

Generadores de vapor

Combustión: conceptos fundamentales

Natalia Wener, Federico Licandro

TECNÓLOGO INDUSTRIAL MECÁNICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

2024

Combustión

Definición

Es una **reacción química de oxidación** entre un combustible y un comburente en la cual se **libera** gran cantidad de **energía**.

- Combustible sólido, líquido o gaseoso. Se oxida
- Comburente (usualmente oxígeno presente en el aire). Se reduce
- Reacción muy rápida y exotérmica
- Se manifiesta en forma de calor y luz (llama o incandescencia)
- Transformación de la energía almacenada en los enlaces químicos del combustible en calor útil

Combustión

Cuatro factores simultáneos para que ocurra la combustión:

- Una mezcla de **combustible y comburente** (en determinadas proporciones)
- **Temperatura** suficiente para que ocurra la ignición de la mezcla (energía de activación)
- **Tiempo** para que trascurren las reacciones en cadena



Características de la combustión

Reacción gas - gas

- Líquidos - Previa evaporación
- Sólidos - Previa volatilización

Reacción sólido - gas

- Únicamente carbón (ej. hollín)

Buena combustión: las tres T

Tiempo - Temperatura - Turbulencia

La combustión es un proceso de reacción en cadena, complejo, compuesto por un gran número de **reacciones intermedias o elementales**.

Se expresa la reacción de combustión como una **única ecuación global**:

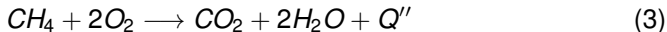
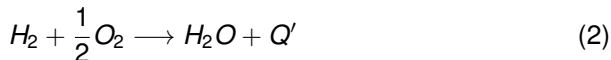
REACTIVOS → *PRODUCTOS*

Combustión

Expresión Global

Combustible + Comburente (reactivos) → Productos

Ejemplos:



Combustibles

Definición

Un **combustible** es cualquier **sustancia capaz de liberar energía** mediante la recombinación de sus átomos debido a una **reacción química** con otra sustancia oxidante.

- La mayoría son **orgánicos**, lo cuál significa que su **composición** está basada en **carbono (C)**. Además pueden contener otros elementos como **hidrógeno (H)**, **oxígeno (O)** y **nitrógeno (N)** en diversas proporciones. También pueden contener **azufre (S)**.
- En minoría están los **inorgánicos**, los cuáles no tienen carbono en su molécula. Están compuestos por **metales combustibles** como **magnesio (Mg)** y **sodio (Na)**.
- Las sustancias **no aptas para ser combustibles** son aquellas que requerirían **temperaturas muy altas para su ignición** o que generarían residuos tóxicos.

Clasificación de los combustibles

Se clasifican según **estado de agregación, obtención y calidad.**

	SÓLIDOS	LÍQUIDOS	GASEOSOS
Naturales	Biomasa Carbón mineral	Petróleo	Gas Natural
Elaborados	Coke de carbón, Carbón vegetal Briquetas y pellets	Destilados de petróleo	Gas licuado de petróleo Gas de síntesis
Renovables	Carbón vegetal Biomasa	Etanol y biodiesel	Biogas Gas de síntesis
Fungibles	Carbón mineral	Destilados de petróleo	Gas Licuado de petróleo Gas Natural

Ejemplos de combustibles

Biomasa: cualquier material proveniente, directa o indirectamente, de reacciones de fotosíntesis a corto plazo. Materia orgánica no fósil y biodegradable proveniente de plantas, animales o microorganismos.



Caracterización de combustibles

Caracterización de **propiedades físicas, químicas, térmicas y fluidodinámicas** de un combustible: primer y más importante paso en la investigación de sus aplicaciones.

Principales análisis y propiedades

- Análisis elemental (o último) - *CHONS*
- Análisis próximo (o inmediato)
- Humedad
- Poder calorífico
- Límites de inflamabilidad
- Temperatura de ignición (energía de activación)
- Octanaje (índice de octano)

Otras características: Temperatura de autoignición, temperatura de fusión de cenizas, densidad, viscosidad, tamaño de grano (distribución granulométrica), porosidad y esfericidad.

Composición elemental

Los principales elementos que componen los combustibles son el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y el azufre (S).

Tipo	Composición
Gaseoso	% Volumen (o molar)
Líquido	% Volumen o masa
Sólido	% Masa

Composición elemental

Hidrocarburos: Combustibles orgánicos compuestos por C y H

Alcanos: C_nH_{2n+2}

Metano: CH_4

Etano: C_2H_6

Propano: C_3H_8

Butano: C_4H_{10}

Pentano: C_5H_{12}

Hexano: C_6H_{14}

Alquenos: C_nH_{2n}

-

Eteno: C_2H_4

Propeno: C_3H_6

Buteno: C_4H_8

Propeno: C_5H_{10}

Hexeno: C_6H_{12}

Combustibles gaseosos

Ejemplo: Gas Natural (GN)

Table: Composición elemental del Gas Natural (% en volumen)

Metano (CH_4)	79-97
Etano (C_2H_6)	0,1-11,4
Propano (C_3H_8)	0,1-3,7
Butano (C_4H_{10})	<0,7
Nitrógeno (N_2)	0,5-6,5
Dióxido de carbono (CO_2)	<1,5

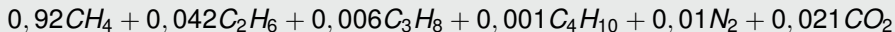
Combustibles gaseosos

Ejemplo: Gas Natural

Table: Composición elemental del Gas Natural (% en volumen) - **Montevideo Gas**

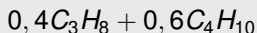
Metano (CH_4)	92,0%
Etano (C_2H_6)	4,2%
Propano (C_3H_8)	0,6%
Butano (C_4H_{10})	0,1%
Nitrógeno (N_2)	1,0%
Dióxido de carbono (CO_2)	2,1%

Composición elemental de 1 *kmol* de gas natural

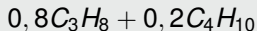


Combustibles gaseosos

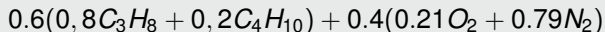
Composición elemental de 1 *kmol* de Supergas



Composición elemental de 1 *kmol* de Propano industrial



Composición elemental de 1 *kmol* de Aire Propanado



Combustibles líquidos

Table: Composición elemental del Petróleo (% en masa)

Carbón (<i>C</i>)	83-85
Hidrógeno (<i>H</i>)	10-14
Oxígeno (<i>O</i>)	0,05-1,5
Nitrógeno (<i>N</i>)	0,1-2,0
Azufre (<i>S</i>)	0,05-6,0
Minerales	<0,1

Combustibles líquidos

Fuel Oil

El resultado del análisis último de un fuel oil, derivado de petróleo, puede expresarse en fracciones másicas como $C = 85\%$, $H = 14\%$, $S = 1\%$

- $C.$ $0,85 \text{ kg}_C/\text{kg}_{Fuel}$

- $H.$ $0,14 \text{ kg}_H/\text{kg}_{Fuel}$

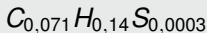
- $S.$ $0,01 \text{ kg}_S/\text{kg}_{Fuel}$

- $C.$ $\frac{0,85}{12} = 0,071 \text{ kmol}_C/\text{kg}_{Fuel}$

- $H.$ $\frac{0,14}{1} = 0,14 \text{ kmol}_H/\text{kg}_{Fuel}$

- $S.$ $\frac{0,01}{32} = 0,0003 \text{ kmol}_S/\text{kg}_{Fuel}$

Composición elemental de 1 kg de Fuel Oil



Combustibles sólidos

Para el caso de los **combustibles sólidos**, debido a la imposibilidad de conocer la composición molecular de estos, se trabaja con las **fracciones másicas** de cada elemento que lo compone.

Table: Composición elemental de Biomosas (% en masa)

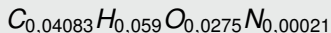
Biomasa	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>
Madera Eucalipto	49,0	5,9	44,0	0,3	0,01
Madera de Pino	49,3	6,0	44,4	0,06	0,03
Bagazo de Caña	44,8	5,4	39,6	0,4	0,01
Cascara de Arroz	41,0	5,9	35,9	0,4	0,02

Combustibles sólidos

Madera de Eucalipto:

- C. $\frac{0,49}{12} = 0,04083 \text{ kmol}_C/\text{kg}_{Fuel}$
- H. $\frac{0,059}{1} = 0,059 \text{ kmol}_H/\text{kg}_{Fuel}$
- O. $\frac{0,44}{16} = 0,0275 \text{ kmol}_O/\text{kg}_{Fuel}$
- N. $\frac{0,003}{14} = 0,00021 \text{ kmol}_N/\text{kg}_{Fuel}$
- S. $\frac{0,0001}{32} \approx 0 \text{ kmol}_S/\text{kg}_{Fuel}$

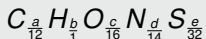
Composición elemental de 1 kg de Eucalipto



Combustibles sólidos - expresión genérica

- Se tiene un combustible del cual se conoce su composición elemental en fracción másica: $A = (\%C)$, $B = (\%H)$, $C = (\%O)$, $D = (\%N)$ y $E = (\%S)$.
- Se definen $a = \frac{A}{100}$, $b = \frac{B}{100}$, $c = \frac{C}{100}$, $d = \frac{D}{100}$ y $e = \frac{E}{100}$ como los kilogramos de cada elemento por kilogramo de combustible.

Composición elemental de 1 kg de Combustible



Análisis próximo (o inmediato)

La composición inmediata, para combustibles sólidos, hace referencia a los porcentajes en masa de los **volátiles** (V), **carbono fijo** (CF) y **cenizas** (Ash) que componen al combustible.

Volátiles: Gases generados en la pirólisis (degradación térmica de la materia en atmósfera inerte). Un gran contenido facilita la ignición.

Carbono fijo: Combustible sólido. Matriz carbonosa.

Cenizas: Materia inorgánica, residuo de la combustión completa. Inherente al combustible o agregado en la manipulación. Problemas de operación de equipos, *slagging* y *fouling*

Análisis próximo (o inmediato)

Parámetros del análisis (ej. Biomasa):

Humedad: 105°C (masa constante)

Genizas: 575°C (masa constante)

Volátiles: 950°C durante 7 min (crisol tapado para atmósfera inerte)

Carbono fijo: Por diferencia



Figure: Ensayo análisis próximo

$$M_{Total} = M_{CF} + M_V + M_{Ash} + M_{W^*}$$

$$W^*(\%) = \frac{M_{Total} - M_{Seco}}{M_{Seco}} \times 100$$

$$Ash(\%) = \frac{M_{Ash}}{M_{Seco}} \times 100$$

$$V(\%) = \frac{M_{Seco} - M_{CF+Ash}}{M_{Seco}} \times 100$$

Poder calorífico: definición

El **poder calorífico** (PC o Q) de un combustible se define como el **calor liberado**, por unidad de combustible, en una reacción de **combustión completa**, donde el estado de los **productos** es **igual** al estado de los **reactivos**.

Tipos de PC

- Poder calorífico superior (PCS o Q^s)
- Poder calorífico inferior (PCI o Q^i)
- Poder calorífico a presión constante (Q_p)
- Poder calorífico a volumen constante (Q_v)

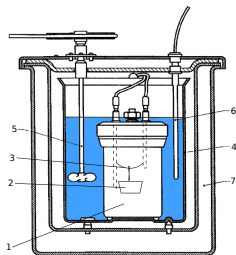


Figure: Bomba calorimétrica

Nota: Los procesos de combustión en calderas son a presión prácticamente constante.

Poder calorífico superior

En el ensayo de poder calorífico superior el agua que está en los productos de la combustión se encuentra en estado líquido (condensó).



Figure: Interpretación del PCS

Poder calorífico inferior

En el ensayo de poder calorífico inferior el agua que está en los productos de la combustión se encuentra en estado de vapor, por lo que no se cuenta con la energía de condensación del agua.

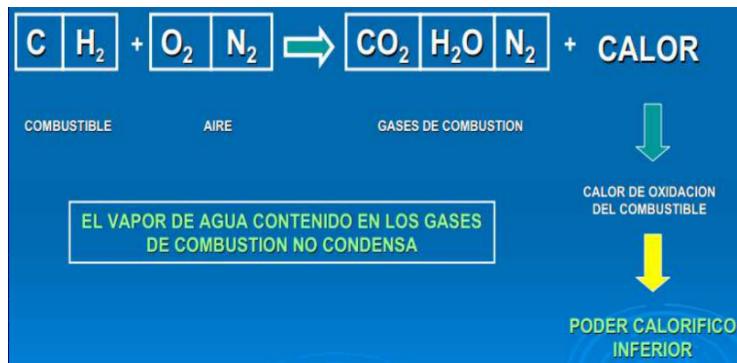


Figure: Interpretación del PCI

Relación entre PCS y PCI

$$PCS = PCI + 9 \cdot H \cdot h_{fg,0}$$

- PCS y PCI son el poder calorífico superior e inferior a la temperatura de referencia, $kJ/unidad_{Fuel}$ o $kcal/unidad_{Fuel}$
- 9 es la relación agua/hidrógeno en una molécula de agua, kg_{H_2O}/kg_H
- H representa la cantidad másica de hidrógeno en 1 unidad de combustible (1 kilogramo o 1 kmol), $kg_H/unidad_{Fuel}$
- $h_{fg,0}$ es la entalpía latente del agua a la temperatura de referencia, kJ/kg_{H_2O} o $kcal/kg_{H_2O}$

Nota: la temperatura de referencia utilizada usualmente es $T_{ref} = T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Base del combustible

Para **combustibles sólidos** existen tres bases distintas para expresar sus propiedades:

- Base total (o húmeda).
- Base seca (incluye las cenizas).
- Base seca sin cenizas.

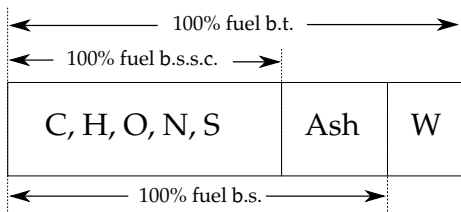


Figure: Bases del combustible

Unidad básica del combustible

Base total o húmeda (b.h. o w.b.)

Composición elemental de combustible:

$$A + B + C + D + E + Ash + W = 100\% \quad (4)$$

Donde A, B, C, D, E son los porcentajes máxicos de los elementos C, H, O, N y S respectivamente.

Composición inmediata:

$$CF + V + Ash + W = 100\% \quad (5)$$

Unidad básica del combustible

Base seca:

Composición elemental de combustible: $A' + B' + C' + D' + E' + Ash' = 100\%$

Composición inmediata: $CF' + V' + Ash' = 100\%$

Base seca sin cenizas (b.s.s.c. o d.a.f): Composición elemental de com-

bustible: $A'' + B'' + C'' + D'' + E'' = 100\%$

Composición inmediata: $CF'' + V'' = 100\%$

Usualmente la composición elemental se presenta en base seca sin cenizas, la composición inmediata en base seca, la humedad en base total y el poder calorífico en base seca.