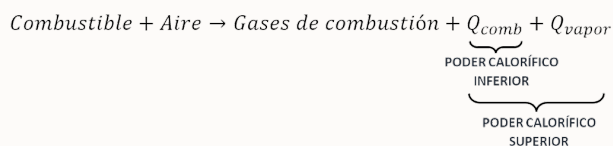


Nomenclatura

PCI [$kcal/kg_{comb}$]	Poder calorífico inferior
PCS [$kcal/kg_{comb}$]	Poder calorífico superior
H, S, C, O	Composición gravimétrica respectiva al elemento (cant. centesimal)
g	Composición gravimétrica (cant. centesimal)
r	Composición volumétrica (cant. centesimal)
H ₂ O	% de humedad en el combustible
G[kg]	Peso
m	Masa
c _L	Calor latente
c _p	Calor específico
1 m ³	1 tn de vapor

UNIDAD 2 COMBUSTIÓN

Poder calorífico



Relación entre los poderes caloríficos

$$PCI = PCS - Q_{vapor} = PCS - 579G$$

$$PCI = PCS - 579(9H + H_2O)$$

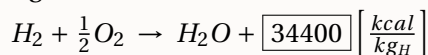
Q_{vapor} Calor de condensación del vapor de agua

G % en peso del agua formada por la combustión más la humedad del combustible.

597 Calor de condensación del agua a 0°C.

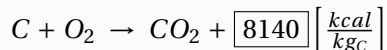
HIDRÓGENO

Reacción química de la combustión completa del hidrógeno

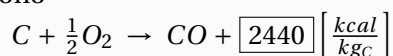


CARBONO

Reacción química de la combustión completa del carbono

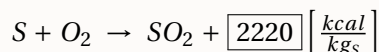


Reacción química de la combustión incompleta del carbono



AZUFRE

Reacción química de la combustión para el azufre.



PC Método analítico

FÓRMULA DE DULONG

PC de un combustible seco

$$PCS = PCI = 8140 C + 34400 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2220 S$$

PCI de un combustible húmedo

$$PCI = 8140 C + 34400 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2220 S - 600 H_2O$$

FÓRMULA DE HUTTE

PCS de un combustible húmedo

$$PCI = 8100 C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 H_2O$$

FÓRMULA DE LA ASOCIACIÓN DE INGENIEROS ALEMANES

PCI de un combustible húmedo

$$PCI = 8080 C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 H_2O$$

$\frac{O}{8}$ % de H₂ en peso combinado con el O₂ del combustible dando *agua de combinación*

$H - \frac{O}{8}$ % de *hidrógeno disponible* en peso que se oxida con el aire (O₂) para dar *agua de formación*

PC Método práctico

CALORÍMETRO DE MAHLER Y KROEGER

Supone que el calor Q generado dentro de la bomba calorimétrica es absorbido por los elementos que la rodean:

- Agua contenida (w)
- Agitador
- Termómetro
- Bomba
- Recipiente

Y dicho calor es cedido por la combustión y el alambre:

$$Q = Q_{combustible} + Q_{alambre}$$

$$= (m_w c_{p_w} + E_{aparato}) \Delta t$$

$$PCS = \frac{Q_{comb}}{G_{comb}}$$

$$PCS = \frac{(m_w c_{p_w} + E_{aparato}) \Delta t - m_{alam} c_{Lalam}}{G_{comb}}$$

$$PCI = PCS - 600 \frac{G_w}{G_{comb}}$$

G_w Peso total de agua existente
= *papel húmedo* – *papel seco*

G_{comb} Peso de combustible quemado

Aire mínimo

COMPOSICIÓN DEL AIRE ATMOSFÉRICO

En volumen	21 % O ₂
	79 % N ₂
En peso	23 % O ₂
	77 % N ₂

CANTIDAD TEÓRICA O MÍNIMA DE AIRE

$$V_{at} = 8,89 C + 26,27 Hd + 3,34 S$$

$$G_{at} = 11,6 C + 34,78 Hd + 4,35 S$$

HIDRÓGENO DISPONIBLE

$$Hd = H - \frac{O_2}{8}$$

EXCESO DE AIRE

En la práctica se trabaja con un exceso de aire de 3-4 % para una combustión completa.

$$V_{exc} = V_{at} (1 + e)$$

e Porcentaje de exceso de aire

Donde:

$$V_{at} \left[\frac{m_{aire}^3}{kg_{comb}} \right] \quad \text{Porcentaje en volumen del aire teórico}$$

$$G_{at} \left[\frac{kg_{aire}}{kg_{comb}} \right] \quad \text{Porcentaje en peso del aire teórico}$$

Gases de combustión

$$g_{humo} = g_{CO_2} + g_{H_2O} + g_{S_2O} + g_{N_2} + g_w$$

$$g_{humo} = (3,67 C + 9 Hd + 2 S) + 3,35 (2,67 C + 8 Hd + S) + g_{agua}$$

$$V_{humo} = 1,897 C + 11,2 Hd + 0,7 S + 3,76 (1,867 C + 5,6 Hd + 0,7 S) + 1,24 g_{agua}$$

g_{humo} (kg de humo / kg de combustible)

V_{humo} (m³ de humo / kg de combustible)

g_{agua} (kg de agua / kg de combustible)

Exceso de aire

$$g_{hum} = 1 + e G_{at}$$

$$G_{at} = 11,6 C + 37,38 H d + 4,35 S$$

$$g_{hum} = g_{sec} + 9 H$$

$$g_{sec} = C g_{sec/C} = C \left(\frac{\sum \mu_i r_i}{\mu_C (r_{CO_2} + r_{CO})} \right)$$

Desarrollo para llegar a g_{sec}

$$g_{sec/C} = \frac{g_{sec}''}{g_C'}$$

$$g_{sec}'' = \sum_{i=1}^n g_i = \sum_{i=1}^n \mu_i r_i$$

 e Porcentaje de exceso de aire μ Peso molecular (kg / kmol)9 H **Agua de formación** (kg de agua / kg de combustible) g_{hum} (kg de gases húmedos / kg de combustible) g_{sec} (kg de gases secos / kg de combustible) $g_{sec/C}$ (kg de gases secos / kg de carbono)

$$g_C' = \sum_{i=1}^n \mu_C r_{iC}$$

 g_{sec}'' (kg gases secos / kmol combustible) g_C' (kg carbono / kmol combustible)

Característica de una caldera

 G_v Vapor producido (kg / h) R_e Relacion esteq. 9,7 para gas natural λ Exceso de aire $\frac{21}{21 - O_2}$ v Velocidad gas A_2, B parametros dependen gas/caldera? P_{ab} va en MCA P_C en combustible sin quemar es la potencia calorifica del carbono, 8140 kcal/kg

%C es Carbono sin quemar, en las cenizas

 $C_p \text{ humo}$ se puede aproximar 0.24 $\frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C}$ C_v vapor sobrecalentado 0.46 $\frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C}$

Calor absorbido por agua

$$Q = \frac{G_v \Delta h_{agua}}{G_{comb}}$$

Capacidad

$$Q = G_r \Delta h$$

Potencia (HP)

$$P = \frac{G_v (\Delta h)}{543,4(kcal/kg) \cdot 15,66(kg)} = \frac{G_v (\Delta h)}{8510(kcal/hp \cdot h)}$$

Aire combustion

$$A_c = G_c R_e \lambda$$

Ejercicio dimensionamiento?

Diametro tubo gas

$$D = \sqrt{\frac{365,35 G_c}{v P_{ab}}} \quad (v < 40m/s)$$

Presión abs gas

$$P_{ab} = P_{atm} + P_{carga} + P_{contra}$$

Pérdida gases

$$pg = (T_{gas} - T_{amb}) \left(\frac{A_2}{21 - O_2} + B \right)$$

Rendimiento

$$\eta = 100 - pg$$

Calor quemador

$$Q = \frac{G_v (\Delta H)}{\eta_{caldera} n_{quemadores}}$$

PERDIDAS

Gases combustión $Q = G_g c_{p \text{ humo}} (T_{gas} - T_{aire})$ Humedad de comb. $Q = G_{H_2O} \Delta h_{H_2O}$ Comb. sin quemar $Q = \frac{G_{escoria}}{G_{comb.}} P_C C$ Humedad comb. durante combustión $Q = 9 G_{hum} \Delta h_{agua}$ Exceso aire $Q = G_{aire} c_{p \text{ humo}} (T_{gas} - T_{aire})$ Humedad aire $Q = G_{aire} c_v (T_{gas} - T_{aire})$

Pérdidas por radiación

Pérdidas circunstanciales

Intercambiador (superficies de intercambio) S superficie de intercambio n número de tubos l longitud tubos d diametro tubos K coef total de transmisión de calor α coeficientes peliculares
(humo/vapor/agua)

$$S = n l \pi d$$

$$Q = S K \Delta T_m$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

 e espesor tubo ΔT_m diferencia log de temp λ conductividad térmica tubo