

Capacitación para técnicos aspirantes a operadores de una refinería de petróleo

MODULO 7 - 1
COMBUSTIÓN

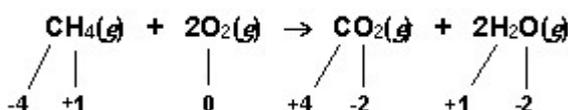
Combustión

Se entiende por **combustión** a toda reacción química de óxido-reducción entre un combustible que actúa como un agente reductor, oxidándose y por lo tanto cediendo electrones al agente oxidante, el comburente, que capta estos electrones produciendo su reducción. Esta reacción va acompañada de un gran desprendimiento de calor (energía calórica).

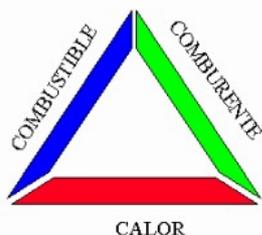
Agente Reductor: Combustible (H₂, CO, Hidrocarburos, ...)

Agente Oxidante: Comburente (O₂, O₃, Cloro, ...)

Ejemplo:



Como se ve, en toda combustión se necesita, como primer requisito un elemento que encienda (arda), denominado **combustible** y como segundo requisito un elemento que produzca la combustión, el **comburente**.



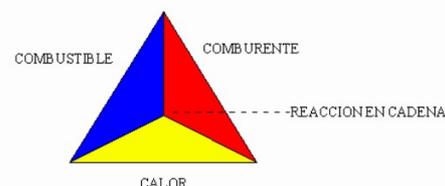
El tercer requisito para que se produzca la combustión, es el **calor**, que aporta la energía necesaria para iniciar la reacción de combustión y así poder mantenerla.

La combustión no puede existir sin la conjunción simultánea del Combustible (material que arde), comburente (oxígeno del aire) y de la energía de activación (calor). Si falta alguno de estos elementos, la combustión no es posible.

A cada uno de estos elementos se los representa como lados de un triángulo, llamado triángulo del fuego, que es la representación de una combustión sin llama o incandescente.

Existe otro factor, "**reacción en cadena**", que interviene de manera decisiva en la combustión.

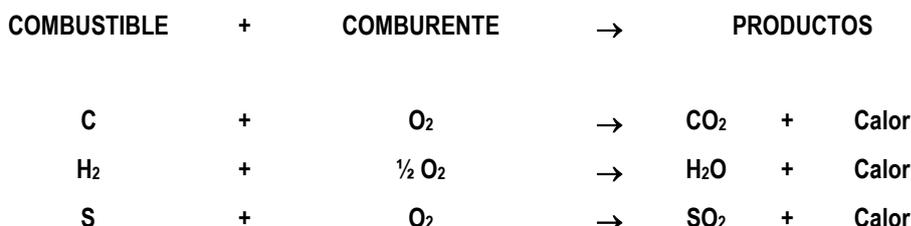
Si se interrumpe la transmisión de calor de una partícula a otra del combustible, no será posible la continuación de la combustión, por lo que ampliando el concepto de Triángulo del Fuego a otro similar con cuatro factores obtendremos el Tetraedro del Fuego, que representa una combustión con llama.



Tipos de Combustión

Combustión Completa:

La combustión se denomina completa o perfecta, cuando toda la parte combustible se ha oxidado al máximo.



La cantidad de Oxígeno teóricamente necesaria para que estas reacciones se lleven a cabo se denomina Oxígeno teórico o estequiométrico.

La combustión llevada a cabo en estas condiciones se denomina estequiométrica o teórica.

Combustión Incompleta:

Si la combustión es incompleta o imperfecta, los productos de la combustión poseen sustancias todavía capaces de ser oxidadas, dando origen a reacciones incompletas, como por ejemplo,



La combustión incompleta aparece cuando el Oxígeno es insuficiente, o en aquellas zonas de las cámaras de combustión en las que el Oxígeno no llega en cantidad suficiente.

En este caso, parte de la energía calórica de la combustión no se libera y permanece en el CO, o sea que en una combustión incompleta no se obtiene la máxima energía disponible en el combustible.

Los productos que no se han oxidado totalmente se denominan inquemados.

Por lo tanto resulta necesario proporcionar un exceso de Oxígeno al combustible para aumentar la posibilidad que reaccione rápida y totalmente en una combustión completa.

En general se tiende a evitar las combustiones incompletas, ya que no sólo van ligadas a pérdidas de energía, sino también a procesos altamente contaminantes (generación de CO, NO_x, etc.).



Combustión estequiométrica

De las reacciones de combustión, se deduce la forma de calcular el aire mínimo o teórico necesario para la combustión, es decir, el aire teóricamente indispensable para que todo el carbono, todo el hidrógeno y todo el azufre de un combustible se combinen con el oxígeno del aire.

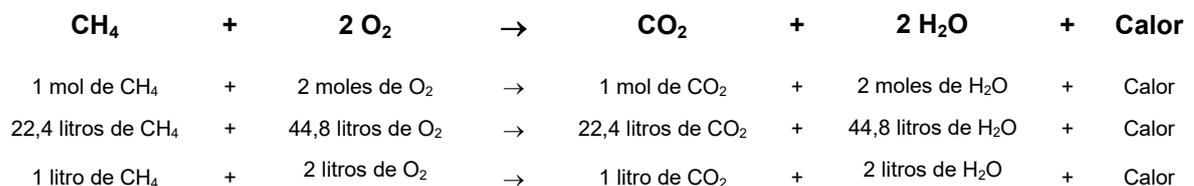
Cálculo de la cantidad de aire mínima necesaria

El oxígeno para la combustión del fuel proviene del aire el cual contiene 1/5 ó un 21% de oxígeno en volumen (23% en peso). Por lo tanto 100 litros de aire contendrán solamente 21 litros de oxígeno.

Los hidrocarburos son combinaciones de carbono e hidrógeno.

Cuando un **hidrocarburo se quema completamente**, el carbono y el hidrógeno se combinan con el oxígeno para formar **“anhídrido carbónico”** y **“agua”**.

Por ejemplo si tomamos el Metano (CH₄):



En vez de referirnos a una molécula de metano, podemos cambiar esta por un litro o cualquier otro volumen.

Un litro de metano reacciona con dos litros de oxígeno para formar un litro de anhídrido carbónico y dos litros de agua (vapor).

La cantidad exacta de aire (no oxígeno) que se precisa puede calcularse fácilmente:

Teóricamente se necesitan 2 litros de O₂.

*El aire contiene solamente un 21% de O₂. Por lo tanto, se necesitarán **9,52 litros de aire**.*

*En otras palabras, **para conseguir los dos litros de oxígeno que se requieren para la combustión completa de un litro de metano, se necesitan 9,52 litros de aire.***

El oxígeno del aire está diluido con nitrógeno, el cual no toma parte en la reacción de combustión, pero impide que muchas moléculas de oxígeno reaccionen. Por lo tanto para las condiciones normales de combustión, se precisa siempre un cierto exceso de oxígeno para asegurarse de que la combustión es completa.

Si la combustión de un fuel tiene lugar sin la suficiente cantidad de oxígeno, el fuel no quedará completamente quemado, y por lo tanto contendrá todavía energía "no liberada".

La combustión "incompleta" de los hidrocarburos, da lugar a Monóxido de Carbono y agua, en vez de anhídrido carbónico y agua, formada en la combustión completa.

En este caso las reacciones serían:

Tomando el ejemplo del Metano,



El anhídrido carbónico es un producto final de una combustión completa y no contiene energía calorífica que pueda ser liberada por medio de una combustión ordinaria.

Así pues, el anhídrido carbónico no es un gas combustible. Sin embargo, el monóxido de carbono contiene energía y puede ser quemado, liberando energía calorífica.

Propagación del calor

Todo cuerpo con una determinada cantidad de calor, tiene la propiedad de cederlo a otro cuerpo, siempre que éste se encuentre a menor temperatura.

Es decir, existe un flujo térmico que consiste en la cesión del calor de los puntos de mayor temperatura. De esa manera, entonces, la energía térmica se transfiere del nivel térmico o temperatura más alto al más bajo, hasta alcanzar un estado de equilibrio o igual temperatura.

Los fenómenos que intervienen en la transmisión del calor son tres:

1. **Conducción**
2. **Convección**
3. **Radiación**

1 - Conducción

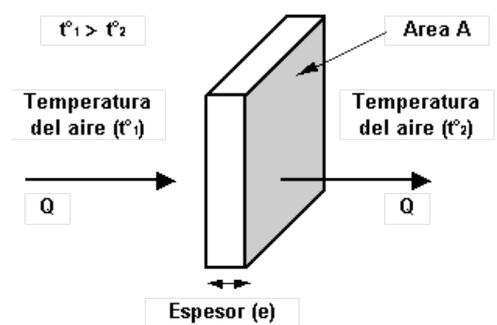
El calor pasa de un foco al otro por contacto directo entre ambos.

La transmisión del calor por conducción es típica de los sólidos. Se origina por la agitación molecular provocada por el calor que se transmite progresivamente, sin modificar la distancia relativa de las moléculas.

La velocidad con que el material deja pasar el calor por conducción, depende de su conductividad que es una propiedad que tiene cada material.

Hay materiales que conducen más que otros, por ejemplo, los metales.

La cantidad de calor transmitido por conducción depende de cuatro factores:



 Gradiente de temperatura ($t_2 - t_1$): Es la diferencia de temperatura entre los focos.

- 📌 Área de transmisión (A): Es la superficie de contacto.
- 📌 Espesor (e): Es el grosor de la superficie de contacto.
- 📌 Conductividad térmica (k): Es un propiedad del material

El calor transferido por conducción es:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{e}$$

La cantidad de calor transferido por conducción aumenta con:

- 📌 Aumento del gradiente de temperatura.
- 📌 Aumento de la superficie de contacto.
- 📌 Disminución del espesor.
- 📌 Aumento de la conductividad térmica.

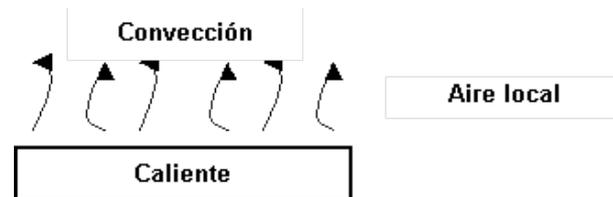
Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes.

2 - Convección

El calor se transmite a través de un fluido al crearse en el propio fluido una turbulencia ya sea natural o forzada.

La forma de transmisión de calor por convección es propia de los fluidos, por ejemplo, el caso del aire o del agua.

Por efecto de la variación de su peso debido a un aumento o disminución de temperatura, se establece en ellos una circulación permanente y continua. Ese movimiento del fluido produce, entonces, la transferencia del calor por convección, que se orienta desde los puntos calientes a los fríos.



La cantidad de calor transmitida por convección depende de tres factores:

- 📌 Gradiente de temperatura ($t_2 - t_1$): Al igual que la conducción.
- 📌 Área de transmisión (A): Al igual que la conducción.
- 📌 Coefficiente de convección (h): Depende de las condiciones fluido-dinámicas del sistema (grado de turbulencia).

El calor transferido por convección es:

$$Q = h \cdot A \cdot (t_2 - t_1)$$

La cantidad de calor transferida por convección aumenta al aumentar los tres factores mencionados.

El coeficiente de convección aumenta con la velocidad de movimiento del fluido caliente.

El análisis de la convección está basado en datos experimentales que se presentan mediante las llamadas correlaciones. Existen casos que permiten abordarlos analíticamente, pero son los menos y no son prácticos desde el punto de vista ingenieril.

3 - Radiación

La forma de transmisión del calor por radiación se produce en el vacío igual que la radiación de la luz en forma de ondas electromagnéticas. De esa manera el proceso de transferencia de calor por radiación no está vinculado a soporte o vehículo material alguno, no pudiendo ser explicado como en los casos anteriores en términos de moléculas que chocan o se desplazan.

Se define entonces la radiación térmica como la transmisión de calor de un cuerpo a otro **sin contacto directo**, en forma de energía radiante.

Todos los cuerpos absorben y además emiten energía radiante, dependiendo de la temperatura a que se encuentren y de sus características físicas.

Los cuerpos calientes emiten mayor cantidad de calor que los fríos, habiendo un continuo intercambio de energía radiante entre las sustancias que se encuentran a distintas temperaturas.

En general, superficies lisas y brillantes reflejan más de lo que absorben.

Para los cálculos de radiación se toma como referencia un teórico **cuerpo negro**, cuya superficie de absorción será perfecta.

La cantidad de calor transmitida por radiación depende de **cuatro factores**:

- 
Diferencia de temperatura ($T_2 - T_1$): Es la diferencia de temperatura entre focos ya que ambos focos emiten energía (en K).
- 
Área de superficial (A): Es la superficie de emisión o recepción según la base que se elija.
- 
Emisividad (ϵ). Representa la radiación emitida por una superficie respecto a la que emitiría el cuerpo negro.
- 
Constante de Stefan-Boltzman (σ): su valor depende de las unidades utilizadas.

La cantidad de calor transmitida por radiación es:

$$Q = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_2 - T_1)^4$$

En esta fórmula vemos que la radiación depende fuertemente de la temperatura, a través de la cuarta potencia.

