

LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS

DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

1. OBJETIVOS GENERALES

Determinar los productos de la combustión para analizar los efectos de los parámetros gobernantes del proceso de combustión y sus posteriores influencias en la optimización del rendimiento térmico, potencia, contaminación, consumo de combustible, etc.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.1. Comprender el por qué y para qué se realiza la determinación y análisis de los productos de la combustión.
- 2.2. Conocer los parámetros que afectan un proceso de combustión, en calderas, motores y máquinas de combustión en general.
- 2.3. Conocer las formas y medios para determinar productos de la combustión.
- 2.4. Determinar experimentalmente los productos de la combustión.
- 2.5. Procesar la información obtenida, analizarla y determinar el tipo de hidrocarburo utilizado en la combustión.
- 2.6. Determinación del exceso/carencia de aire utilizado en la combustión.

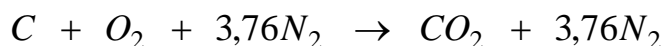
3. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Comprender por qué y par qué se determinan y se analizan los productos de la combustión hoy en día es máxima importancia. Desde el punto de vista de la salud, ecológico y del medio ambiente resulta vital conocer y cuantificar los efectos contaminantes de algunos productos de la combustión tales como monóxido de carbono (CO), Hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógenos (No_x), óxidos de azufre (So_x), y otros. Desde el punto de vista de la ingeniería se orienta a lograr máxima potencia, máximo rendimiento y máxima economía, y para lo cual deberá optimizar los procesos de combustión pero, sin dejar de considerar los efectos sobre la contaminación ambiental

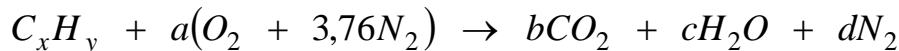
3.1. La combustión

Se denomina combustión a la rápida reacción exotérmica (libera calor) entre combustible y su oxidante (comburente) – oxígeno (o aire que en si posee oxígeno como componente de mezcla). Es decir, en la combustión se liberará energía en forma de calor y comúnmente será acompañada de una flama. Los parámetros de la combustión están representados por:

- a) Ecuación de combustión para el carbono, con aire



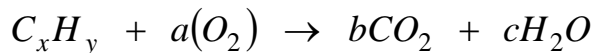
- b) Ecuación de combustión de hidrocarburos con aire



c) Ecuación de combustión carbono con oxígeno



d) Ecuación de combustión de hidrocarburos con oxígeno



e) Relación aire/combustibles (R A/C)

$$R A/C = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}} \text{ (base masa)}$$

f) Exceso de aire

$$\text{EXC. Aire} = \frac{R A/C \text{ Real}}{R A/C \text{ Teórico}} \times 100$$

3.2 Productos de la combustión

La composición de los productos de la combustión, depende de:

- Tipo de combustible usado
- Relación A/C
- Condiciones en que se realiza la combustión

De acuerdo al tipo de combustión, completa o incompleta, los gases básicamente considerados son los siguientes:

- Combustión teórica con aire:
 CO_2, H_2O, N_2
- Combinación completa, con exceso de aire:
 CO_2, O_2, H_2O, N_2
- Combustión incompleta
 $CO_2, CO, H_2O, C_xH_y, N_2$
- Combustión incompleta con exceso de aire:
 $CO_2, CO, H_2O, C_xH_y, O_2, N_2$

Para lograr la total oxidación del combustible, es necesario utilizar una mezcla que tenga un cierto exceso de aire. La cantidad de aire en exceso, necesaria para el funcionamiento del hogar o la cámara de combustión, depende de:

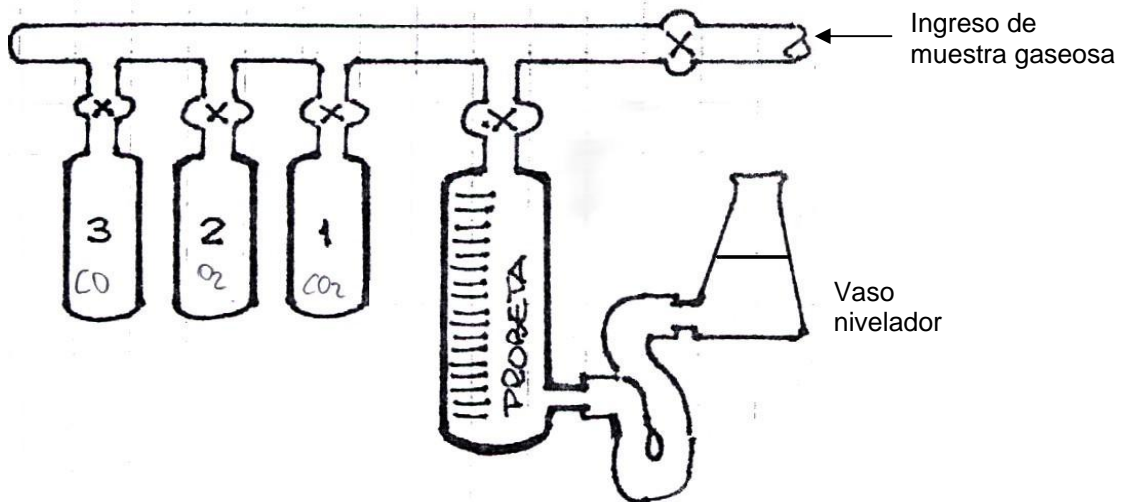
- a) El tiempo disponible, antes que los gases ascendentes alcancen la zona fría del altar y se enfríen por debajo del punto de ignición, en el caso de calderas. El tiempo disponible, en motores de combustión interna, desde el inicio de la inyección de combustibles (Dieses) o inicio del encendido (ciclo Otto) hasta pasado el P. M. (en la carrera de trabajo).
- b) La temperatura, a la cual se encuentra la mezcla.
- c) El grado de mezclado, entre el combustible y el aire. Si un combustible puede ser fuertemente dispersado y totalmente mezclado con el aire, su combustión puede lograrse con un pequeño exceso de aire.

En resumen, en un proceso de combustión, tienen gran influencia, la trilogía de las 3 T: T-tiempo, T-temperatura, T-turbulencia.

3.3 Análisis de ORSAT para productos de la combustión

Cuando la combustión es casi completa, los productos de combustión, como ya se ha señalado, consisten en CO_2 , CO , vapor de H_2O , O_2 y N_2 . Aunque pueden hallarse presente otras sustancias, sus proporciones son despreciables, para los fines de la ingeniería. El aparato Orsat, es un dispositivo útil para el análisis volumétrico de los productos de la combustión. Hay muchas variables del aparato Orsat, tanto por la naturaleza de las pipetas de reacción como por su número. El equipo Orsat más común sirve para determinar la presencia de CO , CO_2 y O_2 en los productos de la combustión.

La figura ilustra una forma del Orsat de tres reactivos. A la derecha, hay una probeta de medición de 100 cm^3 de capacidad, la que puede estar revestida por una camisa de agua a fin de evitar las variaciones de temperatura durante el análisis.



La pipeta de reacción 1 contiene un compuesto químico que absorbe el CO₂, para este fin es muy satisfactorio el empleo de una solución fuerte de hidróxido de potasio o dióxido de potasio. La pipeta 2 es para absorber el O₂, y para este fin se han usado diversos reactivos, pero el más común es el pirogalol (una mezcla de una solución de ácido pirogálico y una solución de hidróxido de potasio). La pipeta 3 está destinada a la absorción del CO, cuando se trata de pequeñas cantidades, para lo cual una solución de cloruro cuproso o cloruro de amonio es efectiva.

4. PROCEDIMIENTO

Se analizará los productos de la combustión de un motor de combustión interna bencinero, con regulación de mezcla aire/combustible por carburador de una garganta. En términos simples, los pasos a seguir son:

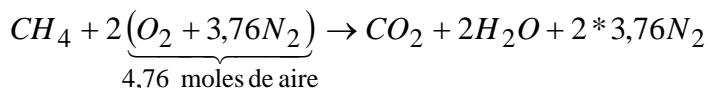
- a) Puesta en funcionamiento del motor.
- b) Nivelar reactivos hasta la marca indicada en el cuello de las pipetas.
- c) Purgar el Orsat de gases viejos.
- d) Conectar el Orsat al escape del motor y tomar una muestra de 100 cm³ de gas producto de la combustión.
- e) Transferir el gas a la primera pipeta, para absorber el CO₂.
- f) Repetir lo anterior, con el resto del gas producto de la combustión, para absorber el O₂, en la segunda pipeta.
- g) Finalmente, repetir lo anterior, para absorber el CO en la tercera pipeta.

5. ANÁLISIS DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

5.1 Aire estequiométrico

A la cantidad mínima de aire necesario para oxidar completamente al combustible se le denomina por "AIRE 100%" o "AIRE ESTEQUIOMÉTRICO". Ejemplo: reacción de metano (CH₄) con aire teórico.

$$1 \text{ mol de aire} = \frac{1}{4,76} O_2 + \frac{3,76}{4,76} N_2$$



Se observa que por cada mol de oxígeno existen 3,76 moles de nitrógeno, que no reaccionan y que una vez conocidos los compuestos que deben existir en los productos, la ecuación química debe ser balanceada en función del número de átomos de cada elemento.

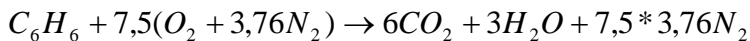
5.2 Exceso y/o deficiencia de aire

Si por alguna razón el combustible no se oxida correctamente en forma completa, parte de él aparecerá en los productos en forma de “CO” – monóxido de carbono – “H₂” e incluso en situaciones extremas “C_xH_y”. Una de las causales puede haber sido el proporcionar aire en una cantidad inferior a la mínima necesaria, situación definida como DEFICIENCIA DE AIRE, en la cual el oxígeno no alcanza a oxidar completamente al combustible.

Con el fin de evitar el caso anterior el aire puede ser suministrado en una cantidad superior a la mínima necesaria, es decir, con “EXCESO DE AIRE”, el cual por su parte provoca la aparición de oxígeno gaseoso en los productos.

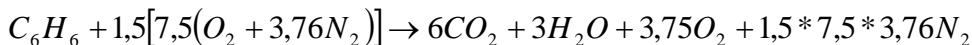
Ejemplo: Reacción de bencina líquida (C₆H₆) con 150% d aire teórico ⇒ 50% exceso de aire, nótese que el exceso o deficiencia de aire será siempre con referencia a la cantidad de aire teórico en la reacción con un determinado combustible.

1.- Plantear la ecuación para 100% de aire teórico:



Cantidad de moles de aire que necesitamos 7,5 * 4,76

2.- Plantear la ecuación para 150% AT ⇒ aparecerá oxígeno libre en los productos, además cambia la cantidad de nitrógeno; deberá balancearse la nueva ecuación:



Si bien con un exceso de aire se logra la “supuesta” oxidación completa del combustible, también significa una disminución en la temperatura de los productos, por cuanto oxígeno y nitrógeno absorben energía del sistema, disminuyendo la transferencia de calor. El término “supuesta oxidación completa”, no garantiza en realidad que esto efectivamente ocurra, ya que puede aparecer “CO” entre los productos de la combustión – índice de combustión incompleto - lo cual se justificaría por turbulencias, agitación o por una velocidad de aire muy alta que impedirían el pleno contacto de partículas de combustible con el oxígeno necesario. Considerando todo lo anterior el porcentaje de exceso de aire necesario dependerá de la aplicación y zona de las características de la combustión misma.

5.3 Utilización del equipo ORSAT

El “ANALIZADOR ORSAT” permitirá determinar el porcentaje de aire teórico presente en la combustión y en algunas ocasiones la composición del combustible. El equipo posee reactivos que absorben el CO_2 , O_2 y CO desde una determinada muestra de gases de combustión.

El análisis volumétrico obtenido usando el equipo de ORSAT, es una base seca; esto es, el agua formada durante la combustión no aparece en el análisis; esto es así, porque la determinación se hace a la temperatura ambiente, que es considerablemente inferior a la del punto de rocío de los productos de la combustión de la mayoría de los hidrocarburos combustibles; además, el gas permanece saturado durante el análisis y éste tiene lugar a presión y temperatura constantes.

Al utilizar el análisis de los productos de la combustión para determinar la relación combustible – aire efectiva, el principio básico que se tiene en cuenta es el de la conservación de la masa de cada uno de los elementos; así al hacerse el cambio de reactivos o productos, se puede hacer balances de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno y de otros elementos que pudieran encontrarse. Puede advertirse, además, que existen relaciones definidas entre las cantidades de varios de esos elementos, de modo que la relación entre el oxígeno y el nitrógeno suministrados con el aire es fija; y también lo es la relación entre el carbono y el hidrógeno si se conoce la composición del hidrocarburo combustible.

Ejemplo de aplicación

Los productos de la combustión de un hidrocarburo combustible de composición desconocida C_xH_y , entrega los siguientes datos en un analizador Orsat.

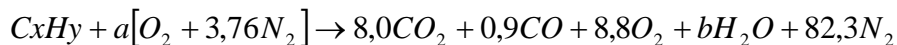
CO_2	8,0 %
CO	0,9 %
O_2	8,8 %
N_2	82,3 %
	100,0 %

Nota: se ha asumido que lo restante del volumen y que no es CO_2 , CO y O_2 es nitrógeno, de ahí el 82,3% de N_2 .

Calcular:

- 1.- La relación aire – combustible.
- 2.- La composición del combustible en base masa.
- 3.- El porcentaje de aire teórico en base masa.

Se plantea una ecuación de combustión para 100 moles de producto seco:



Determinación de coeficientes:

Coef. "a" (aire), considerando al nitrógeno se tiene:

$$a * 3,76 * 2 = 82,3 * 2 \Rightarrow a = 21,9$$

Coef. "b" (agua), considerando el oxígeno de los reactivos que ya está determinado:

$$21,9 * 2 = (8,0 * 2) + (0,9 * 1) + (8,8 * 2) + (b * 1)$$

$$\Rightarrow b = 9,3$$

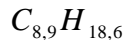
Haciendo el balance de carbono:

$$x = 8,0 + 0,9 = 8,9$$

Finalmente el balance de hidrógeno:

$$y = b * 2 = 9,3 * 2 = 18,6$$

∴ La composición del hidrocarburo es:



Relación aire combustible

$$A/C = \frac{\text{moles aire} * \text{peso molecular aire}}{\text{moles combust.} * \text{peso molec. comb.}}$$

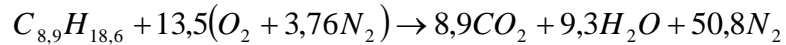
$$A/C = \frac{(21,9 + 82,3) * 28,95}{(8,9 * 12) + (18,6 * 1)} = 24,1 \frac{\text{UM aire}}{\text{UM combust.}}$$

La composición del combustible en base de masas es:

$$\text{CARBONO} = \frac{8,9 * 12}{(8,9 * 12) + (18,6 * 1)} = 0,852 \Rightarrow 85,2\%$$

$$\text{HIDRÓGENO} = \frac{18,6 * 1}{(8,9 * 12) + (18,6 * 1)} = 0,148 \Rightarrow 14,8\%$$

El porcentaje de aire teórico de aire teórico se determina considerando la ecuación teórica de combustión.



Por ser una ecuación con aire estequiométrico no puede existir monóxido de carbono, en cuanto a su relación aire / combustible se tiene:

$$A/C \text{ teor} = \frac{(13,5 + 50,8) * 28,95}{(8,9 * 12) + (18,6 * 1)} = 14,9 \frac{\text{UM aire}}{\text{UM comb.}}$$

$$\therefore \% \text{ aire teórico} = \frac{AC \text{ Real}}{A/C \text{ Teor}} = \frac{24,1}{14,9} = 1,62 = 162\%$$

$$\therefore \text{exceso de aire} = 62\%$$