

4ª edición
julio 2024

Medición de Explosividad con Equipos Portátiles



Material no apto para la venta.



Editorial Red Proteger

Ing. Néstor Adolfo BOTTA

ISBN en trámite

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; Diplomado en Ergonomía recibido en el año 2018 en la Facultad de Química e Ingeniería del Rosario de la Pontificia Universidad Católica Argentina; y Diplomado en Sistemas Integrados de Gestión recibido en el año 2021 en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Estudiante de la Diplomatura en Teología en el Instituto Bíblico Río de La Plata desde el 2022.

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

nestor.botta@redproteger.com.ar

®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

***"En tiempo aceptable te he oído,
Y en día de salvación te he socorrido:
¡He aquí ahora el tiempo aceptable!
¡He aquí ahora el día de salvación!"***

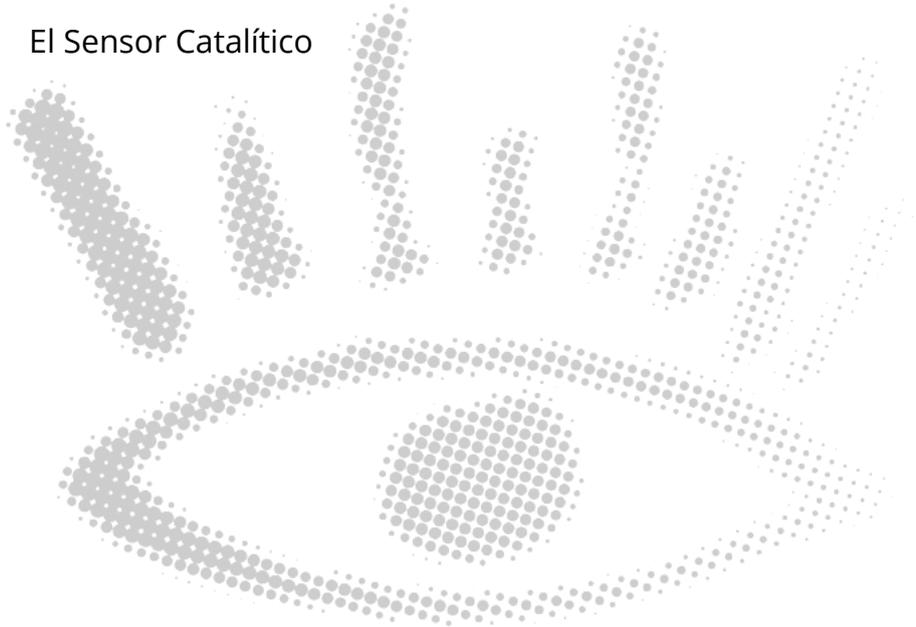
2 Corintios 6:2 BTX IV



INDICE

- 1) Contextualización del Problema
- 2) La Cuestión Legal
- 3) Destruyendo Mitos
- 4) ¿Cómo Entender la Combustión?
- 5) El Proceso del Inicio de la Combustión
- 6) ¿Qué se Necesita para que se Produzca una Combustión?
- 7) ¿Qué es la Combustión?
 - 7.1) La Energía en la Combustión
 - 7.2) El Proceso Químico de Oxido-Reducción
 - 7.3) ¿Dónde se Produce la Reacción Química de la Combustión?
 - 7.4) Velocidad de Oxidación
- 8) Temperaturas del Proceso de la Combustión
 - 8.1) Temperatura de Ignición
 - 8.2) Temperatura de Inflamación
 - 8.3) Temperatura de Autoignición o Ignición Espontánea
- 9) Límites de Inflamabilidad
 - 9.1) Los Límites de Inflamabilidad y la Relación con la Combustión
 - 9.2) ¿Cómo Entender los Límites Inferior y Superior de Inflamabilidad?
 - 9.3) ¿Qué son los Límites Inferior y Superior de Inflamabilidad?
- 10) Medición de Explosividad
- 11) Alternativas de Trabajo
- 12) ¿Qué Pasa Dentro del Rango de Inflamabilidad?
 - 12.1) Combustión Completa, Teórica o Estequiométrica
 - 12.2) Combustión Pobre, Incompleta o con Defecto de Aire
 - 12.3) Combustión con Exceso de Aire
- 13) Variación de los Límites de Inflamabilidad
- 14) Combustión con Exceso de Oxígeno

- 15) ¿Qué Pasa Cuando se Mide Explosividad en Aire con Exceso de Oxígeno?
- 16) Modificación de los Límites de Inflamabilidad con la Temperatura
- 17) LII y LSI con Presiones Distintas a la Ambiente
- 18) La Presión de Vapor y el LII
- 19) LII de Mezclas Inflamables (Regla de Le Châtelier)
- 20) Estimación de los Límites de Inflamabilidad
- 21) Calibración de Equipos
- 22) Pautas Para Realizar Mediciones
- 23) El Sensor Catalítico



1) CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

En la actividad laboral, sea ésta del tipo industrial, comercial o depósitos, la idea es evitar que se produzcan incendios, sean éstos producidos por problemas en los procesos productivos o por trabajos de mantenimiento realizados en condiciones no apropiadas.

Un trabajo típico que se da en casi todas las industrias son los llamados trabajos en calientes, que se entiende como aquellos trabajos en que se requiere el uso de calor y/o generan calor en cualquier forma y tipo, en especial cuando se producen en áreas o equipos que han tenido, tienen o se sospecha que existen materiales inflamables.

Cuando se analiza este tipo de situaciones desde la óptica de la seguridad, se ve que todos los elementos que se necesitan para que se inicie la combustión están presentes en el lugar.

Existe el aire, es muy complejo el trabajo en condiciones de ambientes sin aire, especialmente para los trabajadores.

Existe material combustible, es imposible pensar una industria sin este tipo de materiales.

Existe por cuestiones de reparación y/o mantenimiento una fuente de ignición (calor) que puede estar dado por un proceso de soldadura, por una amoladora, por un calentamiento de la zona, etc.

Además, de todo lo anterior, hay que sumarle los combustibles del tipo inflamables que son en su mayoría sub-ambientales (al menos los más peligrosos), es decir, emiten gases combustibles y tienen temperaturas de ignición por debajo de la temperatura ambiente.

Todo esto es un excelente caldo para que cuando se dé el primer chisporroteo con el electrodo o se generen las primeras chispas con la amoladora, se produzca desde una deflagración leve hasta una explosión si esta se produce dentro de un ambiente cerrado o confinado.

Pensemos ahora por un instante qué se puede eliminar de todo esto, que, además, de dar suficientes garantías de seguridad, sea fácil y por sobre todo económico para poder hacer el trabajo.

Esta solución es eliminar el combustible inflamable de la zona de trabajo para evitar que se forme la mezcla combustible. Por consiguiente, se necesita disponer de una manera fácil, simple, repetible y confiable de poder medir esta presencia o ausencia de inflamables de los ambientes de trabajo.

2) LA CUESTIÓN LEGAL

En la Argentina el decreto 351/79 reglamentario de la ley nacional 19.587 sobre higiene y seguridad en el trabajo, en los artículos 152, 157, 158 y 169 establece para requisitos para los llamados trabajos en caliente, específicamente, para los del tipo de soldadura y corte:

“Artículo 152: En los establecimientos en que se realicen trabajos de soldadura y corte se asegurará una adecuada ventilación e iluminación. Asimismo se tomarán las medidas de seguridad necesarias contra riesgo de incendio.”

¿Qué es un establecimiento? Es la primera pregunta por responder en este análisis legal. El artículo 2° de la ley 19.587 define y deja establecido esta cuestión:

“Artículo 2 Ley 19.587

A los efectos de la presente ley los términos "establecimiento", "explotación", "centro de trabajo " o "puesto de trabajo " designan todo lugar destinado a la realización o donde se realicen tareas de cualquier índole o naturaleza con la presencia permanente, circunstancial, transitoria o eventual de personas físicas y a los depósitos y

dependencias anexas de todo tipo en que las mismas deban permanecer o a los que asistan...”

Se puede concluir que un establecimiento también es un trabajo en la vía pública. Con respecto a la ventilación, este suele ser un problema en los trabajos de soldadura, dado que las corrientes de aire pueden afectar la zona de trabajo. Los objetivos de la ventilación se los puede resumir en: Proveer aire para respirar, retirar el calor, y retirar humos de la soldadura.

El tema *“...se tomarán las medidas de seguridad necesarias contra riesgo de incendio...”*

La pregunta para responder es: ¿Cuáles son las medidas necesarias? La respuesta se vuelve imprecisas. ¿Qué hacer en este tipo de caso? Aplicar el conocimiento técnico y seleccionar de la biblioteca de medidas de seguridad, aquellas que mejor aplican a cada situación, eso sí, aquellas que se seleccionen deben tener un justificativo técnico, además, de ser efectivas para reducir y controlar el riesgo en cuestión. Es más fácil los artículos que listen las medidas precisas a aplicar, que ponerse a pensar sobre cuáles son las mejores, como sucede en este caso. Entre las medidas tradicionales están los permisos de trabajo, limpieza y aislación del área, eliminación del combustible, inertización, verificación mediante mediciones, etc.

“El personal a emplear en este tipo de trabajo será adiestrado, capacitado y provisto de equipos y elementos de protección personal adecuados, los cuales lo protegerán contra los riesgos propios del trabajo que efectúen y en especial contra la proyección de partículas y las radiaciones.”

Este tema debe estar incluido dentro de los programas o planes anuales de capacitación, dado que es un tema donde específicamente se solicita la capacitación del personal, además, del adiestramiento, es decir, entrenamiento. Se

debe capacitar tanto sea en el tema propio de la técnica de la soldadura y corte, como de las condiciones de seguridad en el trabajo de los procesos involucrados. La capacitación debe incluir información, repaso, actualización de contenidos, y evaluación para asegurar que los conocimientos brindados hayan sido correctamente aprendidos, además, de inspecciones a los puestos de trabajos para comprobar que lo aprendido se aplique.

“Se deberán tomar además, todas las precauciones necesarias para proteger a las personas que trabajan o pasan cerca de los lugares en donde se efectúen trabajos de soldadura o corte.”

Hay dos niveles de protección, para el trabajador y hacia los otros trabajadores vecinos que no deben salir afectados por el trabajo de éste, en este caso se hace necesario la colocación de pantallas o cortinas para evitar y limitar las proyecciones de material, además, de retirar el humo de la zona de trabajo y evitar tirarlo a otra zona habitada.

“La ropa deberá estar limpia de grasa, aceite u otras materias inflamables y se deberá cumplir con lo dispuesto en el capítulo 10.”



Alerta de Seguridad

De la Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (IADC)

ALERTA 09 - 05

ENSAMBLE DE SOPLETE DE OXÍGENO SE ENCIENDE DE MANERA EXPLOSIVA Y RESULTA EN QUEMADURA DE LA MANO

¿QUÉ SUCEDIÓ?

Una manguera de oxígeno tuvo una fuga y el oxígeno entró en contacto con aceite y/o grasa (hidrocarburos) resultando en una explosión que causó daños a los manómetros y al regulador y causaron quemaduras en la mano de un empleado.

¿QUÉ LO CAUSÓ?

El oxígeno bajo presión y los hidrocarburos (aceite y grasa) pueden reaccionar violentamente, resultando en explosiones, fuego y lesiones al personal y daños a la propiedad. Nunca debe permitirse que el aceite o la grasa entren en contacto con oxígeno bajo presión. Aún una pequeña cantidad de hidrocarburos puede ser peligrosa en presencia del oxígeno. De hecho, cualquier material orgánico en contacto con oxígeno bajo presión puede tener una reacción violenta.

Uno de los problemas es la combustión espontánea de la grasa o aceite con el oxígeno a alta presión, por ese motivo la ropa debe estar limpia de materiales combustibles e inflamables, situación que se potencia con la proyección de partículas calientes sobre el propio trabajador. Debe evitarse usar ropa de materiales sintéticos dada su fácil combustibilidad.

“Artículo 158: En los establecimientos en los que se realicen trabajos de soldadura y corte de recipientes que hayan contenido sustancias explosivas o inflamables, o en los que se hayan podido formar gases inflamables... Si el contenido del recipiente es desconocido se lo tratará siempre como si hubiera contenido una sustancia explosiva o inflamable.”

¿Qué es un recipiente? El concepto recipiente no sólo hace referencia a un tacho o tambor, sino a todo tipo de instalación en donde los productos mencionados hayan estado.

El desconocimiento sobre el contenido de un recipiente o si éste tuvo o no algo en su interior, hace del mismo un equipo o instalación de alto riesgo y se debe considerar como que ha tenido productos, no solo inflamables, sino también con otras características, por más limpio que parezca su interior.

Como principio de trabajo, no debería existir dentro de una instalación laboral un equipo o recipiente sin saber que contiene su interior.

“...se deberá limpiar perfectamente el recipiente y comprobar por procedimiento apropiado que no queden gases o vapores combustibles en el mismo o reemplazar todo el aire existente en él por un gas inerte o por agua.”

La única forma de “comprobar por procedimientos apropiados” la limpieza y existencia de gases inflamables es mediante la medición con el llamado “explosímetro”, que mide el acercamiento del ambiente al Límite Inferior de Inflamabilidad (LII).

Si los vapores o gases no son combustibles también se debe proceder de la misma forma y medir con el equipamiento apropiado la presencia de los mismo en su interior.

Para cumplir con este requisito, el equipo debe estar calibrado y operado por personal capacitado para interpretar la lectura.

Si se aplica la técnica del inertizado, se debe medir presencia de oxígeno dentro del ambiente. El inertizado es una técnica muy peligrosa si debe ingresar algún trabajador al interior del equipo.

Sobre las dos condiciones de trabajo, por debajo del LII o por encima del LSI, los cuales en teoría dejan al ambiente fuera del rango de inflamabilidad y por ende que se produzca una deflagración, la única que ofrece suficientes garantías es estar lo más abajo posible del LII. Trabajar en ambientes por encima de LSI es peligroso, porque ante una bocanada de aire u oxígeno en un ambiente en que se está

desarrollando un trabajo en caliente, pueden darse las condiciones para que se produzca una deflagración violenta dentro de un equipo o instalación cerrada con la subsiguiente explosión.

La recomendación es siempre medir las dos condiciones, la presencia de gases inflamables o tóxicos, y el nivel de oxígeno especialmente si algún trabajador debe ingresar al interior del equipo.

El siguiente es un artículo del capítulo 18, pero el párrafo tercero se lo puede relacionar con el tema tratado es esta parte de trabajos en caliente.

“Artículo 169: ...Para aquellas tareas que puedan originar o emplear fuentes de ignición, se adoptarán procedimientos especiales de prevención...”

Poco tiene que ver este párrafo del artículo 169 con lo planteado en su desarrollo, que además, es una colección de requisitos de difícil entendimiento y relación entre ellos.

Este párrafo queda mejor ubicado dentro de los artículos 152, 157 y 158 que tratan el tema de soldadura y corte.

El procedimiento especial de prevención por excelencia son los Permisos de Trabajo en Caliente o ATS (Análisis de Trabajo Seguro). El decreto 351/79 debería tener un anexo o capítulo dedicado exclusivamente a los trabajos en caliente.

“Artículo 157: En los establecimientos en los que se realicen trabajos de soldadura y corte en espacios confinados, se deberá asegurar por medios mecánicos una ventilación adecuada conforme lo establecido en el Capítulo 11 de este reglamento. Esta comenzará a funcionar antes de que el trabajador entre al lugar y no cesará hasta que éste no se haya retirado. Cuando el trabajador entre a un espacio confinado a través de

un agujero de hombre u otra pequeña abertura, se lo proveerá de cinturón de seguridad y cable de vida, debiendo haber un observador en el exterior durante el lapso que dure la tarea.

Cuando se interrumpen los trabajos se deberán retirar los sopletes del interior del lugar.”

En el caso de trabajo en Ambientes Confinados como el prescrito en este caso se aplica la *Resolución SRT 953/2010: Criterios de seguridad respecto de las tareas ejecutadas en espacios confinados, que deriva a la norma IRAM 3.625:2003.*

Algunos puntos de la norma IRAM 3.625:2003 (última versión) que se pueden aplicar y relacionar al tema de medición de explosividad son:

“3.10 ambiente peligroso. Ambiente que puede exponer al personal al riesgo de muerte, incapacidad para escapar sin ayuda de un espacio confinado con lesión o descompostura aguda debido a una o más de las causas siguientes:

- Gas inflamable, vapor, niebla o humos que alcancen el 10% del límite inferior de inflamabilidad (L.I./LEL)
- Polvo combustible aéreo, en una concentración que iguale o esté por encima del límite inferior de inflamabilidad.
- Concentración de oxígeno en el ambiente menor que 19,5% o mayor que el 23,5%.”

“3.15 atmósfera deficiente en oxígeno. La que contiene menos del 19,5% de oxígeno en volumen de aire.”

“3.16 atmósfera enriquecida en oxígeno. La que contiene más del 23,5% de oxígeno en volumen de aire.”

“4.5 Ingreso en espacios confinados

4.5.1 *Para el ingreso en espacios confinados en general, se debe cumplir lo siguiente:*

e) *antes del ingreso de una persona al espacio confinado, se debe verificar la atmósfera con un instrumental calibrado, de lectura directa, continua e intrínsecamente seguro, que posea un certificado de antiexplosividad emitido por un organismo reconocido y autorizado. Además, el equipo debe estar protegido contra la interferencia a la radiofrecuencia y a los campos electromagnéticos que puedan alterar la confiabilidad de sus mediciones y debe poseer alarma acústica y luminosa e indicación del estado de la carga de la batería.*

Se deben verificar en el orden detallado las condiciones siguientes (ver Resolución MTEySS 295/03, anexo IV):

e1) *el contenido de oxígeno,*

e2) *la presencia de gases y vapores inflamables, y,*

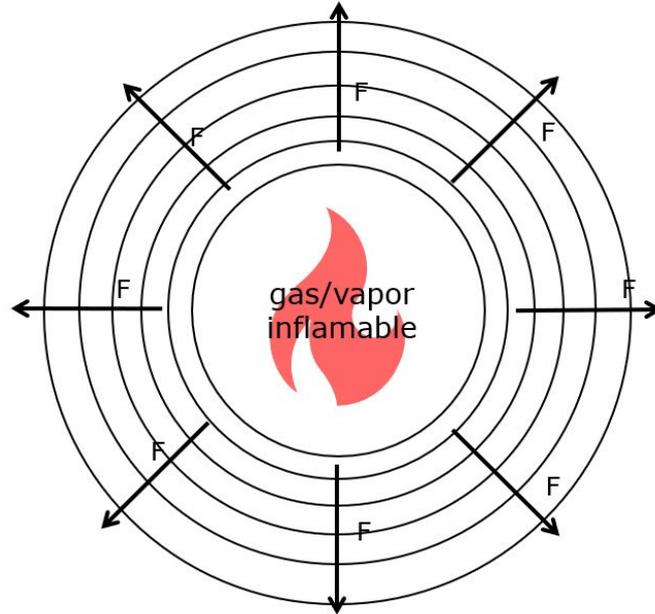
e3) *los potenciales contaminantes tóxicos del aire, por ejemplo: ácido sulfúrico, monóxido de carbono, ácido cianhídrico, cloro y otros, según el riesgo:*

g) *la atmósfera dentro del espacio debe ser controlada continuamente, para asegurar que la ventilación forzada continua, impida la acumulación de contaminantes en el ambiente;”*

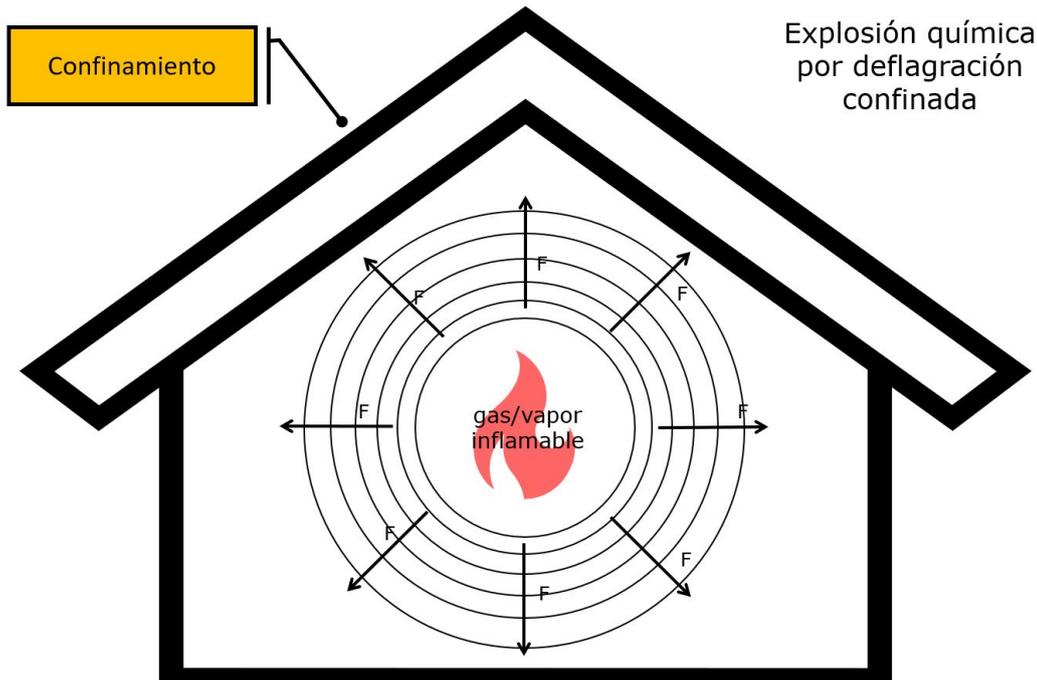
3) DESTRUYENDO MITOS

El término “medición de explosividad” está mal usado. Lo que se mide es la inflamabilidad. Lo que se mide no son materiales explosivos, sino materiales combustibles o inflamables que bajo determinadas condiciones pueden combustionar violentamente, es decir, deflagrar.

Deflagración → UVCE Deflagración NO confinada



Los materiales inflamables NO EXPLOTAN, pero pueden explotar bajo determinadas condiciones de confinamiento.



Para entender que se va a medir e interpretar correctamente la medición, primero se debe repasar algunos conceptos básicos del proceso de la combustión.

4) ¿CÓMO ENTENDER LA COMBUSTIÓN?

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?

Todo lo explicado en esta introducción está relacionado directa o indirectamente con el esquema de la figura 1. Si se logra comprender lo que pasa en esta figura, se logrará 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.

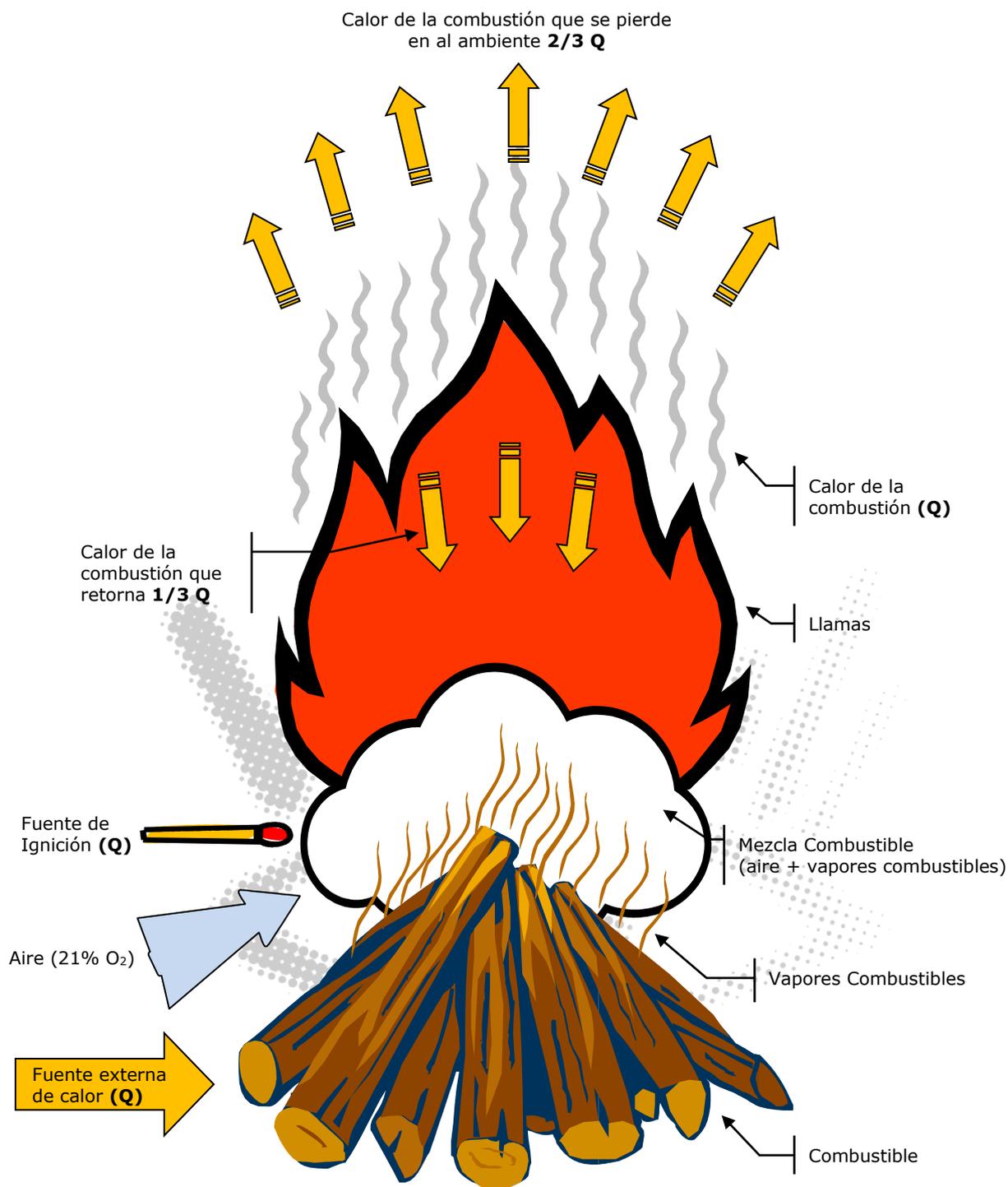


Figura 1: El proceso de la combustión

5) EL PROCESO DEL INICIO DE LA COMBUSTIÓN

Para entender el proceso del inicio de la combustión, y describir los distintos fenómenos físicos y químicos que se dan, se parte de la combustión de la 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. 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.

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

d- Para el caso de los líquidos inflamables de primera categoría esta fuente de calor externa lo constituye el propio calor del medio ambiente y en vez de hablar de pirólisis se habla de temperatura de vaporización, que en este caso es inferior a la temperatura ambiente.

Para el caso de los gases inflamables, estos no necesitan de fuente de calor externa para generar vapores o gases combustibles.

e- 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 el denominado “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”.

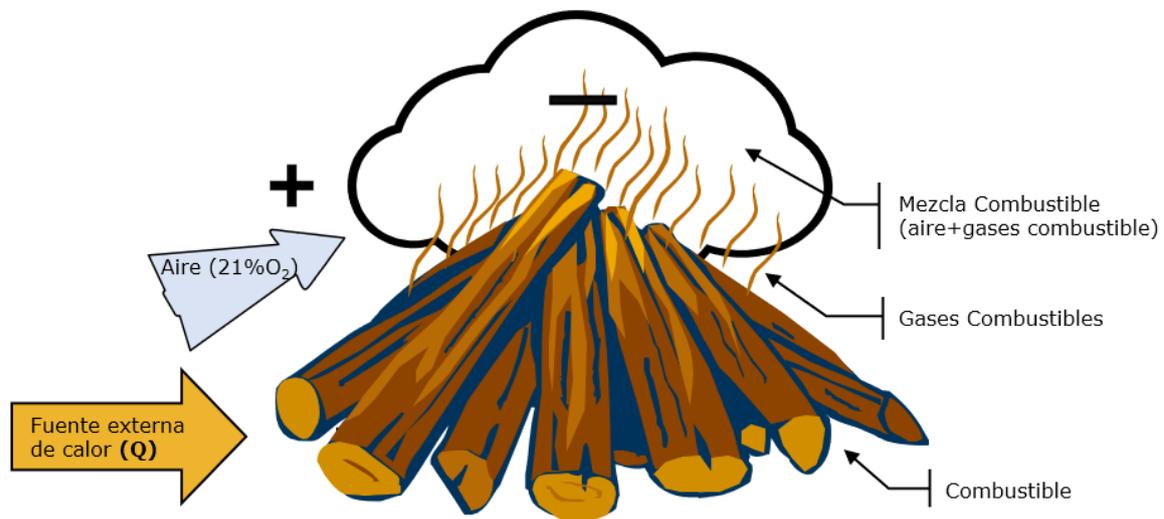


Figura 2: Ingreso del aire

f- ¿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 interna; además,

hay que considerar que 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.

g- El aire que ingresa por el fenómeno de difusión 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.

h- 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 ***“fuente de ignición de energía suficiente”*** que la provoque, y que la mezcla combustible o inflamable se encuentre 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”*.

i- Para que se dé inicio al proceso de la combustión se necesita:

- Que la mezcla combustible o inflamable alcance como mínima la temperatura de ignición.
- Que la mezcla combustible o inflamable esté dentro del rango de inflamabilidad.
- Que aparezca una fuente de ignición.

j- En esta situación están dadas las condiciones que facilitan los problemas de los cuales muchos trabajan para evitar, que son precisamente los incendios, que, a

diferencias de otro tipo de combustiones, éstas son incontroladas y muy dañinas.

El proceso básico del inicio de la combustión se lo puede resumir en el siguiente cuadro.

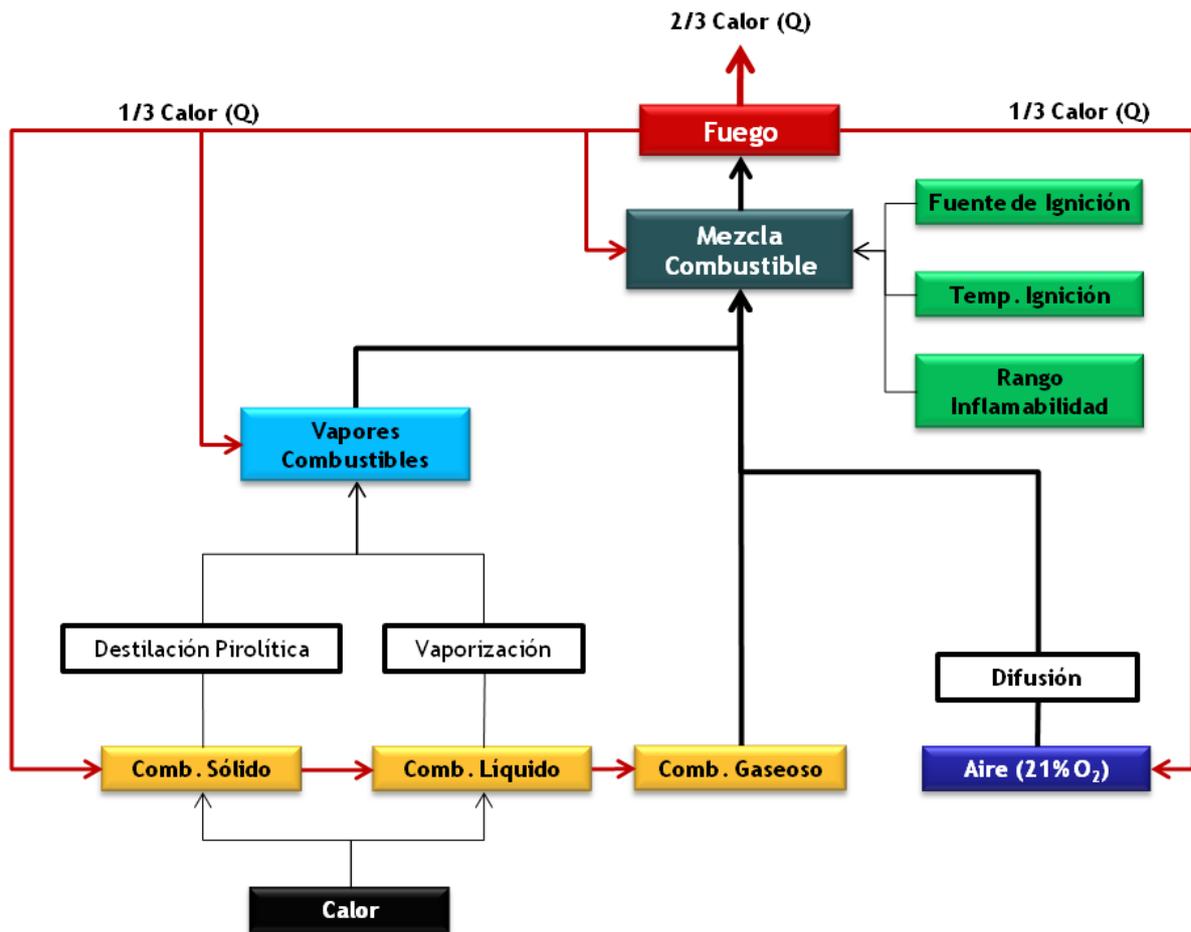


Figura 3: Resumen del proceso de inicio de la combustión

6) ¿QUÉ SE NECESITA PARA QUE SE PRODUZCA UNA COMBUSTIÓN?

Para poder iniciar una combustión, se deben tener los elementos y condiciones siguientes:

- Material Comburente o agente oxidante, normalmente el aire.

- Material Combustible o agente reductor.
- Fuente de Calor Externa con energía suficiente para lograr que el material combustible desprenda vapores combustibles, esto puede suceder a temperatura ambiente como en el caso de algunos líquidos inflamables. Para los gases inflamables no hace falta fuente de calor externa.
- 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.
- Mezcla inflamable dentro del Rango Inflamable.
- Fuente de Ignición de energía suficiente para encender la mezcla inflamable.

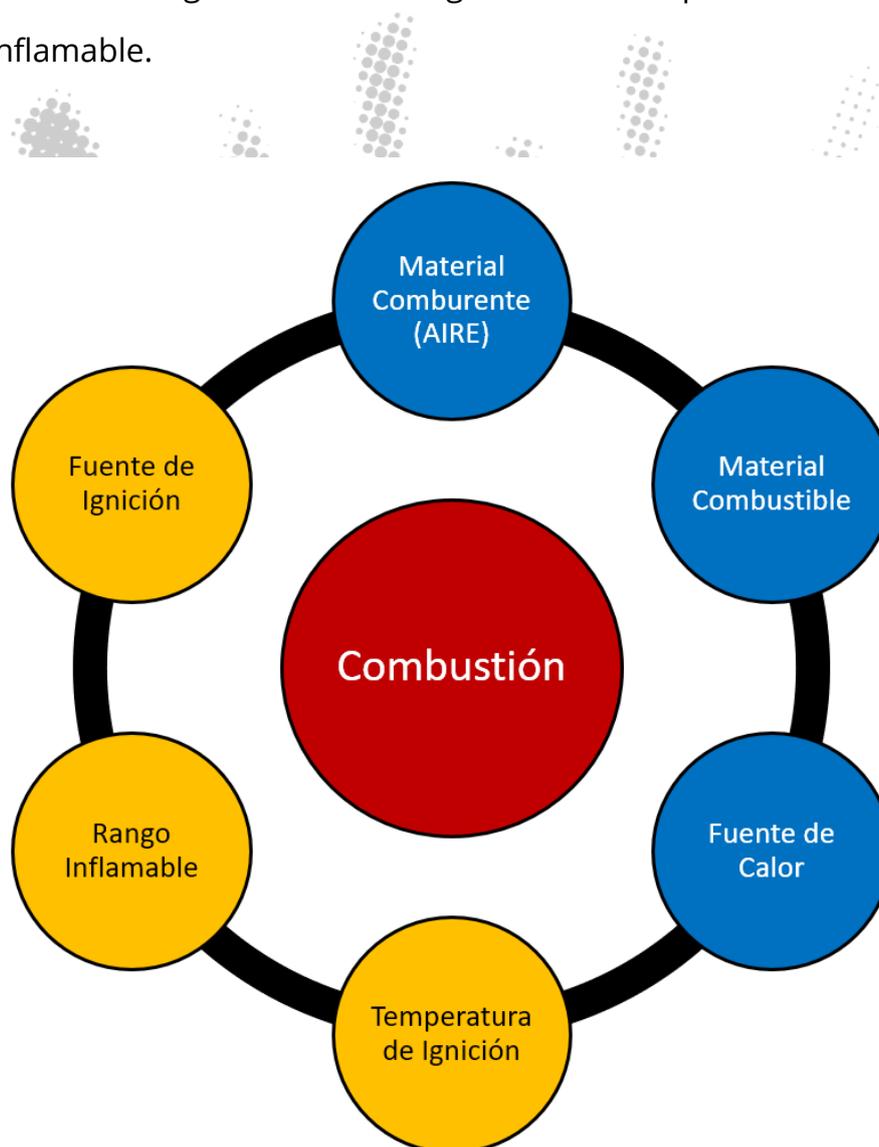
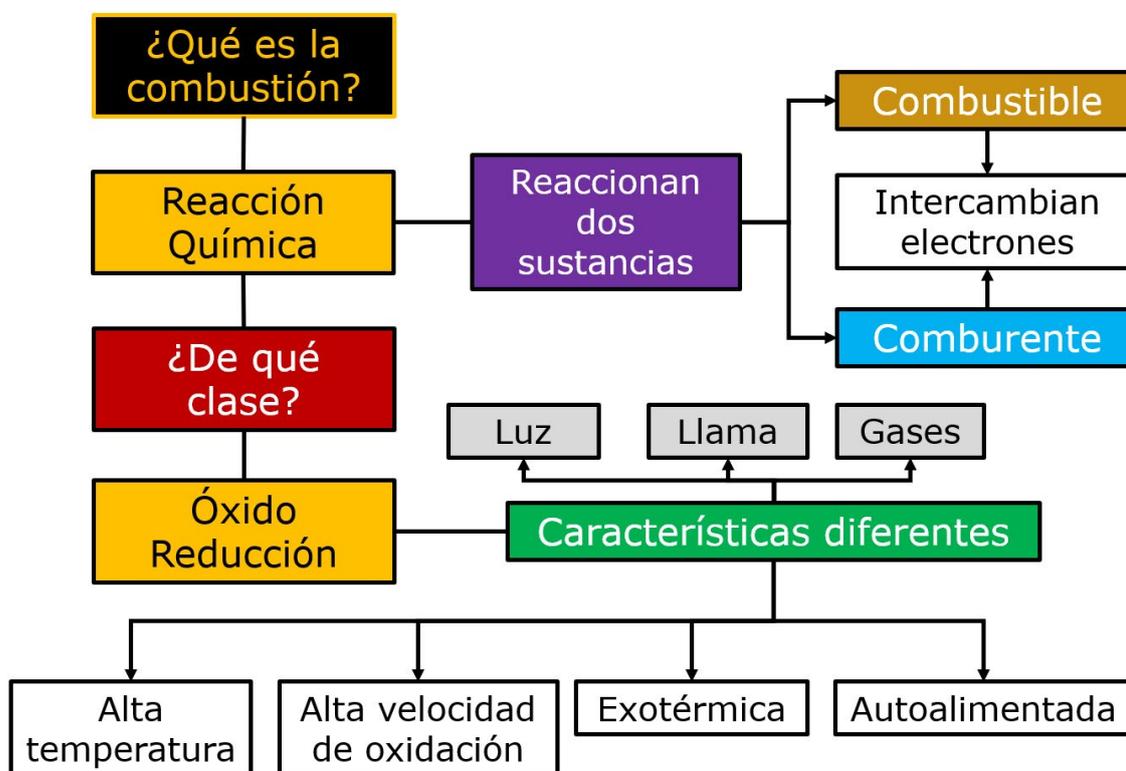


Figura 4: Elementos y condiciones para el inicio de la combustión

7) ¿QUÉ ES LA COMBUSTIÓN?

La combustión es una reacción química, es decir que deben existir dos sustancias distintas que reaccionen entre si intercambiando electrones; de todas las reacciones químicas que existen, la combustión es una de la clase de óxido-reducción, del mismo tipo que la oxidación del acero o el amarilleamiento del papel, pero para que esta reacción química de óxido-reducción sea finalmente una combustión la misma debe reunir las siguientes cuatro características:

- Que se desarrolle a alta temperatura.
- Que se produzca a una alta velocidad de reacción.
- Que sea exotérmica, es decir, que emita calor.
- Autoalimentada de calor.



Una combustión puede describirse de una manera más 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.

Este 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 genere calor a mayor velocidad de la que se disipa. De este modo, la zona de reacción no se enfría.

7.1) 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 se puede 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.

7.2) 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 seno² 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 esta hay una transferencia de electrones de una sustancia a otra, denominándose oxidación al proceso de 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.

² Seno: Concavidad o hueco (RAE).

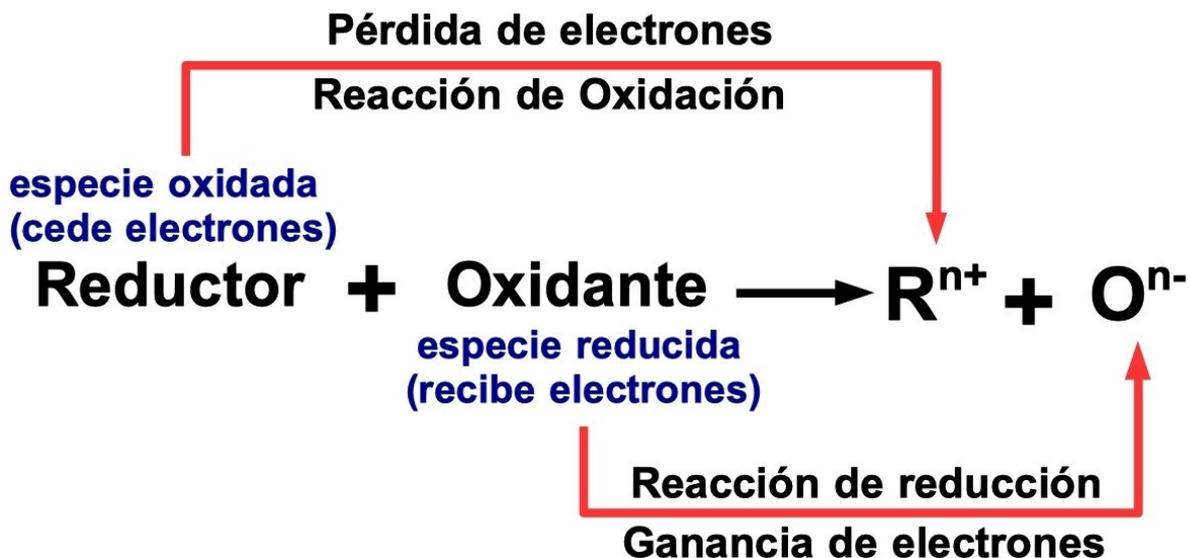


Figura 5: Reacción de óxido reducción

7.3) ¿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.

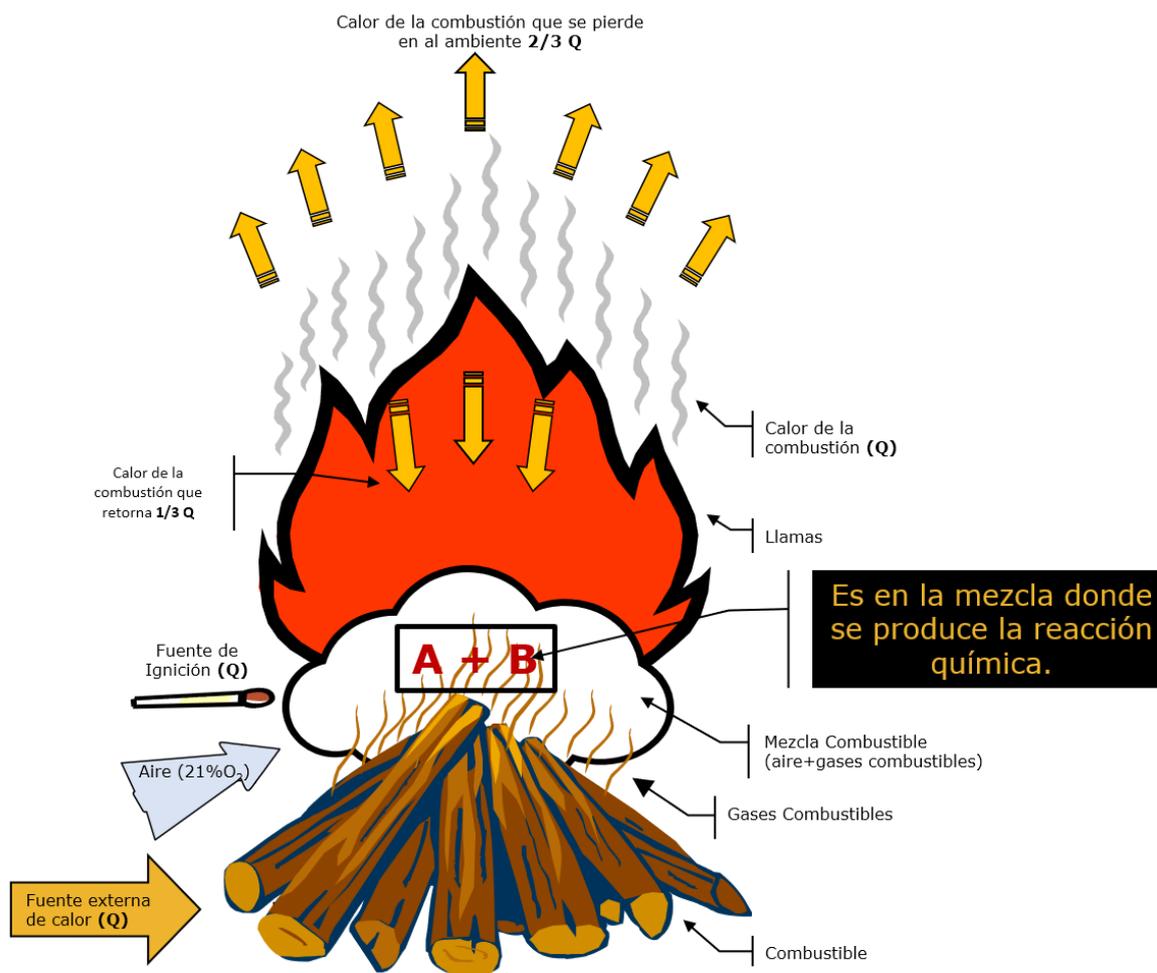


Figura 6: Zona donde se produce la reacción de óxido reducción

7.4) Velocidad de Oxidación

A medida que aumenta la temperatura de las reacciones químicas estas se desarrollan a una mayor 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 1.100 °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 m/s.

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

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 (340 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 (340 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.

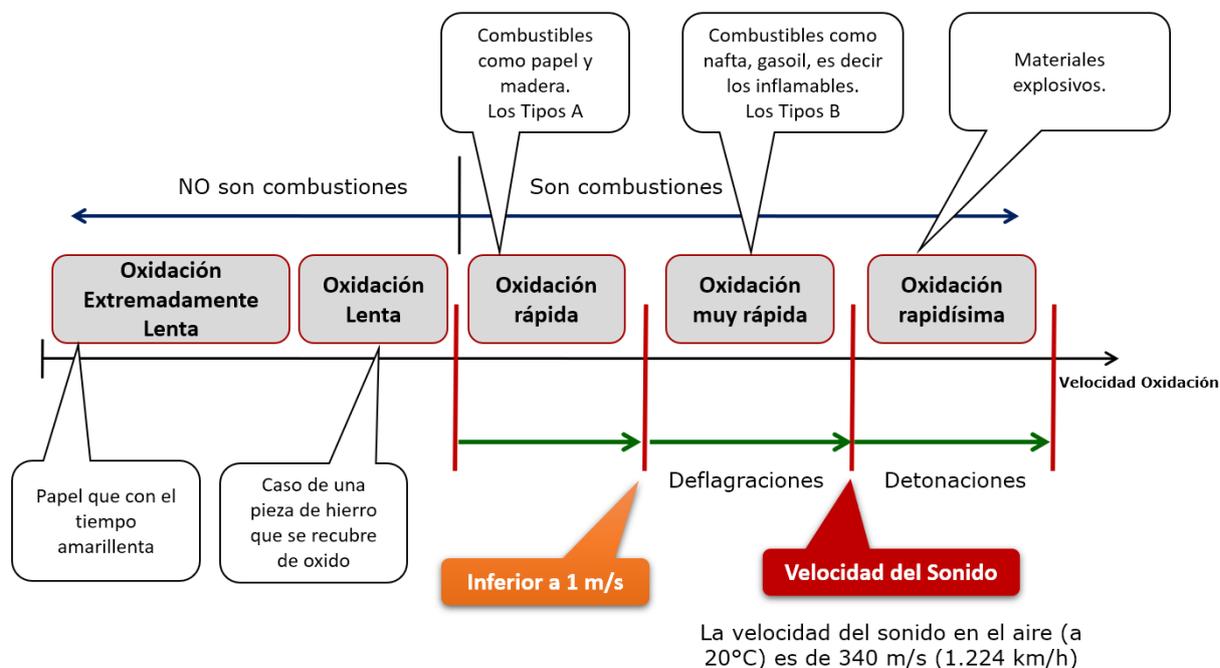


Figura 7: Zonas de distintas velocidades de reacción

8) TEMPERATURAS DEL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN

Las temperaturas³ que aparecen en el proceso de la combustión son las siguientes:

8.1) 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.

En este nivel de temperatura, 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.

8.2) Temperatura de Inflamación

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.

8.3) Temperatura de Autoignición o Ignición Espontánea

Es la mínima temperatura a la cual se debe elevarse una mezcla de vapores inflamables y aire, para que se encienda espontáneamente sin necesidad de la

³ Los nombres pueden variar según el autor y las normas de referencia en la materia.

presencia de una fuente de ignición externa. Esta temperatura suele ser muy superior a las anteriores.

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.

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

9) LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

9.1) 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 intercambiando electrones, 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 (LII) y Límite Superior de Inflamabilidad (LSI).

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

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

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

El 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 un gráfico cartesiano tradicional, están en forma paralela y se mueven en sentido opuesto.

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 diagrama 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.

9.3) ¿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 el 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 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*.

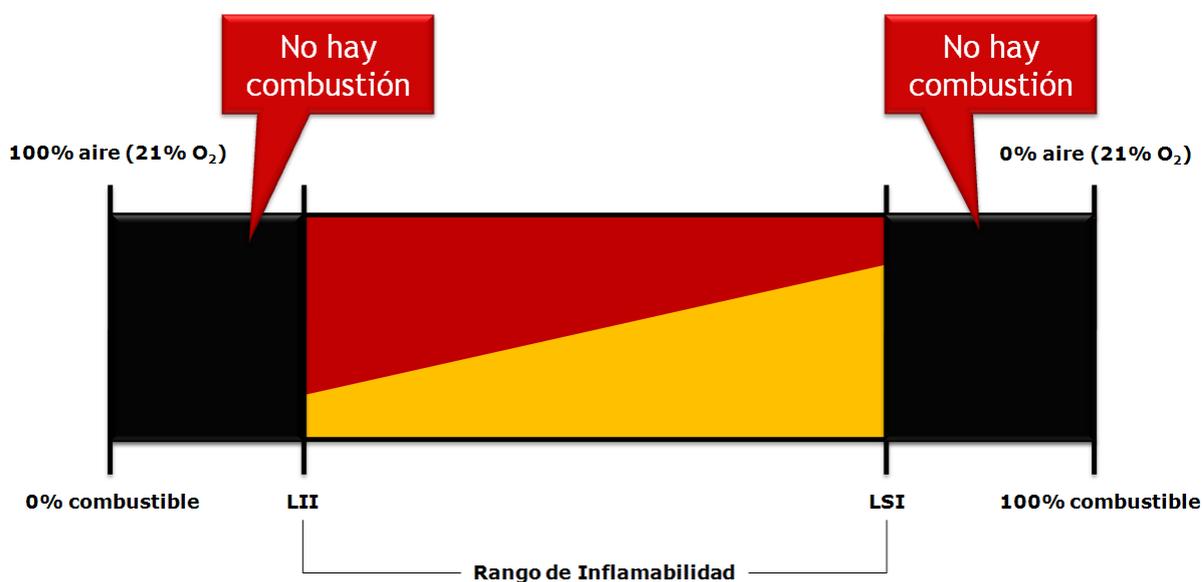
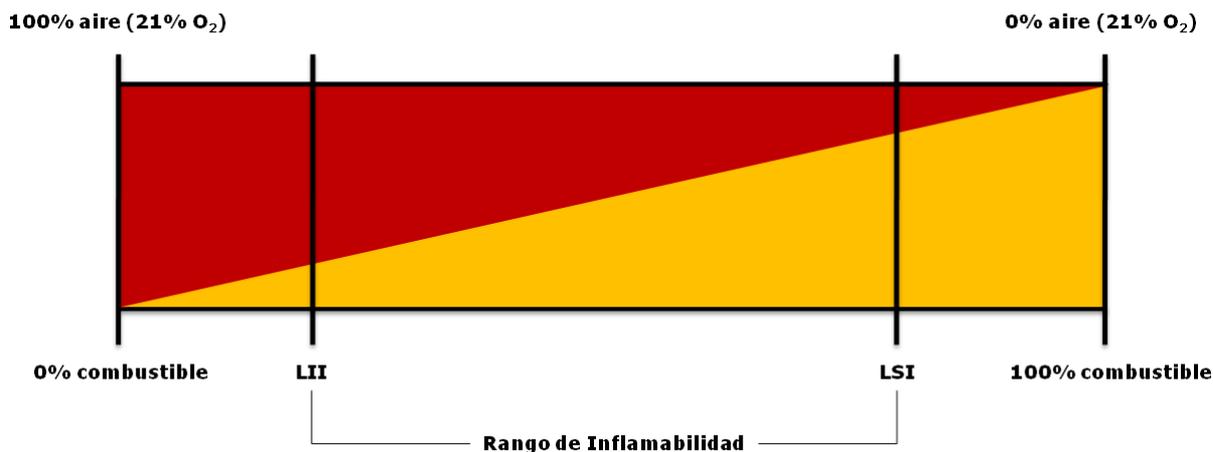


Figura 8: Límites de inflamabilidad

Los datos de LII y LSI de la gran mayoría de todas las tablas están dados para CNPT y para un aire con 21% O₂.

Por ejemplo, el LII de la acetona en el aire es 2,6% en volumen. Esto significa que en 100 volúmenes de mezcla vapor de combustible/aire hay 2,6% de vapor de acetona y $(100 - 2,6) = 97,4\%$ de aire.

Si la concentración de la acetona en aire es menor de 2,6% no se produce la ignición por resultar la cantidad de gases combustibles insuficiente y por encima de 12,8% tampoco se produce la ignición por resultar la concentración con demasiados gases combustibles.

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



Figura 9: Limites de inflamabilidad de la acetona

Acetileno



Figura 10: Límites de inflamabilidad del acetileno

10) MEDICIÓN DE EXPLOSIVIDAD

Para empezar a estudiar este tema, conviene primero responder a las siguientes dos preguntas:

1. ¿Qué se mide en realidad cuando se mide explosividad?

Por empezar no se está midiendo la explosividad de una sustancia, sino, la combustibilidad de un ambiente, mediante la determinación de que tan lejos o cerca se está del LII.

2. ¿Qué se usa para medir?

Para medir la mal llamada “explosividad de un ambiente” se usa un equipo que se mal denomina “explosímetro”.

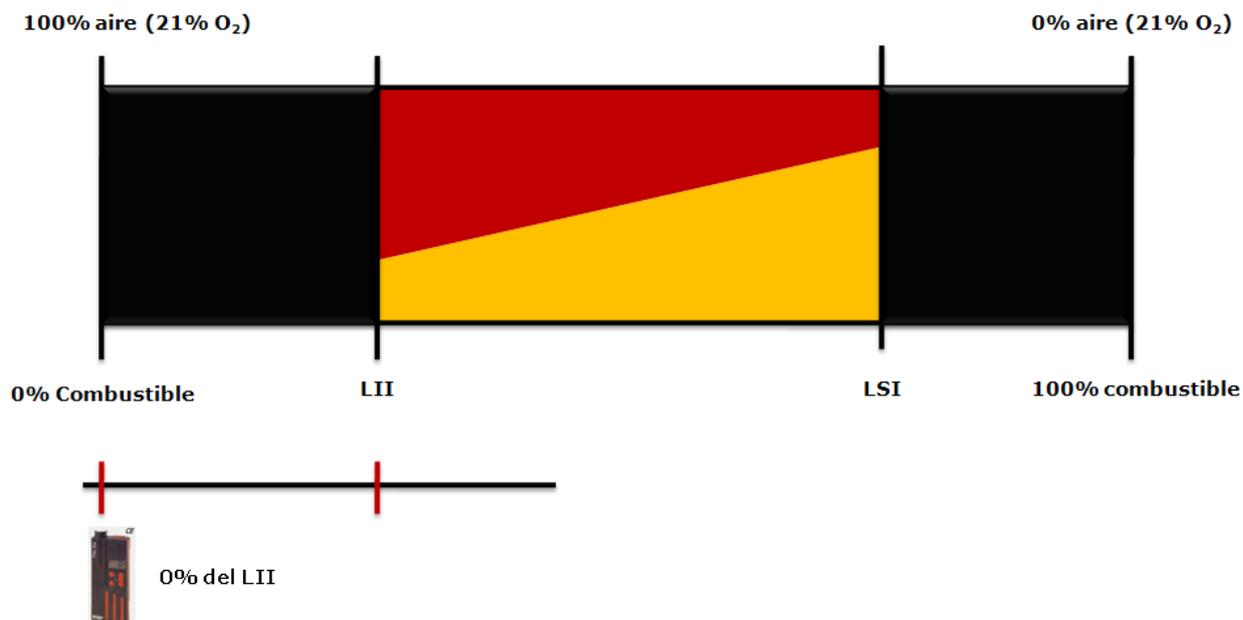


Figura 11: Medición de explosividad. LLI = 0%

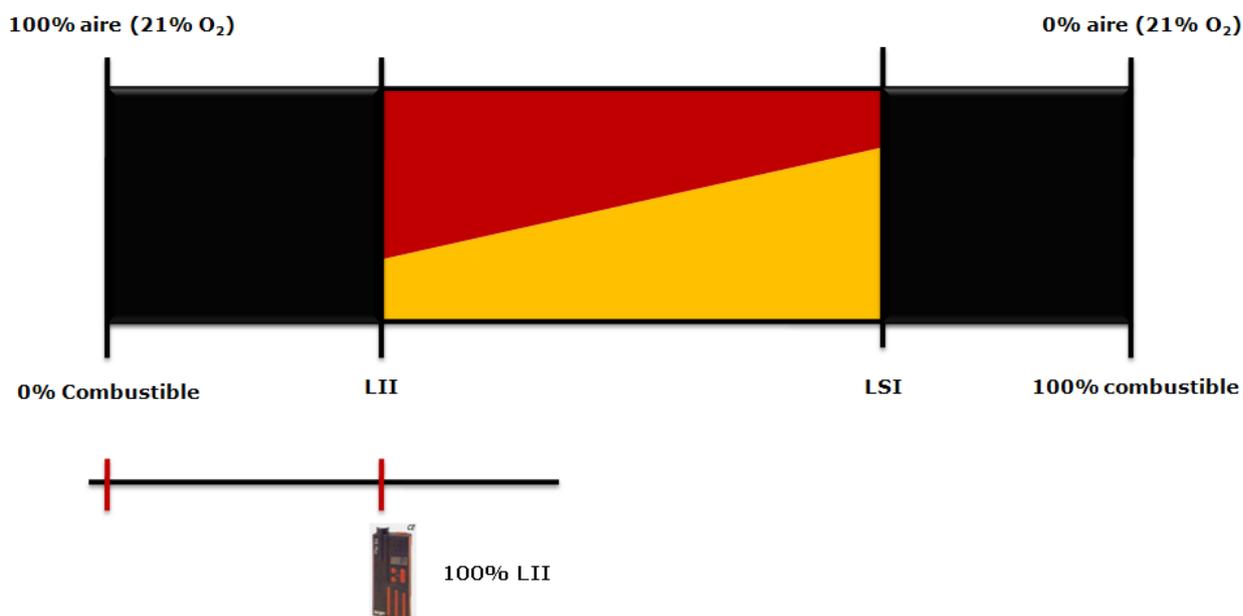


Figura 12: Medición de explosividad. LLI = 100%

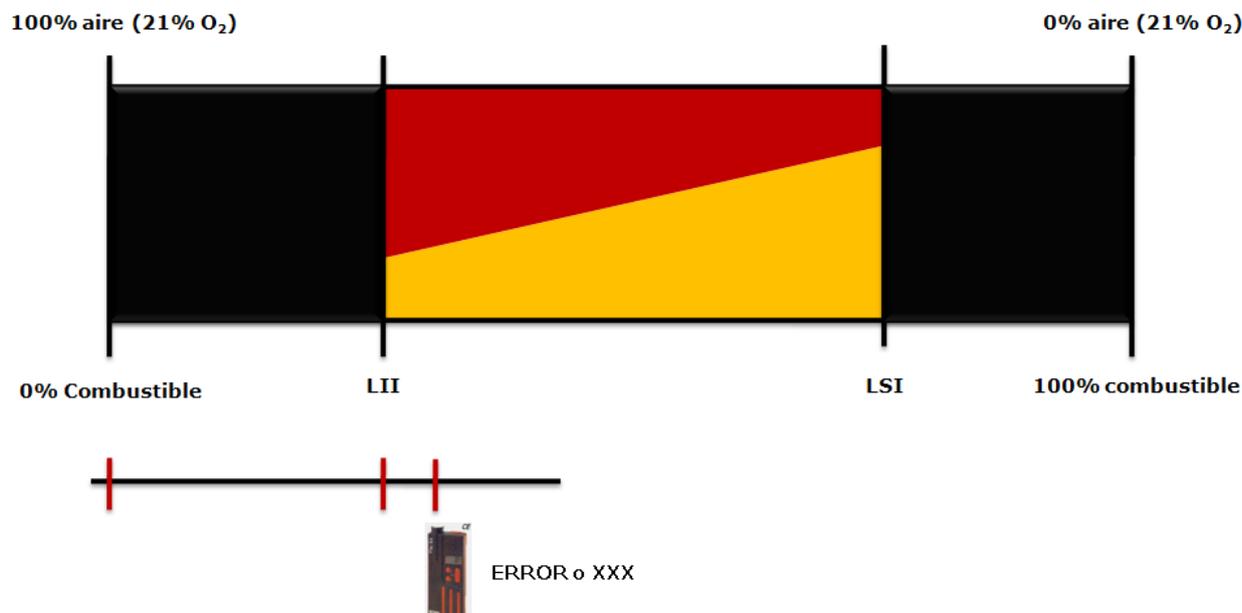


Figura 13: Medición de explosividad. LLI > mayor al 100%

La gran mayoría de los explosímetros, por no decir todos, NO están midiendo directamente el LLI; no lo hacen porque no están midiendo el nivel de oxígeno en el aire y en forma simultánea relacionándolo con el nivel de gases combustibles presentes. Lo que hacen estos equipos es partir de una HIPÓTESIS de calibración presuponiendo que existe un aire con un 21% de oxígeno.

Existen algunos equipos de los denominados duales o multigas que pueden medir nivel de oxígeno y explosividad, pero lo hacen en forma separada, y por consiguiente corresponde al que mide relacionarlos entre sí.

Para poder entender la realidad de lo que se mide cuando se está en presencia de gases o vapores inflamables, es mejor ponerlo en números, y para eso se procederá a analizar la medición del n-Hexano, combustible del tipo inflamable de primera categoría, con LLI = 1,1% y LSI = 7,5%.



Figura 14: Rango de inflamabilidad del n-Hexano

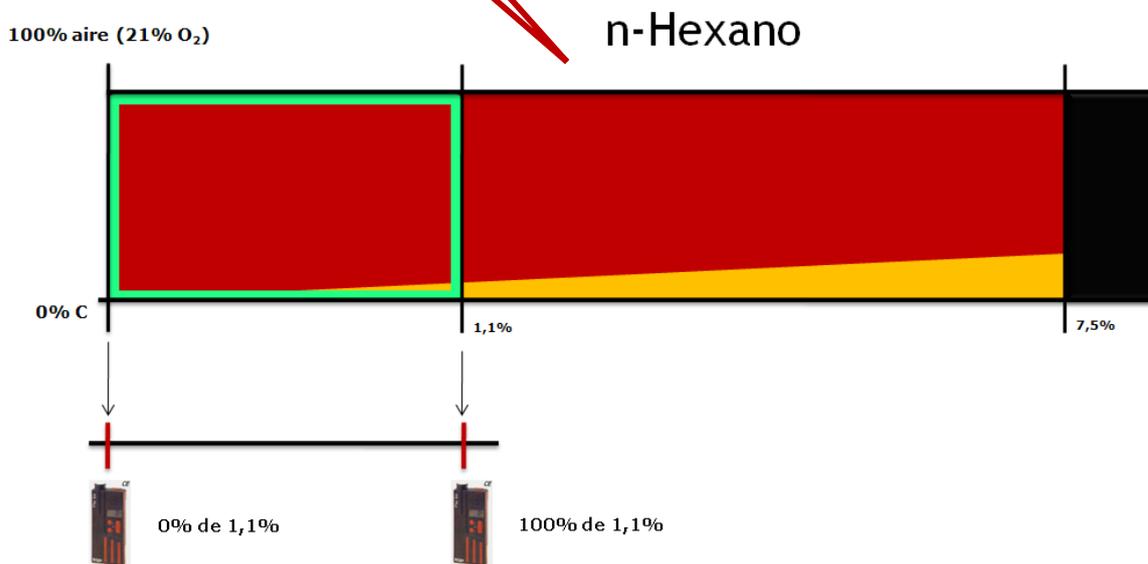


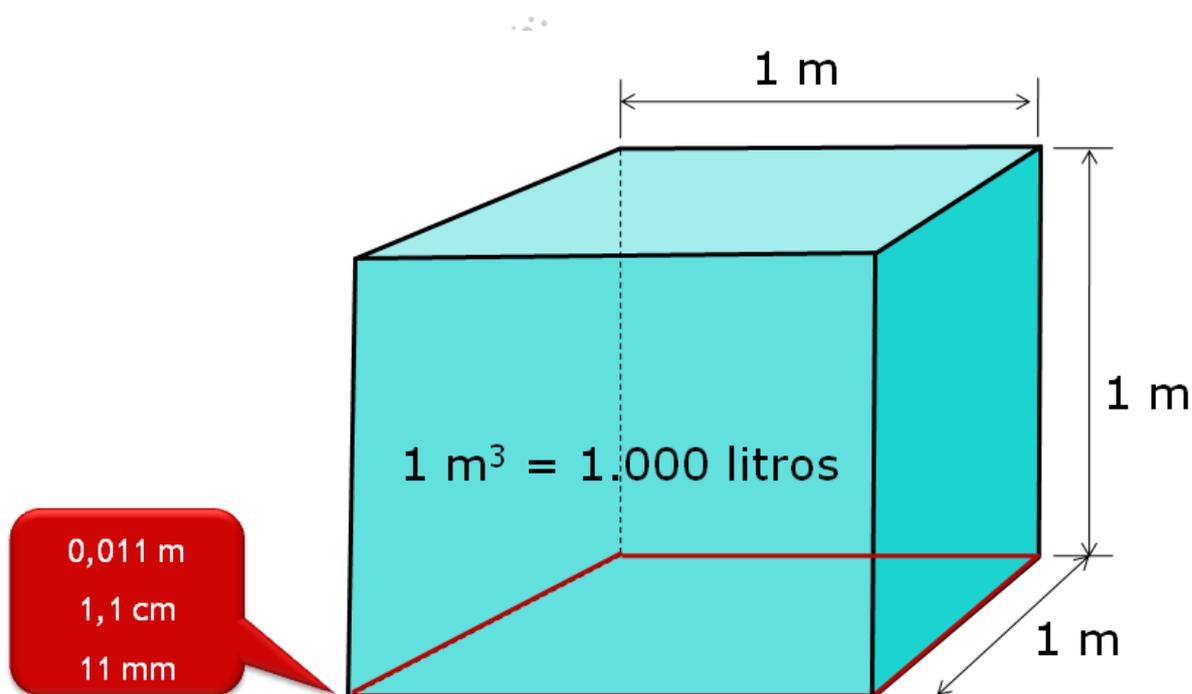
Figura 15: Ampliación del rango de inflamabilidad del n-Hexano

La figura está mostrando qué mide en realidad un explosímetro cuando lo hace de un ambiente que tiene n-Hexano. Cuando el equipo está marcando un 100% LII en realidad es el 100% del 1,1% que es el valor del LII para el n-Hexano, es decir, un valor muy bajo; aunque parezca que medir 100% LII es MUCHO, en casi todos los inflamables se está midiendo un rango muy estrecho.

Pero si esto no alcanza para visualizar qué es el LII = 1,1%, se puede llevar este valor a un volumen conocido y fácil de visualizar como lo es 1 m³ o 1.000 litros, es

decir, un recipiente cúbico de 1 metro de lado, lo que en la industria de los bidones se conoce como “maxi bidón”.

El 1,1% de 1.000 litros es 11 litros, que, si se quisiera visualizar dentro del bidón ocuparía el volumen indicado en la figura con una línea roja. Los 11 litros serían una medición del 100% LLI, pero para poder trabajar en forma segura por lo general se recomienda en algunas bibliografías valores inferiores al 10%LLI o menos, es decir, de 1 litro, o sea, para el n-Hexano, trabajar en forma segura en un ambiente implica que no debe haber más de 1 litro vapores de n-Hexano cada 1.000 litros de volumen de ambiente.



$$1,1\% \text{ de } 1.000 \text{ litros} = 11 \text{ litros}$$

Figura 16: Visualización volumétrica del LLI del n-Hexano



Figura 17: Visualización volumétrica de 1 litro en 1.000 litros o 1 m^3

11) ALTERNATIVAS DE TRABAJO

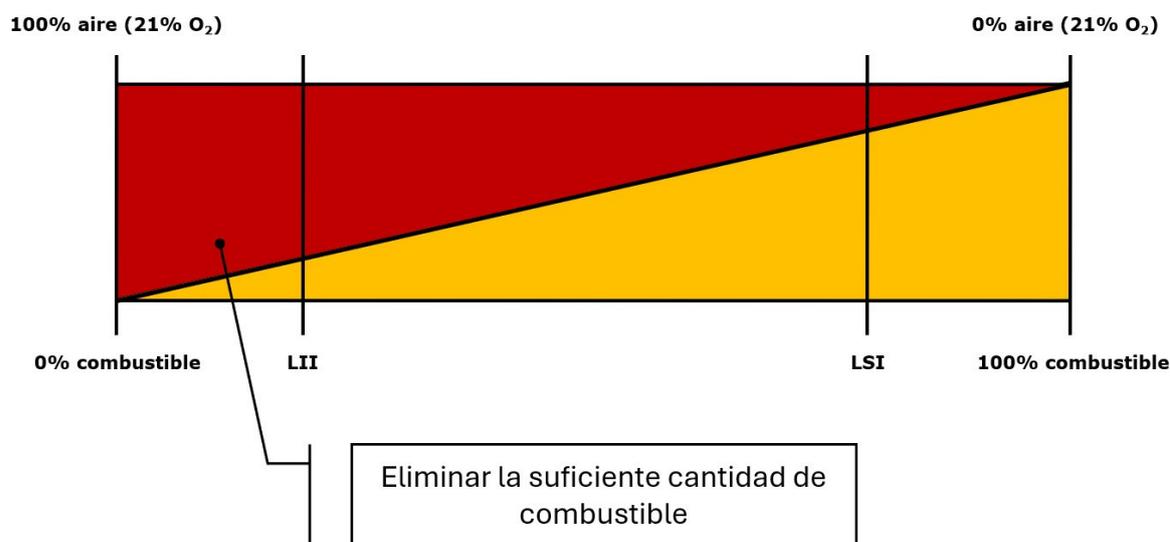
Si la concentración de gas en aire es menor que el LLI no se produce la ignición por resultar la cantidad de combustible insuficiente o un exceso de aire, y por encima del LSI tampoco se produce la ignición por resultar con exceso de combustible o falta suficiente de aire.

Es posible impedir que se inicie la combustión de una mezcla de gases combustibles mediante un exceso de cualquiera de sus componentes.

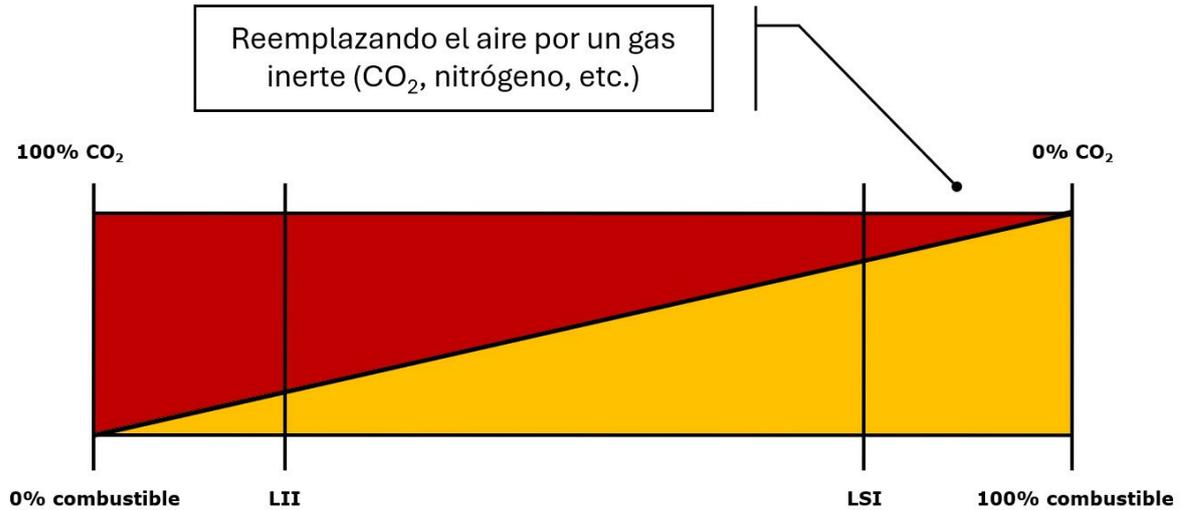
En la práctica, si no se puede evitar la presencia de una sustancia inflamable, se puede prevenir la ignición de esta asegurando que la mezcla combustible o inflamable esté fuera de rango de inflamabilidad.

Las técnicas son:

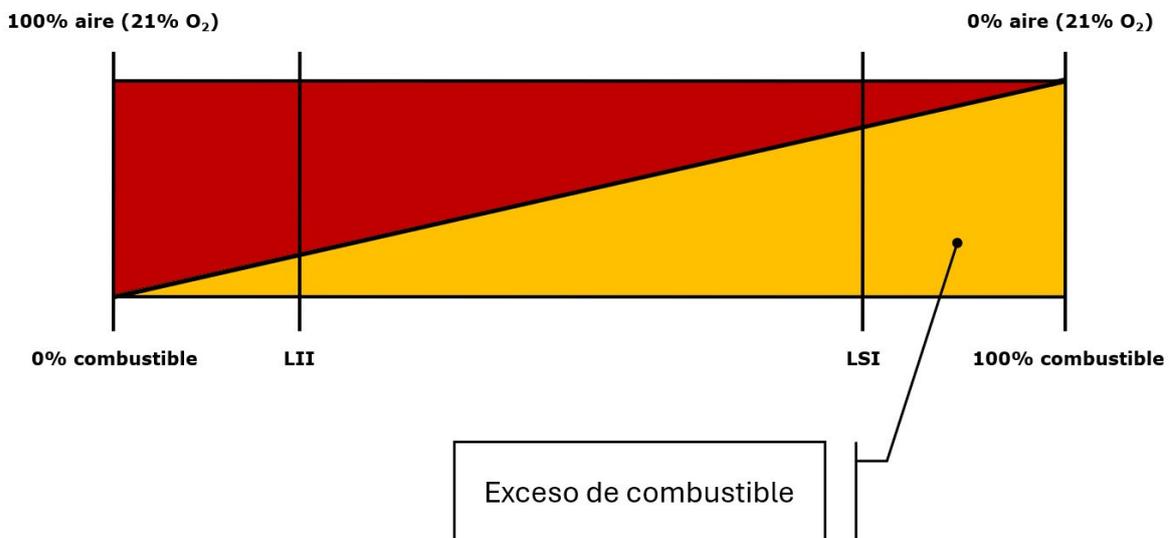
- a) Eliminar la suficiente cantidad de combustible. Ambiente por debajo del LII.



- b) Eliminar la suficiente cantidad de aire. Ambiente por encima del LSI. Cuando se usa un gas inerte para reducir la presencia del aire, a esta técnica se la denomina "inertización", que significa el uso de un gas inerte (nitrógeno o CO₂ por ejemplo) para hacer que la atmósfera dentro de un recipiente hermético no sea inflamable. La inertización, en efecto, reduce el contenido de aire en el espacio libre del equipo a un porcentaje por debajo del cual no puede ocurrir la ignición, reemplazando el aire con un gas inerte.



c) Exceso de Combustible. Ambiente por encima del LSI. La técnica de trabajar en ambientes con exceso de combustibles, aunque teóricamente segura, no se emplea en la práctica por producir un ambiente de trabajo NO seguro. Cualquier ingreso accidental de aire o el desprendimiento de una bolsa de aire del interior del equipo, introduciría nuevamente al ambiente dentro del rango de inflamabilidad; es más fácil controlar la ausencia de gases combustibles, que la presencia de aire. En la práctica esta técnica no es aconsejable, salvo casos muy especiales.



12) ¿QUÉ PASA DENTRO DEL RANGO DE INFLAMABILIDAD?

Dentro del rango de inflamabilidad se pueden distinguir tres zonas de combustión, a saber:

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

12.1) Combustión Completa, Teórica o Estequiométrica

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 O_2 o aire en los humos, ya que todo el oxígeno del aire 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 los humos. En los productos de la combustión se puede encontrar N_2 , CO_2 , H_2O .

Esta combustión se denomina teórica porque en la práctica siempre se produce con una pequeña deficiencia de aire.

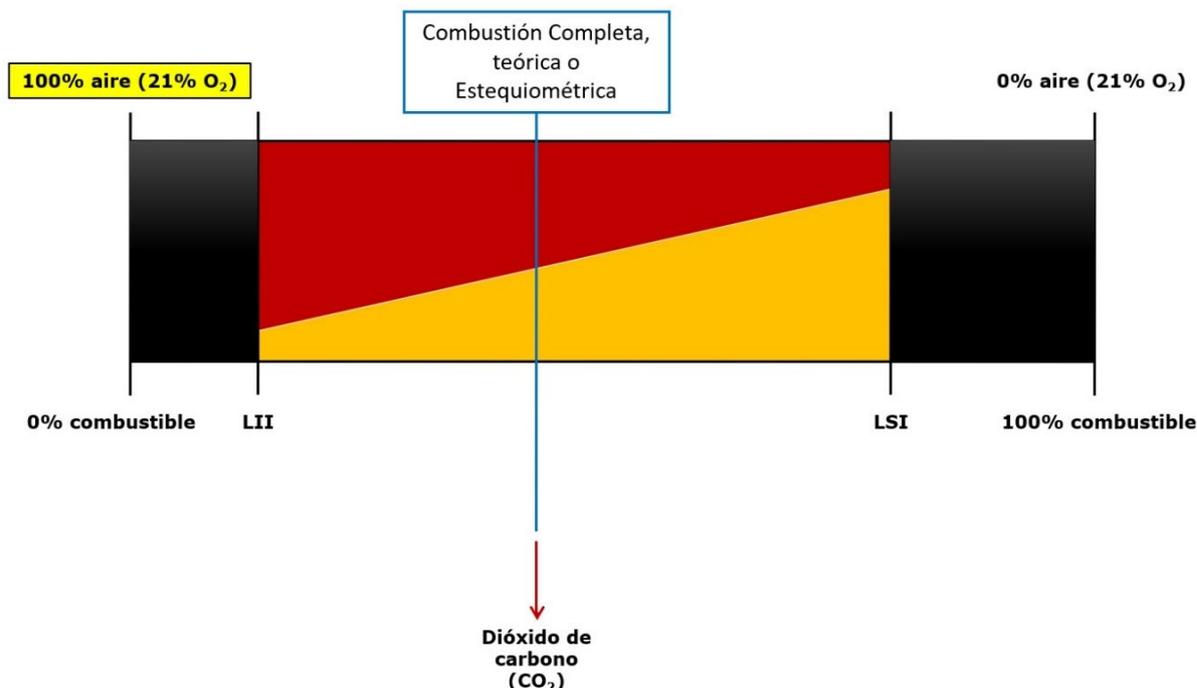


Figura 18: Combustión completa

12.2) Combustión Pobre, Incompleta o con Defecto de Aire

Sucede lo contrario que en la combustión completa. El combustible no se oxida completamente por falta de aire, se forman sustancias que todavía pueden seguir oxidándose; por ejemplo el CO.

Estas sustancias se denominan inquemados porque no tuvieron la suficiente cantidad de oxígeno en el aire para combustionar. La presencia de inquemados indica que la combustión se está realizando en forma incompleta y es uno de los principales propagadores de incendios en forma vertical.

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.

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.

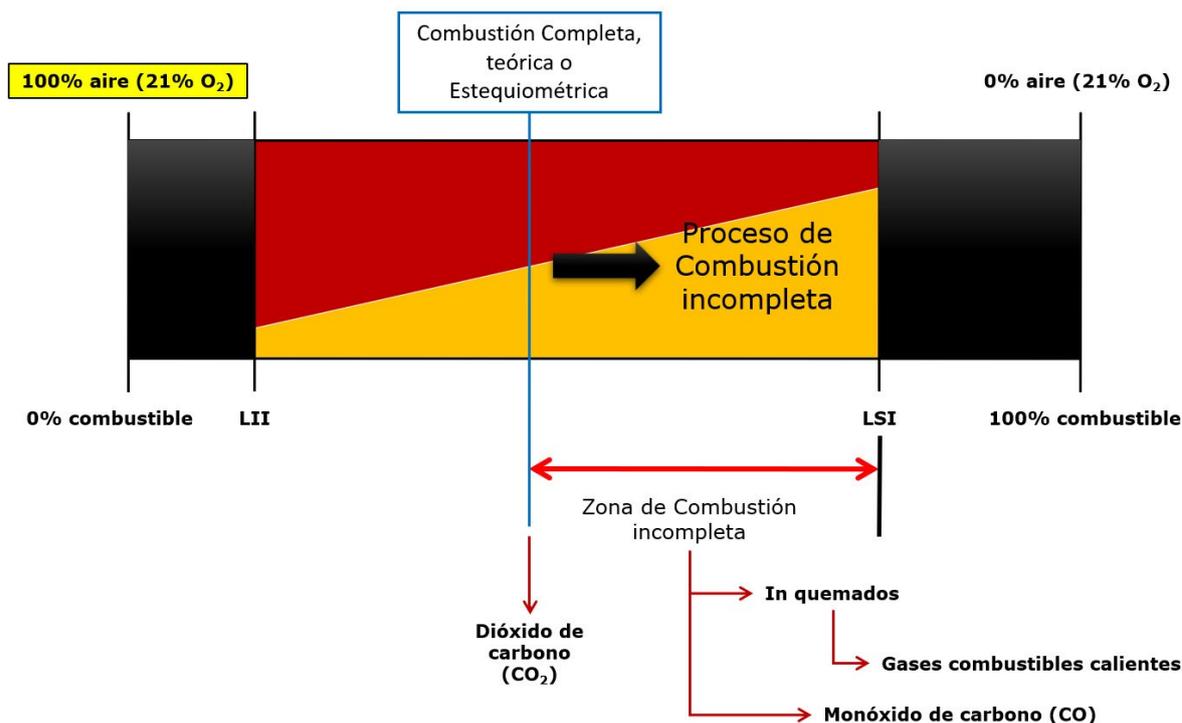


Figura 19: Combustión incompleta

12.3) Combustión con Exceso de Aire

Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Esta combustión tiende a no producir inquemados. Es típica la presencia de aire en los humos. En los incendios esta situación no representa problema alguno.

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.

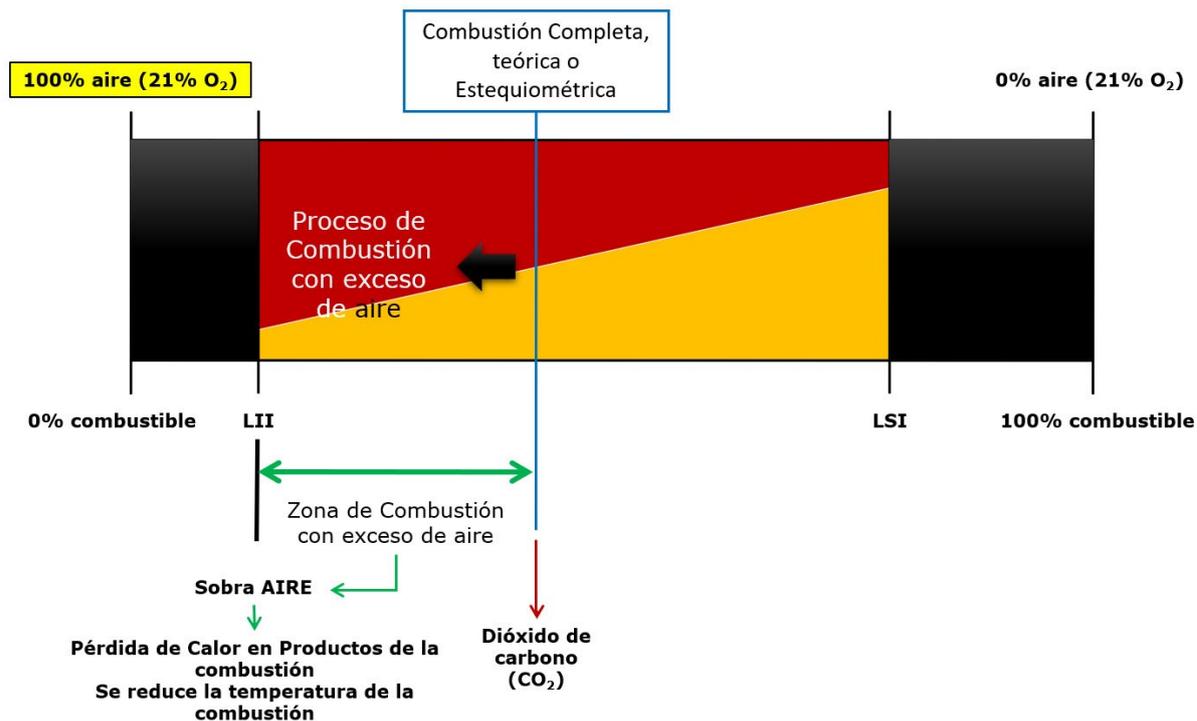


Figura 20: Combustión con exceso de aire

13) VARIACIÓN DE LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

Hasta ahora el estudio de los límites de inflamabilidad se hizo en condiciones de presión atmosférica (1 bar), temperatura ambiente (25 °C) y con un nivel de oxígeno en el aire del 21%.

Hay tres situaciones que se deben analizar para entender a fondo que pasa con los límites de inflamabilidad:

- Aire con más del 21% de oxígeno.
- Temperatura del ambiente superior a los 25°C.
- Presión distinta de la presión ambiente de 1 bar.

14) COMBUSTIÓN CON EXCESO DE 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 ambientes con 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. 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 ambientes que usan oxígeno medicinal como en hospitales y sanatorios, una pérdida en conexiones, mangueras en mal estado o uso de este, puede generar transitoriamente un ambiente sobre oxigenado.

Este aumento del nivel de oxígeno en un ambiente con presencia de gases o vapores combustibles afecta a todos los parámetros básicos de la combustión. Al aumentar la concentración de oxígeno sucede lo siguiente:

- La temperatura de ignición disminuye.
- La potencia de la fuente de ignición disminuye.
- El margen de inflamabilidad se amplía.
- La velocidad de combustión aumenta.

Dándose los efectos máximos en una concentración de oxígeno del 100%. Por lo tanto, las concentraciones de oxígeno mayores que las normales en el aire aumentan proporcionalmente los peligros de combustión.

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.

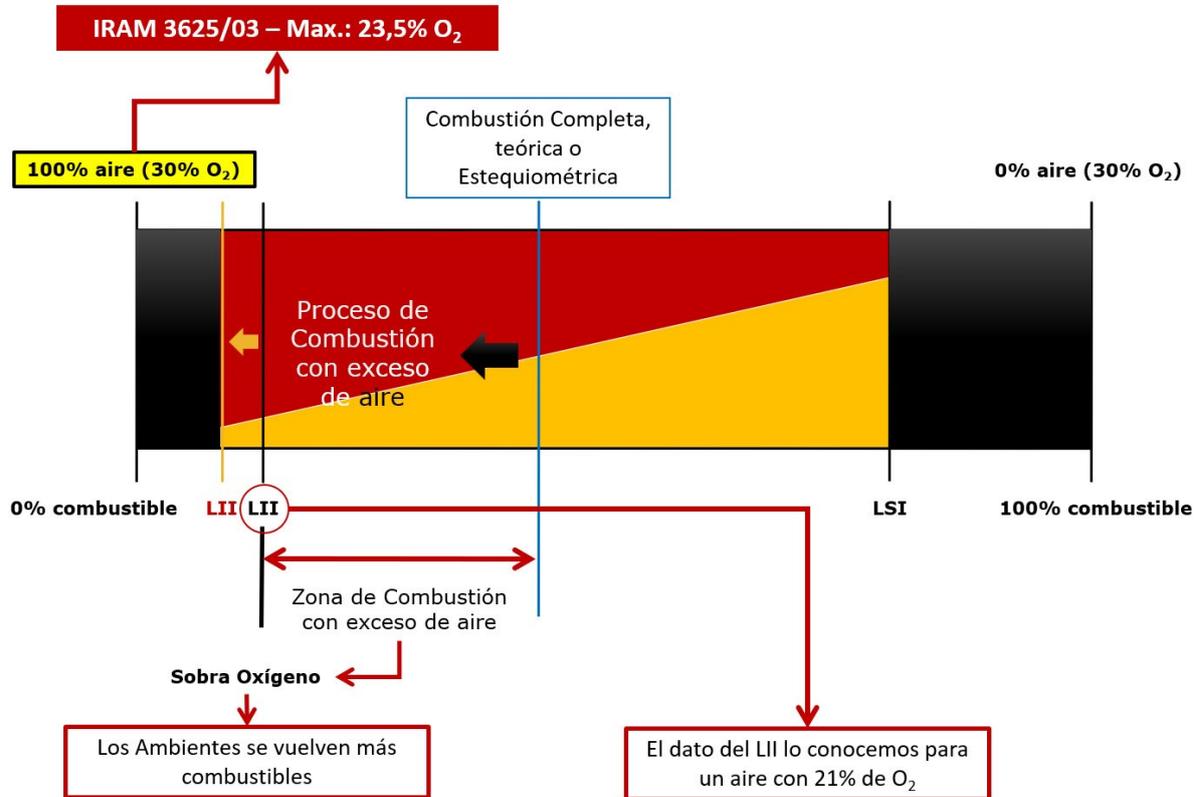


Figura 21: Combustión con exceso de oxígeno

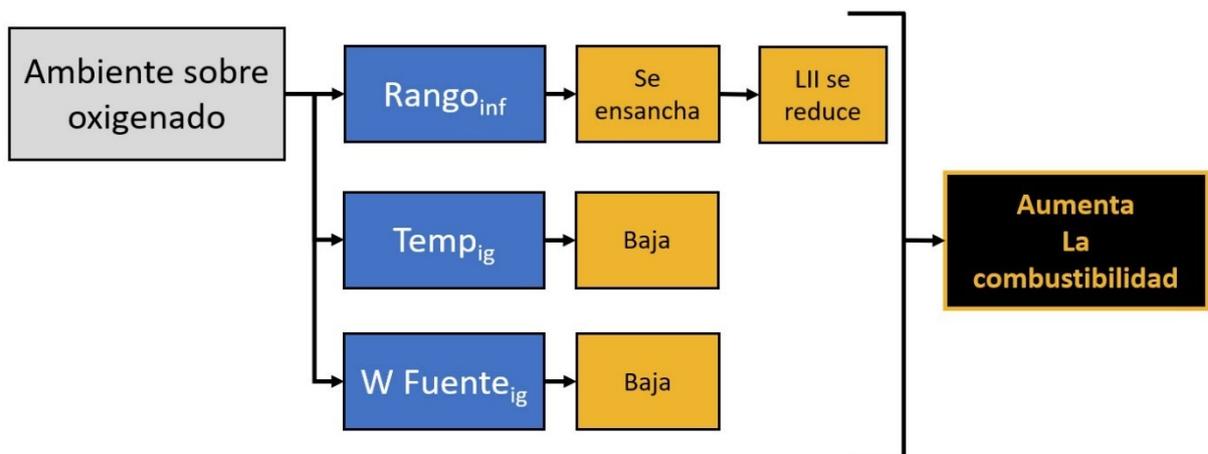


Figura 22: Consecuencias de la combustión con exceso de oxígeno

15) ¿QUÉ PASA CUANDO SE MIDE EXPLOSIVIDAD EN AIRE CON EXCESO DE OXIGENO?

Los explosímetros se calibran con un aire con 21% O₂ pero ¿qué pasa si ahora el aire tiene un 25% o 30% de O₂ o más?

Tal como se explicó en el apartado anterior se amplía o ensancha el rango de inflamabilidad, disminuyendo el LII y aumentando el LSI.

Como el equipo no mide nivel de oxígeno y si lo hace no lo relaciona con el LII, para el equipo le da lo mismo si mide en un ambiente con exceso o falta de oxígeno.

El LII para el equipo, es decir el 100% de la medición será para el valor de calibración a un aire con 21% O₂.

Van a pasar dos cosas muy graves.

- Mientras el valor real del LII disminuye con el aumento del nivel de oxígeno, el equipo va a tener registrado un LII superior porque mide al 21%O₂, y se puede considerar como seguro un ambiente que en la realidad está en condiciones de combustibilidad. Es decir, el LII del equipo está clavado en el valor de calibración y no va a poder detectar la variación real del LII del ambiente.
- Con el aumento del nivel de oxígeno, el ambiente se vuelve más sensible a encender, es decir, ahora puede llegar a producirse una combustión, violenta por exceso de oxígeno, en condiciones que normalmente nunca pasaría nada.

16) MODIFICACIÓN DE LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD CON LA TEMPERATURA

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

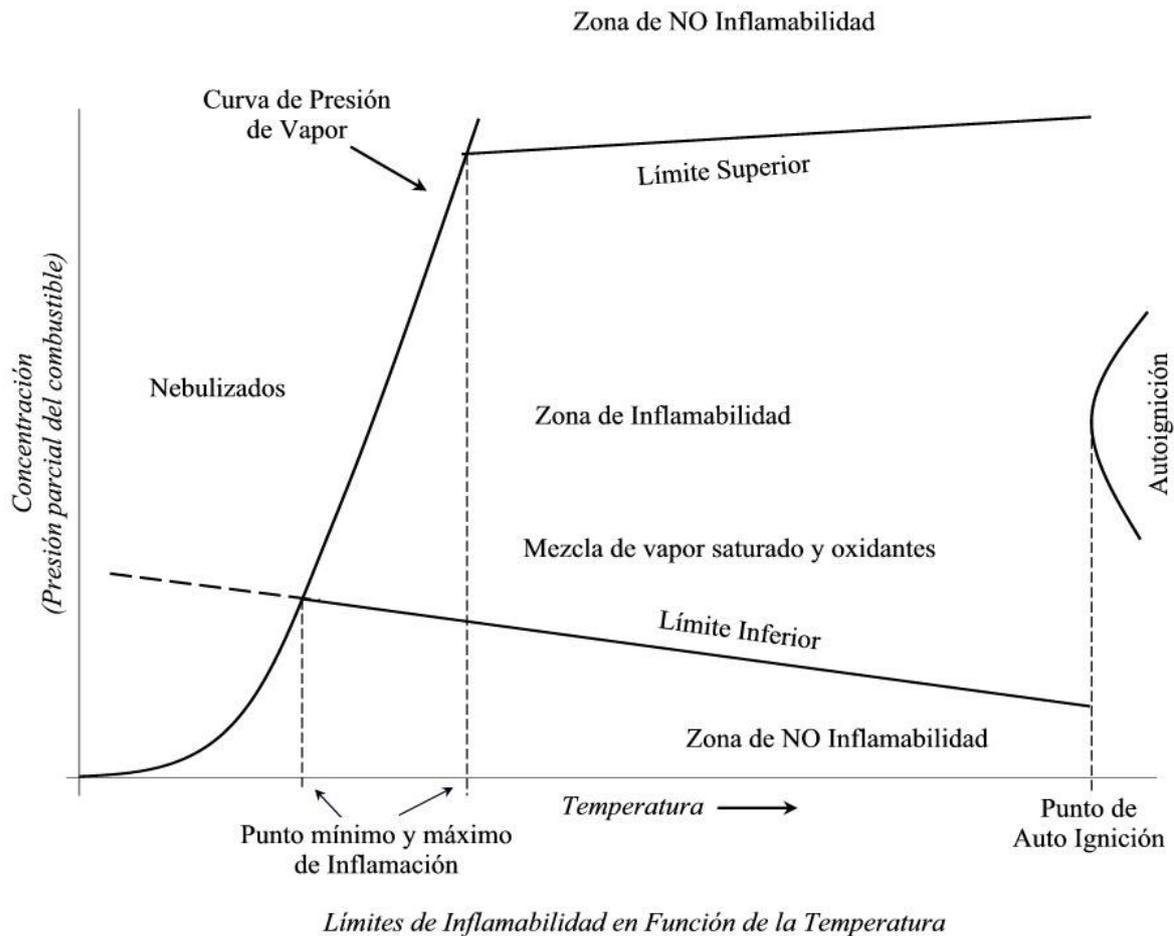


Figura 23: Límites de inflamabilidad en función de la temperatura

Si se está en presencia de un escape de gases o vapores inflamables que salen a mayor temperatura que las CNPT (condiciones normales de presión y temperatura) y se va a medir “explosividad”, entonces aparecen nuevos y serios problemas, no sólo por el peligro que implica el escape, sino, por no considerar la disminución del LII real por aumento de la temperatura de la mezcla. Y como en el caso de exceso de oxígeno, se puede sacar como conclusión que se está por debajo del LII y por consiguiente ese escape no representa un peligro serio, cuando en la realidad lo hemos superado.

Los límites de inflamabilidad de tablas y manuales de propiedades fisicoquímicas se han obtenido en condiciones ambientales de temperatura y presión. En general para una temperatura determinada t (°C) se puede expresar:

$$LII_t = LII_{25^\circ\text{C}} - (0,8 \times LII_{25^\circ\text{C}} \times 10^{-3}) \times (t - 25)$$

$$LSI_t = LSI_{25^\circ\text{C}} + (0,8 \times LSI_{25^\circ\text{C}} \times 10^{-3}) \times (t - 25)$$

donde:

ΔH_c = Calor de combustión neto (kcal/mol)

t = temperatura en °C

También se pueden usar las siguientes ecuaciones:

$$LII_t = LII_{25^\circ\text{C}} [1 - 0,75 (t - 25) / \Delta H_c]$$

$$LSI_t = LSI_{25^\circ\text{C}} [1 + 0,75 (t - 25) / \Delta H_c]$$

donde:

ΔH_c = Calor de combustión neto (kcal/mol)

t = temperatura en °C

17) LII Y LSI CON PRESIONES DISTINTAS A LA AMBIENTE

La presión afecta ligeramente al límite inferior de inflamabilidad. Generalmente es constante al descender la presión desde la presión atmosférica hasta 5 kPa, por debajo de la cual no se propaga la llama.

El efecto de presiones elevadas sobre el límite inferior de inflamabilidad es pequeño y al aumentar la presión disminuye ligeramente el límite inferior de inflamabilidad.

Respecto al límite superior de inflamabilidad, la presión elevada lo aumenta considerablemente. Así, para varios hidrocarburos saturados y para presiones absolutas entre 0,1 MPa (1bar) y 20,7 MPa:

$$LSI_p \cong LSI + 20,6 (\text{Log } p + 1)$$

siendo:

p = presión absoluta en mega pascales (MPa)

LSI = límite superior de inflamabilidad a 0,101 MPa (1 atm)

18) LA PRESIÓN DE VAPOR Y EL LII

En un líquido contenido en un recipiente cerrado con una mezcla de vapor y aire por encima de su superficie, el porcentaje de vapor en la mezcla puede determinarse mediante su presión de vapor. Dicho porcentaje es directamente proporcional a la relación que existe entre la presión de vapor del líquido y la presión total de la mezcla.

Por ejemplo, la acetona a 38°C tiene una presión de vapor de 52 kPa. Suponiendo una presión total de 101 kPa, la proporción de vapor de acetona presente será 52 dividido 101, es decir, el 52%. Si se conoce el punto de inflamación de un líquido en vaso cerrado y la presión de vapor a la temperatura de inflamación, el límite inferior de inflamabilidad (LII) para el vapor, en porcentaje en volumen a presión atmosférica, puede obtenerse de la forma siguiente:

$$LII = \frac{V}{1,01}$$

donde:

LII: porcentaje de vapor en volumen en su límite inferior de inflamabilidad

V: presión de vapor en kPa a la temperatura de inflamación.

A otras presiones:

$$LII = \frac{100 V}{P}$$

donde:

P: presión en psi.

Cuanto mayor sea la presión de vapor del líquido, mayor será la cantidad de vapores inflamables que éste emane a una temperatura determinada y, por tanto, mayor será el riesgo de una potencial inflamación.

Un ejemplo sencillo se puede establecer entre la gasolina y el gasoil. La presión de vapor de la gasolina es de 190 mmHg a 20°C mientras que la del gasoil es de tan sólo 2,6 mmHg a 50°C. Como se sabe, es mucho más fácil que se inflame un derrame de gasolina que uno de gasoil, hecho que es debido, principalmente, a la mayor presión de vapor de la gasolina que lleva consigo, como hemos comentado, una mayor emanación de vapores.

19) LII DE MEZCLAS INFLAMABLES (REGLA DE LE CHÂTELIER)

Para calcular el límite inferior de inflamabilidad de mezclas de vapores o gases inflamables se puede aplicar la regla de Le Chatelier:

$$LII (\text{mezcla}) = 100 \% / [(C_1/LII_1) + (C_2/LII_2) + \dots + (C_n /LII_n)]$$

donde:

$C_1, C_2, \dots, C_n =$ concentración de cada combustible respecto al total de combustibles en porcentaje de volumen.
Cumpliéndose $C_1 + C_2 + \dots + C_n = 100$

$LII_1, LII_2, \dots, LII_n =$ Límite inferior inflamabilidad de cada combustible
% v/v

Esta regla es aplicable para mezclas de vapores o gases de compuestos similares. Así entre otras mezclas, funciona bien para calcular los límites inferiores de inflamabilidad de mezclas de disolventes, conteniendo metil etil cetona y tetrahidrofurano. Sin embargo, la regla no se cumple particularmente bien para los límites inferiores de inflamabilidad de algunas mezclas de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y disulfuro de carbono (CS_2). Por lo tanto, la regla de Le Châtelier se debe aplicar con discreción, especialmente para compuestos de estructura química distinta.

20) ESTIMACIÓN DE LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

Para hidrocarburos, teniendo en cuenta la ecuación química:



Se puede aplicar la siguiente regla:

$$LII = 0,55 (100) / (4,76m + 1,19x - 2,38y + 1)$$

$$LSI = 3,50 (100) / (4,76m + 1,19x - 2,38y + 1)$$

21) CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

La mayoría de los explosímetros utilizan celdas catalíticas o sensores por puente de Wheatstone para indicar la presencia de gases. Este tipo de sensores no reconocen la diferencia entre los distintos gases combustibles, sino que reaccionan frente a todos ellos con diferente intensidad.

Los explosímetros son calibrados con un gas patrón específico, por lo que sólo frente a dicho gas entregarán una lectura en pantalla coincidente con el porcentaje del LII en el ambiente de la medición.

Si se mide otro gas diferente al de la calibración del equipo, se puede cometer graves errores, especialmente si el gas diferente tiene un LII inferior al del gas de calibración.

Ejemplo:

Detector calibrado para METANO

LII metano = 5%

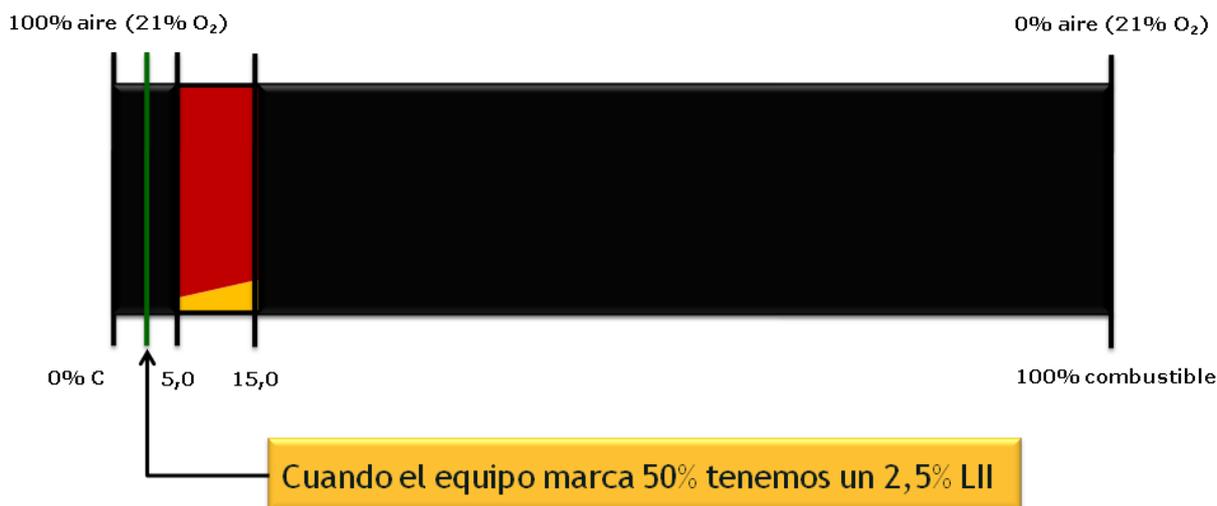


Figura 25: Medición con calibración para metano

¿Qué pasa ahora si mide Propano con el detector calibrado para Metano?

El propano tiene un LII = 2,1% frente metano que tiene un LII = 5,0%.

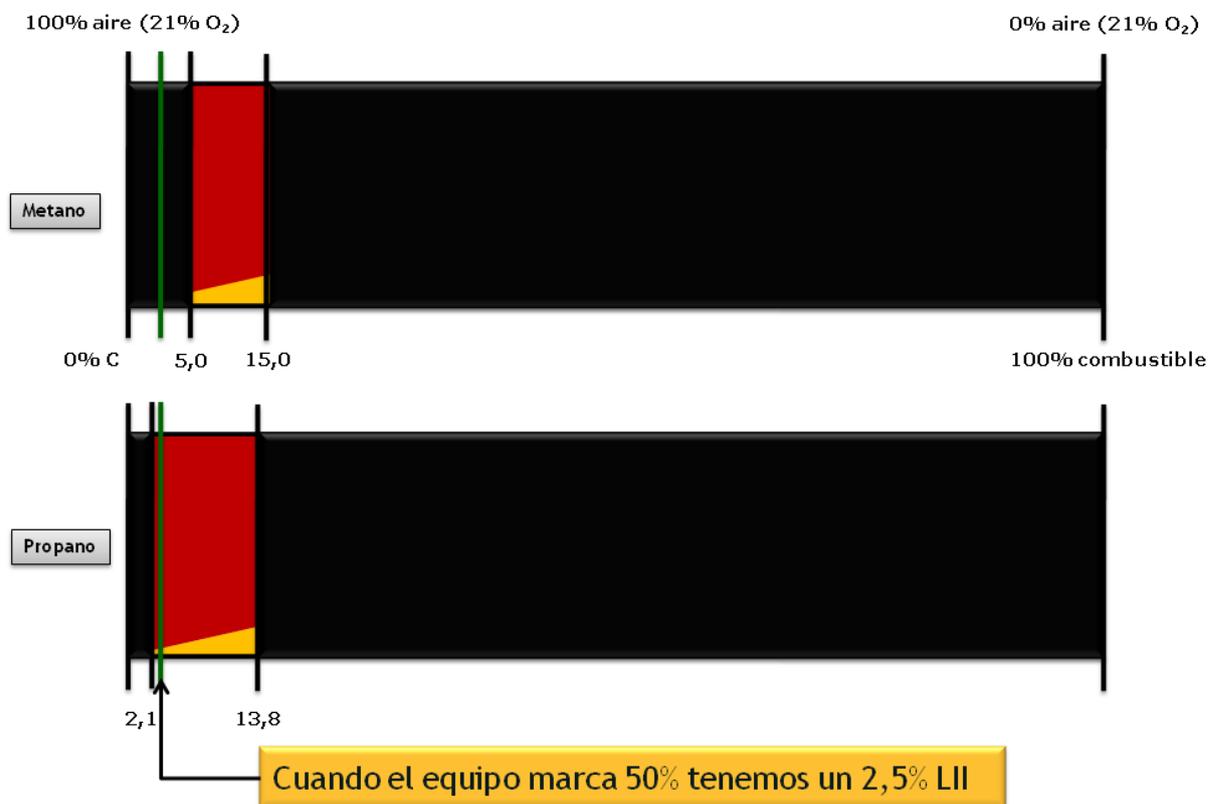


Figura 26: Medición de propano con calibración para metano

Dependiente del fabricante del equipo, algunos prohíben el uso del explosímetro con otros gases que no sea para el cual fue calibrado, otros simplemente expresan que el equipo mide con bajo nivel de error para el gas que fue calibrado y este error aumenta en la medida que midamos otros gases que tengan un LII distinto. En muchos casos el explosímetro se calibra para METANO y al usarlo con otro gas se debe aplicar un factor de corrección tal como se muestra en la tabla siguiente.

Gas	Concentration	Reading [%]
Acetic Acid	4.0 %	29
Acetone	2.6 %	50
Ammonia	15 %	125
Benzene	1.2 %	40
n-Butane	1.8 %	50
Carbon Monoxide	12.5 %	80
Chlorobenzene	1.3 %	34
Ethanol	3.3 %	59
n-Hexane	1.2 %	40
Hydrogen	4.0 %	80
Hydrogen Sulfide	4.3 %	43
Iso Propyl Alcohol	2.2 %	55
Methane	5.0 %	100
Methanol	6.7 %	85
Methyl ethyl ketone	1.9 %	40
n-Pentane	1.4 %	40
Propane	2.1 %	50
Toluene	1.2 %	40

Figura 27: Factores de conversión

Es el fabricante del equipo que se está utilizando el que debe indicar como se usa el equipo, con que gas viene calibrado y como usarlo con otros gases, para lo cual deberá tener su propia tabla de equivalencias de sensibilidades en el manual del equipo.

22) PAUTAS PARA REALIZAR MEDICIONES

El siguiente es un listado de pautas básicas para realizar mediciones de explosividad con efectividad, y por sobre todas las cosas, aprender a no subestimar al equipo y las condiciones ambientales.

- Un detector de fugas no mide explosividad, solo “huele” la presencia de determinados productos químicos, por lo general los equipos de detección de fugas también miden las ppm en el ambiente, aunque no necesariamente.
- El detector de fugas NO sirve como explosímetro.
- El explosímetro NO sirve para medir ppm.
- El explosímetro no mide la cantidad de gas o vapor en el ambiente, sino el porcentaje de éste en relación con su LII.
- Hay que conocer el proceso productivo donde se va a realizar la medición y por sobre todas las cosas, hay que entenderlo. Saber por dónde entran los productos, por donde salen, por donde retornan, como se separan las distintas partes del proceso, etc.

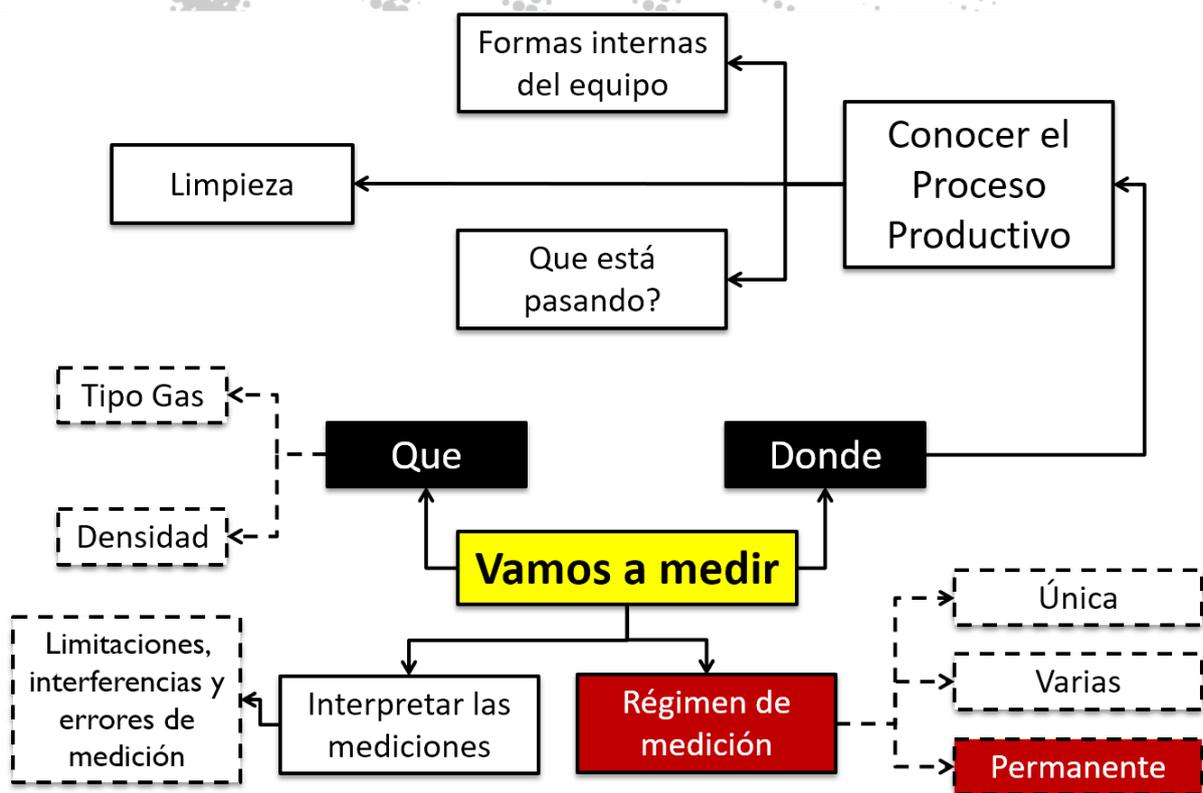


Figura 23: Análisis de la medición

- Hay que saber que se vas a medir, donde y que está pasando en el equipo o zona donde se va a realizar la medición. ¿La planta está parada y limpia? ¿Está

en una parada de emergencia? ¿Cómo está bloqueada del resto del proceso?
¿Qué tipo de bloqueos?

- Aun viéndolos vacíos desde el exterior, los tanques o equipos de procesos suelen tener en su interior borras, barros o residuos, éstas pueden emitir gases o contener bolsas de gases atrapadas.

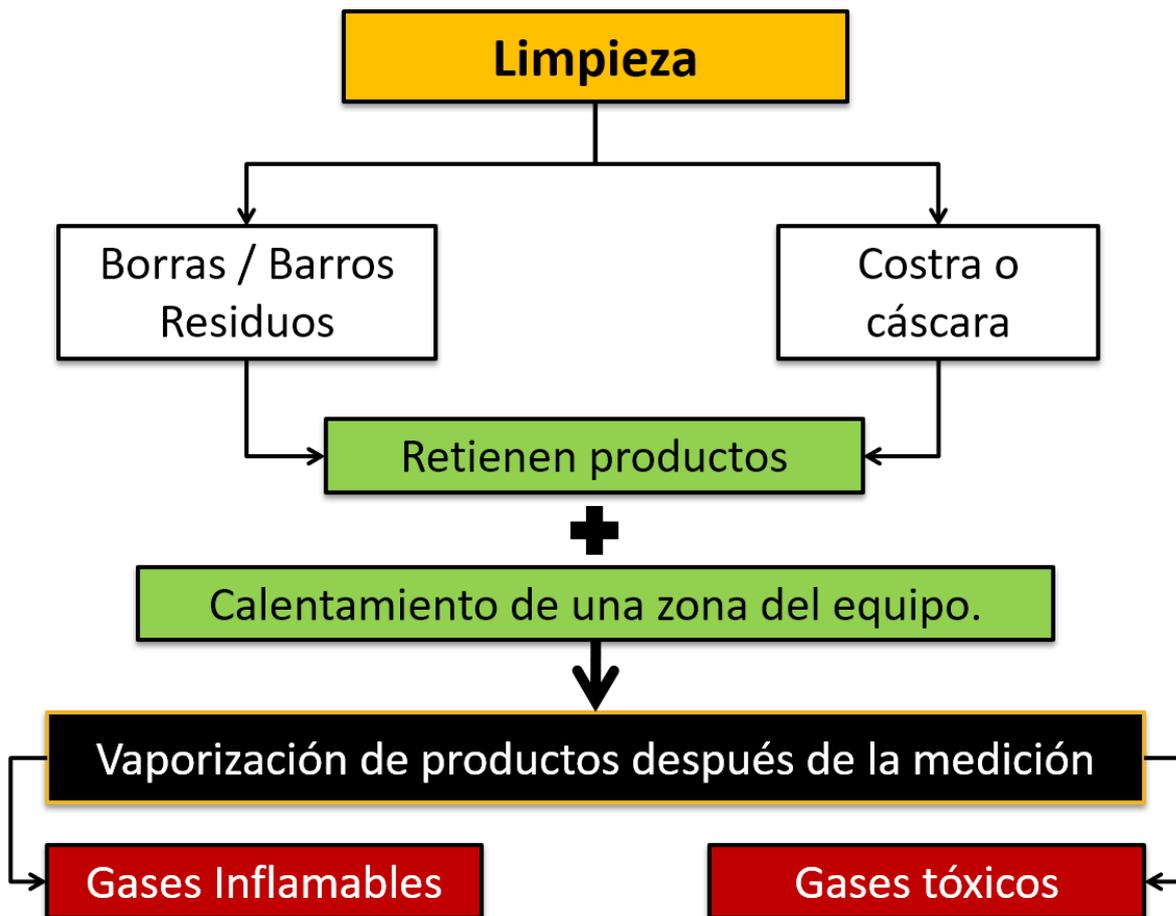


Figura 24: Limpieza y análisis de la medición

- En las paredes de los equipos suele formarse una costra o cáscara que retiene productos.
- Si se va a soldar o calentar una zona del equipo, el calor puede vaporizar productos después de la medición, y no sólo generar gases inflamables, sino, también del tipo tóxicos.

- Si se usa con solventes de alto punto de ebullición, donde el espacio a medir está a una temperatura más alta que la del instrumento, se puede anticipar que habrá cierta condensación de los vapores en la línea de muestreo y en el sistema de flujo del instrumento, y consecuentemente el instrumento puede indicar una concentración de vapores menor a la real. Para algunos de estos casos, la condensación se puede prevenir calentando la línea de muestreo y el instrumento a una temperatura equivalente o por arriba a la de la atmósfera examinada, esto dependerá del modelo de equipo y de las limitaciones y recomendaciones del fabricante.
- La mayoría de los explosímetros no indicarán la presencia de nieblas o rocíos explosivos o combustibles, tales como aceite lubricante, o polvos explosivos, como polvos de grano o de carbono.
- Muchos accidentes resultan de cambios en las atmósferas, después de ocurrida la entrada.
La única manera de detectar los cambios antes de que se torne una atmósfera peligrosa es monitoreando continuamente el ambiente.
- Se debe leer el manual de funcionamiento del equipo antes de su uso. Todos los equipos son distintos, aunque aparentemente funcionen igual.
Hay que saber las limitaciones del equipo, las interferencias y los errores de medición. Un buen equipo tiene un buen manual.
- Se debe encender el equipo en una atmósfera donde haya garantías de ausencias de gases combustibles.
- Antes de usar el equipo se debe verificar que el mismo tenga vigente la calibración externa.
- En caso de dudas de funcionamiento del equipo, realizar una medición en una atmósfera donde se tenga la certeza absoluta de que existen gases combustibles.

- Para realizar una medición tener en cuenta la densidad de los gases combustibles. Los vapores más pesados que el aire deben ser medidos a nivel del suelo o en la parte inferior del equipo.
- Al aumentar la temperatura los gases o vapores son más livianos y pueden estar más arriba de lo que se puede sospechar.
- Se debe medir en las cercanías por donde podría producirse la pérdida o filtración, como ser bridas, válvulas, perforaciones, desagües, etc.
- Nunca se debe realizar una sola medición, se debe dejar pasar unos minutos y volver a medir para certificar o garantizar el ambiente de trabajo.
- En un lugar abierto tener en cuenta la dirección del viento para realizar la medición.
- En un ambiente confinado, antes de realizar la medición pedir el plano del equipo para estudiar las posibles acumulaciones internas dentro del equipo, como así los ingresos y salidas de las sustancias a medir.
- En un ambiente confinado realizar mediciones en varios puntos distintos y a distintos niveles, de manera de poder configurar una grilla tridimensional de mediciones.
- Para autorizar un trabajo el valor de la medición debería ser cero (0) en repetidas mediciones. Algunas bibliografías recomiendan menos del 20% y otros menos de 10%.

Los valores de LII de los inflamables son extremadamente bajos, por lo consiguiente un 10 o 20% se podría considerar como un valor bajo y adecuado para trabajar, pero no hay que olvidar que de por sí el LII es bajo en la mayoría de los inflamables. Igualmente, lo importante no es tanto el valor del %LII sino que este se mantenga estable durante el tiempo.

- Medir en reiteradas ocasiones para asegurar que este valor 0%, 10% o 20% de LII no sea casual o temporal.
- Antes de medir gases combustibles se debe proceder a medir el nivel de oxígeno, el mismo debe dar entre 20,8 y 21%.

- Si el nivel de oxígeno es mayor del 21% el valor de la medición del equipo no representará la realidad de la combustibilidad del ambiente.
Con niveles de oxígeno por encima del 21% los ambientes se vuelven más combustibles y encienden en condiciones de menores de temperatura de ignición y con fuentes de ignición más débiles, cuando no, encienden por sí solos. No es recomendable realizar un trabajo en estas condiciones.
- No trabajar en ambientes con un nivel de oxígeno por encima del 23,5%.
- Con niveles de oxígeno por debajo del 20,8% no se producen condiciones de mayor combustibilidad en los ambientes de trabajo, pero se puede configurar un ambiente peligroso para los trabajadores que pudieran ingresar a trabajar.
- Tener cuidado con los procesos que generan oxígeno cuando se trabaja, como ser el proceso de oxicorte, la medición de oxígeno puede ser normal antes de empezar a trabajar, pero este nivel empieza rápidamente a aumentar con el proceso de oxicorte.
- Antes de realizar una medición de oxígeno en el ambiente a trabajar, encender el equipo fuera del ambiente y proceder a realizar una medición en un ambiente donde tenga garantía que el nivel de oxígeno en el aire sea el normal.
- Los detectores se deben calibrar para el gas que se va a medir, si se mide un gas con un detector calibrado para otro gas, se puede cometer errores, y considerar un ambiente no combustible cuando en realidad supera el LII.

23) EL SENSOR CATALITICO⁴

Bajo ciertas circunstancias los gases y vapores inflamables se pueden oxidar mediante el oxígeno del aire para liberar calor de la reacción. Normalmente esto se consigue por un material catalizador especial y adecuadamente calentado, que

⁴ Introducción a los Sistemas de Detección de Gases. Dräger Safety AG & Co. KGaA. 90 46 703.

aumenta ligeramente su temperatura por el calor de la reacción. Este aumento de temperatura es una medida para la concentración de gas.

Los llamados pellistores son perlas cerámicas minúsculas y muy porosas (diámetro aprox. 1 mm) rodeando una pequeña bobina de hilo de platino. Hay una corriente eléctrica fluyendo a través de la bobina de platino de tal manera que el pellistor se calienta a unos cientos de grados Celsius.

Si la perla cerámica contiene material catalizador adecuado, la temperatura del pellistor aumentará con la presencia de gas inflamable, y por consiguiente la resistencia de la bobina del hilo de platino aumentará. Este cambio en la resistencia con respecto a la resistencia en aire limpio se utiliza para la evaluación electrónica.

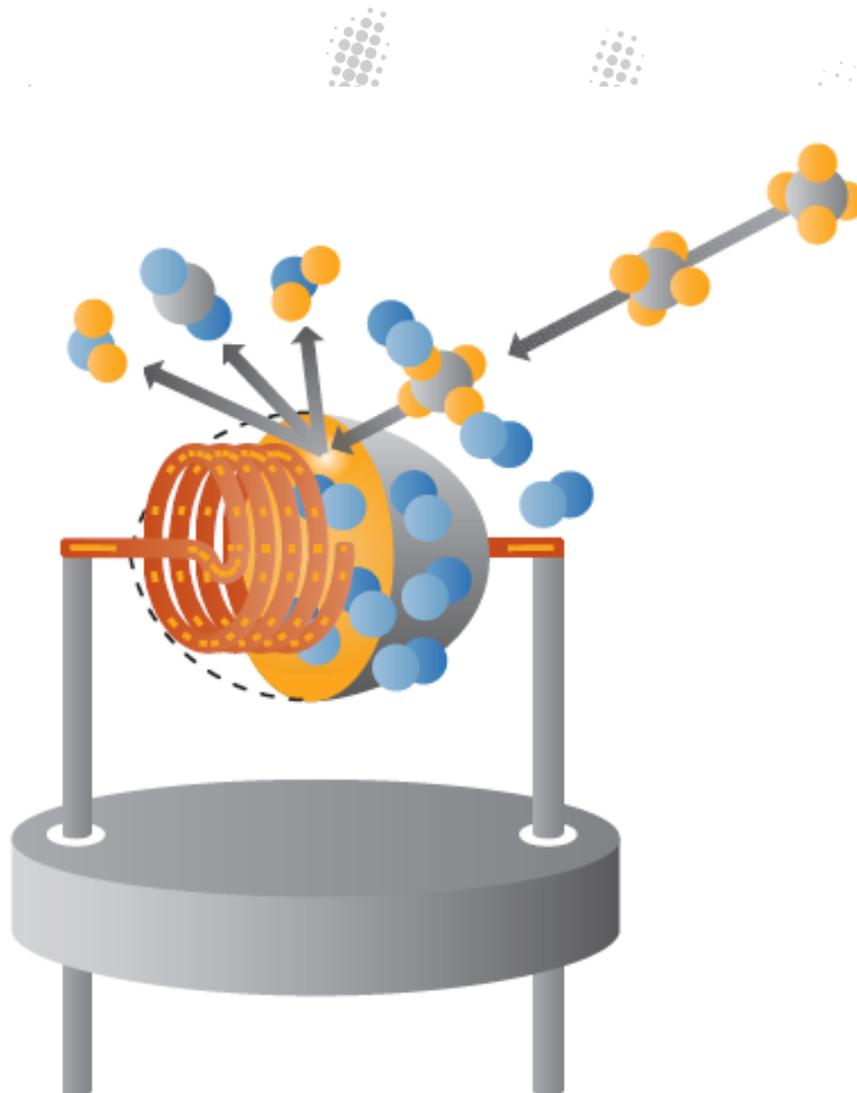


Figura 28: Sensor catalítico de perla

Para eliminar influencias por cambios de la temperatura ambiente, se utiliza un segundo pellistor, que es muy similar pero que no reacciona al gas, porque el pellistor no contiene el material catalizador o está inhibido de cualquier otra manera. Integrando los dos pellistores en un circuito de puente Wheatstone tiene como resultado un sensor para la medición de concentración de gases inflamables, en gran medida independiente de la temperatura ambiente.

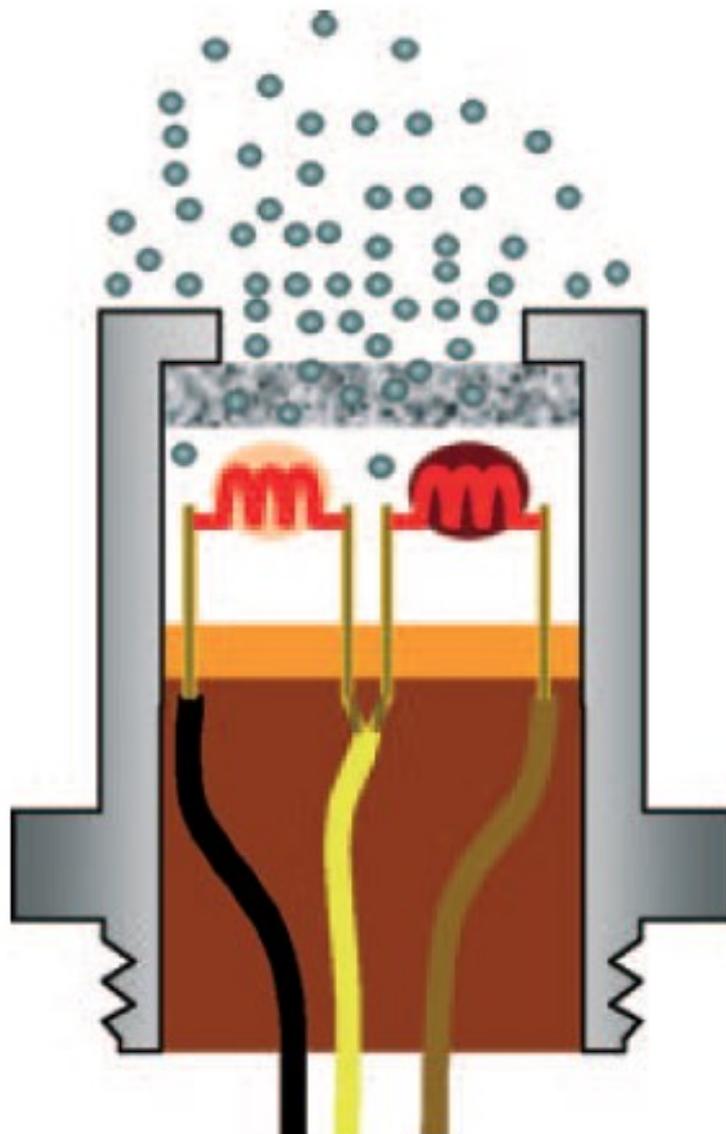


Figura 29: Celda de medición con sensor catalítico de perla

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. NTP 379: Productos inflamables: variación de los parámetros de peligrosidad.
<http://www.insht.es>.
2. Manual de Protección Contra Incendios (NFPA 1991). Cuarta edición en castellano. Editorial MAPFRE. ISBN: 84-7100-645-6.
3. El Fuego. Dinámica de los Incendios. Tercera Edición (2021). Editorial Red Proteger. Botta, Néstor Adolfo.
4. Introducción a los Sistemas de Detección de Gases. Dräger Safety AG & Co. KGaA. 90 46 703.

