obedecen a un enfoque técnico sobre esta materia, redundando en almacenamientos que presentan deficientes niveles de seguridad.

En el presente trabajo, dado el alcance de su título y lo generalizado del problema, y para efectos de su conocimiento y comprensión, se detallan y aplican conceptos y principios de las características de la combustión de compuestos combustibles sobre grupos constituidos por aquellos que tienen, además, características de peligrosidad que los clasifican como sustancias peligrosas, específicamente gases inflamables, líquidos inflamables, sólidos inflamables y peróxidos orgánicos, que debieran constituir la base técnica principal para el desarrollo de criterios para su almacenamiento seguro y elección de medios de control adecuados, en general, para todas ellas.

1.- INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de importantes cantidades de productos o materiales requiere de edificaciones destinadas especialmente para este uso, las cuales, además, deben contar con medidas de prevención y protección contra incendios. Esta necesidad, que claramente es mayor en casos en los que su contenido corresponda a materiales o sustancias clasificadas como peligrosas, se traduce en la realidad de modo variado, observándose que muchas veces las soluciones definidas no obedecen a un enfoque técnico sobre esta materia, no obteniéndose el nivel de seguridad necesario.

Las sustancias peligrosas se definen como “aquellas que, por su naturaleza, producen o pueden producir daños momentáneos o permanentes en la salud humana, animal o vegetal y a elementos materiales como instalaciones, maquinarias, edificios, etc.”, de acuerdo con lo señalado por el Comité de Expertos de la Naciones Unidas en Transporte de Mercaderías Peligrosas[1], por la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI)[2], por el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG)[3], por el Departamento de Transporte de los EE.UU. (D.O.T.), por el Acuerdo Internacional Europeo para el Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR)[4] y por la norma chilena NCh 382.Of2004 “Sustancias Peligrosas - Clasificación general” [5].

Las sustancias peligrosas se encuentran clasificadas en nueve clases, presentando algunas de éstas varias divisiones. Entre estas clases se encuentran los gases inflamables, líquidos inflamables, sólidos

inflamables y peróxidos orgánicos, los cuales, además de sus características de peligrosidad propias, son combustibles y, por lo tanto, pueden ser parte de una reacción de combustión, cuyos mecanismos o formas de desarrollo se analizan a continuación.

2.- FENÓMENO DE LA COMBUSTIÓN

La combustión es una reacción química entre una sustancia o material combustible y un compuesto comburente, preponderantemente oxígeno, la cual produce monóxido de carbono, anhídrido carbónico y agua, junto con gases y vapores con características combustibles, corrosivas y/o tóxicas, y con presencia de llama y calor.

Para que se inicie una combustión debe existir un combustible, un comburente y energía inicial, los cuales permiten el desarrollo de reacciones en cadena, cuya velocidad de reacción y de liberación de calor depende de las características físico químicas de los reactantes.

2.1.- Combustible

Los combustibles son todas aquellas sustancias o materiales gaseosos, líquidos y sólidos, que contienen, mayoritariamente carbono e hidrógeno. Entre ellos se encuentran madera, papel, cartón, plásticos, líquidos derivados del petróleo, propano, alcohol etílico, etc.

2.2.- Comburente

El agente comburente más común es el oxígeno, el que se encuentra presente en el aire y en otras sustancias, como en el nitrato de sodio y en el clorato de potasio. Su principal característica corresponde a una gran densidad electrónica, que le permite alterar los enlaces que mantienen unidos los átomos de las sustancias combustibles.

2.3.- Energía Inicial

El inicio de una reacción de combustión solo ocurre si los reactantes, es decir, combustible y comburente, disponen de energía suficiente, cuyo origen es, normalmente, externo, para reducir las distancias intermoleculares y modificar o reordenar los enlaces que mantienen unidos los átomos de estas sustancias.

2.4.- Reacción en Cadena

Una vez iniciada la ignición, se producen una serie de reacciones en cadena, que se caracterizan por la descomposición e interacción parcial de las moléculas del combustible y del comburente, formando productos de transición, denominados radicales libres. Esta reacción culmina cuando se transforma todo el combustible, obteniéndose los productos finales (reacción controlada por el combustible) o ante la falta de comburente (reacción controlada por la ventilación). Es posible que la combustión se detenga, temporalmente, debido a la baja disponibilidad de comburente, pero ella puede reiniciarse si la disponibilidad de éste aumenta.

2.5.- Productos de Reacción

Los productos finales de una reacción de combustión son monóxido de carbono, anhídrido carbónico y agua. Sin embargo, si esta reacción no dispone de la cantidad necesaria de comburente, el combustible reaccionará en forma parcial y, además de los productos ya señalados, se producirán gases y vapores como resultado de la estabilización de los radicales libres producidos, los cuales presentan características combustibles, corrosivas y/o tóxicas.

Dado que las reacciones de combustión son exotérmicas, uno de los productos que generan es calor, cuya magnitud está limitada, entre otros factores, por el tipo de combustible y su calor de combustión.

2.6.- Velocidad de Combustión y de Liberación de Calor

La velocidad de combustión y de liberación de calor dependen de las características físico químicas de los reactantes y del tipo de reacción de combustión, la que puede ser homogénea o heterogénea.

Reacciones Homogéneas

Si los reactantes se encuentran en fase gas o vapor, la reacción es homogénea y su velocidad de combustión dependerá de la concentración del combustible en el aire, la cual debe estar comprendida entre sus límites de inflamabilidad, y de la liberación del calor generado, que aumenta la temperatura y permite sostener la reacción mientras existan reactantes.

Tanto la velocidad de combustión como la de liberación de calor tienen valores máximos. A modo de ejemplo si la mezcla de combustible y aire se encuentra en una proporción dentro del rango de inflamabilidad, como ocurre en un soplete alimentado con gas licuado y aire, el calor generado y la temperatura asociada son altas. No ocurre lo mismo con la llama de una vela, ya que el aire debe difundir para formar la mezcla combustible, generando menos calor con una menor temperatura asociada.

Reacciones Heterogéneas

Si los reactantes están en distinto estado, como gas-sólido o gas-líquido, la reacción es heterogénea.

En una combustión heterogénea del tipo gas-sólido, la velocidad de reacción depende de una serie de fenómenos de transferencia de masa que incluyen [6]:

- Difusión del reactante gaseoso hacia la superficie del sólido.
- Difusión del reactante gaseoso a través de la capa de cenizas de la superficie del sólido.
- Reacción del reactante gaseoso con la superficie de combustión del sólido.
- Difusión de los gases y vapores formados a través de la capa de cenizas hacia la superficie del sólido.
- Difusión de los gases y vapores formados hacia el interior del reactante gaseoso.

En una combustión del tipo gas-líquido, en cambio, la velocidad de reacción dependerá de la velocidad de transporte de los reactantes, de su solubilidad y de las interacciones químicas que se produzcan entre ellas.

La combustión de un líquido o de un sólido requiere del aumento de su temperatura superficial hasta que se desprendan vapores a una velocidad suficiente para que, una vez iniciada esta reacción, se mantenga la llama.

Los líquidos combustibles generan vapor desde su superficie, pero solo cuando ellos alcanzan la temperatura de inflamación los vapores emanados pueden formar una mezcla combustible con el aire.

Con los sólidos se pueden aplicar conceptos similares, pero ellos requieren temperaturas más altas sobre su superficie, ya que en forma previa a la existencia de vapores deben producirse descomposiciones de tipo químicas, conocidas como reacciones de pirólisis, originadas por calor radiante o por su exposición a un flujo caliente de gases.

Este tipo de reacción se conoce también como de calor latente o “smoldering” [7] y es la responsable de las características de la combustión de combustibles porosos, principalmente, en los de tipo celulósicos, así como de la propensión a su reignición.

La velocidad de combustión está controlada o condicionada por el calor de gasificación, que tiende a ser relativamente más alto en los sólidos que en los líquidos. Es decir, los sólidos tienden a arder mucho más lentamente que los líquidos.

Explosiones

Una explosión se caracteriza por una rápida liberación de uno o varios compuestos en fase gaseosa, cuya expansión disipa energía mediante una onda de presión, la cual, además, puede ser acompañada de desprendimiento de luz y calor[8].

Una combustión puede transformarse en una explosión si existe una mezcla de gases o vapores en una concentración comprendida en el rango de inflamabilidad. Esta reacción se produce simultáneamente en toda la masa reactiva liberando gases y calor.

Una explosión también puede producirse cuando la combustión se inicia en un punto de la masa reactiva y desde él avanza o se propaga sobre el resto formando dos zonas, la de productos de la reacción y la de compuestos sin reaccionar. Este tipo de reacción puede ocurrir con combustibles que formen mezclas de gases o vapores, o que se encuentren en el aire en forma de gotas de líquidos o de partículas de polvo combustibles finamente divididos, en los que la velocidad de liberación de calor es creciente, acelerándose la producción de gases a alta presión y la onda de presión generada por ellos, con un importante aumento de la temperatura y del calor liberado.

3.- MECANISMOS DE COMBUSTIÓN DE ALGUNAS SUSTANCIAS PELIGROSAS

Existe consenso en que el almacenamiento de las sustancias peligrosas, de acuerdo con la definición señalada anteriormente, debe realizarse en recintos específicos destinados para tal efecto, adecuado a las características de cada sustancia y con procedimientos de uso y manejo seguros para los trabajadores.

A continuación se describen las principales características de la combustión de sustancias peligrosas correspondientes a gases inflamables (Clase 2 División 2.1), líquidos inflamables (Clase 3), sólidos inflamables (Clase 4 División 4.1, Clase 4 División 4.2 y Clase 4 División 4.3) y peróxidos orgánicos (Clase 5 División 5.2), así como algunos criterios y condiciones generales para su almacenamiento seguro.

3.1.- Gases Inflamables

La Clase 2 involucra los gases puros, las mezclas de gases, las mezclas de uno o varios gases u otras materias, que pueden encontrarse como gases comprimidos, licuados, disueltos o generadores de aerosoles.

La Clase 2 cuenta, además, con la División 2.1, que corresponde a Gases Inflamables, los cuales pueden formar mezclas combustibles con el aire dentro de los límites o rango de inflamabilidad en una proporción, en volumen, de hasta un 13%.

La velocidad de la reacción asociada a la combustión de los compuestos que pertenecen a esta clase, se puede considerar constante. Si existe un volumen importante de una mezcla de estos productos con aire en una concentración comprendida en el rango de límites de inflamabilidad, su combustión puede generar una deflagración con un reducido efecto térmico.

Sin embargo, si esta mezcla se encuentra en un ambiente cerrado y la combustión se inicia en un punto de ella y se propaga sobre el resto, se puede producir una detonación, la cual, además de importantes efectos de presión, generaría una gran liberación de calor en un reducido tiempo, favoreciendo la

propagación del fuego a combustibles cercanos. Por este motivo, el almacenamiento de recipientes que contengan gases inflamables debe realizarse en un área exterior ventilada y con techo para protegerlos de la intemperie y de la radiación solar incidente. La selección de un área apropiada debe considerar su separación por distancias de seguridad a fuentes de calor, materiales combustibles y, especialmente a sustancias comburentes. Además, si estos recipientes se ven comprometidos por una emergencia de incendio, la respuesta habitual debe corresponder a la aplicación de agua para enfriamiento, con el propósito de evitar el aumento de su presión interna.

Cantidades mayores de estos gases deben ser almacenadas en estanques superficiales o enterrados, construidos e instalados en base a normas de ingeniería de reconocimiento internacional, verificando distancias de seguridad a instalaciones adyacentes y líneas de propiedad, y cubiertos por un sistema automático de enfriamiento en base a agua.

3.2.- Líquidos Inflamables

La Clase 3 corresponde a líquidos inflamables, que son aquellos que tienen, a 50 ℃, una tensión de vapor máxima de 300 kPa (3 bar) y no son completamente gaseosos a 20 ºC y a la presión estándar de 101,3 kPa. Además, deben tener un punto de inflamación máximo de 61 ° C.

Entre estos líquidos se encuentran sustancias o compuestos que contienen extractos aromáticos líquidos, tintas para imprentas, pinturas y lacas, barniz, productos de perfumería, alcoholes, cetonas y aldehídos, entre otros. Sus vapores pueden combustionarse de la misma forma que los gases inflamables, pero su generación está controlada por la fase líquida, la que tiene asociada una tasa máxima de evaporación por unidad de superficie, dependiente del calor generado en esta reacción.

Estas características hacen necesario que los líquidos inflamables se almacenan en recintos que cuenten con un sistema de control de derrames, orientado a reducir la superficie de evaporación en caso de pérdida o volcamiento de un recipiente, y con un nivel de ventilación suficiente para evitar que los vapores alcancen una concentración cercana al límite inferior de inflamabilidad. Los muros perimetrales de estos recintos deben ser resistentes al fuego y su ubicación debe considerar distancias de seguridad, ya que la combustión de estos líquidos se caracteriza por una elevada velocidad de liberación de calor, la que podría propiciar la propagación del fuego a materiales combustibles cercanos. Un fuego que los afecte puede ser detectado por medio de detectores automáticos de temperatura, cuya activación puede estar enclavada con la descarga de un sistema de extinción en base a agua, espuma, polvo químico seco u otros agentes de extinción gaseosos.

3.3.- Sólidos Inflamables

La Clase 4 clasifica a los sólidos inflamables. Esta clase se subdivide en la División 4.1 “Materias Sólidas Inflamables”, División 4.2 “Materias Susceptibles de Inflamación Espontánea” y División 4.3 “Materias que, al Contacto con Agua, Desprenden Gases inflamables”.

Materias Sólidas Inflamables

Las materias sólidas inflamables son sólidos de origen orgánico o inorgánico, en forma de polvo, gránulos o pastas, que pueden combustionarse fácilmente por frotamiento, contacto o exposición breve con una fuente de ignición, como una superficie caliente o llama abierta.

Esta división considera, además, a las materias auto reactivas, que son térmicamente inestables y que pueden experimentar, ante la presencia de una fuente de calor externa, generada por fricción, impacto o incluso por el contacto con impurezas catalíticas, una descomposición fuertemente exotérmica, incluso en ausencia de oxígeno. Su descomposición puede producir una detonación o generar gases tóxicos.

Entre los compuestos del tipo auto reactivos se encuentran el trisúlfuro de fósforo, desechos de caucho o recortes de caucho, silicio en polvo, aluminio en polvo recubierto, azufre o productos humidificados con un mínimo del 30% en masa tales como ácido trinitrobenzoico o trinitrotolueno (TNT), junto con sustancias que presenten enlaces del tipo:

- Azoicos alifáticos (-C-N=N-C-)
- Azidas orgánicas (-C-N_3)
- Compuestos N-nitrosados (-N-N=O)
- Sales diazoicas (-CN_2^+ X^-)
- Sulfohidrazidas aromáticas (-SO_2-NH-NH_2)

Las materias sólidas inflamables deben ser almacenadas en recintos independientes, similares a los recomendados para los líquidos inflamables. Debido a lo complejo y, en algunos casos, rápido desarrollo de su combustión, la selección de un método de detección de un fuego es específica para cada uno de ellos, pudiendo ésta realizarse a través de sensores de temperatura, o mediciones de presión o concentración de polvo, gases o vapores. Los sistemas de protección contra incendio a utilizar para labores de control y extinción son, normalmente, en base a agua o agentes extintores gaseosos.

Materias Susceptibles de Inflamación Espontánea

La División 4.2 incluye a las materias pirofóricas, que son aquellas que en contacto con el aire, incluso en pequeñas cantidades, se inflaman en un corto período de tiempo, del orden de 5 minutos. Se involucra, además, a aquellas materias que experimentan calentamiento espontáneo en contacto con el aire, sin aporte externo de energía, cuando se encuentran apiladas en gran cantidad y después de un cierto período de tiempo (horas o días).

El calentamiento espontáneo de estas materias se debe a su reacción con el oxígeno del aire y a que el calor generado no se disipa hacia el exterior con suficiente rapidez. El aumento y la acumulación de este calor son los responsables de la combustión espontánea.

Algunos de los productos clasificados en esta división son el carbón mineral y vegetal, el algodón húmedo, dietilzinc, fibras o tejidos de origen animal o vegetal o sintéticos y la harina de pescado (desechos de pescado) no estabilizada.

La detección del inicio de la combustión en estos productos se realiza habitualmente a través de mediciones de su temperatura, ya que su aumento indicaría la existencia de calor retenido. Este calor puede ser entregado al ambiente moviendo frecuentemente el material almacenado, para lo cual se requiere de un recinto amplio y ventilado. Ante la existencia de un fuego, éste puede ser controlado, normalmente, por medio de la aplicación de agua con fines de enfriamiento.

Materias que al Contacto con el Agua Desprenden Gases Inflamables

La División 4.3 de la Clase 4 abarca las materias tales como bario, cesio, litio, rubidio, sodio, magnesio en polvo, carburo e hidruro cálcico, carburo y fósfuro de aluminio, e hidruro de litio y de aluminio, que reaccionan con el contacto con agua, desprendiendo gases inflamables, que al mezclarse con el aire pueden arder fácilmente por influencia de cualquier agente normal de encendido, como llamas o chispas provocadas por herramientas, luminarias eléctricas no protegidas, etc. Sin embargo, algunas de estas materias reaccionan en forma violenta y con desprendimiento de energía, la que permite la combustión de los gases inflamables generados.

El almacenamiento de estos productos debe realizarse en recintos que cuenten con un ambiente con humedad relativa controlada y donde no sea probable su contacto con agua.

La combustión de estos productos no puede ser controlada con agua, por lo que deben considerarse agentes de extinción especiales. Estas condiciones deben estar señaladas en sus Hojas de Datos de Seguridad y el área de almacenamiento debe disponer de señales con advertencias sobre su reactividad con agua.

3.4.- Peróxidos Orgánicos

Los peróxidos orgánicos son materias que contienen la estructura bivalente oxígeno-oxígeno (-0-0-) y están sujetas a la descomposición exotérmica a una temperatura normal o elevada por efecto de una fuente de calor externo, como la producida por frotamiento o golpes, o por contacto con impurezas.

La velocidad de descomposición aumenta con la temperatura y es variable según la composición del peróxido orgánico. Esta reacción puede generar desprendimiento de vapores o gases inflamables y/o nocivos y el calor liberado puede iniciar una violenta combustión. En condiciones de confinamiento puede generarse una explosión.

La etapa inicial de la combustión de estos productos puede ser detectada a través de sensores que se activen frente a rápidas variaciones de temperatura o presión o a través de la medición de concentración de gases o vapores. La detección debe dar una alarma y activar un sistema de extinción, el cual es de diseño específico para cada producto, y que puede ser en base a agua o agentes extintores gaseosos, para recintos de tamaño reducido.

Productos de este tipo, como el peróxido de dicumilo, peróxido de benzoilo o el peróxido de metil etil cetona, por su inestabilidad y fácil combustión, son incompatibles con los gases de la Clase 2 División 2.1, los líquidos inflamables de la Clase 3, los sólidos inflamables de la Clase 4 División 4.1 y Clase 4 División 4.2. Su almacenamiento debe realizarse en un recinto exclusivo, de características similares a las especificadas para los líquidos inflamables.

4.- CONCLUSIÓN

Las sustancias peligrosas clasificadas como gases inflamables, líquidos inflamables, sólidos inflamables y peróxidos orgánicos presentan, además, niveles de peligrosidad específicos relacionados con aspectos distintos a su inflamabilidad En consecuencia, las condiciones seguras para su almacenamiento y la definición de los medios necesarios para el control de un fuego que los afecte, no pueden ser establecidos de modo común o genérico, englobándolos bajo el término “inflamables”.

Así, los gases y líquidos inflamables requieren de una energía de activación externa y generan productos de reacción y una tasa de liberación de calor similares y comparables. Sin embargo, sus características inherentes hacen incompatible su almacenamiento en conjunto. Los sólidos inflamables y peróxidos orgánicos, en cambio, son sustancias inestables, cuya estructura interna dispone de energía suficiente para iniciar una reacción de combustión, la que, dependiendo de la composición y estructura de los reactantes y de su confinamiento, pueden desarrollar una velocidad de reacción y un aumento de temperatura creciente con una alta velocidad de liberación de calor, condiciones que pueden generar una explosión.

La incorporación de sistemas o dispositivos que permitan detectar el inicio de la combustión, en base a mediciones de temperatura, presión o concentración de gases o vapores, para dar una alarma y/o activar algún sistema de control debe considerar la velocidad de esta reacción y de liberación de calor en su fase inicial. La selección de un medio o sistema de extinción debe, de modo similar, considerar las características especificas de cada tipo de productos y de su combustión.

Las características propias o inherentes, así como también las asociadas al fenómeno de combustión, hacen incompatibles a estas cuatro divisiones de sustancias peligrosas y, por lo tanto, cada una de ellas,

incluyendo sus clases, deben ser almacenadas en forma independiente y exclusiva. Además, cada grupo debe contar con procedimientos específicos de uso y manejo seguro.

El conocimiento del fenómeno de la combustión en sustancias peligrosas y de sus diferentes mecanismos en productos inflamables de distinta clase y división, permite una definición racional de sus condiciones de almacenamiento, en términos de las características constructivas de bodegas y de correctas especificaciones sobre instalaciones complementarias, tales como ventilación, instalación eléctrica, sistemas de detección y alarma de incendio y medios de extinción, por lo que debiera ser considerado tanto en proyectos como en las bases de desarrollo de criterios reglamentarios aplicables a bodegas de productos peligrosos.

REFERENCIAS

1. N.U. (Naciones Unidas) "Recomendaciones Relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas"; Comité de Expertos en Transporte de Mercaderías Peligrosas del Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas; 2003.

2. OACI (Organización de Aviación Civil Internacional); "Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air"; 2004.

3. IMO (International Maritime Organization) Código IMDG (The International Maritime Dangerous Goods Code);2004.

4. ADR "Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas Por Carretera"; Versión 2005. OACI (Organización de Aviación Civil Internacional); "Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air"; 2004.

5. NCh 382.Of2004 "Sustancias Peligrosas - Clasificación general".

6. Drysdale, Dougal; Fire Dynamics, Wiley; 1985.

7. Rein, Guillermo; Torero, José Luis y Ellzey, Janet L.; "Numerical Study of Forward Smoldering Combustion", Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. 18 (4), pp. 459-474. 2002.

8. MAPFRE; Manual de Protección contra Incendios; 17ªEd, 1993.

CURRICULUM VITAE

Fernando Antonio Medina Zúñiga, Ingeniero Civil Químico de la Universidad de Chile y Experto Profesional en Prevención de Riesgos. Desde 1994 forma parte del Departamento de Prevención y Protección contra Incendios de la ACHS. Es expositor regular de seminarios y cursos sobre temas de Incendio y Sustancias Peligrosas a nivel nacional e internacional y cuenta con formación en The Texas A&M University Systems y Ansul Fire School de EE.UU, y en la Fundación MAPFRE de España.