

## *Estudio de la combustión en motores diesel*

### **1. EL PROCESO DE COMBUSTIÓN**

La *Combustión* es una reacción termoquímica muy rápida entre el oxígeno del aire y el combustible, para formar teóricamente CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, más el consiguiente desprendimiento de calor (Reacción exotérmica). Cuando la reacción emite luz en el visible, se la denomina *Llama*.

Para que se produzca la reacción de una manera efectiva el combustible debe de pasar a estado gaseoso para mezclarse con el oxígeno. De esta manera, la reacción se generará de una forma más eficaz. Debido a que el proceso no es 100% eficaz, parte de los reactivos no se transforman en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, sino que se formarán sustancias contaminantes que se emiten al exterior en forma de emisiones. Como consecuencia, parte de la energía química de los reactivos no se transformará en calor.

El periodo de combustión es muy corto, en torno a decenas de milisegundo, ya que se necesita que la reacción sea rápida y completa. El periodo de combustión normalmente está entre 40-50° de giro de cigüeñal (en torno a 20° APMS y 20-30° DPMS).

Si por ejemplo, un motor funciona a 1500 rpm el tiempo disponible para la combustión será de :

$$50^{\circ} (1 \text{ min}/1500 \text{ rpm}) * (1 \text{ rpm}/360^{\circ}) * (60 \text{ seg}/1 \text{ min}) = 5.6 \text{ ms}$$

Par que se produzca una buena combustión se deben de cumplir varias premisas:

1. Transformar el combustible líquido a estado gaseoso. Cuanto mayor sea el peso molecular del compuesto hidrocarburo menos volátil será, y más complejo será el proceso de combustión.
2. Hacer que el aire y el combustible se mezclen y alimenten la zona de ignición y combustión. En la primera zona el aire y combustible están íntimamente mezclados en forma de gas, mientras que en la segunda zona es más

heterogéneo ya que el combustible no está totalmente en forma de gas ni mezclado homogéneamente con el aire.

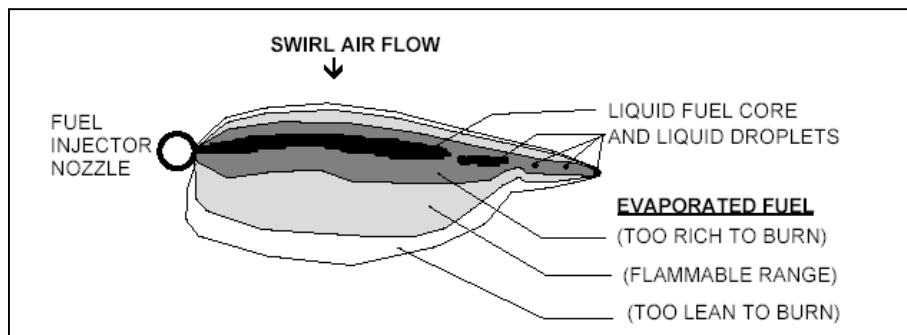
La ignición del combustible se produce cuando las gotas de este finamente formadas están a una temperatura suficiente dentro de la cámara de combustión. Sin embargo, si no se dan las condiciones adecuadas (moléculas muy grandes, poca cantidad de oxígeno y/o temperatura insuficiente) el combustible se quemará parcialmente, es decir, se oxidará formando partículas de carbonilla y otros tipos de partículas contaminantes.

## **2. FORMACIÓN DEL SPRAY.**

Cuando se inyecta combustible en la cámara de combustión de un motor diesel se forman zonas ricas y otras pobres en él. Tanto las zonas ricas como las pobres están involucradas en el proceso de combustión. En las zonas ricas en combustible se suelen generar mayor cantidad de CO, HC inquemados y carbonilla, mientras que en las zonas pobres se producen mayor cantidad de NOx. Sin embargo, en las zonas pobres en combustible, se suelen ir quemando el CO, HC y carbonilla formados en la zona rica antes de que se eliminen por la válvula de escape. La carbonilla no se elimina tan fácilmente debido a que es un sólido y no se oxida lo suficientemente rápido como para desaparecer antes de que abandone la cámara de reacción.

En la figura 1 se observa que el chorro de combustible se atomiza en finas gotas de combustible. Cuando el aire se encuentre aproximadamente en 1000° K, el combustible se evapora de manera muy fácil. La entrada del aire en la cámara de combustión hace que se forme un torbellino, evaporando más fácilmente el combustible al arrastrar parte de él del spray y mezclándose con él, creando zonas ricas y pobres en combustible. La inflamación suele producirse muy cerca del punto estequiométrico, quemándose toda la mezcla disponible instantáneamente. La mezcla que no se puede quemar por su pobreza tiende a oxidarse en parte pero no se quema.

Figura 1. Zonas del spray formado de combustible en la cámara de combustión.



La mezcla formada alrededor del spray de diesel produce dos zonas: la inflamable y la combustible. Cada una de ellas es importante desde el punto de vista de formación de contaminantes.

### **3. ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN.**

Las Características de combustión de un combustible pueden ser estudiadas por medio del análisis de desprendimiento de calor (Heat Release Analysis) y mediante la observación de la presión en el cilindro durante el proceso de combustión.

Realizando este tipo de análisis se consigue obtener bastante información sobre el proceso de combustión y la posible existencia de algún tipo de problemas o anomalías.

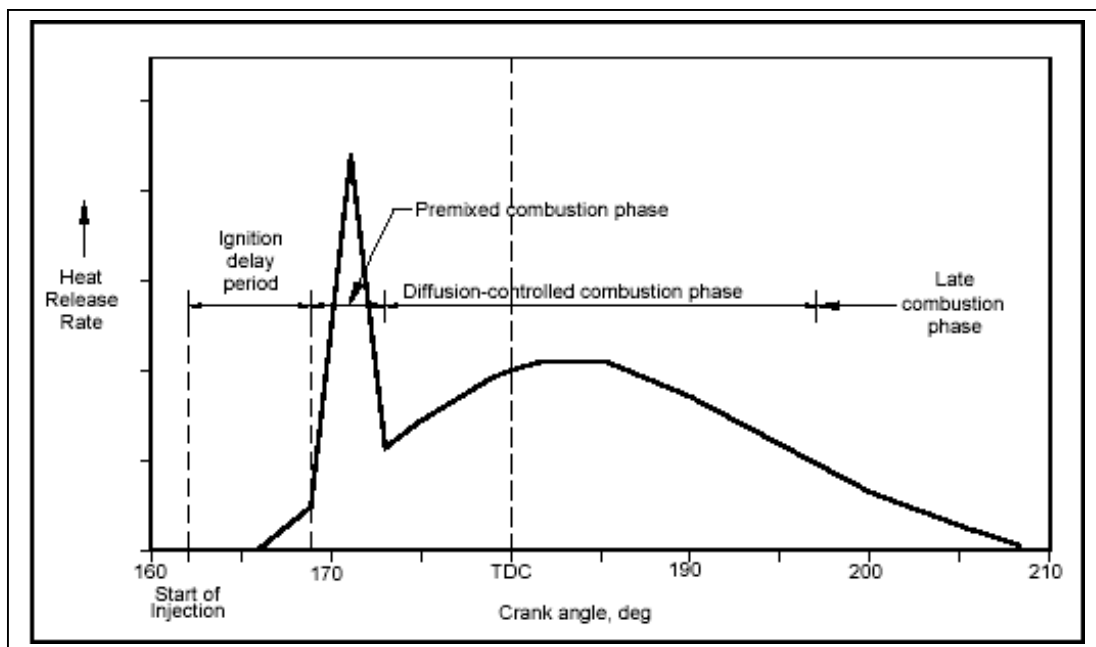
El análisis se basa en la medida de presiones y temperaturas. Para ello se deben de hacer una serie de estimaciones:

1. Se considera la composición química de los gases inquemados igual a la de los quemados.
2. No existen fugas ni transferencias de calor hacia las paredes.
3. Se considera como una reacción entre gases ideales.

Los motores diesel inyectan combustible líquido en una atmósfera de aire caliente comprimido lo que provoca la ignición. La etapa de difusión de la llama se produce cuando la combustión comienza con el aire y el combustible pobremente

mezclados. La velocidad de combustión se determina por la velocidad de inyección de combustible y por la velocidad de mezclado en el cilindro. Los fenómenos más importantes en la combustión son el retraso de la combustión, la combustión por inflamación de la premezcla, la combustión de la mezcla controlada y la combustión de carbonilla y la combustión tardía (Figura 2)

Figura 2. Perfil de desprendimiento de calor del diesel durante la combustión.



La reacción química de combustión es muy sensible a la temperatura. Esta dependencia se puede observar mediante la ecuación de Arrhenius:

$$R = A \cdot e^{(-E_a/RT)}$$

donde  $R$  es la velocidad de la reacción,  
 $E_a$  es la energía de activación,  
 $A$  es el factor pre-exponencial,

Se puede ver que la velocidad de reacción es proporcional al exponencial de la temperatura. De esta manera un pequeño aumento en la temperatura produce un gran efecto en la velocidad de la reacción. Esto es muy importante a la hora de conocer el proceso de la combustión. Cuando el pistón se acerca al PMS el aire se va comprimiendo hasta que se produce el primer golpe de combustión. Este

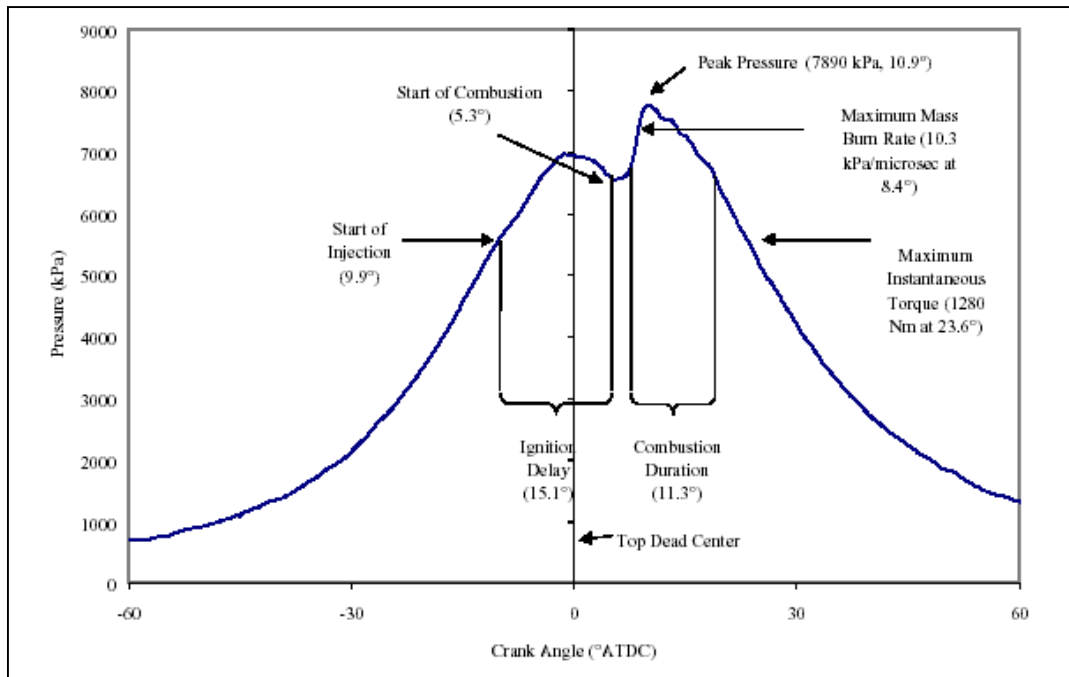
calienta al resto de la mezcla inquemada. El resultado es una combustión muy rápida, casi instantánea, de toda la mezcla que había sido premezclada durante la etapa de retraso a la ignición. La combustión comienza tras un retraso inicial y luego comienza con una cuña de quemado muy rápida donde todo el combustible que había sido vaporizado y premezclado con el aire caliente se quema. Esta inflamación del combustible tiende a producir una luz naranja muy brillante cuando se calienta el exceso de combustible de la zona rica en combustible para formar partículas de carbonilla incandescentes. La radiación del cuerpo sólido de las partículas de carbonilla proporciona una transferencia de calor muy grande, lo que posibilita el calentamiento del resto de gotas de combustible, acelerando la evaporación y mezcla del mismo.

### ***3.1. Retraso de la ignición e Inflamación de la premezcla.***

Este es uno de los parámetros más importantes que hay que tener en cuenta durante el proceso de la combustión del diesel. Se define como el tiempo que transcurre desde que se comienza la inyección de combustible hasta el momento en el que comienza su combustión. El ángulo de cigüeñal en el cual esto ocurre se define como el comienzo medible del desprendimiento de calor. Se puede considerar como el punto en el cual la curva de la presión se desvía de la teórica hasta la fracción de masa del 10%. El comienzo de la inyección de combustible se determina mediante la medida de presión en la cámara de combustión (Figura 3). La apertura de la válvula de aguja del inyector normalmente produce un cambio en la pendiente de la línea de presión. Este punto se considera como el comienzo de la inyección (SOI).

Mediante el análisis del instante en el cual se produce el comienzo de la inyección y la presión máxima obtenida se puede obtener información sobre la calidad del combustible.

Figura 3. Curva de presión de la combustión.



El combustible líquido se inyecta en forma de finas gotas al final del periodo de compresión del cilindro. El aire comprimido en este punto está bastante por encima de la temperatura de ignición del combustible, por lo que la ignición se produce de una manera muy rápida. Sin embargo, existe un lapso de tiempo suficiente como para que parte del combustible se evapore. Este, se mezcla inmediatamente con el aire y se forman reacciones de pre-inflamación por rotura de moléculas de combustible en presencia de aire para formar radicales los cuales son capaces de propagar la cadena de reacción de combustión exotérmica. Normalmente, la formación de la mezcla y las reacciones de pre-inflamación se producen en diversos puntos alrededor del chorro de combustible o de los inyectores.

El control del retraso de la ignición es muy importante en la combustión de un motor diesel. Se desea que esta etapa sea muy corta, ya que si es larga puede producirse el “golpeteo” al producirse una combustión espontánea. Este “golpeteo” causa una gran pérdida de energía calorífica, eficacia del motor y puede llegar incluso a provocar averías, por lo que se debe evitar. Este típico “golpeteo” en un motor diesel se acentúa cuando el motor está frío o con bajas cargas. Para controlarlo es importante poseer un combustible que se autoinflame

fácil y fiablemente. La medida de la calidad de la ignición por compresión es el llamado *Número de Cetano*. Cuanto mayor sea este menor tendencia tendrá al “golpeteo”

### 3.2. Combustión controlada de la mezcla (Figura 2).

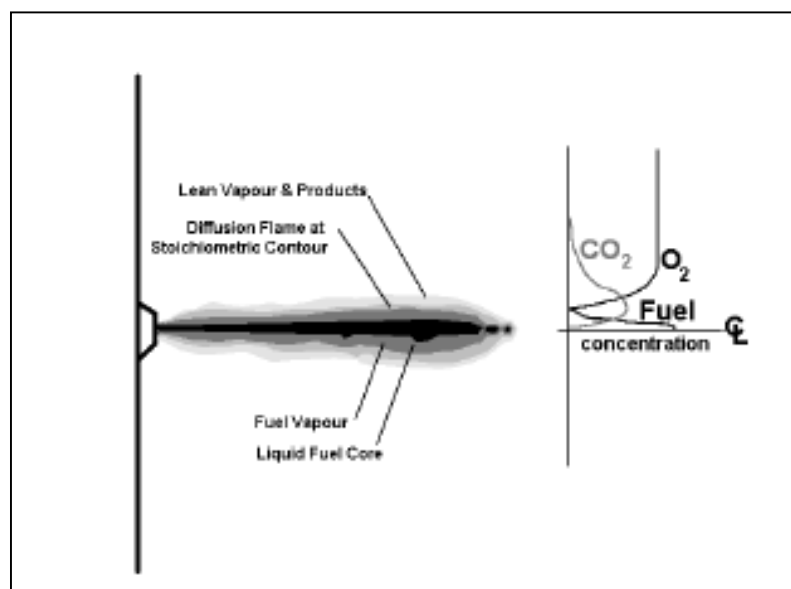
La duración de la combustión se define como el tiempo que transcurre entre el 10 y 90% de fracción de masa quemada en grados de ángulo de cigüeñal. También es útil determinar los puntos al 10, 50 y 90%.

La fracción de masa quemada al 50% se calcula como el punto en el cual el 50% de la fracción de masa se ha quemado.

También se pueden obtener otros tres parámetros: la mezcla quemada (mixing burn), definida como el tiempo en grados de ángulo de cigüeñal para la fracción de masa quemada que va desde el 50-99%. El máximo calor añadido se define como el valor incremental de calor más alto calculado que ocurre en el ciclo. Por último la localización del pico máximo de calor desprendido (MaxQ).

Una vez que la combustión ha comenzado, el diesel actúa como una llama de difusión, inyectado en forma de chorro, mezclándose y reaccionando con el aire (Figura 4).

Figura 4. Zonas del spray de combustible.



Esta llama esta cerca del punto de relación estequiométrica. Debido a que siempre existe una zona rica en combustible y otra pobre, el motor diesel tiende a producir contaminantes que provienen tanto de las zonas ricas como de las pobres.

Para reforzar la mezcla, los motores diesel necesitan que las velocidades del torbellino de aire sea muy alta. Durante el periodo controlado de combustión de mezcla, el combustible se quema según se va inyectando a una velocidad constante. En las zonas ricas en combustible se forma una gran cantidad de carbonilla. Las moléculas de combustible se van craqueando por el calor y los compuestos ligeros como el hidrógeno se difunden preferentemente hacia el exterior de la zona de reacción, dejando unos residuos con alto contenido en carbono dentro. Estos residuos se aglomeran para formar partículas de carbonilla y cadenas de partículas de carbonilla. Normalmente, en un motor diesel, una gran parte del combustible forma carbonilla durante esta etapa de la combustión.

### **3.3. Formación de carbonilla y final de la combustión.**

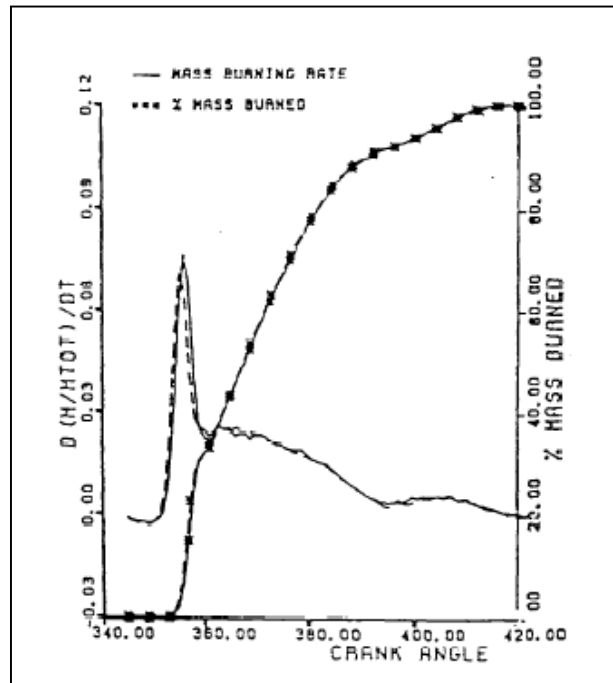
Como se ha comentado, se forma una gran cantidad de carbonilla en la zona del spray rica en combustible. Esto ocurre incluso en mezclas con exceso de aire. Después de que se han formado estas partículas, durante el periodo de inyección/evaporación del combustible, la mayor parte de ellas se queman con el final de la inyección. Sin embargo, esta reacción es entre un sólido y un gas, la cual es mucho mas lenta que un reacción típica gas-gas. Además, al final de la inyección la temperatura de la mezcla disminuye porque el motor está en la etapa de expansión, por lo que la carbonilla tiende a enfriarse y depositarse en el conjunto pistón-cilindro o eliminarse por el escape. Cuando el motor funciona con defecto de aire se forman mucha más carbonilla y emisiones de humo en el motor.

La *Fracción de Masa Quemada* es un parámetro que ayuda a comprender el proceso de la combustión. Se obtiene dividiendo la cantidad de masa quemada en cada punto entre el total de combustible (Figura 5). De esta manera el área normalizada bajo la curva de combustible quemado es siempre igual a uno. Esto



permite comparaciones hechas del combustible quemado a diferentes tiempos durante el proceso de combustión.

Figura 5. Curva de la fracción de masa quemada.



El punto de transición entre la zona de combustión de la premezcla y la de combustión controlada es aquella en la cual se observa un cambio en la pendiente del diagrama de desprendimiento de calor acumulativo "Cumulative Heat Release". Corresponde al punto mínimo de la curva de velocidad de quemado instantánea "Instantaneous Burning Rate Curve" entre los dos tipos de combustión.

Cuando se retrasa el tiempo de inyección, se observa una disminución en la cantidad de masa quemada en la primera etapa, mientras que aumenta la segunda. Sin embargo el comienzo de la combustión es semejante, a pesar de la diferencia en los tiempo de retraso a la ignición. La disminución en el retraso de la ignición está compensado por el tiempo de retraso y la combustión comienza en el mismo punto del ciclo.

Cada vez que se empieza antes la inyección de combustible la presión máxima alcanzada en la cámara de combustión aumenta.

#### **4. PARTICULARIDADES DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.**

Fundamentalmente se quieren estudiar el Biodiesel.

Lo primero que se debe tener en cuenta es como afectan las propiedades físicas del combustible a la forma de la atomización, penetración, evaporación y mezcla con el aire para quemarse.

Los requisitos que debe tener el combustible son:

- Retraso de la ignición pequeño (ms) para evitar el golpeteo diesel, ya que se forman grandes cantidades de mezcla antes de la ignición.
- Cuanto mayor número de cetano posean mejor ya que los retrasos a la ignición son menores. Cuanto mayor y más lineal sea la molécula poseerá un número de cetano mayor.
- Cuanto mayor sea el número de cetano menos tiempo (en grados de cigüeñal) tarda en alcanzar la presión máxima de combustión. Cuanto menor avance de cigüeñal se utilice el tiempo (en grados de cigüeñal) que tarda en alcanzar la presión máxima de pico disminuye.
- Cuanto más fácil sea de crear las turbulencias con el combustible mejor mezcla entre combustible y aire se dará.

##### **4.1. Similitudes.**

Se han visto una serie de similitudes con el diesel, que le hace apto para ser usado en este tipo de motores de combustión interna:

- El biodiesel posee un número de cetano similar o superior al diesel.
- El mecanismo de combustión de los ésteres parece ser similar al del diesel. Las moléculas se descomponen a altas temperaturas generando radicales libres que promueven la autoignición.
- Las velocidades de combustión son similares. El diesel tiene un ligero mayor retraso a la ignición y también una velocidad de combustión máxima durante la etapa de combustión de “premezcla”.
- Una vez que la etapa de precombustión se ha terminado la siguiente etapa es muy similar entre ambos combustibles.

## **5.2. Diferencias.**

También existen una serie de diferencias que hace que se obtengan unos rendimientos y partículas contaminantes diferentes.

- La mayor viscosidad y menor volatilidad del biodiesel frente al diesel hace que las condiciones de formación del spray y atomización varíen. Esto afecta fundamentalmente a las emisiones.
- El pico de presión máximo se desplaza más hacia la derecha.
- En las mezclas biodiesel/diesel se observa que a medida que se aumenta el porcentaje de biodiesel el retraso de la ignición disminuye (al tener un NC mayor) hasta un porcentaje donde aumenta (debido a las características de densidad, viscosidad, de formación del spray...). Los tiempos que tardan desde la inyección hasta que se observa la presión máxima son mayores que en el diesel, aún teniendo un número de cetano superior.
- El tiempo de retraso a la ignición es inferior para el biodiesel con unas características de presión similares al diesel.
- Al formar mayor cantidad de depósitos en la punta del inyector que el diesel la forma de crear el spray y la combustión varían por lo cual los perfiles de combustión también difieren.

## **5. EMISIONES.**

Las emisiones de partículas contaminantes dependen en gran medida de la forma de quemarse que tiene el combustible.

Fundamentalmente influyen en la formación de hidrocarburos inquemados, CO y NOx.

Los hidrocarburos inquemados y CO dan idea de la temperatura/presión que ha generado dentro de la cámara de combustión. Cuanta menor temperatura y presión se haya obtenido en la cámara de combustión, mayor cantidad de estos contaminante se generará porque no se queman totalmente.

Por el contrario, un pico de presión muy grande proporciona una mayor emisión de NOx, ya que la temperatura y presión favorecen su formación en las zonas

pobres en combustible fundamentalmente. Esto es debido a que el exceso de oxígeno reacciona con el nitrógeno del aire.

Si la duración de la combustión ha sido grande la presencia de hidrocarburos inquemados y CO será menor.

## **6. CONCLUSIONES.**

A la vista de esta revisión bibliográfica es interesante estudiar conjuntamente el análisis físico-químico del combustible, así como la medida de las presión en cámara y emisiones para poder determinar si el combustible es apto para su uso en motores diesel o se necesitan ciertas modificaciones.

La información obtenida dará una idea de cómo reacciona el combustible con el aire en la cámara de combustión y la forma de crearse el spray.