

# 1 | Fundamentos de la combustión

## 1.1. Introducción

### 1.1.1. El motor de cuatro tiempos

El motor de combustión interna es un dispositivo capaz de convertir la energía química del combustible en trabajo mecánico [1]. Entre los motores de combustión interna, el motor de cuatro tiempos ha sido el más exitoso debido a su eficiencia, costos de producción y rentabilidad [2]. Por esta razón, nuestro estudio se centrará en este tipo de motor, que es el más común en la industria tanto para el transporte de pasajeros como para el movimiento de bienes e insumos. El motor de encendido provocado (MEP) es accionado por un mecanismo de biela-manivela dentro de un bloque de cilindros. En su interior, un pistón realiza un movimiento alternativo desde el punto muerto superior (PMS) hacia el punto muerto inferior (PMI), impulsado por el cigüeñal.

En la parte baja del bloque motor se encuentra el cárter, encargado de alojar el aceite para la lubricación del sistema. En la parte superior se posiciona la culata, dentro de la cual se encuentra la cámara de combustión y el mecanismo de distribución, encargado de la apertura y cierre de válvulas que permite el ingreso y salida de gases en el motor como se puede ver en la Figura 1.1.

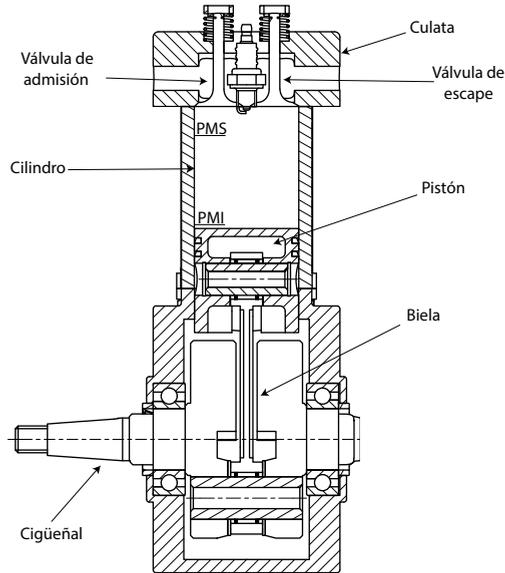


Figura 1.1. Partes de un motor de encendido provocado

### Ciclos de funcionamiento del motor

Como se describió anteriormente, el motor es una máquina capaz de convertir la energía química del combustible y transformarla en trabajo. Para que todo esto pueda suceder, se ingresa al interior del cilindro la mezcla aire-combustible a través de la válvula de admisión actualmente abierta (**ciclo de admisión**) gracias a la succión que genera el pistón en su carrera descendente. Luego de ello, las válvulas permanecen cerradas mientras el pistón inicia su carrera ascendente, comprimiendo la mezcla (**ciclo de compresión**). Cerca del PMS se genera una chispa entre los electrodos de la bujía, encendiendo la mezcla y obligando el desplazamiento del pistón hacia el PMI (**ciclo de trabajo**).

Finalmente, en su última carrera ascendente, el pistón desplaza todos los gases combustionados a través de la válvula de escape que en esta fase se encuentra abierta hacia el exterior (**ciclo de escape**) como se visualiza en la Figura 1.2.

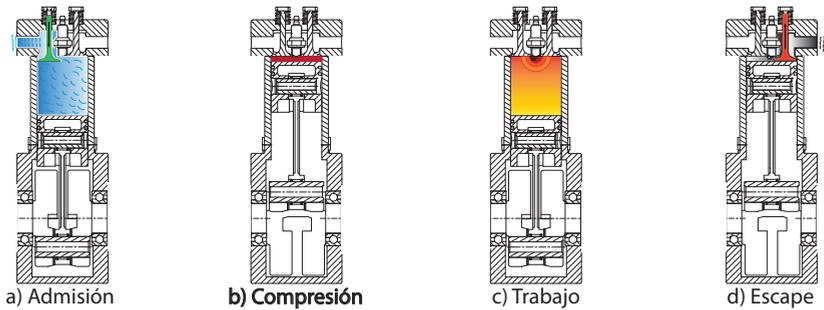


Figura 1.2. Ciclo de funcionamiento del motor de encendido provocado

## 1.2. Propiedades del combustible

Los combustibles producen una reacción con el oxígeno de tipo exotérmica, transformando la energía de su estructura molecular en energía térmica [3]. Estos combustibles pueden encontrarse en estado líquido, gaseoso y sólido. No obstante, combustibles líquidos como el diésel y la gasolina son comunes por su facilidad de almacenamiento y transportación. Los combustibles gaseosos, debido a su arreglo atómico necesitan grandes recipientes para su almacenaje, mientras los sólidos no pueden ser usados en un motor de combustión interna por la rapidez con la que sucede el proceso de combustión.

Los combustibles pueden proceder de fuentes no renovables (origen fósil) y de fuentes renovables (biocombustibles). Los combustibles de origen fósil son obtenidos del petróleo en refinерías mediante un proceso de destilación fraccionada, en donde el crudo es sometido a diferentes etapas de separación física obteniéndose derivados como: gasolina, diésel, queroseno etc., como se puede observar en la Figura 1.3. Cabe destacar que cada producto es obtenido a una temperatura diferente de destilación y posteriormente son sometidos a diferentes procesos para mejorar sus propiedades físicas como se describen a continuación:

- **Reformado catalítico:** produce gasolinas a partir de la nafta pesada.
- **Isomerización:** se aplica a la fracción más ligera de nafta, para convertirla en gasolina, o proporcionar reactivos para procesos posteriores de igualación.
- **Craqueo:** largas cadenas de hidrocarburos son descompuestas en moléculas más pequeñas con la presencia de un catalizador y la ausencia de oxígeno, con la intención de mejorar las propiedades antidetonantes del combustible [4].
- **Hidrodesulfuración:** es necesario para eliminar el azufre de gasolinas, querosenos y gasóleos.

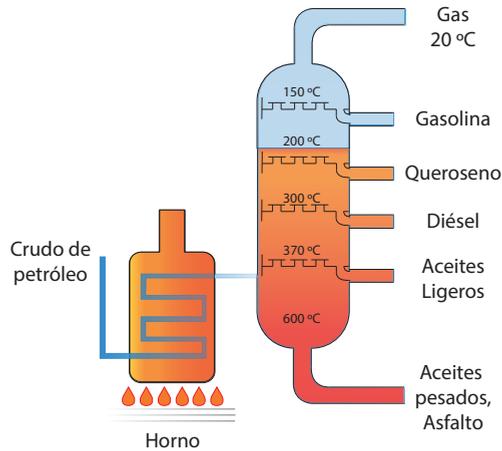


Figura 1.3. Proceso de producción de los diferentes derivados del petróleo

### Gasolina

Es una mezcla de hidrocarburos líquidos incoloros, volátiles y fácilmente inflamables, mejorada con ciertos aditivos que permiten obtener un combustible con mejores propiedades físicas y químicas.

### 1.2.1. Resistencia a la detonación

La detonación es la combustión espontánea e incontrolada de las partículas que no han sido alcanzadas por el frente de llama regular, lo que ocasiona el característico sonido de golpeteo metálico. Aunque el sonido es producido por la colisión de diferentes frentes de llama durante el proceso de combustión, si la combustión se produce de forma normal con un avance del frente de llama regular, se denomina deflagración.

El número de octanos define la capacidad de autoinflamación de un combustible; entre más alto el número mayor es la resistencia a la detonación [3]. La gasolina es una mezcla de isooctano y n-heptano; el isooctano tiene un número de octanos igual a 100 %, mientras que el valor del heptano es 0 %.

Un ejemplo claro es que: si se tiene una gasolina de 95 octanos, este combustible se comportará como una mezcla compuesta por un 95 % de isooctano y un 5 % de n-heptano. En otras palabras, esta gasolina tendrá una resistencia a la detonación equivalente al 95 % de la resistencia del isooctano.

El número de octanos se determina mediante un ensayo experimental realizado en un motor estandarizado con relación de compresión variable y velocidad de giro constante, denominado CFR (Cooperative Fuel Research). Se incrementa progresivamente la relación de compresión hasta registrar una intensidad de picado estándar (50 unidades en la escala Knockmeter) [6]. Existen dos procedimientos para encontrar el valor de octanos:

- El número de octano de motor (MON)
- Número de octano de investigación (RON)

El número de octano de motor (MON) se obtiene con un tiempo de ignición variable, mezcla precalentada y régimen de giro elevado, si se contrasta con el método RON, donde la velocidad y requerimientos energéticos son menores. Es común encontrar una diferencia de 10 unidades entre ambos métodos (sensibilidad). En la Tabla 1.1 se pueden

encontrar los valores de autoinflamación usados según la norma ISO 5164 y en la Tabla 1.2 se encuentran las características principales de cada método.

Tabla 1.1. Requisitos de los combustibles según la norma NTE INEN-ISO 5164

Tipo de gasolina	Octanaje mínimo (RON)	Contenido máximo de azufre (ppm)
Extra	87	650
Súper	92	650

Tabla 1.2. Datos para la determinación del número de octanos del combustible

Características	RON	MON
Pre calentamiento de la mezcla	50 °C	149 °C
Presión de admisión	Atmosférica	
Humedad	0.0036-0.0072 kg/kg aire seco	
Temperatura del refrigerante	100 °C	
Velocidad de giro	600 rpm	900 rpm
Avance de la ignición	13° BTDC	19-26° BTDC
AFR	Ajustado para máxima detonación	

Se pueden obtener combustibles que ofrezcan mayor resistencia a la detonación mediante la adición de éteres como el éter metílico terciario de butilo (MTBE) y el éter etílico de butilo (ETBE), así como de alcoholes como el metanol y el etanol, sin embargo, no se recomienda su uso en motores que no han sido diseñados para este tipo de combustibles, ya que aumentan la volatilidad y pueden deteriorar elementos del motor y del sistema de inyección (ver Figura 1.4) [5].

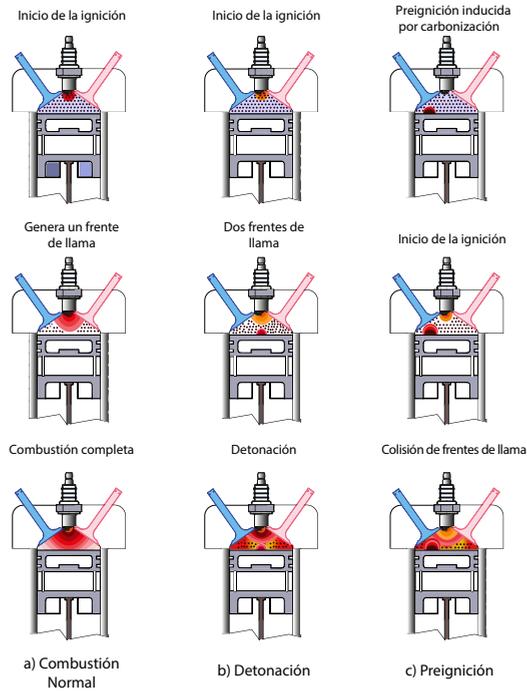


Figura 1.4. Diferentes tipos de combustión

### 1.2.2. Volatilidad

La volatilidad es la capacidad que tienen los líquidos para evaporarse. El combustible debe ser lo suficientemente volátil para garantizar un arranque en frío seguro, pero no puede ser extremadamente alto, porque a temperaturas elevadas se forman bolsas de vapor que pueden producir problemas de marcha en condiciones de arranque. Además, varias medidas medioambientales sugieren que este valor deba mantenerse bajo.

### 1.2.3. Poder calorífico

El poder calorífico es la energía que es capaz de suministrar un combustible por unidad de masa (kilojulio por kilogramo de combustible), y para la gasolina se corresponde con un valor de 43 542 kJ/kg. El po-

der calorífico varía en función de la cantidad de carbono y de hidrógeno que contiene el combustible [7]. Cuanto mayor es la cantidad de hidrógeno, mayor es el poder calorífico.

#### 1.2.4. Aditivos

Están formados por varios componentes que cumplen funciones específicas, determinan la composición de los hidrocarburos y la calidad de los combustibles. Entre los objetivos de los aditivos se encuentra la protección contra el envejecimiento de la cámara de combustión, limpieza de los conductos del sistema de inyección, proteger contra la corrosión, y en temperaturas extremadamente bajas evitar la congelación.

- **Aditivos detergentes:** mantienen el sistema de inyección y líneas de combustible libres de depósitos de carbono, para mantener reducido el número de emisiones contaminantes.
- **Inhibidores de corrosión:** evitan el ingreso de humedad en las líneas de combustible formando una fina capa protectora, que impide la corrosión.
- **Protección contra la congelación:** impide la formación de cristales en las líneas de combustible los cuales podrían generar obstrucciones en el sistema de alimentación.
- **Estabilizadores:** evitan que las propiedades del combustible se degraden durante la fase de almacenamiento.

#### 1.2.5. Densidad

Para obtener una combustión regular, es necesario asegurar una relación correcta entre las masas de aire y de combustible, por lo tanto, la densidad debe ser constante para cada tipo de combustible; la densidad de la gasolina oscila entre 0.71 y 0.76 kg por litro a 15 °C.

### 1.3. Combustión teórica

Se denomina como combustión teórica a la reacción de oxidación del combustible que produce únicamente nitrógeno (N<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O) en los gases de escape, para tal efecto es necesario una determinada proporción entre la cantidad de combustible y la cantidad de aire que se mezclará para producir la denominada relación estequiométrica que tiene un AFR (Air Fuel Ratio) de 14.7 : 1, es decir que por 1 gramo de combustible se necesita 14.7 gramos de aire como se observa en la Figura 1.5.

$$AFR = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \tag{1.1}$$

El factor lambda ( $\lambda$ ) se determina como la relación entre AFR de la mezcla y el AFR ideal.

$$\lambda = \frac{AFR}{14.7} \tag{1.2}$$

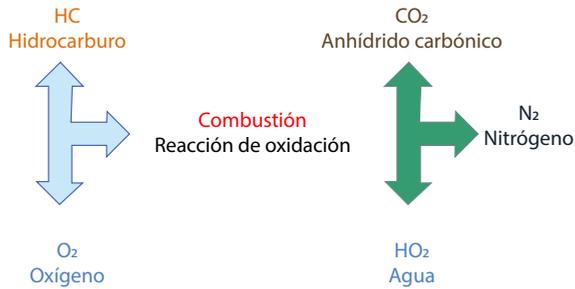


Figura 1.5. Combustión teórica de la mezcla.

Todo el hidrógeno (H) →	reacciona con el →	formando vapores de agua (H <sub>2</sub> O)
Todo el carbono (C) →	reacciona con el →	formando Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).
El nitrógeno (N <sub>2</sub> ) →	no interviene en la →	no reacciona.
	reacción	

### 1.3.1. Composición del aire

La composición del aire varía en función de la ubicación geográfica y la condiciones meteorológicas, a nivel del mar está compuesto principalmente por:

- 21 % oxígeno.
- 78 % nitrógeno.
- 1 % contaminantes, argón, etc. [10].

En la Figura 1.6 se puede visualizar que por cada partícula de oxígeno que hay en el aire existen 3.763 partículas de nitrógeno.

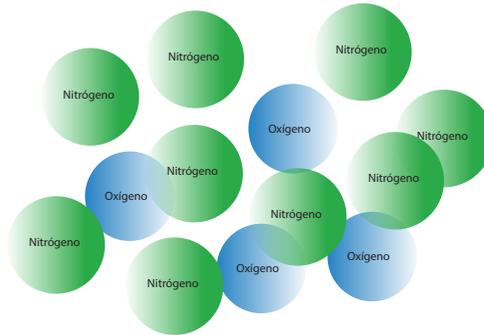
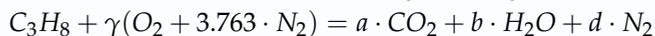


Figura 1.6. Composición química del aire.

**Ejemplo 1.1.** Para la muestra observada en la Figura 1.7, determine la relación aire-combustible (AFR) según los siguientes datos:



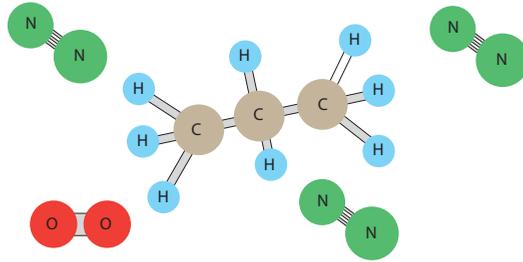


Figura 1.7. Composición de la mezcla aire-combustible

1. Conteo de carbono en reactivos

$$C_3H_8 + \gamma(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = a \cdot CO_2 + b \cdot H_2O + d \cdot N_2 \quad (1.3)$$

$$3 \cdot C = a \cdot C$$

$$a = 3$$

2. Conteo de hidrógeno en reactivos

$$C_3H_8 + \gamma(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = a \cdot CO_2 + b \cdot H_2O + d \cdot N_2 \quad (1.4)$$

$$8H = 2B \cdot H$$

$$b = 4$$

3. Conteo de oxígeno en productos

$$C_3H_8 + \gamma(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = 3 \cdot CO_2 + 4 \cdot H_2O + d \cdot N_2 \quad (1.5)$$

$$2\gamma = 6 + 4$$

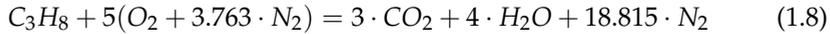
$$\gamma = 5$$

4. Conteo de nitrógeno en reactivos

$$C_3H_8 + 5(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = 3 \cdot CO_2 + 4 \cdot H_2O + d \cdot N_2 \quad (1.6)$$

$$d = 18.815$$

(1.7)



5. Composición de gases de escape

$$100 = 3CO_2 + 4H_2O + 18.815N_2 \quad (1.9)$$

6. Total de moles en productos

$$100 = 3CO_2 + 4H_2O + 18.815N_2 = 25.81 \quad (1.10)$$

7. Fracción molar

$$100 = \frac{3}{25.81}CO_2 + \frac{4}{25.81}H_2O + \frac{18.815}{25.81}N_2 \quad (1.11)$$

$$100 = 0.116 CO_2 + 0.1555 H_2O + 0.729 N_2$$

8. Si se considera que los gases de escape se comportan como un gas ideal, la fracción molar equivale a la composición en [v/v]

$$100 = 11.6\% CO_2 + 15.5\% H_2O + 72.9\% N_2$$

9. El número de moles de todos los componentes es:

- Número de moles de oxígeno = 5
- Número de moles de nitrógeno = 18.81
- Número de moles de aire = 23.81 (Es el resultado de la suma del número de moles de oxígeno y número moles de nitrógeno)
- Número de moles de carbono = 3
- Número de moles de hidrógeno = 4

10. En este apartado se obtiene la relación aire-combustible (AFR)

$$AFR = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (1.12)$$

$$AFR = \frac{N_{aire} \cdot M_{aire}}{N_c \cdot M_c + N_{H_2} \cdot M_{H_2}} \quad (1.13)$$

$$(1.14)$$

Donde:

- $N_{aire}$  = número de moles de aire en la reacción
- $M_{aire}$  = masa molar del aire ( $\approx 29$  kg/mol, considerando la composición del aire)
- $N_c$  = número de moles de carbono en el combustible
- $M_c$  = masa molar del carbono (12 kg/mol)
- $N_{H_2}$  = número de moles de hidrógeno en el combustible
- $M_{H_2}$  = masa molar del hidrógeno (2 kg/mol)

$$AFR = \frac{23.81 \text{ kmol} \cdot 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{3 \text{ kmol} \cdot 12 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} + 4 \text{ kmol} \cdot 2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$AFR = 14.38$$

El resultado representa la relación estequiométrica aire-combustible para el propano, lo que significa que se necesitan 14.38 kg de aire para quemar completamente 1 kg de propano en condiciones ideales.

**Ejemplo 1.2.** Para la muestra observada en la Figura 1.8, determine la relación aire-combustible (AFR) según los siguientes datos:

Composición del combustible: 30%  $\text{CH}_4$  + 70%  $\text{C}_3\text{H}_8$

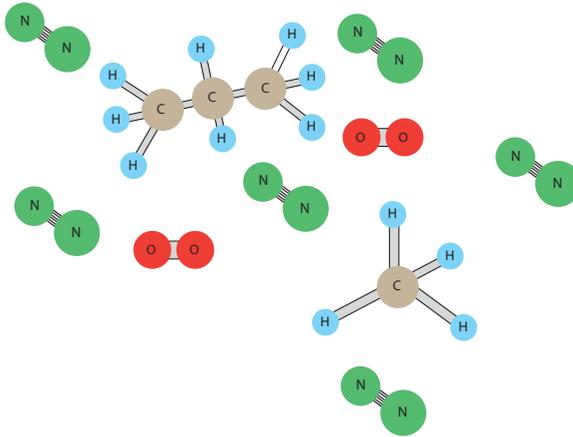
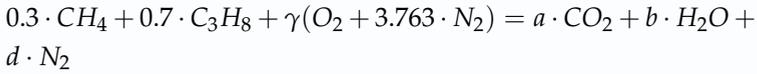
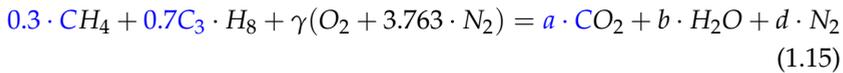


Figura 1.8. Composición de la mezcla

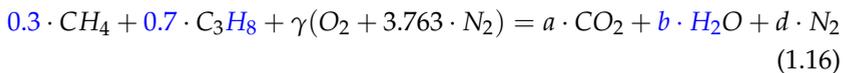
1. Conteo de carbono en reactivos



$$0.3 \cdot \text{C} + 2.1 \cdot \text{C} = a \cdot \text{C}$$

$$a = 2.4$$

2. Conteo de hidrógeno en reactivos



$$1.2H + 5.6H = 2B \cdot H$$

$$b = 3.4$$

(1.17)

## 3. Conteo de oxígeno en productos

$$0.3 \cdot CH_4 + 0.7 \cdot C_3H_8 + \gamma(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = 2.4 \cdot CO_2 + 3.4 \cdot H_2O + d \cdot N_2$$

(1.18)

$$2\gamma = 2 \cdot 2.4 + 3.4$$

$$\gamma = 4.1$$

## 4. Conteo de nitrógeno en reactivos

$$0.3CH_4 + 0.7C_3H_8 + 4.1(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = 2.4 \cdot CO_2 + 3.4 \cdot H_2O + d \cdot N_2$$

(1.19)

$$d = 15.42$$

$$0.3CH_4 + 0.7C_3H_8 + 4.1(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = 2.4 \cdot CO_2 + 3.4 \cdot H_2O + 15.42 \cdot N_2$$

## 5. Composición de gases de escape

$$100 = 2.4CO_2 + 3.4H_2O + 15.42N_2$$

## 6. Total de moles en productos

$$100 = 2.4CO_2 + 3.4H_2O + 15.42N_2 = 21.22$$

## 7. Fracción molar

$$100 = \frac{2.4}{21.22} CO_2 + \frac{3.4}{21.22} H_2O + \frac{15.42}{21.22} N_2$$

$$100 = 0.11 \cdot CO_2 + 0.16 \cdot H_2O + 0.72 \cdot N_2$$

8. Si consideramos que los gases de escape se comportan como gases ideales, la fracción molar equivale a la composición en [v/v]

$$100 = 11 \% CO_2 + 16 \% H_2O + 72 \% N_2$$

9. El número de moles de todos los componentes es:

- Número de moles de oxígeno = 4.1
- Número de moles de nitrógeno = 15.42
- Número de moles de aire = 19.52 (Es el resultado de la suma del número de moles de oxígeno y número moles de nitrógeno)
- Número de moles de carbono = 2.4
- Número de moles de hidrógeno = 3.4

10. En este apartado se obtiene la relación aire-combustible (AFR)

$$AFR = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (1.20)$$

$$AFR = \frac{N_{aire} \cdot M_{aire}}{N_c \cdot M_c + N_{H2} \cdot M_{H2}} \quad (1.21)$$

$$AFR = \frac{19.52 \text{ kmol} \cdot 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{2.4 \text{ kmol} \cdot 12 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} + 3.4 \text{ kmol} \cdot 2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} \quad (1.22)$$

$$AFR = 15.90$$

Por cada kilogramo de combustible se requieren aproximadamente 15.90 kg de aire. La relación hidrógeno-carbono es 1.42, lo que indica una mejor calidad del combustible (ver Figura 1.9).

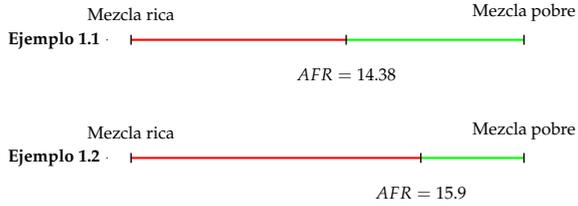


Figura 1.9. Valor AFR para dos distintos combustibles

### 1.4. Combustión real

En los motores de encendido provocado (MEP) con sistemas de inyección indirecta, la mezcla de aire-combustible ingresa en fase gaseosa a la cámara de combustión de forma homogénea, para ser encendida por el salto de la chispa producida en la bujía, la cual iniciará el proceso de combustión denominado deflagración (combustión normal), donde se pueden identificar dos mecanismos de avance del frente de llama, una combustión denominada laminar y otra turbulenta. Esquemáticamente en la Figura 1.10 se puede apreciar el proceso de combustión laminar premezclada.

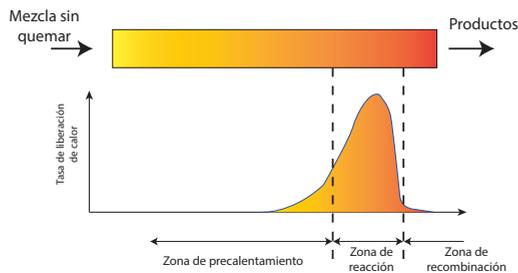


Figura 1.10. Zonas del proceso de combustión laminar premezclada [7]

### Proceso de combustión laminar

El proceso de combustión es laminar cuando el fluido, compuesto por una mezcla homogénea de aire y combustible, se encuentra inicialmente en reposo y el frente de llama se propaga de forma esférica (se define como frente de llama a la zona que separa los productos sin quemar de aquellos combustionados) [7]. Aquí se distinguen tres zonas, la primera denominada zona de precalentamiento donde la mezcla aire-combustible aumenta su temperatura debido a un proceso de difusión térmica y másica, generando reacciones poco exotérmicas. En la siguiente fase se produce una liberación de energía por parte de los hidrocarburos para finalmente tener una zona de recombinación de poca liberación energética.

### Proceso de combustión turbulento

La turbulencia es un fenómeno que facilita la difusión másica y térmica de un fluido permitiendo el incremento de la propagación de la superficie del frente de llama (fenómeno de corrugación). Si la velocidad del frente de llama se eleva (ver Figura 1.11), se pueden obtener combustiones más rápidas, con espesores aparentes de llama mayores y más eficientes.

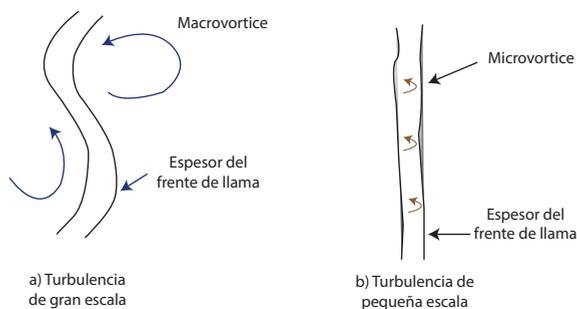


Figura 1.11. Proceso de combustión premezclada turbulenta[7]

**Fases del proceso de combustión**

En este proceso se describen tres etapas, la primera ocasionada por la chispa de la bujía y el inicio de una combustión de tipo laminar, la cantidad de mezcla quemada durante este proceso es pequeña y abarca aproximadamente un 10% del ángulo de combustión. La segunda fase es una combustión de tipo turbulenta donde se logra la máxima presión en el interior del cilindro, producida por el aumento rápido del frente de llama y ocupa un 85% de la duración del ángulo de combustión. Por último, el frente de llama alcanza las paredes del cilindro disminuyendo su presión y velocidad de propagación, producto de la extinción de la fase de combustión laminar, como se puede ver en la Figura 1.12.

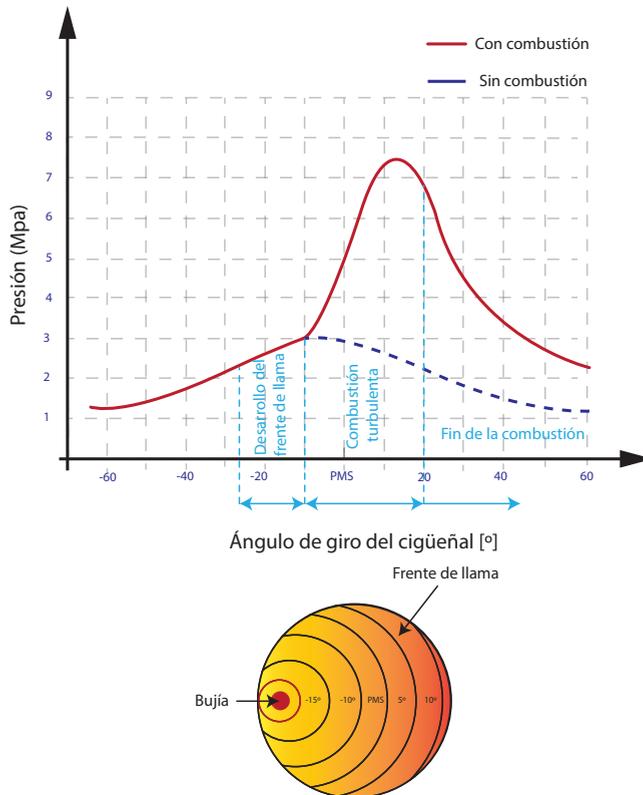


Figura 1.12. Subdivisión del proceso de combustión

### 1.4.1. Emisiones generadas durante el proceso de combustión real

#### Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro altamente tóxico que dificulta la transportación de oxígeno en la sangre y se produce por la oxidación incompleta del carbono, está directamente relacionado con la dosificación del combustible, en situaciones de mezcla rica ( $\lambda < 1$ ) la cantidad de oxígeno es insuficiente para producir una combustión completa [7]. Su concentración disminuye a medida que la mezcla se va empobreciendo, pero no desaparece debido a la lentitud del proceso de oxidación del CO a CO<sub>2</sub>, además, se produce en la combustión de mezclas heterogéneas.

La principal causa de la emisión de CO es la incorrecta dosificación de la mezcla aire-combustible ( $\lambda < 1$ ) y se mide en % de concentración volumétrica

#### Hidrocarburos no combustionados (HC)

Los hidrocarburos no combustionados son gases altamente irritantes para el sistema respiratorio cuyo contacto a largo puede ser causante de cáncer y son el resultado de una combustión incompleta, en la cual partículas de combustible no tuvieron ninguna reacción al interior de la cámara de combustión.

Se forma cuando el combustible esta dosificado fuera de los límites de inflamabilidad, por ejemplo, en condiciones de mezcla rica  $\lambda < 1$  se produce como el resultado de una combustión incompleta por falta de moléculas de oxígeno que puedan oxidar a los hidrocarburos, mientras en condiciones de mezcla muy pobre, la velocidad del frente de llama se ve drásticamente disminuida, con lo cual se genera una combustión muy lenta que no logra oxidar todas las partículas en el interior de la cámara de combustión. Otras razones están asociadas con fallas en el sistema de encendido (*misfire*), insuficiente volatilidad del combustible y consumo de aceite.

Existen varios factores responsables de la generación de HC pero entre los más influyentes están la inadecuada dosificación del combustible, defectos en el sistema de encendido, consumo de aceite y desgaste de los elementos internos del motor. Los HC se cuantifican en partes por millón (ppm).

### Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

Los óxidos de nitrógeno son responsables de la producción de lluvia ácida y del *smog* fotoquímico [3], son el resultado de temperaturas y presiones elevadas durante el proceso de combustión que promueve la reacción entre nitrógeno y oxígeno. Como se sabe, para producir una combustión adecuada se necesitan presiones y temperaturas elevadas en la cámara de combustión, por lo cual la producción de NO<sub>x</sub> (ppm) es inevitable [9].

En el contexto ecuatoriano las emisiones NO<sub>x</sub> no son reguladas por los entes de control locales.

Luego de revisar los diferentes contaminantes producidos por vehículos, se muestra en la Figura 1.13 un resumen del proceso de combustión real producido en un motor de encendido provocado.

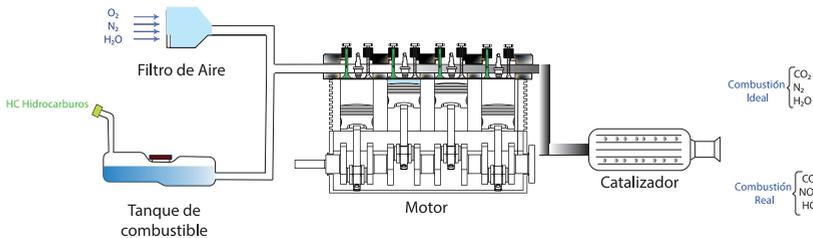


Figura 1.13. Reactivos antes y después del proceso de combustión

### 1.4.2. Ventana lambda

Las emisiones contaminantes generadas a partir del proceso de combustión dependen, entre otros factores, del dosado de la mezcla. La ventana lambda es una herramienta muy útil que permite monitorear de manera gráfica las cantidades de gases emitidos por el motor de combustión interna como se puede observar en la Figura 1.14.

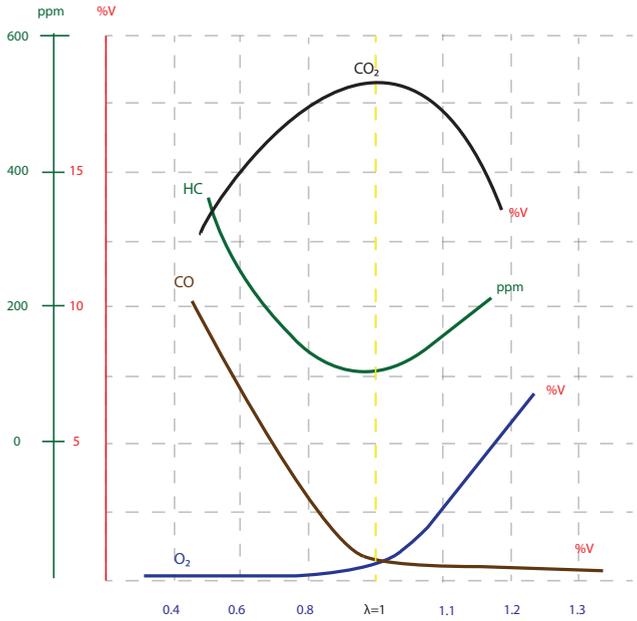


Figura 1.14. Ventana lambda

Entre los muchos aspectos que se pueden estudiar acerca del funcionamiento del motor, los más importantes en esta obra son los siguientes:

- Tipo de mezcla (rica o pobre).
- Estado del catalizador

Además, permite monitorear el comportamiento de las emisiones de gases de escape y determinar el tipo de mezcla que se está quemando y las condiciones de funcionamiento del catalizador.

En una combustión teórica, a la salida del tubo de escape se debería encontrar solo  $\text{CO}_2$  (es un factor importante para determinar la eficiencia en el proceso de combustión)  $\text{N}_2$ , y  $\text{H}_2\text{O}$  en condiciones ideales y con un dosado  $\lambda = 1$ , pero en la realidad según la dosificación de la mezcla del motor, carga y estado de los componentes se encuentran otros tipos de subproductos como se puede observar en la Figura 1.15.

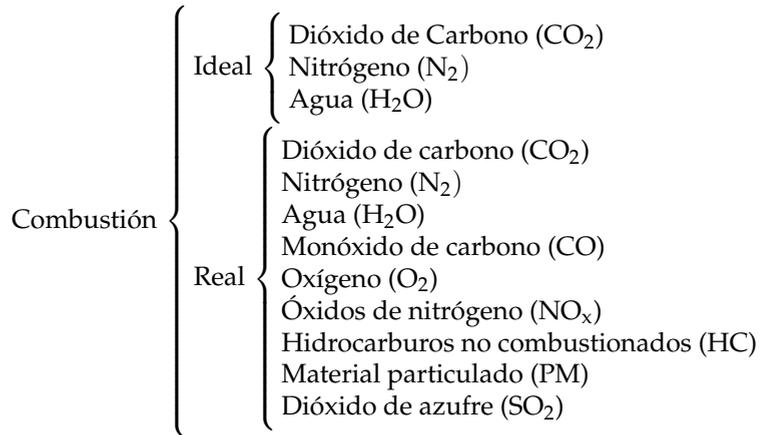


Figura 1.15. Descripción de los contaminantes en una combustión ideal y real

Por limitaciones de producción, el combustible empleado no está totalmente puro y se encuentra contaminado con componentes químicos como el plomo, azufre, bencina entre otros, esto afecta la relación aire-combustible influyendo tanto en el rendimiento del motor, así como en la generación de emisiones.

### 1.4.3. Relación entre $\lambda$ potencia y consumo específico

Como se puede ver en la Figura 1.16, la potencia máxima (kW) de un motor se obtiene con una mezcla ligeramente rica, mientras que el consumo específico mínimo (g/kWh) se consigue con una mezcla ligeramente pobre. Para un mejor entendimiento es necesario dejar claro los siguientes conceptos:

- **Potencia:** es la porción de trabajo que genera un motor por unidad de tiempo, depende de factores como la relación de compresión, cilindrada, dosado de la mezcla, adelanto al encendido, entre otros.
- **Consumo específico:** es la relación que existe entre la masa de combustible consumida por la unidad potencia generada por el motor, por ende depende de los mismos factores que influyen sobre la potencia generada por el motor.

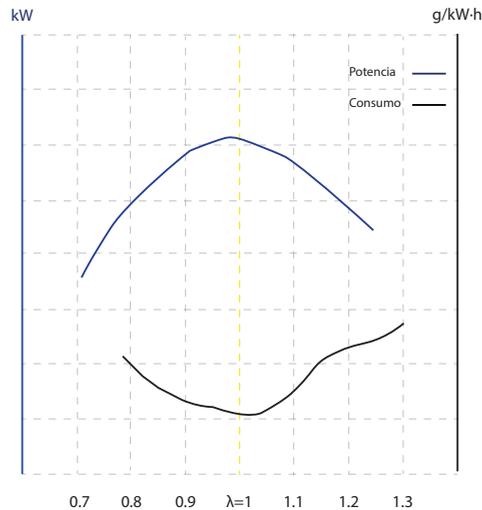


Figura 1.16. Curvas de potencia y consumo específico

#### 1.4.4. Catalizador

Es un elemento que facilita una reacción química sin intervenir en ella, puede considerarse como un dispositivo de postcombustión en el cual se tratan los gases provenientes del motor.

El catalizador tiene menos de una décima de segundo para recombinar los gases tóxicos y producir sustancias no perjudiciales para la salud, como el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{O}_2$ , esto se consigue mediante dos bloques cerámicos que se componen de miles de micro conductos cubiertos de

metales preciosos. En el caso del primer bloque, el recubrimiento es de platino y paladio, que facilitan el proceso de oxidación de las emisiones provenientes del motor, mientras el segundo bloque utiliza como recubrimiento rodio, que se encarga de promover el proceso de reducción de óxidos nitrosos en los gases de escape, como se puede observar en la Figura 1.17.

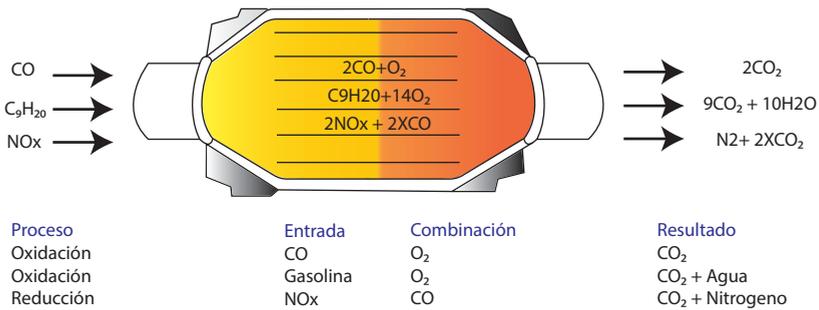
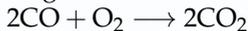


Figura 1.17. Proceso químico interno del catalizador

Los procesos de oxidación y reducción son ineficientes cuando existen bajas concentraciones de oxígeno en los gases de escape (mezclas ricas) y cuando el catalizador se encuentra a temperaturas inferiores a los 150 °C.

#### Explicación de las reacciones

**Oxidación** → Consiste en que un elemento gane átomos de oxígeno.



**Reducción** → Consiste en que un elemento pierda átomos de oxígeno [6].



Acorde al número de reacciones que los catalizadores promueven pueden clasificarse en catalizadores de 2 o 3 vías como se puede ver en la Figura 1.18. Los catalizadores de 2 vías promueven únicamente la reacción de oxidación en dos elementos como son el CO y HC, que

se oxidan de forma completa generando  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Los catalizadores de tres vías cuentan con las dos reacciones de oxidación y además promueven la reacción de reducción en las emisiones de  $\text{NO}_x$  generando  $\text{N}_2$  y  $\text{CO}_2$ .

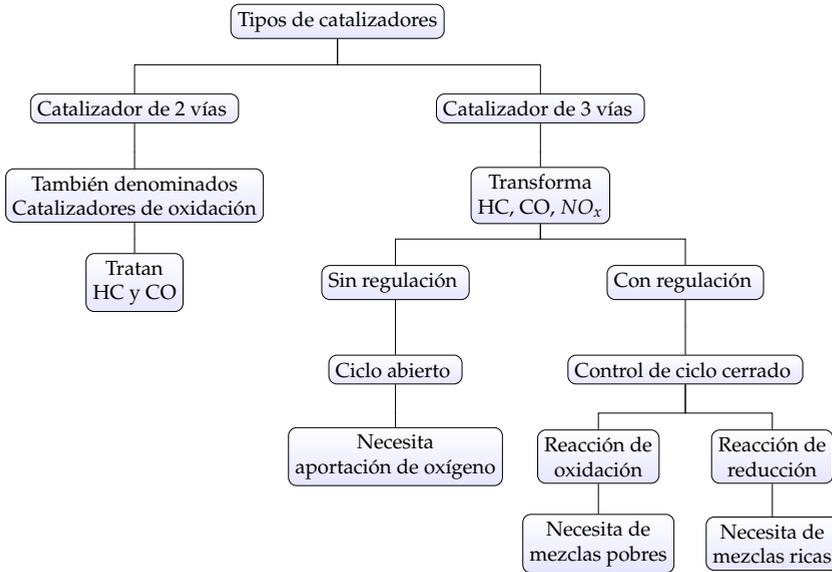


Figura 1.18. Clasificación de catalizadores por número de vías

### 1.4.5. Comportamiento de las emisiones contaminantes según el factor $\lambda$ antes y después de un catalizador

#### Monóxido de carbono (CO)

La principal causa para la generación de CO es la deficiencia de oxígeno en la preparación de la mezcla, por ende, como se puede observar en la Figura 1.19 antes del catalizador la emisión de CO se incrementa cuando el motor trabaja con mezcla rica, mientras que cuando el factor  $\lambda$  se incrementa (mezcla pobre) su concentración en los gases de escape disminuye.

Después del catalizador se observa que la emisión en mezcla rica es prácticamente la misma debido a la baja concentración de oxígeno en

los gases de escape, cuando la mezcla se empobrece esta concentración aumenta, con lo que se promueve la reacción de oxidación convirtiendo el CO a CO<sub>2</sub>, esto genera que la concentración de CO disminuya.

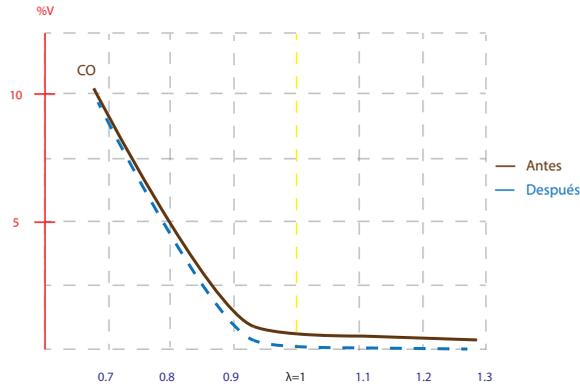


Figura 1.19. CO antes y después del catalizador

Las emisiones de monóxido el carbono (CO) dependen de variables como el dosado de la mezcla, adelanto al encendido, régimen de giro, octanaje del combustible y carga del motor. En el diagrama de efectos principales se representa las variables con mayor influencia en la producción de CO. Como se observa en la Figura 1.20 el factor lambda es la variable más influyente en la generación de emisiones de CO especialmente en mezclas ricas, variables como el adelanto al encendido, el régimen de giro de motor y el octanaje del combustible no influyen sobre el incremento de las emisiones de CO, mientras el aumento de carga en el motor ocasiona ligeros incrementos sobre las emisiones de CO.

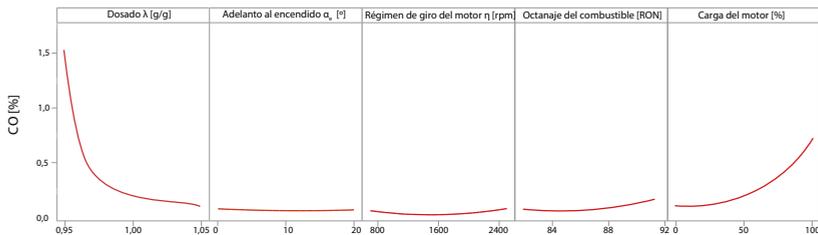


Figura 1.20. Diagrama de efectos principales para CO

### Hidrocarburos no combustionados (HC)

La emisión de HC es alta con mezcla rica debido a la ausencia de oxígeno en el proceso de oxidación del combustible, su concentración disminuye al valor mínimo con mezcla ligeramente rica ( $\lambda \approx 0.95$ ) y nuevamente se incrementa con mezcla pobre debido a la disminución de la velocidad del frente de llama (combustión lenta).

Luego del catalizador, como se aprecia en la Figura 1.21, la emisión en mezcla rica es prácticamente la misma debido a la ausencia de oxígeno en los gases de escape para promover la reacción de oxidación. Según se incrementa el factor  $\lambda$ , se verifica la disminución en la emisión de HC, debido al incremento en la eficiencia del catalizador.

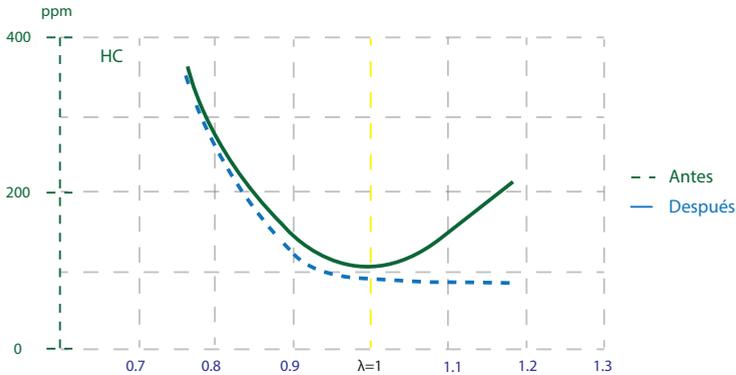


Figura 1.21. HC antes y después del catalizador

Las emisiones de HC son muy sensibles a las variables de funcionamiento del motor. En la Figura 1.22 se observa que el factor lambda produce elevadas emisiones en mezclas extremadamente ricas o pobres, debido a la falta de oxígeno para la oxidación del combustible y a la disminución de la velocidad del frente de llama, respectivamente. La menor emisión de HC se consigue con un dosado ligeramente rico. Con respecto al del adelanto al encendido la menor emisión de HC se consigue con valores ligeramente inferiores de los recomendados por el fabricante, adelantos más pronunciados incrementan la emisión de este contaminante. Al incrementar el régimen de giro del motor la concentración de HC en los gases de escape disminuye. Respecto del combus-

tible la concentración de HC disminuye con el uso de gasolina de alto octanaje. De igual forma que el CO su concentración es proporcional a la carga del motor, mientras que ambas se reducen con un dosado ligeramente pobre. El adelanto al encendido presenta valores mínimos de emisiones en ángulos reducidos; además, las emisiones de HC no son dependientes del régimen de giro del motor y combustibles con valores altos de octanaje disminuyen significativamente las emisiones contaminantes.

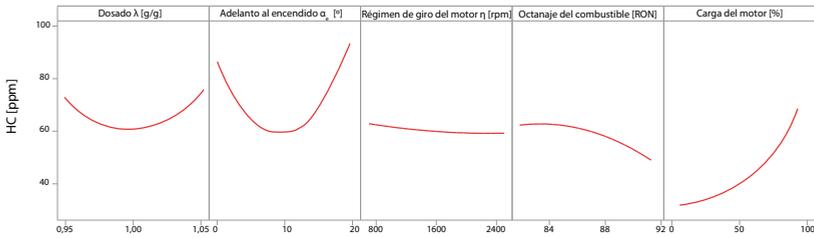


Figura 1.22. Diagrama de efectos principales para HC

### Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

En una combustión teórica, todo el carbono del combustible debería oxidarse y convertirse en CO<sub>2</sub> pero cuando se trabaja con mezclas ricas la ausencia de oxígeno ocasiona que el carbono se oxide parcialmente, dando lugar a la formación de CO, por lo que la emisión de CO<sub>2</sub> disminuye; mientras que al trabajar con mezclas pobres la emisión de CO<sub>2</sub> disminuye debido a la insuficiente cantidad de combustible en la reacción. Cuando los gases generados por la combustión pasan a través del catalizador, la concentración de CO<sub>2</sub> se incrementa para  $\lambda > 1$ , debido a la oxidación del CO y HC, este proceso de oxidación no es posible en mezclas ricas debido a la ausencia de oxígeno, como se ve en la Figura 1.23.

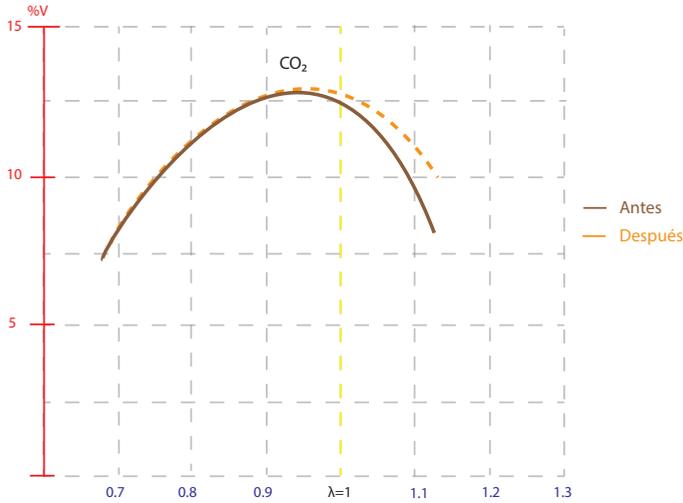


Figura 1.23. CO<sub>2</sub> Antes y después del catalizador

La interacción de diversas variables de funcionamiento del motor interviene sobre el incremento de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En el diagrama de efectos principales (ver Figura 1.24) se muestran las variables más representativas en cuanto al incremento de emisiones de CO<sub>2</sub>.

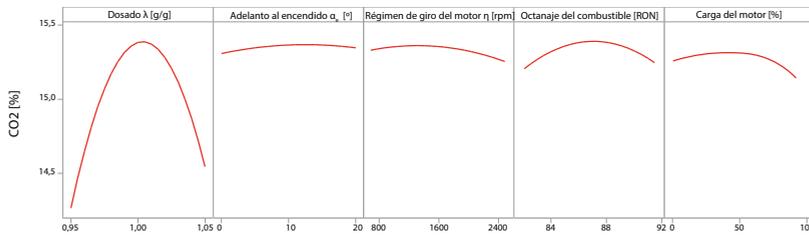


Figura 1.24. Diagrama de efectos principales para CO<sub>2</sub>

El dosado de la mezcla es el factor más representativo en la generación de CO<sub>2</sub>, mezclas ligeramente ricas y cercanas a  $\lambda = 1$  producen niveles bajos de emisión, por otro lado, el adelanto al encendido, velocidad en el régimen de giro del motor y carga son factores que intervienen levemente sobre el CO<sub>2</sub>. El octanaje de combustible tiene mayor

participación que las variables anteriores en cuanto a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> con el uso de combustibles de alto octanaje.

### Oxígeno (O<sub>2</sub>)

En el interior de la cámara de combustión no todo el oxígeno puede reaccionar con las partículas de combustible por lo cual existen partículas de O<sub>2</sub> sin reaccionar en los gases de escape, su emisión es sumamente baja en mezclas ricas debido a la ausencia de aire en la reacción, esta concentración se incrementa a medida que el factor lambda asume valores  $\lambda \geq 1$  como se observa en la Figura 1.25.

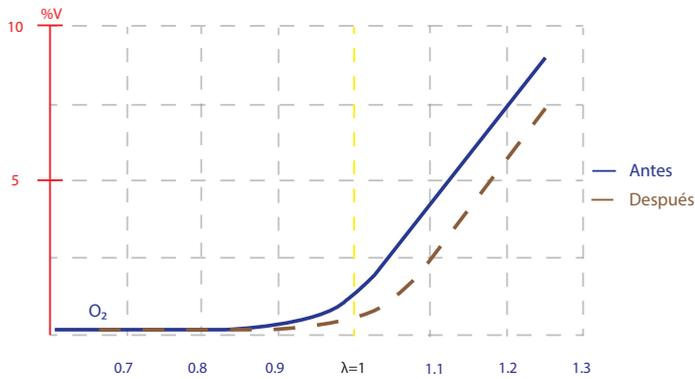


Figura 1.25. O<sub>2</sub> antes y después del catalizador

La concentración de oxígeno (O<sub>2</sub>) en los gases de escape se encuentra condicionada por el dosado de la mezcla, con valores de mezcla ligeramente ricos se obtienen reducidas emisiones y al aumentar este valor las emisiones crecen considerablemente (ver Figura 1.26). Variables como el adelanto al encendido, régimen de giro y octanaje del combustible no aportan significativamente al incremento de emisiones de oxígeno, sin embargo, la variable de carga está condicionada por el factor lambda, por lo cual su valor es mínimo en altos valores de carga.

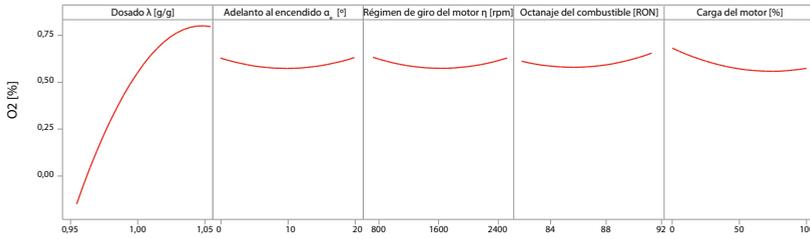


Figura 1.26. Diagrama de efectos principales para O<sub>2</sub>

En este capítulo se analizó la relación existente entre las emisiones contaminantes y el factor lambda ( $\lambda$ ) adelanto al encendido ( $\alpha$ ), régimen de giro ( $\eta$ ), octanaje de combustible y carga motor (%), sin embargo estos gases no dependen exclusivamente de estos parámetros. La composición de las emisiones contaminantes depende de varios factores adicionales como: tipo de combustible, estado del sistema de ignición, estado físico del motor, entre otros. El factor  $\lambda$ ; explica la relación de la mezcla aire-combustible en el motor. Un valor de  $\lambda$  igual a uno indica una mezcla estequiométrica, mientras que valores menores indican mezclas ricas caracterizadas por exceso de combustible y escasez de oxígeno; a su vez valores mayores a uno identifican mezclas pobres caracterizadas por una concentración alta de oxígeno. Estas variaciones afectan las emisiones de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Asimismo, parámetros como el adelanto al encendido ( $\alpha$ ), definen el momento en el cual la chispa inicia la ignición de la mezcla en la fase de combustión. Una modificación al adelanto influye sobre la presión máxima de combustión y la eficiencia térmica, afectando la producción de contaminantes como NO<sub>x</sub>, donde un adelanto excesivo puede incrementar la temperatura de combustión. Además, un régimen de giro más alto puede mejorar la atomización del combustible y reducir las emisiones de HC, pero también puede incrementar las emisiones de NO<sub>x</sub> debido a mayores temperaturas y presiones alcanzadas. Otro factor analizado es el octanaje del combustible, que determina su capacidad para resistir a la detonación. Los combustibles con un mayor octanaje permiten alcanzar mayores presiones en el interior de la cámara de combustión y un mejor encendido de la mezcla reduciendo las emisiones de CO y HC.

## Bibliografía

- [1] R. K. Maurya, *Reciprocating Engine Combustion Diagnostics*, Springer International Publishing, 2019.
- [2] K. Hoag y B. Dondlinger, *Vehicular Engine Design*, 2nd ed., Vienna: Springer, 2016.
- [3] F. Payri *et al.*, *Motores de combustión interna alternativos*, Reverté, 2011.
- [4] C. J. Boluda *et al.*, "La complejidad química de las gasolinas de automoción." *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, vol. 2, no. 2, pp. 51-79, 2019.
- [5] K. Reif, *Gasoline Engine Management, Systems and Components*, Springer Vieweg, 2015.
- [6] *ISO 5164:2005 Petroleum products - Determination of knock characteristics of motor and aviation fuels - Motor method*, ISO, 2005.
- [7] J. Alvares *et al.*, *Motores alternativos de combustión interna*, Ediciones UPC, Barcelona, 2005.
- [8] Información Técnica - Catalizadores, disponible en: <https://www.as-sl.com/es/informacion-tecnica-catalizadores/>. [Accedido: 06-ago-2024].
- [9] P. F. Flynn, G. L. Hunter, L. Farrel, R. P. Durrett, O. Akinyemi, A. O. Zur Loye, and W. J. Pitz, "The inevitability of engine-out NOx emissions from spark-ignited and diesel engines". *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 1, pp. 1211-1218, 2000.

- [10] C. A. R. Pimentel y A. Hetem, "Computation of air chemical equilibrium composition until 30000K - Part I", *J. Aersp. Technol. Manag.*, vol. 3, no. 2, pp. 111–126, 2011, doi: 10.5028/jatm.2011.03021011.