



RED  
PROTEGER

# MEDICIÓN DE EXPLOSIVIDAD

*Material no apto para la venta.*

**2° edición enero 2019**

**1° edición registrada**

ISBN 978-987-4035-10-3



## **EL AUTOR**



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

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

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

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

Su extensa actividad docente lo ubica como:

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

## **Datos de Contacto**

e-mail: [nestor.botta@redproteger.com.ar](mailto:nestor.botta@redproteger.com.ar)

Botta, Néstor Adolfo  
Medición de explosividad / Néstor Adolfo Botta. - 1a edición para el alumno -  
Rosario : Red Proteger, 2019.  
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online  
ISBN 978-987-4035-10-3

1. Prevención y Protección contra Incendios . 2. Lucha contra Incendios. I. Título.  
CDD 658.477

®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](mailto:info@redproteger.com.ar)  
[www.redproteger.com.ar](http://www.redproteger.com.ar)

---

**INDICE**

- 1) INTRODUCCIÓN
  - 2) EL PROCESO BÁSICO DEL INICIO DE LA COMBUSTIÓN
  - 3) ¿QUE SE NECESITA PARA QUE SE PRODUZCA UNA COMBUSTIÓN?
  - 4) LA REALIDAD DE LOS AMBIENTES LABORALES
  - 5) LÍMITES DE INFLAMABILIDAD
  - 6) MEDICIÓN DE EXPLOSIVIDAD
  - 7) ¿QUE PASA DENTRO DEL RANGO DE INFLAMABILIDAD?
  - 8) ¿QUE PASA CUANDO SE MIDE EXPLOSIVIDAD EN AIRE CON EXCESO DE OXIGENO?
  - 9) MODIFICACIÓN DE LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD CON LA TEMPERATURA
  - 10) LA PRESIÓN DE VAPOR Y EL LII
  - 11) LII DE MEZCLAS INFLAMABLES (REGLA DE LE CHÂTELIER)
  - 12) LII Y LSI EN CONDICIONES DIFERENTES A LAS AMBIENTALES
  - 13) PAUTAS PARA REALIZAR MEDICIONES
  - 14) CALIBRACIÓN DE EQUIPOS
  - 15) EL SENSOR CATALITICO
- 

## **ABSTRACT**

El proceso de medición de explosividad o mejor dicho de combustibilidad o inflamabilidad está en la práctica real subvalorado, no por no considerar la importancia real de hacerlo, si no por el hecho de hacerlo sin comprender en el fondo lo que se está midiendo, las condiciones de la medición y del medio ambiente donde se mide. Este trabajo pretende poner en claro que se está midiendo, cuáles son las condicionantes de esa medición y como afecta la medición de la explosividad en la combustibilidad del ambiente de trabajo, es decir, que otros parámetros, además, del LII y LSI hace que un ambiente sea o no combustible o inflamable.

## **Palabras clave**

límites, LII, LSI, inflamabilidad, medición, combustibilidad



## 1) INTRODUCCIÓN

El término “medición de explosividad” está mal usado. Lo que se miden no son materiales explosivos, sino materiales combustibles o inflamables que bajo determinadas condiciones pueden combustionar violentamente, es decir, deflagrar, y/o producir una explosión bajo determinadas condiciones de confinamiento.

A lo sumo lo que se puede detectar son los materiales explosivos, que no es éste el caso en estudio.

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

## 2) EL PROCESO BÁSICO DEL INICIO DE LA COMBUSTIÓN

Para entender el proceso básico del inicio de la combustión, y describir los distintos fenómenos físicos y químicos existentes; analizaremos como ejemplo la combustión de una madera en una situación típica, por ejemplo, una chimenea, o todavía algo más tradicional, la parrilla para el asado.

**a-** Hay que suponer que esta madera experimenta un calentamiento inicial externo por una fuente externa de calor, no importa por ahora porque medios y motivos. Conforme la temperatura superficial de la madera se va aproximando a la temperatura de ebullición del agua, la madera empieza a desprender gases, principalmente vapor de agua. Estos gases iniciales tienen muy poco, o nulos vapores combustibles, pero al incrementarse la temperatura y sobrepasar la de ebullición del agua, el proceso de desecación avanza hacia el interior de la madera.

**b-** Con el calentamiento continuo, la superficie de la madera empieza a decolorarse cuando la temperatura de la superficie sobrepasa 250°C. Esta decoloración es evidencia de la pirólisis<sup>1</sup> 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° – 280°C: Se crea una gran cantidad de productos secundarios producto de la descomposición y comienza la carbonización.

Zona C. 280° – 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 (asfixiante) para producir una gran cantidad de monóxido de carbono (tóxico e inflamable).

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

<sup>1</sup> Pirólisis: Descomposición de un compuesto químico por acción del calor.

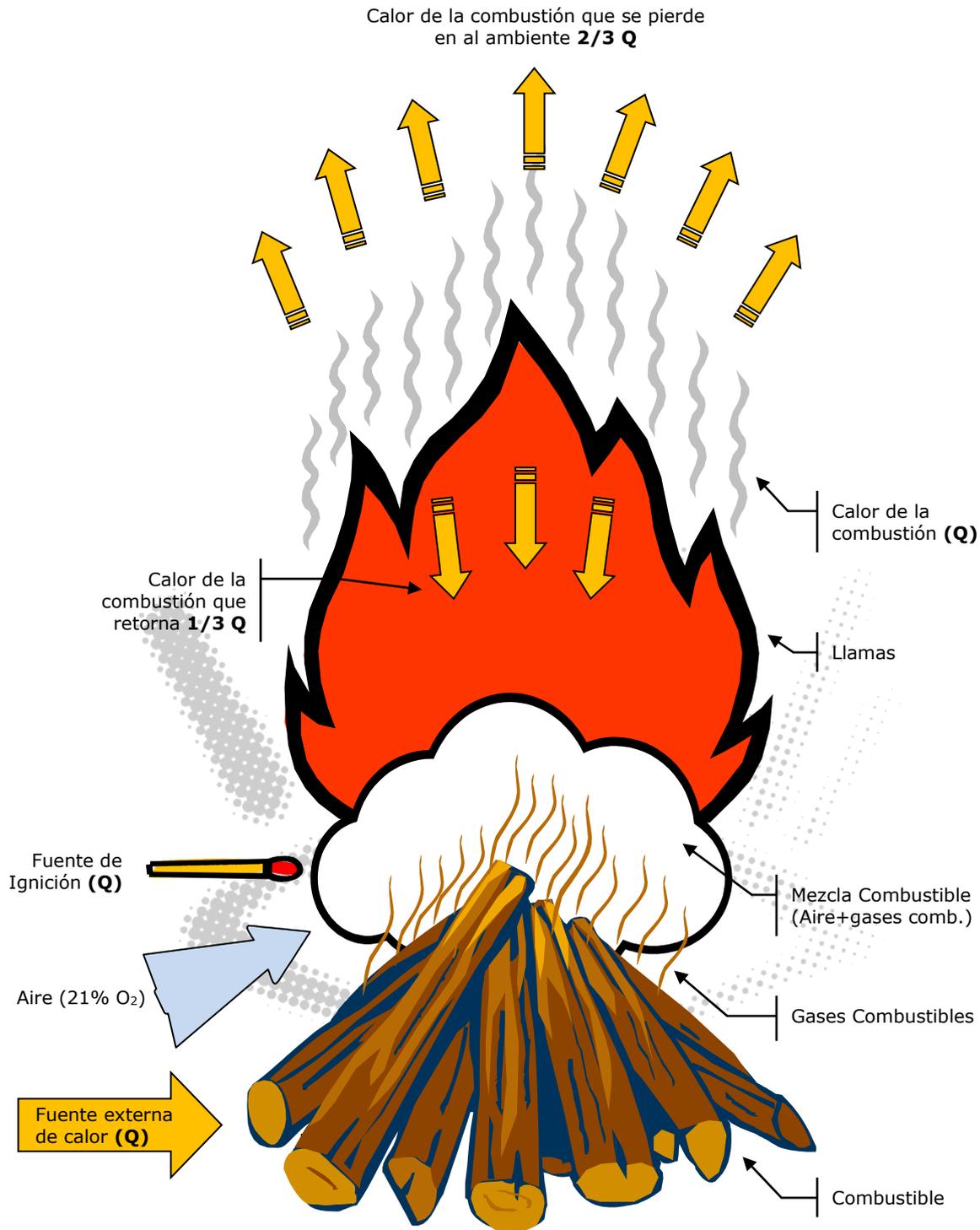


Fig. 1: La Combustión

- e- Inmediatamente después de comenzar la pirólisis activa, se producen rápidamente suficientes gases combustibles como para alimentar una combustión en fase gaseosa.

A medida que los gases calientes suben por efecto chimenea, es decir, al estar calientes se vuelven más livianos que el aire que los rodea, y ascienden; a medida que estos gases ascienden, el espacio que dejan es ocupado por aire más frío que ingresa por un efecto denominado "difusión", el aire ingresa sin ayuda externa por efecto de la depresión producida por los gases calientes. También se suele decir, que los gases calientes en su ascenso arrastran el aire que los rodea.

El aire que ingresa más el aire que los gases combustibles calientes van encontrando en su ascenso, se mezclan, conformando así una mezcla combustible, que es la que alimenta la combustión. Esta mezcla debe estar dentro del rango de inflamabilidad.

Mientras esto se va produciendo, la temperatura sigue en franco aumento producto de la fuente de calor externa, cuando llegamos al nivel de temperatura denominada "temperatura de ignición", sólo nos va a hacer falta para que surja la combustión una "fuente de ignición de energía suficiente" que la provoque. 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"

- f- En estas condiciones empiezan 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 lo podemos resumir en el siguiente cuadro.

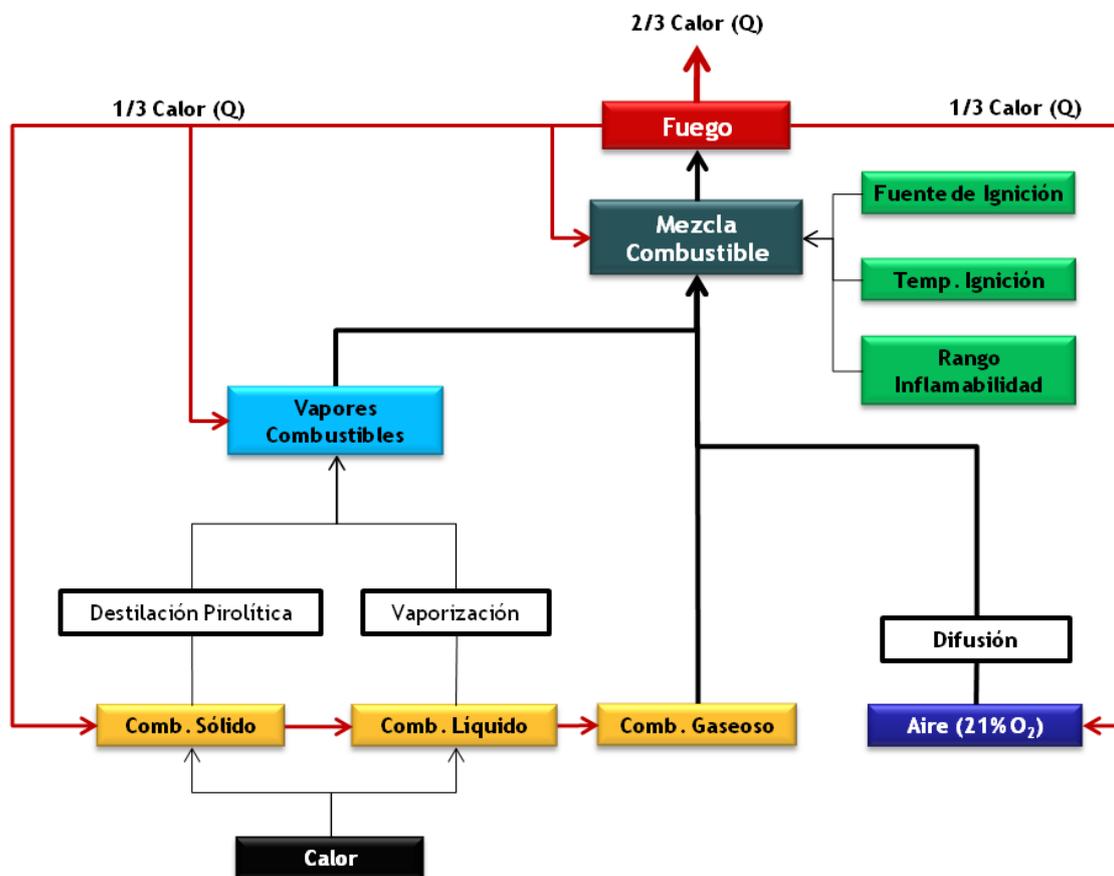


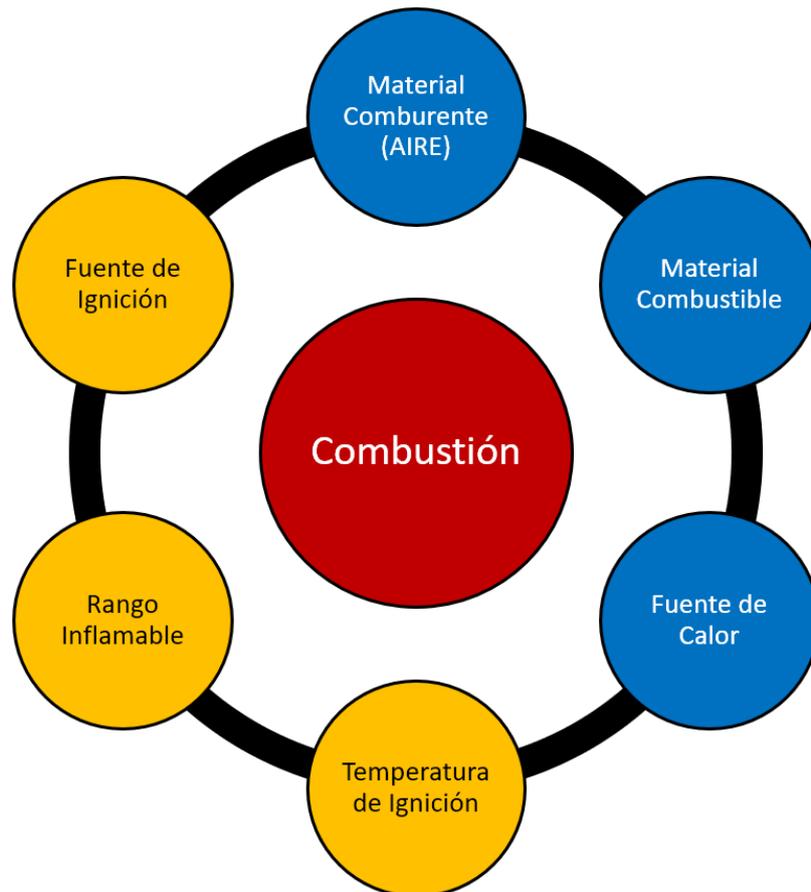
Fig. 2: Resumen del Proceso de Inicio de la Combustión

### 3) ¿QUE SE NECESITA PARA QUE SE PRODUZCA UNA COMBUSTIÓN?

Para poder dar inicio a una combustión, debemos tener los elementos y condiciones siguientes:

- Material Comburente o agente oxidante.
- Material Combustible o agente reductor.

- Fuente de Calor con calor suficiente para lograr que el material combustible desprenda gases o vapores combustibles, esto puede suceder a temperatura ambiente como en el caso de algunos líquidos inflamables.
- Lograr que la mezcla de los gases o vapores combustibles con el agente oxidante, llamada mezcla inflamable o combustible, alcance como mínimo la Temperatura de Ignición.
- Mezcla inflamable dentro del Rango Inflamable.
- Fuente de Ignición de energía suficiente para encender la mezcla inflamable.



#### **4) LA REALIDAD DE LOS AMBIENTES LABORALES**

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 malos trabajos de mantenimiento.

Un trabajo típico que se da en casi todas las industrias son los llamados trabajos en calientes, en especial cuando se producen en áreas o equipos que han tenido, tienen o se sospecha que existen materiales inflamables.

Cuando analizamos este tipo de situaciones desde la óptica de la seguridad, vemos que todos los elementos que se necesitan para que se dé inicio a la combustión están presentes en el lugar.

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

Existe material combustible inflamable, es imposible pensar una industria sin materiales inflamables.

Existe por cuestiones de reparación y/o mantenimiento una fuente de ignición 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 entrar en combustión por debajo de la temperatura ambiente.

Todo esto es un excelente caldo para que cuando demos el primer chisporroteo con el electrodo, encendamos el motor estándar, produzcamos las primeras chispas con la amoladora, se produzca desde una deflagración leve hasta una explosión grave si estamos dentro de un ambiente confinado.

Pensemos ahora por un instante qué podemos eliminar de todo esto, que, además, de darnos 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.

En la Argentina el Decreto 351/79 reglamentario de la ley nacional 19.587 sobre Higiene y Seguridad en el trabajo establece para este tipo de situaciones lo siguiente:

***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.***

**Análisis:** 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.***

**Análisis:** 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 proceder a 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.

## 5) LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

Son los límites máximo y mínimo de la concentración de un combustible dentro de un medio oxidante, por lo que la llama, una vez iniciada, continúe propagándose.

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

En caso de los materiales inflamables estas proporciones se determinan como porcentajes en volumen de gas o vapor en aire. Por lo tanto, los porcentajes mínimos y máximos de gas o vapor combustible necesarios para formar mezclas inflamables constituyen el límite inferior (LII) y superior (LSI) de inflamabilidad respectivamente. La diferencia entre ambos límites define lo que se conoce como rango inflamable que es la zona donde se puede dar una combustión.

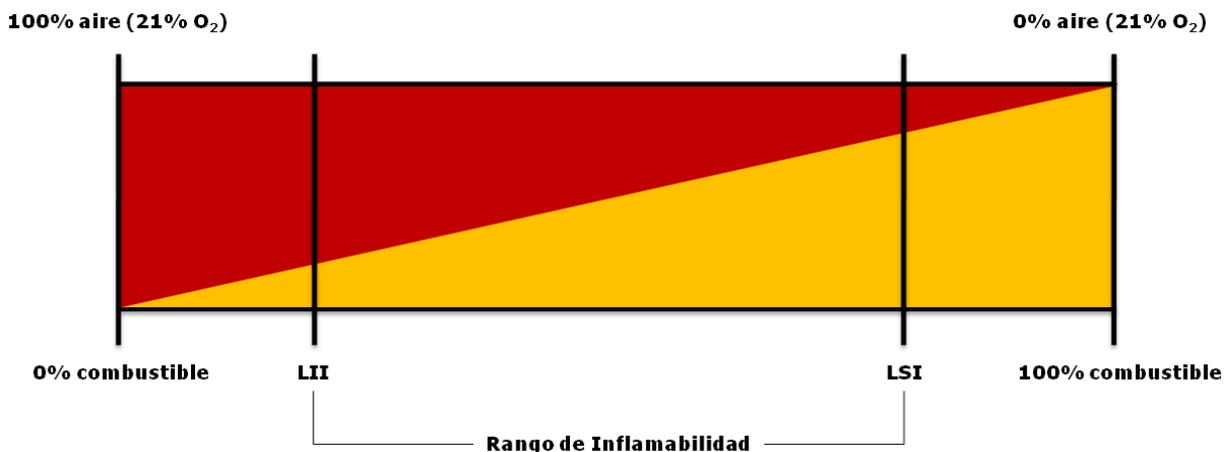


Fig. 3: Límites de Inflamabilidad

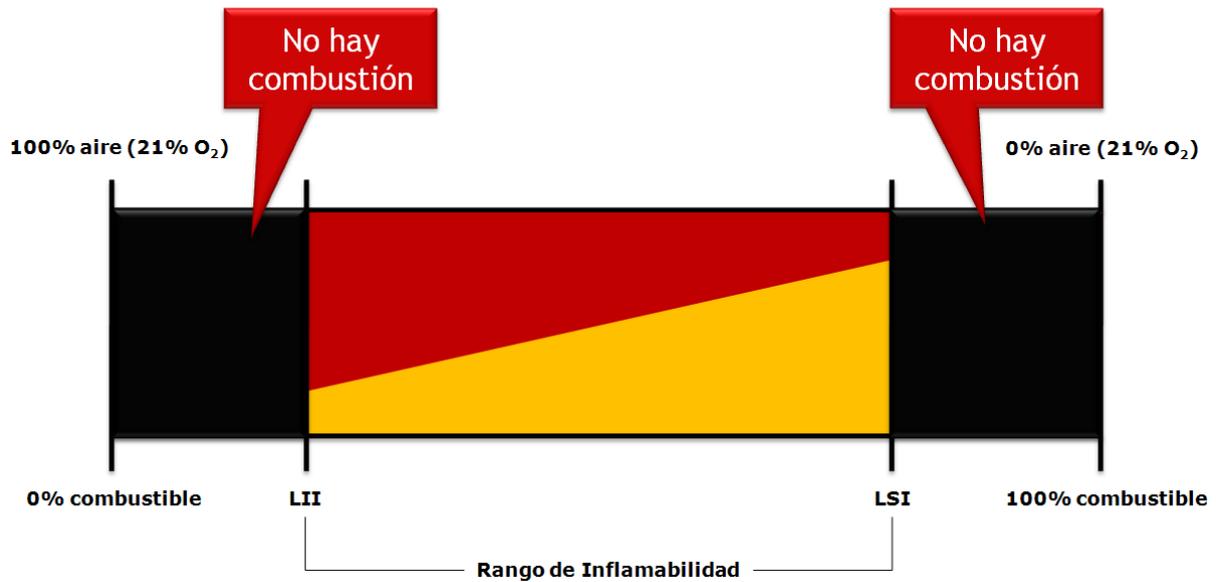


Fig. 4: Zonas de No Combustión

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

Tabla 1: Límite Inferior y Superior de Inflamabilidad

Si la concentración de gas en aire es menor que el LII 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, podemos prevenir la posibilidad de inflamación en una mezcla de gases, asegurándonos que la mezcla esté fuera de rango de inflamabilidad.

Las técnicas son:

- a- Eliminar la suficiente cantidad de combustible, ambiente por debajo del LII.
- b- Eliminar el aire, ambiente por encima del LSI, mediante una técnica que se denomina "inertización", que significa el uso de un gas inerte para hacer que la atmósfera dentro de un recipiente hermético sea no 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.

En la práctica no es aconsejable, salvo casos muy especiales, trabajar con una mezcla que esté por encima del LSI, dado que un pequeño ingreso de aire, o el desprendimiento de una bolsa de aire del interior de un equipo puede llevarlo inmediatamente por debajo del LSI, y producir el accidente que se intentaba prevenir.

Como ya se mencionó anteriormente la técnica será pues eliminar el combustible inflamable de la zona de trabajo.

Los datos de LII y LSI de ésta y la gran mayoría de todas las tablas están dados para CNPT y para un aire con 21% O<sub>2</sub>.

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.

## Acetona



Fig. 5: Límites de Inflamabilidad de la Acetona

### 6) MEDICIÓN DE EXPLOSIVIDAD

#### ***¿Qué medimos en realidad cuando decimos que medimos "explosividad"?***

Por empezar no medimos explosividad, sino, la combustibilidad de un ambiente, mediante la determinación de que tan lejos o cerca estamos del LII.

#### ***¿Que usamos para medir?***

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

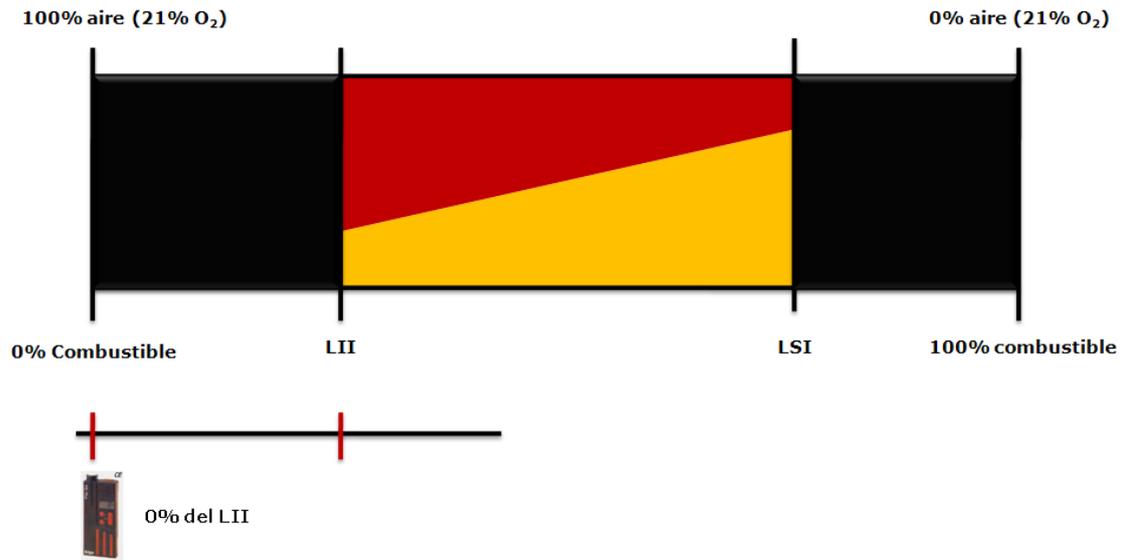


Fig. 6: Medición de Explosividad. LLI = 0%

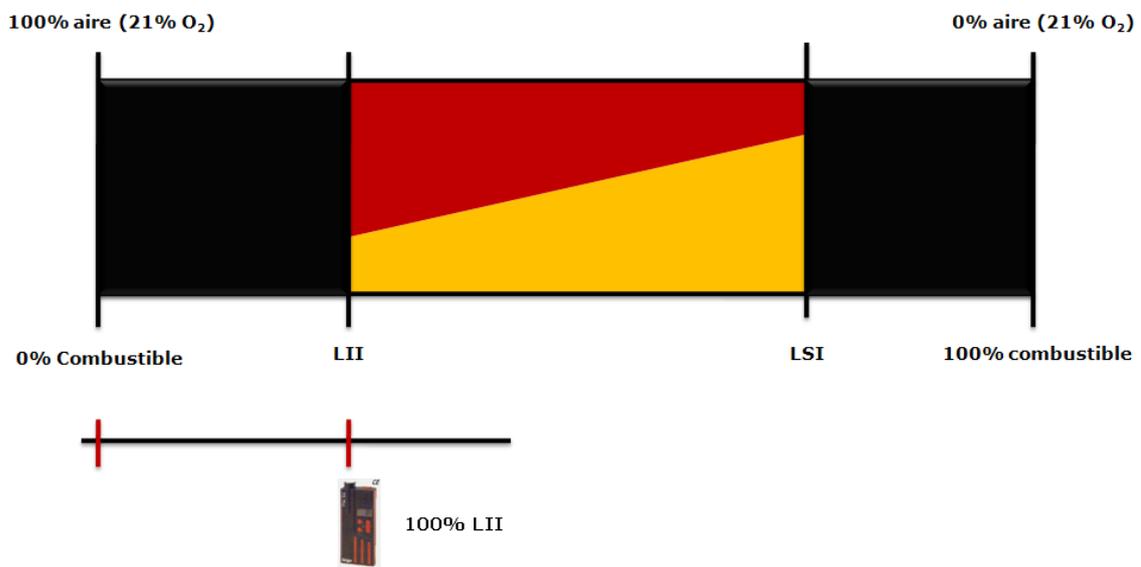


Fig. 7: Medición de Explosividad. LLI = 100%

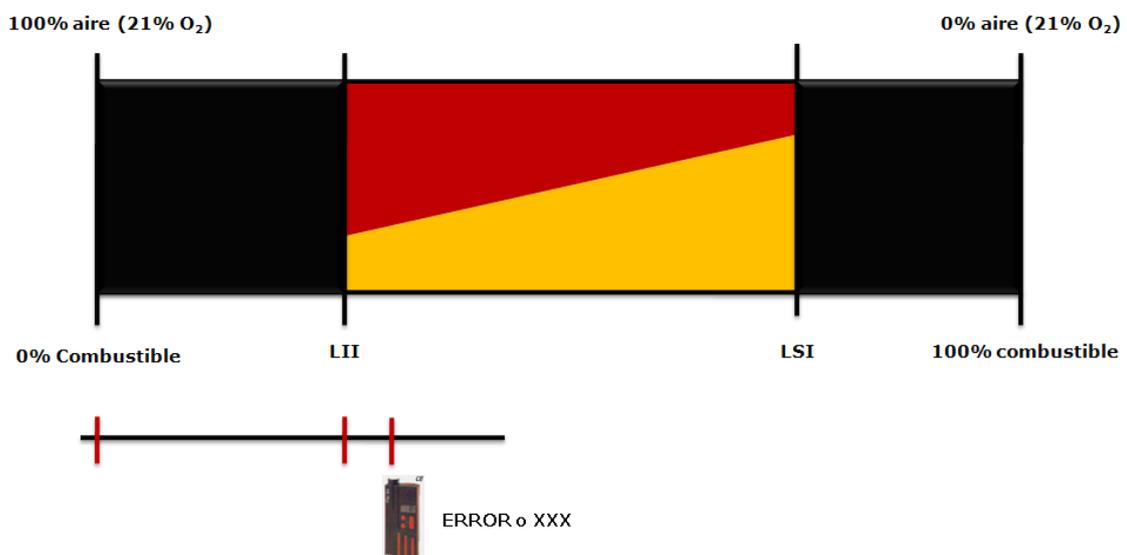


Fig. 8: Medición de Explosividad. LLI > mayor al 100%

La gran mayoría de los explosímetros, por no decir todos, NO están midiendo directamente el LII; 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.

Hay otros tipos de equipos, de generación nueva, no muy usados y difundidos que miden el nivel de oxígeno y gases combustibles, e integra ambas mediciones para determinar el %LII.

Para poder entender la realidad de lo que se mide cuando estamos en presencia de gases o vapores inflamables, es mejor ponerlo en números, y para eso analizaremos la medición del n-Hexano, combustible del tipo inflamable de primera categoría.



Fig. 9: Rango de Inflamabilidad del n-Hexano

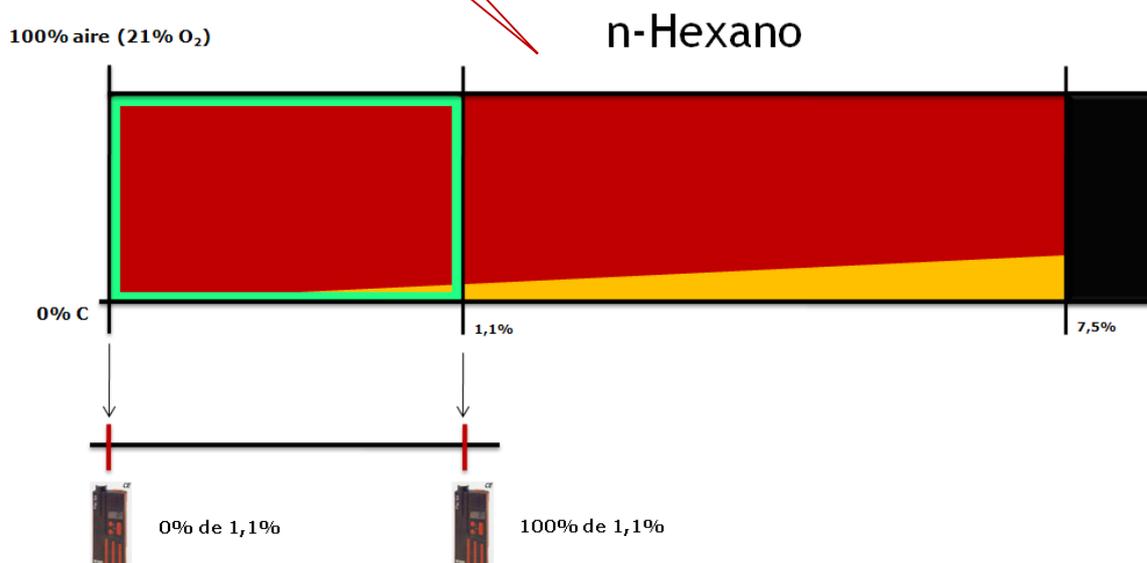
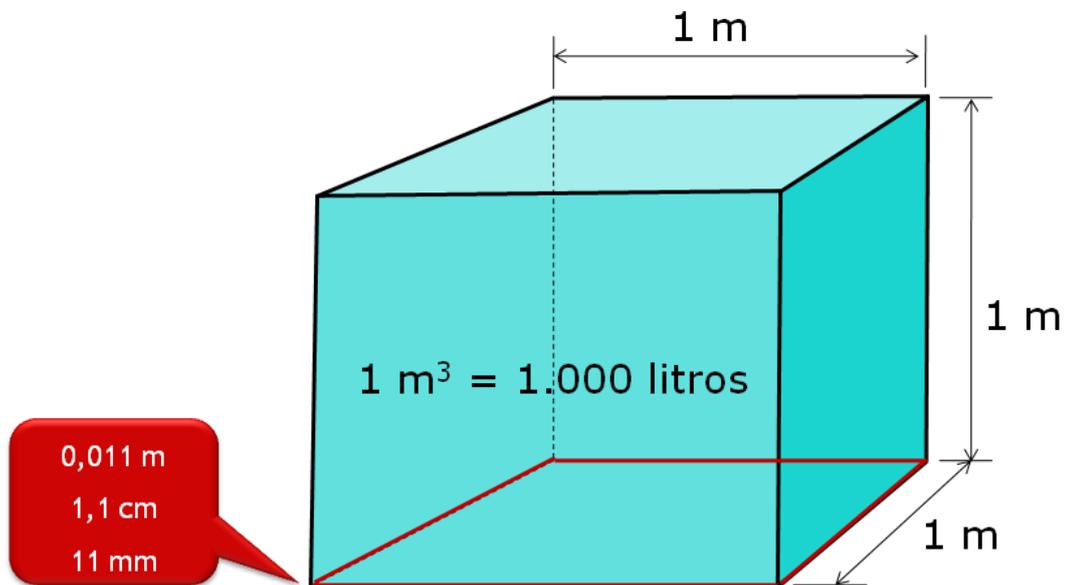


Fig. 10: Ampliación del Rango de Inflamabilidad del n-Hexano

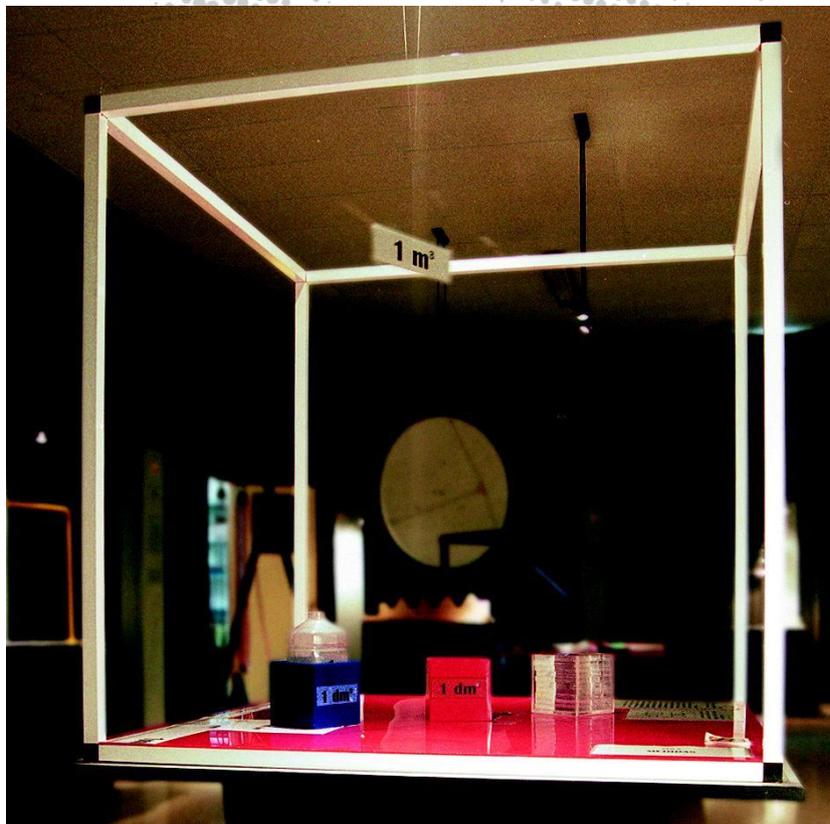
La figura 10 está mostrando que mide en realidad un explosímetro cuando lo hace de un ambiente que tiene n-Hexano. Cuando el equipo está marcando un 100% LII en realidad es

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.



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

Fig. 11: Visualización volumétrica del LLI del n-Hexano



Pero si esto no alcanzara para visualizar qué es el LII = 1,1%, llevemos este valor a un volumen conocido y fácil de visualizar como lo es 1 m<sup>3</sup> 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 lo quisiéramos visualizar dentro del bidón ocuparía el volumen indicado en la figura 11 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.

## **7) ¿QUE PASA DENTRO DEL RANGO DE INFLAMABILIDAD?**

Analicemos ahora que pasa dentro del rango de inflamabilidad. Por empezar podemos 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.

### **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 sin que se produzcan inquemados. En consecuencia, no se encuentra O<sub>2</sub> en los humos, ya que dicho O<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O.

Esta combustión se denomina teórica porque en la práctica siempre se producen inquemados, aunque sea en muy pequeña proporción.

### **Combustión Pobre, Incompleta o con Defecto de Aire**

Sucede lo contrario que en la combustión completa. O sea, como el combustible no se oxida completamente por falta de aire, se forman sustancias que todavía pueden seguir oxidándose; por ejemplo, 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 H<sub>2</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, H<sub>2</sub>S 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.

## 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.

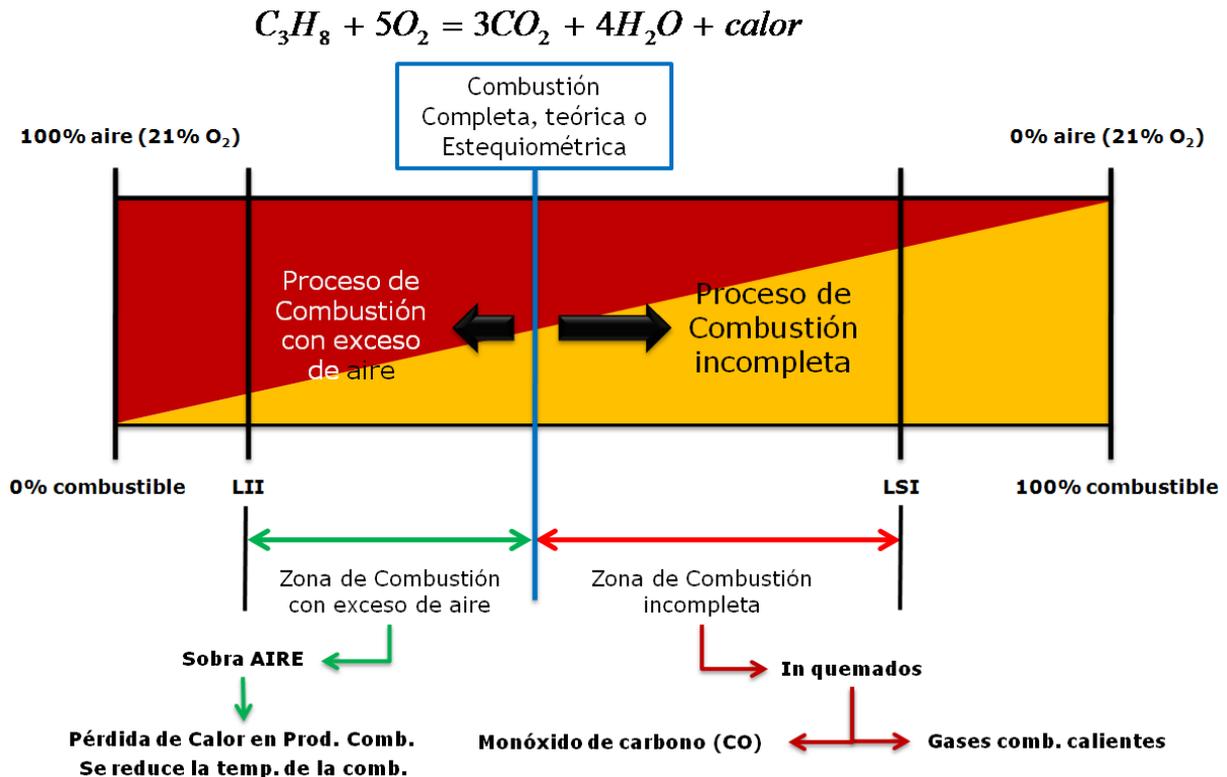


Fig. 12: Tipos y Zonas de Combustión

## Combustión con Exceso de Oxígeno

En el mundo en que vivimos el aire contiene aproximadamente un 21% O<sub>2</sub> a nivel del mar y disminuye menos a medida que ascendemos.

Hay situaciones en la actividad industrial, que, por diferentes motivos, podemos encontrarnos 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 mal 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, excepto al calor de combustión. Al aumentar la concentración de oxígeno, la temperatura y la energía de

ignición disminuyen, el margen de inflamabilidad se amplía y 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.

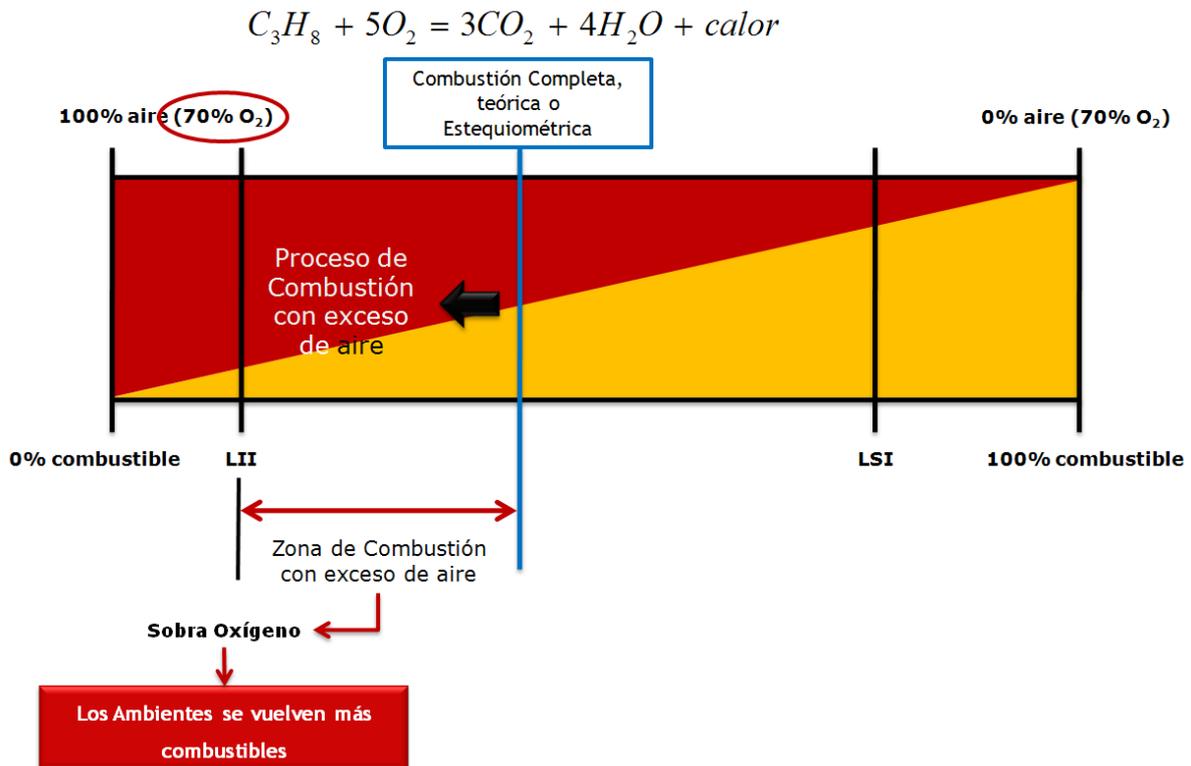


Fig. 13: Zonas de Combustión con Exceso de Oxígeno

## 8) ¿QUE PASA CUANDO SE MIDE EXPLOSIVIDAD EN AIRE CON EXCESO DE OXIGENO?

La mayoría de los explosímetros se calibran para un aire con 21% O<sub>2</sub>.

### ¿Qué pasa si ahora tengo aire con 25 o 30% O<sub>2</sub>?

Tal como explicamos 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% O<sub>2</sub>.

Van a pasar dos cosas muy graves.

- a- 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%O<sub>2</sub>, y podemos 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.
- b- 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.

## 9) MODIFICACIÓN DE LOS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD CON LA TEMPERATURA

Al disminuir la temperatura, una mezcla combustible puede dejar de serlo, al quedar situada por encima o por debajo de los límites de inflamabilidad. En general, al aumentar la temperatura de la mezcla se ensancha el campo de inflamabilidad y aumenta la velocidad de combustión en el mismo.

Si los combustibles líquidos están en equilibrio con sus vapores en el aire, cada combustible presenta una temperatura mínima por encima de la cual hay vapores en cantidad suficiente para formar una mezcla inflamable de vapor-aire.

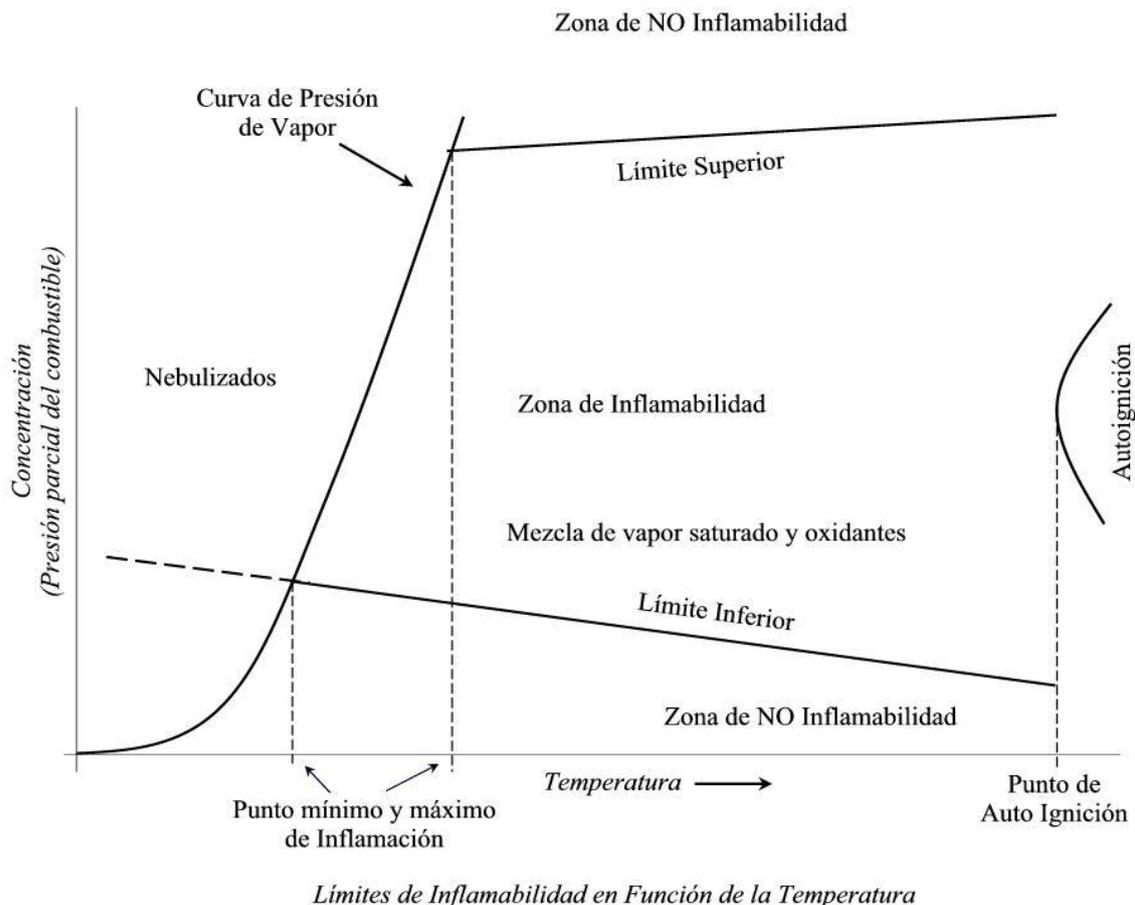


Fig. 14: Límites de Inflamabilidad en Función de la temperatura

Asimismo, hay una temperatura máxima por encima de la cual la concentración del vapor combustible es demasiado elevada para propagar la llama.

Estas temperaturas mínimas y máximas son denominadas, respectivamente, temperatura mínima y máxima de inflamación en el aire. Si las temperaturas son inferiores a la temperatura más baja de inflamación, el vapor del combustible en la fase gaseosa no es suficiente para permitir la ignición homogénea.

Si estamos 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 vamos a medir "explosividad", entonces vamos a estar en 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, podemos sacar como conclusión que estamos por debajo del LII y por consiguiente ese escape no representa un peligro serio, cuando en la realidad lo hemos superado.

## 10) 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:

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

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 sabemos, 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.

## **11) 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:

$$\text{LII (mezcla)} = 100 \% / [(C_1/\text{LII}_1) + (C_2/\text{LII}_2) + \dots + (C_n / \text{LII}_n )]$$

siendo:

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

$\text{LII}_1, \text{LII}_2, \dots, \text{LII}_n$  = 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 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y disulfuro de carbono ( $\text{CS}_2$ ). Por lo tanto, la regla de Le Châtelier se debe aplicar con discreción, especialmente para compuestos de estructura química distinta.

## **12) LII Y LSI EN CONDICIONES DIFERENTES A LAS AMBIENTALES**

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  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) se puede expresar:

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

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

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 también es pequeño y al aumentar la presión disminuye ligeramente el límite inferior de inflamabilidad.

Respecto al límite superior de inflamabilidad, una 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:

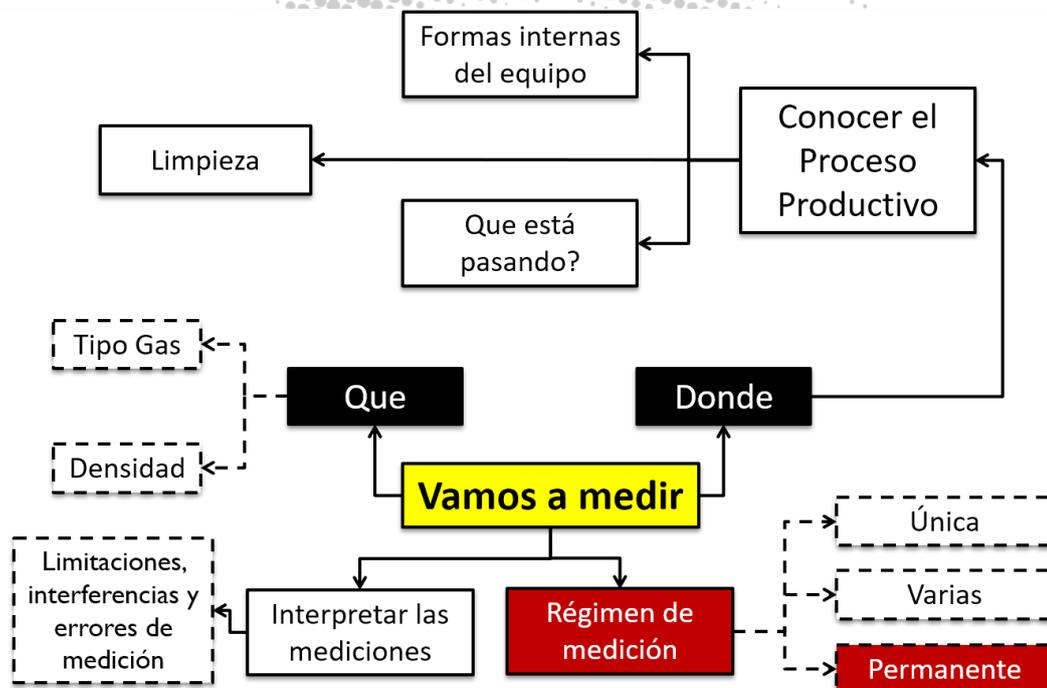
p = presión absoluta en mega pascales (MPa)

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

### 13) 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.

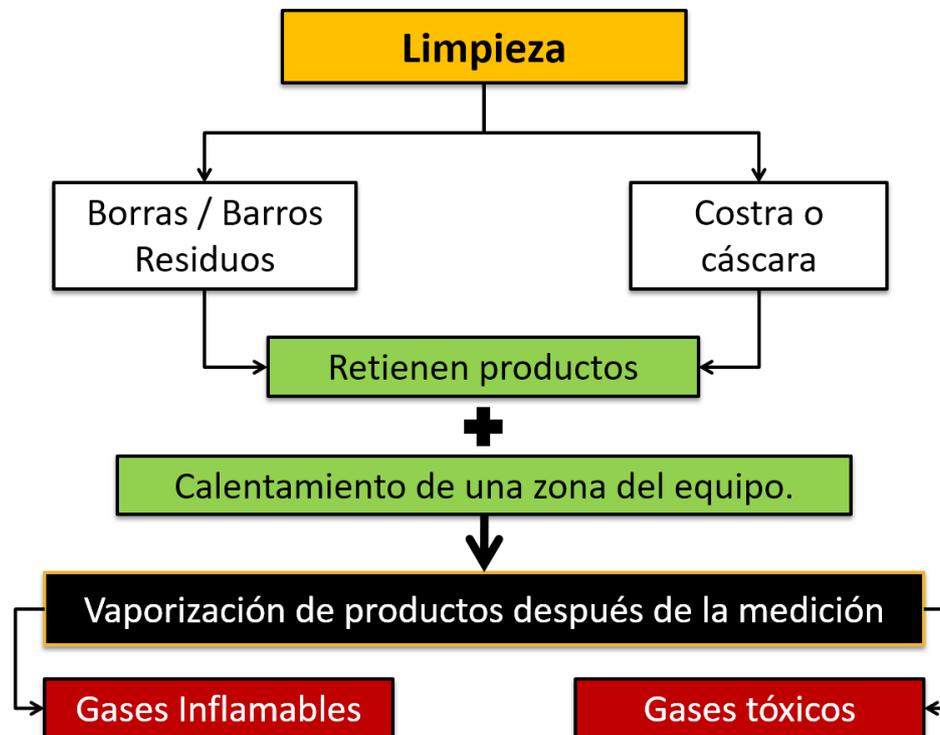
- Un detector de fugas no mide explosividad, solo "huele" la presencia de determinados productos químicos, por lo general los equipos de detección de fugas también miden las ppm en el ambiente.
- El detector de fugas NO sirve como explosímetro.
- El explosímetro NO sirve para medir ppm.
- El explosímetro no mide el porcentaje 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.



- Hay que saber que vamos a medir, donde y que está pasando en el equipo o zona donde vamos 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.



- 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 debe 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 durante el tiempo.
- Siempre verificar el equipo o instalación donde se va a trabajar para asegurar que este valor 0%, 10% o 20% 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 medimos un gas con un detector calibrado para otro gas, podemos cometer errores, y considerar un ambiente no combustible cuando en realidad superamos el LII.

#### 14) 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 midiéramos otro gas diferente al de la calibración del equipo, podemos 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%

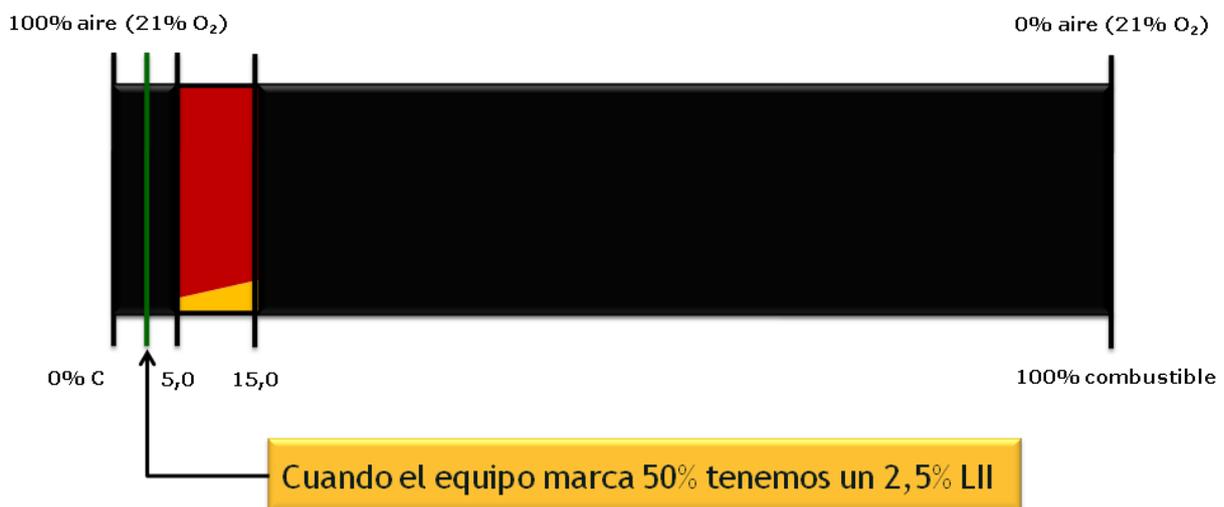


Fig. 15: Medición con Calibración para Metano

#### **¿Qué pasa ahora si medimos Propano con el detector calibrado para Metano?**

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

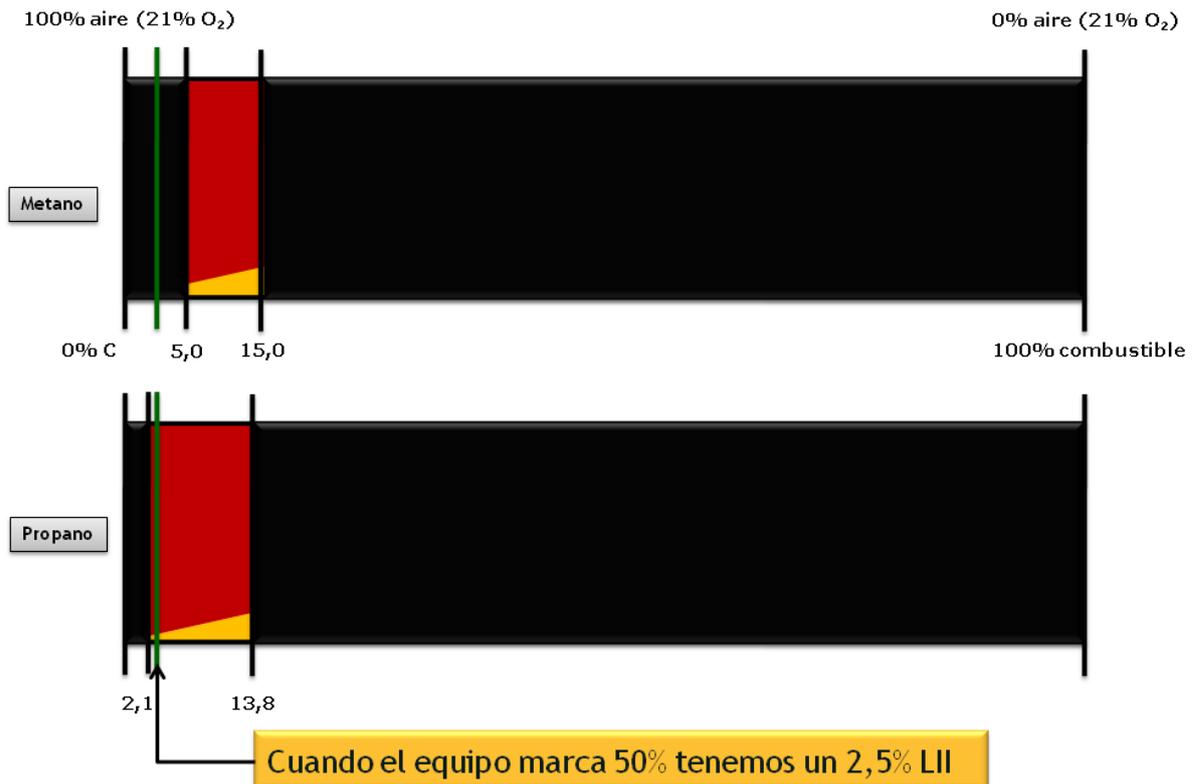


Fig. 16: Medición de Propano con Calibración para Metano

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

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.

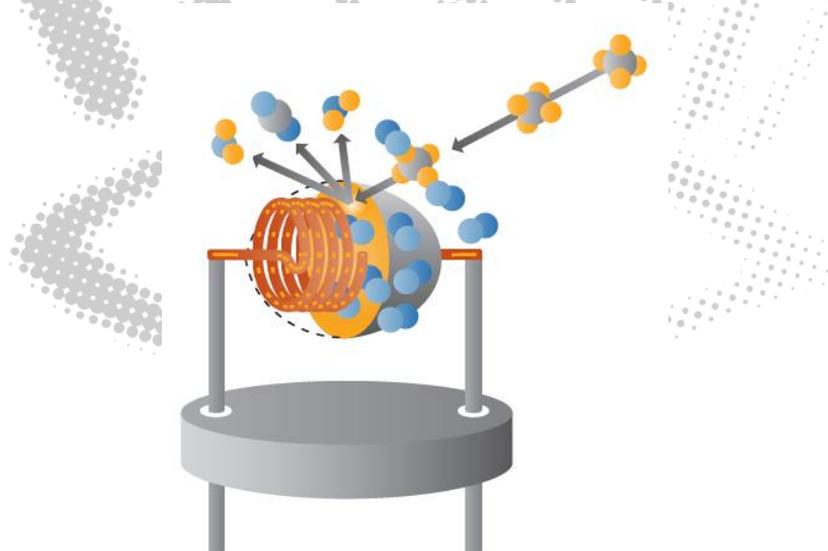
## 15) EL SENSOR CATALITICO<sup>2</sup>

### 15.1) Principio de Medición Sensor Catalítico de Perla

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 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 una de 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.



Por medio del oxígeno del aire que es absorbido por el material poroso y activado por el catalizador, el metano gaseoso es oxidado en el pellistor caliente. Además, de vapor de agua y dióxido de carbono se puede medir el calor de la reacción:



<sup>2</sup> Introducción a los Sistemas de Detección de Gases. Dräger Safety AG & Co. KGaA. 90 46 703.

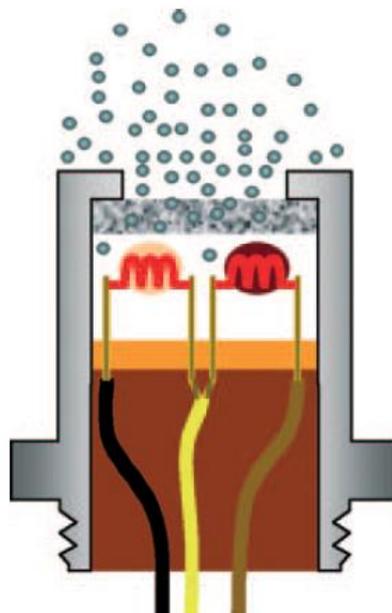
Para eliminar influencias por cambios de la temperatura ambiente, se utiliza un segundo pellistor, que es muy similar pero que no reacciona al gas, porque el pellistor no contiene el material catalizador o está inhibido de cualquier otra manera. Integrando los dos pellistores en un circuito de puente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

### **15.2) Sensores de Perlas Catalíticas**

Un pellistor solo, no es adecuado para la detección de gases y vapores inflamables. Hace falta un segundo para compensar los parámetros ambientales (especialmente temperatura y humedad). Y debe estar protegido contra explosiones.

Mediante una carcasa antideflagrante y un disco sinterizado resulta un sensor de perlas catalíticas útil.

El pellistor compensador está fabricado de manera muy similar al pellistor activo, pero no contiene material catalizador para que no pueda oxidar. Si la temperatura ambiente cambia, la resistencia de ambos pellistores cambiarán y no hay señal puente. Sin embargo, si hay presencia de gas, solo la resistencia del pellistor activo cambia y el puente Wheatstone se desequilibra. Ya que los pellistores del sensor de perla catalítica son calentados hasta unos 450 °C, puede funcionar como una fuente de ignición si el LEL es sobrepasado y la temperatura de ignición del gas es inferior a 450 °C. Mediante un disco sinterizado se evita lo siguiente: *Si en el interior del sensor de perla catalítica se produce una ignición, la carcasa del sensor resistirá la presión de la explosión y la llama es enfriada por debajo de la temperatura de ignición del gas, y ninguna llama pasa al exterior.*



El pellistor activo y el compensador son colocados en una carcasa encapsulada a prueba de llamas. El gas penetra a través del disco sinterizado al interior del sensor donde es oxidado por el pellistor activo.

Estas son las características de la llamada encapsulación antideflagrante. Los sensores de perla catalítica funcionan con un circuito electrónico llamado puente Wheatstone, que es adecuado para convertir cambios de resistencia muy pequeños en voltajes medibles.

Si la segunda mitad del puente Wheatstone es colocado en la unidad de control, el sensor de perla catalítica puede ser conectado a las unidades de control mediante cables muy largos. Sin embargo, son cortos cuando el sensor es instalado en un transmisor.

## **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. Segunda Edición (2013). Editorial Red Proteger. Botta, Néstor Adolfo. ISBN 978-987-27889-6-4.
4. Introducción a los Sistemas de Detección de Gases. Dräger Safety AG & Co. KGaA. 90 46 703.

