



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**CONTROL DE EMISIONES EN
MOTORES ENCENDIDOS
POR CHISPA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTAN:

**PABLO HECTOR GUERRERO GOICOECHEA
GUILLERMO GUILLOT GARCIA
FRANCISCO JAVIER VELEZ STRUCK**

DIRECTOR DE TESIS:

ING. ROGELIO GONZALEZ OROPEZA

MEXICO. D.F.

1991

FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Í N D I C E

INTRODUCCION

CAPITULO I ANALISIS TEORICO DEL CICLO OTTO

CAPITULO II PARTES DE UN MOTOR Y SU
FUNCIONAMIENTO

CAPITULO III COMBUSTIBLES Y COMBUSTION

CAPITULO IV METODOS DE CONTROL MAS USUALES
DE EMISIONES CONTAMINANTES

CAPITULO V METODOS DE ANALISIS DE MEZCLAS
GASEOSAS.

CAPITULO VI EXPERIMENTACION

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

[REDACTED]

INTRODUCCION

[REDACTED]

~~INTRODUCCIÓN~~

La conversión de energía en trabajo ha sido una de las mayores inquietudes del hombre a lo largo de su historia. Así, ha aprendido a usar la tracción animal y la energía del agua, del aire y del fuego. Ha creado diversas máquinas que operan bajo los principios de diferentes ciclos termodinámicos.

Uno de los dispositivos productores de potencia motriz más importantes en la actualidad es el motor de combustión interna, que puede considerarse como relativamente nuevo, ya que los primeros intentos de construirlo datan de 1857.

1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

El cilindro con émbolo era usado por las tribus malayas aborígenes para hacer fuego mediante la rápida compresión de un émbolo en un tubo de bambú.

El primer intento de producir trabajo quemando pólvora en un cilindro se le atribuye al físico holandés Huyghens, en 1680. A mediados del siglo XIX el francés Lenoir construyó el primer motor de gas aunque de rendimiento nulo.

En 1862, Beau de Rochas, también francés, estableció la teoría de un ciclo termodinámico y estipuló las condiciones para obtener un motor de alto rendimiento.

También hay que mencionar que dentro de los primeros intentos para construir un motor de combustión interna, están los de Barsanti y Mattenci, quienes utilizaron pólvora en un motor de émbolo libre; una explosión impulsaba al émbolo hacia arriba y cuando empezaba a descender por la acción de la gravedad, accionaba un trinquete que estaba conectado de tal manera que hacía girar un eje. Dicho motor, muy difícil de manejar, estaba condenado al fracaso a pesar de que Langen y Otto sacaron con éxito varios motores de émbolo libre por el año de 1867.

En 1876, Nicholas Otto (1832-1891) construyó el primer motor con éxito, después de haber establecido independientemente el mismo ciclo de Beau de Rochas. Este fue el primer motor de ciclo Otto de cuatro tiempos y fue conocido como motor de Otto silencioso.

En 1881 se exhibió por primera vez el motor de ciclo Otto de dos tiempos, inventado por Sir Dugald Clerk, nacido en Glasgow en 1854.

Las velocidades de rotación de estos primeros motores de combustión interna eran del orden de 200 rpm. El primero en construir motores pequeños de velocidades relativamente altas, del orden de unas 1000 rpm fue el alemán Gotlieb Damler (1834-1899).

Estos motores trabajaban mediante un encendido de inflamación por bala caliente y, dada su velocidad, hicieron del automóvil una idea practicable.

En 1893, Rudolf Diesel patentó el motor que ahora lleva su nombre. El primer motor fabricado por Diesel explotó en la primera inyección de combustible y tuvieron que pasar cuatro años antes de que construyera un motor con éxito.

Por lo que toca al ciclo de Joule y Brayton usado en la turbina de gas, podemos decir que en 1872 se construyó una turbina sin éxito y no fue sino hasta 1906 cuando se logró otra que ya produjo cierta potencia.

Al hablar un poco de los autores de este ciclo, debemos mencionar que James Prescott Joule (1818-1889), científico inglés, fue educado particularmente por un tutor y llegó a ser en un tiempo ayudante estudiantil de Dalton. Las investigaciones de Joule fueron de importancia en electricidad y en termodinámica.

George Brayton, contemporáneo de Otto, fue un ingeniero de Boston. Más que una turbina, su motor fue del tipo de movimiento alternativo.

Los principales obstáculos a vencer en el diseño de una turbina, como lo mostró el análisis termodinámico, fueron:

- La temperatura al inicio de la compresión tenía que ser alta (entre 371 y 427 °C).
- El compresor y la turbina deben trabajar con una alta eficiencia.

Es preciso apuntar que no fue sino hasta que los avances de la metalurgia lo permitieron que se pudieron construir máquinas de combustión interna y continua.

Para describir la evolución de los motores de combustión interna, la tabla comparativa i.1 podrá dar una mejor idea.

i.2 CLASIFICACION DE LOS MOTORES DE COMBUSTION INTERNA

La siguiente clasificación se hace con base en:

- El ciclo:
 - Otto
 - Diesel
 - Brayton-Joule
- El tipo de pistón:
 - Simple efecto

Doble efecto

Pistones en oposición

manivela única

manivela doble

Ciclo de 2 tiempos

Ciclo de 4 tiempos

Rotatorio

- La disposición y número de cilindros:
 - en línea: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12
 - en V: 2, 4, 6, 8, 12 y 16
 - radial: 2, 3, 5, 7, 9, 11 y 12
- La posición del cilindro:
 - horizontal
 - vertical
 - invertido
 - inclinado
- Las válvulas:
 - rotativas
 - lunbreras
 - de cabeza en I o válvulas de cabeza
 - de cabeza en L o debajo de la cabeza
 - de cabeza en F
 - de cabeza en T
- La ignición:
 - chispa
 - compresión
 - cabeza ardiente
- El arranque:
 - por motor auxiliar
 - por aire comprimido
 - por inercia
 - por cartucho
- La refrigeración:
 - líquida
 - aire
- La alimentación de aire:
 - aspiración natural
 - sobrealimentación
- La alimentación de combustible:
 - carburador:
 - gasolina
 - gas L.P.
 - gas natural

inyector de combustible:
 aceite
 gasolina
 combinación de aceite y gas

- La lubricación:
 cárter seco
 cárter húmedo
 en serie
 en paralelo

TIPO	CONDICIONES	EFICIENCIA (%)
Automóvil de gasolina con ignición por chispa	Optimo	25
	Constante a 96 Km/h	18
	Constante a 48 Km/h	12
Camión de diesel con ignición por compresión	Plena carga	35
	Media carga	31
Locomotora a diesel		30
Turbina de gas (100 hp) sin regeneración	Optimo	12
Turbina de gas (>7500 Kw) sin regeneración con regeneración	Optimo	25
	Optimo	34
Planta de potencia de vapor (>350000 Kw)	Optimo	41

Tabla i.1 Eficiencias porcentuales técnicas que caracterizan algunos mecanismos productores de potencia

(Tomado de: Termodinámica de Kennet Wark. 4o. ed. Mc. Graw Hill)

1.3 UNIDADES (SI)

En el desarrollo tanto de los aspectos teóricos como técnicos de este trabajo, se utilizarán las unidades del Sistema Internacional para todas las magnitudes físicas involucradas, por lo que a continuación se incluyen las definiciones tanto del Sistema Internacional como de las unidades del mismo.

- SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)

Se designa con este nombre al Sistema de Unidades de Medida cuyo nombre y abreviación internacional (SI) ha sido designado por la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) en 1960.

El Sistema Internacional está integrado por tres clases de unidades: unidades de base, unidades suplementarias y unidades derivadas, las cuales, en su conjunto, forman un sistema coherente. También utiliza los prefijos SI para la formación de los múltiplos y submúltiplos decimales de estas unidades. (ver Tabla i.5)

- UNIDADES DE BASE

Son las unidades con las cuales se fundamenta la estructura del Sistema Internacional; en la actualidad son siete, correspondiendo a las magnitudes: longitud, masa, tiempo, intensidad luminosa y cantidad de sustancia, cuyos nombres son, respectivamente: metro, kilogramo, segundo, ampere, kelvin, candela y mol. (ver Tabla i.2)

- UNIDADES SUPLEMENTARIAS

Son las unidades con las cuales no se ha tomado una decisión de si pertenecen a las unidades de base o a las unidades derivadas; corresponden a las magnitudes de ángulo plano y de ángulo sólido y cuyos nombres, respectivamente son: radián y esterradián. (Tabla i.3)

- UNIDADES DERIVADAS

Son las unidades que se forman combinando las unidades de base o bien éstas y las suplementarias según expresiones algebraicas que relacionan las magnitudes correspondientes. Muchas de estas expresiones algebraicas pueden ser reemplazadas por nombres y símbolos especiales, los cuales pueden ser utilizados para la formación de otras unidades derivadas. (ver Tabla i.4)

De estas unidades derivadas del Sistema Internacional, resultan de aplicación para este trabajo las unidades de fuerza, de presión, de trabajo y energía y de potencia, cuyos nombres, respectivamente, son: newton, pascal, joule y watt. Las expresiones matemáticas que relacionan unidades de base para formar estas unidades derivadas son:

UNIDAD DE FUERZA (N)

La segunda ley de Newton establece que la magnitud de la aceleración (a) de un cuerpo es directamente proporcional a la magnitud de la resultante de las fuerzas que actúan sobre él (F_R). La constante de proporcionalidad es la masa (m) del cuerpo. Por tanto, la expresión que relaciona estas magnitudes es:

$$F_R = ma$$

Por lo tanto, la unidad de fuerza (N) del SI será igual al producto de la unidad de masa (kg) por la unidad de aceleración (m/s^2):

$$N = kg (m/s^2) = m \cdot kg \cdot s^{-2} \quad (i.1)$$

UNIDAD DE PRESIÓN (Pa)

La presión se define como la fuerza perpendicular que actúa, por unidad de área, sobre una superficie dada. De aquí que, la unidad de presión (Pa) sea igual al cociente que resulta de dividir la unidad de fuerza (N) entre la de área (m^2):

$$Pa = N/m^2 = Nm^{-2}$$

Sustituyendo el valor del newton, dado en la Ec. i.1, se tiene:

$$Pa = m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot m^{-2} = m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2} \quad (i.2)$$

UNIDAD DE TRABAJO Y ENERGÍA (J)

El trabajo ejecutado por una fuerza al actuar sobre un cuerpo a lo largo de una cierta trayectoria se define como el producto escalar de los vectores fuerza (F) y desplazamiento (s). Por lo que, la magnitud del trabajo está dada por:

$$W = F \cdot s \cdot \cos \theta$$

Por lo tanto, la unidad de trabajo (J), que es la misma que la de energía, será igual al producto de la unidad de fuerza (N) por la unidad de longitud (m) con la que se expresa el desplazamiento:

$$J = Nm$$

Tomando en cuenta el valor del newton expresado en la Ec. i.1, el valor del joule, expresado en función de las unidades de base es:

$$J = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \quad (i.3)$$

UNIDAD DE POTENCIA (w)

La potencia se define como la variación del trabajo ejecutado con respecto al tiempo de ejecución. Por tanto, la unidad de potencia (watt) es el cociente que resulta de dividir la unidad de trabajo (J) entre la de tiempo (s):

$$W = J/s$$

que, en función de las unidades de base del SI, tomando en cuenta la Ec. i.3, queda expresada por:

$$w = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$$

(i.4)

MAGNITUD	U N I D A D E S			OBSERVACIONES
	Nombre	Símbolo	Definición	
longitud	metro	m	es la longitud igual a $1\ 650\ 763.73$ longitudes de onda en el vacío, de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles $2p_1$ y $5d_5$ del átomo del kriptón 86.	11º CGPM de 1960 Resolución 6
masa	kilogramo	kg	es la masa igual a la del prototipo internacional del kilogramo.	3º CGPM de 1901
tiempo	segundo	s	es la duración de $9\ 192\ 631\ 770$ periodos de la radiación correspondiente entre los dos niveles hiperfinos del átomo de cesio 133.	13º CGPM de 1967 Resolución 1
intensidad de corriente eléctrica	ampere	A	es la intensidad de una corriente constante que mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y colocados en el vacío a una distancia de un metro uno del otro, producirá entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newtons por metro de longitud.	9º CGPM de 1948 Resolución 2
temperatura termodinámica	kelvin	K	es la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.	13º CGPM de 1967 Resol. 4
intensidad luminosa	candela	cd	es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hertz y cuya intensidad energética en esa dirección es $1/683$ watt por esteradián.	16º CGPM de 1979 Resolución 6
cantidad de sustancia	mol	mol	es la cantidad de sustancia que contiene tantas entidades elementales como existen átomos en 0.012 kg de carbono 12.	(*)

* Cuando se emplea la mol, las entidades elementales deben ser especificadas y pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones de otras partículas o de grupos específicos de tales partículas. 14º CGPM de 1971. Resolución 3

Tabla i.2 Unidades de base del Sistema Internacional SI

(Tomada de la Norma Oficial Mexicana)

MAGNITUD	U N I D A D E S			OBSERVA- CIONES
	Nombre	Símbolo	Definición	
ángulo plano	radián	rad	es el ángulo plano comprendido entre 2 radios de un círculo y que interceptan sobre la circunferencia de este círculo un arco de longitud igual a la del radio	Recomen- dación ISO-R31/1
ángulo sólido	esterradián	sr	es el ángulo sólido que teniendo su vértice en el centro de una esfera corta sobre la superficie de esta esfera una área igual a la de un cuadrado que tiene por lado el radio de la esfera	Recomen- dación ISO-R31/1

Tabla i.3 Unidades Suplementarias del Sistema Internacional

(Tomado de la Norma Oficial Mexicana)

MAGNITUD	UNIDADES		EXPRESION EN UNIDADES	
	Nombre	Símbolo	SI DE BASE	OTRAS
frecuencia	hertz	Hz	s^{-1}	
fuerza	newton	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$	
presión	pascal	Pa	$m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-2}$	N/m^2
trabajo, energía, cantidad de calor	joule	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	$N \cdot m$
potencia, flujo energético	watt	W	$m \cdot kg \cdot s^{-3}$	J/s
carga eléctrica, cantidad de electricidad	coulomb	C	$s \cdot A$	
potencial eléctrico, diferencia de potencial, tensión fuerza electromotriz	volt	V	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	W/A
capacidad eléctrica	farad	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	C/V
resistencia eléctrica	ohm	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	V/A
conductancia eléctrica	siemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$	A/V
flujo de inducción magnética, flujo magnético	weber	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	$V \cdot s$
densidad de flujo magnético, inducción magnética	tesla	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	Wb/m^2
inductancia	henry	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	Wb/A
flujo luminoso	lumen	lm	$cd \cdot sr$	
luminosidad	lux	lx	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$	lm/m^2
actividad nuclear	becquerel	Bq	s^{-1}	
dosis absorbida	gray	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$	J/kg

Tabla i.4 Unidades derivadas que tienen nombre especial

(Tomado de la Norma Oficial Mexicana)

PREFIJOS			
NOMBRE	SIMBOLO		FACTOR
peta	P	10^{18}	trillón
tera	T	10^{12}	billón
giga	G	10^9	mil millones
mega	M	10^6	millón
kilo	k	10^3	mil
hecto	h	10^2	cientos
deca	da	10	diez
deci	d	10^{-1}	décimo
centi	c	10^{-2}	centésimo
mili	m	10^{-3}	milésimo
micro	μ	10^{-6}	millonésimo
nano	n	10^{-9}	mil millonésimo
pico	p	10^{-12}	billonésimo
femto	f	10^{-15}	mil billonésimo
atto	a	10^{-18}	trillonésimo

Tabla i.5 Prefijos SI para la formación de múltiplos y submúltiplos decimales.

(Tomado de la Norma Oficial Mexicana)

I

ANALISIS TEORICO DEL CICLO OTTO

ANÁLISIS TÉCNICO DEL CICLO (TTP)

I.1 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA

La primera Ley de la Termodinámica es la aplicación del Principio de Conservación de la Energía. Establece que ésta es una magnitud que se conserva y se puede expresar como sigue: "La diferencia de energía que entra y sale de un sistema termodinámico, permanece en el mismo".

La energía transmitida a un sistema, o por un sistema, sólo puede ser en forma de calor o de trabajo. Sin embargo, se debe tomar una convención acerca de los signos asociados tanto a la energía que "llega" al sistema como a la que "sale" del sistema. Esto se representa en la Figura I.1.

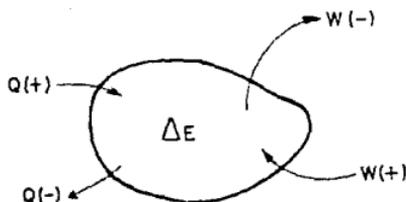


Figura I.1 Formas de transmisión de la energía y Convención de signos.

Recordando que: al aplicar una fuerza sobre un cuerpo cualquiera en la dirección de su movimiento, el trabajo se considera positivo y la energía del cuerpo aumenta y que, en cambio, si la fuerza aplicada es opuesta a la dirección del movimiento (tal es el caso de la fricción, ilustrado en la Figura I.2, que produce un calentamiento causando una transmisión de calor al medio ambiente), se considera positivo el trabajo entregado al sistema pues causa un aumento en la energía del mismo.

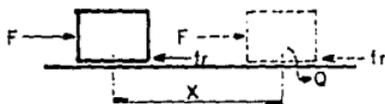


Figura I.2 El trabajo entregado al sistema es positivo

De acuerdo con lo anterior, la energía que llega a un sistema termodinámico la consideramos positiva y la que sale como negativa (Figura I.1)

De esta forma, la Primera Ley podrá expresarse como la suma algebraica:

$$\Delta E = Q + W \quad (I.1)$$

donde:

ΔE es la diferencia de energía que permanece en el sistema

Q es el calor transmitido al o del sistema

W es el trabajo transmitido al o del sistema

Debemos aclarar que el término E involucra a las tres manifestaciones de energía que ya conocemos: energía cinética (E_c), energía potencial gravitacional (E_p) y energía interna (U). Esto es:

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = Q + W \quad (I.2)$$

Ahora bien, si consideramos a un sistema cerrado estacionario (que no se mueve respecto a un cierto marco de referencia), los términos E_c y E_p serán nulos y la variación de energía será exclusivamente interna. Esto es:

$$\Delta U = Q + W \quad (I.3)$$

La Ec. I.3 es la expresión de la Primera Ley para sistemas cerrados estacionarios.

Para establecer la forma de la Ec. I.3 para aquellos sistemas estacionarios que realizan ciclos, consideraremos, por ejemplo, un sistema con variaciones de presión y volumen (Figura I.3).

Nos damos cuenta de que en el estado "i", el sistema tenía una energía U_i y al regresar al mismo estado tendrá necesaria y nuevamente U_i , por lo que el cambio de energía del sistema será nulo.

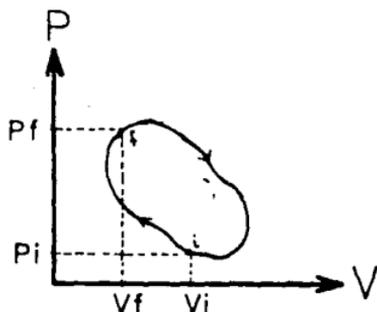


Figura I.3 Una masa de gas sufre variaciones de P y V desde sus valores iniciales hasta los finales, completando el ciclo al regresar a su estado inicial nuevamente

$$\Delta U = 0$$

$$\Sigma Q_{\text{ciclo}} = -\Sigma W_{\text{ciclo}} \quad (I.4)$$

integrando:

$$\oint \delta Q = -\oint \delta W$$

Finalmente, para concluir con esta breve exposición de la Primera Ley de la Termodinámica, deduciremos la expresión general que permite calcular el trabajo hecho por o sobre una sustancia simple compresible (gas). Así, consideremos la siguiente figura (Figura I.4), en la que una masa gaseosa está confinada en un sistema cilindro-pistón.

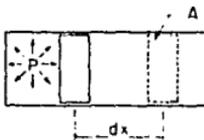


Figura I.4 Trabajo hecho por una sustancia simple compresible

Si el pistón se mueve es debido a que existe una fuerza por unidad de área actuando sobre él y es la que lo desplaza.

Sabemos que:

$$W = F \cdot x$$

y que:

$$P = F/A$$

luego entonces:

$$dW = P A dx = P dV$$

Pero, de acuerdo con nuestra convención de signos, el trabajo que sale de un sistema se considera negativo, por lo que el trabajo desarrollado por el gas, será:

$$dW = - P dV \quad (1.5)$$

integrando:

$$W = - \int P dV$$

I.2 GAS IDEAL

El gas ideal, también conocido como gas perfecto, es una idealización del comportamiento de los gases reales aunque éstos, en algunas condiciones de presión y temperatura, tienen un comportamiento ideal.

Se define al gas ideal como aquel cuyo comportamiento sigue de cerca las leyes de:

Boyle - Mariotte
Charles
Gay Lussac
Joule y
Avogadro

- Ley de Boyle-Mariotte.

"Si una masa de gas se mantiene a temperatura constante, la presión del gas es inversamente proporcional al volumen del mismo".

Esto es:

A temperatura constante:

$$P \propto 1/V$$

introduciendo una constante de proporcionalidad, C :

$$P V = C$$

- Ley de Charles (1746-1823).

"El volumen de un gas es directamente proporcional a su temperatura, cuando la presión de éste permanece constante".

A presión constante:

$$V \propto T$$

o bien:

$$V = C T$$

Existe un segundo enunciado de esta ley:

"Cuando el volumen de un gas permanece constante, la presión de éste es directamente proporcional a su temperatura":

A volumen constante:

$$P \propto T$$

o bien:

$$P = C T$$

- Ley de Gay Lussac (1778-1850).

Esta ley coincide con el segundo enunciado de Charles, de tal forma que se puede enunciar también como:

$$P = C T$$

Es preciso mencionar que, en estas tres leyes enunciadas anteriormente, se hace alusión a presiones y temperaturas ABSOLUTAS.

- Ley de Joule (1818-1889)

James Joule realizó un experimento que consistía en observar las variaciones de temperatura de un gas cuando éste se dejaba expandir libremente. De sus observaciones concluyó que: "La energía interna de un gas es función exclusivamente de su temperatura absoluta".

$$U = U(T)$$

- Ley de Avogadro (1776-1856)

El físico italiano Amadeo Avogadro estableció que: "A volúmenes iguales, temperaturas iguales y presiones iguales, todos los gases contienen el mismo número de moléculas".

A pesar de que esta ley no es exacta para gases reales, se acerca lo suficiente como para ser útil al igual que los principios anteriores.

De los procesos descritos en la siguiente figura I.5, encontramos las relaciones (a), (b) y (c) aplicando las leyes anteriormente enunciadas.

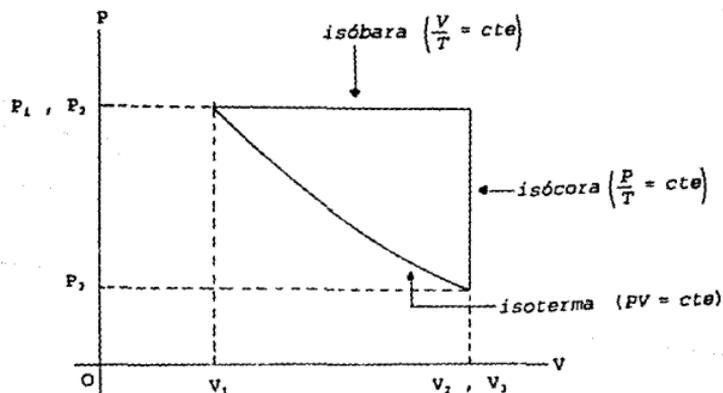


Figura I.5 Procesos isobárico, isométrico e isotérmico

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{y como} \quad P_1 = P_2 \quad - \quad \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (a)$$

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3} \quad \text{y como} \quad V_2 = V_3 \quad - \quad \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \quad (b)$$

$$P_1 V_1 = P_3 V_3 \quad \text{y como} \quad T_1 = T_3 \quad - \quad \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \quad (c)$$

De las relaciones (a), (b) y (c), se observa que:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3} = \text{cte.} \quad (I.6)$$

Es decir, el producto de la presión por el volumen entre la temperatura absoluta arroja siempre un mismo resultado, es decir, una constante.

El valor de dicha constante es función de la masa de gas con que se esté experimentando. Tomando el volumen de gas por unidad de masa, el resultado será independiente de la masa de gas con que se experimente, esto es:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3} = \text{cte.} = R \quad (I.7)$$

donde:

$$v = \frac{V}{m}$$

Siendo R la constante particular de cada gas, así pues R tendrá un valor específico para cada gas, por ejemplo:

$$R_{\text{aire}} = 286.7 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \quad R_{\text{O}_2} = 259.8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$R_{\text{CH}_4} = 519.6 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \quad R_{\text{N}_2} = 296.93 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} ; \text{ etc.}$$

Para verificar las unidades de esta constante (R), despejémosla de la ecuación de estado:

$$Pv = RT \quad - \quad R = \frac{Pv}{T} \quad [R] = \frac{Nm^3}{m^3 kg K} = \frac{Nm}{kg K} = \frac{J}{kg K}$$

La ecuación de gas ideal, considerando a cada gas en particular, se puede escribir como:

$$Pv = RT \quad (I.8)$$

o bien:

$$PV = mRT$$

Asociando ahora la ley de Avogadro con la ecuación de gas ideal, tenemos que si

$$P_A = P_B = P$$

$$V_A = V_B = V$$

$$T_A = T_B = T$$

entonces:

$$n_A = n_B = n$$

definiendo a n (número de moles) como la relación:

$$n = \frac{m}{M} \quad (I.9)$$

donde m es la masa del gas y M su peso molecular:

$$n = \frac{m_A}{M_A} = \frac{m_B}{M_B} \quad - \quad [n] = \frac{kg}{kg/kmol} = kmol$$

Aplicando la Ec. I.9 a la ecuación de estado de gas ideal:

$$PV = nMRT$$

o bien:

$$PV = n\bar{R}T \quad (I.10)$$

donde: $M\bar{R} = \bar{R}$ es la constante universal de los gases. El valor de esta constante es siempre el mismo para cualquier gas que se comporte idealmente.

Despejando \bar{R} de la Ec. I.10:

$$\bar{R} = \frac{PV}{nT} \quad [\bar{R}] = \frac{Nm^3}{m^2 kmolK} = \frac{Nm}{kmolK} = \frac{J}{kmolK}$$

Experimentalmente, encontramos que el valor de \bar{R} es:

$$\bar{R} = 8314 \frac{J}{kmolK}$$

Este valor de \bar{R} dependerá de las unidades en que se exprese.

Una vez conocidas las unidades SI que se utilizarán y las ecuaciones de estado para un gas ideal, será conveniente resumir las expresiones que el tratamiento de gas ideal arroja. Recordando que el trabajo efectuado por una sustancia simple compresible se calcula con:

$$w = -\int PdV$$

y que los calores específicos C_p y C_v se expresan respectivamente como:

$$C_p = \frac{dh}{dT} \quad C_v = \frac{du}{dT}$$

* para gases ideales

Aplicando la 1ª Ley:

$$\Delta U = Q + W$$

a) para el proceso isométrico (a volumen constante):

$$Q = mc_v \Delta T$$

$$W = \int PdV = 0 \quad \text{si } V = \text{cte} \quad ; \quad dV = 0$$

$$\Delta U = Q = mc_v \Delta T$$

b) para el proceso isobárico (a presión constante):

$$Q = mc_p \Delta T$$

dado que P es constante:

$$W = -\int PdV = -P\Delta V \quad (P = \text{cte.})$$

$$\Delta U = mc_p \Delta T - P\Delta V \quad U_2 - U_1 = mc_p(T_2 - T_1) - (PV_2 - PV_1)$$

$$\therefore (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1) = mc_p(T_2 - T_1)$$

$$H_2 - H_1 = Q_{12} \quad \Delta H = Q$$

c) para el proceso isotérmico (a temperatura constante).

Por la Ley de Joule que establece:

$$U = U(T)$$

$$\Delta U = 0$$

ya que si:

$$T = C$$

entonces:

$$U = C$$

La primera ley queda:

$$Q = -W = -\int PdV$$

como en este proceso:

$$PV = C$$

entonces:

$$P = \frac{C}{V}$$

$$W_{12} = -\int_1^2 \frac{C}{V} dV = -CL_n V \Big|_1^2$$

como:

$$C = P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \therefore \quad W_{12} = -P_1 V_1 L_n \frac{V_2}{V_1} = -P_2 V_2 L_n \frac{V_2}{V_1}$$

Así pues, tenemos:

$$Q_{1f} = -W_{1f} = -P_1 V_1 L_n \frac{V_f}{V_1}$$

$$Q_{1f} = -W_{1f} = -P_f V_f L_n \frac{V_f}{V_1}$$

d) Proceso adiabático (es aquel en el cual no existe transmisión de calor). También se le conoce como isentrópico ya que:

$$\Delta S = 0$$

efectivamente, si:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} \quad y \quad dQ = 0 \quad - \quad \Delta S = 0$$

Aplicando la 1ª ley:

$$dU = \delta W + \delta Q$$

como:

$$\delta Q = 0$$

entonces:

$$dU = \delta W$$

o sea:

$$mC_v dT = -PdV$$

de la ecuación de estado:

$$d(PV) = d(mRT)$$

$$PdV + VdP = mRdT \quad (a)$$

$$PdV = mRdT - VdP \quad (b)$$

de (a):

$$dT = \frac{PdV + VdP}{mR} \quad (c)$$

sustituyendo (b) en:

$$dU = \delta W$$

entonces:

$$mC_v dT = -mRdT + VdP$$

$$dT(mC_v + mR) = VdP$$

como:

$$R = C_p - C_v$$

$$dT(mC_p) = VdP$$

$$dT = \frac{VdP}{mC_p} \quad (d)$$

igualando (c) con (d):

$$\frac{PdV + VdP}{nR} = \frac{VdP}{mC_p}$$

o bien:

$$\frac{PdV + VdP}{C_p - C_v} = \frac{VdP}{C_p}$$

$$C_p PdV + C_p VdP = C_p VdP - C_v VdP$$

$$C_p PdV + C_v VdP = 0$$

haciendo:

$$k = \frac{C_p}{C_v}$$

(k se conoce como índice adiabático).

$$kPdV + VdP = 0$$

separando variables:

$$k \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0$$

integrando:

$$kL_n V + L_n P = L_n C$$

($L_n C$ es la constante de integración)

$$L_n P V^k = L_n C \quad \therefore \quad P V^k = C \quad (I.11)$$

Encontremos ahora una expresión que nos permita calcular el trabajo desarrollado por una sustancia simple compresible (gas ideal) en un proceso isentrópico:

$$W_{12} = -\int_1^2 PdV$$

como:

$$PV^k = C$$

entonces:

$$P = \frac{C}{V^k}$$

$$W_{12} = -\int_1^2 C \frac{dV}{V^k} = -\int_1^2 CV^{-k} dV$$

integrando:

$$W_{12} = -\left[\frac{CV^{-k+1}}{-k+1} \right]_1^2 = \left[\frac{CV^{-k+1}}{k-1} \right]_1^2$$

evaluando de 1 a 2 y como:

$$C = P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

$$W_{12} = \frac{P_2 V_2^k V_2^{-k+1} - P_1 V_1^k V_1^{-k+1}}{k-1}$$

$$W_{12} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{k-1}$$

En general:

$$W_{1f} = \frac{P_f V_f - P_i V_i}{k-1} \quad (I.12)$$

e) Proceso politrópico es aquel que cumple con la ecuación $PV^n=C$, o bien, $P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$ donde n se conoce como índice politrópico. Teóricamente, n puede tener cualquier valor entre $-\infty$ y $+\infty$ pero, en la práctica, el valor de n no difiere mucho del índice adiabático k .

Los procesos estudiados anteriormente pueden representarse con $PV^n = C$, dando los valores adecuados a n :

$$n = 0 \quad ; \quad PV^0 = C \quad ; \quad P = C$$

(proceso isobárico)

$$n = 1 \quad ; \quad PV^1 = C \quad ; \quad PV = C$$

(proceso isotérmico)

$$n = k \quad ; \quad PV^k = C$$

(proceso adiabático)

$$n = \infty \quad ; \quad PV^\infty = C \quad ; \quad V = C$$

(proceso isométrico)

Dada la analogía entre las ecuaciones $PV^n = C$ y $PV^k = C$, la obtención de la expresión del trabajo en un proceso politrópico es igual a la correspondiente al proceso adiabático:

$$W_{12} = \frac{P_f V_f - P_i V_i}{n-1} \quad (I.13)$$

De igual manera, las relaciones entre P, V y T en ambos procesos serán de la misma forma:

- Relación entre P y V

$$P_i V_i^n = P_f V_f^n \quad ; \quad \left(\frac{V_i}{V_f}\right)^n = \frac{P_f}{P_i} \quad \text{y} \quad \left(\frac{V_i}{V_f}\right)^k = \frac{P_f}{P_i} \quad (I.14)$$

- Relación entre P y T

De la Ec. I.14:

$$\frac{V_i}{V_f} = \left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{\frac{1}{n}}$$

y de la ecuación de estado para los estados inicial y final del proceso:

$$\frac{P_i V_i}{T_i} = mR \quad \frac{P_f V_f}{T_f} = mR$$

$$\frac{V_i}{V_f} = \frac{P_f}{P_i} \frac{T_i}{T_f}$$

$$\left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{P_f}{P_i} \frac{T_i}{T_f}$$

$$\left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{\frac{1}{n}-1} = \frac{T_i}{T_f} \quad \text{y} \quad \left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{\frac{1}{k}-1} = \frac{T_i}{T_f} \quad \dots \quad (I.15)$$

Veamos que sucede cuando $n \rightarrow \infty$:

$$\left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{-1} = \frac{T_i}{T_f}$$

o sea:

$$\frac{P_i}{T_i} = \frac{P_f}{T_f} = C$$

que corresponde a un proceso isométrico:

$$\dots \text{ cuando } n \rightarrow \infty : \quad V = C$$

- Relación entre V y T

De I.14 y de la ecuación de estado:

$$\frac{P_f}{P_i} = \left(\frac{V_i}{V_f}\right)^n \quad , \quad \frac{P_f}{P_i} = \frac{V_i}{V_f} \frac{T_f}{T_i}$$

igualándolas:

$$\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^n = \frac{V_i}{V_f} \frac{T_f}{T_i}$$

$$\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{n-1} = \frac{T_f}{T_i} \quad \text{y} \quad \left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{k-1} = \frac{T_i}{T_f} \quad \dots \quad (I.16)$$

En la Tabla I.1 se resumen las fórmulas y expresiones vistas en los anteriores procesos con gases ideales.

Proceso	ΔU	Q	W	ΔH	ΔS	Relaciones		
						P-V	P-T	V-T
Isométrico o Isocórico	$m C_v \Delta T$	$m C_v \Delta T$	0	$m C_p \Delta T$	$m C_v \frac{T_2}{T_1}$	$V = C$	$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_1}{T_1}$	$V = C$
Isobárico	$m C_p \Delta T$	$m C_p \Delta T$	$-P(V_2 - V_1)$	$m C_p \Delta T$	$m C_p \frac{T_2}{T_1}$	$P = C$	$P = C$	$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1}$
Isotérmico	0	-W	$-P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$ o $-P_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$	0	$m r \ln \frac{V_2}{V_1}$	$P_1 V_1 = P_2 V_2$	$T = C$	$T = C$
Adiabático o Isentrópico	$m C_v \Delta T$	0	$\frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{k - 1}$	$m C_p \Delta T$	0	$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^k = \frac{P_2}{P_1}$	$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{T_2}{T_1}$	$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \frac{T_2}{T_1}$
Politrópico	$m C_v \Delta T$	$\Delta U - W$	$\frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{n - 1}$	$m C_p \Delta T$	$m C_p \frac{T_2}{T_1}$	$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n = \frac{P_2}{P_1}$	$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n-1}} = \frac{T_2}{T_1}$	$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} = \frac{T_2}{T_1}$

Tabla I.1 Resumen de fórmulas de los diferentes procesos con gases ideales

I.3 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA

En la vida cotidiana se observa una gran cantidad de cambios que tienen lugar independientemente de la voluntad humana; puede decirse que ocurren por sí mismos de una manera incontrolable. Como ejemplo de estos procesos se pueden citar el de la fusión de un cubo de hielo colocado en una habitación a la temperatura ambiente, la solidificación de argamasa colocada en la intemperie, la caída de agua en una cascada, la igualación de temperaturas de dos cuerpos puestos en contacto con temperaturas diferentes originalmente, etc.

A todos estos procesos que ocurren a nuestro alrededor se les llama procesos naturales. Son tan comunes, que su observación no despierta el interés y casi nadie se pregunta, pasada la infancia, por que ocurren así y no de otra manera, es decir, por que tienen una dirección preferida. A nadie le causa sorpresa la caída de una pelota sobre una superficie dura, pues todo mundo sabe lo que ocurre, se escucha el sonido característico al hacer contacto con la superficie y se ve que la pelota rebota hacia arriba hasta alcanzar

una altura muy cercana a la altura desde donde cae. Dependiendo de la elasticidad de la pelota, continuará rebotando durante un tiempo más o menos prolongado, hasta que eventualmente quede inmóvil sobre la superficie dura. Si se levanta la pelota y se le deja caer nuevamente, se puede tener la certeza de que se sucederán los mismos pasos ya relatados, pues es lo que corresponde a la experiencia que se ha ido acumulando a fuerza de ver la caída de la pelota. Sin embargo, un hecho que sorprendería al observador sería el que una pelota comenzara a rebotar por sí misma, alcanzando alturas cada vez mayores hasta regresar a la altura desde donde se le ha dejado caer. Lo sorprendente del caso consiste en que nunca nadie lo ha visto ocurrir jamás. Aunque pensándolo bien, parece ser que no existe ninguna imposibilidad para que la pelota se comportara de esta manera, siempre y cuando cumpliera con el principio de la conservación de energía, uno de los más generales de la naturaleza.

El descubrimiento de que sí existe una razón que prohíbe el comportamiento de la pelota "rebelde", o los procesos contrarios a los citados anteriormente (como sería la formación de hielo a la temperatura ambiente a partir de agua líquida, el ablandamiento de arcamasa y su separación en agua, cal y arena, el paso de agua a lo alto de una cascada, el proceso de intercambio de energía entre dos cuerpos puestos en contacto para que sus temperaturas se hicieran cada vez más distintas, etc.) conduce a la formulación de la Segunda Ley de la Termodinámica.

MAQUINAS TERMICAS

La motivación que tuvieron los científicos del siglo XIX fue la de comprender y perfeccionar el funcionamiento de la maquinaria necesaria para obtener trabajo mecánico a partir de calor.

Estas maquinarias reciben el nombre de máquinas térmicas y se pueden definir de una manera general como aquellos sistemas que operan cíclicamente y por cuyas fronteras solamente circulan calor y trabajo. Con la finalidad de simplificar el análisis, conviene definir un depósito térmico como un sistema que es incapaz de efectuar o de recibir trabajo, que mantiene una temperatura constante en toda su extensión y que cuenta solamente con la transmisión de calor para interaccionar con otros sistemas. Debido a la Primera Ley de la Termodinámica, esta transmisión de calor es igual al incremento de la energía interna del sistema. Un ejemplo de tales depósitos térmicos es la atmósfera, capaz de intercambiar grandes cantidades de calor sin cambiar su temperatura apreciablemente.

La máquina térmica contiene una sustancia de trabajo o agente de transformación que sufre cambios cíclicos; toma calor de una fuente externa, convierte una parte en trabajo y cede el resto a un depósito exterior.

Para una máquina térmica cualquiera se tendrán tres cantidades:

el calor suministrado al agente de transformación (Q_A), el trabajo entregado por el agente de transformación (W) y el calor rechazado por el agente de transformación (Q_B). Con estas magnitudes se puede definir un concepto muy útil para conocer la habilidad de la máquina en su misión de transformar calor en trabajo: la eficiencia térmica.

$$\eta = \frac{W}{Q_A}$$

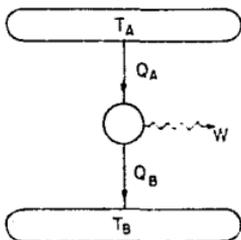


Figura I.6 Máquina térmica

Aplicando la 1ª ley a este sistema:

$$Q_A - Q_B - W = 0$$

$$Q_A - Q_B = W$$

$$\eta = \frac{W}{Q_A} = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} \quad (I.17)$$

Esta conclusión es la que, precisamente, contempla la 2ª Ley de la Termodinámica en el enunciado de Kelvin-Planck: "No es posible la existencia de ningún dispositivo que, operando cíclicamente, tenga como único propósito la conversión total de calor en trabajo mecánico".

Esto es:

$$\eta < 100\%$$

I.4 CICLO DE OTTO

Como ya se mencionó anteriormente, este ciclo fue llevado a la práctica por Nikolaus A. Otto en 1876, basado en las ideas del francés Beau de Rochas. Posteriormente, en 1881 apareció una máquina basada en el mismo ciclo, pero que utilizaba sólo 2 tiempos o carreras) no corresponden necesariamente a los procesos termodinámicos del ciclo.

Para comprender como opera una máquina de ciclo Otto observaremos la siguiente Figura (I.7) y describiremos la operación del mecanismo:

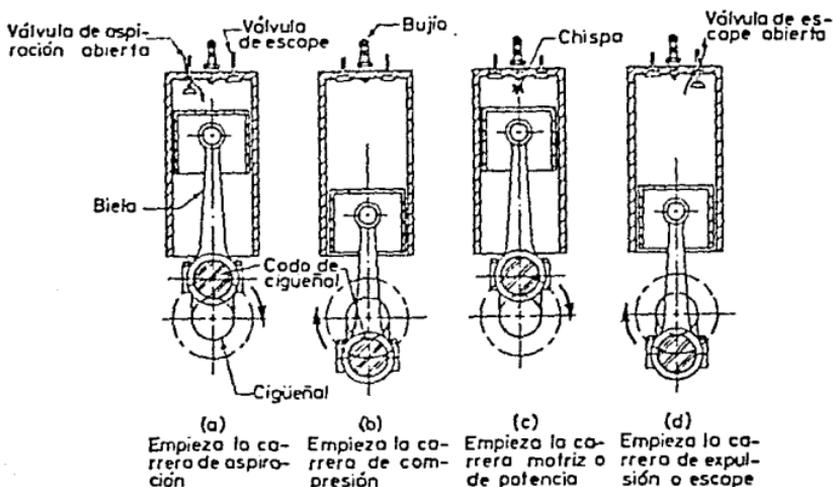


Figura I.7 Máquina de 4 tiempos o carreras que se opera con un ciclo Otto

1. Se abre la válvula de admisión para permitir el paso a la mezcla aire-combustible, simultáneamente el émbolo o pistón inicia la carrera de aspiración desde el punto muerto superior (P.M.S.) hasta

el punto muerto inferior (P.M.I.). Este es un evento mecánico, ya que el gas introducido a la cámara de combustión no modifica sus propiedades termodinámicas (densidad, presión, temperatura, etc.)

2. Una vez que ha concluido la carrera de aspiración, se cierra la válvula de admisión y se inicia la carrera de compresión desde el P.M.I. hasta el P.M.S. Este es el primer proceso termodinámico, que viene a ser una compresión adiabática la que, por ser tan rápida, no da tiempo a que se establezca la transmisión de calor y por tanto, no existe flujo de calor.

3. Cuando el émbolo llega al P.M.S., salta la chispa de la bujía, incendiando la mezcla aire-combustible. Este es el segundo proceso termodinámico, el cual consiste en una transmisión de calor al sistema cuando el gas mantiene su volumen constante.

4. Después de que se ha encendido la mezcla aire-combustible y se han elevado la presión y la temperatura, se inicia la carrera de potencia desde el P.M.S. hasta el P.M.I. Este es el tercer proceso termodinámico, que es esencialmente una expansión adiabática.

5. Cuando el émbolo ya se encuentra en el P.M.I., se abre la válvula de escape dando lugar a un descenso de la presión y la temperatura del sistema. Este es el cuarto proceso termodinámico que viene a ser una transmisión de calor al medio ambiente, manteniéndose constante el volumen del sistema.

6. Una vez abierta la válvula de escape, se inicia la carrera de barrido o expulsión de los gases productos de la combustión. Este es un evento mecánico, ya que no existen modificaciones de las propiedades del gas. Concluida esta carrera, se inicia nuevamente el ciclo.

Como se podrá observar, efectivamente los tiempos o carreras no corresponden estrictamente a los procesos termodinámicos del ciclo.

En la Figura 1.8, podemos ver este ciclo representado en los planos V-P (volumen-presión) y S-T (entropía-temperatura).

1-2	Compresión adiabática	(suministro de trabajo)
2-3	Combustión a volumen constante	(suministro de calor)
3-4	Expansión adiabática	(realización de trabajo)
4-1	Transmisión de calor a volumen constante	(transmisión de calor al medio-ambiente)

Consideraremos que los procesos termodinámicos de este ciclo son reversibles de aquí que el 1-2 y el 3-4 son isentrópicos.

El diagrama V-P representa el trabajo que entrega el sistema en la carrera de expansión o de potencia (proceso 3-4), menos el trabajo entregado al sistema mediante la carrera de compresión (proceso 1-2). Esto es, el área encerrada por los procesos 1-2, 2-3, 3-4, 4-1 será el

trabajo neto que desarrolla el sistema por ciclo.

Análogamente en el diagrama S-T, el área encerrada por el ciclo representa el calor "aprovechado" por el sistema para ser convertido en trabajo.

En los ciclos ideales que se analizan aquí, se supone que la sustancia de trabajo es un gas ideal y no una mezcla aire-combustible como ocurre en la realidad.

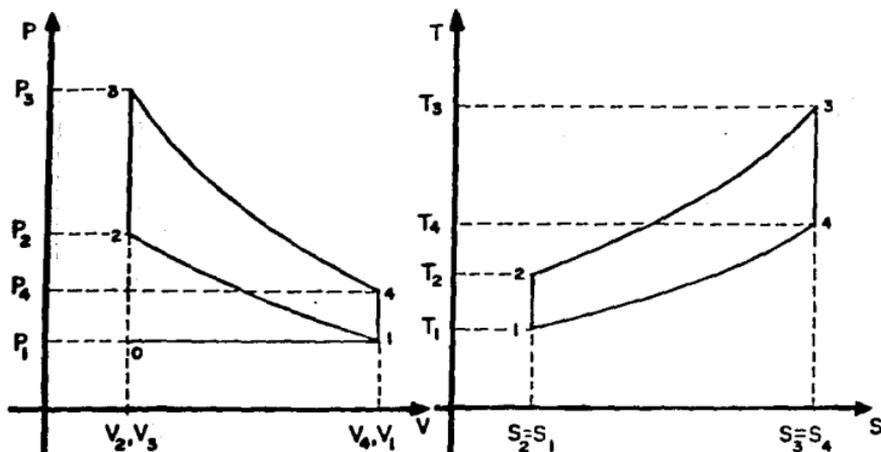


Figura I.8 Diagramas volumen-presión y entropía-temperatura. de un ciclo Otto ideal

A continuación examinando los procesos del ciclo, pretenderemos encontrar una expresión que nos permita calcular la eficiencia térmica del mismo.

De acuerdo con la Figura (I.9):

$$W = Q_A - Q_B$$

ya que haciendo un balance de energía:

$$Q_A - Q_B - W = 0$$

además, como ya es conocido:

$$\eta = \frac{\text{trabajo generado}}{\text{energía suministrada}} = \frac{\text{trabajo neto}}{\text{calor suministrado}}$$

$$\eta = \frac{W_n}{Q_A} = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A} = 1 - \frac{Q_B}{Q_A}$$

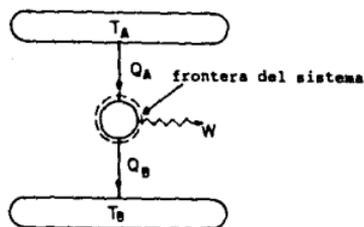


Figura I.9 Motor a gasolina

ahora haciendo referencia a la Figura (I.8):

$$\frac{Q_B}{Q_A} = \frac{mC_V (T_4 - T_1)}{mC_V (T_3 - T_2)} = \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

y tomando la relación entre T y V para un proceso adiabático, (tabla I.1):

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1} \quad \text{y} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1}$$

como:

$$V_3 = V_2 \quad \text{y} \quad V_4 = V_1 \quad - \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3}$$

por tanto:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1} = 1 - \frac{1}{r_c^{k-1}}$$

recordando que la relación de compresión r_c es V_1/V_2 , y el índice adiabático k es C_p/C_v , podemos ver que mientras más se aumenta la relación de compresión, más eficiente es el ciclo. Esto ha

conducido a producir motores con una relación de compresión más alta, sin embargo, se presenta el problema de la autoignición del combustible, debido a que alcanza temperaturas y presiones muy altas. Lo anterior lo podremos ver en la Figura I.10.

En la máquina real existen numerosas irreversibilidades como la inevitable fricción del émbolo con las paredes del cilindro y la transmisión de calor en los procesos de compresión y expansión.

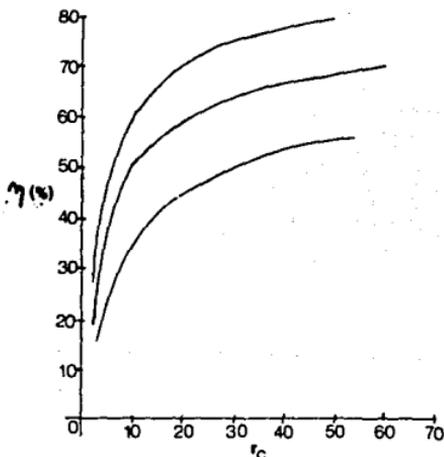


Figura I.10 Eficiencia de un ciclo Otto en función de la relación de compresión y el índice adiabático

II

PARTES DE UN MOTOR Y SU FUNCIONAMIENTO

PIEZAS DEL MOTOR Y SU FUNCIONAMIENTO

II.1 FUNCIONAMIENTO BASICO

Han transcurrido unos setenta años desde que el motor de combustión interna (Figura II.1) hizo su primera proclama como una fuente de energía. Durante estos años el motor de combustión ha reemplazado con largueza al motor de vapor y, en la actualidad, solamente la turbina de vapor es comparable con él en lo que a la cantidad de energía producida se refiere. El progreso del mundo ha sido influido, en gran parte, por este tipo de motor y en el campo de la aviación no se ha encontrado todavía un sustituto satisfactorio. Actualmente, la construcción de motores de combustión interna para automóviles, lanchas, aeroplanos y trenes, lo mismo que para pequeñas plantas de energía, constituye una de las más grandes industrias en el mundo.

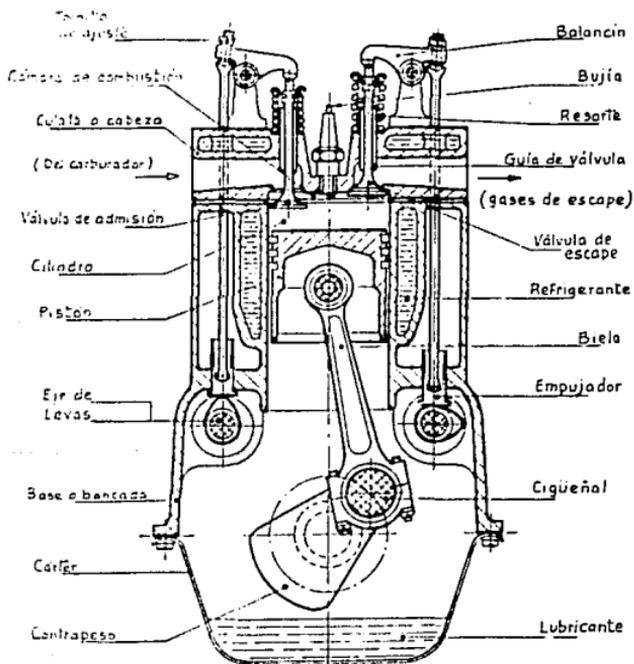


Figura II.1 Motor de combustión interna

En un motor de combustión externa los productos de la combustión del aire y el combustible le transfieren calor a un segundo fluido, el cual se convierte en el fluido motriz o elemento productor del trabajo. En un motor de combustión interna los productos de la combustión son, directamente, el fluido motriz. Debido a este rasgo simplificador y al alto rendimiento térmico resultante, el motor de combustión interna es una de las unidades generadoras de trabajo más ligeras (en peso) que se conocen y, por lo mismo, su mayor campo de aplicación es en la transportación.

II.2 EL MOTOR DE CUATRO CARRERAS

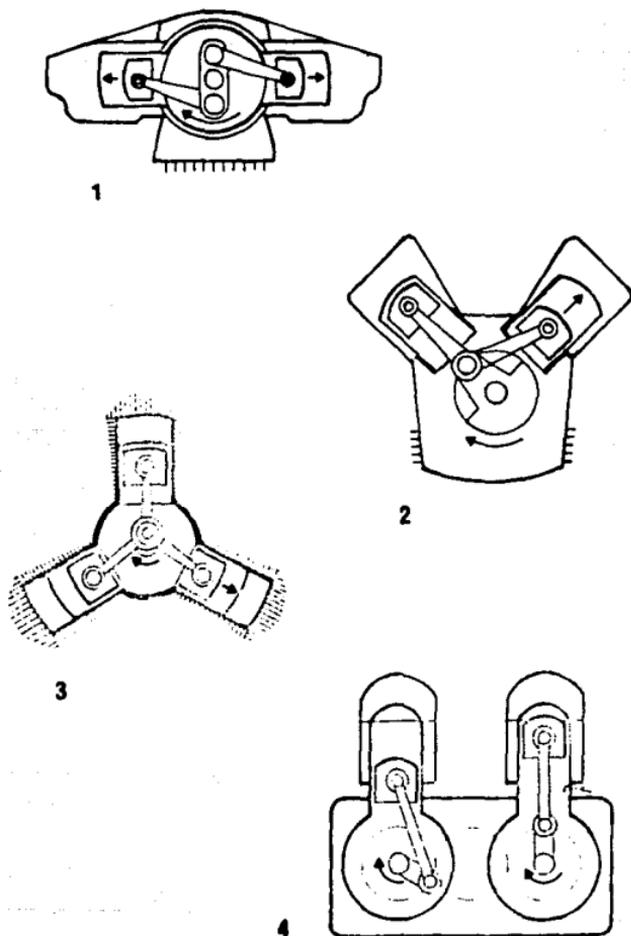
La mayoría de los motores de combustión interna utilizan el principio del émbolo reciprocante, mostrado en la figura II.2, según el cual, un émbolo se desliza dentro de un cilindro, hacia atrás y hacia adelante y transmite fuerza a la flecha motriz, por lo general, mediante un simple mecanismo de biela y manivela (Figura II.3).

En 1862, Beau de Rochas propuso la secuencia de funcionamiento para el motor de émbolo reciprocante, que aún hoy en día es típica de la generalidad de los motores encendidos por chispa (ECH), (Figura II.4).

En todos los motores de émbolo reciprocante, éste llega necesariamente a una completa inmovilidad, en dos posiciones particulares del cigüeñal antes de invertir la dirección de su movimiento. En la Figura II.5 el émbolo ha pasado precisamente del límite inferior de su carrera; a esta posición se le llama punto muerto inferior (PMI). Existe una posición "muerta" semejante, o etapa sin movimiento del émbolo, en el instante en que éste llega al punto muerto superior (PMS). Debido a esta posición "muerta", la combustión de la mezcla en el motor Otto ocurre prácticamente a volumen constante. En vista de que la carrera de potencia sólo existe en una parte del tiempo total del ciclo, se emplea un volante para hacer uniformes dichos impulsos, obteniendo así, esencialmente una rotación uniforme del cigüeñal (Figura II.6)

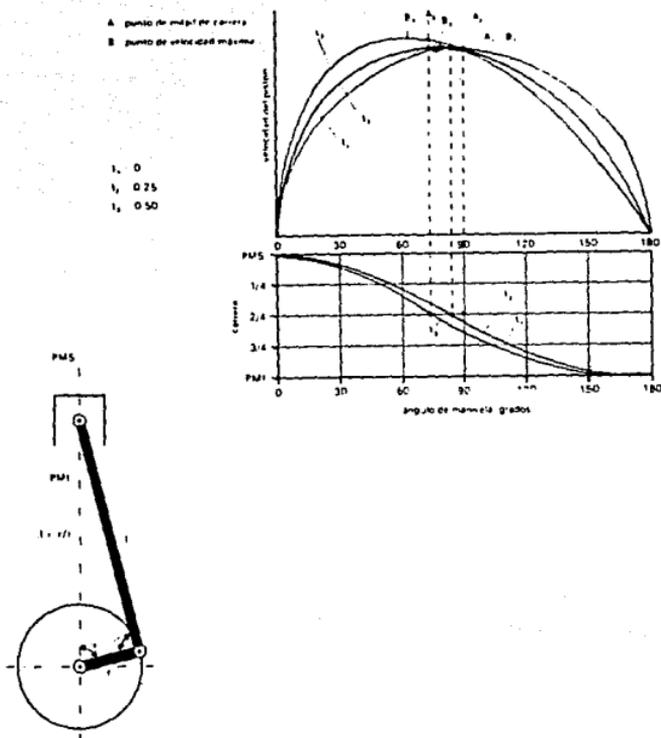
II.3 CONTROL DE LA VELOCIDAD Y DE LA CARGA EN LOS MOTORES ECH

Como una chispa puede encender solamente a una mezcla combustible, si se desea que la llama se propague a través de ella deberán estar presentes, en toda la cámara de combustión, las cantidades de aire y combustible en una proporción razonablemente definida y homogénea, (aproximadamente 15 partes de aire por una de combustible, en masa). Un carburador es el medio usual para obtener la relación aire/combustible.



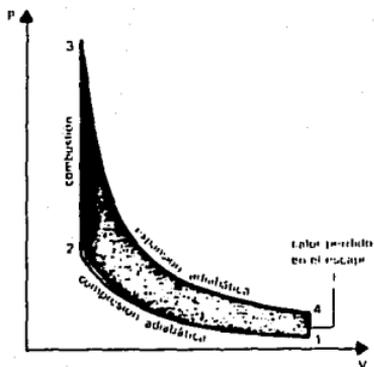
El carácter ascendente (y descendente) de la carrera no puede influir la posición del motor y es variable según la distribución de los cilindros. En la figura se muestran cuatro ejemplos de ello: 1, cilindros en horizontales y opuestos (boxer); 2, cilindros en V; 3, distribución en estrella, con número impar de cilindros; 4, cilindros en línea para bimotores. Las flechas en negro indican los pistones que están realizando la carrera ascendente, según el sentido de giro indicado.

Figura II.2 Principio del émbolo recíprocante



El movimiento de un pistón unido a un mecanismo biela-manivela no es perfectamente armónico, sino que está condicionado por la relación $\lambda = r/l$. Las 3 líneas de los gráficos muestran los espacios recorridos y las velocidades del pistón, en función del ángulo de la manivela para 3 valores de λ , de los cuales los extremos son teóricos (el valor $\lambda = 0$ corresponde a una biela de longitud infinita, condición para que el movimiento sea perfectamente armónico, y $\lambda = 0.5$ corresponde a una biela de longitud igual a la carrera), mientras que $\lambda = 0.25$, es un valor que se aproxima a los que se usan normalmente. Es interesante comprobar que al aumentar progresivamente λ se obtiene un incremento de la velocidad máxima (que se alcanza en el instante en que $\alpha = 90^\circ$) y un avance del instante en que el pistón alcanza el punto de la mitad de carrera (correspondiente a la configuración en que $\alpha = \beta$).

Figura II.3 Mecanismo biela-manivela



Transformaciones termodinámicas que se producen durante el ciclo ideal de Beau de Rochas. El área comprendida por el ciclo (área oscura) representa el trabajo útil y es la diferencia entre el trabajo obtenido por la expansión y el necesario para comprimir el fluido.

Figura II.4 Ciclo de Beau de Rochas

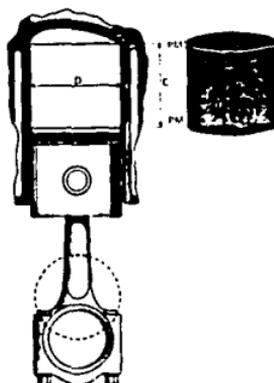


Figura II.5 Carrera del émbolo recíprocante

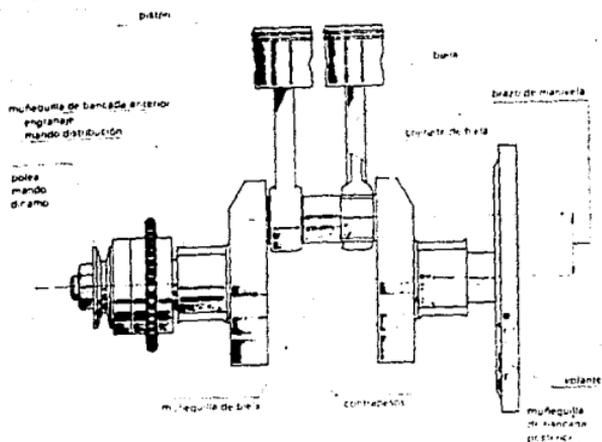
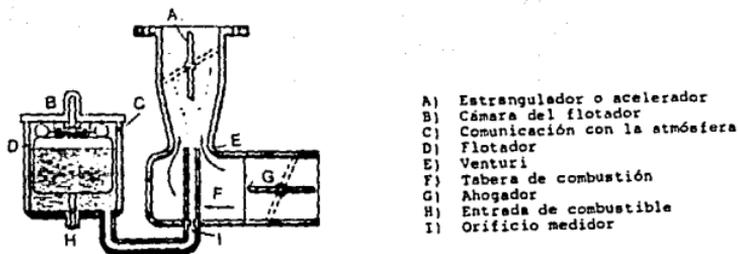


Figura II.6 Nomenclatura del cigüeñal

CARBURADOR SIMPLE

En la Figura II.7 se ilustran las partes básicas de un carburador simple: un venturi, una tobera para combustible con orificio medidor, un recipiente para combustible en la cámara del flotador, un acelerador y un ahogador. Cuando el émbolo desciende en la carrera de admisión, aspira aire a través del venturi, aire que está a la presión atmosférica, aproximadamente. Debido al pequeño diámetro en la garganta del venturi, aumenta la velocidad del aire y por lo mismo disminuye su presión. Pero la presión en el extremo de la tobera, también es menor que la presión (atmosférica) dentro de la cámara del flotador. Por esta diferencia de presiones, el combustible es pulverizado dentro de la corriente de aire, en una cantidad tal que es determinada por el tamaño del orificio medidor. Nótese que si aumenta la velocidad del motor, aumenta la cantidad de aire aspirado a través del venturi y, por lo mismo, se crea mayor caída de presión y proporcionalmente se pulveriza mayor cantidad de combustible, en el seno de la corriente de aire. En consecuencia, un carburador es hábil para mantener una relación aire/combustible aproximadamente constante en toda la amplitud de velocidades posibles del motor.



- A) Estrangulador o acelerador
- B) Cámara del flotador
- C) Comunicación con la atmósfera
- D) Flotador
- E) Venturi
- F) Tobera de combustión
- G) Ahogador
- H) Entrada de combustible
- I) Orificio medidor

Figura II.7 Elementos de un carburador simple, de succión ascendente

El esfuerzo de giro aplicado al cigüeñal depende de la masa de la mezcla quemada en cada cilindro, por ciclo, y se controla restringiendo la cantidad de mezcla (pero no necesariamente la relación aire/combustible), que entra al cilindro en la carrera de admisión. Esto se consigue mediante el empleo, en el carburador, de una válvula llamada estrangulador o acelerador, para obstruir el paso hacia el múltiple de admisión (Figura II.8). En la carrera de admisión, si el acelerador está casi cerrado, entrará al cilindro solamente una pequeña cantidad de mezcla y la presión dentro de él estará muy por debajo de la atmosférica, con las correspondientes presiones de compresión y combustión, también bajas. La velocidad resultante del motor será lenta y si el cigüeñal no está acoplado a una carga externa, se dice que el motor está en vacío. Cuando el acelerador se abre gradualmente, la velocidad del motor irá aumentando hasta un valor determinado por la carga externa acoplada a la flecha motriz. (La carga es un freno opuesto a la rotación de la flecha y puede ser suministrada, por ejemplo, por la resistencia de las ruedas motrices de un vehículo sobre la carretera o bien, por la resistencia de una hélice girando en el agua o en el aire.) Por lo tanto, la velocidad del motor se controla mediante las posiciones del estrangulador o acelerador y por la magnitud de la carga. Puede mantenerse una velocidad definida variando la posición del estrangulador con relación a la carga; o pueden obtenerse diferentes velocidades manteniendo constante la posición del estrangulador y haciendo variaciones en la carga.

El ahogador permite al motor recibir una cantidad adicional de combustible (mezcla "rica") para el arranque, cuando está frío. Nótese que al cerrar el ahogador, la succión del motor se ejerce directamente en la tobera del combustible, mientras que se restringe la entrada del aire.

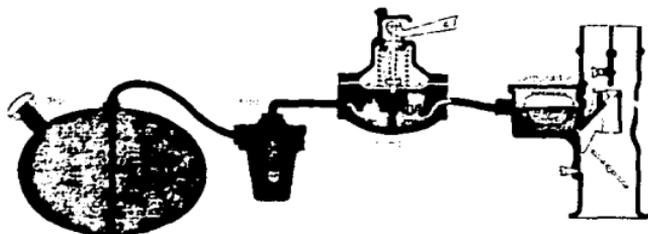


Figura II.8 Sistema de alimentación en un carburador típico

CARBURADOR DE VENTURI VARIABLE

El principio de este carburador es el disponer de un difusor de sección variable con el fin de mantener una elevada velocidad del aire, incluso con el motor funcionando a bajo régimen. El combustible que fluye por el surtidor principal lo hace en forma de gotas que tienen menor tamaño cuanto mayor es la velocidad del aire. Precisamente ésta es una de las finalidades del carburador de venturi variable: el disgregar el combustible en pequeñas gotas, con las ventajas que esta disgregación proporciona, entre las que cabe destacar: rápida gasificación, homogeneización y menor inercia del combustible.

Por otra parte, el surtidor de combustible suele ser también de sección variable, gracias a una aguja cónica que se introduce en mayor o menor proporción en el surtidor.

Muchos fabricantes (Weber, Ford, Holley, etc.) están investigando en este campo y, con algunas realizaciones prácticas, se han conseguido reducciones importantes en la emisión de monóxido de carbono e hidrocarburos sin quemar, manteniendo el consumo específico y los óxidos de nitrógeno.

CARBURADOR SONICO

El carburador sónico es un carburador en forma de tobera convergente-divergente y de sección variable. Está diseñado de tal forma que en la garganta se alcanzan las condiciones críticas, es decir, la velocidad del sonido. Su funcionamiento es estable a partir de depresiones del orden de 10 mm de Hg. Como se representa en la Figura II.9, el combustible es suministrado por un distribuidor mandado mecánicamente. En la parte divergente de la tobera se alcanzan velocidades supersónicas, pero diseñado para que haya una sobreexpansión aparece una honda de choque plana. Las altas

velocidades y la onda de choque provocan la ruptura de las gotas de combustible (diámetros del orden de $10\ \mu\text{m}$) y generan una cierta turbulencia en la mezcla. El carburador sónico no equipa mariposa, controlándose el flujo de aire al variar la sección.

Con carburadores de este tipo y diseños adecuados de los colectores de admisión se ha logrado funcionar satisfactoriamente con relaciones aire/combustible relativas del orden de 1.33. En motores convencionales, funcionando con carburadores sónicos, se han obtenido disminuciones de consumo del orden de un 10%, con reducciones importantes en la emisión de NO_x y CO , pero a costa de elevar, incluso en un 50%, la emisión de HC.

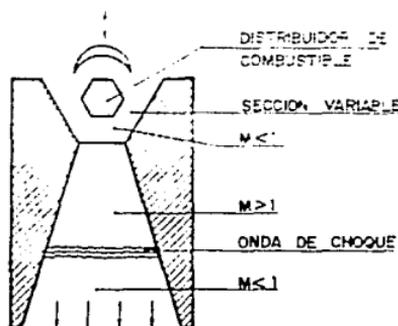


Figura II.9 Carburador sónico

CARBURADOR ULTRASONICO

La finalidad del carburador ultrasónico es la disgregación del combustible en pequeñas gotas. Para ello (ver Figura II.10) el combustible se inyecta sobre una superficie que vibra con elevada frecuencia, del orden de 20 a 40 kHz. El chorro de combustible, al incidir sobre la superficie vibrante, se fracciona en gotas de pequeño diámetro, debido a la agitación mecánica.

Este tipo de carburador, desarrollado por la Universidad Técnica de Florida, ha mostrado en algunas pruebas una reducción en la emisión de contaminantes e incluso una disminución del consumo específico.

Una gran ventaja de un sistema de este tipo es que funciona con independencia de la temperatura, por lo que en frío tiene la misma capacidad para disgregar el combustible que en caliente. Sin embargo presenta graves inconvenientes, como son su complejidad, vida

operativa, costo, ruido (puesto que el margen de frecuencias es audible) y, finalmente, que absorbe gran potencia.

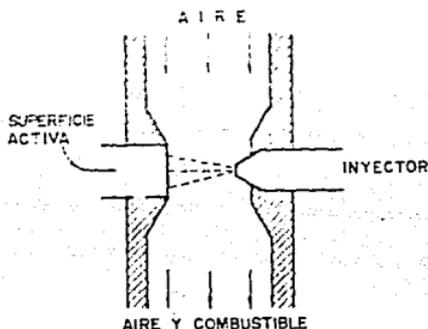


Figura II.10 Carburador ultrasónico

INYECCION DE COMBUSTIBLE

Los tres tipos de carburadores anteriores existen a nivel de prototipo o bien equipando pequeñas series de automóviles, pero su uso no está extendido. La inyección de combustible, sin embargo, se viene utilizando desde hace casi treinta años. En un principio, al equipar un motor de combustión interna alternativo con un sistema de inyección, se buscaba un aumento de potencia específica. Los automóviles que equipaban estos dispositivos solían ser los de mayor precio dentro de la gama de cada fabricante. En los últimos años, los fabricantes se han planteado la extensión de la inyección a vehículos de inferior categoría para dar respuesta a las reglamentaciones sobre contaminación. Así, en 1977, más del 16% de los vehículos fabricados equipaban un sistema de inyección.

La esencia de los sistemas de inyección es adecuar en todo momento la cantidad de combustible inyectado a las necesidades del motor. Para ello se miden una serie de parámetros que afectan a las necesidades de la relación aire/combustible, que son procesadas en un microordenador que envía al inyector una señal para que éste inyecte una mayor o menor cantidad de combustible.

Los sistemas de inyección se han desarrollado gracias a tres fabricantes: Robert Bosch, en Alemania; Bendix Corp., en Estados Unidos y Lucas, en el Reino Unido.

Los sistemas de inyección de combustible Bosch son los más extendidos en la Europa continental y tal vez sea este fabricante el

que más esfuerzo ha hecho en lo que se refiere a la contaminación. Por estas razones hemos elegido el sistema «L-Jetronic» de este fabricante como representativo de los equipos de inyección de combustible.

El sistema «L-Jetronic», representado esquemáticamente en la Figura II.11 es un sistema de inyección intermitente con control electrónico. El inyector principal está situado en las proximidades de la válvula de admisión y recibe el combustible de una boma a una presión de unos dos bares, con un regulador de presión para amortiguar las pulsaciones. La apertura del inyector se efectúa por medio de una aguja controlada por una bobina que recibe la señal de un falso distribuidor montado en el propio delco. El recorrido de la aguja es de 15 centésimas de milímetro y el tiempo de apertura oscila entre dos y diez milésimas de segundo.

La señal más importante es, sin duda, la que manda el medidor de caudal de aire. El principio del medido de caudal está representado en la Figura II.12. Una mariposa rectangular está situada en el conducto de admisión y tiene un muelle antagonista de constante baja. Una segunda mariposa sirve para amortiguar las pulsaciones que el aire induce en la primera.

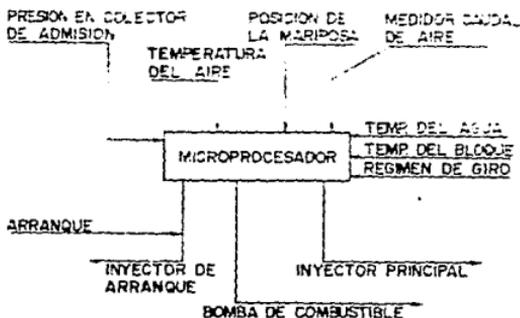


Figura II.11 Sistema L-Jetronic

La conversión de la posición angular en una señal eléctrica se efectúa por medio de un potenciómetro. Este caudalímetro está construido de tal forma que existe una relación logarítmica entre el ángulo de la mariposa y el caudal de aire. El sistema presenta el inconveniente de medir caudales de aire, mientras que el parámetro realmente importante para una correcta dosificación de combustible es el gasto de aire. Por esta razón, en Bosch se trabaja sobre un nuevo sistema para medir el gasto de aire, que consiste en introducir

un fino alambre de platino en forma de V en el conducto de admisión una vez pasado el filtro. Este hilo se calienta eléctricamente, mientras que el aire que circula tiene tendencia a enfriarlo, siendo la cantidad de calor absorbida por el aire proporcional a la masa que circula por unidad de tiempo. La medida real de esta sonda de platino es la intensidad que es preciso aplicar para mantener constante la temperatura del hilo.

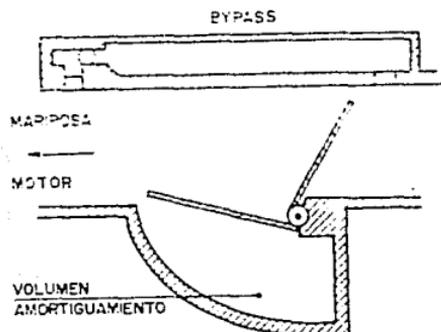


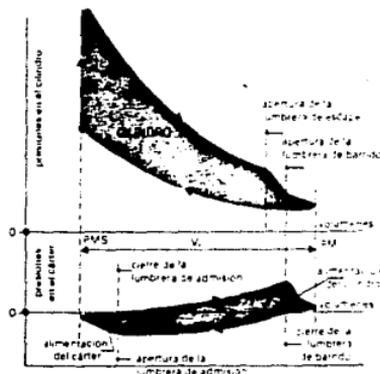
Figura II.12 Esquema del medidor de caudal del sistema L-Jetronic

La utilización del control electrónico para regular la relación aire/combustible que entra al motor plantea en la actualidad una gran controversia. Los defensores de esta solución destacan la reducción en las emisiones de HC y CO. Sin embargo, el consumo específico es similar al ofrecido por un carburador convencional y, en cambio, su utilización plantea el grave problema del costo; la extensión de su utilización está condicionada a la severidad de las leyes anticontaminación y a una eventual reducción de precio. En su favor hay que decir que en un informe de la Oficina Federal Americana del Medio Ambiente elaborado en 1976, en algunos vehículos equipados precisamente con el sistema «L-Jetronic», la emisión de contaminantes se encontraba por debajo de los estrictos límites que se aplicarán en 1982, y eso sin utilizar ningún dispositivo adicional, como catalizador de escape o bomba de inyección de aire en el escape.

II.4 EL CICLO DE DOS CARRERAS

El ciclo de cuatro carreras requiere dos revoluciones del cigüeñal por cada carrera de potencia. Con objeto de tener un mayor rendimiento con el mismo tamaño de motor y también una simplificación en las válvulas, fue diseñado por Dugald Clerk en 1878, el ciclo de

dos carreras (Figura II.13). Este ciclo es aplicable tanto al motor encendido por compresión como al encendido por chispa. Al principio, solamente tuvo éxito con el primero.



En los motores de dos tiempos el ciclo se completa con sólo 2 carreras del pistón, es decir, en una vuelta del cigüeñal. Durante la carrera ascendente se producen: la terminación del barrido, la compresión y la entrada de la mezcla fresca en el cárter. Durante la carrera descendente se producen: la expulsión y la expansión, la compresión de la mezcla fresca en el cárter, el escape espontáneo de los gases quemados y la entrada de mezcla fresca en la cámara de combustión a través de las lumbreras de barrido.

Figura II.13 Ciclo de 2 carreras

Refiriéndose a la Figura II.14, en el PMS se tiene el atomizado del combustible en el seno del aire caliente comprimido, o bien, el encendido por chispa de una mezcla de vapores que inician la combustión y liberan la energía para la carrera de potencia que es la siguiente. Próximo al final de esta carrera, el émbolo descubre una lumbrera o abertura en las paredes del cilindro en B, pasando la mayoría de los productos de la combustión al múltiple de escape. Inmediatamente después, en la carrera, es descubierta por el émbolo una segunda lumbrera en A siendo forzado hacia el interior del cilindro, ya sea aire o la mezcla gasolina-aire. Esto es un ejemplo del barrido cruzado. Se incorporan al émbolo unos deflectores para evitar que la carga admitida pase de largo a través del cilindro hasta el múltiple de escape a medida que el resto de los gases quemados están siendo barridos (extraídos) del cilindro. La carrera de regreso del émbolo es la carrera de compresión del ciclo. Debe notarse que todo el ciclo se completa en una sola revolución del cigüeñal.

Si las lumbreras de admisión se colocan próximas, en lugar de

opuestas a las de escape, el aire admitido deberá describir un "lazo" completo antes de llegar al conducto de escape; esto se llama barrido de lazo. En la Figura II.15, la combinación de válvulas de escape en la cabeza y lumbreras de admisión en el cilindro, permite obtener el barrido continuo o de flujo unidireccional.

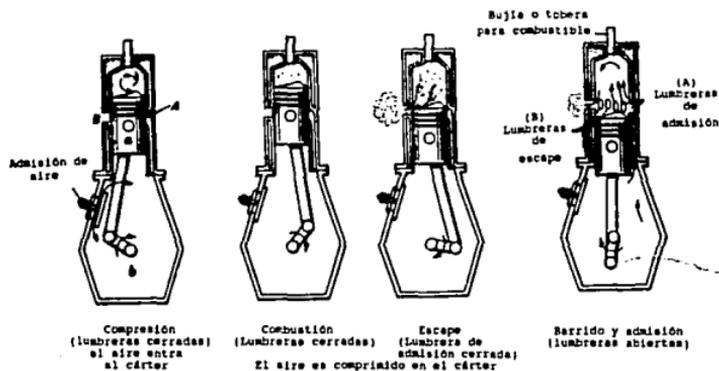


Figura II.14 Sucesos en el cilindro para el ciclo de dos carreras. Barrido cruzado

Si se emplea el ciclo de dos carreras para un motor carburado con gasolina, parte de la mezcla fresca será desalojada junto con los gases de escape. Es difícil conseguir una carga eficiente del cilindro sin grandes pérdidas de combustible, por esta razón los motores de dos carreras ECH son poco usados, excepto para motores pequeños de gasolina en los que la economía no es un factor vital; como en los motores fuera de borda para lanchas. En los motores EC o diesel, no existe la desventaja de la pérdida de combustible porque se emplea solamente aire y, por lo tanto, sólo se pierde aire en el barrido del cilindro.

Considérese que un motor, por razones de su gran tamaño, deba ser limitado a trabajar a velocidades bajas. Por ejemplo, un motor con émbolos grandes y, en consecuencia, pesados, no deberá funcionar a velocidades altas por los esfuerzos que desarrollan las fuerzas de inercia creadas al acelerar y retardar las partes recíprocas. En tales casos, puede usarse ventajosamente el ciclo de dos carreras para aumentar la producción de la potencia. Por otra parte, la tendencia de un motor para fallar por esfuerzos térmicos, está relacionada directamente con el número de carreras de potencia que se verifican en un intervalo de tiempo definido. Bajo este punto de

vista, un motor con ciclo de cuatro carreras puede trabajarse a altas velocidades sin que experimente temperaturas excesivas, que ocasionen discontinuidad en la lubricación y rotura de las partes metálicas. Además, el motor con ciclo de dos carreras cuyos escape y proceso de barrido tienen rendimientos relativamente bajos, no puede normalmente inducir en la carrera de admisión tanto aire como lo hace el motor con ciclo de cuatro carreras, a menos que se emplee una bomba suplementaria para el aire. Los más modernos diseños de motores EC, con ciclo de dos carreras, no emplean el método de comprimir la carga de aire en el cárter como se muestra en la Figura II.14; en cambio, se emplean compresores movidos por la flecha principal del motor, para llevar el aire a una presión de 0.1406 a 0.3515 kg/cm² (2 a 5 lb/plg²) para el barrido y para surtir al cilindro del motor (Figura II.15). Empero, la potencia para mover tales sopladores debe ser suministrada por el motor mismo.

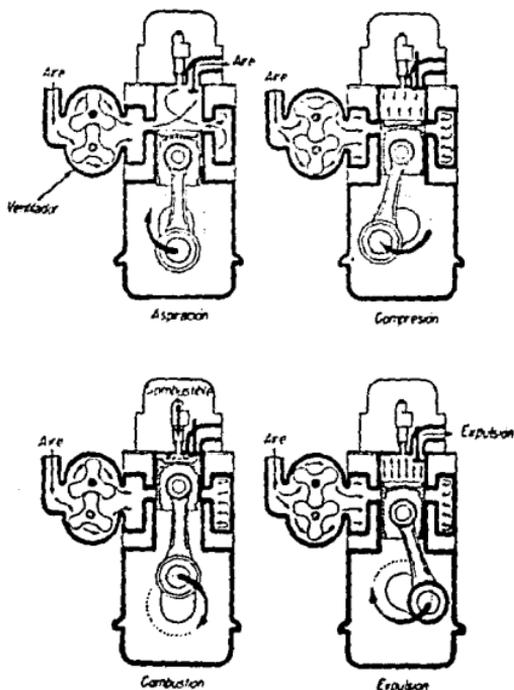


Figura II.15 Motor EC con ciclo de 2 carreras

Las denominaciones motor diesel de dos carreras y motor EC de dos carreras se emplean como sinónimos, igualmente el motor ECH de dos carreras se designa generalmente con el nombre de ciclo Otto de dos carreras (aun cuando Otto no intervino en ese descubrimiento).

II.5 SOBREALIMENTACION

En el motor ECH se puede mover la carga máxima cuando se quita del conducto de admisión la restricción impuesta por el estrangulador o acelerador. Teniendo el acelerador completamente abierto, se llena el cilindro con una mezcla que estará aproximadamente a la presión atmosférica y el rendimiento del motor será proporcional a la energía liberada al quemarse esa masa particular de combustible y aire. Para aumentar la producción de energía deberá forzarse al cilindro una masa mayor de mezcla. Cuando esto se realiza mediante el empleo de un soplador o de cualquier otro forma de compresor, el proceso se llama sobrealimentación (Figura II.16).

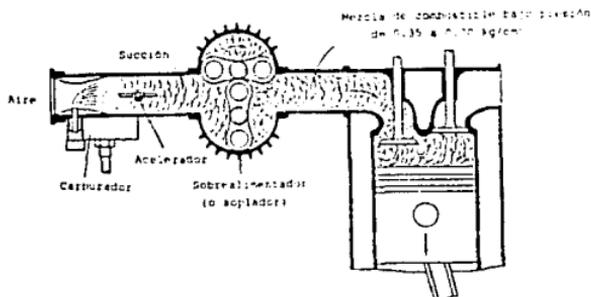


Figura II.16 Sobrealimentación del motor ECH con un soplador Roots

Teóricamente, la potencia podrá aumentarse indefinidamente forzando más y más mezcla dentro del motor con una bomba auxiliar para aire (mezcla), pero el recalentamiento del motor limita la cantidad de sobrealimentación que realmente se puede intentar. Deberá notarse que un motor no sobrealimentado, teniendo el acelerador parcialmente abierto, tendrá en el múltiple una presión inferior a la atmosférica. En cambio, el motor sobrealimentado tendrá en el múltiple una presión ya sea positiva o negativa dependiendo de la posición del acelerador y de la capacidad de la bomba de aire.

El motor EC induce una cantidad constante de aire y se alcanza la carga máxima cuando la cantidad de combustible inyectado es

demasiada para que sea quemada efectivamente por la cantidad de oxígeno en la cámara. Esto se evidencia por el humo (combustible no quemado) que aparece en los gases de escape. Un motor sobrecargado muestra humo negro desvaneciéndose el color hacia el gris a medida que disminuye la carga. Para sobrealimentar un motor EC debe forzarse dentro del cilindro una mayor cantidad de aire y, en correspondencia, una mayor cantidad de combustible en el seno del aire. El motor no sobrealimentado tiene, aproximadamente, la misma presión (atmosférica) en el múltiple en tanto que un motor sobrealimentado tendrá una presión positiva mayor, creciente a medida que aumente la proporción de sobrealimentación.

TURBOCARGADORES Y SUPERCARGADORES

Los sobrealimentadores más conocidos y estudiados son los centrífugos y rotativos de desplazamiento positivo. Los primeros, conocidos como turbocargadores, son compresores de aire movidos por una turbina que es accionada por los gases de escape (Figura II.17). En su forma más corriente, el rotor de un compresor centrífugo está conectado al eje de la propia turbina. Esta última puede ser del tipo radial o axial dependiendo del caudal y la presión en los conductos de escape. La potencia del motor aumenta un 50% o más de la obtenida sin sobrealimentador, sin que el rendimiento térmico se vea afectado. Por otro lado, el trabajo de admisión y escape no es realizado por el cilindro; este trabajo aparece como una porción de las pérdidas por fricción en los motores con aspiración natural. Por otra parte, las presiones pueden mantenerse y el motor desarrolla, a grandes alturas, la misma potencia que al nivel del mar.

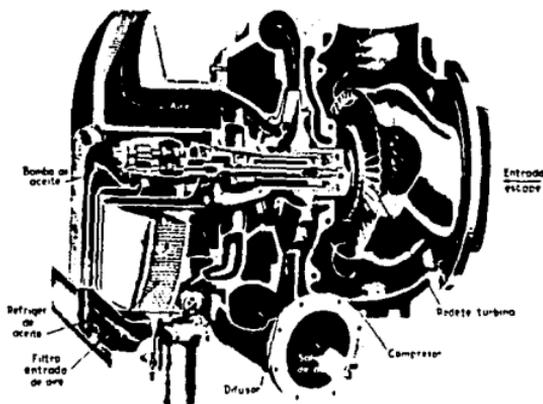


Figura II.17 Vista en corte de un turbocargador

(Tomado de "Energía mediante vapor, aire o gas. W.H. Severns)

Si se sobrealimenta un motor de carburación normal que tenga la relación de compresión óptima para el combustible disponible, se provocan detonaciones durante la combustión. Para evitarlas es necesario reducir la relación de compresión, enriquecer la mezcla o aumentar el número de octano.

Dado que, con la sobrealimentación se tiene mayor potencia, también se incrementan los esfuerzos térmicos y mecánicos que obligan a un nuevo diseño de las partes principales del motor (cojinetes de cigüeñal, pistones, relación geométrica de la cámara de combustión, bujes, anillos, etc.) aumentando considerablemente su costo.

El mantenimiento de un motor turbocargado (TC) debe ser cuidadosamente llevado a cabo pues, dado que el rotor alcanza grandes velocidades (de 15000 a 50000 rpm), cuando hay acumulaciones de material excedente de los gases de escape (carbonilla debido a una combustión incompleta provocada por falta de mantenimiento en bujías y filtros de aceite y aire, sobre todo) se ocasiona un desbalanceo de los álabes de la turbina lo cual provoca una pérdida de eficiencia y un deterioro prematuro del turbocargador.

El sistema de sobrealimentación rotativo de desplazamiento positivo o supercargador (SC) es un compresor que se conecta mediante una polea y una banda al cigüeñal del motor, como se haría con un aire acondicionado o un generador. Al igual que con los turbocargadores se logran mayores potencias y rendimientos al usar un supercargador, pero debe tenerse cuidado al instalarlos pues pueden provocar un daño severo al someter a una máquina a esfuerzos mayores que los de diseño.

Un motor turbocargado al igual que un supercargado debe diseñarse desde sus orígenes de manufactura para soportar los esfuerzos debidos a la sobrealimentación.

DESEMPEÑO DE MAQUINAS TURBOCARGADAS

Como se ha visto anteriormente, el uso de la sobrealimentación por un lado incrementa la potencia y el torque que se desarrollan en la máquina y, por otro, plantea problemas mecánicos de diversa índole. No obstante, su utilización ha demostrado reducir la contaminación debido al hecho principal de que se obtienen rendimientos iguales con máquinas más pequeñas, es decir que se logran las mismas potencias y torques con menos combustible.

Las gráficas de la Figura II.18 comparan las potencias y torques desarrolladas por tres máquinas diferentes: dos turbo cargadas y una normalmente aspirada. En la Tabla II.1 se observan las cifras relativas a estas máquinas y sus desempeños.

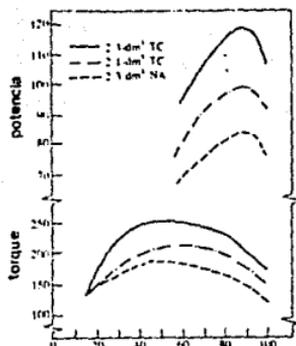


Figura II.18 Potencia y torque en función de la velocidad (rpm) para tres máquinas diferentes: a) 2.3 dm³ (TC/AC*); b) 2.1 dm³ (TC) y c) 2.3 dm³ (NA). (*AC = avance controlado)

Tipo	2.3 dm ³ (TC/AC)	2.1 dm ³ (TC)	2.3 dm ³ (NA)
Desplazamiento (dm ³)	2.316	2.127	2.316
Diámetro x carrera (mm)	96 x 80	92 x 80	96 x 80
Razón de compresión	8.7	7.5	9.5
Potencia máxima, kw a rpm	117 a 5300	98 a 5400	83 a 5400
Par máximo, Nm a rpm	250 a 2900	210 a 3800	184 a 2800
Empe máximo, kPa	1356	1241	998

Tabla II.1 Desempeño de máquinas turbocargadas encendidas por chispa

En la tabla II.1 se observa que es relevante la disminución que hay que hacer a la máquina en su relación de compresión debido a las superiores presiones que se manejan en los TC. Las relaciones aire/combustible deben ser diferentes debido a las mayores masas de aire presentes en la cámara de combustión y el avance tiene que sufrir algunas alteraciones. Electrónicamente se controlan minuciosamente todos los parámetros involucrados y debido a su rápida respuesta se logran sorprendentes desempeños aunque esto acarrea una serie de dispositivos y componentes que obligan a los fabricantes a

complicar sus diseños. Uno de los problemas del turbocargador es su tendencia a obligar a la máquina misma hacerse ir más rápido cada vez, conceptualmente esto sería infinito ya que a mayor velocidad de los gases de escape, mayor presión de aire a la entrada de la cámara de combustión. Esto ocasionaría preignición, que se evita adaptando un sensor de golpe para controlar el avance de la chispa.

Los sistemas de encendido electrónico cuentan cada vez con más dispositivos de control. Idealmente, se supone que la misma computadora puede informar de las fallas de algún vehículo, aunque en la práctica no siempre es así, y debido a los comportamientos a veces erráticos de ciertos dispositivos, la reparación de uno de éstos puede volverse extremadamente complicada aún para un experto. Sin embargo las exigencias de los usuarios han obligado a la creación de verdaderas obras de arte controlando desde la humedad del aire hasta la calidad de la gasolina y proveyendo a la máquina de la mezcla exacta requerida y el tiempo de ignición para las diferentes situaciones de manejo.

11.6 CONJUNTO DE CILINDROS

El término cilindro, cuyo significado geométrico es de todos conocido y se halla bien definido, se ha extendido a partes mecánicas en las cuales posee una utilidad preponderante la presencia de una superficie cilíndrica. En los motores, se llama cilindro la parte por cuyo interior se mueve el émbolo con movimiento alternativo rectilíneo. Los motores de automóvil son máquinas volumétricas de pistones con los cilindros fijos. Los motores de cilindros rotatorios fueron probados en aviación, pero luego se abandonaron. Los motores de cilindros oscilantes, raramente empleados para vapor, nunca se han utilizado para combustión interna. Todos los intentos hechos para construir motores alternativos con cilindros de sección distinta a la circular, con el fin de aprovechar mejor el espacio y, por tanto, reducir las dimensiones, han fracasado por muchas razones que está de más indicar aquí.

Los cilindros pueden hallarse separados entre sí, como en los motores refrigerados por aire, o bien formar parte de un bloque de forma algo complicada que se obtiene por fusión y que se denomina bloque de cilindros o monobloque. En los motores modernos, el bloque de cilindros comprende también la parte en la cual gira el cigüeñal, que antiguamente representaba la bancada, por lo que se designa con este nombre.

En los motores de automóvil, los cilindros suelen practicarse en el propio bloque. Sin embargo, no son pocos los casos en los que los cilindros forman parte de unos tubos de espesor reducido, que se introducen en el bloque y que reciben el nombre de camisas.

En los motores refrigerados por agua, las camisas pueden ser de tipo seco o húmedo. Las primeras se hallan situadas en el interior del bloque y no están en contacto directo con el agua, mientras que

las segundas se encuentran colocadas de forma que están sumergidas directamente en el agua de refrigeración.

El cilindro, o la camisa cuando existe, constituyen la cámara en la cual se desarrolla el ciclo térmico del motor. La variación máxima del volumen de la cámara, causada por el movimiento del pistón, es la cilindrada del mismo.

En los motores Wankel, la parte dentro de la cual gira el pistón de tres vértices puede considerarse como un cilindro, cuya sección es una curva trocoide de dos lóbulos. En este caso, el pistón no posee un movimiento alternativo rectilíneo, sino que gira en torno a un eje que, manteniéndose paralelo a las generatrices del cilindro, se desplaza describiendo una circunferencia. Debido a que por cilindro se entienda comúnmente uno de sección circular, el del motor Wankel, para distinguirlo de éste, se suele denominar estator; de forma análoga, el pistón se llama rotor.

-LAS FUNCIONES DEL CILINDRO

Incluso cuando está en reposo, el cilindro es una de las partes constituyentes del motor que desarrolla mayor número de funciones, hallándose sometido a un complicado sistema de sollicitaciones mecánicas y térmicas, ya que en él se repite periódicamente el ciclo caracterizado por variaciones muy grandes de presión y temperatura.

Su función esencial es la de guiado del pistón, oponiendo la menor resistencia posible al deslizamiento y asegurando la estanquidad de los gases. Las demás funciones dependen del tipo de motor y de su estructura; en efecto, el bloque de cilindros es la parte fundamental del motor a la que van unidas todas las demás, tales como el cigüeñal, la culata, los órganos de la distribución y gran parte de los órganos auxiliares, como el motor de arranque, el generador de energía eléctrica, el filtro de aceite, el cárter, etc. Durante el desarrollo de sus funciones, el cilindro está sometido, como ya se ha dicho, a sollicitaciones mecánicas y térmicas, las primeras causadas por la presión de los gases y por las fuerzas impuestas por el mecanismo de biela y manivela, y las segundas por las temperaturas de los gases y sus variaciones. Asimismo, la superficie interna del cilindro se halla sometida a la acción química de los gases que entran en forma de mezcla de aire y gasolina, y luego se transforman, con la combustión, en gases de escape. Las sollicitaciones mecánicas son causadas por la presión de los gases, el pistón y los anillos o segmentos.

La presión varía periódicamente según la ley del ciclo, pasando de un mínimo, próximo a la presión atmosférica, cuando el pistón se halla en el PMI, a un máximo cuando está en el PMS, durante la combustión. Este valor máximo es de unos 4.4 MPa (45 kg/cm²) en los motores de encendido por chispa y de 7.8 a 9.8 MPa (80 a 150 kg/cm²) en los motores Diesel, pero, al alcanzarse en las proximidades del PMS, las paredes del cilindro se hallan poco

solicitadas. En cambio, sí lo está el bloque, ya que se encuentra unido a la culata y al cigüeñal y la presión se ejerce entre la culata y el pistón; por ello, se halla sometido a la tensión generada por una parte por la culata y por la otra por el cigüeñal.

Cuando el pistón está en una posición intermedia entre ambos puntos muertos, la presión de los gases es menor; pero el pistón, por efecto de la inclinación de la biela, somete las paredes del cilindro a un empuje lateral que varía durante la carrera y alcanza su valor máximo en un punto que se halla próximo al de velocidad máxima del pistón. Este tipo de sollicitación tiende a desgastar las paredes del cilindro; otra causa de desgaste la constituyen los anillos de compresión y lubricación que actúan contra dichas paredes.

El espesor de las paredes del cilindro es muy superior al mínimo suficiente para soportar las pulsaciones causadas por la sucesión de las variaciones de presión y de los empujes laterales; dicho espesor se determina en relación a las exigencias de fabricación y de resistencia a las sollicitaciones térmicas. Estas últimas son causadas por las variaciones de temperatura de motor frío a motor caliente, entre las diferentes zonas del cilindro. Evidentemente, éste está más caliente en las zonas adyacentes a la cámara de combustión y más frío en el extremo opuesto. Por esta causa, se dilata de diferente manera por efecto del calor y tiende a adoptar una forma ligeramente cónica. Para mantener las deformaciones dentro de límites tolerables el cilindro se refrigera. La temperatura de los cilindros debe mantenerse baja, incluso con el fin de conservar el aceite en condiciones de lubricar convenientemente la superficie de deslizamiento y refrigerar los émbolos.

Tras una larga evolución, se ha llegado al bloque de cilindros con culata separada y bancada integrada, que parece ser la solución definitiva en el desarrollo de los motores de automóvil.

-LAS CAMISAS

Cuando, por razones de ligereza, el bloque se construye de aleación de aluminio, se adoptan camisas que, en general, se construyen de fundición y se introducen en el bloque de cilindros. A veces también se emplean camisas cuando el bloque es de fundición y se juzga conveniente emplear, para el bloque, una fundición adecuada para coladas complicadas y para las zonas sometidas a desgaste, paredes interiores de las camisas, una fundición especial resistente al mismo.

Si el bloque de cilindros es de aleación de aluminio, las camisas de tipo seco pueden introducirse durante la operación de fusión, o bien, con el bloque ya fundido y mecanizado en parte.

-NUMERO Y DISPOSICION DE LOS CILINDROS

La elección del número de cilindros deriva de consideraciones de carácter técnico y económico. Está claro que cuanto mayor sea el número de cilindros, tanto más elevado será el costo del motor, por lo cual se tiende a adoptar el número mínimo compatible con los resultados que intentan alcanzarse. En definitiva, la elección depende de la cilindrada total del motor y, en relación con la misma, de la calidad o clase del automóvil, de la potencia máxima y el régimen correspondiente, de las dimensiones y del peso del motor.

Debe tenerse en cuenta el hecho de que, cuanto mayor sea la cilindrada unitaria, es decir, la de cada uno de los cilindros, menor será el régimen de rotación alcanzable, ya que existen limitaciones de la velocidad media del pistón y de la aceleración de las válvulas grandes y pesadas; además, las fuerzas alternativas procedentes del mecanismo biela-manivela aumentan de tal modo, que causan dificultades para el equilibrio y, por tanto, para la suspensión del motor al vehículo. Por esta razón, los motores de 4 cilindros con una cilindrada superior a 2.000 cc, hacen que aparezcan problemas de vibraciones difícilmente superables. Por ello, por encima de 2.300 cc, en general, los motores poseen 6 u 8 cilindros.

Los cilindros pueden hallarse situados en línea, es decir, con sus ejes sobre un mismo plano vertical o inclinado, incluso horizontal. Asimismo, pueden formar 2 grupos con sus ejes sobre 2 planos que se cortan según el eje del cigüeñal; en tal caso se dice que el motor es en V. (En las Figuras II.19 a II.26 se muestran diferentes disposiciones de diferentes números de cilindros).

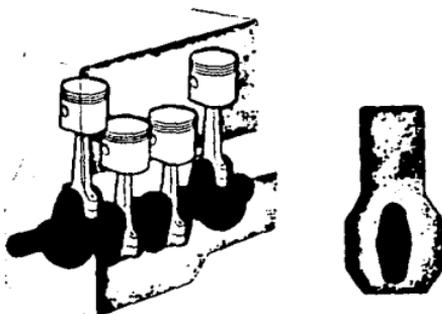


Figura II.19 4 cilindros en línea

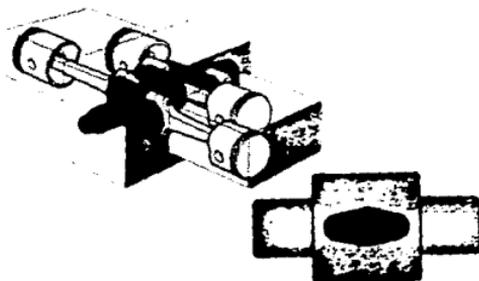


Figura II.20 4 cilindros opuestos

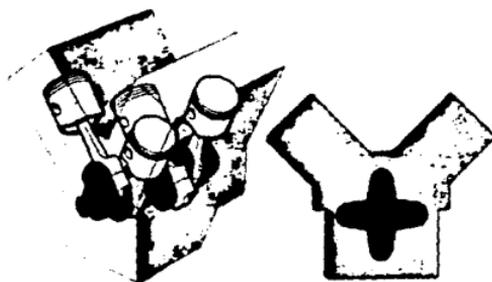


Figura II.21 4 cilindros en V (90°)

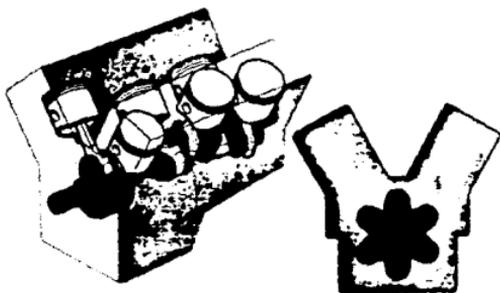


Figura II.22 6 cilindros en V (60°)

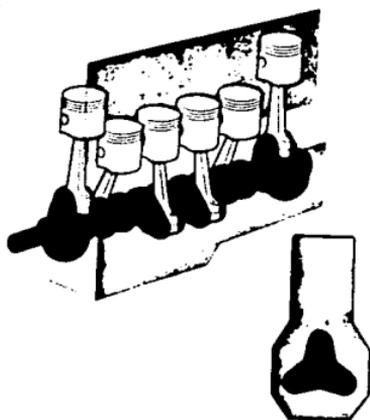


Figura II.23 6 cilindros en línea

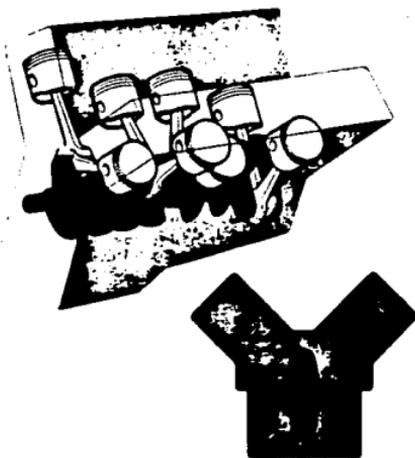


Figura II.24 8 cilindros en V (90°)

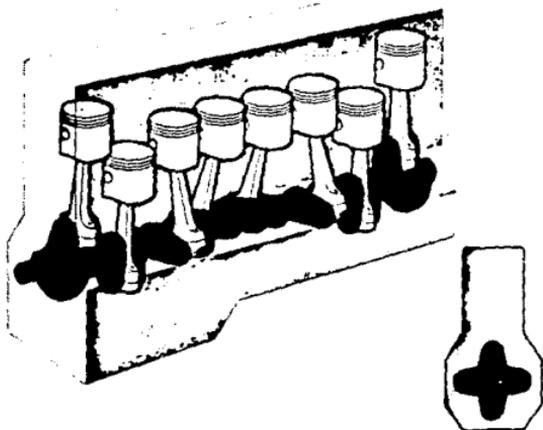


Figura II.25 8 cilindros en línea

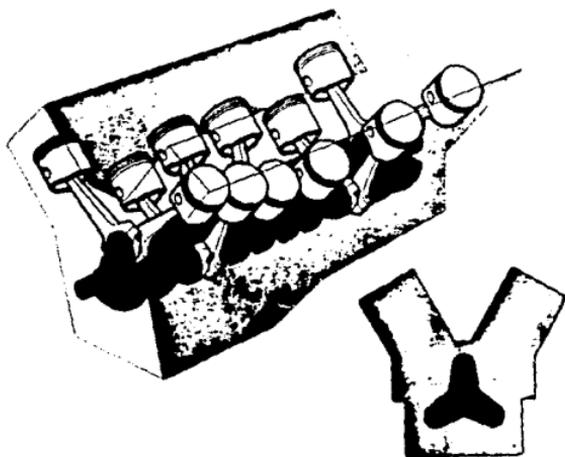
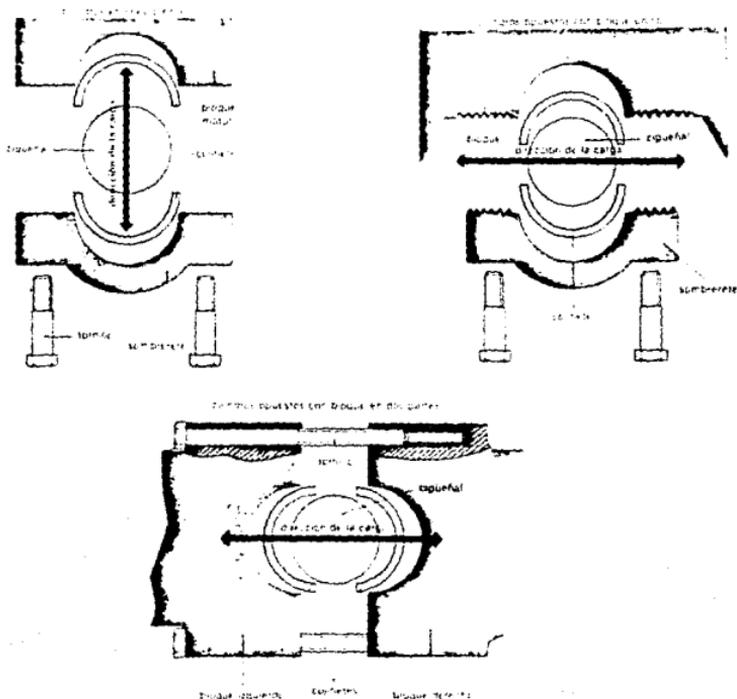


Figura II.26 12 cilindros en V (60°)

En las bancadas de los motores modernos, entre cada cilindro y el contiguo se coloca una pared de separación que constituye el asiento de un cojinete de bancada, sobre el cual gira el cigüeñal. En los motores en V, las paredes se hallan situadas entre los pares de cilindros que tienen sus ejes más próximos. En los motores de 4 cilindros en línea, las paredes intermedias del bloque de cilindros son una o tres, en los de 6 cilindros son cinco en los de 8 cilindros en V son tres. Estas paredes de separación dan al bloque una gran resistencia, tanto a la flexión como a la torsión, y mayor rigidez a las paredes longitudinales. (Figuras II.27 y II.28).



El cigüeñal está alojado en un asentamiento obtenido la mitad en el bloque y la otra mitad constituida por los sombreretes. En el caso de cilindros opuestos el bloque está formado por dos piezas y el asentamiento se obtiene en los dos bloques. Las flechas indican la dirección de la carga, que normalmente es perpendicular al plano de unión con el sombrerete.

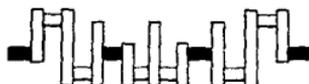
Figuras II.27 Tipos fundamentales de soportes de bancada



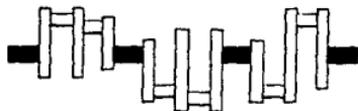
a) 4 cilindros en V



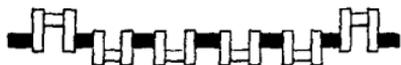
b) 4 cilindros en línea



c) 6 cilindros en línea. Manivelas a 120° una de otra: solución adoptada por muchos vehículos de E.U. Ejemplo: Plymouth Valiant

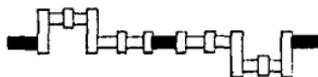


d) 6 cilindros en V. Manivelas a 60° una de otra: motor muy compacto. Ejemplos: Fiat 130, Lancia Flaminia



e) 6 cilindros en línea/6 cilindros opuestos. Solución refinada usada para vehículos deportivos. Ejemplos: BMW 2500 - 2800 - 3000, Porsche 911

Figura II.28 Disposiciones de los soportes de bancada (sigue →)



f) 8 cilindros en V. Solución muy económica, usada en el pasado en algunos vehículos de E.E.U.U.



g) 8 cilindros en V. Disposición clásica. Ejemplo: Alfa Romeo Montreal, Ford Mustang.



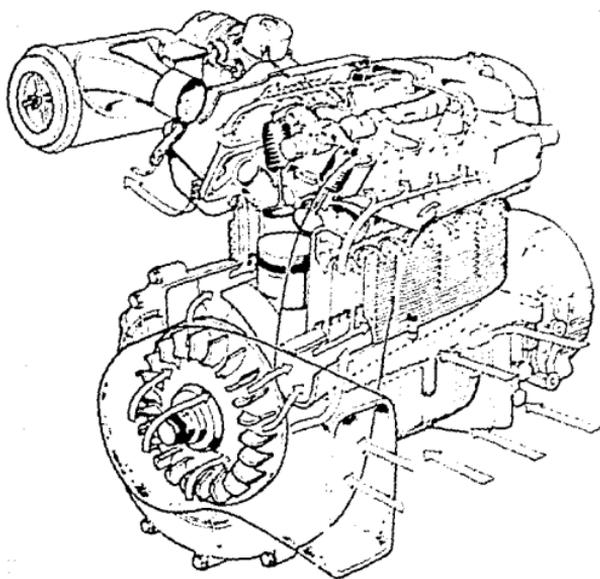
h) 12 cilindros en V. Disposición clásica. Ejemplo: Ferrari, Jaguar XJ-12.



i) 12 cilindros opuestos. El cigüeñal es igual al de un motor de 12 cilindros en V. En el Porsche 917 el soporte central está dividido en 2 partes para permitir la transmisión de potencia mediante un engranaje.

Figura II.28 Disposiciones de los soportes de bancada

Los cilindros de los motores refrigerados por aire más conocidos son de fundición. En los motores deportivos o de carreras son de aluminio, con camisas colocadas durante la fusión o introducidas en caliente, o bien no llevan camisas y poseen su parte interior cromada. La refrigeración se obtiene por medio de las aletas, que son más grandes hacia la culata, ya que es ahí donde hay que disipar mayor cantidad de calor. (Figura II.29)



En 1968, Honda presentó un modelo equipado con un motor de 1.300 cc, refrigerado por aire, de prestaciones elevadas; la característica más sobresaliente de esta construcción consiste en que el motor monobloque está obtenido en una fundición única de aleación ligera que lleva incorporadas aletas para la refrigeración. La sección muestra las numerosas aletas, que tienen además la función de refuerzo, y el recorrido de aire.

Figura II.29 Motor Honda de 1300 cc enfriado por aire

La fusión del bloque de cilindros es complicada, sobre todo por la presencia del espacio intermedio para el agua de refrigeración. Sin embargo, los progresos efectuados en la preparación de los nuyos para fundición permiten, en la actualidad, construir bloques de cilindros de fundición muy precisos, con paredes de espesor reducido (de 3 a 5 mm) y, por tanto, muy ligeros. Antiguamente, los cilindros de los motores de automóvil se construían de fundición gris de grano fino, cuya composición variaba entre límites amplios. La necesidad de mejorar sus propiedades físicas indujo a reducir el contenido total de carbono y silicio, así como el de fósforo, el cual, a la vez que hace más fácil la fusión porque tiende a conservar más fluido el

metal en estado líquido, disminuye la dureza de la fundición y su resistencia al desgaste. Normalmente se prescribe que la fusión resulte lisa y bien limpia, exenta de cavidades, grietas, inclusiones, puntos duros, zonas de carburos libres y cualquier otro defecto que sea perjudicial para el mecanizado, la apariencia y las prestaciones. Cuando se especifican los datos de dureza y resistencia, se indican los puntos en los cuales debe efectuarse el control.

Para aumentar la dureza y, por tanto, la resistencia al desgaste, la fluidez del metal en estado fundido y la facilidad de mecanizado, se adoptan fundiciones aleadas, es decir, a las que se han añadido metales como níquel, cromo, cobre o molibdeno. El níquel y el cromo aumentan su dureza, el cobre mejora su fluidez y actúa como grafitizante, y el molibdeno aumenta su resistencia al desgaste, especialmente a temperaturas altas, haciendo más fino el grano y la distribución del grafito.

El bloque está delimitado por 4 superficies mecanizadas, sobre las cuales se montan: por arriba la culata, por debajo el cárter, por delante la caja que contiene la totalidad o una parte de los órganos de accionamiento de la distribución y por detrás la caja que contiene el embrague. Lateralmente, el bloque posee los puntos de fijación del motor y de los grupos auxiliares. (Figura II.30).

Para evitar distorsiones de origen térmico, durante el proyecto se adoptan artificios especiales tales, como evitar que existan partes delgadas junto a otras de gran espesor. Durante las fases de calentamiento y enfriamiento, se producen expansiones y contracciones que, en partes de espesores distintos, causarían deformaciones inaceptables para los cilindros. Del mismo modo hay que evitar las deformaciones de origen mecánico; así, por ejemplo, debe hacerse lo posible por situar los tornillos que unen la culata al bloque de cilindros en una posición tal que, cuando se aprietan, no sean causa de deformaciones de los cilindros o las camisas en las proximidades del plano de unión a la culata. Cuando esto no es posible, puede recurrirse a efectuar la última operación de acabado una vez montada la culata.

El mecanizado de los cilindros consiste generalmente en un mandrilado de desbaste y semiacabado, un escariado de acabado y, finalmente, un esmerilado y un acabado definitivo. El escariado se efectúa con máquinas transfert, provistas generalmente de tantas cabezas como cilindros posea el bloque. El escariado final de acabado se efectúa con herramientas que portan una sola cuchilla.

El acabado final consiste en una doble operación de esmerilado, designada con el término inglés honing (de hone = piedra), que se lleva a cabo con una máquina transfert. Las herramientas que se emplean para la operación de honing son unos mandriles que llevan 3-4 piedras abrasivas, a las cuales empujan contra las paredes de los cilindros unos muelles o un sistema hidráulico. Estas herramientas

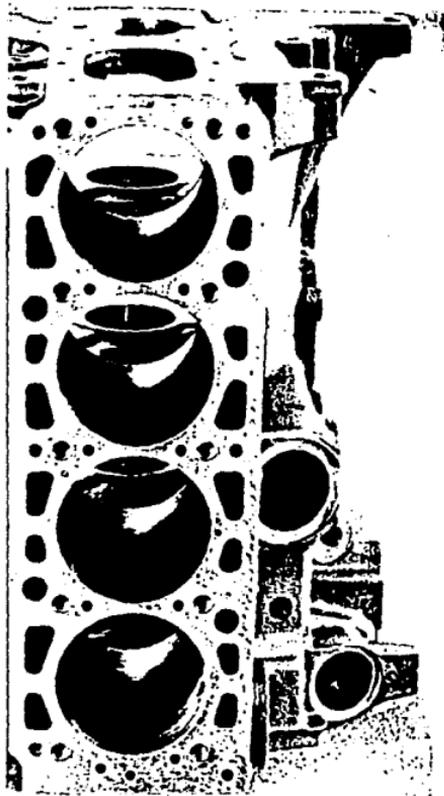


Figura II.30 Bloque de cilindros

(Tomado de: Enciclopedia del automóvil. Salvat)

poseen normalmente un movimiento rotativo y de traslación. No extraen una cantidad apreciable de material, sino que eliminan las trazas o la ligera rugosidad que deja la operación de acabado anterior, a lo largo del cilindro. Se obtiene así el grado de acabado más conveniente para la lubricación del conjunto cilindro-pistón. El grado de rugosidad que se admite para la superficie se indica en el plano del cilindro. Cuando la operación de honing se efectúa a mano, suele hacerse por medio de una herramienta de madera acoplada a una taladradora eléctrica portátil.

Otra operación de superacabado es el lapeado. La herramienta que se emplea es similar a la del honing, pero, en lugar de piedras abrasivas, lleva unos sectores metálicos recubiertos por un compuesto abrasivo. El lapeado se efectúa con la ayuda de una mezcla de polvo abrasivo y aceite o keroseno, que luego debe eliminarse cuidadosamente por lavado.

II.7 PISTON O EMBOLO

En sentido general, el pistón o émbolo es el órgano que, en el mecanismo cinemático que transforma un movimiento rectilíneo en un giratorio, tiene la función de deslizarse alternativamente dentro de su guía (cilindro). El mecanismo, denominado de biela-manivela, está compuesto por pistón, biela y manivela, y encuentra su aplicación natural tanto en máquinas motrices (motores de combustión interna, motores de vapor) como en máquinas operadoras o de trabajo (bombas hidráulicas alternativas, compresores, etc.). Su movimiento no es armónico simple, pero se diferencia muy poco.

En todas las aplicaciones en que se emplea, el pistón recibe (o transmite) fuerzas en forma de presión (a) un líquido o de (a) un gas.

El origen del pistón puede remontarse al del cañón: de hecho, en esta máquina el proyectil (inicialmente esférico y luego cilíndrico) es conducido por la caña y empujado por la elevada presión de la explosión. Los primeros intentos de un motor de combustión interna en el siglo XVI se basaban en el cañón, puesto que usaban como combustible pólvora negra.

En 1873, gracias al norteamericano Brayton, la forma del pistón, de cuerpo cilíndrico, se hizo cada vez más compleja y similar a la configuración actual: se introdujeron los segmentos elásticos con sus correspondientes alojamientos, y los agujeros del bulón fueron dotados de una zona de robustecimiento interna.

El material con que se construía fue durante muchos años la fundición. En el año 1911, La Hispano-Suiza introdujo los pistones de aluminio, obteniendo una notable ventaja en cuanto a ligereza. Sin embargo, la mayor dilatación térmica del aluminio (3 veces superior a la de la fundición) y el consiguiente peligro de gripado

condujeron a los demás constructores de motores a conservar aún durante un decenio los pistones de fundición, limitando el peso mediante la reducción del grosor del material.

A partir de 1920, gracias a las nuevas aleaciones ligeras y a las técnicas de fusión y de mecanización mejoradas, el pistón de aluminio comenzó a substituir al de fundición, aunque en los años treinta se produjo en Estados Unidos un retorno al segundo tipo, por razones económicas y en parte técnicas.

-Pistones para motores de encendido por chispa

Son los pistones que se emplean preferentemente en los motores de 4 y de 2 tiempos. Su diámetro va desde 30 a 70 mm para las motocicletas hasta 52 a 110 mm para los automóviles. Pueden construirse de varias formas: la cabeza, por ejemplo, puede ser plana, cóncava o convexa. Puede presentar rebajes circulares en correspondencia con la posición de la válvulas de admisión y de escape.

En el pistón pueden distinguirse 4 partes principales: la cabeza, que recibe el calor y el impulso de los gases de combustión; la zona de los anillos, que por medio de los segmentos asegura la retención de los gases y del aceite de lubricación y al mismo tiempo disipa una parte del calor recibido; los alojamientos del bulón mediante el cual se une el pistón a la biela, y la falda, cuya función consiste en guiar el pistón en su movimiento dentro del cilindro y ceder el resto del calor al fluido de refrigeración (aire o agua).

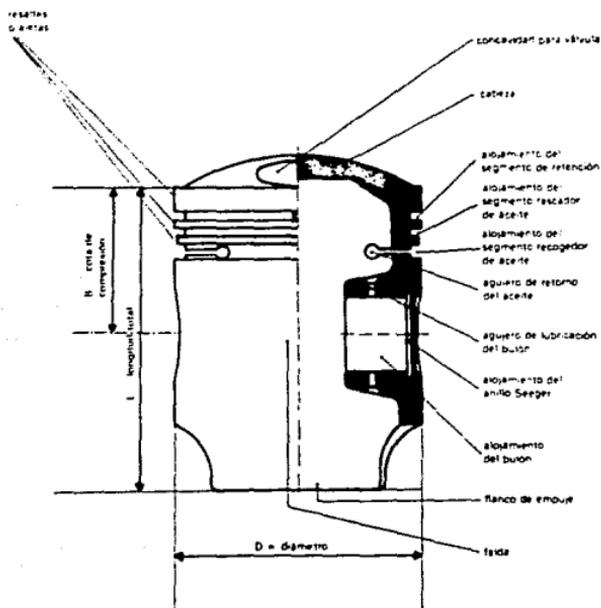
El pistón está definido por las siguientes dimensiones fundamentales: diámetro, longitud total, cota de compresión y diámetro del bulón.

La cota de compresión tiene cierta importancia, puesto que suministra la posición del plano de la cabeza en el punto muerto superior y, consiguientemente, el volumen útil de la cámara de combustión. En otros términos, influye sobre la relación de compresión que se deduce del cociente entre la suma de la cilindrada y el volumen de la cámara de combustión dividido por este último. (Figura II.31).

En la zona portasegmentos, los alojamientos de los segmentos se obtienen mediante torneado. En tiempos no muy lejanos podían contarse hasta 5 alojamientos; en la actualidad, dada la eficiencia de los segmentos, éstos se han reducido a 3 para los pistones de motores de turismo comunes y 4 para los de motores Diesel.

El primer alojamiento, comenzando por arriba, aloja un segmento de retención; el segundo (o el segundo y el tercero) puede incluir un segmento rascador con rebaje, o bien, un segmento de retención y otro con rebaje; el último alojamiento lleva un segmento clásico recogedor

de aceite, con ranuras, que tiene la función de recuperar una parte del aceite de lubricación lanzado contra las paredes del cilindro.



La superficie lateral del pistón no es perfectamente cilíndrica, como muchos creen; la parte más ancha se encuentra generalmente a 1 cm del fondo del pistón. Precisamente, en este punto se mide el diámetro para determinar el juego.

Figura II.31 Nomenclatura del pistón

No todo el aceite es retenido por el segmento correspondiente en su carrera de bajada; una parte permanece y sirve para mejorar las condiciones de rozamiento de los demás segmentos. La función del primer segmento es bloquear la parte residual de aceite que sube hasta él.

Un hecho bastante curioso, pero que tiene razón de ser, es que la última aleta, es decir, la porción comprendida entre los 2

segmentos finales, tiene 1 mm menos de diámetro, aproximadamente, que las demás; esto tiene como finalidad crear un espacio regulador, donde se forma un anillo líquido que retarda la marcha del aceite hacia arriba y produce una zona de retención más.

El área de los alojamientos del bulón, zona de unión del pistón con la cabeza de la biela mediante el bulón, es muy delicada, dadas las fuerzas que actúan en ella. Una acoplamiento realizado defectuosamente implica consecuencias catastróficas (rotura de los apoyos, gripado y avería total del cilindro). Para tener una idea de ello piénsese que el agujero del bulón se mecaniza con herramientas de diamante, con una rugosidad superficial hasta de $0,5 \mu\text{m}$ y con tolerancias de mecanización de 4 a $7 \mu\text{m}$. Análogamente, el bulón (de acero bonificado), con superficie exterior cementada, se rectifica con tolerancias de 5 a $7 \mu\text{m}$. Generalmente, se usan 3 acoplamientos: bulón fijo a la biela y flotante sobre los apoyos; bulón sujeto al pistón y libre sobre la biela, y bulón libre en los apoyos y en la biela (flotante).

En el caso de bulones libres en los apoyos, éstos no pueden deslizarse y salir de sus alojamientos, puesto que se lo impiden unas arandelas del tipo Seeger de sección rectangular.

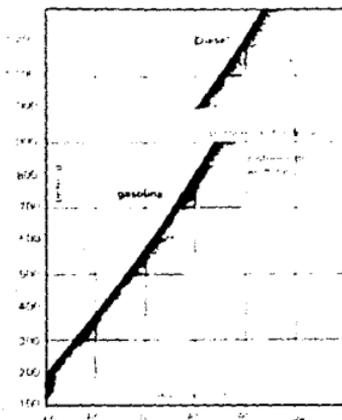
Las aleaciones de aluminio empleadas normalmente para la construcción de pistones pueden clasificarse en 3 categorías; aluminio-cobre, aluminio-níquel (o hierro) y aluminio-silicio. Las aleaciones más empleadas son las últimas, puesto que ofrecen óptima resistencia mecánica y coeficiente de dilatación bajo, junto con elevado coeficiente de conductibilidad térmica. (Figura II.32). Además de éstas, existen aleaciones de aluminio al cobre, al silicio y al magnesio adecuadas para pistones estampados en prensa, de resistencia mecánica elevada. Estas aleaciones sirven, sobre todo, para construir pistones para motores de competición y de aviación.

En los motores de combustión interna, se confían al pistón las siguientes funciones: transmitir al cigüeñal, a través de la biela, los impulsos producidos por los gases de combustión; garantizar la retención de los gases y del aceite de lubricación, y transmitir al cilindro el calor que recibe de los gases.

La primera función está relacionada esencialmente con su resistencia mecánica y es una de las principales consideraciones que el diseñador debe tener en cuenta al proyectar los grosores y al elegir el material.

La segunda función (retención de gases) permite utilizar toda la energía producida en el momento de la combustión y evita que los gases, al pasar al cárter, quemen el aceite y provoquen el gripado o el encolado de los segmentos. La retención del aceite es necesaria, además de para limitar el consumo, para evitar depósitos de carbón entre las aletas y en la cámara de combustión; estos últimos pueden provocar el preencendido por puntos incandescentes e

incluso perforar el pistón. Las dimensiones de la falda y de las aletas contribuyen a garantizar la retención, puesto que, por encima de ciertos valores de juegos de acoplamiento entre el pistón y el cilindro, el sistema no puede funcionar, por el peligro de gripado, por lo que dicha función se confía sobre todo a los segmentos.



En el gráfico se indican los límites de peso de varios pistones de serie en función del material con que están contruidos y del tipo de aplicación. Como puede verse, los pistones para los motores Diesel son, a igualdad de diámetro, mucho más pesados que los de motores de gasolina.

Figura II.32 Peso del pistón

La tercera función (disipación del calor) favorece el mantenimiento de las características mecánicas del material, reduce el peligro de trabamiento de los segmentos y el desgaste de los alojamientos.

La gama de los tipos de pistones, diferentes por su forma, sus funciones y dimensiones, es muy amplia. Cada motor tiene su pistón. De todos modos, puede aceptarse una subdivisión en dos grandes clases, cada una de las cuales agrupa subtipos con características definidas.

Diferentes cavidades representan la investigación continua de los proyectistas para conseguir una combustión completa y, por tanto, un menor porcentaje de gases no quemados en el escape.

La zona inferior de la falda posee generalmente aletas que tienen la función de aumentar la guía y reducir el golpeteo del pistón contra las paredes del cilindro. El área de la falda próxima

a los agujeros del bulón muchas veces se rebaja para aligerar el pistón sin comprometer su resistencia.

También puede hacerse otra distinción tomando en consideración las diferentes técnicas de construcción ideadas para controlar la dilatación térmica. Dichas técnicas representan la evolución máxima del pistón.

Pistones monometálicos de falda completa. Son los más sencillos y los más usados; la dilatación térmica de la falda es relativamente grande, de ahí que se precisen amplios juegos de acoplamiento y notables ovalizaciones de compensación. En tiempos pasados, este tipo de pistón tenía un corte, vertical u oblicuo, con la función de hacer más elástica la falda y absorber las dilataciones. Sin embargo, esto implicaba una menor rigidez de la falda que, muchas veces, se rompía.

En la misma categoría pueden incluirse los pistones de estampación para competición. Tienen la cabeza de forma convexa con gran curvatura para permitir relaciones de compresión elevadas. En la zona portasegmentos existen alojamientos para 2 segmentos o, como máximo, para 3, y la falda tiene una superficie muy reducida cuya función es solamente de guía. Presentan nervios muy pronunciados, con la única finalidad de reducir al mínimo el peso que, dado el elevado número de ciclos (9000 a 11000 por minuto), influye de manera notable sobre la naturaleza y la clase de las fuerzas de inercia que intervienen.

Pistones de dilatación térmica controlada. Son pistones con pequeñas placas de acero, incorporadas durante la fundición, que les confieren altas prestaciones desde el punto de vista de la dilatación térmica. En 1925, A. L. Nelson construyó un pistón con placas de invar, aprovechando que este material posee un coeficiente de dilatación muy pequeño respecto al de las aleaciones de aluminio. Posteriormente, en Alemania aparecieron los pistones Autothermik y Autothermatik de la empresa Mahle y los pistones con segmentos de dilatación de la Karl Schmidt.

El pistón Autothermik se caracteriza tanto por el tipo de placas como por la presencia de un corte en el alojamiento del segmento recogedor de aceite, que interrumpe la unión de la cabeza con la falda. El corte determina que la falda esté más fría y, por tanto, que sea más fácilmente controlable. El pistón Autothermatik es muy similar al Autothermik: se diferencia únicamente en que la unión de la cabeza con la falda no está cortada, sino sólo interrumpida por agujeros situados de manera que permiten aún cierto flujo de calor desde la cabeza a la falda que, por consiguiente, permanece más fría. Además de esto, se evitan las deformaciones de la cabeza, que en este caso apoya toda la circunferencia sobre el cuerpo del pistón. Los pistones de este tipo ofrecen las mismas ventajas que los monometálicos no cortados y que los autotérmicos, por lo que se emplean en motores rápidos y sometidos a sollicitaciones

elevadas.

Los pistones con anillos de dilatación se caracterizan por una pieza de acero de sección transversal circular, con la parte exterior lisa o dentada, incorporada en el momento de la colada. Esta pieza especial tiene la capacidad de reducir notablemente la dilatación de la parte superior de la falda, es decir, la contigua al alojamiento del segmento rascador de aceite.

II.8 CIGÜEÑAL Y BIELA

El cigüeñal forma parte del mecanismo biela-manivela, es decir de la serie de órganos que con su movimiento transforman la energía desarrollada por la combustión en energía mecánica. El cigüeñal recoge y transmite al cambio la potencia desarrollada por cada uno de los cilindros. Por consiguiente, es una de las piezas más importantes del motor.

En los motores rotativos (eléctricos o de turbina), el árbol motor tiene simplemente forma cilíndrica, con estriados para su ajuste con el rotor (inducido eléctrico o rodete de la turbina) y engranajes o poleas para transmitir el movimiento. En los motores de pistón rotativo (tipo Wankel) el cigüeñal lleva simplemente una excéntrica circular por cada pistón.

Sin embargo, en los motores alternativos tradicionales tiene una forma más complicada (puesto que hay manivelas), determinada por la necesidad de transformar el movimiento alternativo en movimiento giratorio; precisamente, dada su forma, se le denomina árbol de manivelas o árbol de codos, además de cigüeñal.

En los primeros tiempos, el motor típico de combustión interna era monocilíndrico, y el cigüeñal, al tener una sola manivela, era completamente semejante al antiguo berbiquí de carpintero, denominado en francés «vilebrequin». El término vilebrequin es aún hoy día el apelativo francés correspondiente al español cigüeñal. Los ingleses lo llaman «crankshaft», que significa árbol-manivela.

Cada manivela está formada por dos brazos llamados brazos de manivela y por el muñón de manivela o muñón de biela, que gira sobre el cojinete de la cabeza de biela. Los muñones del eje de rotación del cigüeñal se denominan muñones de bancada.

En los motores con los cilindros en línea el cigüeñal está formado por tantas manivelas como cilindros. En los motores con los cilindros opuestos el número de manivelas puede ser el mismo que el de cilindros o sólo la mitad. En los motores en V, generalmente el número de manivelas es la mitad del de cilindros.

El número de muñones de bancada puede variar bastante. Por ejemplo, en un motor de 4 cilindros puede emplearse un cigüeñal que

tenga únicamente dos muñones de bancada, o bien tres, cuatro o cinco. (Figura II.33). La elección depende de razones técnicas y económicas. La solución más económica es un cigüeñal con sólo dos apoyos en los extremos, pero en este caso no puede pretenderse alcanzar potencias elevadas a altos regímenes. De hecho, para evitar las flexiones y las consiguientes vibraciones del cigüeñal, es necesario que los muñones de manivela tengan el mayor diámetro posible y los brazos de manivela una sección considerable. El cigüeñal y las cabezas de biela son pesados y, por tanto, las masas en rotación originan fuerzas considerables y el motor no puede girar a regímenes muy elevados. Las oscilaciones flectoras del cigüeñal son también la causa de ruidos originados por el golpeteo sobre los cojinetes de bancada.

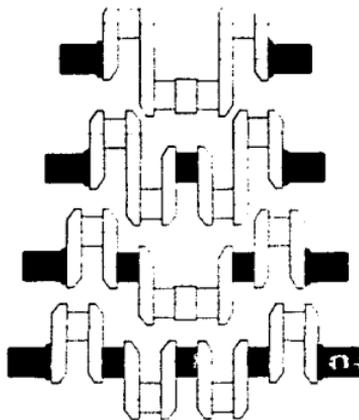


Figura II.33 Cigüeñales para motor de 4 cilindros con 2, 3, 4 y 5 muñones

-Proceso de fabricación.

El material empleado generalmente para la construcción de los cigüeñales es de acero al carbono; en los casos de mayores sollicitaciones se emplean aceros especiales al cromo-níquel o al cromo-molibdeno-vanadio tratados térmicamente. Se construyen también cigüeñales en fundición nodular que poseen unas características de resistencia semejantes a las del acero al carbono.

Cuando, a causa de las fuertes descargas, deben emplearse cojinetes con una superficie bastante dura (antifricción de aleación

cobre-plomo, duraluminio, etc.), los muñones de cigüeñal se endurecen superficialmente mediante cementación, temple superficial o nitruración. En un sistema especial de temple superficial muy empleado en la fabricación en serie, el endurecimiento se produce mediante un calentamiento superficial obtenido por procedimiento eléctrico (por inducción) y posterior enfriamiento con agua; este sistema de endurecimiento es muy rápido. Otro sistema de endurecimiento superficial es el flameado, en el cual el calentamiento se obtiene con la llama. Cuando los problemas económicos pasan a segundo término, como sucede en el caso de los autos de carreras, se puede elegir un acero especial de alta resistencia y adoptar el endurecimiento por nitruración.

Las operaciones de mecanizado consisten en el desbarbado de la pieza, torneado de los muñones y posterior rectificación, y arranque de material para el equilibrado estático y dinámico.

-Equilibrado

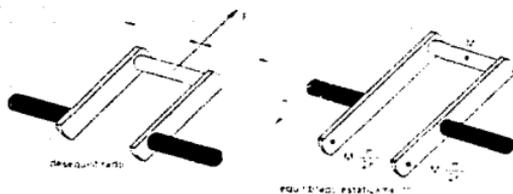
El equilibrado se consigue por medio de contrapesos aplicados a las manivelas para obtener, cuando sea necesario, el equilibrado estático y el dinámico del cigüeñal en todo su conjunto y, muchas veces de cada una de las manivelas. (Figura II.34). Sirve además para reducir el efecto de movimiento alternativo. Los objetivos del equilibrado son esencialmente dos:

1. Reducir las vibraciones del motor causadas por las fuerzas y momentos generados por la presión de los gases en los cilindros y por las piezas en movimiento alternativo y giratorio (pistones, bielas y cigüeñal), y

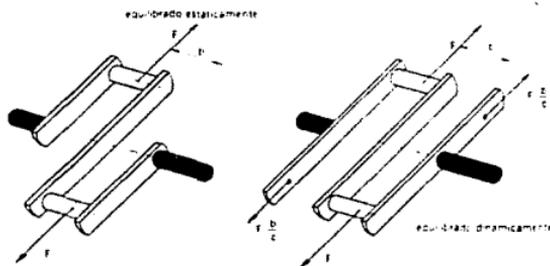
2. Reducir las cargas sobre los cojinetes de bancada.

La relación entre la carrera y el diámetro influye sobre diversas características y sobre el diseño del motor. Su influencia se hace notar también sobre el cigüeñal. Efectivamente, a igualdad de cilindrada, aumentando el diámetro de los cilindros y disminuyendo correspondientemente la carrera, el cigüeñal se alarga y los brazos de las manivelas se acortan. Reduciendo la longitud del brazo de manivela se disminuyen las fuerzas de inercia causadas tanto por las masas de rotación como por las masas alternativas. Además, el cigüeñal, al tener un diámetro de giro menor, puede tener una constitución más ligera.

El cigüeñal está equilibrado estáticamente cuando la resultante de las fuerzas centrífugas es nula, es decir, cuando el baricentro se encuentra sobre el eje de rotación. Es característico el ejemplo del cigüeñal con una sola manivela. Es obvio que para que el cigüeñal esté en equilibrio en cualquier posición, el peso de la manivela debe ser equilibrado por el de los contrapesos.



a) Equilibrado estático de las masas de rotación de un monocilíndrico; el cigüeñal está equilibrado estáticamente cuando el baricentro cae sobre el eje de rotación.



b) Equilibrado dinámico de las masas en rotación de un bicilíndrico: las fuerzas centrífugas en planos diferentes crean un momento flector que puede ser anulado por los contrapesos.

Figura II.34 Equilibrado del cigüeñal

Pero el cigüeñal, además de estar equilibrado estáticamente, puede estarlo dinámicamente, es decir, puede dar lugar, cuando se halla en movimiento, a un momento flector originado por las fuerzas centrífugas que se encuentran en planos distintos. Puede suceder, en definitiva, que en los motores con varios cilindros la resultante de los momentos respecto a un punto cualquiera del eje no sea nula. Este concepto resulta más claro si se concreta en el caso de un cigüeñal con 2 manivelas de un motor de 2 cilindros opuestos, de 4 tiempos. Las fuerzas centrífugas actúan en planos diferentes, cuya distancia entre ellos es igual a la que hay entre los ejes de los cilindros. El momento resultante es igual al producto de la fuerza centrífuga por la distancia entre los ejes y puede ser equilibrado con uno igual y opuesto por medio de contrapesos.

En los cigüeñales que tienen más de 2 manivelas, éstas se disponen angularmente de manera que las combustiones resulten

distanciadas igualmente una de otra para obtener la máxima regularidad del par motor, y en estas condiciones, en la mayor parte de los casos, la disposición de los brazos de manivela es tal que, sin añadir contrapesos, la condición de equilibrio estático se satisface automáticamente, ya que el cigüeñal admite un plano de simetría que pasa por su eje.

BIELA

La biela es la varilla, articulada por un extremo con el pistón y por el otro con el muñón del cigüeñal (Figura II.35), que permite la transformación del movimiento alternativo en rotativo. La invención del mecanismo de biela-manivela, una de las más importantes en el campo de la mecánica, se remonta a la Edad Media y nació para transformar el movimiento rotativo de origen hidráulico, eólico o animal en el movimiento alternativo necesario para el accionamiento de las bombas hidráulicas de émbolo. Este principio lo utilizó luego Watt cuando, al obtener trabajo a partir de un fluido en expansión en un cilindro, tuvo el problema inverso de transformar el movimiento alternativo en rotativo. El nombre biela procede del francés «bielle», de origen desconocido, llamándose en inglés «connecting rod» (abreviado en con-rod) y en alemán «Pleuelstange».

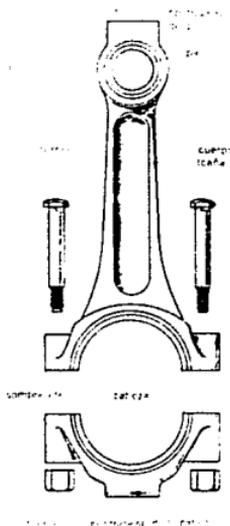


Figura II.35 Nomenclatura de la biela

-Tipos de biela

A una única manivela pueden unirse una o más bielas, una al lado de otra; en el primer caso, se trata de motores en línea, mientras que en el segundo, de motores en V u opuestos.

El dimensionado y, como consecuencia, la forma de una biela depende de los siguientes parámetros:

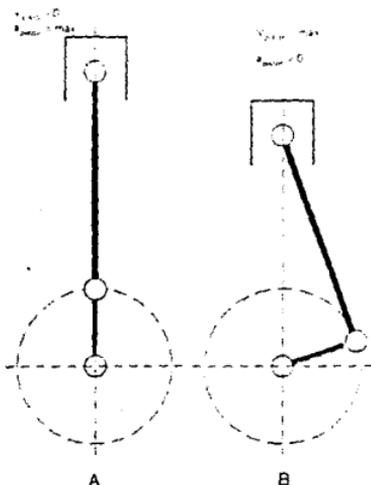
1. Tipo de ciclo, de 2 o de 4 tiempos
2. Sistema de lubricación, según sea mediante circuitos de aceite a presión o por mezcla
3. Régimen de rotación
4. Número y disposición de los cilindros
5. Montaje y desmontaje de las diferentes partes que constituyen el motor y sus consiguientes uniones.

En los motores de 2 tiempos, si las explosiones tienen lugar regularmente, la biela se halla solicitada únicamente por compresión, ya que, incluso a regímenes de rotación elevados, las fuerzas de inercia que en torno al punto muerto superior solicitarían a la biela por tracción son inferiores a la fuerza resultante de la presión de los gases. Por tanto, la cabeza y el pie de biela se construyen delgados, y el cuerpo, resistente. Por el contrario, en los motores de 4 tiempos, también la estructura del pie y de la cabeza, cuando ésta se halla partida, debe ser resistente, ya que las fuerzas de inercia dominan durante 3 de las 4 carreras del pistón de cada ciclo (admisión, compresión y escape), mientras que únicamente durante la fase de expansión dominan las fuerzas de los gases que solicitan la biela por compresión.

El material que constituye las bielas de los automóviles de turismo suele ser acero de calidad. Para los motores de carreras se emplean aceros especiales de alta resistencia al cromovanadio o también aleaciones de titanio. La biela y el sombrerete proceden, cuando su forma lo permite, de una única pieza forjada; un corte separa a ambos componentes durante la fabricación. Recientemente se han adoptado, con buenos resultados, bielas de fundición nodular. Antiguamente se adoptaron también bielas de aleación de aluminio estampadas.

Las elaboraciones mecánicas de una biela son el planeado de los flancos y, simultáneamente, el mecanizado previo de los gorriones. Luego, si el conjunto de la biela y el sombrerete se obtiene por forja, la cabeza de biela se corta diametralmente en dos partes. A continuación, con un brochado único, se mecanizan las superficies de unión al sombrerete y la simcilíndrica de asiento del cojinete, practicando luego los agujeros para los tornillos de fijación. La

biela y el sombrerete se aparean y se unen con tornillos, que se aprietan con un par igual al que corresponde al montaje final; de esta forma se tiene la certeza de que la superficie del cojinete resultará cilíndrica una vez montada la biela.



a) En el PMS, la biela se halla sometida a la máxima tracción, ya que las fuerzas de inercia alcanzan el valor más elevado en este punto y van dirigidas hacia arriba. Sin embargo, si el motor se halla en la fase de explosión, prevalece la presión de los gases, que comprime la biela (carga máxima y, por tanto, la más peligrosa); en este caso, las fuerzas de inercia, iguales a las que existían en el caso anterior, se restan del empuje de los gases.

b) En esta posición, en que la biela y la manivela forman entre sí un ángulo de 90° las aceleraciones normales al eje de la biela y, por tanto, las acciones de flexión debidas a la inercia alcanzan su valor máximo, con peligro de que la caña se doble. Por esta razón la caña de la biela posee forma de H, de manera que se aumenta, para un mismo peso, el momento de inercia de la sección según el plano del movimiento.

Figura II.36 Posiciones de la biela a 0° y 90° con respecto a la manivela

En la Figura II.37 se muestra tres distintas soluciones al problema de embielaje en los motores con cilindros dispuestos en V:

- dos bielas acopladas
- bielas de horquilla
- biela madre y bieleta



Figura II.37 Embielaje

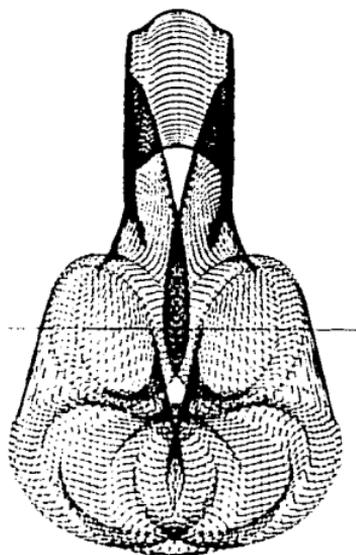


Figura II.38 Trazado de las posiciones de una biela durante su movimiento, dibujado por un graficador electrónico
(Tomado de: Enciclopedia del automóvil Salvat)

II.9 CULATA Y VALVULAS

La culata (también llamada cabeza) es la parte del motor que cierra los cilindros por su lado superior y en correspondencia con la cual suelen ir colocadas las válvulas de admisión y de escape.

La forma y las características de la culata siempre han ido estrechamente ligadas a la evolución de los motores y, en especial, han venido condicionadas por el tipo de distribución y por la forma de la cámara de combustión.

Aunque algunos de los primeros motores para automóviles presentaban la culata separada del bloque de cilindros, la mayoría de los constructores prefirió adoptar la solución de culata y cilindros en un bloque único. De esta forma se conseguía mayor solidez y se evitaba el mecanizado de las superficies de unión entre la culata y los cilindros, eliminando simultáneamente cualquier problema de estanquidad.

En lo relativo a la distribución, en los primeros motores de gas se adoptaron válvulas bilaterales en cabeza, es decir, situadas en 2 filas, con las de escape frente a las de admisión.

Sin embargo, las mayores velocidades y presiones alcanzadas pronto sugirieron, para evitar complicaciones de construcción, la adopción de válvulas de admisión automáticas accionadas por la depresión que se creaba en el cilindro durante la carrera de admisión. Posteriormente, cuando las velocidades de rotación aumentaron, este sistema se reveló poco eficiente. En efecto, para cerrar la válvula era preciso un muelle y, por tanto, una buena parte de la carrera de admisión se perdía para crear la depresión suficiente para determinar la apertura de la válvula. Por ello fue necesario adoptar sistemas de accionamiento también para las válvulas de admisión.

Con el progreso de los materiales y de la técnica, la solución que se impuso gradualmente fue la de todas las válvulas en cabeza. (Figura II.39). En efecto, aunque las culatas con válvulas laterales en el bloque eran de construcción más sencilla, no permitían alcanzar regímenes de rotación superiores a 4.000 rpm, sobre todo debido a la forma de los colectores.

En los años sesenta se fue imponiendo progresivamente, también en los automóviles de serie, la distribución mediante árboles de levas en culata con accionamiento directo de las válvulas o con balancines. Esta solución proporciona indudables ventajas desde el punto de vista del rendimiento global del motor, pero presenta mayores dificultades de construcción en la realización de la culata, que, la mayoría de las veces, se hace desmontable separando el soporte del árbol de levas de la culata propiamente dicha.

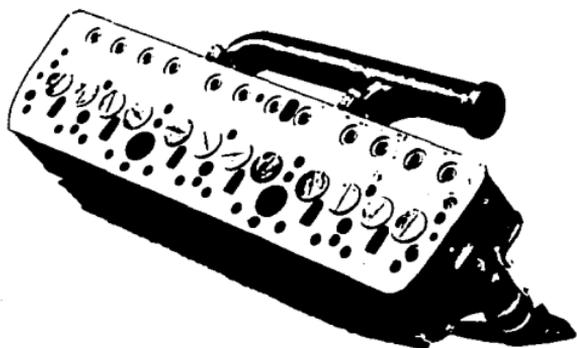


Figura II.39 Válvulas en la culata

Durante los años setenta los problemas creados por la contaminación atmosférica y las respectivas normas a que deben atenerse los motores de los automóviles han impuesto a los fabricantes restricciones cada vez más rigurosas y, consecuentemente, complicaciones de construcción aún mayores.

Como ejemplo de lo dicho, baste citar el motor proyectado por la Honda, capaz de superar los estándares norteamericanos para 1976. Este motor, denominado CVCC (Compound Vortex Controlled Combustion) es, en realidad, un motor del tipo de carga estratificada con cámara de combustión desdoblada, con una válvula de admisión principal y otra secundaria para la introducción de la mezcla en la precámara.

-Construcción y materiales

En el estudio del proyecto de una culata para un motor de combustión interna moderno existen 3 objetivos principales que el proyectista trata de alcanzar: buen rendimiento, poca contaminación y bajo costo de construcción. Estas 3 metas no siempre son compatibles y, frecuentemente, obligan a soluciones de compromiso. En especial, es probable que la introducción de normas anticontaminación cada vez más rigurosas, conduzca a sacrificar el rendimiento y el valor de la potencia máxima. En general, se estudian la forma y la inclinación de los conductos de admisión y de escape de forma que se cree la mayor turbulencia inducida en la cámara de combustión, sin disminuir la velocidad de la carga y, por tanto, el rendimiento volumétrico.

En particular, la sección transversal de los conductos debe conservarse constante durante toda su longitud o, como máximo, con pequeñas conicidad.

Las dimensiones de la cámara de combustión y su forma están estrechamente relacionadas con la elección de una relación carrera/diámetro adecuada. Precisamente, el problema de la contaminación parece favorecer un retorno a los motores de carrera larga, es decir, con cámaras compactas, en las cuales la combustión se desarrolla mejor.

Las culatas se construyen tanto de fundición como de aleación de aluminio. En los motores más modernos se prefieren generalmente las aleaciones ligeras, debido a la notable ventaja en términos de reducción de peso y a las inmejorables características de fusibilidad y disipación del calor. Los soportes de la distribución se obtienen mediante fusión a presión, que permite realizar piezas con acabados óptimos y de paredes delgadas. La parte inferior de la culata se realiza mediante colada en coquilla o, algunas veces, en arena; experimentalmente se han realizado también por el método anterior.

Las guías de las válvulas se introducen a presión en la culata en el caso de que ésta sea de fundición. Dichas guías se construyen de fundición, cuya composición debe estudiarse de acuerdo con el material empleado para las válvulas, a fin de evitar el peligro de agrietamiento. Para las culatas de aleación ligera se emplean guías de bronce, que se adaptan mejor a las dilataciones del material. También los asientos de las válvulas se introducen a presión en la culata y, al igual que las guías, se les da su medida definitiva mediante mecanizados sucesivos una vez introducidos. Dichos asientos se construyen de fundición o de acero, con un aporte eventual de material resistente a las temperaturas elevadas y a la corrosión (estelita) en el caso de los asientos de las válvulas de escape.

VALVULAS

Las válvulas de los motores de combustión interna son los órganos que regulan la admisión y el escape de los gases en la cámara de combustión mediante la variación de la sección de paso.

Las válvulas poseen en la actualidad una forma unificada que data de finales del siglo pasado. Las válvulas clásicas tienen forma de hongo, en el que el sombrerete, que es el elemento obturador, se apoya en el asiento y se encuentra sostenido por el vástago cilíndrico, que es el elemento de guía. Están dotadas de un movimiento alternativo y se abren hacia el interior de la cámara de combustión, de manera que la estanquidad se ve favorecida por la presión de los gases. Este órgano es aparentemente muy sencillo, pero trabaja en condiciones críticas, siendo muy solicitado, especialmente en el escape, tanto por las elevadas temperaturas como por la corrosividad de los gases, de manera que su proyecto, aunque

posee una forma simple, requiere estudios cuidadosos para la determinación de las dimensiones y los materiales.

En los motores de automóvil, las condiciones de trabajo de las válvulas requieren que cualquier dimensión, cualquier unión y cualquier tolerancia sean una consecuencia de las rigurosas exigencias de funcionamiento. La cabeza posee 3 formas posibles: convexa, plana o cóncava. La primera proporciona válvulas más rígidas, macizas y sólidas, pero más pesadas, y unos asientos sensibles a los efectos de la temperatura, montándose generalmente en el escape. Las válvulas de forma cóncava tienen la propiedad de conservar la forma cónica del asiento incluso bajo grandes deformaciones térmicas y, en su mayoría, se emplean como válvulas de admisión en motores de competición o deportivos.

Actualmente los constructores tienden al empleo de válvulas con cabeza plana, ya que no requieren mecanizados; las válvulas con cabeza cóncava o convexa se destinan a aplicaciones especiales.

Los asientos, tanto el móvil de la válvula como el fijo de la culata, poseen forma troncocónica, con un semiángulo en el vértice generalmente de 45° .

Las características que se requieren de los materiales para las válvulas dependen de gran número de factores: de las dimensiones y forma de las válvulas, del asiento y del colector de escape, de la ley de la distribución, de la relación de compresión y de la composición del combustible.

El material del vástago debe poseer un coeficiente de rozamiento bajo con relación a la guía de válvulas y un coeficiente de dilatación reducido para poder disminuir los juegos entre el vástago y la guía y entre la válvula y la leva. Además, se precisan características de resistencia al desgaste en la unión deslizante. El material de la guía de válvulas suele ser de fundición perlítica o de bronce.

El material de la culata, y especialmente el de la válvula de escape, debe poseer gran resistencia al choque y a la corrosión. El fenómeno de la corrosión es complicado y se debe a la acción simultánea del monóxido de carbono, el vapor de agua, el anhídrido sulfuroso, los hidrocarburos, los depósitos sólidos, los complejos de óxidos y, a veces, los residuos de los aditivos antimisfiring.

Cuando el motor no se encuentra suficientemente solicitado, es posible responder a estas exigencias, distintas entre la culata y el vástago, con aceros al níquel-cromo para las válvulas de admisión y al cromo-silicio para las de escape.

Cuando no es posible obtener la dureza deseada con el material de base, se sitúa un cordón de estelita en el asiento; ésta es una aleación a base de cobalto y cromo.

Actualmente se construyen con frecuencia válvulas bimetálicas, con la cabeza y el vástago de materiales distintos y unidos mediante soldadura por chisporroteo o por inercia. Las válvulas construidas de esta forma no poseen, respecto a las monometálicas, desventajas en cuanto a la templabilidad ni en cuanto a la diferente conductibilidad térmica, y son inoxidable e indeformables. Normalmente, las válvulas experimentan un tratamiento térmico de temple en los asientos y en el extremo del vástago, tratamientos superficiales de cromado o nitruración blanda en los asientos para aumentar su dureza, y luego un cromado a lo largo del vástago para mejorar sus características de antidesgaste.

Recientemente se ha adoptado el endurecimiento mediante aluminización, empleado preferentemente en los asientos de las válvulas de admisión que, así, alcanzan durezas semejantes a las de los materiales más resistentes que se emplean para las válvulas de escape.



En las válvulas más perfeccionadas, el vástago es completamente hueco y se llena parcialmente con sodio líquido o sales de litio y potasio, cuyo punto de fusión es inferior a la temperatura de funcionamiento de la válvula. De este modo, el movimiento de la válvula, inducido por inercia también en el líquido interior, permite disipar, en cada desplazamiento, una parte de calor de la culata a través del vástago.

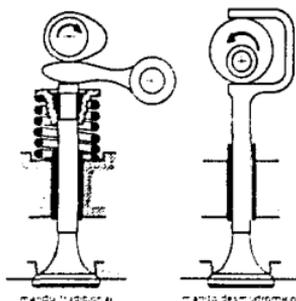
Figura II.40 Válvula de vástago hueco

(Tomado de: Enciclopedia del automóvil. Salvat)

El dimensionado de las válvulas se estudia según dos criterios: uno, fluidodinámico, que determina la sección y la velocidad de la mezcla durante su paso, en función del llenado y del escape más convenientes en las diferentes condiciones de funcionamiento; y otro, mecánico, que fija las velocidades de choque admisibles según las características mecánicas y térmicas del material. Estos criterios llevan a la determinación del diámetro, la altura y el peso de la

válvula.

El primer criterio se aplica igualando el volumen de mezcla que pasa por la válvula con el que barre el pistón y es válido en primera aproximación si se considera el fluido incompresible. Como es conveniente obtener una velocidad media de los gases comprendida entre 80 y 120 m/s, se determina el diámetro de la válvula partiendo del diámetro y de la velocidad media del pistón. Con unos coeficientes adecuados se tienen en cuenta las correcciones de esta ley simple con relación al fenómeno real. El segundo criterio va ligado a las presiones que pueden alcanzarse en el contacto válvula-cabeza, que dependen de la ley de apertura y de la masa de la válvula.



Las válvulas pueden ser accionadas, ya sea mediante levas que imprimen el movimiento de subida oponiéndose a la acción de retorno de un muelle o mediante mando desmodrómico. La característica del mando desmodrómico es la de tener contacto bilateral con la válvula, haciendo inútil el uso de los muelles. Los dibujos ponen de manifiesto la diferencia entre los 2 tipos de accionamiento.

Figura II.41 Accionamiento de las válvulas

II.10 LEVA, ARBOL DE LEVAS Y BALANCINES.

LEVA

La leva es el órgano capaz de transformar un movimiento rotativo uniforme en otro de tipo distinto: rectilíneo alternativo o bien oscilatorio. En el primer caso, la leva se llama de primera clase y actúa sobre un taqué; en el segundo caso, se denomina de segunda clase y manda directamente un balancín. Generalmente, la leva está constituida por una sección no circular cuyos bordes están en contacto con un órgano móvil (taqué o balancín).

La leva tiene numerosas aplicaciones en los automóviles, como

por ejemplo: en el accionamiento de la bomba de gasolina, en el del ruptor del delco, en la regulación de los juegos en los frenos de tambor y en el mando de los tambores cuando se acciona el freno de mano. Sin embargo, la aplicación principal y más conocida es la del mando de las válvulas de los motores de 4 tiempos.

Para ilustrar los problemas dinámicos del proyecto de una leva es necesario definir las características geométricas de su perfil. (Figura II.42). Este depende del movimiento que se quiera realizar. Tal movimiento viene definido por la ley de la elevación en función del tiempo, o sea de la sección de traslación obtenida representando en ordenadas los desplazamientos del taqué y en abscisas los ángulos.

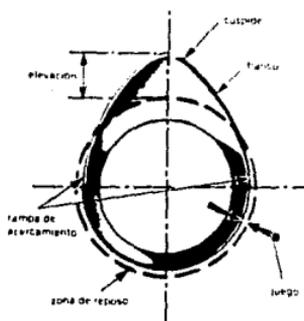


Figura II.42 Nomenclatura de la leva

En el perfil de la leva así realizado, se distingue una parte en que la distancia entre el elemento transmisor y el eje de rotación de la leva es variable (fase activa del movimiento), y otra en que permanece invariable (fase de reposo).

La fase activa del movimiento se obtiene con dos trazos curvilíneos, tangentes al círculo de base, llamados flancos de leva, a los cuales corresponden los períodos de apertura y cierre de la válvula, y con un trazo curvilíneo que rodea los dos flancos, llamado cúspide o cabeza de la leva, que corresponde a la máxima apertura de la válvula.

La fase de reposo, correspondiente al período de cierre de la válvula, se obtiene con un trazo circular perteneciente al círculo de base, dejando un pequeño juego entre la leva y el taqué, para permitir las dilataciones térmicas que se producen durante el funcionamiento del motor y garantizar así el cierre perfecto de la

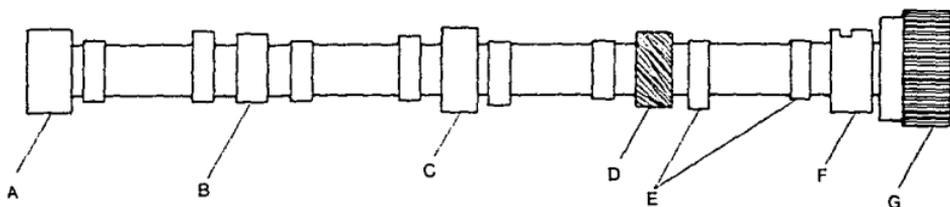
válvula; en tal caso se tiene el círculo reducido.

Dada la presencia del juego, no se puede saber con exactitud el punto en que se producirá el contacto entre la leva y el taqué y, por tanto, no es posible realizar un perfil que evite toda posibilidad de choque (tangente horizontal). Esto se remedia enlazando el círculo reducido con el flanco mediante una rampa de acercamiento, de manera que el choque con el taqué o balancín se produzca a una velocidad constante ($\approx 0,5$ m/s).

El perfil de la leva es el elemento que requiere mayor atención: no debe provocar excesivas aceleraciones del taqué y mucho menos golpes entre la leva y el taqué.

ARBOL DE LEVAS

El árbol de levas o eje de levas es el órgano del motor que regula el movimiento de las válvulas de admisión y de escape. (Figura II.43). En la práctica, se trata de un árbol dotado de movimiento rotativo, sobre el cual se encuentran las levas o excéntricas, que provocan un movimiento oscilatorio del elemento causante de la distribución. (Figura II.44). El elemento que provoca la distribución, cuando está sujeto a un movimiento rectilíneo de traslación, recibe el nombre de empujador, centrado o desviado según que su eje encuentre o no al eje de rotación de la leva. Cuando al mismo tiempo cumple un movimiento oscilante de rotación alrededor de un perno toma el nombre de balancín.



- A) muñón posterior
- B) excéntrica para bomba de gasolina
- C) muñón central
- D) engranaje para mando del distribuidor
- E) levas
- F) muñón anterior
- G) polea para banda dentada

Figura II.43 Nomenclatura del árbol de levas

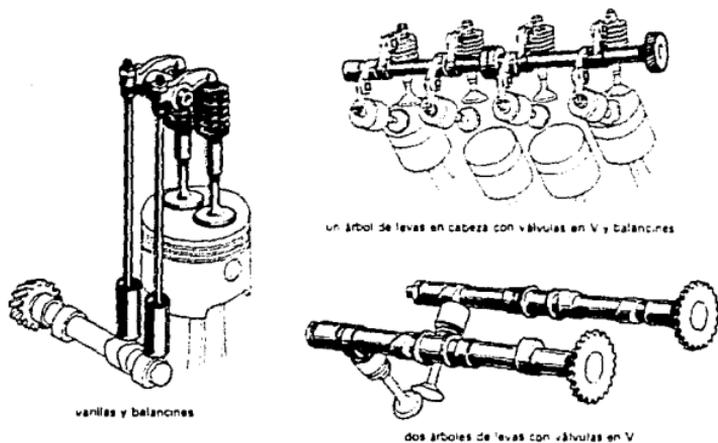


Figura II.44 Diferentes disposiciones de árbol de levas, válvulas, varillas y balancines

BALANCIN

El balancín es el elemento de la distribución que transmite el movimiento de la leva o de la varilla a la válvula (Figura II.45), aprovechando el principio de la palanca.

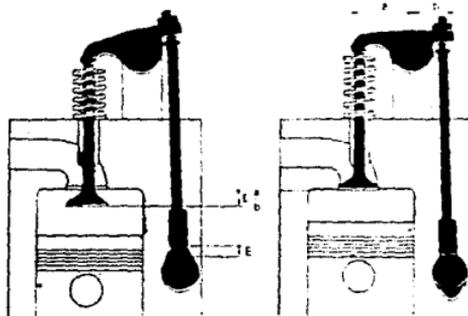


Figura II.45 La elevación de la válvula depende de la relación de los brazos a y b del balancín

El balancín está generalmente apoyado en un punto intermedio actuando como una palanca de primer grado; pero puede también estar apoyado en un extremo y en tal caso se le llama balancín «tipo dedo». (Figura II.46).

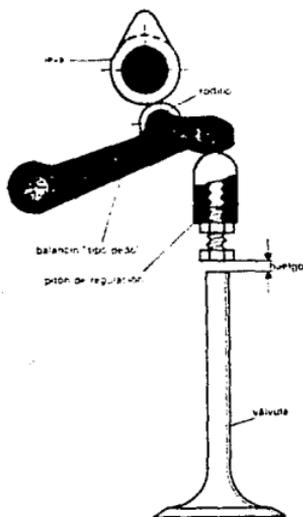
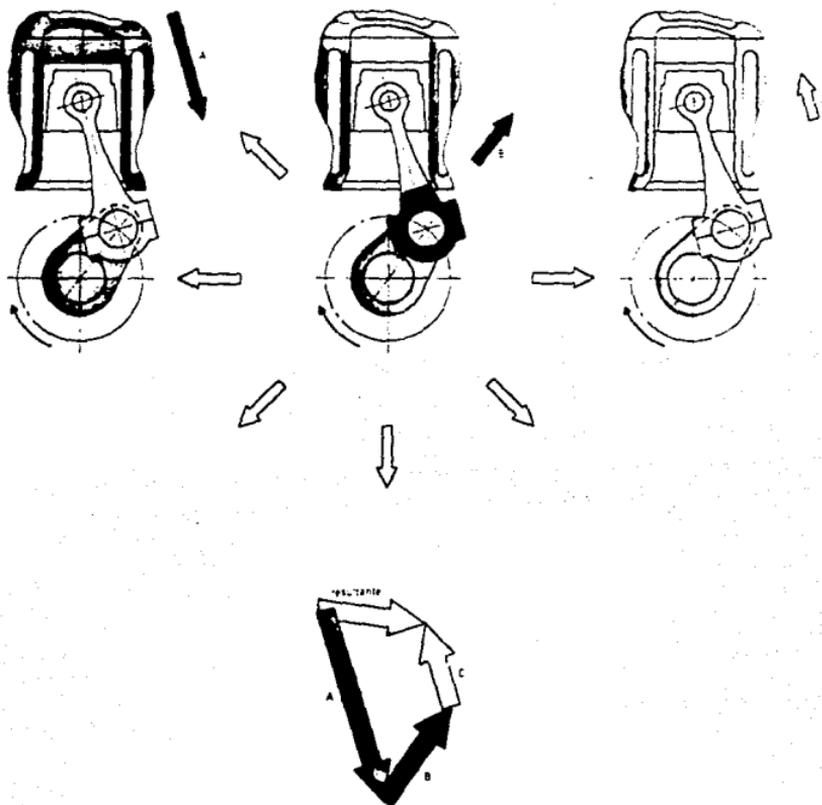


Figura II.46 Balancín "tipo dedo"

II.11 COJINETE

El cojinete es el elemento mecánico en el que se apoya y gira un eje mediante su gorrón u órgano de contacto. Los diversos tipos de cojinetes pueden clasificarse atendiendo a la carga o esfuerzo que actúa sobre ellos, o bien según el modo de efectuar el contacto. En el primer caso se distinguen los cojinetes radiales, en los que el esfuerzo actúa perpendicularmente al eje, de los cojinetes axiales o de empuje, en los cuales éste se transmite en la misma dirección que el eje; también pueden considerarse cojinetes mixtos de los dos tipos anteriores. En cuanto al modo de contacto, se habla de cojinetes de fricción o lisos, cuando el rozamiento es por deslizamiento, y de cojinetes de rodamiento o, simplemente, de rodamientos, cuando es por rodadura.



A = empuje de los gases (variable)

B = fuerza centrífuga (constante)

C = fuerza de inercia (variable)

Los dibujos muestran, por separado, las fuerzas que actúan sobre los cojinetes de biela, en un determinado instante de la carrera de expansión. Estas son: la componente A del empuje de los gases, la fuerza centrífuga B debida a la cabeza de biela y la componente C de las fuerzas de inercia de las masas alternativas (pistones, pies y parte de la caña de la biela). La resultante de estas fuerzas representa, en dirección, magnitud y sentido, la carga total que actúa sobre el cojinete de la biela en el instante considerado.

Figura II.47 Fuerzas que actúan sobre el cojinete de biela

Cojinete de fricción. También denominado cojinete liso o de deslizamiento, es el elemento mecánico capaz de soportar los gorriones de los ejes giratorios, que se caracteriza por un reducido coeficiente de rozamiento, así como por la posibilidad de ser lubricado constantemente o estar dotado de poder autolubrificante. Otra característica importante reside en el hecho de que el material del cojinete debe ser más blando que el eje, para evitar el deterioro de éste en el caso de una lubricación defectuosa. En la zona de acoplamiento entre el gorrón y el cojinete existe un rozamiento (por deslizamiento), cuya magnitud puede medirse por medio de un coeficiente, que es función de la velocidad periférica del gorrón, del estado de las superficies, de la temperatura y de la naturaleza de los dos cuerpos en contacto.

Normalmente el cojinete va revestido con un material de antifricción, que sirve para guiar y sostener los órganos giratorios, comúnmente con velocidades y con cargas más bien elevadas. Su función es la de reducir los roces disminuyendo el desgaste y evitar el peligro de gripado.

Muchas veces los cojinetes de fricción están divididos en dos mitades, llamada semicojinetes. En otros casos constan de una sola pieza, y entonces se usa más propiamente el término de casquillo, especialmente si se trata de cojinetes de dimensiones relativamente pequeñas.

Los semicojinetes se montan generalmente en correspondencia con los soportes de bancada y en los muñones del cigüeñal, en los soportes del árbol de levas, en ciertos ejes del cambio, etc.

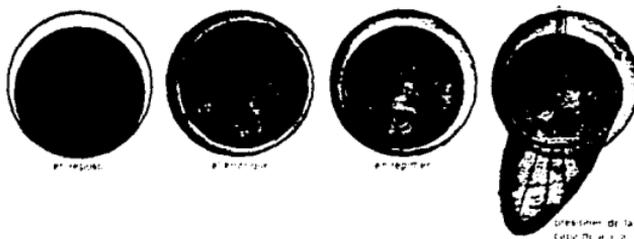
En los primeros motores la lubricación se realizaba por caída (gravedad) o por barboteo; sucesivamente se ha ido pasando a la lubricación forzada, sobre todo para los cojinetes sometidos a cargas muy fuertes, como las del cigüeñal.

Los cojinetes de fricción se montan con interferencia en sus correspondientes soportes (partes fijas), mientras que es preciso dejar entre el gorrón y el cojinete un juego o huelgo del orden de 0.03 a 0.06 mm, para permitir la formación de la película necesaria para la lubricación hidrodinámica. (Figura II.48).

Al inicio del automovilismo los semicojinetes estaban constituidos por bronce fundido y mecanizado bastante, sobre el cual se depositaba por colada el material de antifricción, que luego era elaborado y pulido a máquina. A veces, con ocasión de reparaciones, los cojinetes eran lisados a mano.

Actualmente los materiales que más se emplean para la construcción de los cojinetes de fricción son las aleaciones de plomo, de antimonio y el bronce. Los procesos de fabricación están automatizados y con ellos se obtienen elevados grados de precisión y acabado. Los procedimientos más comunes son aquellos que se obtienen

a partir de un fleje continuo, con depósito de la aleación de antifricción por fusión o sinterización, sobre el susodicho fleje de acero cuidadosamente preparado por ataque con ácido, pulido mecánico u otro procedimiento que permita una perfecta adherencia del revestimiento. Posteriormente, el fleje es cortado en elementos rectangulares, que se someten a fases sucesivas hasta el esariado final y eventual electrodeposición de una capa, generalmente de plomo-estaño, con funciones antioxidantes para el soporte de acero y de protección durante el período de rodaje del semicojinete. Los semicojinetes con protección o molde de bronce son usados muy raramente y casi siempre en motores grandes.



En reposo el peso empuja el gorrón contra el cojinete, si bien la untuosidad del aceite evita el contacto directo. En el arranque la excentricidad hace aumentar gradualmente la presión, hasta alcanzar el régimen en que, bajo el efecto de la velocidad, el gorrón flota en el aceite (sustentación hidrodinámica). El cuarto dibujo indica las variaciones de la presión de la capa de aceite.

Figura II.48 Lubricación hidrodinámica de los cojinetes de fricción

Los cojinetes de fricción deben tener algunas propiedades características. La primera y la más obvia es que exista compatibilidad entre los materiales del cojinete y el órgano en movimiento; en la práctica, esta condición se cumple normalmente, pues basta que los materiales en contacto no sean afines entre sí (por ejemplo, acero con acero).

El segundo requisito fundamental, es la aptitud para soportar presiones específicas y velocidades de rozamiento elevadas. En el cálculo de los cojinetes se debe tener en cuenta que la presión específica media no ha de superar los valores para los cuales se llega al contacto directo entre cojinete y gorrón. De este modo en las condiciones de funcionamiento normal se tiene un rozamiento indirecto, o sea que entre el cojinete y el gorrón se interpone siempre una capa de aceite; o, a lo más, un rozamiento combinado, o sea en parte directo y en parte indirecto.

Además de las presiones específicas, los cojinetes deben resistir el calentamiento, pues si la temperatura de funcionamiento es excesiva, la viscosidad del aceite se reduce y, por consiguiente, el lubricante deja de ejercer su acción soportante. Esto conduce a un contacto directo entre cojinete y gorrón y, en consecuencia, a un mayor calentamiento provocando el gripado y la fusión. Naturalmente, el calentamiento es función del coeficiente de rozamiento característico del material componente del cojinete, de la velocidad de rotación, de las características de acoplamiento, de las posibilidades de refrigeración y de la cantidad de aceite circulante.

II.12 LUBRICACION

Los motores modernos son lubricados ya sea mediante un sistema de circulación alimentado a presión o mediante una combinación de alimentación a presión y salpicadura. (Figura II.49). En un sistema completamente a presión, el aceite se pasa por un filtro (la Figura II.50 muestra un tipo flotante), antes de pasar a la bomba del aceite que es movida por el árbol de levas. El aceite proveniente de la bomba se divide en dos o más flujos; uno de ellos entra al filtro y regresa al depósito de aceite, un segundo flujo va hasta los cojinetes principales y mediante conductos taladrados a través de los brazos del cigüeñal hacia los cojinetes de las balas, un tercer flujo continúa hasta los cojinetes del cigüeñal; puede llegar un cuarto flujo a una flecha hueca que soporta a los balancines, de ahí a los cojinetes de ellos y a la junta de los balancines y el levantaválvulas. El aceite que escurre por el levantaválvulas lubrica las punterías y las levas. Las paredes del cilindro reciben suficiente aceite de los sobrantes por exceso provenientes de los cojinetes de las bielas. Por esto, un cojinete de biela flojo puede sobrecargar a los anillos que controlan el aceite, como para que surja una falla de la bujía.

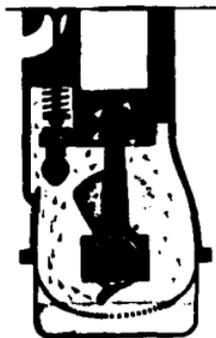


Figura II.49 Lubricación combinada a presión y salpicadura

En vista de que es costoso el barrenado del cigüeñal y de las bielas, se pueden colocar debajo de cada biela, artesas que se mantendrán llenas de aceite proveniente de la bomba. Una saliente en el extremo de la biela, se sumerge en la artesa y forma un rocío de aceite para lubricar el cojinete de la biela, las paredes del cilindro y el pasador del émbolo

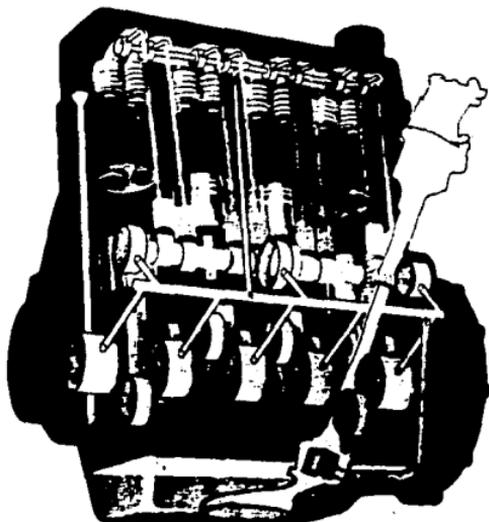
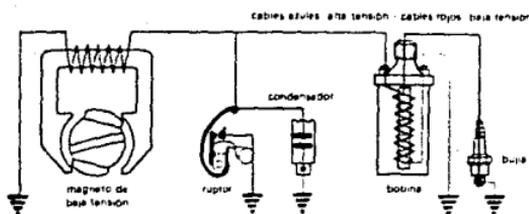


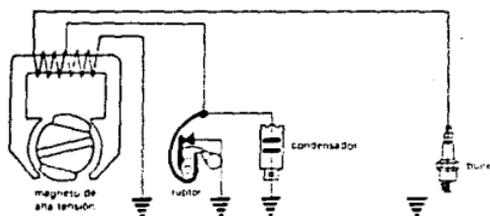
Figura II.50 Circuito de lubricación

II.13 SISTEMAS DE ENCENDIDO.

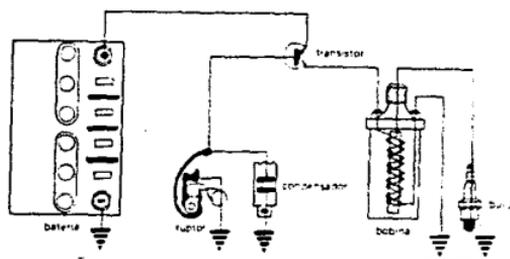
El sistema de encendido consta de un acumulador o un magneto, una bobina de encendido, un distribuidor con levas y platinos y una bujía para cada cilindro. (Figura II.51). En el motor de cuatro carreras se requiere una revolución completa del cigüeñal por cada ciclo. Por esta razón deberá haber un chispazo en cada cilindro a intervalos de 720° de giro del cigüeñal. Para garantizar esta secuencia, el distribuidor se mueve mediante el árbol de levas a la misma velocidad obteniéndose una revolución del distribuidor por cada dos revoluciones del cigüeñal (para un ciclo de dos carreras el distribuidor deberá moverse a la velocidad del motor). En la



a) Magneto de baja tensión



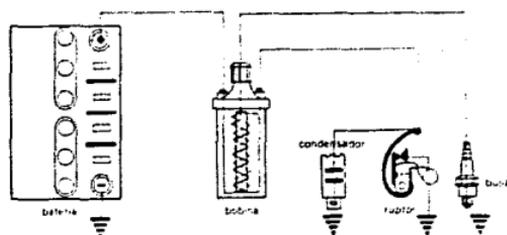
b) Magneto de alta tensión



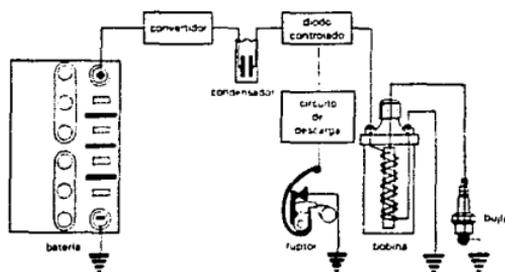
c) Encendido transistorizado

Figura II.51 Diferentes tipos de encendido

(sigue →)



d) Encendido por delco



e) Encendido por descarga capacitiva

Figura II.51 Diferentes tipos de encendido

flecha del distribuidor, debajo de éste se encuentra una leva con un lóbulo por separado para cada bujía. A medida que gira la flecha del distribuidor, los platinos son separados por uno de los lóbulos de la leva siendo interrumpida la corriente que proviene del acumulador y pasa por la bobina. Debido a esta interrupción se induce un alto voltaje en la bobina. Este potencial es enviado al contacto central de la tapa del distribuidor y de ahí a la bujía conveniente. Debido a los muchos lóbulos de la leva pueden inducirse una serie de impulsos eléctricos correctamente sincronizados, que son luego dirigidos por el distribuidor hacia los diferentes cilindros.

-Encendido electrónico.

El sistema convencional con platinos es un sistema mecánico

que requiere de un mantenimiento periódico para su funcionamiento óptimo. Para ello se puede citar, por ejemplo, el caso de un automóvil impulsado por un motor de ocho cilindros con encendido convencional a una velocidad cercana a los 100 km/h; el juego de platinos se abre y cierra más de 12000 veces por minuto. Al producirse el arco eléctrico se generan en los platinos altas temperaturas, razón por la cual se tienen puntos de tungsteno. Después de unas 250 horas de funcionamiento a temperaturas candentes, los platinos dejan de transmitir fielmente la corriente; además, su desgaste altera la sincronización del encendido, lo que no sucede con el novedoso encendido electrónico.

Con el encendido electrónico se eliminan platinos y condensador y el avance sigue exactamente igual al convencional, pero la unidad magnética y el reluctor sustituyen a los platinos y a la leva del distribuidor, como se muestra en la Figura II.52.

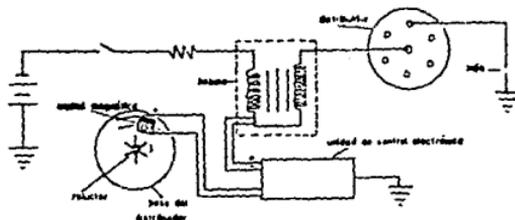


Figura II.52 Encendido electrónico

La unidad magnética consiste de un imán permanente conectado a una bobina arrollada alrededor de un polo. El reluctor es como una especie de engrane, con tantos dientes como cilindros tenga el motor. No es imán pero es mejor conductor magnético que el aire y funciona como un generador que induce impulsos magnéticos a medida que cada diente se aproxima al polo; esto produce un voltaje positivo en las terminales de la bobina. A medida que el diente se aleja del polo, la fuerza del campo magnético se reduce y se induce un voltaje negativo, generándose, de esta manera, impulsos eléctricos que se transmiten a la unidad de control electrónica.

Cuando el voltaje positivo es inducido, la unidad de control permite el paso de corriente por el devanado primario de la bobina. La unidad de control está conectada a tierra. Al alejarse el diente del polo, el voltaje se convierte en negativo y se neutralizan los circuitos de la unidad de control, entonces la corriente no va hacia tierra y la corriente primaria de la bobina de encendido es interrumpida; esta interrupción induce suficiente voltaje en el

secundario para que se produzca el arco entre los electrodos de la bujía.

II.14 BOMBA DE GASOLINA

Para alimentar gasolina al motor se necesita algún medio. Un método utilizado es el de alimentación por gravedad, por medio de un tanque colocado más alto que el carburador. Otro sistema utilizado es el tanque de vacío operado por el vacío creado en el múltiple del motor. Los automóviles modernos utilizan una bomba operada por el mismo motor, que bombea la gasolina necesaria desde el tanque de depósito y, a través de la tubería, hasta el carburador.

-Funcionamiento

Para accionar la bomba, hay en el árbol de levas, una diseñada especialmente. Cuando la parte más alta de esta leva al girar, empuja el brazo del balancín, éste, por medio de unas varillas tira hacia abajo del diafragma. Al bajar el diafragma crea un vacío en la cámara de gasolina que abre la válvula de entrada y cierra la de salida. Por la presión atmosférica en el tanque, la gasolina es forzada a entrar a la cámara. Cuando la parte más baja de la leva entra en contacto con el balancín, el diafragma sube creando una presión en la gasolina que se encuentra en la cámara. Esto cierra la válvula de entrada y abre la de salida forzando la gasolina hacia el carburador. La anterior descripción correspondió a una bomba mecánica. (Figura II.53).

Otro tipo de bomba de gasolina es la eléctrica, que suele ocupar un lugar cercano al depósito de gasolina y alejado del motor y del calor que éste produce. El principio de funcionamiento de las bombas eléctricas es el mismo que el de las mecánicas, con la excepción de que el diafragma es accionado por un solenoide (electroimán), en lugar del árbol de levas. El solenoide se activa por medio de un ruptor y hace que el diafragma sea oprimido contra su muelle y aspire gasolina desde el depósito. Entonces el ruptor se abre y el muelle empuja al diafragma que impele gasolina al carburador. (Figura II.54)

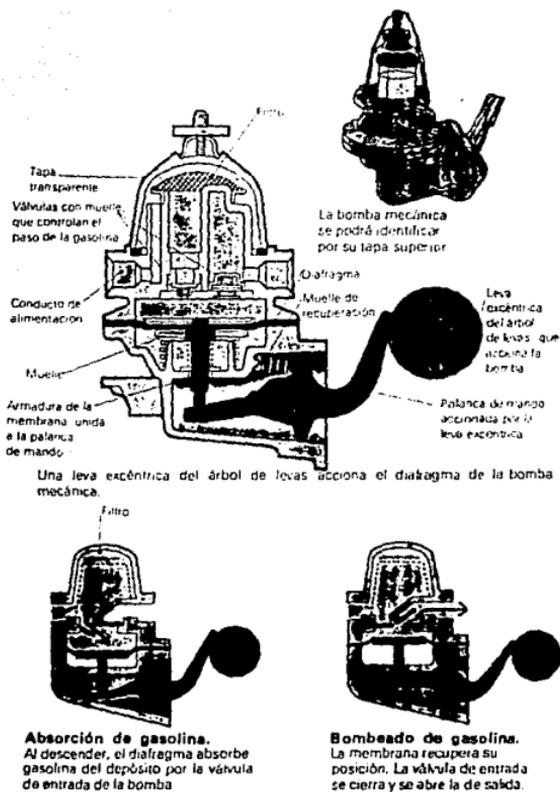
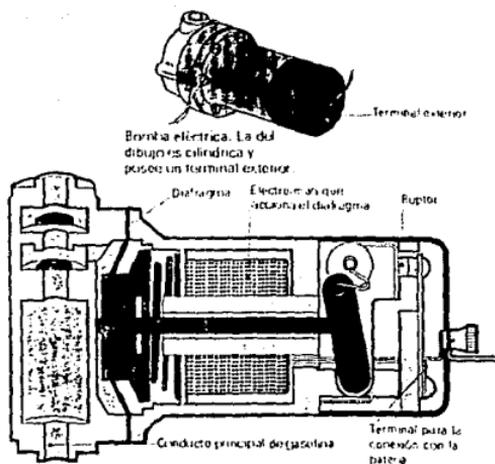
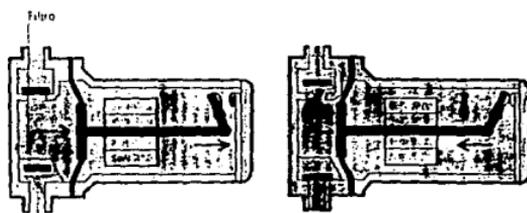


Figura II.53 Bomba mecánica



Al ser activado, el solenoide de la bomba eléctrica oprime el diafragma contra un muelle y la gasolina penetra en la bomba.



Absorción de gasolina.
Al desplazarse el electroimán al diafragma se abre la válvula de entrada; la de salida está cerrada.

Bombeado de gasolina.
El muelle recupera al diafragma. La válvula de salida se abre y la de entrada se cierra.

Figura II.54 Bomba eléctrica

COMBUSTIBLES Y COMBUSTION**III.1 COMBUSTIBLES**

"Combustible Termol. Sustancia apta para ser oxidada desarrollando calor (quemada).

Estas sustancias pueden ser naturales o artificiales, o bien, desde otro punto de vista, sólidas, líquidas o gaseosas.

Los combustibles naturales sólidos son: madera, turba, lignito, hulla y antracita: tienen el mismo origen geológico, pero se caracterizan por su diferente edad.

El combustible natural líquido es esencialmente el petróleo, con sus diferentes composiciones y variedades. Se encuentran combustibles naturales gaseosos junto con el petróleo, o se desarrollan en los pantanos o en los volcanes, constituidos principalmente por metano, mezclado con cantidades muy pequeñas de etano y otros hidrocarburos.

Los combustibles artificiales sólidos son el cok y el carbón vegetal, que se prepara por destilación seca de la madera en las carboneras o en retortas.

Los combustibles líquidos están constituidos por los productos de la destilación fraccionada del petróleo.

Los combustibles artificiales gaseosos están constituidos por el gas del alumbrado, que se produce mediante una apropiada destilación seca de la hulla, el gas de aire, constituido por una mezcla de óxido de carbono con nitrógeno, que se obtiene haciendo pasar aire en cantidad deficiente sobre carbón al rojo, y el gas de agua, formado por una mezcla de óxido de carbono e hidrógeno, que puede obtenerse haciendo pasar vapor de agua sobre carbón rojo.

Otros combustibles gaseosos se obtienen en las operaciones de destilación fraccionada del petróleo bruto."

III.1.1 PRINCIPALES FAMILIAS DE HIDROCARBUROS EN EL ACEITE CRUDO

Es muy posible, aún cuando no económicamente factible, convertir casi todo el petróleo crudo en gasolina y combustible diesel. Sin embargo, como hay demanda por muchos productos diferentes de la gasolina, el costo del equipo refinador, así como los precios de los productos en el mercado, dictan la división del crudo en diversos productos de variada utilidad. En la Figura III.1 se ilustran los pasos del proceso de la división del crudo en tales productos.

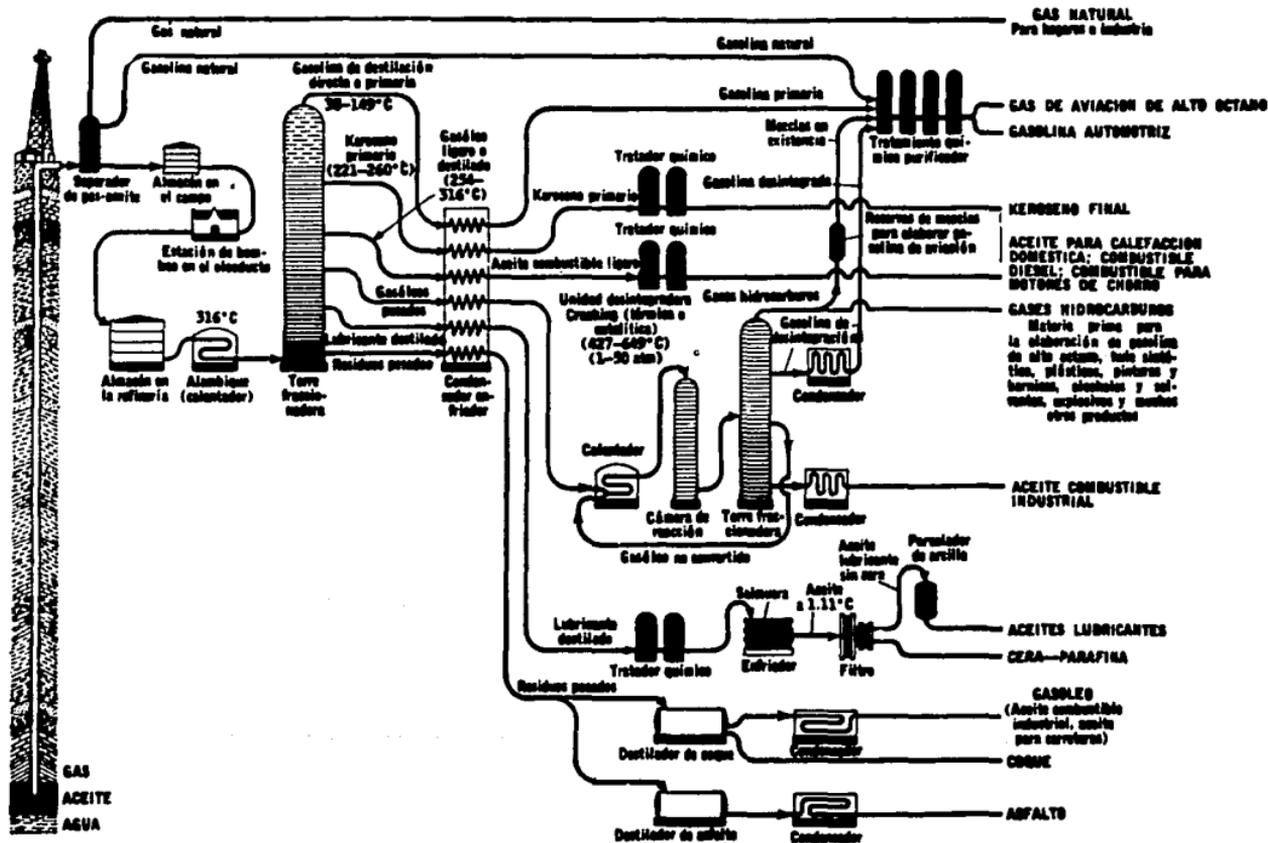


Figura III.1

Diagrama de flujo de una refinera

(American Petroleum Institute)

FAMILIA	FORMULA	ESTRUCTURA
Parafina (alcanos)	C_nH_{2n+2}	Cadena
Nafteno	C_nH_{2n}	Anillo
Aromáticos	Benceno C_nH_{2n-6}	Anillo
	Naftaleno C_nH_{2n-10}	

Tabla III.1 Familias de Hidrocarburos. Fórmulas Generales

(Tomada de "Motores de Combustión Interna". Edward F. Obert. Ed. CIESA. 1974.)

En el subsuelo suele estar el aceite sometido a grandes presiones y su liberación permite a los compuestos ligeros en ebullición, pasar al estado gaseoso, por lo que el aceite que emerge del pozo es una mezcla de gases húmedos y de líquidos. Los gases húmedos son separados de la parte líquida del crudo, pasando la mezcla a través de un absorbente. En este caso, el fluido pasa por entre un gasóleo de baja volatilidad y las gotitas del líquido son absorbidas en tanto que, el gas esencialmente seco abandona al absorbente. Cuando la gasolina líquida queda libre mediante el calentamiento del gasóleo, se requiere un tratamiento relativamente sencillo, antes de poder utilizarla, llamándosele gasolina natural o de cabezal.

La etapa preliminar en la refinación del petróleo es la de pasar crudo caliente por el interior de una torre fraccionadora, ésta contiene una serie de artesas en donde los componentes de alto punto de ebullición se condensan en bandejas inferiores y los de bajo punto de ebullición en las superiores.

Las fracciones obtenidas en niveles más elevados, se llaman gasolina de destilación directa y representan la fracción más ligera de aceite crudo. Debe notarse que la gasolina no es sólo un compuesto, sino que reciben ese nombre muchos compuestos que cubren una franja de la curva de destilación, sin que haya puntos definidos de donde comienza y donde termina. La gasolina de baja volatilidad se denomina aceite para alumbrado llamado KEROSENO. A las fracciones más pesadas se les llama gasóleo. Los productos finales de base parafina son para fines de lubricación.

La mayoría de las refinerías incluye un desintegrador catalítico debido a que la calidad de las gasolinas, para resistir el autoencendido, es superior a la de las gasolinas producidas por desintegración piragénica.

Las variables fundamentales en las reacciones de desintegración son la temperatura, el tiempo de exposición, la presión y las características de la materia prima que se va a desintegrar. Una

alteración en cualesquiera de estas variables cambiará la composición del producto desintegrado. Por esta razón, se construyen plantas piloto estudiándose las reacciones en escala pequeña, antes de hacer el diseño final y de que se establezcan las condiciones de funcionamiento.

III.1.2 GASOLINAS. CARACTERISTICAS

La gasolina que se expende en el mercado es una mezcla de productos obtenidos mediante diferentes procesos. Con dichas mezclas, se ajustan las propiedades del combustible para obtener las características de funcionamiento deseadas, siendo estas características las de especial interés para el ingeniero. Por lo tanto, independientemente de su origen, la gasolina debe tener las propiedades siguientes:

CARACTERISTICAS DE GOLPETEO (CASCABELEO). Actualmente el patrón de comparación es el número octano. En términos generales, el mejor combustible es el que tiene número de octano mayor.

VOLATILIDAD

- a) Características de arranque. La gasolina pondrá en movimiento al motor, rápidamente, siempre que una parte de ella tenga bajo punto de ebullición como para permitir que se forme la mezcla combustible a la temperatura ambiente.
- b) Características de vaporización. El combustible debe tener una baja presión de vapor, a las temperaturas existentes en las tuberías, para evitar la vaporización en ellas y en el depósito del flotador; vaporización que impide o limita el flujo de combustible líquido.
- c) Dilución en el cárter. La dilución del aceite lubricante tiene lugar cuando se condensa el combustible, o cuando deja de vaporizarse en el motor, siendo deseable una temperatura de destilación baja.

DEPOSITOS GOMOSOS Y BARNIZ. El combustible no deberá depositar en el motor, ni goma ni barniz.

CORROSION. El combustible y los productos de la combustión no deben ser corrosivos.

La cualidad antidetonante de un combustible se mide mediante su octanaje. Al heptano, que es un combustible muy deficiente en cuanto a que provoca auto-ignición en los motores, se le da el valor 0 de octanaje.

Por otra parte, el 2, 2, 4 trimetil pentano (al cual se le conoce generalmente con el nombre incorrecto de isoctano) es un

combustible excelente. A esta sustancia se le asocia el valor de 100 de octanaje.

Los combustibles se comparan (en una máquina de pruebas) contra mezclas variables de heptano y 2, 2, 4 trimetilpentano (isooctano). Una gasolina que tiene un comportamiento igual al de una mezcla de 10% (en mol) de heptano y 90% (en mol) de isooctano, tiene un octanaje de 90.

Se ha establecido una escala para los combustibles EC, con los mismos lineamientos que para los combustibles ECH. Así el HEXADECANO (CETANO), se incendia rápidamente en un motor EC para relaciones de compresión bajas y por ello se le asignó arbitrariamente un número cetano 100. El otro combustible primario, de referencia para la escala cetano, es el ALFA-METIL NAFTALENO, con un valor arbitrario de 0 cetano.

Por lo tanto, un número cetano de 45 asignado a un aceite combustible significa que tendrá característica de autoencendido equivalente a los de una mezcla de 45 partes en volumen de cetano y 55 partes de alfa-metil naftaleno. (La relación de volúmenes es equivalente a una relación en moles).

Las características más importantes de algunos combustibles se muestran en las Tablas 1, 2 y 3 del Apéndice de este capítulo.

Continuando con la descripción de los combustibles mencionaremos que estos pueden tener azufre libre, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos de azufre. El contenido de azufre se determina midiendo la cantidad de bióxido de azufre formado por la combustión y traduciéndola a un peso equivalente de azufre libre (aún cuando se encuentra en el combustible en forma de compuestos diferentes). El azufre o sus compuestos, son elementos corrosivos que atacan a las tuberías, los carburadores y las bombas de inyección. Puede unirse con el oxígeno para formar bióxido de azufre que en presencia del agua a baja temperatura, tiende a formar ácido sulfúrico. Sin embargo, los gases de escape del motor usualmente abandonan a éste y a los tubos del escape a altas temperaturas y, por lo tanto, no tiene lugar la formación de ácido. Al suspender el funcionamiento del motor, ciertas partes quedan expuestas al agua a bajas temperaturas, que son las condiciones necesarias para la formación del ácido sulfúrico.

En virtud de que el azufre tiene una temperatura de encendido baja, la presencia de él tiende a reducir la temperatura de autoencendido, facilitando el golpeteo en el motor ECH y tendiendo a disminuir el golpeteo en el motor EC. Se ha encontrado que el comportamiento del combustible ECH al tetraetilo queda reducido por la presencia de azufre.

Para la mayoría de las gasolinas se exige un contenido de azufre menor del 0.1%.

El constructor diseña el motor con la idea de usar combustibles que sean obtenibles comercialmente. Si la relación de compresión de diseño es baja, de modo que pueda usarse gasolina barata, de bajo octano, la compra de gasolina de alto octano es antieconómica pues no dará mejor rendimiento, si el sistema de carburación tiene una zona caliente grande para evaporar gasolinas de alto punto de ebullición, no será necesario el empleo de un combustible volátil y su empleo ocasionaría un rendimiento bajo en el motor. Esto quiere decir que cuesta más trabajo introducir una mezcla aire-gas al cilindro cuando su temperatura se incrementa.

III.1.3 ACEITE COMBUSTIBLE

Como se ve en la Tabla 3 del apéndice, las temperaturas de autoencendido de las parafinas normales disminuyen a medida que aumenta la longitud de la cadena. Ya que el número cetano es una medida de las características de encendido del combustible, se puede concluir que los miembros más pesados de la familia de las parafinas tienen mayores números cetano. De hecho, el cetano (hexadecano) es la forma de la escala de cetanos con un valor arbitrario de 100, en tanto que otras n-parafinas tienen números cetano que varían casi siempre en proporción lineal con la longitud de la cadena. Los números cetano para los miembros de diferentes familias de hidrocarburos son, en general, menores que para las parafinas, en el siguiente orden: n-parafinas, naftenos, aromáticos (lo cual, por supuesto, es el orden inverso de la excelencia de los números octano). La relación inversa de las cifras cetano y octano muestra que los combustibles de cabezal que comúnmente son malos combustibles ECH, son deseables para los motores EC.

Los aceites combustibles comerciales son productos tanto de cabezal, de desintegración como mezclados.

La viscosidad del combustible ejerce una gran influencia sobre la forma del rocío: por ejemplo, altas viscosidades producen poca atomización (gotas de gran tamaño) y mayor penetración del chorro. En cámaras pequeñas de combustión, el efecto de la viscosidad puede ser crítica, por lo cual se especificarán valores máximos y también mínimos, nótese que un motor frío con aceite viscoso, recibirá casi siempre como consecuencia, un caudal compacto dentro de la cámara de combustión y el arranque se dificulta en tanto que, invariablemente, aparecerá el escape humeante.

AGUA Y SEDIMENTOS. De todas las especificaciones para el aceite combustible, el factor limpieza es probablemente el más importante, debido a la precisión de acoplamiento de las partes de la bomba del combustible y las toberas. Han sido dañados más motores por la suciedad y el agua en el aceite que, por cualquier otra deficiencia en sus especificaciones. Ni el agua, ni los sedimentos son desalojados de los aceites pesados tan rápidamente como lo son de la gasolina. La presencia del agua salada es especialmente dañina, por

corrosiva.

PUNTO DE INFLAMACION. El punto de inflamación es la temperatura más baja del fluido que permite se formen vapores inflamables. Se le encuentra calentando lentamente al combustible y pasando una llama por la superficie líquida. Se obtiene una llama distinta en el punto de inflamación.

El punto de inflamación es importante por motivos de seguridad y es un índice del riesgo de incendio.

PODER CALORIFICO. El poder calorífico de un combustible se determina quemándolo con oxígeno en una bomba y tomando nota de la elevación de la temperatura del baño refrigerante. La cantidad de calor transferida al refrigerante dependerá parcialmente, de que todo o parte del vapor de agua formado por la combustión se condense. Si se condensa todo el vapor de agua, se obtiene el poder calorífico superior; si nada del vapor de agua se condensa, se obtiene el poder calorífico inferior.

III.1.4 DATOS TECNICOS DE LOS COMBUSTIBLES ELABORADOS POR PEMEX

Un combustible se compone de elementos químicos los cuales, por su unión química rápida con el oxígeno, producen la combustión. En todos los combustibles de uso común los elementos que se buscan, por tener el calor de formación necesario y la velocidad suficiente para reaccionar, son el carbón y el hidrógeno. Estos dos elementos químicos se combinan con otros de diferentes maneras, produciendo los combustibles comerciales. Se emplean combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. El carbón es el combustible sólido que más se usa comúnmente, pero también a veces se usan desperdicios industriales. El petróleo es el tipo de combustible líquido más importante. El tercer grupo lo forman los gases naturales y los que resultan como productos secundarios en la industria, además de los manufacturados pero estos últimos se usan rara vez debido a su alto costo. Ocasionalmente es posible usar gases que son productos secundarios.

En nuestro país, el consorcio paraestatal que produce los combustibles derivados del petróleo es PEMEX, entre algunos de ellos podemos citar: aceites combustibles, coke, combustóleos, gases, diesel, gasolinas, etc. De acuerdo a los objetivos de este trabajo, se presentan las características de aquellos que son de mayor interés.

En las siguientes Tablas (III.2), (III.3) y (III.4) se muestran las características del Diesel, la Gasolina Extra SP y la Gasolina Nova respectivamente. Al final del capítulo, en el apéndice, se anexan las tablas 4, 5 y 6 con las características del Diesel Especial, el Gas Licuado Baja Presión y la Turbosina.

CARACTERISTICAS	ANALISIS TIPICO	METODO ASTM
Color ASTM	2.0	D-1500-64
Peso Especifico a 20/4 C	0.852	D-1289-67
Temp. de Inflamación, C	77	D- 93-73
Temp. de Congelación, C	6	D- 97-66
Viscosidad S.U.S a 37.8 C	38	D- 88-56
Azufre Total, % peso	1.00	D- 129-64
Indice de Cetano	52	D- 976-66
Carbón Ramsbotton (En 10% de residuo), % peso	0.1	D- 524-64
Agua y Sedimento, % vol.	0.05	D-1796-68
Destilación		D- 86-67
Temp.inicial ebullición, C	185	
10% destila a, C	225	
50% destila a, C	287	
90% destila a, C	344	
Temp.final ebullición, C	371	
Poder Calorífico neto, Kcal/Kg.	10 680	
APLICACIONES	MANEJO	
Combustible automotriz e industrial	Autotanques y carrotanques	

Tabla III.2 Diesel

(Tomada del Manual de Propiedades de Productos elaborados por PEMEX)

CARACTERISTICAS	ANALISIS TIPICO	METODO ASTM
Color	Amarillo	Visual
Peso Especifico a 20/4 C	0.729	D-1298-67
Indice de Octano, F.-1	91.4	D-2699-70
Presión de Vapor Reid, Lb	7.4	D- 323-72
Período de Inducción, min.	300	D- 525-55
Azufre, % en peso	0.15	D-1266-70
Goma Preformada, mg/100 ml.	0.9	D- 381-70
Destilación		D- 86-67
Temp. Inicial de Ebullición, C	46	
El 10% destila a, C	61	
El 50% destila a, C	102	
El 90% destila a, C	171	
Temp. Final de Ebullición, C	207	
APLICACIONES	MANEJO	
Gasolina para vehículos de motor y especifica para los que cuentan con convertidor catalítico	Autotanques y carrotanques	

Tabla III.3 Gasolina Extra SP

(Tomada del Manual de Propiedades de Productos elaborados por PEMEX)

CARACTERISTICAS	ANALISIS TIPICO	METODO ASTM
Color	Azul	Visual
Peso Específico a 20/4 C	0.726	D-1289-67
Azufre, % en peso	0.09	D-1266-70
Indice de Octano F-1	82.7	D-2699-70
Presión de Vapor Reid, lb.	8.5	D- 323-72
Corrosión 3 hr. a 50 C	Std. 1-Aq	D- 130-68
Goma Preformada, mg/100 ml.	0.9	D- 381-70
Contenido de Tetraetilo de Plomo, ml/gal.	2.19	D- 526-70
Período de Inducción, min.	> 300	D- 525-55
Destilación		D- 86-67
Temp.Inicial de ebullición, C	41	
10% destila a, C	61	
50% destila a, C	110	
90% destila a, C	175	
Temp. Final de Ebullición, C	210	
APLICACIONES	MANEJO	
Gasolina para vehículos de motor.	Autotanques y carrotanques	

Tabla III.4 Gasolina Nova

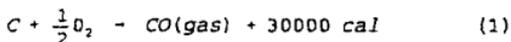
III.2 COMBUSTION

"Combustión Quím. gral. Proceso químico de oxidación de un compuesto, llamado combustible, por parte de otro generalmente el oxígeno, llamado comburente. Las reacciones de combustión son globalmente exotérmicas, o sea, en general desarrollan calor, y a alta temperatura también luz.

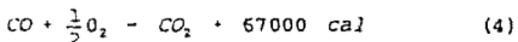
La temperatura es un factor esencial en el curso y en la fenomenología de la combustión. Así, calentando progresivamente en medio oxidante un combustible, la oxidación procede inicialmente con un curso lento con tal de que no se cese de proporcionar energía del exterior; sin embargo, una vez superado un determinado umbral, o sea un gradiente térmico llamado temperatura de ignición, la reacción de combustión parte con una gran intensidad y no importa ya proseguir la calefacción, porque el calor emitido por la combustión es suficiente para la continuación del proceso oxidante. La experiencia demuestra que la temperatura de ignición de un combustible depende de muchos factores. Es diferente según el estado de agregación del combustible; p. ej., si es sólido (carbón), la temperatura de ignición depende, no solamente de la calidad, sino del modo en que esté fragmentado, de la porosidad, de la composición de las cenizas, etcétera.

La energía relacionada con el proceso de combustión depende evidentemente del contenido en carbono, de la presencia de materias volátiles, de la intensidad del residuo incombustible (cenizas) y de la humedad.

La termoquímica ha definido suficientemente la energía relativa a muchas reacciones. P. ej.:



de la correlación entre (1) y (2) se infiere, por la ley de Hess:



La suma de las energías térmicas de la (1) y de la (4) iguala la tonalidad térmica de la (2) en cuanto se alcanza el mismo

compuesto final, aunque a través de estadios diferentes.

Conociendo las proporciones de los elementos (C, H, S, etc.), es fácil para un químico calcular exactamente, o sea estequiométricamente, el aire o el oxígeno necesarios para la completa combustión. Sin embargo, si bien para los combustibles gaseosos (p. ej., metano) la cantidad teórica de aire es prácticamente idéntica a la utilizada, en el caso de los combustibles líquidos, y con mayor razón en el de los sólidos, debe emplearse un volumen de aire mayor para obtener un suficiente tiraje a través de la parrilla. Este incremento de aire (o aire en exceso) sustrae energía térmica y por tanto degrada el rendimiento de la combustión. También debe tenerse presente que si el agua (producto de combustión del hidrógeno) se halla en fase gaseosa (vapor) o en fase condensada (líquido) debe computarse el calor latente de vaporización." ¹¹¹

III.2.1 COMPOSICION DEL AIRE SECO

El oxígeno necesario para la combustión es captado siempre del aire, acompañándole gran cantidad de nitrógeno. Debido a que no es fácil la separación de ambos, el oxígeno embotellado se utiliza para determinadas aplicaciones como, por ejemplo, en el soplete para cortar donde no pueden permitirse los efectos diligentes del nitrógeno. Por lo tanto, revisemos las propiedades del aire seco como manantial de oxígeno. En la Tabla III.5 figuran los porcentajes de los principales componentes del aire seco. Cada gas se encuentra en la atmósfera a su presión parcial propia, independientemente de la presencia de los otros gases (Ley de Dalton).

COMPONENTE	% EN VOLUMEN (o en moles)	% EN PESO	PESO MOLECULAR (kg/mol)
Oxígeno	20.99	23.19	32.000
Nitrógeno	78.03	75.47	28.016
Argón	0.94	1.30	39.944
Anhídrico Carbónico	0.03	0.04	44.030
Hidrógeno	0.01	0.00	2.016
Aire Seco	100.00	100.00	28.961

Tabla III.5 Composición del aire seco

¹¹¹ Enciclopedia Británica Hombre Ciencia y Tecnología. (Vol. II)

Para ciertos cálculos se supone que el aire se halla constituido por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, en volumen y por 23.2% de oxígeno y el 76.8% de nitrógeno, en masa. Todos los constituyentes, excepto el oxígeno pueden considerarse en conjunto como un gas inerte cuyo peso molecular es 28.2 en vez de 28.0 que corresponde al nitrógeno puro.

La relación molar entre el nitrógeno y el oxígeno del aire es la misma que su relación volumétrica, debido a que ambos son gases y se encuentran a la misma temperatura; por lo tanto, se tendrá:

$$\frac{\text{moles } N_2}{\text{moles } O_2} = \frac{79\%}{21\%} = 3.76$$

Lo cual significa que por cada mol de oxígeno presente en el aire, existen 3.76 moles de nitrógeno. Por consiguiente, en un motor de combustión interna, por cada volumen de oxígeno que pasa por el filtro de aire, el carburador, las válvulas de admisión y el cilindro, entran 3.76 volúmenes de nitrógeno.

III.2.2. QUIMICA DE LA COMBUSTION

Los grados de la combustión varían ampliamente, conociéndose la combustión lenta y la combustión muy rápida o detonación. De acuerdo con los fundamentos de la química la unión de carbono y oxígeno se expresa de la forma siguiente:



$$1 - 1 \longrightarrow 1 \quad (\text{en moles})$$

$$12 - 32 \longrightarrow 44 \quad (\text{en masa})$$

Las expresiones anteriores indican que 1 masa molecular de carbono se combina con 1 masa molecular de oxígeno para producir 1 masa molecular de anhídrido carbónico. Un mol de sustancia vale M kilogramos, cuando M es la masa molecular. Aunque las cantidades que se combinan pueden expresarse en kilogramos, es más sencillo efectuar todos los cálculos utilizando moles y transformarlos en kilogramos o metros cúbicos solamente cuando sea necesario.

Se dice que una combustión es completa cuando el combustible es totalmente oxidado y se libera toda la energía. La combustión incompleta puede ser debida a:

1. Insuficiencia de oxígeno
2. Mezcla imperfecta entre el combustible y el oxígeno, y
3. Temperatura demasiado baja para mantener la combustión.

Las expresiones siguientes corresponden a la combustión incompleta, debido a la presencia de óxido de carbono y de hidrógeno libre en los respectivos productos finales.



Tomando en cuenta la composición de aire seco, estudiemos la combustión de los elementos constituyentes de los combustibles usados en los motores ECH:

-COMBUSTION DEL CARBONO

La combustión del carbono en el aire viene representada por la siguiente relación:



$$1 + 1 + 3.76 \longrightarrow 1 + 3.76 \text{ (en moles)}$$

$$12 + 32 + 3.76 (28.2) \longrightarrow 44 + 3.76 (28.2) \text{ (en masa)}$$

Dividiendo entre 12:

$$\frac{1}{\text{combustible}} + \frac{2.667 + 8.84}{\text{aire}} \longrightarrow \frac{3.667 + 84.8}{\text{productos}} \text{ (en masa)}$$

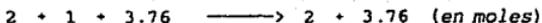
Por lo tanto, el aire requerido será:

$$(2.66 + 8.84) / 1 = 11.5 \text{ Kg de aire / Kg de carbono}$$

-COMBUSTION DEL HIDROGENO

La combustión del hidrógeno en el aire viene representada por la siguiente relación:





Dividiendo entre 4:

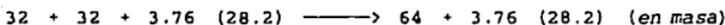
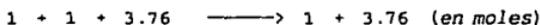
$$\frac{1}{\text{combustible}} + \frac{8 + 26.5}{\text{aire}} \longrightarrow \frac{9 + 26.5}{\text{productos}} \text{ (en masa)}$$

Por lo tanto, el aire requerido será:

$$(8 + 26.5) / 1 = 34.5 \text{ Kg de aire / Kg de hidrógeno}$$

-COMBUSTION DEL AZUFRE

Para la combustión del azufre en el aire se tiene:



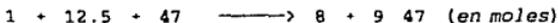
Dividiendo entre 32:

$$\frac{1}{\text{combustible}} + \frac{1 + 3.32}{\text{aire}} \longrightarrow \frac{3 + 3.32}{\text{productos}} \text{ (en masa)}$$

Por lo tanto, el aire requerido por Kg de azufre será:

$$(1 + 3.32) / 1 = 4.32 \text{ Kg}$$

Como ejemplo de combustión de hidrocarburos consideremos el caso de la gasolina típica. (C_8H_{18})



Dividiendo entre 114:

$$\frac{1}{\text{combustible}} + \frac{3.51 + 11.62}{\text{aire}} \longrightarrow \frac{3.09 + 1.42 + 11.62}{\text{productos}} \quad (\text{en masa})$$

Así pues, para la combustión de cada kilogramo de esta gasolina se necesitan $(3.51 + 11.62) / 1$ ó 13.13 Kg de aire estando éste constituido por 3.51 Kg de oxígeno y 11.62 Kg de nitrógeno.

La relación aire/combustibles es, por consiguiente, 15.13 a 1, y la relación combustible/aire es de 1 a 15.13, o sea 0.066. Estas expresiones se utilizan mucho para indicar la riqueza o la pobreza de una mezcla de combustibles y aire. La expresión anterior representa una mezcla perfecta, químicamente correcta o ideal. Las proporciones químicamente correctas no producen la combustión completa, pues por la ley de la probabilidad no es posible que cada una de las extraordinariamente numerosas moléculas que componen el combustible encuentre una molécula de oxígeno para combinarse con ella. Para lograr la total oxidación del combustible es necesario utilizar una mezcla que tenga un cierto "exceso de aire".

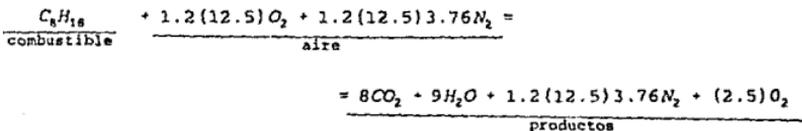
Si el aire está faltando pueden producirse pérdidas importantes en forma de óxido de carbono, hidrógeno libre e hidrocarburos destilados. En un hogar el fin que se persigue consiste en emplear el mínimo de exceso de aire compatible con la combustión completa. La cantidad de aire en exceso necesaria para el funcionamiento del hogar depende de:

1. El tiempo disponible antes de que los gases ascendentes alcancen la zona fría del altar y se enfrien por debajo del punto de ignición.
2. La temperatura a la cual se encuentra la mezcla, y
3. Del grado de mezclado entre el combustible y el aire.

Estos tres factores principalmente se resumen con frecuencia en las palabras: "tiempo, temperatura y turbulencia". Si un combustible puede ser fuertemente dispersado y totalmente mezclado con el aire, su combustión puede lograrse con un pequeño exceso de aire, por ejemplo: al quemarse gasolina típica, C_8H_{18} , con un 20% de exceso de aire en masa:



Con un 20% de aire en exceso:



$$F = \frac{1.2 (12.5) 32 + 1.2 (12.5) (3.76) 28.2}{12 (8) + 18} = 18.05 \frac{\text{Kg de aire}}{\text{Kg de combustible}}$$

Se supone que la masa neta de hidrógeno disponible para la combustión es la correspondiente al hidrógeno que no está combinado con el oxígeno formando agua. El análisis de la humedad permanente del carbón como hidrógeno y oxígeno, supone que todo el O_2 está combinado con el H_2 . La relación de combinación del H_2 al O_2 es de 1 a 8 en masa; por lo tanto, la masa neta de H_2 disponible para una ulterior oxidación vendrá dada por $(H-O)/8$.

III.2.3 PRODUCTOS DE LA COMBUSTION

Los gases de escape de los motores se denominan productos de la combustión. La composición de estos productos depende del tipo de combustible utilizado; de la relación aire/combustible y de las condiciones en que se efectúa la combustión. Generalmente contiene anhídrico carbónico, óxido de carbono, oxígeno, nitrógeno, carbono libre, cenizas ligeras, vapor de agua, anhídrico sulfuroso e hidrocarburos no quemados. La mayoría de estos productos son invisibles. El óxido de carbono presente en los gases de escape puede producir elevadas pérdidas de energía. En general, la aparición de densos humos gaseosos es indicio de que se trabaja a baja temperatura o con insuficiente oxígeno.

-Análisis de los productos de escape

Mediante analizadores de gases puede efectuarse un análisis de los productos de escape a partir del cual es posible calcular la relación aire/combustible. También puede determinarse el grado de efectividad de la combustión, y este dato es de vital importancia para el buen funcionamiento de un hogar o de un motor. Por medio de la medición de los gases de escape, los talleres mecánicos modernos ajustan en el carburador la relación aire/combustible. Por otra parte, las centrales térmicas de vapor registran continuamente, la concentración de CO_2 en los gases quemados o de escape, con el fin de controlar la marcha de la operación. En todas las instalaciones de combustión externa se trata siempre de conseguir la máxima concentración en CO_2 .

III.2.4 SISTEMA DE CARBURACION

La carburación desempeña un papel fundamental al permitir que el vehículo arranque con facilidad, acelere sin vacilaciones, circule de manera económica, rinda al máximo y no se detenga en pleno tráfico. Su misión consiste en mezclar una determinada cantidad de gasolina con otra de aire, y en suministrar una proporción adecuada de esta mezcla vaporizada a cada cilindro para su combustión. El

proceso completo de carburación comienza en el momento en que se realiza la mezcla de gasolina con el aire y termina cuando esta mezcla empieza a quemarse en los cilindros. De este modo, en la carburación intervienen los carburadores, el colector de admisión, e incluso las cámaras de combustión y los pistones.

El sistema de carburación proporciona gasolina al carburador éste está formado por un depósito de carburante montado a distancia, una bomba que impulsa la gasolina hasta la cuba del carburador, y varios filtros que impiden la entrada de impurezas.

Por regla general, una mezcla apropiada es de 15 partes aproximadamente de aire y una de combustible (denominada mezcla perfecta) que asegura la combustión completa del carburante. La combustión del aire y la gasolina produce, entre otros gases, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.

Una mezcla de más de 15 partes de aire por una de gasolina es llamada pobre y se utiliza frecuentemente cuando el vehículo viaja en un camino plano y a una velocidad razonable. Una mezcla con menos de 15 partes de aire por una de gasolina es llamada rica y se utiliza para altas velocidades o cuando se carga un gran peso.

La proporción de gasolina-aire se controla por medio de cámaras de aire, espreas y válvulas localizadas en el carburador.

EL CARBURADOR

La gasolina en su forma líquida natural no se quemará satisfactoriamente para hacer funcionar un motor de combustión interna. Primero deberá ser atomizada. Después de atomizada, la gasolina es vaporizada y mezclada con aire en proporciones adecuadas para la combustión. Estas proporciones varían ligeramente según la marca del motor. En volumen, la proporción será de 10,000 litros de aire por cada litro de gasolina; en masa la proporción es de 15 partes de aire aproximadamente por una de gasolina.

-Partes principales de un carburador

Espreas. Una esprea tiene una perforación calibrada. El tamaño de la perforación determina la cantidad de gasolina que puede fluir a través de la esprea. Esta puede ser parte integrada en la fundición o bien, separada y unida por medio de un pasaje en la fundición. Cada circuito de carburador tiene una o más espreas para controlar el flujo de combustible.

Respiraderos de aire. Son pequeñas aberturas que conducen aire del tubo o cuerpo del carburador hacia los circuitos del mismo. Mezclando aire con gasolina, ésta se atomiza parcialmente antes de llegar al punto de descarga.

Válvulas. Para controlar el flujo de la gasolina y aire se usan válvulas de varios tipos. Generalmente las válvulas que controlan el flujo de la gasolina son del tipo de aguja o de émbolo y las que controlan el flujo de aire son de mariposa.

El venturi. Se trata de una sección angosta del pasaje de aire del carburador. Su propósito es crear un vacío parcial en el pasaje de aire. Cuando a través del venturi pasa la misma cantidad de aire que en el resto del pasaje, la velocidad del aire será mayor en el punto más angosto. De ésto resulta una baja de presión que atrae o chupa gasolina en forma de rocío a través de la nariz de descarga que está montada en el punto más angosto del venturi. Mientras más rápido pase el aire a través del venturi, será mayor la cantidad de gasolina (halada o chupada) fuera de la nariz y mezclada a la corriente de aire. Frecuentemente para producir menor presión en determinadas áreas del pasaje, se utilizan venturis dobles o triples.

-Construcción del carburador.

Generalmente el carburador está formado por tres partes fundidas separadamente. La superior llamada cuerno de aire o pasaje de aire, la central llamada cuerpo principal y taza de combustible y la inferior llamada cuerpo de acelerador. El pasaje del carburador a través del cual pasa el aire, se llama garganta.

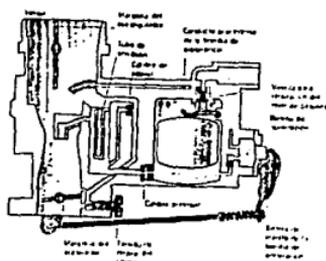


Figura III.2 Sección transversal de un carburador típico

-Circuitos del carburador

En la Figura III.3 se ilustran los circuitos del carburador para diferentes sistemas de marcha:

- a) marcha mínima
- b) baja velocidad
- c) alta velocidad y
- d) sistema de potencia

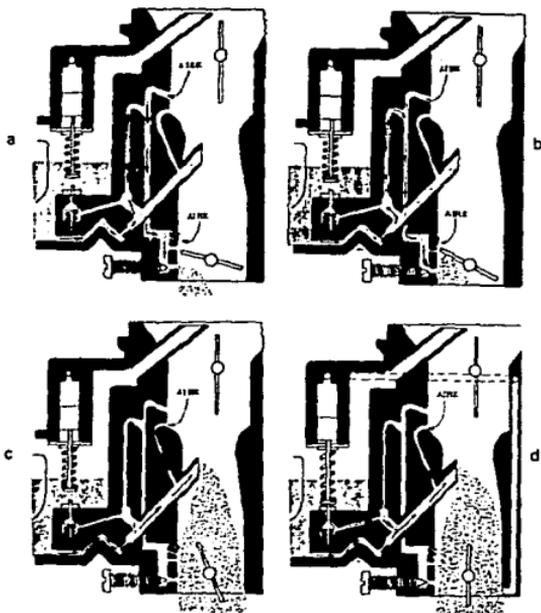


Figura III.3 Circuitos del carburador

III.2.5 TIPOS DE CARBURADORES

El carburador de difusor fijo, mostrado en la Figura III.4, consta de varios calibres y de una bomba de aceleración, que permite variar la mezcla según las necesidades del motor.

Al aumentar su velocidad en el difusor, el aire pierde densidad y, si no existiera un dispositivo compensador, la mezcla se enriquecería hasta que fuese demasiado rica para arder.

El carburador de difusor fijo resuelve este problema mediante el sistema de compensación, que mezcla algo de aire con la gasolina antes de que ésta entre en el difusor. En la mayor parte de los carburadores la compensación se efectúa mediante un tubo perforado, que emulsiona la mezcla. El calibre principal alimenta de gasolina a un pozo de emulsión, en el que se encuentra el tubo perforado, cerrado en su parte superior por un calibre, que regula el paso del

aire. Al aumentar las revoluciones del motor y disminuir el nivel de gasolina en el pozo, se intensifica la absorción de aire a través de una serie de orificios en el tubo, empobreciendo la mezcla automáticamente.

Otra posibilidad consiste en la instalación de un calibre de compensación, además del calibre principal. Al descender el nivel de gasolina en un pozo colocado al lado de la cuba, se absorbe aire a través del calibre, de compensación, de modo que el surtidor recibe una mezcla de aire y gasolina en lugar de gasolina sola.

La dimensión del calibre principal suele estar calculada para que produzca mezclas relativamente pobres, para que la velocidad de crucero resulte económica.

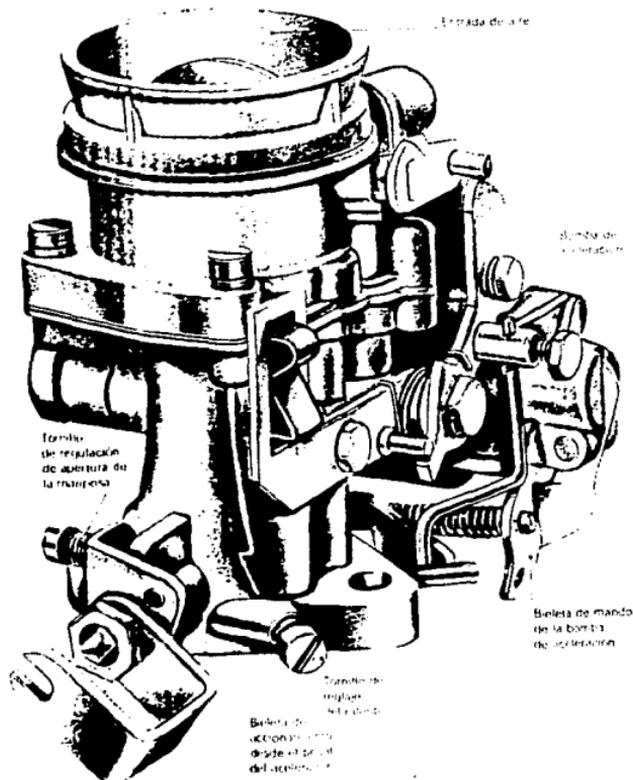


Figura III.4 Carburador típico de difusor fijo

Para conseguir mezclas ricas, necesarias cuando se circula con el acelerador a tope, el carburador de difusor fijo dispone de un segundo surtidor, que funciona con grandes aperturas de mariposa. Esto suplementa al surtidor principal, que así puede tener un calibre reducido para mayor economía.

En las siguientes Figuras: III.5, III.6 y III.7 se ilustran los carburadores de difusor variable, Weber de doble cuerpo y el carburador mixto.

III.2.9 INYECCION DE GASOLINA

En el sistema de inyección de gasolina, ésta entra a presión a través de unas pequeñas boquillas inyectoras, una para cada cilindro. La gasolina es impulsada por una bomba mecánica o eléctrica: los inyectores están situados en las conducciones de entrada de aire, muy cercano a donde se encuentran las válvulas de admisión.

El caudal de carburante inyectado y el tiempo de inyección dependen del sistema empleado, pero la cantidad de combustible debe ser exacta. El sistema produce una atomización muy fina del combustible y asegura su distribución ideal, siempre que la cantidad de aire que llegue a cada cilindro sea la misma. Con la inyección de gasolina no se necesita venturi, por lo que el flujo de aire encuentra menos obstáculos que en el carburador.

Como el colector de admisión sólo conduce aire, no necesita foco calorífico y puede tener una forma que no dificulte el paso de éste. Si se le compara con la carburación, la inyección de gasolina mejora la potencia del motor y la aceleración. Además puede reducirse el consumo, ya que la distribución de la mezcla es mejor.

Los principales inconvenientes del sistema de inyección son su elevado costo (mayor que el de sistemas de carburadores múltiples) y que las reparaciones (pocas veces necesarias) deben ser realizadas por un experto.

Existen dos tipos básicos de inyección:

- Inyección mecánica Lucas (Figura III.8)
- Inyección electrónica Bosch (Figura III.9)

Los sistemas de inyección electrónica, presentan dos ventajas sobre los mecánicos: disponen de innumerables dispositivos de alta sensibilidad para suministrar siempre a los cilindros el volumen adecuado de gasolina y no requieren un distribuidor mecánico de alta precisión.

Estas ventajas resultan evidentes en el sistema electrónico Bosch, uno de los más populares que además funciona a presiones de combustible más bajas que los mecánicos. Dispone de una bomba

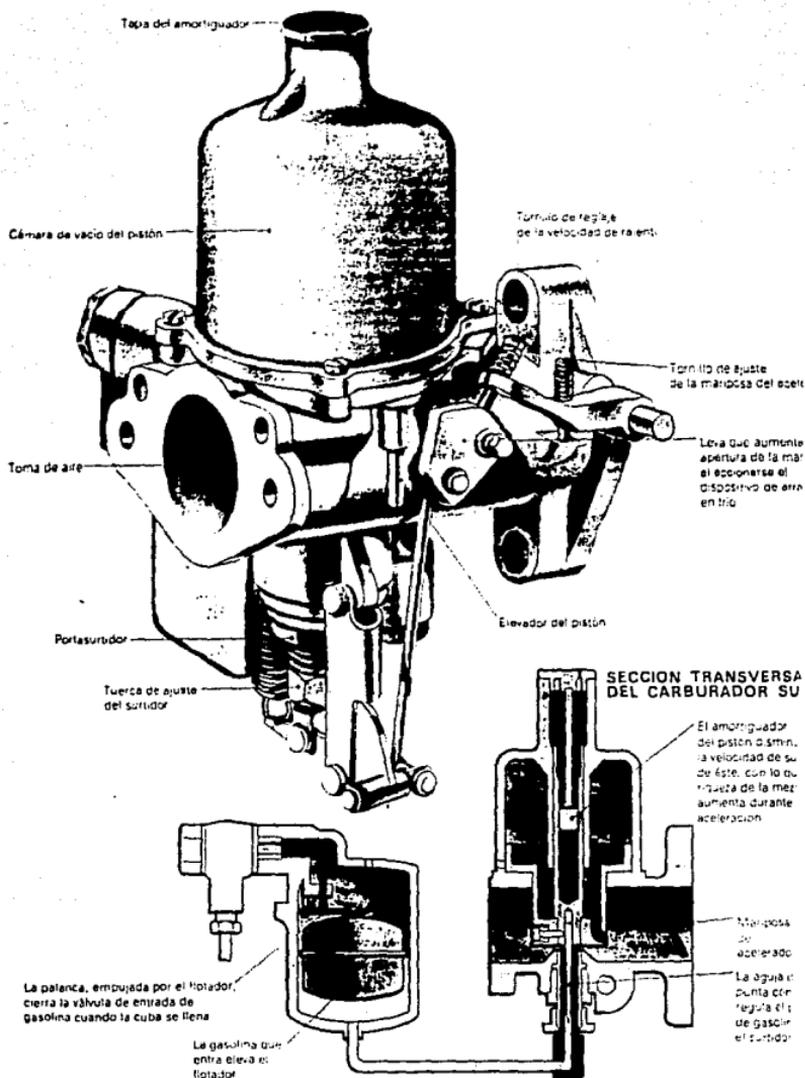
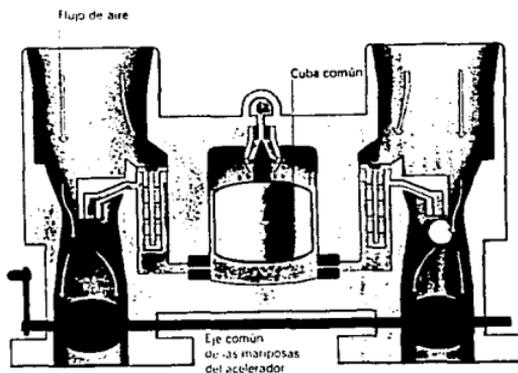
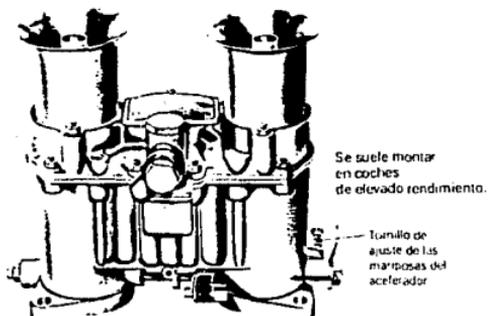
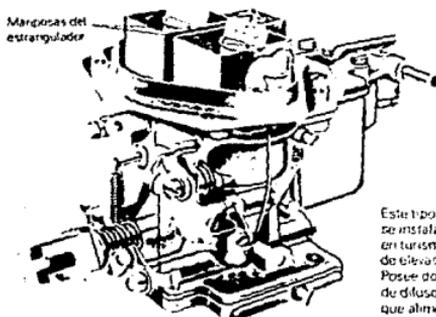


Figura III.5 Carburador de difusor variable

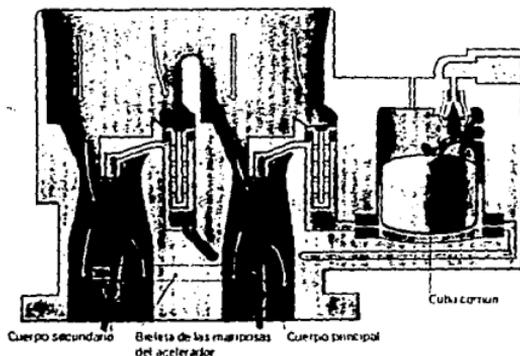


La cuba común suministra cantidades equivalentes de gasolina a cada uno de los pasos de aire o cuerpos que poseen su propio surtidor principal, tubo de emulsión y circuito de ralenti. Las dos mariposas de acelerador suelen montarse en el mismo eje y se abren simultáneamente gracias a una palanca única.

Figura III.6 Carburador Weber de doble cuerpo



Este tipo de carburador se instala a veces en turismos de elevado rendimiento. Posee dos o más cuerpos de difusor fijo, que alimentan un colector común de admisión.



Los cuerpos de difusor fijo alimentan un colector común. El cuerpo principal que es más pequeño, asegura la suavidad del funcionamiento a bajo régimen de revoluciones del motor, y el cuerpo secundario, más voluminoso, aumenta la cantidad de mezcla necesaria para conseguir el máximo rendimiento.

Figura III.7 Carburador mixto

eléctrica. Unos muelles mantienen cerrados los inyectores, que sólo se abren por acción de electroimanes. La cantidad de carburante inyectado depende del tiempo que el electroimán mantenga abierto el inyector. Esto a su vez depende de la señal que reciba el solenoide desde un computador o unidad de control electrónico.

Este computador está conectado a una serie de dispositivos sensibles, que le hacen actuar según las diversas condiciones del motor, tales como la presión del aire en el colector, la temperatura del aire y del agua, el grado de aceleración y la posición del acelerador.

Los dispositivos sensibles permiten al computador determinar instantáneamente el momento de abertura de los inyectores. Para simplificar el sistema electrónico, los inyectores se emparejan abriéndose al mismo tiempo incluso antes de que abran las válvulas de admisión. Esto da como resultado la reducción del número de dispositivos necesarios para accionarlos.

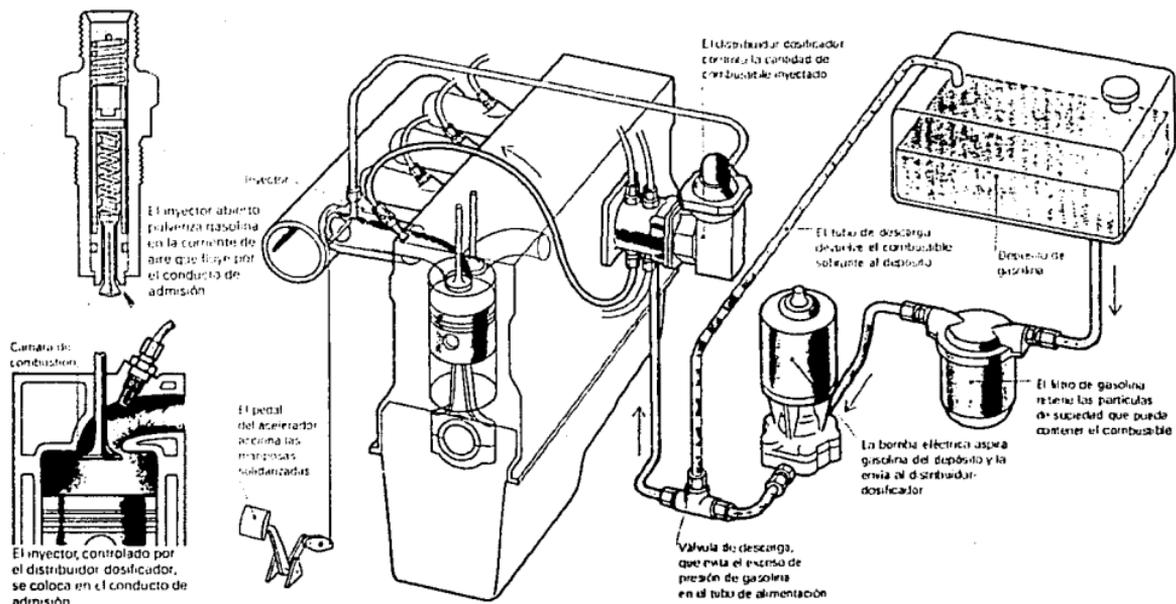


Figura III.8 Inyección mecánica Lucas

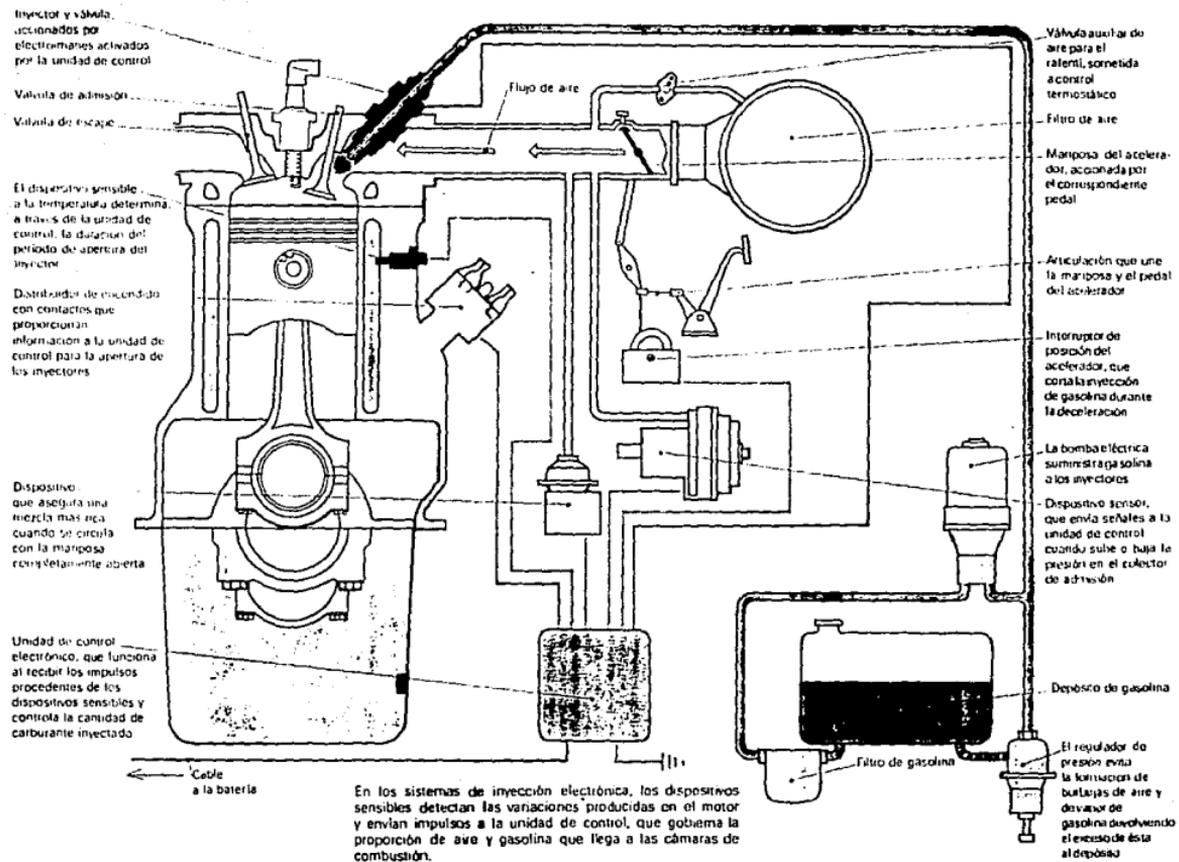


Figura III.9 Sistema de inyección electrónica Bosch

Nombre dado en la refinería	Aceites combustibles destilados				Aceites combustibles residuales	
	Keroseno aceite combustible Nº 1	Aceite combustible Nº 2	Aceite combustible Nº 3	Aceite combustible Nº 4	Aceite combustible Nº 5	Aceite diesel
Proceso	De cabezal	De cabezal	Mezclas de productos de cabezal, de desintegración térmica y de desintegración catalítica			
Usos principales	Calefacción, iluminación doméstica, motores diesel de alta velocidad, autotransportes urbanos	Motores diesel de alta y media velocidad	Calefacción doméstica, motores diesel de alta, media y baja velocidad, camiones, plantas de energía para ferrocarriles; estacionarias y marinas		Calefacción industrial, plantas de vapor generadoras de energía, motores diesel de baja velocidad, principalmente marinos	Motores diesel de baja velocidad, principalmente marinos
Destilación ASTM						
Punto 10% °F	370-400	400-440	400-440	480-510	.....	.....
Punto 90% °F	460-500	560-590	560-590	600-660	650 hasta 700	650 hasta 700
Punto final de ebullición °F	510-575	600-650	600-650	700-775	.....	.....
Número cetano	40-65	40-68	35-55	30-45	15-40	20-40
Gravedad API	40-46	34-38	32-36	28-32	16-24	20-28
Gravedad específica	.825 - .797	.855 - .835	.865 - .845	.887 - .865	.959 - .910	.934 - .887
Calor de combustión (neto) Btu/gal	135 800-132 400	139 400-137 000	140 600-138 200	143 100-140 600	150 700-145 500	148 100-143 000
Viscosidad a 100 °F Segundos-Saybolt	29-32	34-39	34-42	34-50	50-150	40-150
Azufre % en peso	0.04-0.1	0.1-0.8	0.1-0.8	0.2-1.2	0.5-2.0	0.5-1.5
Residuo de carbón en 10% de sedimentos - %	Nada - 0.02	0.02-0.07	0.02-0.25	0.0 1-0.02	1.0-5.0	0.5-5.0
Ceniza % en peso	Nada	Nada	Nada	Nada	Vestigios - 0.15	Vestigios - 0.15
Agua y sedimentos - %	Nada	Nada	Vestigios	Vestigios	Vestigios - 0.5	Vestigios - 0.5
Punto de fluidez °F	(-80) a (-20)	(-40) a (+20)	(-40) a (+20)	(-10) a (+30)	(-10) a (+40)	(-10) a (+40)

Estas cifras son para residuos de carbón en todo el combustible

Tabla 1. Clasificación del aceite combustible

(Tomado de W.M. Holaday y E.F. Miller. Soconoy-Vacuum Oil Co.)

Familia	Nombre	Peso Molar	Densidad		Temperatura de fusión °C (2)	Temperatura de ebullición °C (2)	Presión de vapor kg/cm ² (6)	Relación de compresión (3)	Número Octano (4)	Temp. de autoencendido (2)	Poder calorífico (5)			Calor latente kcal/kg	Relación aire-combustible	Fórmula
			API	Específica (1)							Superior kcal/kg	Inferior kcal/kg	kcal/m ³ de mezcla			
Nafteno																
	Ciclopentano	70.1	59.0	.746	-94	55	.693	12.4	83	.....	10 460	9 744	834	.....	14.7:1	C ₅ H ₁₀
	Ciclohexano	84.1	51.6	.778	7	81	.249	4.9	77	.....	10 421	9 705	834	87	14.7:1	C ₆ H ₁₂
	Benceno	78.1	29.0	.880	6	81	.224	15	110*	738	10 115	9 575	856	94	3.2:1	C ₆ H ₆
Aromáticos																
	Tolueno	92.1	31.0	.870	-95	110	.077	15	104*	811	10 193	9 725	875	87	13.4:1	C ₇ H ₈
	Xileno-m	106.2	31.0	.86	-26	141	.245	15.5	105*	.....	10 305	9 746	862	81	13.6:1	C ₈ H ₁₀
	Propano	42.1	103.0	.610	-185	-48	.....	10.6	85	.....	11 697	10 834	853	.....	14.7:1	C ₃ H ₈
	Butano-1	56.1	.....	.625	-195	-7	.....	7.1	80	.....	11 641	10 778	857	.....	14.7:1	C ₄ H ₁₀
Olefinas																
	Pentano-1	70.1	87.0	.642	-146	30	.....	5.5	.....	.....	10 761	10 045	857	.....	14.7:1	C ₅ H ₁₀
	Hexano-1	84.1	76.0	.675	-138	64	.....	4.3	.....	.....	10 611	9 894	849	93	14.7:1	C ₆ H ₁₂
	Heptano-1	98.1	.....	.697	-113	93	.....	.....	73	.....	.....	.....	.....	93	14.7:1	C ₇ H ₁₄
	Hexadecano-1	224.4	48.0	.783	5	275	.....	.....	.....	218	.....	.....	.....	.....	14.7:1	C ₁₆ H ₃₄
	Metanol	32.0	46.4	.792	98	65	.....	.....	98	.....	5 442	4 815	796	280	6.4:1	CH ₃ O
Alcoholes																
	Etanol	46.0	47.1	.785	117	78	.....	.....	99	.....	7 118	6 463	829	221	9.0:1	C ₂ H ₅ O
	Propanol	60.0	.....	.799	.....	98	.....	.....	.....	.....	8 077	7 408	831	164	10.5:1	C ₃ H ₇ O
	Butanol	74.1	47.1	.805	.....	118	.....	.....	100+	.....	8 634	7 956	834	141	11.1:1	C ₄ H ₉ O

(1) Densidad de la sustancia a 20 °C, referida a la del agua a 4 °C. (La densidad de los gases, se ha determinado en el punto de ebullición).

(2) Presión de 1.033 kg/cm² abs.

(3) Relación de compresión aproximadamente útil o relación de compresión crítica (CCR). Golpeteo audible; local silencioso; 600 rpm; aire de admisión a 38 °C; refrigerante a 100 °C; chispa para obtener máxima potencia (pruebas GM).

(4) Método del motor ASTM.

(5) Poderes caloríficos a volumen constante desde 25 °C (77° F).

(6) Presión del vapor a 38 °C (100 °F).

Tabla 2. Familias de hidrocarburos y sus características

Fórmula	Nombre	Peso Molar	Gravedad		Temperatura de fusión °C (2)	Temperatura de ebullición °C (2)	Presión de vapor kg/cm ² (6)	Relación de compresión (3)	Número octano y cetano (4)	Temp de autoencendido (2)	Poder calorífico (5)			Calor latente kcal/kg	Relación aire-combustible	Fórmula
			API	Específica (1)							Superior kcal/kg	Inferior kcal/kg	De la mezcla kcal/l			
C ₁ H ₄	METANO	16.03	202.5	.425	-183	-162		12.6	110*	861	13 284	12 030	774	138	17.2:1	C ₁ H ₄
C ₂ H ₆	ETANO	30.05	194	.546	-172	-88		12.4	104*	565	12 477	11 473	821.5	97.5	16.0:1	C ₂ H ₆
C ₃ H ₈	PROPANO	44.06	142	.582	-188	-42		12.2	100	534	12 059	11 148	833.9	93	15.6:1	C ₃ H ₈
C ₄ H ₁₀	BUTANO	58.1	116.5	.570	-138	-0.6	3.500	5.5	92	516	11 864	11 026	843.7	92	15.4:1	C ₄ H ₁₀
C ₄ H ₁₀	ISOBUTANO	58.1	121	.559	-159	-12	5.250	8.0	99		11 836	10 998	841.9	87	15.4:1	C ₄ H ₁₀
C ₅ H ₁₂	PENTANO	72.1	94.5	.631	-130	36	1.085	4.0	61	500	11 753	10 916	848.2	90	15.3:1	C ₅ H ₁₂
C ₅ H ₁₂	ISOPENTANO (2 metil butano)	72.1	94.9	.625	-160	28	1.428	5.7	90		11 753	10 916	848.2	89	15.3:1	C ₅ H ₁₂
C ₆ H ₁₄	HEXANO	86.1	80.8	.667	-95	68	0.343	3.3	25	487	11 641	10 824	850	87	15.2:1	C ₆ H ₁₄
C ₆ H ₁₄	ISOHEXANO (2,3 dimetil butano)	86.1	81	.666	-129	58	0.511	9.0	95		11 641	10 824	850	87	15.2:1	C ₆ H ₁₄
C ₇ H ₁₆	HEPTANO	100.2	73	.692	-91	98	0.112	3.0	0(57)	478	11 634	10 810	858	74	15.1:1	C ₇ H ₁₆
C ₈ H ₁₈	OCTANO	114.2	70.5	.703	-57	125		2.9	-17	471	11 558	10 766	859	71	15.1:1	C ₈ H ₁₈
C ₈ H ₁₈	ISO-OCTANO (2,2,4 trimetil pentano)	114.2	71.8	.696	-107	99	0.119	7.3	100	731	11 463	10 672	850		15.1:1	C ₈ H ₁₈
C ₉ H ₂₀	NONANO	128.2	65.5	.718	-54	150			-45	466	11 530	10 746	859	66	15.0:1	C ₉ H ₂₀
C ₁₀ H ₂₂	DECANO	142.3	62.5	.730	-30	178				463	11 474	10 697	859.7	60	15.0:1	C ₁₀ H ₂₂
C ₁₁ H ₂₄	ISODECANO	142.3							93		11 474	10 697	859.7		15.0:1	C ₁₁ H ₂₄
C ₁₁ H ₂₄	UNDECANO	156.3	59.5	.740	-26	195					11 474	10 702	861.5	5.0:1	15.0:1	C ₁₁ H ₂₄
C ₁₂ H ₂₆	DODECANO	170.3	57.5	.749	-10	216			(82)		11 446	10 697	862.4	59.5	14.9:1	C ₁₂ H ₂₆
C ₁₂ H ₂₆	ISODODECANO	170.3							100		11 446	10 697	862.4		14.9:1	C ₁₂ H ₂₆
C ₁₃ H ₂₈	TRIDECANO	184.3	55.5	.757	-6	226					11 446	10 655	861.5		14.9:1	C ₁₃ H ₂₈
C ₁₄ H ₃₀	TETRADECANO	198.4	53	.763	6	251					11 407	10 647	861.5		14.9:1	C ₁₄ H ₃₀
C ₁₅ H ₃₂	PENTADECANO	212.4	52.5	.769	16	261					11 391	10 634	861.5		14.9:1	C ₁₅ H ₃₂
C ₁₆ H ₃₄	HEXADECANO (CETANO)	226.4	51.5	.774	18	280			(100)		11 374	10 620	862.4		14.9:1	C ₁₆ H ₃₄
C ₁₇ H ₃₆	HEPTADECANO	240.50	51	.777	22	303					11 363	10 611	865.1		14.9:1	C ₁₇ H ₃₆
C ₁₈ H ₃₈	OCTADECANO	254.5	49.5	.782	28	308					11 363	10 609	866		14.9:1	C ₁₈ H ₃₈
C ₂₀ H ₄₂	PENTATRIACANTANO	292.3	49.5	.781	80	331					11 353	10 601	868		14.8:1	C ₂₀ H ₄₂

(1) Densidad de la sustancia a 20 °C, referida a la del agua a 4 °C. (La densidad de los gases, determinada en el punto de ebullición del gas).

(2) Presión de 1.033 kg/cm²

(3) Relación de compresión aproximadamente útil o relación de compresión crítica (CCR). Golpeteo audible; local silencioso; 700 rpm; aire de admisión a 38 °C; refrigerante a 100 °C; chispa para obtener máxima potencia.

(4) Método del motor ASTM para determinar los números octano; los números cetano, entre paréntesis.

(5) Poderes caloríficos a volumen constante desde 25 °C (77° F).

(6) Presión del vapor a 38 °C (100 °F).

Tabla 3. Familia de las parafinas y sus propiedades

CARACTERISTICAS	ANALISIS TIPICO	METODO ASTM
Color ASTM	0.5	D-1500-64
Peso Especifico a 20/4 C	0.824	D-1298-67
Temp. de Inflamación, C	74	D- 93-73
Temp. de Congelación, C	3	D- 97-66
Viscosidad S.U.S a 37.8 C	38	D- 88-56
Temp. de Anilina, C	66	D-1012-62
Azufre Total, % peso	0.40	D- 129-64
Corrosión, 3 h.a 50 C	Std. 1-A	D- 130-68
Indice de Cetano	52	D- 976-66
Carbón Ramsbotton (En 10% de residuo), % peso	0.09	D- 524-64
Agua y Sedimento, % vol.	Trazas	D-1796-68
Destilación a 760 mm. Hg.		D- 86-67
Temp. inicial ebullición, C	189	
10% destila a, C	208	
50% destila a, C	260	
90% destila a, C	315	
Temp.final ebullición, C	350	
Poder Calorífico neto, Kcal/Kg.	10 680	
APLICACIONES	MANEJO	
Combustible para autotransportes, turbinas y locomotoras especiales.	Autotanques y carrotanques	

Tabla 4 Diesel especial

(Tomada del Manual de Propiedades de Productos elaborados por PEMEX)

CARACTERISTICAS	ANALISIS TIPICO	METODO ASTM
Peso Especifico a 15.6/15.6 C	0.575	D-1657-67
Azufre total, p. p. m.	90	D-1266-70
Presión de vapor, lb/pulg ²	69	D-1267-73
Corrosión 1 hr. a 37.8 C	Std. No.1-A	D-1838-64
Vaporización;		D-1837-64
Temp. inicial de ebullición, C	- 9	
95% destila a, C	1	
Residuo, % vol.	Nada	
Poder calorífico neto, Kcal/Kg	11000	
APLICACIONES	MANEJO	
Combustible de uso doméstico	Autotanques, carrotanques, tubería y cilindros.	

Tabla 5 Gas licuado baja presión

(Tomada del Manual de Propiedades de Productos elaborados por PEMEX)

CARACTERISTICAS	ANALISIS TIPICO	METODO ASTM
Peso Específico a 20/4 C	0.786	D-1298-67
Temp. de Inflamación, C	48	D- 56-73
Temp. de Congelación, C	58	D-2386-67
Viscosidad Cinemática a-34 C, cs.	5.6	D- 445-72
Azufre Total, % en peso	0.035	D-1266-70
Azufre Mercaptánico, % en peso	> 0.003	D-1323-62 ó D-1219-61
Goma Preformada, mg/100 ml.	0.7	D- 381-70
Estabilidad Térmica Caída de Presión, in Hgo.	0.92	D-1660-72
Aromáticos, % vol.	18	D-1319-70
Poder Calorífico Neto, BTU/lb	18623	D-1405-64
Destilación a 760 mm. Hg.		D- 86-67
Temp. inicial de ebullición, C	150	
10% destila a, C	163	
50% destila a, C	184	
90% destila a, C	213	
Temp. Final de Ebullición, C	243	
APLICACIONES	MANEJO	
Combustible para aviones de retropolpusión.	Autotanques, carrotanques, tambores de 200 litros y tubería.	

Tabla 6 Turbosina

(Tomada del Manual de Propiedades de Productos elaborados por PEMEX)

IV

**METODOS DE CONTROL MAS USUALES
DE EMISIONES CONTAMINANTES**

MÉTODOS DE CONTROL MAS USUALES DE LAS EMISIONES CONTEMPORANEAS**IV.1 ANTECEDENTES**

Analizando las tendencias en el diseño de motores y su utilización, se observa como el aumento en el consumo de gasolina ha deteriorado el medio ambiente. Esto hace necesario el control de emisiones y la reducción del consumo, especialmente en vehículos de trabajo ligero.

Los ingenieros automotrices, así como el público en general, están volviéndose cada vez más conscientes de la creciente demanda de combustibles de todo tipo y del cada vez menor abastecimiento de petróleo.

Para julio de 1974, en Estados Unidos debería haberse ofrecido una gasolina libre de plomo y de por lo menos, un número de octano 91 como anticipación a los coches de 1975 equipados con catalizador. Los estándares federales de Estados Unidos en 1976 indicaban:

- Hidrocarburos no quemados (HC) = 0.41 gal/mi
- Monóxido de carbono (CO) = 3.4 gal/mi
- Oxido de nitrógeno (NO_x) = 0.4 gal/mi

(Tomado de D.H.Clewell-Mobil Oil Corp.)

Dos sistemas de control de emisiones se consideraba que satisfacían los estándares de 1976:

1. El sistema de doble catalizador al cual la industria de automóviles estaba dirigiendo la mayor parte de sus esfuerzos. Se decía que si este sistema tenía éxito, los automóviles requerirían 21% más gasolina. Estos sistemas utilizarían alguna recirculación de gases de escape (EGR) para ayudar a controlar los NO_x.

2. El catalizador HC/CO más una máxima recirculación de gases de escape. Esta es la única alternativa disponible con un aviso de corto tiempo si no se contara con un catalizador NO_x exitoso.

Por entonces se especulaba que si la calidad del octano se aumentara en respuesta a la presión competitiva para la satisfacción de la población vehicular, se requerirían algunas inversiones de refinerías y de petróleo crudo. Por otro lado, la industria automotriz podría tomar ventaja de estos octanos adicionales incrementando la relación de compresión y recuperando alguna economía de combustibles.

De esta manera y como un panorama general donde se contemplaba la situación actual, del motor ECH, se tenían en 1985, 4 posibles opciones:

1. Reconsideración de los estándares de emisiones.
2. Coches más pequeños.
3. Coches de combustión a diesel.
4. Transporte masivo.

El potencial completo de conservación de energía y de la reconsideración de estándares de emisión podían asegurarse por medio de una acción rápida del gobierno antes de que los estándares vigentes tuvieran efecto. Una estrategia de coches pequeños puede tener mayor potencial para la conservación de la energía, pero requeriría tiempo de implementación y su éxito final dependería principalmente de la aceptación del público. La transportación masiva ofrece grandes beneficios potenciales en áreas metropolitanas densamente pobladas con respecto a otras áreas del país. El diesel requeriría un desarrollo mayor antes de que sus beneficios potenciales pudieran ser evaluados con precisión y muchos años de tiempo de dirección antes de que estos beneficios pudieran notarse en la práctica, si la relación de costo/beneficio probara ser favorable.

-Carros pequeños

Es reconocido que el peso del vehículo es el factor que afecta más la economía de combustible, por lo tanto reduciendo el tamaño de los automóviles, deberían lograrse ahorros de combustible. Además, para mejorar la economía de combustible, los carros chicos tienen menor costo inicial de mantenimiento. A pesar de estas ventajas, los compradores de autos prefieren aún los más grandes. Las razones son probablemente subjetivas; la comodidad en el viaje y el mayor sentimiento de seguridad en el automóvil grande parece ser que es más altamente apreciado que la economía de operación. En lo que se refiere a emisiones, los fabricantes, en general, confían más en satisfacer los estándares federales con autos de tamaño convencional que con carros chicos.

-Diesel

Los autos impulsados por diesel han sido designados por la Academia Nacional de Ciencias como autos potencialmente de bajas emisiones y una mayor economía de combustible. Sin embargo, con la información disponible en 1985 era difícil valorar su eventual impacto en la población de vehículos.

A pesar de las bajas emisiones demostradas de HC y CO y de la confianza de que puede satisfacerse el estándar NO_x de 1976, no hubo evidencia de que los vehículos de pasajeros impulsados por diesel serían comercializados masivamente.

Para lograr una mayor aceptación de vehículos impulsados por diesel, se requería del desarrollo de un motor nuevo de alta velocidad con bajo peso, teniendo un olor aceptablemente bajo y emisiones de partículas que ofrecieran un desempeño competitivo con

los autos de gasolina. Al mismo tiempo, deberían satisfacer los estándares de emisiones de 1976. Había una posibilidad razonable de que un motor prototipo se desarrollara en 3 ó 4 años, satisfaciendo los estándares de emisiones de 1976; de cualquier forma, el vencer el olor y los problemas de emisiones de partículas requeriría una tecnología nueva, y pudiera requerir un período más largo de desarrollo. Se estimaba que la ventaja en la economía potencial de combustible (en km/l) de este motor, relativa a un equivalente del motor de gasolina, podría oscilar entre 25 y 50%.

-Transporte público

El cuarto punto en la lista de formas posibles para moderar el crecimiento de la demanda de combustible es el incremento en el uso de transporte público. Mientras que esto posiblemente quede fuera del alcance de una discusión sobre automóviles, puede ayudarnos a solucionar el problema del consumo de los energéticos. Nuevamente, la aceptación del público es la clave de su crecimiento eventual. Las mejoras en cuanto a servicios y comodidad, especialmente en áreas urbanas, alejaría a los viajeros de sus autos y habría menos demanda de energéticos. También reduciría en significativas reducciones de emisiones y efectivamente, tal mejoría, figura en planes de largo alcance de muchas ciudades para mantener la calidad de aire en el ambiente.

IV.2 IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS DISTINTOS CONTAMINANTES EN CADA TIPO DE MOTOR

Junto con el dióxido de carbono y el vapor de agua, productos inertes de la oxidación del carbono, y el hidrógeno contenido en el combustible que alimenta al motor, se pueden formar sustancias contaminantes como CO, HC y NO_x, en algunas zonas de la cámara de combustión.

IV.2.1 MONOXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono es un producto intermedio de la combustión de un hidrocarburo. En la Figura IV.1 aparece el porcentaje de CO, en volumen, que contienen los gases de escape en función del dosado relativo con el que funciona el motor. Se observa la gran inclinación de la curva para dosados relativos mayores que la unidad, es decir, para mezclas ricas.

Cuando la presión y la temperatura dentro de la cámara de combustión son elevadas, el equilibrio de la ecuación:



está desplazado hacia la derecha. Al disminuir la presión y la temperatura en el proceso de expansión y, posteriormente, en el proceso de escape, el equilibrio se desplaza hacia la izquierda. Sin embargo, si la relación aire/combustible relativa es menor que la unidad, hay escasez de oxígeno, por lo que no puede llevarse a cabo la recombinación total. Para mezclas pobres siempre hay una pequeña cantidad de CO, puesto que el proceso de recombinación tiene una cierta inercia y no da tiempo a que la totalidad de CO se oxide a CO₂, dado que los procesos de expansión y escape son relativamente rápidos.

Se comprende que el CO es un contaminante importante en los motores de encendido por chispa (ECH), mientras que cuantitativamente es despreciable en los motores de encendido por compresión (EC), puesto que éstos últimos funcionan con dosados relativos menores que la unidad, del orden de 0.65 como máximo.

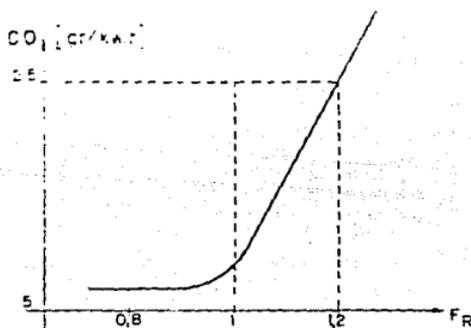


Figura IV.1 Cantidad de CO en los gases de escape en función del dosado relativo

(Tomado de "Soluciones a la contaminación de los motores térmicos alternativos de automoción". Dr. Francisco Payri González).

Por otra parte la formación del CO (que produce un aumento de la tasa de carboxihemoglobina, a causa de la cual queda reducido el transporte de oxígeno a la sangre) da lugar, en condiciones climatológicas especiales, al "esmog fotoquímico" (la palabra "esmog" proviene de la contracción anglosajona de las palabras smoke y fog, que significan humo y niebla, respectivamente) que irrita y tapa las vías respiratorias del organismo. La explicación del como se forma el CO es la siguiente: una mezcla rica significa que en la cámara de combustión se halla presente menos aire y, por lo tanto, menos oxígeno del que se necesitaría para oxidar el carbono presente en la

gasolina; en estas condiciones es natural que algunos átomos de carbono, en lugar de unirse a 2 átomos de oxígeno para formar CO_2 , se junten a un solo átomo de oxígeno, formando el CO .

IV.2.2 HIDROCARBUROS SIN QUEMAR (HC)

Los HC sin quemar pueden formarse por tres razones distintas:

- Combustión incompleta.
- Efecto de pared.
- Cortocircuito de la carga fresca.

En la Figura IV.2 se observa la dependencia de la cantidad de HC sin quemar con el dosado para un motor ECH. Para mezclas ricas y mezclas pobres aumenta la cantidad de HC debido a que el proceso de combustión no se desarrolla en buenas condiciones y se puede dar el apagado de la llama. Para dosados próximos al estequiométrico, donde la llama no tiene dificultades para progresar, la combustión incompleta no suele ser motivo de aparición de los HC en el escape, puesto que los hidrocarburos se oxidan, aunque sólo sea parcialmente (formación de CO), en el colector y tubo de escape.

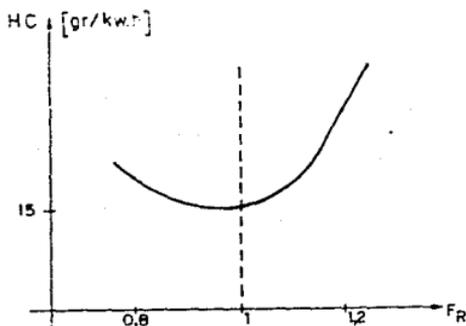


Figura IV.2 Cantidad de HC sin quemar en los gases de escape en función a la relación del dosado

(Tomado de "Soluciones a la contaminación de los motores térmicos alternativos de automoción". Dr. Francisco Payri González).

El motivo principal del fallo de combustión en gran parte de los HC sin quemar hay que atribuirlo al efecto extintor ejercido por las paredes de la cámara de combustión (efecto de pared). Mientras que

la temperatura de la llama supera ampliamente los 1000 C, en las zonas inmediatamente próximas a las paredes, siempre refrigeradas con agua o aire y en un espesor de varios décimos de milímetros, la temperatura es mucho más baja y queda por debajo de los valores que permiten a todas las moléculas de hidrocarburos liberar en cantidad suficiente los radicales que originan y sostienen la combustión, por lo que algunos de ellos pasan directamente a los gases de escape.

La formación de HC no quemados se dirige directamente al conducto de escape y tiene lugar, preferentemente, en la zona de extinción, es decir en el estrato adyacente a la cámara de combustión donde el frente de llama no consigue llegar.

También en el estrato de extinción se forman aldehídos, productos de oxidación parcial característicos de las reacciones previas de los hidrocarburos, que pueden persistir porque en aquel lugar no llega la llama.

IV.2.3 OXIDOS DE NITROGENO (NO_x)

De todos los óxidos de nitrógeno, NO, NO₂, N₂O, NO₃, N₂O₃, etc., el más importante cuantitativamente es el NO₂, puesto que los demás son compuestos muy inestables que se descomponen rápidamente en NO₂ y O₂. El mecanismo más aceptado actualmente para la formación del dióxido de nitrógeno es el conocido mecanismo generalizado de ZELDOVICH¹¹, que postula las siguientes reacciones:



Posteriormente, el NO se oxida para formar NO₂.

Experimentalmente se comprueba que las emisiones de NO_x son máximas para dosados ligeramente pobres. (ver Figura IV.3)

¹¹ "Soluciones a la contaminación de los motores térmicos alternativos de automoción". Dr. Francisco Payri González).

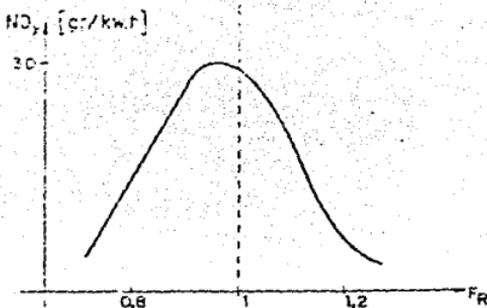


Figura IV.3 Cantidad de NO_x en los gases de escape en función del dosado

[Tomado de "Soluciones a la contaminación de los motores térmicos alternativos de automoción". Dr. Francisco Payri González

Por otra parte (Figura IV.4), se puede comprobar también que las emisiones de NO_x son máximas cuando el motor funciona a par máximo, es decir, cuando la pme del motor es máxima. Así pues, la formación de NO_x está muy afectada por las presiones y temperaturas máximas. Sin embargo, cabría esperar que, al disminuir estas presiones y temperaturas en las carreras de expansión y escape, los NO_x se disociasen en oxígeno y nitrógeno, desplazándose el equilibrio químico hacia estos compuestos. Esto no ocurre en la práctica y la razón puede residir en la complejidad del mecanismo de formación (Ecuaciones IV.2, IV.3, IV.4 y IV.5).

Los NO_x aparecen en los gases de escape de los MEC y de los MECH; sin embargo, son más importantes en el primer tipo debido a las más altas presiones de funcionamiento de los motores Diesel.

Los NO_x deben considerarse como los productos que acompañan a una eficiente combustión "caliente", ya que se pueden formar sólo a temperaturas muy elevadas, de unos 1600 C. Por consiguiente, los NO_x no presentan un máximo correspondiente a la relación aire/combustible, sino a la máxima temperatura de la llama y se puede decir que su formación es inversamente proporcional a las emisiones de CO y HC.

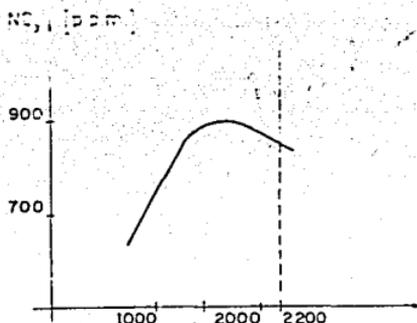


Figura IV.4 Cantidad de NO_x en los gases de escape en función del régimen de giro para un motor diesel

(Tomado de "Soluciones a la contaminación de los motores térmicos alternativos de automoción". Dr. Francisco Payri González).

Se están estudiando diversas soluciones para eliminar los agentes contaminantes, pero junto a soluciones que analizan la combustión y la eliminación de las emisiones nocivas en el escape por medio de reactivos térmicos o catalíticos, recientemente se han desarrollado unos tipos de motores con cámaras capaces de realizar una buena combustión con bajos niveles de contaminantes y bajo consumo de combustible.

Dos tipos de motores reúnen estos últimos requisitos y están en condiciones de lograr los límites de emisiones: el motor diesel con inyección indirecta (es decir, en la cámara de precombustión) y el motor de carga exhalificada.

Así en el motor Honda CVCC (Compound Vortex Centralled Combustion) se tiene una combustión compuesta, es decir, en dos periodos: primero, la inflamación de una pequeña parte de mezcla muy rica, próxima a la bujía, y luego la propagación de esta llama al resto de la mezcla muy pobre, con una elevada vertiginosidad inducida en el momento de la inflamación. En este motor la combustión queda controlada en cuanto la llama se propaga más lentamente que en un motor convencional (Figuras IV.5 y IV.6). De esa manera se alcanzan temperaturas más bajas (menos NO_x) en un tiempo más largo (menos HC) mientras que la combustión de una mezcla muy pobre elimina el CO.

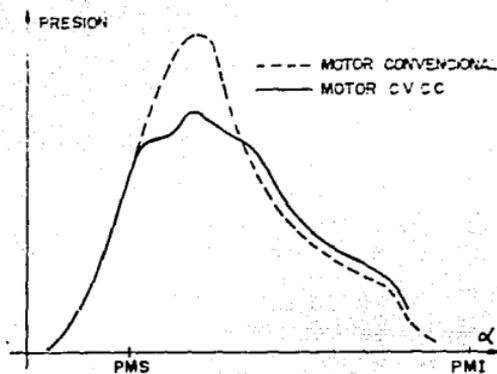


Figura IV.5 Variación de la presión con respecto a la carrera del pistón

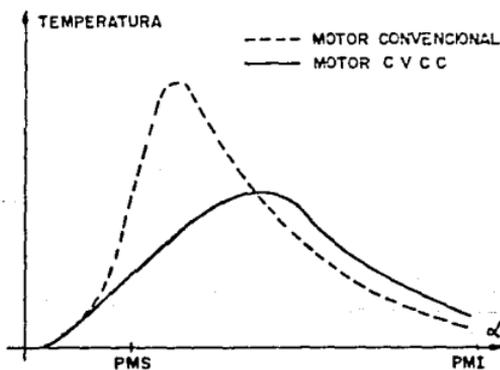


Figura IV.6 Variación de la temperatura con respecto a la carrera del pistón

(Tomadas de "Soluciones a la contaminación de los motores térmicos alternativos de automoción". Dr. Francisco Payri González).

En los motores convencionales, reduciendo las temperaturas disminuyen los NO_x pero aumentan los HC. Todo lo contrario sucede si se aumenta la temperatura.

IV.2.4 OTROS CONTAMINANTES

Además de los tres compuestos citados, existe otra serie de contaminantes en los gases de escape de los motores de combustión interna alternativos. A continuación vamos a enumerar los más destacados, aunque su importancia cuantitativa frente a los anteriores es pequeña, salvo en casos muy particulares.

-Aldehídos.

Se conocen con este nombre todos los compuestos orgánicos que llevan el grupo aldehído o el grupo formil.



Las propiedades del compuesto dependen de la estructura y la magnitud del radical R. En los MCI alternativos aparecen fundamentalmente el formaldehído y la acroleína entre los productos de escape. El olor característico de los gases de escape de los motores diesel y sus propiedades irritantes son debidas a estos compuestos.

Los aldehídos son productos formados como consecuencia de la oxidación parcial de los HC. Las prerreacciones que conducen al autoencendido incluyen estas oxidaciones parciales. Así se han medido cantidades relativamente grandes de aldehídos en motores ECH que funcionaban con autoencendido. De la misma forma, en los motores EC, los aldehídos aparecen como consecuencia de la oxidación parcial de combustible durante las prerreacciones que se llevan a cabo a baja temperatura.

-Emisiones de plomo.

El tetraetilo de plomo ($\text{Pb C}_2\text{H}_5$) empezó a utilizarse como aditivo para la gasolina alrededor de 1920, en los Estados Unidos, y desde entonces prácticamente todas las gasolinas lo contienen en mayor o menor proporción para aumentar su número de octano.

Durante el proceso de combustión, el tetraetilo de plomo reacciona dando, entre otros compuestos, óxidos de plomo que se depositan en válvulas, bujías y paredes de la cámara de combustión, afectando al buen funcionamiento del motor, debido fundamentalmente a la aparición de puntos calientes. Con el fin de evitar la formación de estos depósitos, junto con el tetraetilo de plomo se añaden compuestos, entre los que cabe destacar el dibromuro de etilo

(Br, C, H₂), que se combinan durante el proceso de combustión, dando productos volátiles (bromuro de plomo), que son los que aparecen en los gases de escape del motor.

Actualmente se están realizando investigaciones sobre la influencia que tienen estos compuestos volátiles en el organismo humano.

Para un motor que utilice un tipo de combustible determinado, la cantidad de plomo emitido es proporcional al consumo de combustible, según la siguiente ecuación:

$$E = K_1 K_2 G_f \quad (IV.7)$$

donde:

- E = cantidad de plomo emitido (g)
- K₁ = coeficiente adimensional menor que la unidad
- K₂ = constante que da el valor del contenido en plomo de la gasolina (g/l)
- G_f = consumo de combustible (l)

El coeficiente K₁ es variable con el régimen y carga del motor y tiene un valor medio de 0.7. Esto quiere decir que alrededor de un 30% del plomo¹¹ introducido en la gasolina no sale posteriormente con los gases de escape, depositándose en la culata, cabeza del pistón, válvula de escape, etc.

Hay que resaltar finalmente el problema que presentan las emisiones de compuesto que contienen plomo cuando se utilizan reactores en el escape, ya que provocan un envenenamiento del material catalítico de los mismos.

-Oxidos de azufre

Proviene de la oxidación del azufre que contiene el combustible. La cantidad emitida es, evidentemente, función de la cantidad de azufre que contiene el combustible.

-Partículas sólidas (humos)

Aunque los motores de combustión interna alternativos producen varios tipos de partículas sólidas, vamos a centrarnos en la emisión de humos (partículas de carbón), que tiene especial importancia en los MEC.

Si durante el proceso de combustión existen zonas con dosados muy ricos, al alcanzarse elevadas presiones y temperaturas con falta

¹¹ "Soluciones a la contaminación de los motores térmicos alternativos de automoción". Dr. Francisco Payri González.

de oxígeno, puede suceder que la cadena del hidrocarburo comience a fracturarse y deshidrogenizarse, pudiendo quedar fácilmente convertido en carbón. Este fenómeno suele darse, bien en la zona interior del chorro de combustible que proviene del inyector, donde el dosado es muy rico y, por tanto, hay falta de oxígeno, o bien en el combustible depositado en las paredes. Afortunadamente, la mayor parte de estas partículas se oxidan posteriormente para formar dióxido de carbono, con lo que no aparecen en el escape.

Esencialmente podemos decir que las emisiones de humo crecen con la cantidad de combustible inyectada después del tiempo de retraso. O, dicho de otra forma, dada una cantidad de combustible inyectado fija, crecen con todos aquellos parámetros que tiendan a disminuir el tiempo de retraso, como pueden ser: aumento de la relación de compresión, aumento del número de cetano del combustible, disminución del avance a inyección, etc.

Como resumen de este apartado incluimos la Tabla IV.1 en la que se representa la importancia de cada uno de los diversos contaminantes en los motores ECH y EC.

CONTAMINANTE	TIPO DE MOTOR		
	ECH	EC	EC SOBREALIMENTADO
NO _x	Importante	Muy importante	Muy importante
CO	Muy importante	Poco importante	Poco importante
HC	Muy importante	Poco importante	Poco importante
Aldehidos	Poco importante	Importante	Importante
Pb	Importante	Nula	Nula
Oxidos de azufre	Poco importante	Importante	Importante
Humos	Poco importante*	Importante	Muy importante

* Excepto para dosados anormalmente ricos.

Tabla IV.1 **Importancia de cada uno de los contaminantes en los motores EC y ECH**

-Ozono

Se puede estudiar desde el punto de vista de componente natural del aire atmosférico o como contaminante.

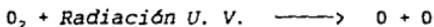
-Como componente del aire

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno, con fórmula química O₃. Posee un fuerte poder oxidante y una gran tendencia a transformarse en oxígeno mediante una reacción exotérmica que, frecuentemente tiene lugar con violencia explosiva.

Las concentraciones en la tropósfera (capa de aire más próxima a la tierra) son muy pequeñas, oscilando de 0.02 a 0.05 ppm. a nivel del mar, pero se incrementan rápidamente con la altura alcanzándose la mayor concentración en la estratósfera, hacia los 25 Km. de altura.

Los aumentos de concentración de ozono por causas naturales se observan principalmente en las zonas costeras, cuando las masas de aire procedentes del mar arrastran cantidades relativamente elevadas de dicho compuesto.

El principal mecanismo para su formación es la disociación de la molécula de oxígeno en dos átomos sueltos por acción de la radiación ultravioleta de longitud de onda inferior a 242 nm y que procede del sol. Si estos átomos encuentran otro en su mismo estado, la molécula se reconstruye; pero si tropieza con una molécula ya constituida, se une a ella formando el ozono (O_3).



En la estratósfera, las tasas de formación y descomposición del ozono, hacen que la cantidad sea siempre constante, aunque la concentración en equilibrio depende fundamentalmente de la altura, de las estaciones y de las manchas solares.

La capa de ozono, de espesor variable, es poco consistente, pero tiene la propiedad de absorber la parte más peligrosa de la radiación solar, que es perjudicial para casi todas las formas de vida, por lo que su existencia es una condición fundamental para la vida en la tierra.

Hasta la era industrial los mecanismos naturales de defensa de la tropósfera han preservado eficazmente la integridad de la capa de ozono. Sólo muy recientemente (década de los 70) se ha descubierto que dichos mecanismos son vulnerables a compuestos tales como los clorofluorocarbonos y halógenos.

-Como contaminante.

Los contaminantes primarios son aquellas sustancias que son vertidas directamente a la atmósfera, mientras que los secundarios son aquellos contaminantes que se forman como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios dentro de la misma. De esta forma el ozono puede clasificarse de las dos maneras, según su procedencia:

-Como contaminante primario se encuentra principalmente en ambientes industriales, instalaciones eléctricas de alta tensión,

hornos de arco en fundiciones, instalaciones en las que se realicen actividades de soldeo al arco o con electrodo y, en general en aquellas actividades en que se producen descargas eléctricas, radiaciones X o ultravioletas y arcos voltaicos.

También puede emitirse directamente en zonas urbanas a causa de los motores de los vehículos cuando se encuentran a régimen de ralenti.

-Como contaminante secundario se encuentra fundamentalmente en ambientes urbanos formando parte principal de los llamados contaminantes fotoquímicos, resultado de las reacciones que tienen lugar entre los hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, en presencia de la radiación ultravioleta procedente de la luz del sol.

El mecanismo de formación es complejo, realizándose por etapas a través de una serie de reacciones químicas.

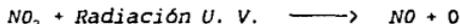
El proceso completo no se conoce totalmente en la actualidad, pero se puede resumir de la forma siguiente:

En las primeras horas de la mañana se produce una intensa emisión de HC y NO al comenzar la actividad humana en las grandes ciudades, debido fundamentalmente al tráfico intenso y al encendido de las calderas de calefacción. El NO se oxida a NO₂, aumentando la concentración de éste último en la atmósfera. Las concentraciones superiores de NO₂, unidas a que la radiación solar se va haciendo más intensa, ponen en marcha el ciclo fotolítico del NO₂, generando el oxígeno atómico que al transformarse en ozono conduce a un aumento de la concentración de este elemento y de radicales libres de hidrocarburos. Estos, al combinarse con cantidades apreciables de NO, producen una disminución de este compuesto en la atmósfera. Este descenso de concentración de NO impide que se complete el ciclo fotolítico aumentando rápidamente la concentración de ozono.

A medida que avanza la mañana la radiación solar favorece la formación de oxidantes fotoquímicos, aumentando su concentración en la atmósfera. Cuando disminuyen las concentraciones de los precursores (NO_x y HC) en la atmósfera, cesa la formación de oxidantes y sus concentraciones disminuyen al avanzar el día. De aquí que la contaminación fotoquímica se manifieste principalmente por la mañana en las ciudades.

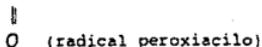
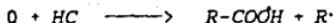
Una descripción muy simplificada de las reacciones que tiene lugar puede ser la siguiente:

Iniciación:

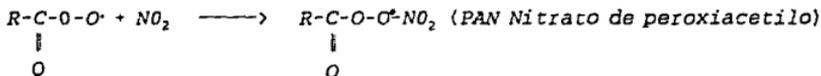




Formación de radicales (radicales libres con escaso tiempo de residencia)



Fase de finalización:



El ozono ha sido utilizado tradicionalmente como medida de la gravedad de un episodio de smog fotoquímico.

Como referencia, en las Figuras IV.7 y IV.8, se pueden observar las variaciones de THC, NO y O₃ medidas en una estación de control en el Aeropuerto Internacional y en el centro de la Ciudad de México¹¹¹.

-Efectos del ozono

El ozono es considerado un contaminante que puede ser peligroso en concentraciones superiores a 0.1 ppm. y exposiciones largas, produciendo fundamentalmente irritación en los ojos y estrechamiento de las vías respiratorias del fondo de los pulmones, provocando una mayor resistencia al paso del aire. También tiene efectos sobre el sistema circulatorio y puede producir una calcificación acelerada en los huesos del cuerpo humano.

¹¹¹ Datos tomados por A.H. Bravo en los Centros de Control de Emisiones de SEDUE

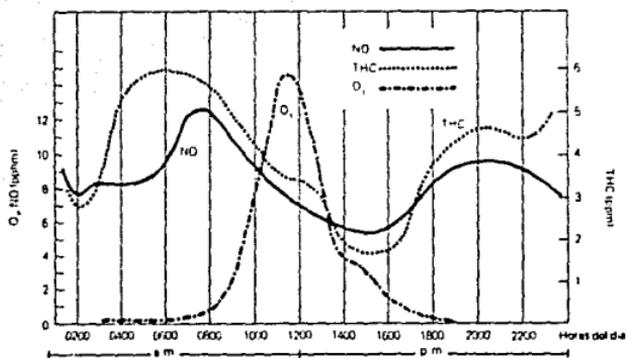


Figura IV.7 Concentraciones promedio de ozono, hidrocarburos totales y óxido nítrico en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

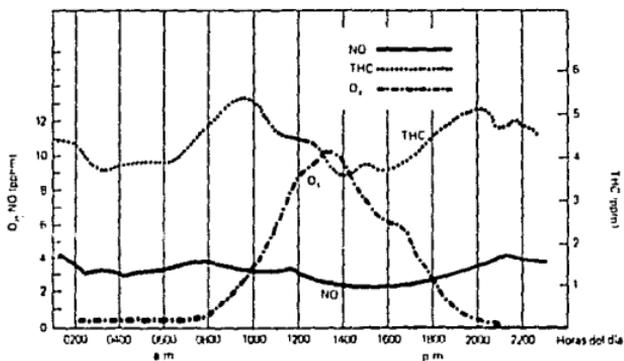


Figura IV.8 Concentraciones promedio de ozono, hidrocarburos y óxido nítrico (2 semanas en Bellas Artes)

IV.3 ANALISIS DE LOS GASES DEL ESCAPE

IV.3.1 FUENTES DE EMISIONES

La principal fuente de emisiones de un vehículo está en el escape, éste es responsable del 60% de las emisiones de HC y del 100% de las emisiones de CO, NO_x, aldehídos, óxidos de azufre y ácido sulfúrico.

Del otro 40% de emisiones de hidrocarburos, 20% resultan por la ventilación del cárter, y el otro 20% por evaporación de gasolina en el tanque de combustible y en el carburador.⁽¹⁾

-Emisiones del cárter

Las emisiones del cárter se deben al escape de gases del cilindro durante los tiempos de compresión y explosión. Los gases escapan entre las superficies obturadoras del pistón y de la pared del cilindro hasta llegar al cárter. Los gases resultantes emitidos por el cárter consisten en una mezcla de la que aproximadamente un 85% es carburante-aire sin quemar y el 15% restante son gases de escape.

-Emisiones por evaporación

Las evaporaciones se verifican, tanto en el depósito como en el carburador y representan aproximadamente un 20% de los hidrocarburos emitidos por un automóvil desprovisto de dispositivos de control.

-Emisiones de HC en los gases de escape

El tipo y la cantidad de contaminantes en los gases de escape depende de una serie de factores entre los que figuran:

- relación aire-carburante
- momento del encendido
- relación de compresión
- geometría de la cámara de combustión
- velocidad del motor
- tipo de carburante

-Emisiones de partículas de los gases de escape

Las partículas con una base metálica provienen de los compuestos antidetonantes de plomo presentes en el carburante, de los aditivos metálicos del aceite lubricante y del desgaste y deterioro del motor.

⁽¹⁾ Tomado de: IX Seminario de PEMEX. 1988)

IV.3.2 ENSAYOS PARA EL ANALISIS DE LOS GASES DE ESCAPE

Los gases de escape se analizan para alcanzar dos finalidades diferentes: la puesta a punto del motor y la reducción de los componentes nocivos en las emisiones.

Para la puesta a punto del motor el análisis se realiza a través de pruebas que permiten obtener datos sobre el desarrollo de la combustión. Sobre la base de estos datos se pueden aportar al motor mejoras, generalmente relativas a la carburación o la inyección, el encendido, la geometría de la cámara de combustión, la distribución de la mezcla; el examen de los gases de escape de cada uno de los cilindros puede proporcionar elementos precisos para perfeccionar la forma y las dimensiones del múltiple o colector.

Un primer juicio aproximado sobre la dosificación de la mezcla para cada cilindro y sobre la diferencia de dosificación entre los diferentes cilindros puede obtenerse fácilmente del examen visual de las llamas que salen de los tubos de escape. Este examen se realiza durante las pruebas de los motores de aviación, previa aplicación en cada lumbrera de escape de un corto tramo de tubo. Aproximadamente, entre la dosificación de la mezcla y el color de la llama en el escape existe la siguiente correspondencia:

mezcla excesivamente rica:	llama rojiza, a veces con bocanadas de humo;
mezcla correcta:	llama larga de color azul;
mezcla pobre:	llama más corta tendiente al blanco.

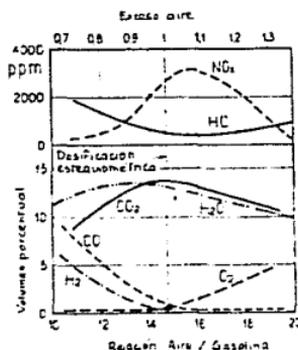


Figura IV.9

Emisiones en volumen, de O₂, CO₂, CO, H₂O y H₂, y emisiones en ppm de HC y NO_x, con respecto a la razón aire/gasolina, en un motor de ciclo Otto

(Tomado de "Motores Endotérmicos" Dante Giacosa)

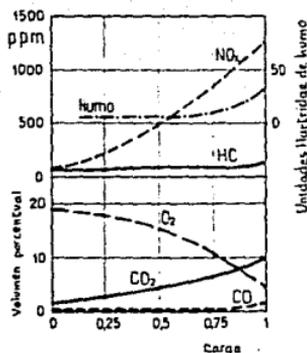


Figura IV.10 Emisiones en volumen, de O_2 , CO_2 , CO ; emisiones en ppm de HC y NO_x , y emisiones de humo en unidades Hartridge, en un motor de ciclo Diesel

(Tomado de "Motores Endotérmicos" Dante Giacosa)

Cuando el motor está en régimen de detonación, se verifican en la llama delgadas lenguas de fuego de color rojo, que aumentan de longitud y de esplendor al agravarse la detonación, y bocanadas de humo negro.

Para un examen más detallado de la combustión es necesario recurrir a otros ensayos térmicos y análisis químicos y químico-físicos.

Los ensayos térmicos consisten esencialmente en la medición de la temperatura del gas; a igualdad de las demás condiciones, la temperatura es tanto mayor cuanto menor es la razón de expansión aprovechada (en relación al avance de apertura de la válvula de escape), cuanto más se prolonga la combustión y cuanto menor es el grado de avance del encendido o de la inyección.

Los análisis químicos y químico-físicos permiten evaluar de manera precisa el grado de aprovechamiento del combustible y las emisiones nocivas.

Si la combustión fuese completa, el gas de escape estaría compuesto por CO_2 , H_2O y N_2 . En la práctica la combustión no es nunca completa a causa de deficiencias derivadas de exigencias constructivas y funcionales y por el hecho de que las ecuaciones de equilibrio de las reacciones de combustión están relacionadas con la

temperatura. En efecto, en el escape encontramos, además de los gases antes mencionados, CO, HC, NO_x, H₂, O₂ y otros compuestos como anhídrido sulfuroso (SO₂), aldehídos, etc. Su porcentaje está en función sobre todo de la razón de mezcla aire/combustible (como es evidente en los diagramas de las Figuras IV.9 y IV.10). Otros factores que intervienen en su formación son el momento del encendido, la geometría de la cámara de combustión, la relación de compresión, la temperatura del aire aspirado, etc.

IV.3.3 ANALISIS QUIMICOS Y QUIMICO-FISICOS DE LOS GASES DE ESCAPE

Un método clásico para la determinación de las concentraciones de los componentes de los gases de escape es el de Orsat (Figura IV.11). Un volumen de gas a analizar, contenido en la bureta graduada V, se hace pasar mediante la maniobra de la botella B y de las válvulas R, sucesivamente a los diferentes recipientes L. llamados laboratorios, que contienen sustancias absorbentes aptas para retener respectivamente los varios componentes, y precisamente: potasa cáustica (KOH) para el CO₂, pirogalol C₆H₃(OH), para el O₂, y una solución amoniacal de cloruro de cobre para el CO. Los porcentajes de hidrógeno y de hidrocarburos pueden calcularse en función del porcentaje de CO:

$$\% H_2 = 0.36\% CO \quad \text{y} \quad \% CH_4 = 0.12 \% CO$$

El volumen de cada componente se mide por diferencia haciendo volver, después de cada absorción, el gas no absorbido a la bureta V.

Puesto que el procedimiento que hemos mencionado es largo y ya no muy confiable, se han estudiado instrumentos de uso más sencillo y expeditivo, los cuales por medio de un índice señalan la menor o mayor presencia de uno o más componentes del gas de escape. Estos aparatos son usados para la medición de las emisiones nocivas y son tratados en el siguiente capítulo.

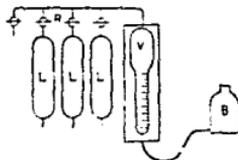


Figura IV.11 Aparato de Orsat

IV.4 METODOS DE CONTROL DE EMISIONES

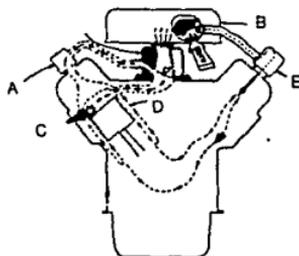
Existen 3 técnicas generales de control destinadas para disminuir la emisión de gases en los motores de combustión interna.

1. modificación del proceso básico, con objeto de conseguir un funcionamiento más limpio.
2. sustitución de los combustibles utilizados por otros más apropiados.
3. lavado de los gases efluentes antes de su emisión a la atmósfera.

De las tres clases de técnicas de control enumeradas anteriormente, las técnicas de lavado de gases ha sido probablemente las más estudiada y constituye probablemente la medida de control más extremadamente aplicada a las fuentes de emisión.

IV.4.1 CONTROL DE LAS EMISIONES DEL CARTER.

Se reciclan los gases de las pérdidas de compresión desde la bomba de aceite del motor al sistema de toma de aire. El aire de ventilación se aspira y dirige hacia el cárter, desde donde asciende a través de la válvula y el tubo de ventilación para incorporarse finalmente al colector de entrada de aire del motor. (Figura IV.12).



- A) Carburador
- B) Filtro de aire
- C) Válvula de ventilación del cárter
- D) Gases de pérdidas de compresión
- E) Tapón del aceite

Figura IV.12 Sistema de control de las emisiones del cárter

IV.4.2 CONTROL DE LAS EMISIONES POR EVAPORACION

Se tienen dos métodos de control de las emisiones por evaporación, que son el sistema de recuperación de vapor y el sistema de adsorción y regeneración.

En el sistema de recuperación de vapor (Figura IV.13), el cárter se utiliza como depósito de los vapores procedentes del depósito de

gasolina y del carburador. Durante el transcurso de un remojo en caliente, el descenso de la temperatura del cárter produce una reducción de la presión en el mismo, suficiente como para aspirar los vapores producidos. Por consiguiente, durante, un remojo en caliente, los vapores del carburador pasan al cárter. El vapor del depósito de gasolina pasa primero a un condensador y a un separador de vapor-líquido desde donde el vapor pasa al cárter y el líquido condensado pasa de nuevo al depósito de gasolina. Cuando el motor se pone en marcha, los vapores almacenados en el cárter se reciclan al carburador por medio del sistema de ventilación positiva del cárter.

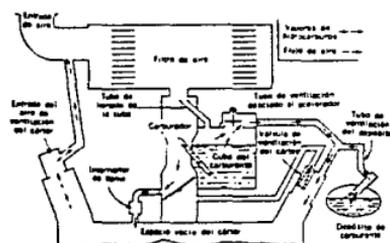


Figura IV.13 Sistema de recuperación de vapor

En el sistema de adsorción y regeneración (Figura IV.14), un recipiente de carbón activado recoge los vapores y los retiene hasta que se envían de nuevo al colector de toma de aire para quemarse. Los elementos esenciales del sistema son el recipiente, una válvula reguladora de presión y una válvula de control de purga.

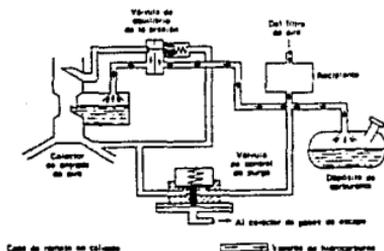


Figura IV.14 Sistema de adsorción y regeneración

Durante el transcurso de un remojo en caliente, los vapores de hidrocarburos del carburador se envían mediante la válvula reguladora

de la presión hacia el recipiente que contiene el carbón activado.

El vapor del depósito de gasolina se envía a un condensador y a un separador, desde donde el carburante líquido se devuelve al depósito. Cuando el motor se pone en marcha, la válvula de control de la presión permite una succión de aire a través del recipiente, arrastrando consigo los hidrocarburos hasta el colector de toma para quemarse posteriormente en los cilindros.

IV.4.3 CONTROL DE LAS EMISIONES DE LOS GASES DE ESCAPE

Existen 4 formas básicas con las que pueden reducirse las emisiones de HC, CO Y NO_x, contenidas en los gases de escape de un automóvil:

1. modificaciones de funcionamiento.
2. modificaciones en el diseño del motor.
3. modificaciones en la formulación del combustible.
4. tratamiento de los gases de escape.

Dentro de las modificaciones de funcionamiento del motor de combustión interna convencional se incluyen todos los cambios posibles que no lleven consigo un nuevo diseño del motor. Como ejemplos de este tipo de modificación, pueden citarse los cambios de las relaciones aire/carburante y del tiempo de encendido del motor. Las modificaciones en el diseño del motor son mucho más costosas de llevar a cabo que las modificaciones de funcionamiento, dado que pueden significar importantes cambios de diversas piezas y, por consiguiente, del equipo de fabricación en serie. La sustitución de la gasolina por otros carburantes de hidrocarburos constituye la tercera gran clase de métodos de control. Si el nuevo carburante puede utilizarse en un motor sin modificar, el costo total de esta alternativa está relacionado directamente con el carburante utilizado. La cuarta clase de métodos de control comprende el tratamiento de los gases de escape (generalmente asociado con algunas modificaciones de funcionamiento) por medio de reactores colocados en el sistema de escape del automóvil.

1. Modificaciones de funcionamiento.
 - a) Relaciones aire/carburante relativamente pobres en ralentí y velocidad de crucero.
 - b) Mayor velocidad del motor en ralentí. Aunque estas modificaciones tuvieron éxito para reducir las emisiones de HC y CO, lo consiguieron a expensas de aumentar las emisiones de NO_x.
2. Modificaciones en el diseño del motor.

Uno de los métodos más ventajosos para conseguir un funcionamiento con mezcla pobre es el reciclaje de los gases de

Por lo tanto es evidente el interés que reviste, a efectos de la reducción de las emisiones de NO_x , una disminución de la temperatura de combustión.

Esta disminución puede conseguirse, además de con una adecuada razón aire/gasolina y un avance del encendido menor que el normal, con la dilución de la carga aspirada por el motor con un gas o con una mezcla de gases inertes que no participen en la combustión. Podrán usarse gases de diferente naturaleza como argón, helio, nitrógeno, CO_2 , vapor de agua, pero es más conveniente y práctico usar los mismos gases de escape porque una parte de ellos es reaspirada por el motor, obteniéndola en zonas adecuadas del tubo de escape.

En la Figura IV.16 están trazadas las curvas de las reducciones porcentuales de las emisiones de NO en función del porcentaje de gas recirculado para diferentes tipos de gases diluyentes, obtenidas experimentalmente en un motor monocilíndrico.

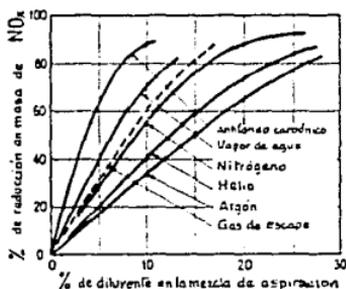
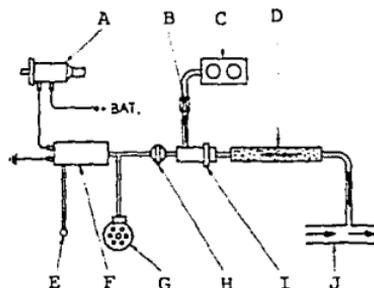


Figura IV.16 Reducción porcentual de las emisiones en peso de NO con diferentes diluyentes de la mezcla

La recirculación de los gases de escape presenta algunos inconvenientes con respecto al funcionamiento del motor. El sistema, además de influir negativamente en la potencia, es causa de engrase del lubricante y de las bujías superior al normal y puede provocar fenómenos de enclavamiento de los segmentos del pistón por adherencia. A esto hay que agregar la dificultad de realizar sistemas de interceptación para poder excluir la recirculación cuando sea necesario, por ejemplo en el funcionamiento en ralentí (mínimo) a plena carga.

El porcentaje de gas recirculado que, en base a los conocimientos actuales, además de garantizar buenas dotes de manejabilidad y de duración, permite reducir notablemente las emisiones de NO_x (-30%), es de aproximadamente de 5 a 10%.

Para la circulación el gas puede ser aspirado por el motor antes del filtro de aire o en la zona de carburador comprendida entre el difusor y la mariposa o, por último, directamente en el múltiple o colector de admisión. Esta última solución, aun presentando notables dificultades de regulación, es la que reviste mayor interés. (Figura IV.17).



- A) Interruptor comandado por la velocidad del motor.
- B) Agujero calibrado.
- C) Dispositivo de entrada de gas en el carburador.
- D) Enfriador de los gases.
- E) Toma de depresión conducto de aspiración.
- F) Electroválvula de control de depresión.
- G) Distribuidor de encendido.
- H) Resorte de retorno.
- I) Válvula de cierre comandada por la depresión.
- J) Tubo de escape.

Figura IV.17 Esquema de recirculación de gases de escape controlados por la velocidad del motor

Por último es necesario notar que la introducción de un gas inerte reduce la temperatura máxima del ciclo, así como también la velocidad de la combustión, por lo que se hace posible adoptar encendidos más avanzados y recuperar así, al menos en parte, la pérdida de potencia.

3. Modificaciones en la formulación del combustible

Cuando la gasolina se reemplaza por carburantes adecuados constituidos por el alcohol o hidrocarburos gaseosos de bajo peso molecular, las emisiones de HC, CO y NO_x pueden reducirse considerablemente.

La formulación de la gasolina, aunque fuera de control de la

industria automotriz, tiene la misma importancia que el motor con respecto a las emisiones contaminantes. La gasolina que está en uso en México, está compuesta de 4 tipos de hidrocarburos, los parafínicos, los olefínicos, los parafínicos cíclicos, y los aromáticos.

Los parafínicos son hidrocarburos completamente saturados, o sea, todas las ligas entre los átomos son del tipo simple, y tienen una estructura abierta.

Los parafínicos no forman depósitos fácilmente en el carburador, son inactivos con componentes hechos de hule, y en combustión se queman de manera muy limpia.

Los parafínicos cíclicos son iguales que otros parafínicos en su función para la gasolina. Ellos sólo difieren en que su estructura es en forma de un círculo en vez de ser abierta.

Todos los tipos de parafínicos son un componente muy deseable en la formulación de gasolina, y en los E.E.U.U. forman un promedio de 65%, en masa, de los hidrocarburos en la gasolina. Con esta formulación, los parafínicos son responsables del 24% de las emisiones de HC en el escape.

Los olefínicos tienen una estructura, muy parecida a la de los parafínicos, pero en este caso la cadena de hidrocarburos no es completamente saturada. Con ellos se encuentra una o más ligas dobles entre los átomos de carbono. Los olefínicos son indeseables en la formulación de gasolina por su facilidad de formar depósitos que pueden estorbar la operación del carburador. Las gasolinas de los E.U. tienen un promedio del 7% por peso de olefínicos, y son responsables del 45% de las emisiones de hidrocarburos no quemados en el escape.

Los aromáticos son hidrocarburos basados en el anillo de benceno. Ellos tienen una estructura de 6 átomos de carbono, y también pueden tener pegados grupos de methyl o ethyl. La estructura está poco saturada, y está muy compacta, resultando en temperaturas de propia combustión muy altas, y en números de octanaje muy altos. Los aromáticos no forman fácilmente depósitos en el carburador, sin embargo hacen daño a los componentes hechos de hule, pueden producir depósitos en la cámara de combustión, y pueden causar el cáncer. A pesar de todos los problemas asociados con el uso de aromáticos, ellos son populares en la formulación de gasolina para subir el número de octanaje. Las gasolinas de los E.U. tienen un promedio de 28% (en masa) de aromáticos, los cuales constituyen el 20% de las emisiones de hidrocarburos no quemados.

-Alcoholes

Aunque no es usado en México, debemos, considerar el uso de alcohol como un constituyente de la gasolina. Básicamente, los

alcoholes son hidrocarburos de liga simple, que tienen un átomo de oxígeno pegado a un átomo de hidrógeno. El alcohol puede ayudar mucho para subir el número de octanaje, y además en combustión se quema de manera muy limpia. Como los aromáticos, los alcoholes no forman depósitos en el carburador, pero también hacen daño a componentes hechos de hule. En los E.E.U.U. el alcohol ha tenido éxito con una mezcla del 10% de alcohol etílico en la formulación de gasolina.

La formulación de la gasolina tiene un papel muy importante en las emisiones de hidrocarburos. Esta fuente de contaminación puede ser reducida por una reformulación de la gasolina consumida en las ciudades con niveles de contaminación muy graves. Primero los olefinicos, hidrocarburos que contaminan en cantidades más grandes, pueden ser eliminados lo más posible de la formulación. El constituyente más limpio en emisiones, los parafinicos, debe ser aumentado a un porcentaje máximo. Para obtener el octanaje, se puede usar una mezcla de alcohol y aromáticos, manteniendo un mínimo porcentaje de los aromáticos.

En la Cuarta Conferencia Internacional del Pacífico de Ingeniería Automotiva (Melbourne, Australia. 1987), se habló del efecto del mezclado de Metil Tertiary-Butil Eter (MTBE), en la gasolina con respecto al mejoramiento del número de octano.

- Existen dos incentivos básicos al mezclar MTBE en la gasolina:
- 1º mejorar el número de octano y
 - 2º reducir el contenido de plomo.

El MTBE es un componente relativamente nuevo para la refinería del petróleo. Sus características de mezclado son muy parecidas a las de los hidrocarburos y se sintetiza del metano y el isobutileno. En E.U.A. fue aprobado su uso por EPA en febrero de 1979, para aumentar el número de octano, hasta en un 7% en volumen en la gasolina terminada sin plomo. Posteriormente el límite se incrementó hasta un contenido máximo de oxígeno de 2% en volumen, permitiendo hasta un 11% en volumen de MTBE en la gasolina sin plomo.

El MTBE fue fabricado comercialmente en Europa por Chemische Werke Huls en Alemania Occidental y por Anic en Italia.

El uso del MTBE, como elevador de octano, en las gasolinas tiene varias ventajas, entre ellas su gran miscibilidad en todas sus proporciones y su alto contenido de valor calorífico. Además, el MTBE con gasolina no es higroscópico como son los demás mezclados de gasolina oxigenada.

Producido por la reacción de isobutileno y methanol es una forma de usar el methanol en la gasolina del motor sin los problemas asociados con el alcohol que se usa como componente de la mezcla. La gasolina que contiene MTBE es compatible con los sistemas de distribución de la actual gasolina.

Los resultados obtenidos experimentalmente¹¹ confirmaron los efectos positivos del MTBE como un elevador de octanaje de la gasolina. El 15% en volumen del MTBE mezclado con gasolina sin plomo produjo un aumento de 6.1 RON en el número de octano (de 80.9 a 87).

Sin embargo, el aumento del 15% en volumen de MTBE afecta la volatilidad de la mezcla para reducirla abajo de la especificación de la destilación, en particular para el 50% (en volumen) de temperatura destilada.

-Estudio del uso de la gasolina sin plomo mezclada con el compuesto MTBE.

El MTBE como elevador octano tiene muchas ventajas: alto número de octano, buena estabilidad química y buena compatibilidad de materiales. Se han estudiado los efectos del mezclado de MTBE con los varios componentes de gasolina, incluso su efecto en las propiedades del combustible y el efecto tóxico de sus emisiones.

Para mejorar la calidad de las gasolinas de motor producidas en China, el MTBE se usa como multiplicador o amplificador de octano para varias combinaciones de mezclado.

Las pruebas de mezclado que usan MTBE y alkyllis de plomo revelaron que la adición de MTBE no afectaba la susceptibilidad de las composiciones de gasolina respecto de los antidetonantes de plomo.

Respecto a las pruebas de corrosión, el efecto del combustible base y el de gasolina con MTBE mezclado en varios metales se pudo estudiar con las muestras de metal inmersas en el combustible a 30 C durante 15 días. No se observó ningún efecto nocivo en dichas muestras de metal.

Debido a que todas las muestras de metal probadas no fueron afectadas por la presencia de MTBE en el combustible, podrá concluirse que la gasolina mezclada con MTBE es totalmente compatible con los metales que se usan actualmente.

-Nivel de Toxicidad

Se enviaron muestras de gasolina base y gasolina base con 15% de MTBE al laboratorio de Beijing Medical University para efectuar los estudios de toxicidad. El estudio de la inhalación se realizó con ratas albino expuestas por un tiempo predeterminado a los vapores de la gasolina base y la mezclada con MTBE respectivamente en un cuarto cerrado para conocer la concentración del vapor a la que el 50% de los animales muere. Los resultados revelan que tanto el combustible base como el mezclado con MTBE se clasifican como

¹¹ Cuarta Conferencia Internacional del Pacifico de Ingeniería Automotiva Melbourne, Australia. 1987.

productos químicos de baja toxicidad; además el combustible base y la gasolina mezclada con MTBE fueron aplicados a la piel de unos conejos albinos durante 24 horas sin detectarse ninguna irritación en la piel.

-Prueba de pantalla para la mutación de genes

Tanto la gasolina base como la mezclada con MTBE fueron probadas para la activación metabólica de acuerdo con Ames Salmonella/Microsome en un ensayo. Se obtuvieron resultados negativos. Por lo tanto es evidente que la gasolina mezclada con MTBE es un non-mutagen.

-Ensayos con el dinamómetro

Los motores usados durante el estudio fueron volkswagen de 1.8 litros. Cada máquina se colocó en un banco de pruebas y fue acoplada al dinamómetro hidráulico. El combustible, se midió con un medidor de flujo digital, la velocidad de la máquina con un tacómetro digital y el gas se analizó para las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos con una analizador MEXA 324-E. Toda la operación de la máquina fue controlada con un microprocesador SHARP PC-1500.

Cada motor se usó para probar tanto el combustible de referencia como la gasolina con MTBE durante 300 horas. El intervalo en el cambio de aceite para la prueba de dinamómetro fue de 150 horas.

-Resultados de las pruebas

Los resultados de la pruebas se dan en términos de potencia producida, emisiones y desgaste. Las pruebas de dinamómetro muestran que la potencia producida por el motor usando gasolina mezclada con MTBE fue casi la misma que la producida cuando se usó gasolina regular con plomo. Sin embargo, el par de la máquina que usa gasolina mezclada con MTBE fue un poco más elevado. Esto fue más significativo cuando la máquina se operaba a velocidades altas y medias.

4. Tratamiento de los gases de escape

La forma de reducir las emisiones de HC, CO y NO_x consiste en tratar los gases de escape por medio de reactores químicos colocados en el sistema de escape. Este método puede dividirse en equipos catalíticos y no catalíticos. El problema fundamental es que los HC y el CO deben oxidarse y el NO_x debe ser reducido a N₂ y O₂, si se quiere que los tres contaminantes sean transformados por el sistema.

a) Tratamiento catalítico

El sistema catalítico más estudiado es el sistema doble, donde el motor funciona con una mezcla rica y los gases de escape alimentan primero al lecho de eliminación de NO_x y a continuación al flujo de

gases se le inyecta una cantidad adicional de aire para que, el HC y el CO sean oxidados.

Los catalizadores propuestos pueden dividirse en dos grupos:

1. Los metales del grupo del platino, incluyendo el paladio y el rodio.

2. Los metales base tales como el cobre, el níquel y el cromo, así como sus aleaciones. (monel, inconel y acero inoxidable).

En general la mayoría de los catalizadores actúan hasta cierto punto como oxidantes y reductores.

Un catalizador metálico contiene capas de filtros metálicos o están rellenos de pequeñas virutas de metal.

Un catalizador soportado consiste en una cantidad relativamente pequeña de metal noble o de metal base depositada sobre la superficie de una estructura de soporte inerte generalmente alúmina. (Al_2O_3).

A fin de que el elemento oxidante reacciones con eficacia éste debe reaccionar a una temperatura de 400 C aproximadamente.

Una alternativa al doble sistema catalítico es el sistema catalizador trivalente que simultáneamente oxida los HC y el CO y reduce el NO_x (Figuras IV.18 y IV.19). Un catalizador semejante sólo puede operar satisfactoriamente en un intervalo reducido de relación aire/carburante, con una mezcla ligeramente rica respecto al valor de la relación estequiométrica.

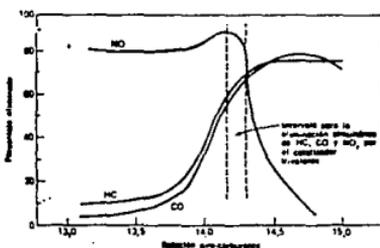


Figura IV.18 Efecto de la relación aire/carburante sobre el porcentaje de eliminación de HC, CO y NO_x en un sistema catalizador trivalente

(Tomada de: IX Seminario Nacional sobre el uso racional de energía. PEMEX)

-Filtros para eliminar emisiones de plomo.

Partiendo de la base de que eliminar, o simplemente disminuir, el contenido en plomo de las gasolinas va, o bien en detrimento del costo del combustible, o bien en detrimento del rendimiento del motor, una solución interesante es dotar al sistema de escape de un filtro adecuado que sea capaz de retener el plomo. Las realizaciones prácticas que se han llevado a cabo por Ethyl Corporation y Texaco Oil Co., entre otras, se basan en sustituir el silenciador del motor por otro silenciador de similares características, pero con lana de acero inoxidable recubierta de alúmina en su interior. Los resultados obtenidos en diferentes pruebas han sido satisfactorios, encontrándose disminuciones en las emisiones de plomo que oscilan entre el 50 y el 75%. La ventaja de utilizar este sistema está en que prácticamente no afecta al funcionamiento del motor, manteniéndose el consumo específico. Por otra parte, su costo es reducido y su vida operativa bastante alta.

b) Reactores térmicos.

El segundo tipo de sistemas de tratamiento de los gases de escape consiste de una cámara en el que los HC y el CO sufren una combustión suplementaria después de salir de los cilindros. El reactor térmico puede utilizarse tanto con una mezcla pobre como con una mezcla rica, se necesita una inyección de aire suplementaria. (Figura IV.21). El motor Wankel, por ejemplo, se adapta muy bien a un reactor térmico dado que las temperaturas de los gases de escape son muy elevadas y todos los orificios de salida de los gases están muy próximos entre sí.

-Avances en la formulación de catalizadores.

En comparación con las expectativas que se tenían en E.U. en 1985, con la normatividad basada en la del estado de California en 1975 y los estándares federales de emisiones de 1976, los recientes avances en las formulaciones de catalizadores de tres vías han conducido a mejoras significativas en duración y desempeño.

El incremento de la durabilidad juega un papel importante en el uso de metales nobles, lográndose emisiones standar más restringidas y extendiendo los requerimientos de durabilidad en las garantías.

Este estudio examina los beneficios de las tecnologías de catalizadores de tres vías perfeccionados con el fin de acelerar su aplicación para requerimientos de emisión más arduos.

Rangos relativos y niveles de desempeño son comparados para formulaciones de dos nuevos catalizadores, de alta tecnología de producción y de avanzada tecnología. Los beneficios de desempeño son caracterizados por una matriz de varios métodos de envejecimiento, métodos de prueba de dinamómetro estacionario, y sistemas vehiculares.

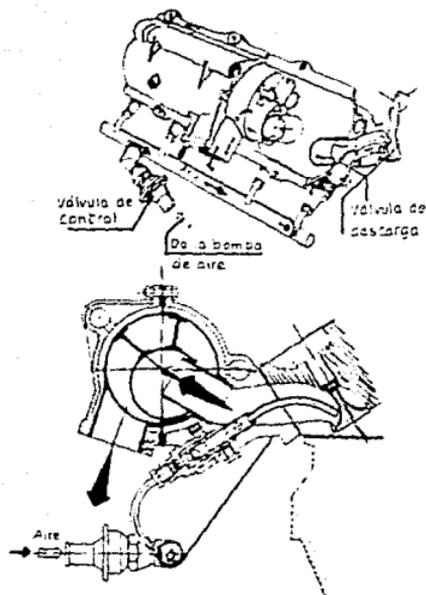


Figura IV.21 Reactor térmico para la transformación del CO y de los HC en CO_2 y H_2O

Avances significativos en emisiones vehiculares suceden cuando las mejoras en tecnologías de catalizadores son sistemáticamente aparejadas con mejoras en tecnologías de control de sistemas para simultáneamente optimizar el sistema vehicular de emisiones en su totalidad.

La extensiva reputación del desempeño del catalizador es determinada por los fabricantes de automotores durante la validación y verificación, y por fabricantes de catalizadores durante el desarrollo de los catalizadores.

El desarrollo del sistema comercial de catalizadores para el control de emisiones es el producto de numerosos estudios de evaluación empleando laboratorios con dinamómetro para motores, así como de pruebas en vehículos.

Envejecimiento y evaluación de catalizadores de tres vías (CTVS) presentes en sistemas automotores comunes son las variables complejas usadas para eventualmente predecir el desempeño de catalizadores en numerosos sistemas vehiculares durante las variadas condiciones encontradas en campo y durante el ciclo de manejo de 1975 (FTP). Los CTVS son diseñados para la simultánea oxidación de hidro carbonos (HC) y monóxido de carbono (CO) así como la reducción del óxido de nitrógeno (NO_x).

La durabilidad al envejecimiento de los sistemas de CTVS es demostrado finalmente durante la costosa certificación de vehículos con 50,000 millas / 80,450 km. del ciclo acumulativo de kilómetros de la AMA, que puede ser incrementado hasta 100,000/160,000 km. con un ajuste futuro de requerimientos de emisión.

Para facilitar el control de calidad de los catalizadores, numerosos ciclos de envejecimiento en dinamómetro se han desarrollado empíricamente por las compañías fabricantes de automotores y catalizadores, esto para acelerar el deterioro de catalizadores con la esperanza de que éstos sean representativos del envejecimiento de los automóviles. Técnicas de laboratorio para simular el envejecimiento representativo de CTVS son menos comunes, pero han sido útiles en separar los modos químicos de la desactivación térmica.

Las condiciones de evaluación de catalizadores de control de emisiones envejecidos son variadas y tan críticas en la selección de tecnologías apropiadas de catalizadores para una aplicación dada como los ciclos de durabilidad al envejecimiento. Dado que los CTVS deben funcionar en un contorno químico dinámico y rara vez bajo condiciones estables, las evaluaciones de desempeño de los catalizadores convertidores son típicamente una función de la relación aire/combustible (A/C), temperatura, velocidad en volumen de control y modulaciones acerca de la relación estequiométrica de A/C. En el desempeño dinámico del catalizador se ha encontrado una variación dramática en condiciones estables y han sido necesarias modulaciones de aire/combustible para simular vehículos FTP-75 con CTVS.

Aunque las evaluaciones del "barrido" de modulaciones A/C sólo indican el desempeño a velocidad constante, son útiles para predecir cualitativamente los rangos de desempeño del catalizador. Las variaciones en los sistemas vehículo a vehículo influyen grandemente en el desempeño absoluto del catalizador, pero las pruebas de barrido A/C se han correlacionado con la fase dos (estabilizado en frío) de la prueba FTP-75 con apropiadas perturbaciones A/C y temperaturas de escape.

Se han demostrado mediante medidas instantáneas de CO durante condiciones dinámicas A/C de catalizadores con contenido de Cerio fresco, encontrándose que mejoran las conversiones de CO durante el ciclado de A/C.

La modulación asimétrica de chorros alimentadores en ciertos puntos no estequiométricos se encontró benéfica a elevadas temperaturas pero no fueron significativos durante el calentamiento del catalizador. Para maximizar los beneficios potenciales de operación periódica sobre catalizadores con contenido de Pt-Pd y Rh, se usan chorros alimentadores modulados (sin SO_2).

Se ha observado que existen mayores perturbaciones en los gases de escape a bajas temperaturas, durante el calentamiento de los catalizadores.

Sin embargo, a temperaturas de operación ocurren las conversiones óptimas de tres vías, con mínima amplitud en modulaciones A/C. Dado que la mayor parte de conversiones NO/CO ocurren en el estado estable A/C en el punto estequiométrico controlado, este estado es el más deseable.

-Formulaciones de catalizadores.

Todos los catalizadores evaluados en estos estudios fueron preparados en substratos de cerámica monolítica teniendo una célula nominal con geometría de 64 células/cm² (400 celdas cuadradas/pulgada²) con una pared de 1.5 μm de espesor. Todos los substratos ovales tienen las siguientes dimensiones: 8.1 x 14.5 x 13.2 cm con 1.5 l. de volumen.

El contenido del metal noble se expresa en gramos por volumen de substrato cerámico monolítico. Los catalizadores incluidos en este estudio son formulaciones de tres vías conteniendo 31 g. de metal noble/pie³ (1100g/m³) con una tasa de platino rhodio de 10/1.

-Evaluación y envejecimiento por dinamómetro.

Una máquina de doble garganta V-8 de 5.0 litros con inyección de combustible fue utilizada para envejecer a los catalizadores en todos los experimentos de durabilidad. Dos catalizadores de tamaño normal fueron envejecidos simultáneamente en el experimento típico. Para asegurar que los dos catalizadores fueron expuestos a las mismas condiciones, los humos de cada banco de las máquinas se mezclaron y posteriormente se redistribuyeron sobre los dos catalizadores.

Cuatro motores diferentes realizaron el ciclo de envejecimiento de 100 horas para comparar la durabilidad de las dos formulaciones de catalizadores de platino/rhodio.

Los cuatro ciclos de envejecimiento aceleraron el proceso al exponer al catalizador a elevadas temperaturas en su completa duración. Dos ciclos de crucero de 760°C y 900°C fueron designados, se expuso a los catalizadores a una condición de alta temperatura con un modo único estequiométrico. Los ciclos de cruceros simularon vehículos que generan altas temperaturas de escape pero sin exponer a los catalizadores a incursiones con mezclas demasiado pobres.

En todas las corridas de envejecimiento los niveles de envenenamiento fueron los mismos: 4 mg de plomo/l. y 0.5 mg de fósforo/l. El consumo promedio de aceite lubricante fue de 1 a 2 l.

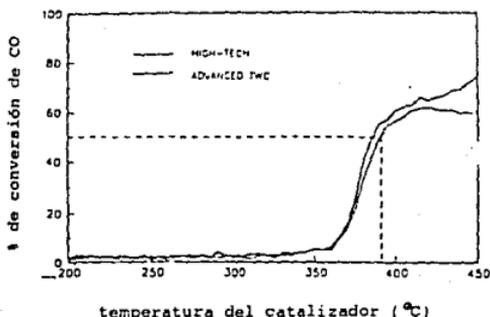


Figura IV.22 Resultados del travesero de temperatura para conversiones de CO en mezcla estequiométrica para ambos tipos de Catalizadores de Tres Vías

(Tomado de: J.F. Skowron. SAE)

EVALUACION VEHICULAR DE CATALIZADORES ENVEJECIDOS EN DINAMOMETRO

Los datos vehiculares fueron generados comparando el desempeño relativo de catalizadores de rodio/platino a 850°C con combustible recortado. Dos muestras de catalizador fueron evaluadas con cuatro diferentes vehículos.

Los vehículos escogidos para probar el desempeño del catalizador fueron un Chevrolet Citation 1982, un Buick Somerset 1987, un Nissan 300 ZX Turbo 1984, y un Volkswagen Scirocco 1984.

Tanto el Citation como el Somerset están equipados con máquina de 2.5 l. de 4 cilindros con inyección de combustible y sistema de gargantas incorporado al cuero del motor "Throttle body".

El sistema de control de combustible del Somerset incorpora una revisión más reciente y concreta un control más estrecho de A/C comparado al del Citation excepto en la velocidad de crucero de 50 millas/hora (80 K/h). Debido a mejoras significativas en el diseño del motor, las emisiones de hidrocarburos y CO para el Somerset son sustancialmente menores. El Nissan 300 ZX está equipado con un motor V-6 de 3.0 litros, con inyección múltiple de combustible. El Scirocco está equipado con motor de 1.8 litros, 4 cilindros e inyección múltiple. El Scirocco fue el único vehículo que no incorpora un sistema de recirculación de humos y correspondientemente

la mayor emisión de NO_x a la salida del motor. Estos vehículos fueron seleccionados para obtener un rango de temperatura y estrategias de control de combustible para determinar un desempeño relativo de dos tecnologías diferentes de catalizadores.

El 300 ZX es el más frío de los 4 vehículos. Como se esperaba es por mucho el que más demanda en términos de desempeño de catalizador.

El calentamiento lento del reactor está caracterizado por el porcentaje relativo de tiempo con temperaturas de entrada al reactor por abajo de 350°C , como se muestra en la Figura IV.23. Las fases de transición tanto frías como calientes, tienen significativamente menor promedio de temperaturas de entrada en el reactor que los otros vehículos. Por ejemplo, hay una diferencia de 67°C en temperaturas promedio de entrada en la fase de transición fría de la FTP-75 entre el Chevrolet Citation y el Nissan 300 ZX Turbo.

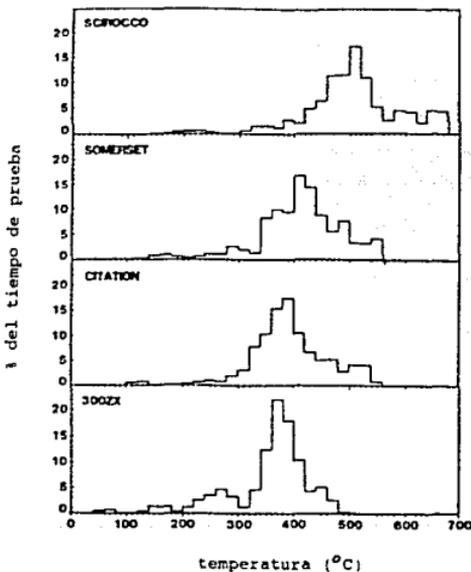


Figura IV.23 Histogramas de temperatura a la entrada del reactor para los vehículos de prueba (FTP-75) mostrando el porcentaje de tiempo para cada incremento de temperatura

(Tomado de: J.F. Skowron. SAE)

Una vez que los vehículos están calientes, las diferencias de temperatura se reducen. Por ejemplo, en la fase fría estabilizada del FTP-75 la diferencia en la temperatura de entrada al convertidor es sólo de 5°C. El Buick Somerset tiene temperaturas moderadas a la entrada del convertidor. El Somerset opera 27°C más caliente que el del Citation a través de la fase transitoria fría del FTP-75. La prueba del Scirocco expone al catalizador a temperaturas peligrosas durante la prueba FTP-75 que alcanzan a las temperaturas de envejecimiento descritas anteriormente.

Los cuatro vehículos también presentan significativas diferencias en los parámetros de A/C para el catalizador. El Chevrolet Citation está calibrado precisamente en el punto estequiométrico y no presenta problema de mezclas pobres y ricas. El Buick Somerset está calibrado ligeramente pobre bajo el punto estequiométrico y tiene más transitorios en la dirección pobre que en la rica.

Los dos vehículos multiporteados, (un conducto de admisión para cada cilindro) con inyección de combustible, el Nissan 300 ZX y Scirocco tienen significativamente diferentes estrategias de control del A/C. El Nissan 300 ZX Turbo tiene la calibración más pobre de los 4 vehículos de prueba.

El 300 ZX tiene el más dinámico entorno de A/C, teniendo las mayores oscilaciones durante los cruceros y extremos recortes de combustible durante las desaceleraciones.

El Scirocco obtuvo la calibración de cruce más rica de todos.

Una comparación de mezclas A/C durante la fase transitoria caliente de la prueba FTP-75 es útil para mostrar las características de control de combustible caliente. (Figura IV-24).

Las características de control de la mezcla A/C de los cuatro vehículos fueron medidas con sistemas de respuesta rápida. Nótese la incursión que hace el 300 ZX recortando el combustible durante la desaceleración en la fase transitoria caliente desde los 80 Km/h a los aprox. 300 seg. Mientras que la característica de recorte de combustible no fue un parámetro que afectara las emisiones de la prueba FTP-75, es un factor crítico en la durabilidad como se mostrará posteriormente.

PROCEDIMIENTOS DE LAS PRUEBAS VEHICULARES

Los cuatro catalizadores envejecidos por las máquinas fueron evaluados en los cuatro vehículos usando el ciclo de prueba FTP-75 (U.S.).

El FTP-75 empieza con un arranque en frío y posteriormente tiene un exceso de combustible en caliente, se divide en tres fases: el transitorio en frío (TF), el estabilizado en frío (EF), y el

transitorio en caliente (TC). Entre la parte estabilizada en frío y el transitorio en caliente la máquina se apaga y el vehículo es enfriado (hot Soaked) por 10 minutos.

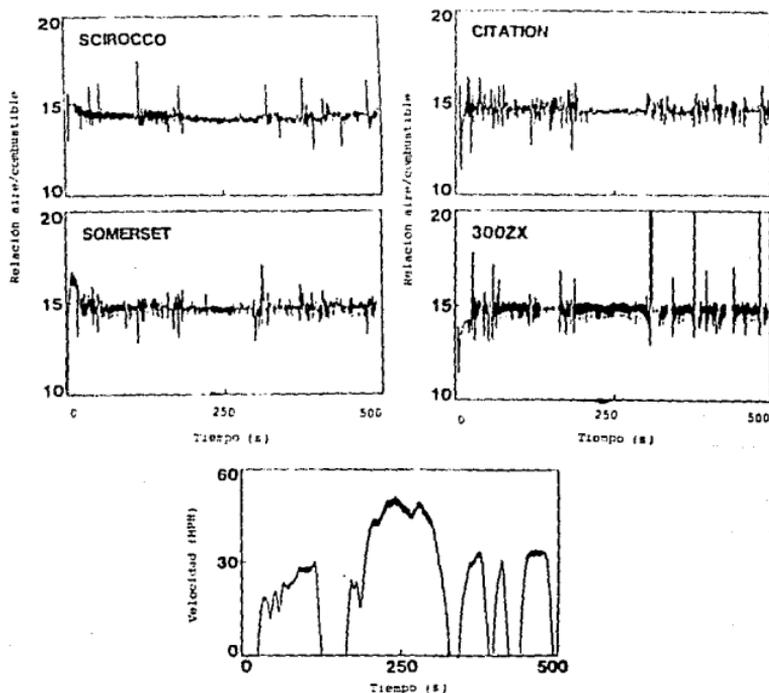


Figura IV.24 Características de control de A/C para los diferentes vehículos durante una fase de transición en caliente durante la prueba FTP-75

(Tomado de: J.F. Skowron. SAE)

El FTP-75 cubre una distancia total de aproximadamente 18 km. a una velocidad promedio de 34 km/h. para todos los resultados vehiculares presentados se esperó una semejanza con la información obtenida.

Tanto en las bolsas como en las emisiones totales sin diluir, estos se determinan para HC, CO Y NO_x . Todos los desempeños para la conversión de catalizador han sido calculados para los pesos totales

antes y después del reactor.

Diferencias en el desempeño del catalizador de menos del 4% no se han considerado significativas.

RESULTADOS Y DISCUSION DE EFECTOS DE ENVEJECIMIENTO

Cuatro métodos diferentes de envejecimiento fueron seleccionados para estudiar los severos efectos de las incursiones pobres a elevadas temperaturas, y el desempeño de durabilidad de los modernos catalizadores de tres vías. De acuerdo con las tasas de los efectos con altos niveles de flujos en el escape se deduce que mientras mayores tasas de flujo menores niveles de desempeño en los catalizadores. Mientras menor sea la temperatura límite, mejor será el desempeño del catalizador en emisiones durante la fase de transición fría.

100 h de envejecimiento	Tecnología	Prueba a 450°C Desempeño del catalizador (% de conversión)					
		30 000 h ⁻¹			90 000 h ⁻¹		
		HC	CO	NO _x	HC	CO	NO _x
Gasolina recortada (760°C)	Avanzada	90	82	82	84	66	69
	Alta	91	75	75	85	58	62
	Diferencia	-1	7	7	-1	8	7
Gasolina recortada (850°C)	Avanzada	90	78	75	86	70	67
	Alta	89	62	72	81	54	63
	Diferencia	1	16	16	5	16	4

Tabla IV.2 Efectos en el aumento de las tasas de flujo

LAS MUESTRAS DE CTVs de avanzada tecnología tienen una ventaja definitiva cuando son envejecidas con un método de cruce a altas temperaturas con mezcla estequiométrica como se observa en la Tabla IV.2 de efectos en el aumento de las tasas de flujo.

Los desempeños de límite no son significativamente diferentes al ser utilizada una mezcla pobre con recorte de combustible, y los CTVs avanzados no presentan deterioro con temperaturas de envejecimiento al ser incrementadas de 760 a 850°C.

Mientras estos efectos son fácilmente apreciados con el dinamómetro fijo, pueden no ser significativos durante la operación

del vehículo debido a la colocación del reactor y las características de calentamiento.

Con el dinamómetro fijo y en sistemas vehiculares el desarrollo del envejecimiento de catalizadores y los procedimientos de evaluación apropiados para el sistema de emisiones de un vehículo en particular requiere una juiciosa selección de parámetros específicos de operación. Asimismo al seleccionar una tecnología de catalizadores para un control de emisiones de un vehículo en particular, debe tenerse cuidado de confiarse en una prueba limitada tanto para el envejecimiento del catalizador como para la evaluación del mismo. (Figura IV.25).

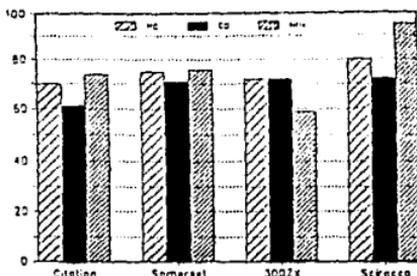


Figura IV.25 Efectos de sistemas vehiculares de evaluación en el desempeño de CTVs avanzados después de 100 horas de envejecimiento a 850°C con combustible recortado

1.- Las formulaciones de catalizadores avanzados han mostrado ampliamente las mejorías en la estabilidad, a altas temperaturas, de los metales nobles.

2.- Los efectos de estabilización térmica de los catalizadores de 3 vías se observan claramente en el mejoramiento del control del CO.

3.- Las mejorías en las conversiones de HC se correlacionan con mayores temperaturas de entrada al convertidor. La mejor estabilidad térmica de la tecnología avanzada permitirá el uso de un acoplamiento más directo entre el múltiple de escape y el reactor, para lograr potencialmente menores estándares de HC no quemados.

4.- Un mejor desempeño de los CTVs avanzados se encontró también a tasas de flujos incrementados y, por lo tanto, se puede esperar también durante aceleraciones de alta velocidad.

5.- La relación entre la tecnología de los catalizadores y los sistemas vehiculares de control de emisiones es un balance muy delicado y los modernos sistemas de catalizador y manejo de combustible en el motor, necesitan ser optimizados simultáneamente para lograr estándares más rigurosos.

V

**MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MEZCLAS
GASEOSAS**

MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MEZCLAS GASEOSAS

V.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS

En este capítulo nos ocuparemos de los transductores de medida de emisiones contaminantes provenientes del escape de los motores ya que, como hemos visto, es la principal fuente contaminante del vehículo.

Centraremos nuestro estudio en los métodos de medida de las emisiones contaminantes previa revisión de los transductores de medida de gases en general.

Para el análisis de uno o más componentes en una mezcla gaseosa se cuenta con una gran variedad de detectores, con distintos grados de sensibilidad y aplicables a distintos rangos de medida. En general, los detectores utilizan como principio de funcionamiento diversas propiedades químicas o físicas de los gases a analizar. En la mayor parte de las aplicaciones es necesario someter a la muestra a un pretratamiento antes de ser analizado por el detector.

La clasificación de los métodos de análisis se hace en base a los principios que rigen el funcionamiento del sistema de pretratamiento o del detector. Formalmente, los métodos o técnicas de análisis químicos de sistemas gaseosos se clasifican con las siguientes denominaciones: Cromatografía, Análisis térmico, Espectroscopía y Métodos electroquímicos.

V.1.1 CROMATOGRAFIA

Las técnicas cromatográficas se basan en las diferentes distribuciones de concentración de cada uno de los componentes que se producen en una mezcla compuesta por dos fases inmiscibles, a medida que una fase (la fase móvil) pasa por encima o a través de la otra fase (la fase estacionaria).

Un ejemplo de cromatografía gas-sólido es el de un analizador por filtro en el que la muestra se hace pasar por un filtro de papel o alguna otra sustancia absorbente que cambia sus características en función del tipo de componente y su concentración. Los opacímetros son sistema de este tipo.

En el caso de un cromatógrafo de gas-gas se tiene un tubo o capilar con un determinado gas por el cual se hace pasar el gas de muestra a flujo constante. Las diferencias de concentración de los distintos componentes al pasar la muestra por el tubo de análisis son conocidas mediante un detector adecuado.

V.1.2 ANÁLISIS TÉRMICO

En esta técnica se calienta o enfría la muestra lo cual causa

variaciones en ciertas propiedades de la misma que, una vez detectadas permiten analizar los cambios químicos o físicos ocurridos durante el calentamiento o enfriamiento de la muestra.

En algunos casos se registran los valores absolutos de la propiedad medida, en otros la diferencia entre alguna propiedad de la muestra y otra sustancia estándar o la razón de variación de las propiedades con respecto al tiempo o a la temperatura.

V.1.3 ESPECTROSCOPIA

La espectroscopía está basada en el hecho de que la materia tiene propiedades de absorción o emisión de cuantos de luz.

Para identificar los componentes que la constituyen, se obtiene el espectro de emisión o absorción de la muestra y, para determinar sus concentraciones se mide la variación de la intensidad de la radiación que pasa a través de la muestra o es reflejada por ella.

En estas técnicas se utilizan diferentes rangos del espectro (rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas) y se denominan dispersivas si usan toda la banda completa y no dispersivas cuando usan ciertas frecuencias discretas de la banda. Por ejemplo, las técnicas dispersivas del infrarrojo se conocen como DIR y las no dispersivas del mismo: NDIR. Las técnicas NDIR se usan ampliamente en medida de contaminantes.

Se denominan técnicas de quimioluminiscencia a aquellas que se basan en medir la radiación liberada en una reacción química. Las que utilizan micrófonos para relacionar variaciones de presión originadas por la muestra con la longitud de onda de la radiación incidente sobre la misma se denominan técnicas fotoacústicas.

V.1.4 METODOS ELECTROQUÍMICOS

Basados en las propiedades eléctricas de los iones de las sustancias bajo estudio, estos métodos consisten en ionizar la muestra y midiendo intensidades de corriente, diferencias de potencial, resistencia, conductividad, etc. se conoce la concentración de la sustancia.

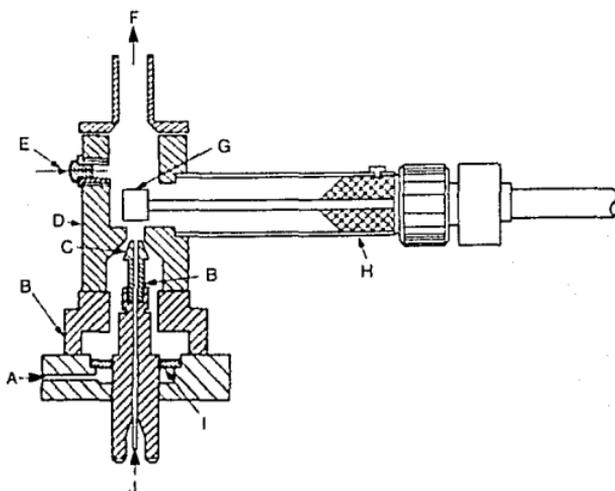
V.2 DETECTORES

V.2.1 DETECTOR DE IONIZACIÓN DE LLAMA (FID)

Cuando una partícula de alta energía choca contra otra partícula, ésta se ioniza produciéndose iones positivos y electrones que pueden ser dirigidos a electrodos entre los cuales se aplica una diferencia de potencial o voltaje externo a la cámara donde se produce el choque, de tal manera que se genera una corriente eléctrica (corriente de ionización).

El FID se basa en sistemas en los cuales se miden las variaciones de la intensidad de la corriente de ionización que ocurren en el interior de una cámara. Se utiliza una llama de hidrógeno-oxígeno que contiene átomos altamente energéticos y una cantidad de iones del orden de 10^7 por cm^3 . Cuando se añaden trazas de compuestos orgánicos a la llama el número de iones aumenta hasta un orden de 10^{11} iones por cm^3 , produciéndose una corriente de ionización medible.

En la Figura V.1 se muestra el corte transversal de un FID. El gas de muestra se hace pasar por una llama de hidrógeno-aire. El chorro de la llama y el cuerpo del detector se encuentran al mismo potencial eléctrico y constituyen uno de los electrodos, el otro electrodo es un colector cilíndrico situado por encima del chorro.



- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| A) Aire | B) Aislante |
| C) Boquilla del chorro | D) Cuerpo del detector |
| E) Encendedor | F) Respiradero |
| G) Electrodo colector cilíndrico | H) Teflón |
| I) Difusor | J) Hidrógeno y muestra gaseosa |

Figura V.1 Corte transversal de un FID

Cuando las moléculas del gas se ponen en contacto con la llama, se ionizan produciendo la corriente de ionización (amplificable y medible).

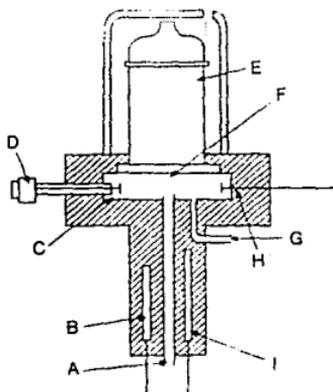
El FID es un detector que responde no a la concentración del componente del gas que entra sino a la cantidad de materia orgánica que entra por unidad de tiempo. La corriente de ionización es proporcional al número de átomos de carbono presentes en la llama.

La sensibilidad del detector puede expresarse como la cantidad de sustancia que debe pasar por la llama para producir una señal detectable. Un orden de magnitud típico es 10^{-11} gramos de carbono por segundo.

El FID es prácticamente sensible a todas las sustancias orgánicas, pero no es sensible a las sustancias inorgánicas ni al agua. Tiene una gran sensibilidad, alta estabilidad y un amplio rango de respuesta lineal. Se usa ampliamente en cromatografía de gases y en analizadores globales de hidrocarburos.

V.2.2 DETECTOR DE FOTO-IONIZACIÓN (PID)

Este detector (Figura V.2) es sensible a una gran cantidad de sustancias orgánicas y también inorgánicas. Es muy similar al FID, sólo que en vez de usar una llama para ionizar la muestra utiliza una fuente de radiación ultravioleta. De esta manera se ionizarán aquellas moléculas cuyo potencial de ionización sea más bajo o del mismo orden que la correspondiente a la radiación. Igual que en el FID, los iones se recogen en un electrodo debido a la existencia de un campo externo.



- | | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| A) Entrada de la muestra | B) Termopar |
| C) Electrodo colector de iones | D) Señal al electrómetro |
| E) Lámpara UV sellada intercambiable | F) Cámara de ionización |
| G) Salida de la muestra | H) Electrodo acelerador |
| I) Calefactor | |

Figura V.2 Esquema de un detector de fotoionización (PID)

La respuesta del PID está determinada, entonces, por el potencial de ionización de la molécula. La selectividad del PID es diferente para diferentes bandas de radiación ultravioleta como puede verse en

la Figura V.3 en la que se usaron tres lámparas UV diferentes.

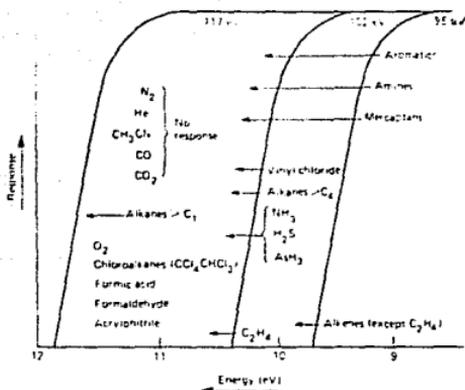


Figura V.3 Respuesta de un PID para varias lámparas UV

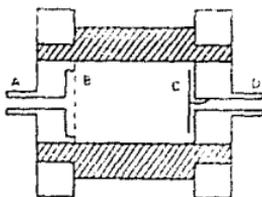
Los potenciales de ionización del N_2 , He, CH_3 , CH, CO y CO_2 , están por debajo de la energía de estas lámparas y el PID no responde en estos gases.

El PID es altamente sensible a ciertos compuestos orgánicos y tiene una amplia respuesta lineal.

V.2.3 DETECTOR DE CAPTURA DE ELECTRONES

En este detector, ilustrado en la Figura V.4, el gas de muestra se hace pasar por una cámara que contiene una fuente radioactiva de rayos β (generalmente tritio ó ^{63}Ni). Como puede verse en la misma figura, el sistema está dispuesto entre dos electrodos conectados a una diferencia de potencial externa lo cual produce, una cierta intensidad de corriente. Al introducir el gas de muestra, según su electroafinidad, capturaré parte de los electrones emitidos por la fuente causando una disminución de la intensidad de la corriente. Tal disminución nos permite conocer la concentración de dicho gas.

El detector de captura de electrones es extremadamente sensible a las especies electronegativas, en particular los compuestos alojenados y el oxígeno.

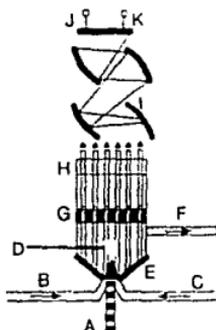


- A) Entrada del gas y ánodo B) Difusor (hecho de malla 100, metálica)
 C) Fuente de radiación ionizante D) Salida del gas y cátodo

Figura V.4 **Detector de captura de electrones**

V.2.4 DETECTOR FOTOMETRICO DE LLAMA (FPD)

En el detector fotométrico de llama (Figura V.5) el gas de muestra se hace pasar por una llama rica de hidrógeno-oxígeno o de hidrógeno-aire la cual produce especies quimioluminiscentes que emiten radiación en bandas características.



- A) Entrada de la muestra B) Aire
 C) Hidrógeno D) Llama
 E) Reflector F) Salida
 G) Protector térmico de cuarzo H) Filtro de interferencia
 I) Fotomultiplicador J) Señal de medida
 K) Suministro de voltaje

Figura V.5 **Detector fotométrico de llama (FPD)**

La emisión se monitoriza mediante un fotomultiplicador a través de un filtro adecuado, haciendo el detector selectivo al azufre, al fósforo o a otros elementos como los halógenos y el nitrógeno. Esto lo hace altamente selectivo, es muy sensible (10^{-11} g) y relativamente simple pero su respuesta es altamente no lineal. Se suele usar en

cromatografía de gases y en analizadores de azufre.

V.2.5 DETECTOR ULTRASÓNICO

El principio en que se fundamenta el funcionamiento del detector ultrasónico (Figura V.6) es el hecho de que la velocidad del sonido en un gas es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular. De aquí que midiendo la velocidad del sonido en una mezcla binaria de gases se puede conocer su composición.

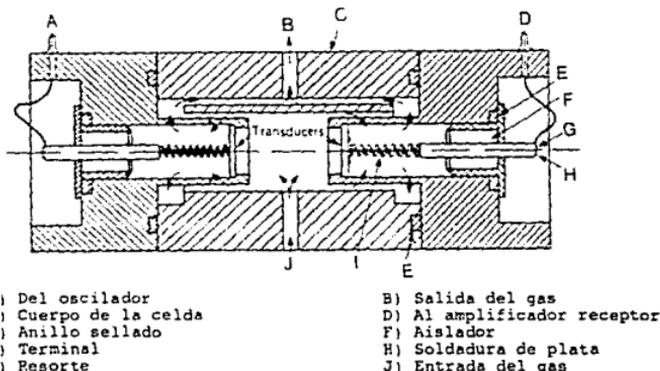


Figura V.6 Detector ultrasónico

Dos transductores de cristal de cuarzo situados en los extremos del tubo de análisis operan, uno como transmisor y el otro como receptor. Cuando está presente la mezcla binaria de muestra se produce un desfase de la señal del sonido que al compararse con una señal de referencia permite determinar la variación en la velocidad del sonido.

El detector ultrasónico se emplea a menudo en cromatografía de gases ofreciendo una sensibilidad de 10^{-9} a 10^{-10} g, su respuesta es universal y la señal de salida es proporcional a la diferencia de pesos moleculares de los gases que forman la mezcla binaria. Sin embargo, se requiere un estricto control de la temperatura y el circuito eléctrico es complejo. Puede usarse como alternativa a los métodos de llama.

V.2.6 DETECTOR CATALÍTICO (PELLISTOR)

En el detector catalítico de gases se produce una oxidación catalítica del gas de muestra sobre una superficie sólida (catalizador), dando como productos CO_2 y vapor de agua. El catalizador está incorporado a un sensor de estado sólido con un

calentador eléctrico y un control de temperatura. Al hacer pasar el gas de muestra se oxidarán los gases inflamables dando lugar a una liberación de energía que aumentará la temperatura registrada por el sensor. Las variaciones de temperatura medidas dan un registro continuo de la concentración de la muestra.

El platino, el paladio y, en general, los metales del grupo 8 del sistema periódico son los más adecuados como catalizadores para la oxidación de moléculas que contengan enlaces C-H como el metano y otras sustancias orgánicas. El sensor de temperatura suele ser un termómetro de resistencia de platino.

La sensibilidad y selectividad del detector dependen del tipo de catalizador y de la temperatura de funcionamiento.

V.2.7 DETECTOR SEMICONDUCTOR

El principio de funcionamiento de un detector semiconductor está basado en el hecho de que cuando un semiconductor, de óxido metálico, adsorbe una molécula gaseosa, se forma un enlace entre la molécula gaseosa y el semiconductor cambiando así su conductividad eléctrica. Puede obtenerse la concentración de un gas que rodea a un semiconductor refiriendo los cambios en su conductividad al número de moléculas de gas que han sido adsorbidas.

En la Figura V.7 se muestra un detector semiconductor típico. El semiconductor se encuentra situado entre dos cables de platino que circulan a través de él. Uno de los hilos de platino se utiliza como calentador semiconductor de tal manera que el proceso de adsorción sea reversible. Midiendo la resistencia entre los dos cables de platino se obtiene la variación de la resistencia del semiconductor.

El principal defecto de este detector es su falta de selectividad. Se usa para la detección de gases inflamables.

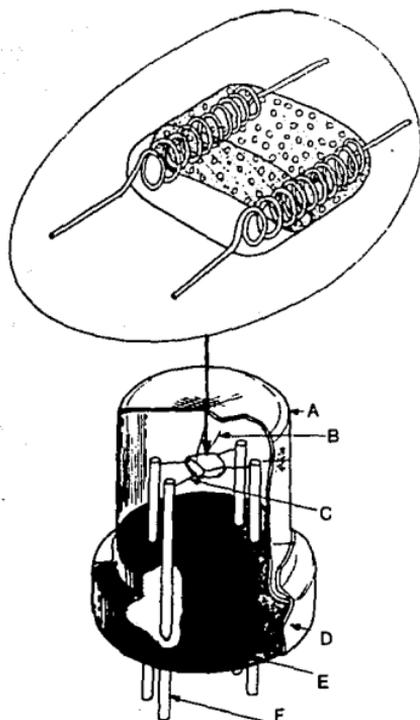
V.3 APLICACIONES DE LOS DETECTORES DE GASES

Las propiedades y aplicaciones de los detectores de gases más comúnmente usados se resumen en la Tabla V.1

DETECTOR	APLICACIÓN	SELECTIVIDAD	GAS TRANSPORTADOR	LÍMITE INFERIOR DE DETECCIÓN (g)	RANGO LINEAL	APLICACIONES TÍPICAS
Conductividad térmica	Universal	No selectivo	He, H ₂	10 ⁶ a 10 ⁷	10 ⁴	Análisis de mezclas binarias y pseudobinarias; cromatografía de gases
Ionización de flama	Compuestos orgánicos	No selectivo	N ₂	10 ⁻¹¹	10 ⁶	Cromatografía; analizadores de hidrocarburos
Foto-ionización	Compuestos orgánicos excepto hidrocarburos de bajo peso molecular	Limitada	N ₂	10 ⁻¹¹ a 10 ⁻¹²	10 ⁷	Cromatografía de gases
Captura de electrones	Compuestos alogenados y oxigenados	Altamente dependiente del compuesto	Ar, N ₂ N ₂ + 10% CH ₄	10 ⁻¹² a 10 ⁻¹³	10 ³	Cromatografía de gases, detectores de trazas de gas, detectores de explosivos
Foto métrico de flama	Compuestos de azufre y fósforo	Selectivo a compuestos de S y P	N ₂ , H ₂	10 ⁻¹¹	5 x 10 ² (S) 10 ³ (P)	Cromatografía de gases, analizadores de azufre
Detector ultrasónico	Universal	No selectivo, principalmente a pesos moleculares bajos	H ₂ , He, Ar, N ₂ , CO ₂	10 ⁻⁸ a 10 ⁻¹⁰	10 ⁶	Cromatografía de gases
Catalítico (Pellistor)	Gases inflamables	Selectivo a gases inflamables	Aire	*		Detectores de gases inflamables
Semiconductor	Gases inflamables, otros gases	Limitada	Aire	*		Detectores de gases inflamables de bajo costo

* El comportamiento de estos detectores depende del diseño y la aplicación individuales

Tabla V.1 Aplicaciones más comunes de los detectores de gases



A) Malla 100 de acero inoxidable 18-8 (doble)
 C) Alambre de platino
 E) FRP moldeado

B) Sensor
 D) Bronce niquelado
 F) Cobre níquel

Figura V.7 **Detector semiconductor**

La medida de la concentración de los diferentes componentes contaminantes presentes en las emisiones de escape de los motores se hace con analizadores capaces, por un lado, de detectar pequeñas cantidades y, por otro, de evitar interferencias con otros gases que puedan estar presentes. Existen analizadores específicos homologados por los organismos competentes en materia de contaminación.

En esta sección detallaremos algunos de los tipos de analizadores más comúnmente empleados.

V.3.1 MEDIDA DE CO₂ Y CO

El CO₂ es un gas que absorbe radiación en la zona infrarroja del espectro. Esto hace que la medida de este compuesto sea, casi exclusivamente, realizada con un analizador no dispersivo en el infrarrojo (NDIR). Al hacer incidir un rayo de luz infrarroja sobre una muestra de CO₂ gaseoso, la intensidad del rayo se verá atenuada; el grado de atenuación dependerá de la cantidad de CO₂ presente en el camino del rayo.

La Figura V.8 es un diagrama esquemático del analizador NDIR el cual consta de cuatro elementos: una fuente de infrarrojos, un tubo con el gas de referencia, un tubo de análisis y un detector con un sistema electrónico de medida.

La fuente de infrarrojo es un filamento de alta resistencia calentado eléctricamente. La radiación infrarroja así producida se hace pasar intermitentemente pero de forma simultánea cada uno de los tubos mediante un obturador circular giratorio. El gas de referencia debe ser un gas que no presente absorción en el infrarrojo (por ejemplo, aire seco exento de CO₂). El tubo de análisis contiene la muestra de los gases de escape cuyo contenido de CO₂ se desea analizar.

La muestra puede tener componentes, como el N₂ o el CO, que presentan absorción en el infrarrojo y cuya presencia puede causar interferencia en las medidas. Para evitar esto, el sistema tiene un filtro que debe llenarse con aquellos componentes que no queremos que interfieran en las medidas.

Además de estos componentes, las emisiones de los gases de escape contienen vapor de agua, el cual absorbe radiación en la zona del infrarrojo. Por tanto, con el objeto de no tener interferencia en la medida del CO₂, la muestra debe secarse antes de pasarla al NDIR. El secado puede hacerse usando cualquier agente deshumidificante con el sílica gel o el perclorato de magnesio. Generalmente la columna de secado se encuentra integrada al sistema analizador.

El detector tipo Luft, probablemente el más utilizado, consta de dos cámaras separadas por una membrana metálica delgada que se mueve debido a la diferencia de presiones existentes entre las cámaras. Este movimiento de la membrana se detecta capacitativamente.

Ambas cámaras del detector contienen el gas a analizar, en este caso CO₂. La radiación que llega a cada una de ellas es absorbida por el CO₂ aumentando su temperatura y, dado que el volumen es constante, su presión aumenta (proporcionalmente al aumento de la temperatura). Este aumento de presión es distinto en ambas cámaras ya que la radiación que recibe cada una es diferente. La cámara de referencia recibe toda la radiación mientras que la otra la recibe atenuada por haber pasado a través del gas de muestra. La diferencia de presiones

depende, pues, de la cantidad de CO₂ presente en la muestra.

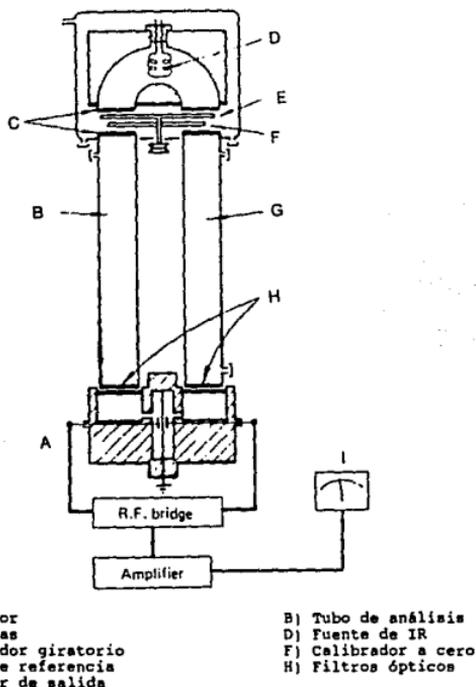


Figura V.8 Esquema de un analizador NDIR

Otro tipo de detectores tienen las dos cámaras (una llamada de absorción y la otra de compensación) unidas mediante un tubo que permite el paso de gas de la cámara caliente a la fría. La diferencia de presiones se obtiene midiendo el flujo de gas.

Generalmente estos instrumentos se calibran haciendo pasar, por el tubo de análisis, mezclas de concentraciones conocidas del gas a analizar y aire y registrando para cada concentración la lectura que ofrece el detector.

-Medida del CO

El CO se suele medir utilizando el mismo analizador NDIR, sólo

que ahora el filtro debe llenarse con los compuestos, diferentes al CO, que pueden causar interferencia y las cámaras del detector contendrán CO.

En la Tabla V.2 se dan las máximas sensibilidades aproximadas que se obtienen para distintos gases usando este analizador.

Gas	Concentración mínima a escala completa (% en vol)	Gas	Concentración mínima a escala completa (% en vol)
CO	0.05	NO ₂	0.1
CO ₂	0.01	SO ₂	0.02
H ₂ O	0.1	HCN	0.1
CH ₄	0.05	Acetona	0.25
C ₂ H ₄	0.1	Benzeno	0.25
N ₂ O	0.01		

Tabla V.2 Sensibilidades típicas de un NDIR

V.3.2 MEDIDA DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

Para medir el óxido nítrico (NO), puede utilizarse la técnica NDIR sólo que, en este caso, para evitar interferencia, las celdas del filtro deben llenarse con CO y CO₂, y las cámaras del detector deben contener NO. También como en el caso de la determinación de CO, deberá secarse la muestra con el objeto de eliminar el vapor de agua y evitar, de esta manera, interferencias.

También se puede usar un analizador de quimioluminiscencia (CLA) que tiene la ventaja de poder medir, además del óxido nítrico, el dióxido de nitrógeno. (Figura V.9).

Para medir el óxido nítrico la muestra se hace pasar por una cámara de reacción en donde hay ozono que se genera a partir del aire atmosférico con radiación UV, según la reacción:



Al pasar por la cámara de reacción, el óxido nítrico se combina con el ozono produciendo dióxido de nitrógeno excitado:



Las moléculas de NO, excitado vuelven a su estado base emitiendo

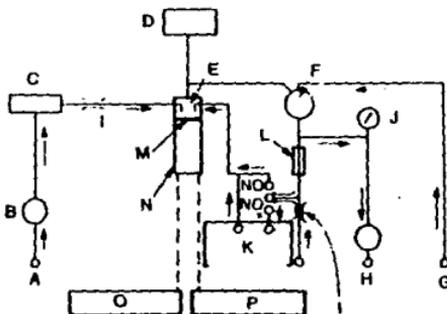
fotones con longitudes de onda comprendidas entre 590 y 2600 nm:



Estos fotones son detectados y amplificados dentro de la cámara por un filtro y un fotomultiplicador cuya lectura es proporcional a la concentración del óxido nítrico. Interferencia debida a los diferentes niveles de oxígeno presentes en la muestra.

Al quemarse el hidrocarburo sobre la llama produce iones que, con un campo eléctrico externo presente, causan una corriente eléctrica proporcional al número de átomos de carbono presentes en el hidrocarburo. Esta corriente de ionización es amplificada y medida. La calibración del analizador se hace con un gas hidrocarburo conocido, generalmente se usa el propano.

Los resultados referentes al carbono presente en la muestra se presentan, generalmente en partes por millón (ppm), lo cual da una medida verdadera de la cantidad de hidrocarburos presentes.



- | | |
|--|-----------------------------|
| A) Oxígeno o aire seco | B) Regulador |
| C) Generador de ozono | D) Bomba de vacío |
| E) Cámara de reacción | F) Regulador de la muestra |
| G) Aire | H) Salida |
| I) Capilares | J) Calibrador de la muestra |
| K) Convertidor $\text{NO}_2\text{-NO}$ | L) Medidor de flujo |
| M) Filtro óptico | N) Fotomultiplicador |
| O) Amplificador | P) Alto voltaje |

Figura V.9 Esquema de un analizador de quimioluminiscencia

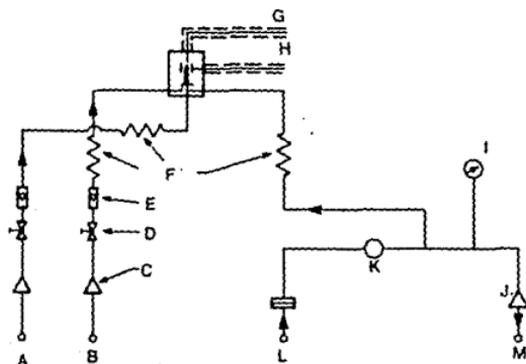
Para medir el dióxido de nitrógeno, los gases de escape antes de pasar por la cámara de reacción lo hacen por una cámara de reacción

donde, térmica o catalíticamente, el NO_2 se reduce a NO y se sigue el proceso descrito anteriormente. La medida total de NO será la correspondiente al NO y más la del NO_2 , conocida como medida de óxidos de nitrógeno (NO_x). Por consiguiente, la concentración de NO , se obtiene restando el NO_2 al total de NO_x .

V.3.3 MEDIDA DE HIDROCARBUROS

Para la medida de los hidrocarburos en los gases de escape nunca se emplea el sistema NDIR ya que aunque presentan absorciones en el infrarrojo, éstas son muy dispares.

Los sistemas de medida más comúnmente usados son los detectores de ionización de llama caliente (HFID). El HFID presenta como diferencia con el FID el hecho de que las líneas del sistema se mantienen a alta temperatura. El HFID se usa especialmente en la medida de los hidrocarburos presentes en las emisiones de motores encendidos por compresión ya que los combustibles usados en estos motores son de peso molecular bastante elevado y tienen, por tanto, altos puntos de ebullición; manteniendo todas las partes del sistema



- | | |
|-----------------------------|---------------------|
| A) Gas combustible | B) Aire |
| C) Regulador | D) Válvula de aguja |
| E) Medidor de flujo | F) Capilares |
| G) Alto voltaje | H) Señal de salida |
| I) Calibrador de la muestra | J) Regulador |
| K) Bomba | L) Muestra |
| M) Salida | |

Figura V.10 Esquema de un detector de ionización de llama (FID) para la medida de HC no quemados

que están en contacto con la muestra a una temperatura cercana a los 200 C se evita que haya condensación de la misma, lo cual causaría imprecisiones en la medida.

En la Figura V.10 se ilustra un analizador de ionización de llama.

El gas de muestra pasa al detector a través de un capilar que controla el flujo y se dirige sobre una llama de hidrógeno o una mezcla de hidrógeno y helio o hidrógeno y nitrógeno en aire. Se prefiere el uso de las mezclas pues sufren menos efectos de

V.3.4 CARACTERIZACION DE LAS EMISIONES

La medida que hacen los analizadores es la de la concentración molar del componente en estudio en la muestra de los gases del escape. La concentración molar de un componente (Φ_i) se define como el número de kilomoles (n_i) del componente por cada kilomol de muestra de los gases del escape. Si el número de kilomoles de los gases de escape los representamos con n_{es} , la expresión correspondiente a la concentración molar es:

$$\Phi_i = \frac{n_i}{n_{es}}$$

Las concentraciones de los hidrocarburos sin quemar (HC) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) se expresan en ppm y las de CO y CO_2 se expresan en porcentaje (1% = 10^4 ppm).

Recordando que el número de kilomoles es igual a la masa (m) de un gas, dividida por su masa molecular (M), tendremos:

$$\Phi_i = \frac{\frac{m_i}{M_i}}{\frac{m_{es}}{M_{es}}} = m_i = \frac{M_i}{M_{es}} m_{es} \Phi_i \quad (V.1)$$

que es la expresión de la masa total (m_i) de un componente en función de su fracción molar.

Como sabemos el dosado estequiométrico (F_s) es la relación combustible/aire que se requiere para una combustión completa y el dosado relativo (F_r) es la relación combustible/aire dividido entre F_s ; entonces, el dosado es:

$$F = F_r F_s = \frac{m_c}{m_a} \quad (V.2)$$

Por otro lado, la masa de los gases del escape será igual a la masa del combustible (m_c) más la masa de aire (m_a).

$$m_{gs} = m_c + m_a = m_c \left(1 + \frac{m_a}{m_c} \right) \quad (V.3)$$

tomando en cuenta (V.2):

$$m_{gs} = m_c \left(1 + \frac{1}{F} \right) \quad (V.4)$$

sustituyendo en (V.1):

$$m_1 = \frac{M_1}{M_{gs}} m_c \left(1 + \frac{1}{F} \right) \Phi_1$$

Para evaluar la contaminación ambiental producida por un motor, las emisiones se suelen referir a los parámetros característicos de funcionamiento.

a) En función de la potencia efectiva:

$$\frac{m_1}{N_e} = \frac{M_1}{M_{gs}} g_{ef} \left(1 + \frac{1}{F} \right) \Phi_1 \quad \left(\frac{g}{kw h} \right)$$

b) En función del gasto de combustible:

$$\frac{m_1}{m_c} = \frac{M_1}{M_{gs}} \left(1 + \frac{1}{F} \right) \Phi_1 \quad \left(\frac{g}{kg} \right)$$

c) En función de la distancia recorrida por el vehículo:

$$\frac{m_1}{d} = \frac{M_1}{M_{gs}} \frac{m_c}{d} \left(1 + \frac{1}{F} \right) \Phi_1 \quad \left(\frac{g}{km} \right)$$

V.3.5 SISTEMAS DE ANALISIS

En el mercado existen diferentes equipos para el análisis de gases contaminantes. Estos equipos constan de varios analizadores conectados entre sí y con diferentes rangos de medida así como con la capacidad de realizar medidas simultáneas de varios contaminantes.

En la Tabla V.3 se muestran los modelos de las series MEXA 1120 y 1220 de la casa Horiba. Se especifican además, las aplicaciones de

cada equipo, los analizadores que usan y el tipo de motor en que se emplean.

Modelo	Aplicación	Analizador	Motor
MEXA-1120L	Medida de gasolina cruda	NDIR: CO, CO ₂ , NO, HC	ECH
MEXA-1120 EGR	Medida de EGR, sencilla	NDIR: CO ₂	ECH
MEXA-1220 EGR	Medida de EGR, doble	NDIR: CO ₂	ECH
MEXA-1120 CLT-L	Medida de NOx	CLD: NO/NOx	ECH
MEXA-1120 CLT-H	Medida de NOx, calentados	CLD: NO/NOx	ECH/EC
MEXA-1120 CLT-F	Especificaciones federales	CLD: NO/NOx	ECH/EC
MEXA-1120 TFI-L	Medida de HC	FID: HC	ECH
MEXA-1120 TFI-H	Medida de HC calentados	FID: HC	ECH/ED
MEXA-1120 TFI-F	Especificaciones federales	FID: HC	ECH/ED
MEXA-1120 MET	Medida de CH ₄	FID+HC Cutter: CH ₄	ECH
MEXA-1220 MET	Medida de CH (no CH ₄)	FID+HC Cutter: HC	ECH
MEXA-1120 MET-G	Medida de CH ₄ , cromatográfico	FID+GC: CH ₄	

Tabla V.3 Características de los modelos de la serie MEXA 1120/1220

En la Tabla V.4 se tienen las especificaciones del equipo MEXA 1120 L que es capaz de medir las concentraciones de CO, CO₂, NO y HC.

En la Tabla V.5 se dan las especificaciones del equipo MEXA 1300L que es capaz de medir tres de las concentraciones de CO, CO₂, HC o NO simultáneamente.

El equipo MEXA 1300 L utiliza un analizador NDIR por lo que, como se ha visto anteriormente, no es recomendable para medir las concentraciones de HC.

En la práctica, para la medida de los HC, no se utiliza el equipo MEXA 1300 L porque además de utilizar un analizador NDIR, trabaja a bajas temperaturas. Como se ha visto anteriormente, las absorciones que presentan los HC en el infrarrojo son muy dispares y los HC pesados condensan a temperaturas bajas.

La medida de los HC debe hacerse con un sistema que ocupe un analizador FID.

ESPECIFICACIONES

UNIDAD ANALIZADORA

Componentes:	uno de CO, CO ₂ , NO o HC
Principio:	NDIR
Rango:	Sencillo o doble CO: 0 a 100 ppm / 0 a 24% (vol) CO ₂ : 0 a 0.5% (vol) / 0 a 20% (vol) NO: 0 a 200 ppm / 0 a 6000 ppm HC: 0 a 100 ppm / 0 a 1% (vol)
Repetitividad:	Dentro de 1% de la escala completa
Desviación de Cero/span:	±1% / 8 h de la escala completa (fluctuaciones de ±5% de la temperatura ambiente)
Tiempo de respuesta:	Aproximadamente: 1.5s (flujo de la muestra: 5 l / min) Aproximadamente: 3s (en rango bajo)
Temperatura ambiente:	5 a 35 °C
Tiempo de calentamiento:	Aproximadamente 2h

SISTEMA DE MUESTREO

Método:	By-pass
Flujo de la muestra:	3 a 10 l / min
Temperatura de la muestra:	Menos de 60 °C (en la entrada del sistema)
Purgado:	Ajuste normal

CARACTERISTICAS

Dimensiones:	600 mm (ancho) por 700 mm (largo) x 1400 mm (altura)
Peso:	Aproximadamente 250 kg
Fuente de poder:	Línea de C.A., 50/60 Hz, aproximadamente 1.5 KVA

Tabla V.4 Especificaciones del Sistema MEXA 1120 L

ESPECIFICACIONES

UNIDAD ANALIZADORA

Componentes a medir:	CO, CO ₂ , NO o HC
Principio:	NDIR
Rango:	CO: 0 a 100 ppm/0 a 24% CO ₂ : 0 a 0.5%/0 a 20% NO: 0 a 200 ppm/0 a 6000 ppm HC: 0 a 100 ppm/0 a 1%
Repetitividad:	Dentro de 1% de la escala completa
Velocidad de respuesta:	Aproximadamente 1.5 s (flujo de la muestra 5l/min) Aproximadamente 35 (para el tubo de 500 mm)
Desviación de Cero/span:	±1%/8h de la escala completa (sujeto a fluctuaciones de 5 C de la temperatura ambiente)
Temperatura ambiente:	5 a 35 °C
Tiempo de calentamiento:	Aproximadamente 2 h

SISTEMA DE MUESTREO

Método :	By-pass
Flujo de la muestra:	40l/min (máximo)
Temperatura de la muestra:	Menos de 60 °C (a la entrada del sistema)
Purgado:	Variable entre 0 y 30 min a un gasto de 15 a 30l/min
Tiempo muerto	Aproximadamente 2s (gasto de la muestra: 40 l/min. Tubo de muestreo: 5m)
Velocidad de respuesta:	CO, CO ₂ : aproximadamente 3s (gasto de la muestra: 40 l/min) HC, NO: aproximadamente 7s (gasto de la muestra: 40 l/min)

Tabla V.5 Sistema MEXA 1300 L

VI

EXPERIMENTACION

EXPERIMENTACION

En los últimos 15 años, las ciudades han tenido grandes crecimientos en sus poblaciones y por tanto, sus necesidades de transportación deberían ser atendidas paralelamente; en la Ciudad de México se ha visto la necesidad de cubrir diferentes rutas con vehículos de transporte colectivo y con autos de uso particular, esto hace que cada vez se emplee un mayor número de motores de combustión interna y es obligadamente necesario disponer de una tecnología adecuada para emitir el mínimo de contaminantes a la atmósfera por este medio.

Como una parte importante, en el presente trabajo, se presentan los resultados de los ensayos experimentales que se corrieron a fin de conocer la efectividad de un filtro para detener plomo, hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono.

Creemos que la parte experimental complementa los fundamentos teóricos y la exposición de la situación, tanto de los combustibles nacionales como de un motor típico, utilizado en un gran número de vehículos particulares y de servicio público.

El combustible empleado para estos ensayos ha sido la gasolina NOVA PLUS con el aditivo METIL-BUTIL-ETER que se conoce de manera más común como GASOLINA OXIGENADA.

Se ha hecho un análisis por absorción atómica, tanto del elemento filtrante como de la gasolina empleada, para tener resultados más fidedignos en cuanto al balance de plomo.

Estas pruebas se corrieron en un motor VW-1600 enfriado por aire, utilizando un dinamómetro electromagnético para proporcionarle carga al motor y un analizador de gases analógico para determinar los niveles de CO y HC emitidos.

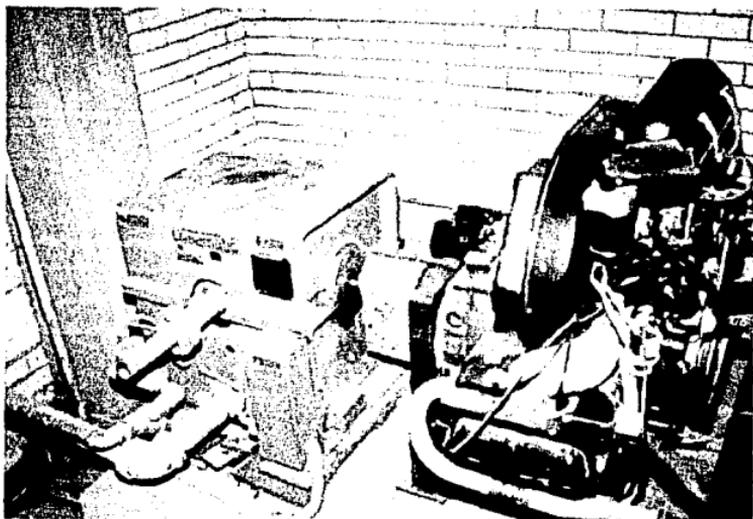
VI.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO

-Motor de Volkswagen, de 4 cilindros en Boxer, de 1600 cc, enfriado por aire y con control de velocidad, acoplado a un dinamómetro electromagnético de 75 HP con control de carga (Fotografías VI.1 y VI.2).

-Analizador de Gases de Escape Sun Electric, analógico. Para la determinación de CO los rangos son de 0 a 5% y de 0 a 10%, con una resolución de 0.1%. Los rangos, para la determinación de los HC son de 0 a 1000 ppm y de 0 a 2000 ppm con una resolución de 0.5 ppm. Este analizador está conectado al sistema de tal manera que, mediante una sonda, pueda medir las emisiones antes y después del filtro.

El gas de calibración utilizado para el equipo fue el aire del

ambiente, de tal forma que, los valores leídos de CO y HC son relativos a los niveles de CO y HC existentes en la atmósfera circundante.



Fotografía VI.1 Dinamómetro acoplado con el motor



Fotografía VI.2 Control de la velocidad del motor

-Lámpara estroboscópica con medidor de avance de la chispa.

-Tacómetro para determinar la velocidad (en rpm) del motor.

-Manómetro diferencial construido con manguera de plástico transparente y tubo Pyrex conectado al tubo de escape para conocer la caída de presión en el filtro (Figura VI.1). El fluido manométrico usado fue agua.

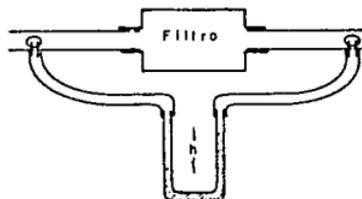


Figura VI.1 Colocación del manómetro diferencial en el ducto de salida de los gases de escape

VI.2 OBJETIVOS

Los objetivos de este experimento son:

-Determinar la cantidad de plomo que el filtro retiene impidiendo así su descarga en la atmósfera y

-Medir la disminución obtenida en las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono por la acción del filtro.

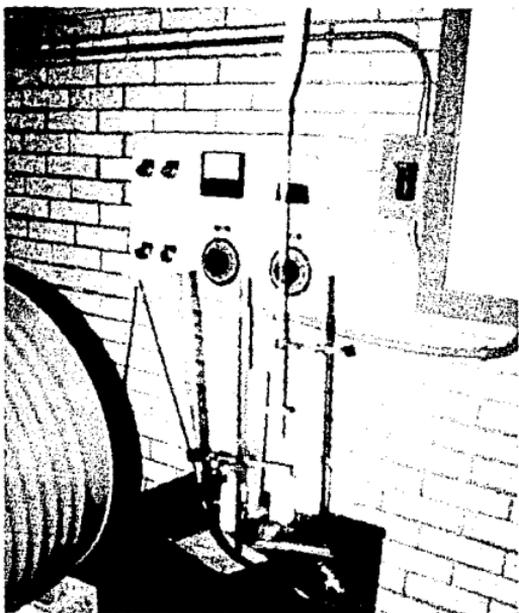
VI.3 DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO

Para llevar a cabo estas pruebas, se seleccionaron diferentes estados de operación (definidos por la velocidad del motor y la carga a la que fue sometido) en los cuales el motor trabajaba mejor. Las velocidades elegidas fueron: 1000, 1400, 1800 y 2000 rpm y las cargas fueron del 20, 30 y 40% de la capacidad del dinamómetro (15, 22.5 y 30 HP). Esto da un número de 12 combinaciones posibles.

Las lecturas de HC y CO se hicieron durante un tiempo de 15 minutos. Tiempo que se consideró adecuado para evitar las fluctuaciones en las medidas debidas a los cambios de carga y/o velocidad. Durante este tiempo se registraban tanto las lecturas del analizador como el consumo de combustible y la caída de presión en el filtro.

Para medir el consumo de combustible se introdujo una manguera de

suministro (la que va del tanque a la bomba de gasolina) en una probeta graduada, tomando el tiempo en que se consumían 20 ml de dicho combustible para cada una de las combinaciones velocidad-carga. (Fotografía VI.3).



Fotografía VI.3 Probeta graduada y control de carga

Medir la caída de presión en el filtro tiene por objeto saber si el elemento filtrante (que en este caso es lana mineral) es perforado por los gases de escape; en el momento en que ésto suceda, se considera que termina la vida útil del filtro.

En la medida de las emisiones de HC y CO se tomó en cuenta que la altura de la Ciudad de México es, en promedio, de 2200 m sobre el nivel del mar, lo que hace que haya menos oxígeno y, por tanto, disminuye la eficiencia del motor. Por esta razón, las medidas se hicieron en 7.5 de avance a P.M.S. para obtener la velocidad y el % de CO en ralenti de las especificaciones de fábrica y, así, iniciar las pruebas.

Las emisiones de plomo, en cambio, son independientes del estado de operación del motor ya que, todo el plomo contenido en la gasolina tendrá que, una vez quedada ésta, salir a la atmósfera, independientemente de la velocidad y/o la carga. (Se sabe que una mínima parte del plomo se puede integrar al material del pistón o del cilindro.

Al terminar las pruebas, se sometió al elemento filtrante a un análisis por absorción atómica para determinar la cantidad de plomo que había quedado en él y al mismo tiempo, se hizo el análisis de la gasolina empleada, para determinar la cantidad de plomo por litro que ésta contenía (Ambos análisis fueron practicados por el Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM). Así, fue posible determinar cuantos gramos de plomo quedaron en el filtro, cuantos salieron a la atmósfera y cuantos tenía en total el combustible

Antes de la presentación de resultados, es conveniente aclarar porque sólo en algunos estados de operación (RPM y carga) se midieron el gasto y la caída de presión.

Como ya se explicó anteriormente, la caída de presión era útil sólo para saber si el filtro no había sido perforado, amén de que también podría ser una información útil para saber si la colocación del filtro afectaba el funcionamiento del motor. (Figura IV.2).

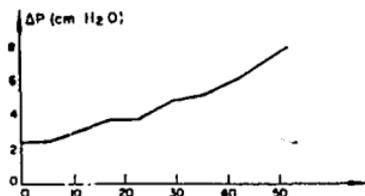


Figura VI.2 Caída de presión durante el tiempo de operación

Respecto al consumo de combustible, se midió 3 veces en cada una las 12 posibles combinaciones y como no se encontraron diferencias significativas, se consideró un gasto promedio para cada estado de operación, así que, conociendo únicamente el tiempo que duraba operando el motor con cierta carga y a cierta velocidad, se podría saber cuantos litros consumía.

VI.3 RESULTADOS

La forma más conveniente de presentar los resultados obtenidos de las emisiones de CO y HC es mediante gráficas que son de fácil interpretación y contemplan una buena cantidad de información.

Al aplicar una cierta carga al motor, se midieron los valores de CO y HC que salían por el tubo de escape a diferentes velocidades de operación. Dichos valores se obtuvieron midiendo el HC y el CO, antes del filtro y después de él, y se presentan en gráficos de barras. (Figuras VI.3 a VI.8)

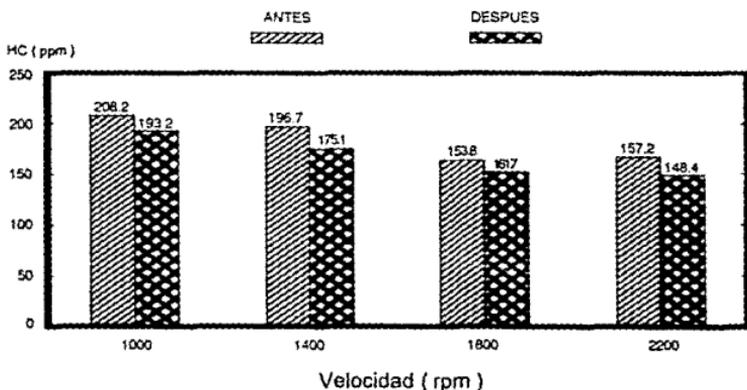


Figura VI.3 Emisión de HC en ppm. Potencia = 15 HP

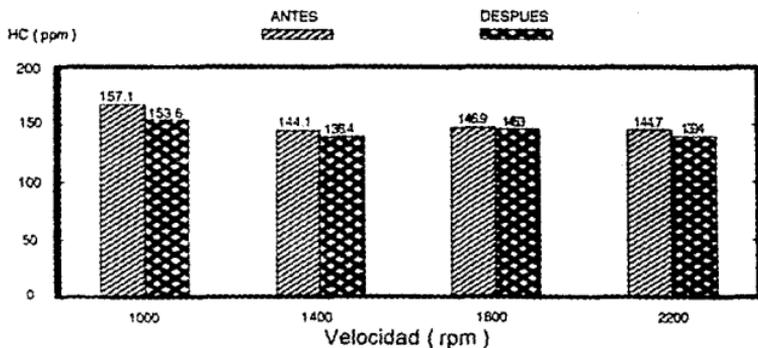


Figura VI.4 Emisión de HC en ppm. Potencia = 22.5 HP

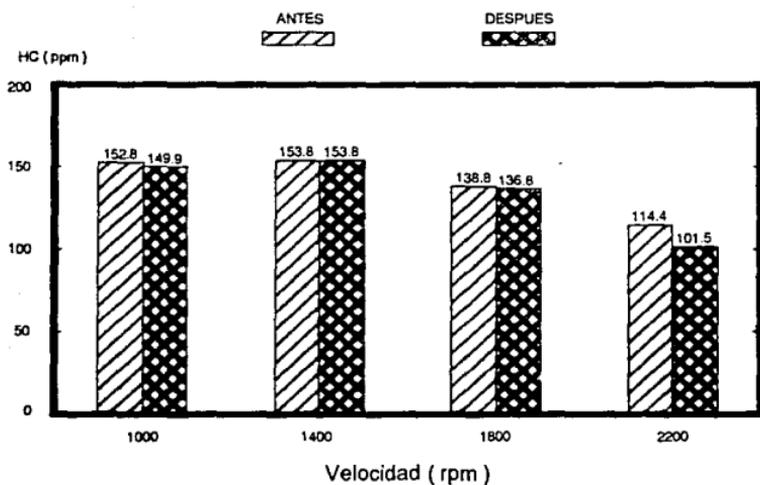


Figura VI.5 Emisión de HC en ppm. Potencia = 30 HP

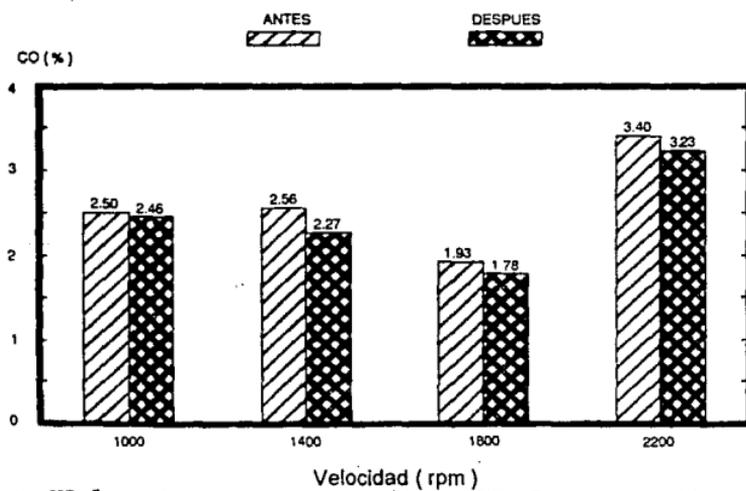


Figura VI.6 Porcentaje de emisión de CO. Potencia = 15 HP

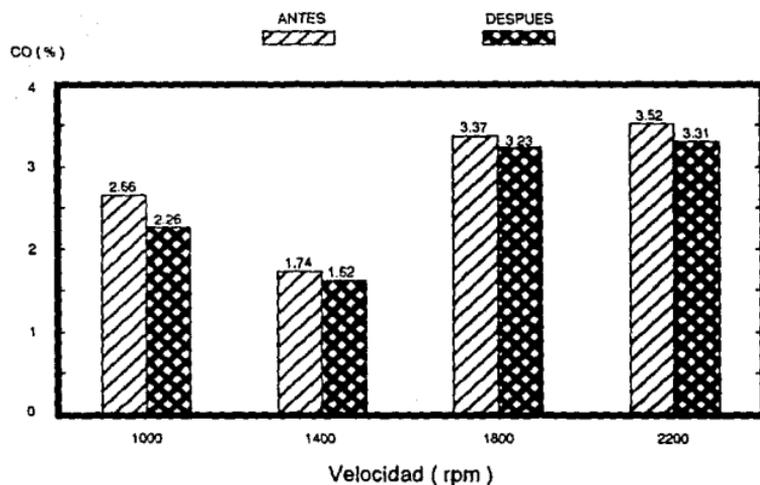


Figura VI.7 Porcentaje de emisión de CO. Potencia = 22.5 HP

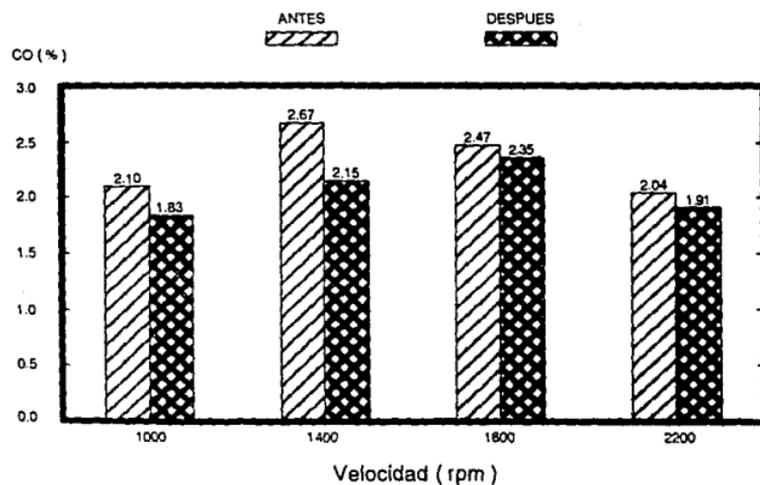


Figura VI.8 Porcentaje de emisión de CO. Potencia = 30 HP

Para interpretar mejor los resultados obtenidos, las gráficas de barras fueron condensadas en las gráficas correspondientes a las Figuras VI.9 y VI.10.

La Figura VI.9 da información de los hidrocarburos no quemados en el motor que han sido atrapados por el filtro; el eje de las ordenadas indica la diferencia del nivel de HC medido antes y después del filtro, el eje de las abscisas corresponde a la velocidad del motor y finalmente las curvas corresponden a un valor constante de carga aplicada.

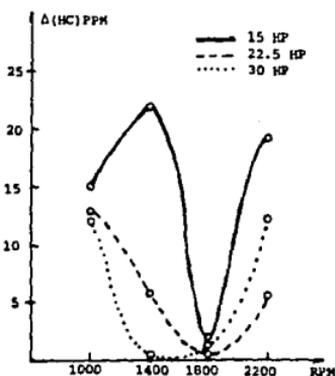


Figura VI.9 Captación de hidrocarburos no quemados (HC)

La construcción de la gráfica para CO (Figura VI.10) es análoga a la gráfica de HC salvo que, para esta última, las lecturas están en % y en la anterior en PPM.

En lo que se refiere al plomo detenido por el filtro, los resultados obtenidos de los análisis por absorción atómica son los siguientes:

-Del combustible:

contenido de plomo = 1.3375 g/l

Dado que la cantidad de combustible utilizado en las pruebas fue de 109.24 l, el total de plomo contenido en el combustible es:

cantidad de plomo = 1.3375 g/l (109.24 l) = 146.11 g

-Del filtro:

Porcentaje de plomo en el filtro = 3.994%

El peso del filtro es de 276.7 g. Por lo tanto, el peso de plomo atrapado por el filtro es: $276.7 \times 0.03994 = 11.05 \text{ g}$

De las cantidades anteriores, se pueden expresar los siguientes porcentajes:

Plomo detenido por el filtro = 7.56%

Plomo emitido a la atmósfera = 92.44%

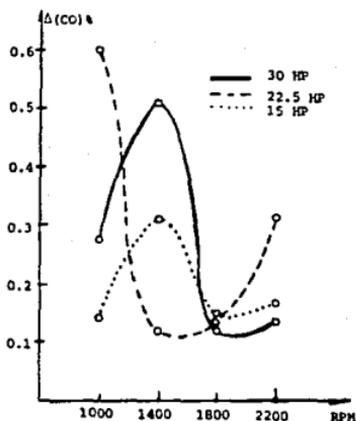


Figura VI.10 Captación del monóxido de carbono (CO)

VI.4 CONCLUSIONES DEL EXPERIMENTO

De acuerdo con los resultados de los análisis químicos practicados tanto al elemento filtrante como al combustible empleado, la cantidad de plomo detenido por el filtro no es significativa.

Las disminuciones obtenidas en las emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC), por efecto del filtro, no son sustanciales. Sin embargo, en ciertas condiciones de operación, se consiguió una reducción de 22.6 PPM en HC y de 0.58% en CO.

La caída de presión a través del filtro no representa pérdidas de potencia en el motor (3 pulgadas de H₂O como máximo).

La gasolina que fue utilizada en el experimento debería salir inmediatamente del mercado por el contenido tan alto de plomo que

tiene.

Independientemente de la carga aplicada, la velocidad de operación más crítica para el filtrado de CO y HC es 1800 RPM.

A menor carga la acción del filtro mejora en lo que se refiere a los hidrocarburos, en cambio para el monóxido de carbono existe un mayor efecto a mayores cargas y menores velocidades.

Deberá utilizarse un dispositivo que logre resultados más sustanciales que éste o bien, una combinación de dispositivos que logren efectos significativamente más altos.

[REDACTED]

CONCLUSIONES

[REDACTED]

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos expuesto cuales son las emisiones contaminantes de los motores encendidos por chispa (MECH), su proceso de formación en los sistemas vehiculares, las fuentes de emisión, los métodos para su control y los sistemas empleados para su medición. Antes de llegar a establecer algunas conclusiones, consideremos:

- que las emisiones contaminantes de los MECH son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los hidrocarburos no quemados (HC), las partículas sólidas (humos), los aldehídos, los óxidos de azufre (SO_x) y el plomo (Pb). En la Ciudad de México se arrojan a la atmósfera alrededor de 5 millones de toneladas anuales de emisiones contaminantes, de las cuales aproximadamente, el 80 % es producida por los vehículos automotores⁽¹⁾

- que el 40%, aproximadamente, de hidrocarburos no quemados provienen de la evaporación de la gasolina en el tanque de combustible, en el carburador y en la ventilación del cárter. Otras fuentes de emisiones de HC son las fugas en válvulas, ductos y tanques de almacenamiento tanto en las estaciones de servicio como en el transporte de la gasolina.

- que el resto de HC emitidos por los vehículos así como los totales de CO, NO_x, SO_x, humos y aldehídos son productos de la combustión y, con el plomo contenido en la gasolina, son emitidos a la atmósfera por el escape del vehículo.

- que el smog fotoquímico (el ozono principalmente) es producto de reacciones entre la energía solar y los HC con los NO_x.

- que la gasolina que consumen los vehículos automotores (con excepción de los nuevos modelos 1991) contiene tetraetilo de plomo como elevador de número de octano (0.64 ml/galón).

- que la situación geográfica de la Ciudad de México contribuye a la formación de smog. Por un lado, cuanto más cerca se está del Ecuador es mayor el potencial energético de la radiación solar que se recibe y, por tanto, se favorece la formación de ozono. El ozono se ha convertido en un problema grave de contaminación atmosférica: en 1987, la estación de monitoreo del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM registró 740 horas arriba de la norma de calidad del aire (0.11 ppm, promedio horario máximo), cifra que se incrementó en 1988 a 959 violaciones (horas) y a 1224 en 1989.

1

Por otro lado, debido a su altitud, el contenido de oxígeno en el aire es bajo (212 g/m³ por 275 g/m³ al nivel del mar) lo cual provoca

(1) La contaminación del aire en México. Bravo H. Universo Veintiuno. 1987.

deficiencias en los procesos de combustión de los motores y, por consiguiente, un alto nivel de emisiones contaminantes. La eficiencia de combustión de un vehículo bien afinado es de 92% y, en el D.F. de 69%.

La Ciudad de México está situada en un valle rodeado de montañas de tal manera que la difusión de contaminantes en la atmósfera es mínima ya que hay muy poca circulación de aire. Los vientos, durante casi 7 meses al año son de baja velocidad (menos de 1.5 m/s) y actúan como una escoba que dispersa los contaminantes hacia el centro, el sureste y el suroeste de la ciudad.

- que se ha incrementado el uso del automóvil, como transporte individual, con sus consecuentes repercusiones en el aumento de la contaminación ambiental. En efecto, de los 2'549,581 vehículos registrados en el Padrón Vehicular de la Ciudad de México, hasta el 5 de noviembre de 1991, 7,299 son camiones de la Ruta 100 y 101,451 son taxis y microbuses⁽¹⁾ (0.3 % y 4.0 % del total, respectivamente); el resto, más del 95 %, son automóviles que solo transportan el 19 % de los viajes-persona-día, ocupan el 70 % de la vialidad y consumen 15 veces más combustible por persona que el sistema colectivo y causan gestionamientos.

CONCLUSIONES

1. En los vehículos deben hacerse las siguientes modificaciones:

- Instalar una trampa de carbón para que atrape las emisiones provenientes de la evaporación de la gasolina tanto en el tanque de combustible como en el carburador y una válvula de no retorno para los vapores que provienen del cárter. Estas son modificaciones muy efectivas y resultan relativamente baratas.

- Instalar obligatoriamente catalizadores en los escapes de todos los automóviles que puedan utilizar gasolina sin plomo. Es una modificación costosa pero muy efectiva en la reducción de emisiones contaminantes ya que el catalizador completa la reacción de los productos de la combustión.

2. Respecto a los combustibles:

- Cambiar la formulación de la gasolina, reduciendo al mínimo el contenido de tetraetilo de plomo, para los vehículos particulares de producciones anteriores a 1991, vigilando la calidad del aire con interés particular en el ozono y sus precursores.

- Para las zonas más contaminadas, hacer una formulación especial que contemple la disminución del tetraetilo de plomo y de los oleofinicos (que son los hidrocarburos que más contaminan), el

(1) S.P.V. Dirección General de Autotransporte Urbano. 1991.

aumento de parafínicos y el uso de una mezcla de alcohol con un mínimo de aromáticos. Con esta formulación especial se obtendría por una parte un octanaje más alto y, por la otra, serían reducidos los componentes de los hidrocarburos que más contaminan.

- Consolidar una tecnología nacional que nos permita, a futuro, producir la gasolina sin plomo, sin tener que importarla como hasta ahora se hace.

- Aumentar el número de refinerías para abastecer la demanda actual y garantizar el abastecimiento para las nuevas producciones de vehículos. En 1990 la población vehicular particular se incrementó en un 17.5 % y para 1991 se espera un 18.5 % al menos.⁽¹⁾

3. Es necesario desarrollar e implementar un plan que fomente el uso de la transportación colectiva que haga eficiente y suficiente la transportación masiva desalentando el uso del automóvil particular y, al mismo tiempo, incrementar el número de líneas del metro, los trolebuses, tranvías y tren ligero sobre el de microbuses, combis y camiones de la Ruta 100 que, a pesar de la obligación de usar dispositivos anticontaminantes, son fuentes de contaminación.

4. Para evitar al máximo los congestionamientos viales es necesario capacitar y concientizar a los conductores y, al mismo tiempo, reglamentar el funcionamiento y operación del sistema de transporte colectivo automotor. Algunas medidas que deberá contemplar este reglamento son:

- Establecer paradas fijas para los microbuses y las combis.

- Fijar horarios de salida, de las bases de los transportes colectivos, adecuados para satisfacer la demanda de servicio durante las diferentes horas del día, de acuerdo con estudios estadísticos de la misma.

- Hacer obligatorio el uso de transporte escolar para las escuelas particulares.

- Fijar y hacer cumplir límites de velocidad adecuados a la vialidad en las diferentes calles de la ciudad.

- En las ciudades más contaminadas establecer un programa de inspección y mantenimiento continuo de los vehículos ya que, por ejemplo, un automóvil mal afinado que tuviera una relación aire/combustible de 12.5 produciría emisiones de CO hasta un 460 % mayores y un 100 % más en emisiones de hidrocarburos que las que tendría con una mezcla estequiométrica. Inclusive un auto equipado con catalizador debe ser verificado por lo menos dos veces al año ya que un mal funcionamiento del motor (fallas en las bujías o gasto prematuro de los filtros de aceite, aire o gasolina) provocaría el

(1) S.P.V. Dirección General de Autotransporte Urbano. 1991.

envenenamiento inmediato del catalizador.

5. Implementar una campaña publicitaria a nivel nacional y por todos los medios de comunicación con, sobre todo, información veraz y comprensible para el público en general del estado de la contaminación, así como las causas de la misma y de las consecuencias que puede traer sobre las condiciones de vida de todos los habitantes de este país en general y de cada una de las ciudades en particular. De esta manera despertar la conciencia ciudadana acerca de la gravedad del problema, de su responsabilidad en el estado actual del ambiente y de las acciones que cada uno puede llevar a cabo para abatir este problema.

Sobre todo, es necesario que la reglamentación propuesta y la ya existente al respecto se aplique con todo el rigor que la magnitud del problema requiere y no con la flexibilidad que hasta ahora ha sido característica. Solo si la voluntad política para ejercer las medidas conducentes se fortalece frente a los intereses de las fuentes contaminantes y la conciencia ciudadana asume su responsabilidad y cumple con el papel que le corresponde en la solución de este problema y, al mismo tiempo, exige el cumplimiento del compromiso que, como tal, le corresponde al gobierno, vislumbraremos una perspectiva de mejor calidad de vida para todos los habitantes de las ciudades más contaminadas de nuestro país.

BIBLIOGRAFIA

- Asociación de Técnicos y Profesionistas en Aplicación Energética A.C. IX SEMINARIO NACIONAL SOBRE EL USO RACIONAL DE LA ENERGIA; Memoria. CINCUENTA ANIVERSARIO. PEMEX. Ed. ATPAE, 1988.
- Baumeister III T. Avallone E.A. Baumeister T. MARKS, MANUAL DEL INGENIERO MECANICO. 8a. Edición. Ed. Mc. Graw Hill, 1982.
- Bravo A.H. LA CONTAMINACION DEL AIRE EN MEXICO. 1a. Edición. Ed. Universo Veintiuno, 1987.
- Bravo A.H. Perrín G.R. Sosa E.R. Torres J. EFECTO DEL CAMBIO EN LA FORMULACION DE LA GASOLINA SOBRE LOS NIVELES EN LA ATMOSFERA DE PLOMO Y OZONO EN LA CIUDAD DE MEXICO, Memoria. V CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL. Querétaro, Qro. 10-13 agosto, 1988.
- Bravo A.H. Perrín G.R. Sosa E.R. Torres J. INCREMENTO DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA POR OZONO EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO. Ingeniería Ambiental, año 1, No 1: 8 - 14, 40. 1988.
- Bravo A.H. Sosa E.R. Torres J.R. OZONO Y LLUVIA ACIDA EN LA CIUDAD DE MEXICO, Ed. Sección de Contaminación Ambiental. C.C.A. Facultad de Ciencias. UNAM.
- Bustani M.E.J. Wang Y. PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL PACIFIC CONFERENCE ON AUTOMOTIVE ENGINEERING. Melbourne, Australia. Ed. SAE, Australasia, 1987.
- Clewell D.H. IMPACT OF AUTOMOTIVE EMISSIONS REGULATION ON GASOLINE DEMAND. Mobil Oil Corp. 1985.
- Giacosa D. MOTORES ENDOTERMICOS. 14a. edición. Ed. Omega S.A. 1988.
- González O.R. Núñez O.F. APUNTES DE PRINCIPIOS DE ENERGETICA. 1a. edición. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Legorreta J. LA GRAVE CONTAMINACION ATMOSFERICA DE LA CIUDAD DE MEXICO. Ciencias, No. 22: 55 - 61. 1991. Facultad de Ciencias. UNAM.
- Obert E.F. INTERNAL COMBUSTION ENGINE. 2a.edición. Ed. International Text Book Co. 1964.

- Obert E.F. MOTORES DE COMBUSTION INTERNA. 10a. impresión.
Ed. Continental S.A. 1978.

- Payri G.F. SOLUCIONES A LA CONTAMINACION DE LOS MOTORES
TERMICOS ALTERNATIVOS DE AUTOMOCION. España, 1987.

- Pedroche S.F. TRANSDUCTORES DE MEDIDA DE EMISIONES
CONTAMINANTES, Apuntes. División de Estudios de Postgrado. Facultad
de Ingeniería. UNAM. 1990.

- Severns W.H. ENERGIA MEDIANTE VAPOR, AIRE O GAS. 5a.
edición. Ed. Reverté S.A. 1972.

- Skowron J.F. Williamson W.B. Summers J.C. EFFECT OF AGING
AND EVALUATION CONDITIONS ON THREE WAY CATALYST PERFORMANCE. Ed. SAE
International. 1989.