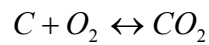


9.- Combustión

Consideramos la reacción que ocurre cuando se combina el carbono con el oxígeno para formar dióxido de carbono:



Implica que: 1 molécula C + 1 molécula O₂ → 1 molécula CO₂

Teniendo en cuenta sus masas tenemos: 12 kg C + 32 kg O₂ → 44 kg CO₂ (A)

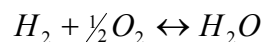
Estas masas que aparecen en la ecuación son moléculas-gramo o moles.

→ 1 mol C + 1 mol O₂ → 1 mol CO₂ (B)

Un mol de cualquier gas perfecto, bajo condiciones de presión y temperatura constantes ocupa un volumen definido. Esto es aproximadamente cierto para los gases reales a bajas presiones. Por lo tanto la ecuación (B) puede escribirse:

→ 1 volumen C gaseoso + 1 volumen O₂ → 1 volumen CO₂ p,T =ctes (C)

Razonando de la misma forma, se puede poner la ecuación de combustión del hidrógeno:



→ 1 mol H₂ + ½ mol O₂ → 1 mol H₂O

→ 1 volumen H₂ + ½ volumen O₂ → 1 volumen H₂O p,T =ctes

Estas ecuaciones muestran que la masa de la mezcla deberá ser igual a la masa de los productos aún cuando los moles (y los volúmenes) de la mezcla y de los productos no sean necesariamente iguales.

9.1.- Propiedades del aire

El aire seco es una mezcla de gases que tiene un análisis volumétrico representativo expresado en porcentajes y es:

- 20.99% oxígeno
- 78.03% nitrógeno
- 0.94% argón, neón, helio, criptón
- 0.03% dióxido de carbono
- 0.01% hidrógeno

Para la mayoría de los cálculos, es suficientemente aproximado considerar el aire seco compuesto por 21% de oxígeno y 79% de gases inertes tomados como nitrógeno.

El polvo y la humedad del aire en la atmósfera varía entre límites muy amplios, dependiendo de condiciones meteorológicas. La máxima cantidad de vapor de agua a

21°C (70°F) en el aire y a presión normal es de 2.46% en volumen (punto de saturación). En muchos casos, a bajas temperaturas, el contenido de vapor de agua en el aire es despreciable a efectos de los cálculos. Frecuentemente su presencia implica una cantidad de material adicional inerte.

Dado el análisis volumétrico del aire seco, se puede calcular el peso molecular del aire:
 $M_{aire} = 28.967 \cong 29$

El peso molecular del nitrógeno aparente se determina dividiendo el peso total de los gases inertes (2186.1 + 37.6 + 1.3) entre el número total de moles de esos componentes (78.03 + 0.94 + 0.03 + 0.01). De modo que: $M_{N_{aparente}} = \frac{2225}{79.01} = 28.161$

En lo sucesivo el término nitrógeno se referirá al grupo completo de gases inertes de la atmósfera, por lo cual tomaremos como valor correcto de su peso molecular 28.161 (en vez de 28.016 para el nitrógeno puro).

En el proceso de combustión el oxígeno es el componente activo, considerándose el nitrógeno aparente como inerte. De lo que resulta que por cada mol de oxígeno suministrado, 3.764 moles de nitrógeno aparente lo acompañan o diluyen:

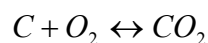
$$\frac{79.01}{20.99} = 3.764 \frac{\text{moles } N_2 \text{ aparente}}{\text{mol } O_2}$$

9.2.- Elementos combustibles en los comburentes

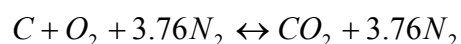
Los elementos combustibles en los comburentes son: carbono, hidrógeno y pequeñas cantidades de azufre. Los combustibles líquidos son mezclas de hidrocarburos complejos, a pesar de lo cual para cálculos de combustión, tanto la gasolina como el aceite se supone satisfacen la fórmula molecular C_8H_{18} .

9.3.- Combustión con aire

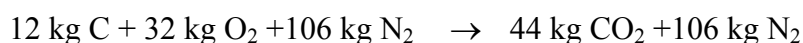
En muchos casos, el proceso de combustión se realiza con aire atmosférico y no con oxígeno puro. El nitrógeno y otros gases en el aire simplemente diluyen la concentración de oxígeno, apareciendo en los productos de combustión. Por ejemplo, la combustión del carbono es:



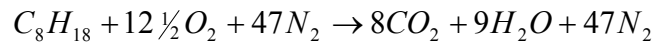
Cuando el oxígeno es suministrado por aire seco, 3.76 moles de nitrógeno aparente acompañan a cada mol de oxígeno:



Multiplicando cada término por el peso molecular apropiado:



Si se plantea la combustión completa del C_8H_{18} , esto es:



En este caso se ha empleado la cantidad de aire correcta para la conversión del combustible en productos completamente oxidados (cantidad estequiométrica). Las cantidades relativas de aire y combustible que reaccionan, su cociente, se le llama relación aire-combustible o su inversa la relación combustible-aire.

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{\text{MasaAire}}{\text{MasaCombustible}} = \frac{(12 \frac{1}{2} + 47) \cdot 28.97}{8 \times 12 + 18 \times 1.008} = 15.1 \frac{\text{kgAire}}{\text{kgCombustible}}$$

$$F_q = \frac{\text{MasaCombustible}}{\text{MasaAire}} = \frac{1}{15.1} = 0.0662 \frac{\text{kgCombustible}}{\text{kgAire}}$$

9.4.- Calor de combustión

El calor de combustión de un combustible es igual al calor liberado cuando se quema completamente y los productos de la combustión son enfriados hasta la temperatura inicial. Existen 2 casos: calor de combustión a volumen constante y calor de combustión a presión constante.

(Ver Obert, páginas 124 y 125, capítulo 4)

Si se aplica el balance de energía para estos 2 procesos se tiene:

$$\text{Para } V=\text{cte: } Q - W = \Delta U \quad , \quad W = 0 \quad \rightarrow \quad \boxed{Q_{V,T} = U_{\text{PRODUCTOS}} - U_{\text{MEZCLA}}}$$

$$\text{Para } p=\text{cte: } Q - W = \Delta H \quad , \quad W = 0 \quad \rightarrow \quad \boxed{Q_{p,T} = H_{\text{PRODUCTOS}} - H_{\text{MEZCLA}}}$$

El calor de combustión a presión constante no es necesariamente igual al calor de combustión a volumen constante. Si restamos estas cantidades y para los gases perfectos:

$$Q_{p,T} - Q_{V,T} = \Delta H - \Delta U = \Delta pV = \Delta N p v = \Delta N R_0 T$$

En esta expresión puede despreciarse el número de moles de los componentes líquidos y sólidos, porque los productos pV para tales componentes son relativamente pequeños.

9.5.- Poderes caloríficos superiores e inferiores

Siempre que un combustible contiene hidrógeno, uno de los productos de la combustión será el agua, que podrá estar en estado líquido, gaseoso o mezcla de ambos. Si el agua formada en la combustión del hidrógeno del combustible se condensa, se obtendrá una mayor cantidad de calor que si el agua estuviera en estado de vapor. Debido a esto, se reconocen 2 poderes caloríficos:

- 1) Poder calorífico superior (bruto), que se obtiene cuando el agua formada en la combustión se condensa totalmente en la prueba.

- 2) Poder calorífico inferior (neto), que se obtiene cuando el agua al final del procedimiento existe en estado de vapor.

Para los cálculos en los motores de combustión interna se usa siempre el poder calorífico inferior Q_p^i .

9.6.- Temperatura teórica de llama

Sea una combustión a volumen constante, adiabática, de una mezcla combustible-aire:

$$Q - W = \Delta U \quad , \quad Q = 0 \text{ (adiabático)}, \quad W = 0 \quad \rightarrow \quad \Delta U = 0 \quad \rightarrow \quad U_{PRODUCTOS,T2} = U_{MEZCLA,T1}$$

Para la conversión completa de la mezcla en productos, el calor de combustión resulta ser:

$$Q_{V,T1} = U_{PRODUCTOS,T1} - U_{MEZCLA,T1} = U_{PRODUCTOS,T1} - U_{PRODUCTOS,T2} = -\Delta U_{PRODUCTOS} \Big|_{T1}^{T2}$$

Un razonamiento similar puede hacerse para un proceso de combustión a presión constante:

$$Q_{p,T1} = H_{PRODUCTOS,T1} - H_{MEZCLA,T1} = H_{PRODUCTOS,T1} - H_{PRODUCTOS,T2} = -\Delta H_{PRODUCTOS} \Big|_{T1}^{T2}$$

Dicho en palabras, el proceso de combustión puede suponerse equivalente a quemar completamente a la temperatura inicial T_1 , hasta obtener los productos de la combustión y con el calor así obtenido de la reacción, poder elevar la temperatura de dichos productos hasta T_2 .

9.7.- Combustión en el motor de encendido por chispa (ECH)

La combustión en el motor ECH, depende de que la llama formada en la bujía sea capaz de avanzar en la mezcla que aún no se ha quemado. A pesar de que no es conocido el mecanismo exacto de la propagación de la llama, ella misma es la evidencia de una reacción química entre el combustible y el oxígeno, reacción que libera energía con la consiguiente elevación de temperatura. Si se estima que la mezcla teóricamente correcta es químicamente más reactiva y no siendo nunca las mezclas reales enteramente homogéneas, una mezcla ligeramente rica en combustible estará mejor dotada para la reacción química. Sin embargo, la reacción química no es la clave de la propagación de la llama, porque la transferencia de calor, por ejemplo, desde un extremo de combustión hasta la mezcla no quemada (fría) podrá elevar la temperatura ayudando a la propagación de la reacción. O es posible que las partículas altamente activadas en el extremo de la llama (ej.: átomos de hidrógeno), puedan difundirse dentro del gas no quemado manteniendo así una velocidad de combustión. El exceso de combustible favorecerá la formación de tales átomos de hidrógeno. A partir de estas consideraciones, puede decirse que mezclas ricas son necesarias para rápidas propagaciones de llama.

Experimentalmente se puede ver que la velocidad de llama de una mezcla inactiva es muy lenta, 9m/s (30ft/s). Un motor con esa velocidad de llama, quedará restringido a velocidades de giro muy bajas. Por ejemplo, suponiendo que el período de combustión está limitado a 30° de giro del cigüeñal, siendo la cámara de combustión de 10.16 cm de altura (4”), para estas condiciones y una velocidad de llama de 9m/s aprox., ese motor quedará limitado a 600 rpm aproximadamente.

Afortunadamente para los motores de alta velocidad, puede multiplicarse la velocidad de llama notablemente valiéndose del aumento de la turbulencia de la mezcla. Este efecto aumenta la velocidad de la llama entreverando porciones encendidas de mezcla y las no encendidas en el frente de la misma.

La turbulencia se inicia a partir de la velocidad de la mezcla combustible-aire que entra al cilindro en la carrera de admisión a través de la válvula y en la que tienen que ver también el contorno de la tapa de cilindros y la forma de la cabeza del pistón. Debe considerarse que la turbulencia proveniente de estos factores aumenta en forma directa con la velocidad del motor. Como consecuencia de este aumento, el período de combustión en el motor ECH medido en grados de giro del cigüeñal tiende a ser constante.

La combustión en el motor comienza en la bujía cuando las moléculas alrededor de la chispa en el seno de ella, son energizadas hasta un nivel en el que la reacción se mantenga por sí misma. Durante este período, la elevación de temperatura es muy baja porque la cantidad de carga quemada es muy pequeña, (por lo cual la combustión de cada elemento infinitesimal ocurre a presión constante). En este momento, la velocidad de llama es anormalmente baja debido a que se establece una zona de reacción de cierta altura en la cámara donde la turbulencia de la mezcla es baja.

Es de hacer notar, que la posición en general de las bujías es cercana a la zona de menor turbulencia. Por esta razón, la chispa de la bujía debe ocurrir antes del final de la carrera de compresión si se quiere tener altas presiones próximas a la carrera de expansión.

Una vez que la reacción se ha iniciado, avanzará desde la bujía una llama de frente esférico. Los límites de la esfera aparecerán un tanto rasgados, debido a las corrientes convectivas altamente turbulentas de la mezcla. Además, cerca de las paredes de la cámara la mezcla será enfriada, retardándose por tanto la velocidad del frente de llama.

Nótese que el gas no quemado en esta etapa, más allá del frente de llama y el gas no quemado detrás de ella son comprimidos por la expansión de la mezcla quemada. En este caso, como anteriormente, la combustión de cualquier elemento pequeño de mezcla ocurre a presión esencialmente constante, aún cuando la presión en toda la cámara ha aumentado si se considera el proceso total.

En la figura 4.3 se muestra una velocidad media para esta etapa, llamándosele velocidad de la llama.

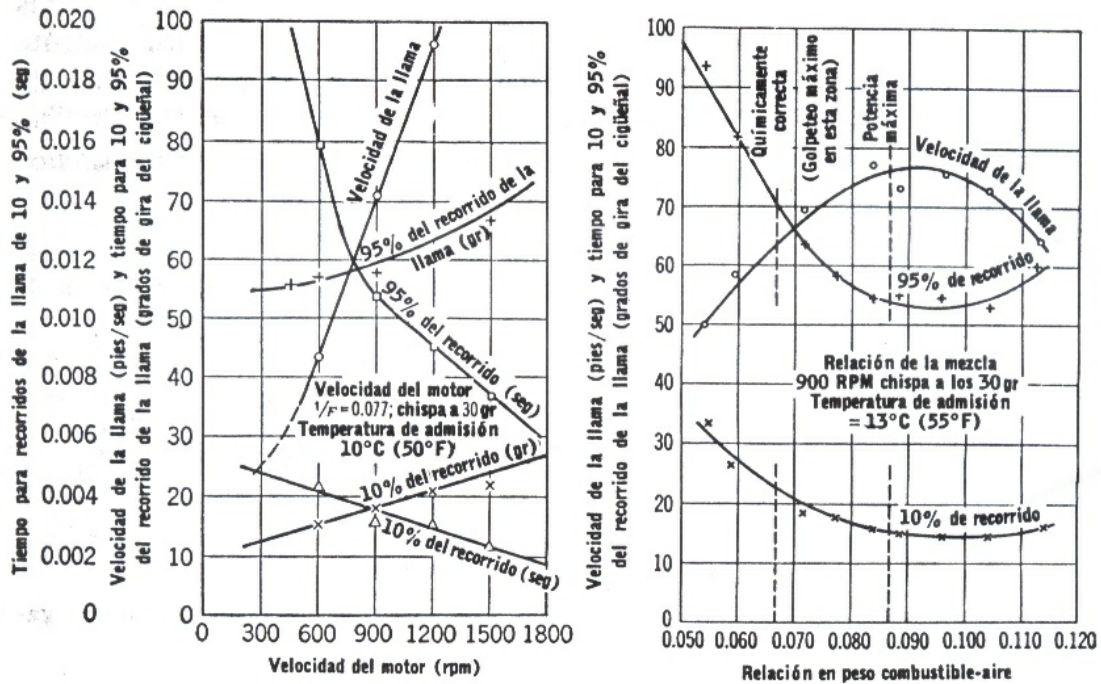


FIG. 4-3. Velocidad de la llama y tiempo de combustión en el motor ECH. Influenciados por la relación de la mezcla y la velocidad del motor. (De Bouchard, Taylor, and Taylor, Ref. 18)

Se tiene la parte final del proceso de combustión cuando la llama alcanza las paredes más lejanas de la cámara. El punto final exacto es difícil de definir por lo cual se muestra sólo el 95% de su desplazamiento.

9.8.- Autoencendido y reacción química

Una mezcla de combustible y oxígeno puede reaccionar espontáneamente sin necesitar una llama para iniciar la combustión. Cuando ocurre este fenómeno por sí mismo o autoencendido, aumentan abruptamente la presión y la temperatura por la súbita liberación de energía química. Consideremos los factores que controlan el autoencendido o reacción química espontánea:

Si la T es elevada, la energía molecular será elevada y por tanto las colisiones pueden ocasionar la formación de nuevas moléculas. Si la densidad es elevada, el número de colisiones es mayor y por tanto el n° de moléculas formadas será mayor. La rapidez de la reacción también es controlada por el n° relativo de moléculas reactivas así como también por la presencia de moléculas inertes (N del aire) que influyen en la colisión de las moléculas.

Es difícil separar los efectos de los distintos factores que intervienen en el autoencendido. Supongamos que una mezcla homogénea de combustible-aire deba ser comprimida rápidamente y mantenida a alta presión y temperatura conseguidas por la compresión. Para estas condiciones poco posibles de densidad, temperatura y relación aire-combustible, la mezcla no autoencenderá y se enfriará lentamente (ver figura 4.5 Obert, proceso ABC), sin embargo, el análisis de una muestra exhibirá algunos signos de oxidación.

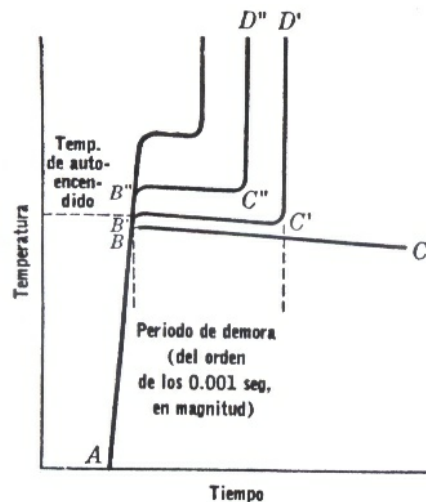


FIG. 4-5. Curvas de temperatura-tiempo para la mezcla comprimida de hidrocarburo-aire. (Tizard and Pye, "Ignition of Gases by Sudden Compression". *Philosophical Magazine*, julio, 1922)

Si se eleva la relación de compresión, se alcanzará finalmente un estado en donde ocurra el autoencendido (como en $AB'C'D'$, en la misma figura 4.5). Pero exactamente después de que se consigue este estado, se manifiesta una demora en el encendido (ID) o período de la inducción antes de que la reacción se haga explosiva. Evidentemente, las reacciones de quema anticipada ocurrirán en el período de inducción, preparando la mezcla para la reacción por sí misma. Aún cuando lo que ocurre exactamente es desconocido, se cree que en el período de inducción aparece algún producto intermedio de combustión que sirve para catalizar la reacción completa hasta las velocidades de detonación.

Cuando se comprime la mezcla hasta temperaturas más elevadas que las anteriores, se encuentra que se acorta la demora de encendido (ID) (proceso $AB''C''D''$), cosa razonable porque en el nuevo estado, la actividad molecular es mayor que antes.

Aparece entonces el autoencendido como dependiendo de cinco factores:

1. Temperatura
2. Densidad
3. Tiempo: Período de inducción
4. La composición:
 - a) relación combustible-oxígeno
 - b) presencia de gases inertes o cualquier sustancia que afecte la reacción química.
5. Si la mezcla no es homogénea, estará presente un factor de mezcla: Turbulencia.

Supongamos una mezcla de aire y combustible definida y homogénea (para eliminar los factores 4 y 5).

Igual que en la figura 4.6 Obert, aparecerá una figura ideal de la superficie crítica que separa las etapas de detonación y la de no detonancia. Por lo tanto si se mantiene la mezcla a cierta temperatura especificada, ocurrirá el autoencendido solamente si se satisfacen ciertos factores mínimos de densidad y período de inducción. Por supuesto que esta figura es completamente ideal. No obstante ayuda a visualizar los factores que controlan el autoencendido.

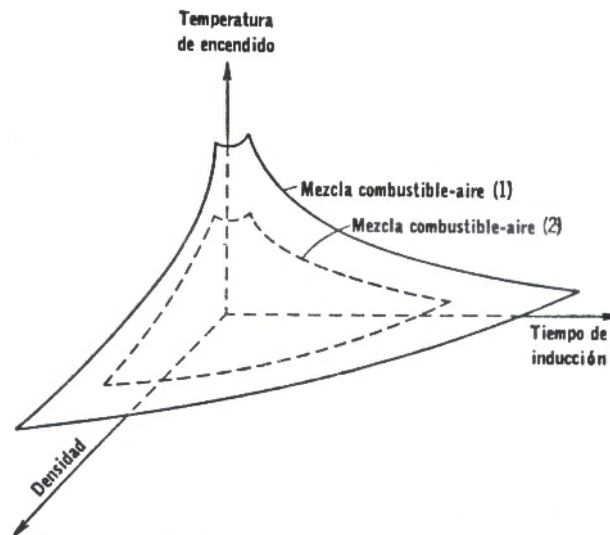


FIG. 4-6. Esquema para ilustrar las relaciones ideales de temperatura, densidad y tiempo para una mezcla definida de combustible-aire. Autoencendido arriba de la superficie; no autoencendido abajo de la superficie

Es usual hablar de la temperatura de encendido por sí misma (SIT) de la mezcla. Sin embargo, como se ve, este concepto es falso porque la reacción puede ocurrir a diferentes temperaturas. Nótese que el término demora de encendido (ID) tiene la misma falacia implícita ya que sólo tiene sentido si ocurre una reacción abrupta. A pesar de eso se usarán ambos términos en sentido cualitativo para describir procesos de combustión y ciertos aspectos de la misma.

9.9.- El fenómeno de combustión en el motor de encendido por chispa (ECH)

El proceso de combustión tratado en 9.7, raramente ocurre en un motor real sin vestigios de autoencendido. Luego, el gas al frente de la llama normal es comprimido por la dilatación de la mezcla quemada y como consecuencia aumenta su temperatura y densidad.

Se puede demostrar, suponiendo comportamiento similar a gases perfectos que:

$$T_{GASfinal} = T_0 \left(\frac{P_{final}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad p_0, T_0: \text{presión y temperatura al final de la compresión}$$

Si dicha temperatura excede la de autoencendido, y se mantuviera a ella o superior a ella, los gases no quemados durante la demora de encendido, aparecerá encendido espontáneo en varios puntos pequeñísimos que se convertirán en los originadores de él.

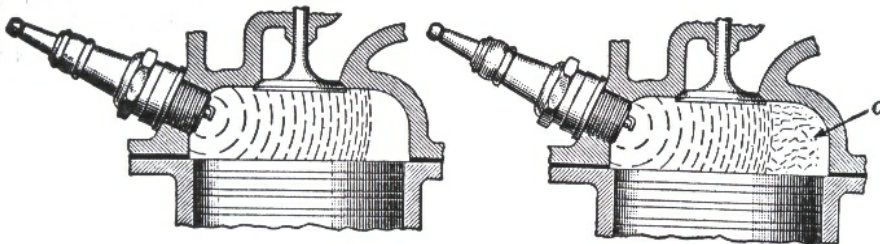


FIG. 4-7. Golpeteo en el motor ECH

El proceso de autoencendido puede seguir diferentes trayectorias:

- 1) En algunos casos, la llama se propaga, partiendo de cada punto particular de encendido con velocidades del mismo orden (o bien mucho mayores, centenares de m/s mayores), que la normal para su propagación. (ver figura 4.13 c). La combustión y expansión de cada elemento de la mezcla ocurre más o menos al unísono y por lo tanto la presión, aún cuando aumenta con rapidez, es esencialmente uniforme en toda la cámara. Sin embargo, la liberación de la energía es mucho más rápida que en la combustión normal, como consecuencia de la multiplicidad de los frentes de llama. Esta liberación rápida de la energía puede ocasionar vibraciones en la atmósfera del motor.
- 2) El autoencendido puede ocurrir en diferentes puntos con velocidad de detonación. En este caso, la dilatación de los elementos inflamados no va acorde con la liberación de energía rápida y aparecerá momentáneamente en la cámara una elevación localizada de presión; luego, superpuesta a la elevación total de la presión, habrá diferencias localizadas provenientes de las detonaciones casi instantáneas, de parte de la mezcla.

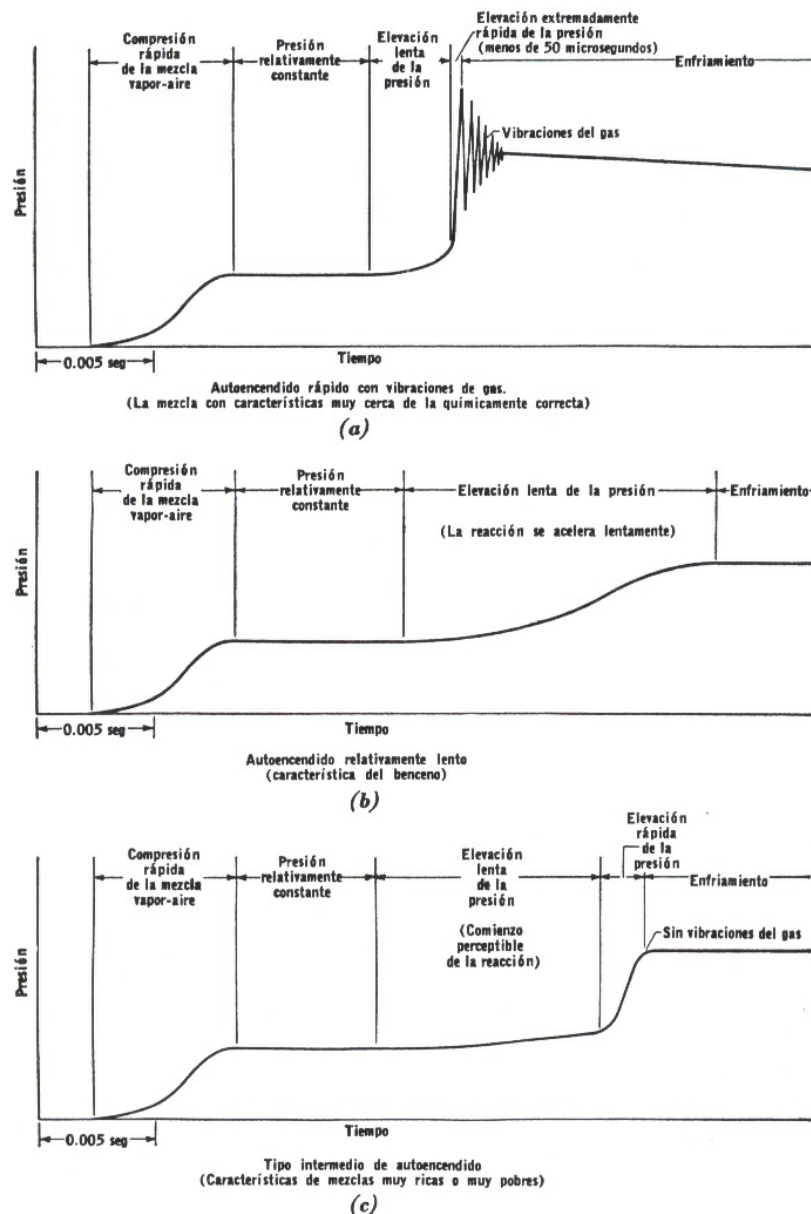


FIG. 4-13. Presión desarrollada contra tiempo con varios grados de severidad del autoencendido. (Trazado con objeto de enfatizar las tendencias mostradas por Taylor, Taylor, Livengood, Russell y Leary en la Ref. 19; no están completamente a escala)

La diferencia de las presiones localizadas, si es pequeña viajará a través de la cámara a la velocidad acústica, siendo reflejada al frente y atrás por las paredes de la cámara (en la misma forma que el eco dentro de un local). El gas en la cámara será comprimido y expandido alternativamente por la onda de presión, hasta que se restablece el equilibrio, como se ve en la figura 4.8 de Obert. La frecuencia de este fenómeno depende de la velocidad de la onda y de las dimensiones físicas de la cámara que ocasiona múltiples reflexiones. De donde se puede colegir que en las cámaras pequeñas se tendrán vibraciones de altas frecuencias y las bajas frecuencias estarán asociadas a cámaras grandes. En motores de tracción estas frecuencias están en el orden de 5000 Hz.

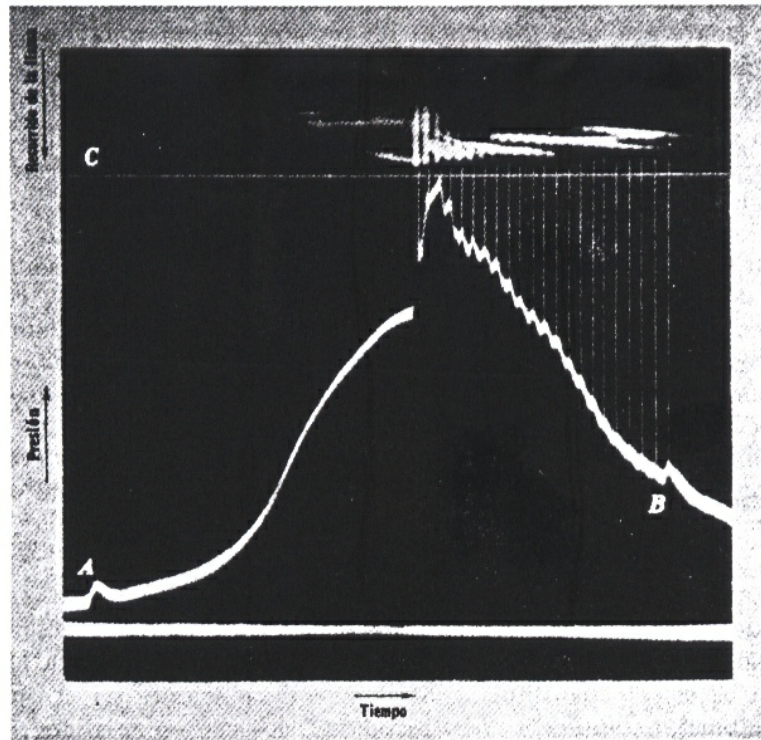


FIG. 4-8. Vibraciones del gas, provenientes del autoencendido en un motor ECH, tal y como se muestra en un diagrama presión-tiempo (trazo inferior) y mediante la fotografía de la llama (trazo superior). Aire teórico 80% ; avance de la chispa, 40 grados antes del PMS; estrangulación completa; A, encendido; B, 91 grados después de encendido; la fotografía proviene de una cinta de película pasando por una ventana de cuarzo en la cámara de combustión. (Cortesía de Lloyd Withrow and General Motors Corp.)

EN RESUMEN: Cuando ocurre el autoencendido se presentan 2 tipos diferentes de vibraciones. En un caso se autoenciende una gran cantidad de mezcla, ocasionando así un rápido aumento de la presión en toda la cámara de combustión, que repercutirá como un golpe directo sobre la estructura del motor. En otro caso, habrá una gran diferencia de presión en la cámara de combustión y la vibración resultante del gas, forzará a las paredes de la cámara a vibrar en su misma frecuencia. Todos estos fenómenos tienen manifestaciones audibles, que se mezclan, los debidos a la detonación y al golpeteo.

El asunto es definir qué se entiende por **detonación** y **golpeteo**. En términos generales el golpeteo y detonación son términos usados para denominar cualquier ruido inusual que aparece en el funcionamiento del motor debido a autoencendido en el proceso de combustión. Muchas veces en la bibliografía se emplean como sinónimos.

Reservaremos el término **detonación** para indicar específicamente la existencia de diferencias de presión y por tanto, existencia de vibraciones en el gas.

El término **golpeteo** se empleará para incluir todos los fenómenos provenientes del autoencendido.

Una de las metas en el proceso de combustión es la de quemar la mezcla antes que el émbolo avance en su carrera de expansión. De aquí, que sea necesario un autoencendido ligero, que acelere el proceso de combustión, en el instante en que la velocidad de llama comienza a disminuir. De hecho, se obtiene la máxima potencia con el motor ECH y con combustible normal cuando se ajusta la chispa en un punto de golpeteo escasamente audible.

Esto no es deseable. Aparte de las sollicitaciones mecánicas a las que son sometidas las piezas del motor cuando ocurre detonación, aparece otro fenómeno.

La temperatura en la bujía es muy elevada y cualquier otro aumento en torno a ella es absolutamente indeseable.

En esa región o en cualquier región de la cámara crítica tienden a formarse puntos calientes que ocasionan un encendido anticipado a la acción de la chispa de la bujía. La detonancia favorece la formación de estos puntos calientes.

Al encendido anticipado, proveniente de un punto caliente se le llama pre-encendido porque la llama se inicia antes de que ocurra el chispazo. El pre-encendido produce temperaturas y presiones aún mayores en el gas final, que las obtenidas mediante un encendido normal por el hecho de aparecer prematuramente en la carrera de compresión. En consecuencia, el pre-encendido se anticipa al autoencendido y el autoencendido estimula el pre-encendido.

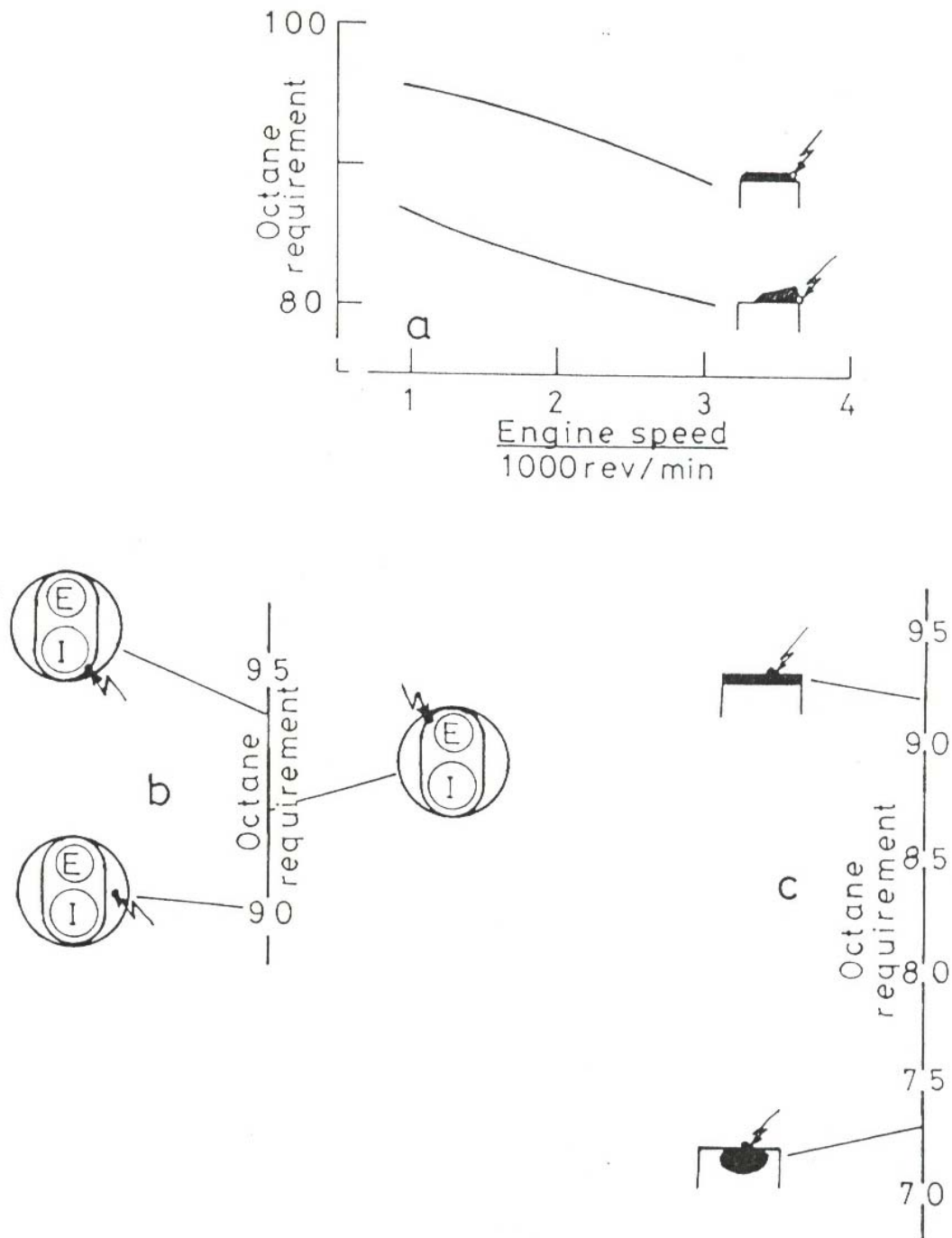


Figure 22 Octane requirement of different combustion chamber arrangements from Caris *et al.* (1956). (a) Effect of providing quench area; (b) effect of flame travel relative to hot and cool areas; (c) extreme designs with central fuel injection. Reprinted with permission © 1956 Society of Automotive Engineers Inc.

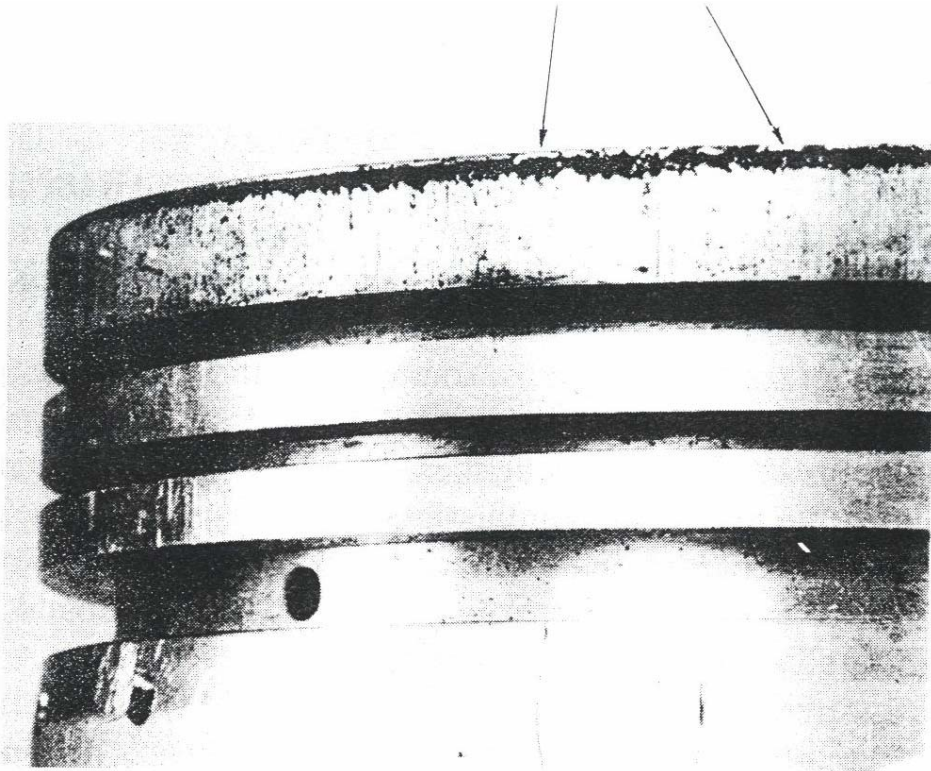


Figure 4 Damage done to piston by knock.



Figure 5 Damage done to piston by runaway pre-ignition.

9.10.- El fenómeno de combustión en el motor de encendido por compresión (EC)

En el motor EC solamente se comprime aire en la carrera de compresión, llevándolo a temperaturas altas.

Seguidamente se introducen en la cámara de combustión, (ver Figura 4.9 Obert) uno o más chorros de combustible a presiones muy altas.

En estas condiciones el chorro se desintegra en un núcleo de combustible rodeado por una cubierta de partículas de aire y combustible pulverizados (Figura 4.10 a). Esta última zona es formada tanto por la atomización como por la vaporización del combustible, así como también por la turbulencia del aire en la cámara de combustión al pasar a través del chorro y arrastrar las partículas de combustible del núcleo (Figura 4.10 b). En alguna parte de la cubierta pulverizada se formará una mezcla de aire y combustible que comenzará a oxidarse.

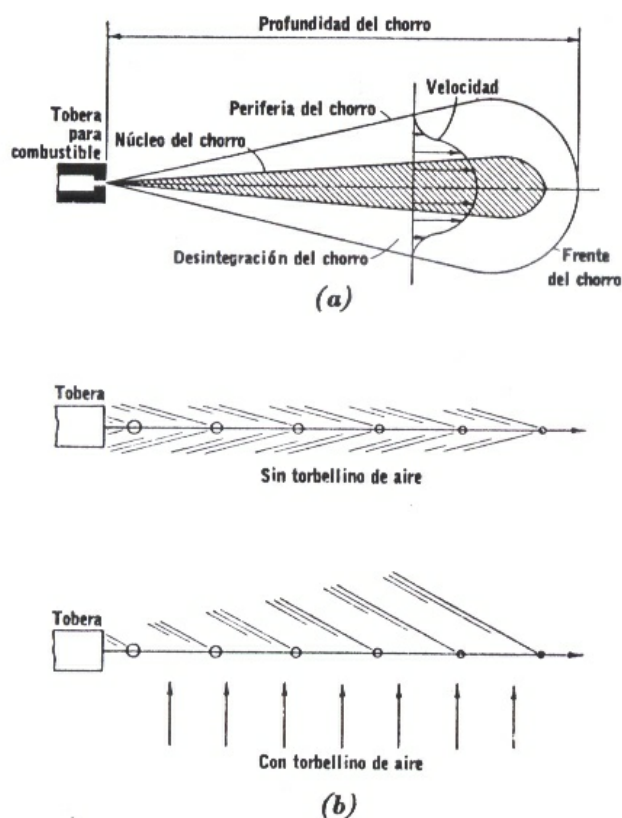


FIG. 4-10. Análisis esquemático de la desintegración de un chorro de combustible. [(a) por K. Neumann, de la Ref. 5; (b) de Dicksee, *Trans. SAE*, enero, 1949)]

Este período de **demora física** es el lapso entre el comienzo de la inyección y el logro de las condiciones de la reacción química; en el mismo el combustible es atomizado, vaporizado, mezclado con el aire y aumentado de temperatura. En la siguiente etapa, llamada **demora química**, la reacción se inicia lentamente y en seguida se acelera hasta que ocurre el encendido más o menos 5° antes del P.M.S. En muchos puntos aparece la llama, pero en lugar de la propagación ordenada a lo largo de un frente definido podrán

detonar o encenderse áreas enteras debido a la acumulación de combustible en la cámara durante el período de demora. Debe tenerse en cuenta que la mezcla en el motor EC es muy heterogénea a diferencia del motor ECH. Existen regiones con gotas de combustible solamente, con vapores de combustible pero sin aire, con aire solamente y con mezclas de combustible-aire.

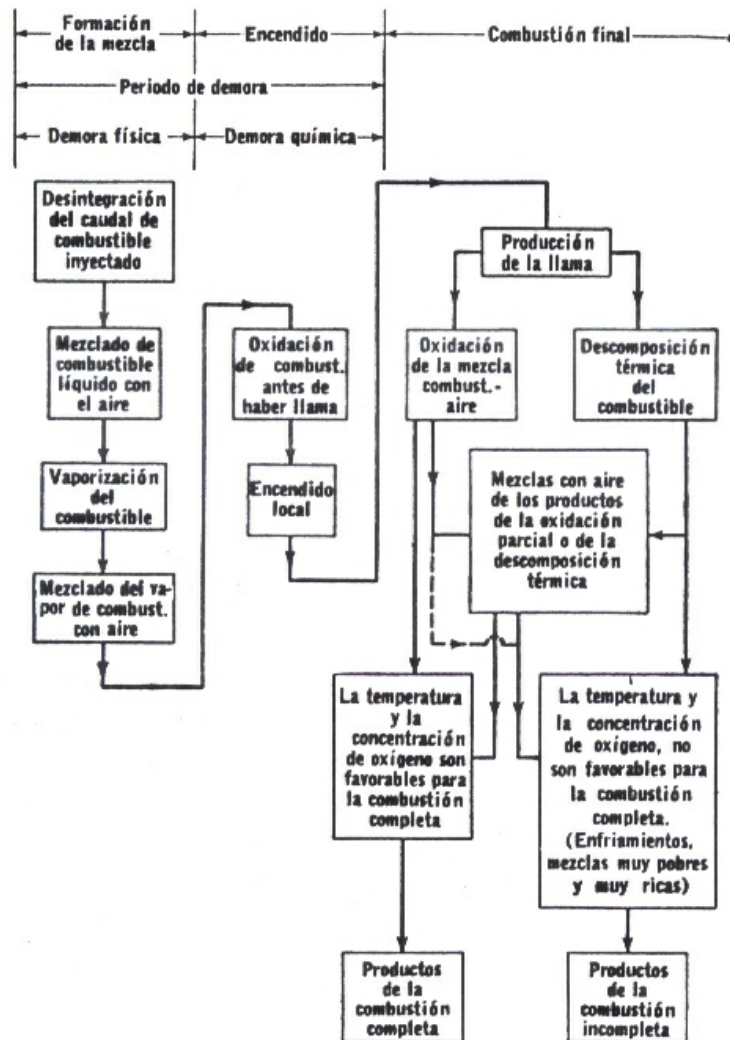


FIG. 4-11. Esquema del proceso de combustión en el motor diesel. (De Elliot, Ref. 5)

Cuando comienza en una región que contiene tanto aire como combustible, la llama se propagará si la región de la mezcla es continua. Además, las regiones adyacentes pueden a su vez entrar en combustión por el calor transferido de la región que se está quemando.

En este proceso, siempre será difícil distinguir entre la propagación de la llama y autoencendido, que coexistirán, estos últimos asistidos por las altas temperaturas que se generan en la cámara.

El nombre **demora del encendido** se asigna al tiempo consumido por ambas demoras, tanto la física como la química. Debe entenderse que la demora del encendido en un motor ECH equivale fundamentalmente a la demora química del motor EC. Sin

embargo, debe admitirse que es difícil establecer cuando finaliza una y comienza la otra por la complejidad del proceso.

Para los combustibles ligeros, la demora física es pequeña en tanto que para los pesados, viscosos, la demora física puede ser el factor de control. La demora física se reduce en gran medida usando presiones de inyección muy elevadas y gran turbulencia, facilitando la desintegración del chorro.

En los motores EC, la demora del encendido es menor que la duración de la inyección. Por lo tanto el proceso de combustión puede dividirse en cuatro etapas:

1. Demora de encendido
2. Elevación rápida de la presión
3. Presión controlada o elevación constante de la presión
4. Encendido en la carrera de expansión

La elevación rápida de la presión es consecuencia de la cantidad de puntos de encendido y la acumulación de combustible durante el período de demora.

Continuando esta etapa, se inyecta la porción final de combustible dentro de la llama y consecuentemente la combustión de esta porción es regulada un tanto por la rapidez de la inyección. En vista de que el proceso no es homogéneo, continúa la combustión cuando ya se inició la carrera de expansión.

9.11.- Golpeteo en el motor EC

En los motores ECH es relativamente fácil distinguir entre el funcionamiento con y sin golpeteo.

En el motor EC, el encendido se logra por autoencendido, por tanto el efecto del golpeteo es inevitable. Por supuesto que esto no significa que este golpeteo deba tener una manifestación audible, pero sí implica que el autoencendido es la condición esencial para establecer una diferencia de presión o una rápida elevación de presión en la cámara.

La severidad del aumento de presión dependerá de la extensión de la demora del encendido y de la temperatura de autoencendido.

Si el combustible tiene un período de demora demasiado grande, se inyectará una mayor cantidad que se acumula en la cámara durante el período de demora. El autoencendido tenderá a ser incontrolablemente rápido por esa cantidad de mezcla a alta temperatura acumulada en la cámara. Por tanto, si se ha de evitar el golpeteo, un buen combustible de EC debe tener una demora de encendido (I.D.) corta y una temperatura de autoencendido baja (S.I.T.).

I.D. del inglés Ignition Delay

S.I.T. del inglés Self Ignition Temperature

9.12.- Combustión en la turbina de gas

El proceso de combustión en el quemador de una turbina de gas, es un proceso de flujo continuo siendo el problema mantener una llama estable, estacionaria sobre límites muy amplios de las relaciones totales de combustible-aire.

Pueden reconocerse tres velocidades diferentes:

1. V_s , la velocidad absoluta del frente de llama (velocidad de la llama) normal a ella misma.
2. V_g , la velocidad del gas; la velocidad absoluta de los gases no quemados, normal al frente de llama.
3. V_n , la velocidad normal de combustión o de encendido, o velocidad de transformación.

Entonces por definición: $V_s = V_g + V_n$

Nótese que la velocidad de quema, a diferencia de las otras, es una propiedad de la mezcla y depende de la velocidad de la reacción química llamada combustión.

Con estas definiciones el requisito para una llama estacionaria es:

$$V_s = 0 \rightarrow V_g = -V_n$$

En general se encuentra que:

- A) Las velocidades de quema aumentan a medida que aumenta la temperatura de los gases no quemados.
- B) El valor de las relaciones combustible-aire para la quema estable, aumenta a medida que aumenta la temperatura o la presión de los gases no quemados.

Considérese una tobera inyectando combustible en el seno de una corriente de aire en movimiento dentro de una cámara de combustión de flujo estable. Si el aire se mueve a velocidades mayores que la de combustión la llama se saldrá de la cámara; si el aire se mueve a velocidades menores que la de combustión, la llama viajará hacia la tobera y se extinguirá. (Esta última conclusión no es correcta porque a medida que la llama se acerque a la tobera, la relación combustible-aire cambiará y la mezcla se tornará totalmente heterogénea a causa de la presencia de partículas de combustible y la velocidad de combustión disminuirá aún más.

Por tanto se hace evidente el problema del quemador de la turbina de gas: deberá ser capaz de mantener una combustión continua, a pesar de cambios en la relación combustible-aire, en la presión, en la temperatura y en la rapidez del flujo de masas.

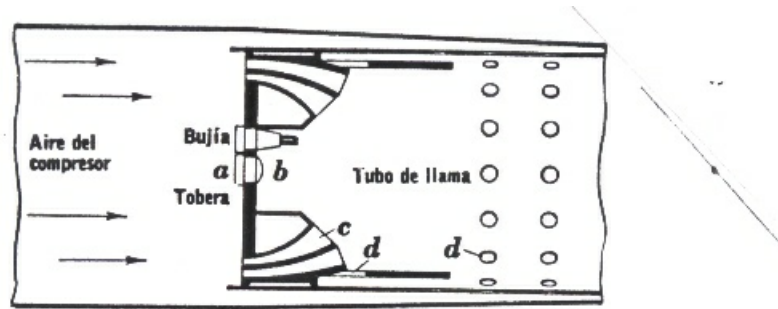


FIG. 4-12. Quemador, tipo bote de lata, para turbina de gas. (De Mock, *Trans. SAE*, mayo, 1946)

Uno de los diseños de quemador, es el llamado tipo bote de lata (ver figura 4.12 Obert). Se coloca un ducto principal de aire, entre el compresor y la turbina, un tubo cilíndrico para la llama. En la copa central b se coloca una tobera a, alimentándole a la copa aire a baja velocidad por c. En esta forma se estabiliza la llama colocando a la tobera en una región donde la velocidad de la corriente de aire es baja y la velocidad de combustión puede mantener una llama estacionaria. Cuando se inyecta una mayor cantidad de combustible, se recibe aire a mayor velocidad a través de los alimentadores d.

9.13.- Teorías de la combustión

Cuando se mezcla combustible con aire a la temperatura ambiente, se observa, generalmente, que la reacción es extremadamente lenta. Una teoría para explicar esta inacción, supone que las colisiones entre moléculas no ocasionan la formación de una nueva molécula, a menos que las moléculas en colisión posean energía en exceso, de un valor mínimo llamada energía de activación. Mediante esta teoría, la rapidez de la reacción podrá elevarse aumentando la concentración de moléculas (aumentando la presión), incrementando de esa forma la frecuencia de las colisiones moleculares; también será posible aumentarla elevando la temperatura en cuyo caso se aumentará el número de moléculas con energía en exceso.

Consideremos colocar una mezcla en un recipiente adiabático. Cuando ocurre la reacción se libera la energía y se aumenta la temperatura. Pero a esta temperatura mayor aumenta la reacción por lo cual se libera mayor energía. Como consecuencia, la rapidez de la reacción es acelerada continuamente por el aumento de temperatura pudiendo ocurrir una detonación. Esta es la teoría térmica de la detonación.

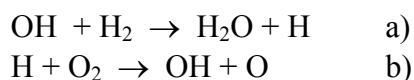
Esta teoría no es capaz de explicar muchos fenómenos que ocurren durante reacciones de combustión.

Supongamos que una molécula de H_2 experimenta una colisión y se vuelve altamente activa. Se concibe que la molécula activada podrá desintegrarse en 2 átomos de H. También es posible que las moléculas de hidrógeno y oxígeno reaccionen en fase gas para formar peróxido de hidrógeno, el cual se desintegrará rápidamente en 2 radicales hidroxilos.



Con la aparición de radicales como centros activos, la formación de H₂O podrá resultar de muchas reacciones.

Dos de éstas son:



Nótese que el radical OH formado en b) es utilizado en a). Es decir, un radical OH es capaz de formar n moléculas de H₂O si se regenera n veces, antes de que alguna colisión extraña ocasione su desaparición.

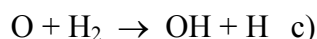
Una reacción así se llama reacción en cadena si los radicales que reaccionan son regenerados durante el proceso. A dichos radicales se les llama portadores de cadena.

La velocidad de reacción será controlada por el número de portadores de cadena inicialmente presentes y por la longitud de la cadena.

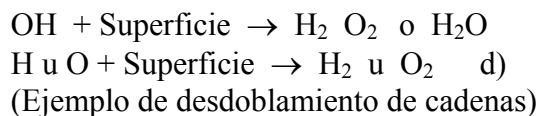
La teoría de la reacción en cadena ayuda a explicar otros fenómenos que aparecen en las reacciones de combustión:

1. La existencia de un período de inducción (atraso de encendido)
2. La curiosa dependencia de la velocidad de reacción de:
 - a) la naturaleza y área de las paredes de confinamiento
 - b) el efecto de los aditivos inertes
 - c) el efecto de los diminutos vestigios de aditivos que reaccionan.

Retomemos las reacciones a) y b). De la ecuación b), el O formado puede reaccionar con H₂ :



Proporcionando así portadores para 2 o más cadenas. b) y c) se llaman reacciones en cadena ramificada porque se multiplican los portadores. La velocidad de la reacción será aumentada enormemente (y a temperatura constante) por dichas reacciones. Por otra parte, los portadores de cadena pueden ser destruidos:



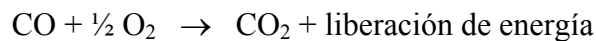
Esta teoría explica la verificación experimental de que las mezclas de H₂ y O₂, detonan a bajas presiones y reaccionan moderadamente a presiones mayores. Si la reacción en cadena es favorecida por una disminución de la presión, o si una reacción en cadena ramificada es favorecida por una disminución de la presión, las reacciones desdobladoras como las d), podrán romper la cadena, presentándose una región no detonadora. La explicación es que la velocidad es regulada por la longitud y número de cadenas que pueden formarse, así como la temperatura y concentración.

De todos modos, un hidrocarburo complejo, requiere más de una molécula de O₂ para su completa reacción, y esto no implica que una sola molécula de combustible deba chocar simultáneamente con varias moléculas de O₂.

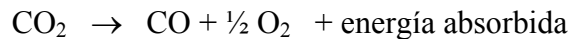
Lo que ocurra probablemente es una colisión bimolecular, siendo oxidado el combustible en parte para dar lugar a un producto intermedio. Este a su vez sufre otras colisiones hasta que, pasando por varios productos intermedios, se obtiene un estado de casi completa conversión a H₂O y CO₂.

9.14.- Equilibrio químico y disociación

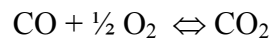
No se puede lograr la temperatura teórica de la combustión completa porque la reacción nunca es completa. Por ejemplo, la reacción del monóxido de carbono y el oxígeno produce dióxido de carbono con liberación de energía que eleva la temperatura:



Pero a altas temperaturas el CO₂ se disociará con absorción de energía:



Se alcanza una temperatura límite cuando la velocidad de reacción en ambas direcciones es igual. Entonces la reacción está en equilibrio químico.



Esto es, para cada temperatura, están presentes en la mezcla en equilibrio, proporciones definidas de CO, O₂ y CO₂. A temperaturas bajas CO₂ aumenta. A temperaturas altas CO₂ disminuye.

Este fenómeno de disociación, es el causante además de los venenos que se producen en la combustión y que estudiaremos en el capítulo "Polución".

9.15.- Algunos conceptos importantes sobre combustibles

Es muy importante como se ha visto, en el motor ECH y en el motor EC, evitar los fenómenos de detonación y golpeteo. Desde que este fenómeno como vimos, depende de las características del combustible entre otros parámetros, se han establecido métodos que permiten evaluar el comportamiento de cada combustible en relación con la detonación y el golpeteo. Para el motor ECH es el **número de octano** y para el motor EC el **índice de cetano**.

La determinación del **nº de octano** en un combustible, se hace con un motor especial de relación de compresión variable. El mismo puede funcionar con una mezcla de iso-octano (2-2-4 trimetil pentano) y n-heptano. Al iso-octano se le asigna un número de octano de 100 y al n-heptano 0. (ver figura 9.10 Obert)

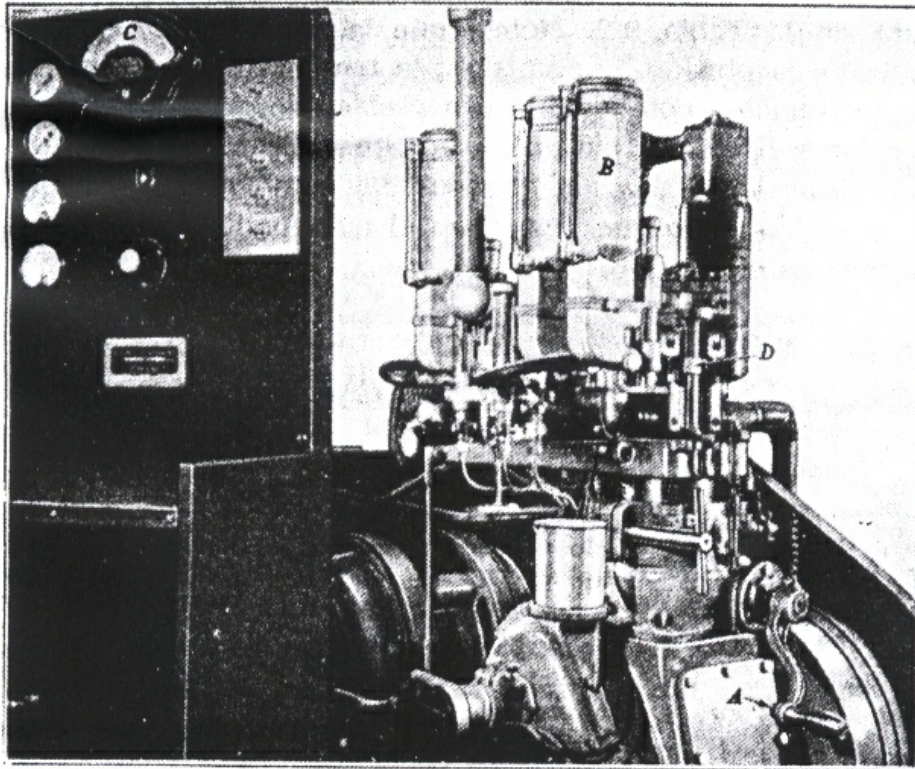


FIG. 9-10. Motor Waukesha ASTM-CFR para valorizar los grados de golpeteo de la gasolina

El motor compara las características de golpeteo de un combustible problema con diferentes mezclas de iso-octano y n-heptano. Existen varias normas que describen este ensayo a saber:

- A) Método de Investigación: ASTM – D 2699-99
(Motores Tipo Automotriz)
- B) Método del Motor: ASTM – D 2700-99

Cuando se reporta una gasolina con 95 de n° de octano, significa que su comportamiento en condiciones de ensayo con el motor Wankesha - ASTM - CFR de relación de compresión variable es similar a una mezcla de 95% de iso-octano y 5% de n-heptano en volumen.

Algunos refinadores, cuando reportan un número de octano de una determinada gasolina, el N° reportado es la media aritmética de los valores definidos por los métodos A y B. Por otra parte esto está especificado en el método ASTM – D 2700-99.

La tendencia al golpeteo en un motor EC, se encuentra comparando, bajo estrictas condiciones de ensayo, en un motor especial (ver figura 9.26 Obert) con combustibles primarios de referencia. Estos son el n-cetano, con n° de cetano de 100 y el alfa metil naftaleno, con n° de cetano de 0. Un combustible con índice de cetano 60, indica que en las condiciones de ensayo, tiene las mismas características de encendido que una mezcla de 60% de cetano y 40% alfa metil naftaleno. Notar, que el combustible es evaluado por sus características de encendido, no tanto por el golpeteo (I.D.). El ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM – D 613-95.

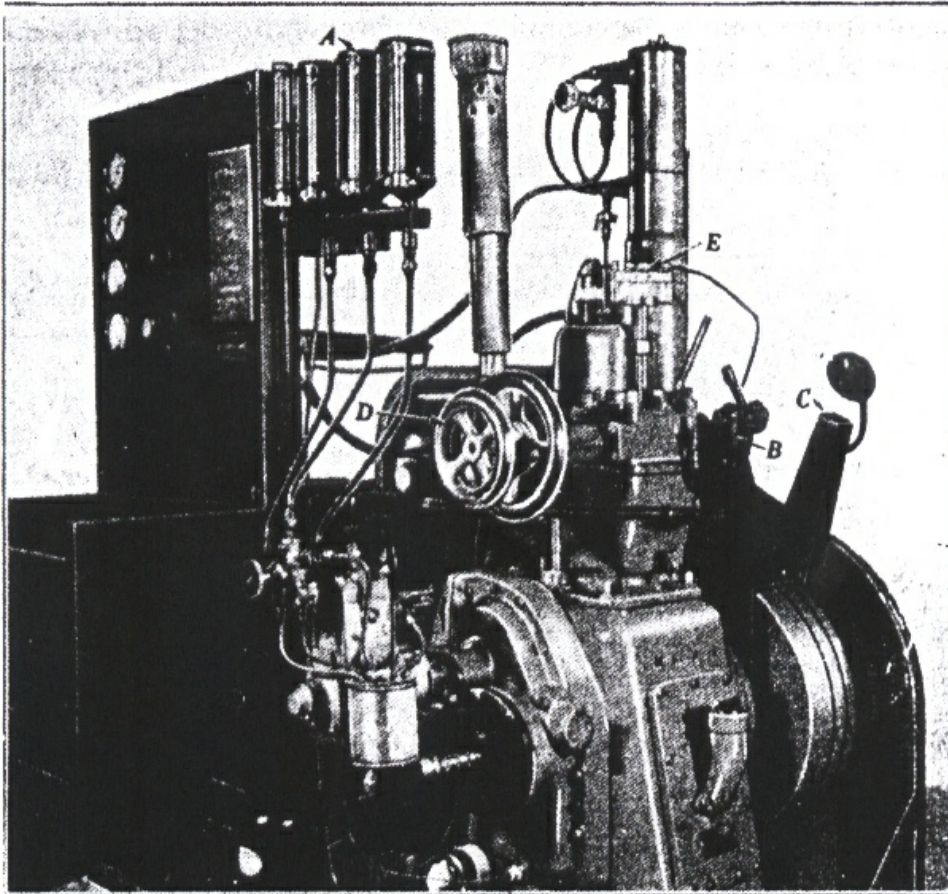


FIG. 9-26. Motor Waukesha ASTM-CFR, para valuar la propiedad de incendiarse de los aceites combustibles

Existen aditivos para mejorar el N° de octano de una gasolina y el N° de cetano de un combustible para Diesel.

Para gasolinas:

- Plomo tetra-etilo
- MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether)
- MMT (Methylcyclopentadienyl Manganese Tricarbonyl)
- ETBE (Ethyl Tertiary Butyl Ether)
- TAME (Tertiary Amil Methyl Ether)
- Alcohol (Etanol)

Para Gas Oil:

- Amil Tionitrito
- Tetra Butil Tionitrito
- Etil Tionitrito
- Amil Nitrato
- Etc.

9.15.1.- Aditivos mejoradores de N° de Octano

9.15.1.1.- Tetraetilo de plomo

1) Introducción

El plomo, como tetraetilo de plomo, fue introducido en los años '20 como una manera de incrementar el número de octano de las naftas, y fue utilizado esencialmente en todas las naftas comercializadas hasta mediados de los años '70.

Debido a la creciente preocupación para proteger al medio ambiente y la salud surgieron disposiciones legales para imitar las emisiones de gases, requiriéndose el uso de los denominados catalizadores. Estos catalizadores son “envenenados” por el plomo contenido en la nafta, disminuyendo su efectividad, no cumpliendo con la función para la cual han sido diseñados (acelerar la reacción de pasaje de los gases de combustión nocivos en otros menos nocivos).

Como resultado de lo anteriormente expuesto, se está dando la transición al mercado de las naftas sin plomo.

El plomo no sólo se utiliza para mejorar el índice de octano de la nafta, sino que también se usa por el efecto beneficioso que tiene en la lubricación de asientos de válvulas de escape blandos previniendo su depresión (Valve Seat Recession VSR). Esto es ventajoso para los vehículos viejos los cuales están equipados con asientos de válvulas blandos y requieren de la lubricación que el plomo en la nafta otorga. Por lo cual el principal problema para eliminar el plomo de la nafta es que existe aún un porcentaje de vehículos construidos con asientos de válvulas blandos.

2) La transición desde la nafta con plomo a la nafta sin plomo

El proceso comenzó en Estados Unidos, Japón y Canadá a mediados de los '70, actualmente son mercados que comercializan únicamente naftas sin plomo.

En Europa este proceso comenzó una década después, a mediados de los '80, lo que extendió el uso de catalizadores al mercado europeo. En la mayor parte de la comunidad europea, actualmente, las naftas con plomo no son permitidas.

En América del Sur, Brasil no usa naftas con plomo desde principios de los '80 y Argentina comenzó a cambiar en los '90.

3) Desgaste de asiento de válvulas

Un beneficio adicional del plomo es que otorga propiedades lubricantes a altas temperaturas, previniendo por ello el desgaste prematuro de los asientos de válvulas de escape, siendo esto importante cuando los asientos de válvula son blandos. Este tipo de asientos sólo se encuentra en motores viejos y la cantidad de ellos varía de un país a otro. En la tabla al final se adjuntan los motores que no podrían utilizar naftas sin plomo.

En la figura se puede ver un ejemplo de un asiento de válvula de escape deprimido.



4) Soluciones - Aditivos alternativos

Para proveer protección contra la depresión del asiento de válvula de escape, el plomo debe ser reemplazado con un agente adecuado y éste se consigue con distintos aditivos alternativos: a partir de potasio, magnesio, fosforados. Cada uno de ellos tiene sus pro y sus contra.

Inicialmente, en algunos mercados, la protección del asiento de válvulas (VSRP) se llevó a cabo agregando en la nafta aditivos que contenían potasio, para atender la demanda. Pero después de algunos años, a medida que el número de vehículos construidos con asientos de válvulas blandos descendió, el aditivo con potasio se quitó de la formulación de las gasolinas y se comercializó el aditivo separado para que el usuario lo agregara en el tanque de gasolina de su vehículo cada vez que se surtía gasolina.

MARCAS Y MODELOS NO APTOS PARA USAR NAFTA SIN PLOMO

| MARCA | MODELO | Anteriores a |
|-----------------------------|--|--------------------------|
| RENAULT | R4 (GTL, Furgoneta, Pick Up) | Junio 1986 |
| | R-9 (TS, TSE, TXE, GTL) | 1987 |
| | R-11 (TL, GTL, TS, TSE, TXE, Turbo) | 1984 |
| | R-12 (GTL, QTL Break, L, L Break, TL, TL Break, GTS, GTS Break, TS, TS Break) | Junio 1986 |
| | R-18 (GTL, GTL Break motor 1.4, TS, TS break, TX, TX Break, GTX, GTX Break, LS, GXE, LX, LX Break, GTS, GTS Break, TXE, TXE Break motor 1.6/2.0) | Junio 1986 1980 |
| | R-21 (GTX, GTX Break, TXE, TXE Nevada) | 1989 |
| | Fuego (GTX, GTA, Max) | 1982 |
| | Trafic (T310, TA12, TA 52FLC, TA 12 FLC) | 1986 |
| | Rodeo (TA 82) | 1991 |
| | VOLKSWAGEN | Gacel (GL, GS, GLS, 1.8) |
| Senda (N) | | 1990 |
| Santana | | 1987 |
| Gol (GL, GLI) | | 1991 |
| VW (Kombi, Furgón, Pick Up) | | 1982 |
| Saveiro | | 1991 |

| MARCA | MODELO | Anteriores a |
|-----------|---|--------------|
| FORD | Taurus (L, GXL,GT,GT – SP, Ghía) | 1974 |
| | Sierra (GL, Ghía, SX, LX, XR4, Rural) | 1984 |
| | Escort (GL, LX, SX, XR3, 1.8, Ghía S, Cabriolet) | 1987 |
| | Galaxy 2.0 | 1992 |
| | Pick Up F100, F-150 | Mayo 1992 |
| FIAT | 128 (C, CL, CLF, Europa, Europa Familiar, Europa IAVA, Super Europa, Super Europa Familiar) | 1980 |
| | 147 (C, CL, CLS, TR, TR5, Sorpasso, -motores a partir de 1100cc- SpazioC, CL, TR, T, Brío) | 1980 |
| | Regatta (85, 100S, S, SC, 2000, Weekend) | 1985 |
| | Duna (S, SC, SL, SCV, SCX, Weekent T) | 1987 |
| | Uno, Premio | 1988 |
| | Fiorino (pick up, Furgón) | 1980 |
| PEUGEOT | 504 (GR11, SR, SR11, SRX) | 1986 |
| | 504 (Pick Up N, GR, G) | 1986 |
| | SR, Autom, Confort/Gamma, Super Cofort/Gamma) Injection, Familiar, Autom/Salón) | 1986 |
| | 405 (SRI) | 1991 |
| CHEVROLET | Custom 10, Silverado (Motor 4097 cc) | 1986 |

9.15.1.2.- MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether)

Este aditivo es el más usado en sustitución del plomo tetraetilo.

Últimamente se ha planteado la posible sustitución del mismo, debido a que el estado de California en EE.UU. ha decidido prohibir el uso de éste, dado el impacto que podría tener un derrame accidental en las napas freáticas, su olor y su gusto.

La principal preocupación, es que en aquellos lugares donde se usa agua subterránea para el suministro de agua potable, pequeñísimas cantidades de MTBE (30ml en 500m³) producen un olor y gusto realmente desagradable.

MTBE es usado en toda Europa como mejorador de n° de octano sustituyendo las gasolinas con plomo, y será usado en mayores cantidades, dadas las resoluciones del

gobierno de EE.UU. de bajar drásticamente los contenidos de bencenos, aromáticos y olefinas en las gasolinas.

MTBE es un líquido volátil, soluble en agua, incoloro y realmente tiene una baja toxicidad. El problema es su olor y gusto cuando contamina vertientes de agua potable.

Alternativas al MTBE

Plomo y algunos otros metales son los mejoradores de n° de octano más efectivos. El plomo está descartado por razones de higiene ambiental.

Una alternativa es el MMT (Methylcyclopentadienyl Manganese Tricarbonyl), que no tiene suficiente aceptación a nivel mundial.

Es probable que la solución pase por el uso de otros ésteres, como el ETBE (Ethyl Tertiary Biotyl Ether) y TAME (Tertiary Amyl Methyl Ether) o alcohol como el Etanol.

Etanol es ya usado en algunos lugares de U.S.A. y muy cerca de nuestro país en Brasil. El alcohol es un formidable mejorador del número de octano pero tiene el inconveniente que el producto necesita no tener agua en absoluto por su tendencia a separar de la gasolina en presencia de ésta.

9.15.2.- El N° de cetano

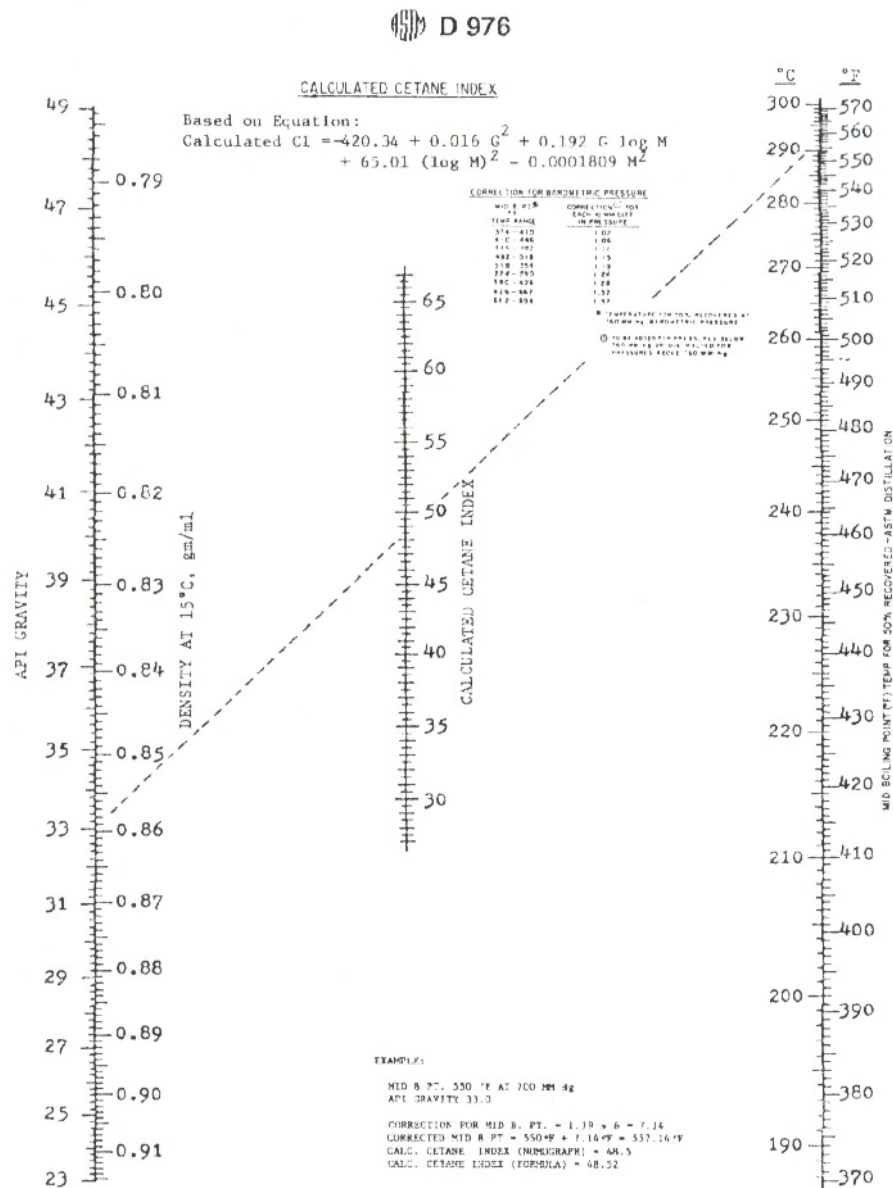
Como vimos este valor tiene una importancia capital en la calidad de un combustible Diesel. El N° de cetano se determina con el motor especial, según la norma ASTM – D 613-95.

Hay otra manera de evaluar el combustible Diesel y es por un índice de cetano calculado de acuerdo a la norma ASTM - D 978. Se trata de un nomograma que teniendo la densidad del producto y la temperatura de 50% de destilado se logra en el centro el índice de cetano calculado. (Ver Nomograma 1)

El índice de cetano es una estimación del número de cetano. Aunque no contabiliza el uso de aditivos mejoradores de ignición como el 2-EHN (2-Ethyl Hexyl Nitrate), el índice de cetano ha servido bien para estimar la calidad o n° de cetano en la operación diaria en una refinería. Sin embargo un número de cambios que están comenzando, hacen que el índice de cetano no sea ahora tan útil.

- Especificaciones modernas, más exigentes para el gas-oil tienden a especificar el N° de cetano en vez del índice de cetano.
- El alto costo de los aditivos mejoradores de calidad de ignición, significa que el n° de cetano debe ser medido exacto para evitar sobre-costos.
- El uso de componentes no tradicionales en los gas-oil (algunos con componentes pesados de baja calidad de ignición), hace que la correlación entre los 2 métodos n° de cetano e índice de cetano sea cada vez menos confiable.

El motor usado en el ASTM – D 613 para medir el n° de cetano es viejo y engoroso, haciendo el ensayo muy caro. Sin embargo, hasta ahora no hay una alternativa satisfactoria desarrollada.



Note 1—The Calculated Cetane Index equation represents a useful tool for *estimating* cetane number. Due to inherent limitations in its application, Index values may not be a valid substitute for ASTM Cetane Numbers as determined in a test engine.

FIG. 1 Nomograph for Calculated Cetane Index (ECS-1 Meter Basis—Test Method D 613)

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).