



TEMA 4: BALANCES TÉRMICOS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN

ACTIVIDADES PRÁCTICAS, SOLUCIONES (I)

Blanca M^a Caballero Iglesias
Maite de Blas Martín

Escuela de Ingeniería de Bilbao
Ingeniería Química y del Medio Ambiente

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

SOLUCIÓN A LAS ACTIVIDADES PRÁCTICAS (I)

I) Problemas de balances térmicos:

Problemas 4.1 y 4.2



Imagen publicada en Pixabay
bajo dominio público [\[1\]](#)

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (I)

a) Cálculo del volumen de aire teórico:

Al ser un combustible sólido, se tomará como referencia **100 kg de fuel**. También se indican las reacciones de combustión completa:

| Composición | % peso | Reacción combustión |
|-------------|--------|--|
| C | 87 | $C + O_2 \rightarrow CO_2$ |
| H | 10 | $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ |
| S | 1,5 | $S + O_2 \rightarrow SO_2$ |
| Humedad | 0,5 | - |
| Sedimentos | 10 | - |

$$\frac{87 \text{ kg C}}{100 \text{ kg fuel}} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}}{12 \text{ kg C}} \cdot \frac{1 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol C}} \cdot \frac{22,4 \text{ m}^3 \text{N } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} = 1,624 \frac{\text{m}^3 \text{N } O_2}{\text{kg fuel}}$$

$$\frac{10 \text{ kg H}}{100 \text{ kg fuel}} \cdot \frac{1 \text{ kmol } H_2}{2 \text{ kg H}} \cdot \frac{1/2 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } H_2} \cdot \frac{22,4 \text{ m}^3 \text{N } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} = 0,560 \frac{\text{m}^3 \text{N } O_2}{\text{kg fuel}}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (II)

$$\frac{1,5 \text{ kg S}}{100 \text{ kg fuel}} \cdot \frac{1 \text{ kmol S}}{32 \text{ kg S}} \cdot \frac{1 \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol S}} \cdot \frac{22,4 \text{ m}^3 \text{N O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} = 0,011 \frac{\text{m}^3 \text{N O}_2}{\text{kg fuel}}$$

Sumando se obtiene el **oxígeno teórico**:

$$O_T = 1,624 + 0,560 + 0,011 = 2,195 \frac{\text{m}^3 \text{N O}_2}{\text{kg fuel}}$$

Y con la proporción de oxígeno en el aire seco, **el aire teórico**:

$$2,195 \frac{\text{m}^3 \text{N O}_2}{\text{kg fuel}} \cdot \frac{100 \text{ m}^3 \text{N aire}}{21 \text{ m}^3 \text{N O}_2} = 10,45 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{kg fuel}} \longrightarrow A_T = 10,45 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{kg fuel}}$$

Cálculo del volumen de gases de combustión (combustión teórica)

$$\frac{87 \text{ kg C}}{100 \text{ kg fuel}} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}}{12 \text{ kg C}} \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}_2}{1 \text{ kmol C}} \cdot \frac{22,4 \text{ m}^3 \text{N CO}_2}{1 \text{ kmol CO}_2} = 1,624 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{kg fuel}}$$

$$\frac{1,5 \text{ kg S}}{100 \text{ kg fuel}} \cdot \frac{1 \text{ kmol S}}{32 \text{ kg S}} \cdot \frac{1 \text{ kmol SO}_2}{1 \text{ kmol S}} \cdot \frac{22,4 \text{ m}^3 \text{N SO}_2}{1 \text{ kmol SO}_2} = 0,011 \frac{\text{m}^3 \text{N SO}_2}{\text{kg fuel}}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (III)

$$10,45 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{kg fuel}} \cdot \frac{79 \text{ m}^3\text{N N}_2}{100 \text{ m}^3\text{N aire}} = 8,256 \frac{\text{m}^3\text{N N}_2}{\text{kg carbón}}$$

\downarrow
 N_2 del aire

Sumando se obtiene el volumen total de gases de combustión:

$$V_T = 1,624 + 0,011 + 8,256 = 9,89 \longrightarrow \boxed{V_T = 9,89 \frac{\text{m}^3\text{N gases}}{\text{kg fuel}}}$$

b) Exceso de aire. Volumen de aire y gases de combustión

Se plantean el balance de oxígeno y el balance de gases de combustión en la combustión. Siendo la combustión completa:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\%O_2}{100} \cdot V_0 &= \frac{21}{100} \cdot (n-1) \cdot A_T \\ V_0 &= V_T + (n-1) \cdot A_T \end{aligned} \right\} \longrightarrow \frac{\%O_2}{100} \cdot [V_T + (n-1) \cdot A_T] = \frac{21}{100} \cdot (n-1) \cdot A_T$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (IV)

Sustituyendo en la ecuación anterior "n" es la única variable desconocida:

$$\frac{4,4}{100} [9,89 + (n - 1) \cdot 10,45] = \frac{21}{100} \cdot (n - 1) \cdot 10,45 \longrightarrow n = 1,25$$

$$A_0 = nA_T = 1,25 \cdot 10,45 \longrightarrow A_0 = 13,06 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{kg fuel}}$$

$$V_0 = V_T + (n - 1) \cdot A_T = 9,89 + (1,25 - 1) \cdot 10,45 \longrightarrow V_0 = 12,50 \frac{\text{m}^3\text{N gases}}{\text{kg fuel}}$$

c) Aire ambiental

Cálculo del vapor de agua presente en el aire de combustión: $w_0 = \frac{\phi P_{\text{sat}}(T)}{P - \phi P_{\text{sat}}(T)} A_0$

$$w_0 = \frac{(0,50 \cdot 23,78) \text{ mmHg}}{(750 - 0,50 \cdot 23,78) \text{ mmHg}} \cdot 13,06 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{kg fuel}} \longrightarrow w_0 = 0,21 \frac{\text{m}^3\text{N H}_2\text{O}}{\text{kg fuel}}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (V)

El aire húmedo en condiciones normales: $A_R = A_0 + w_0$

$$A_R = 13,06 + 0,21 \longrightarrow A_R = 13,27 \frac{\text{m}^3\text{N aire húmedo}}{\text{kg fuel}}$$

El aire ambiental (en condiciones ambientales): $\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T}$

$$\frac{760 \text{ mmHg} \cdot 13,27 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{kg fuel}}}{273 \text{ K}} = \frac{750 \text{ mmHg} \cdot V}{(25 + 273) \text{ K}} \longrightarrow V = 14,68 \frac{\text{m}^3 \text{ aire ambiental}}{\text{kg fuel}}$$

d) Volumen de gases de combustión. Es necesario incluir el vapor de agua:

- Humedad del aire: $w_1 = 0,21 \frac{\text{m}^3\text{N H}_2\text{O}}{\text{kg fuel}}$

- Humedad del combustible. Para 100 kg de fuel: 0,5 kg agua + 40 kg vapor

Para pulverizar el fuel: 0,4 kg H₂O/kg fuel

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (VI)

$$\frac{40,5 \text{ kg H}_2\text{O}}{100 \text{ kg fuel}} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \cdot \frac{22,4 \text{ m}^3\text{NH}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} = 0,504 \frac{\text{m}^3\text{NH}_2\text{O}}{\text{kg fuel}} \rightarrow w_2 = 0,504 \frac{\text{m}^3\text{NH}_2\text{O}}{\text{kg fuel}}$$

- El vapor de agua resultante de la combustión del hidrógeno del combustible:

$$\frac{10 \text{ kg H}}{100 \text{ kg fuel}} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2}{2 \text{ kg H}} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2} \cdot \frac{22,4 \text{ m}^3\text{NH}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} = 1,12 \frac{\text{m}^3\text{NH}_2\text{O}}{\text{kg fuel}} \rightarrow W_3 = 1,12 \frac{\text{m}^3\text{NH}_2\text{O}}{\text{kg fuel}}$$

$$\text{Sumando: } 0,21 + 0,504 + 1,12 = 1,834 \frac{\text{m}^3\text{NH}_2\text{O}}{\text{kg fuel}}$$

Para calcular el resto de componentes de los gases de combustión se tiene en cuenta que la combustión es completa y que $n=1,25$.

Los volúmenes de CO_2 y SO_2 son los producidos en la combustión teórica:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,624 \frac{\text{m}^3\text{N CO}_2}{\text{kg fuel}}; \quad V_{\text{SO}_2} = 0,011 \frac{\text{m}^3\text{N SO}_2}{\text{kg fuel}}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (VII)

- Los volúmenes O_2 y N_2 :

$$(n-1) \cdot \frac{21}{100} A_T = (1,25-1) \cdot \frac{21}{100} 10,45 = 0,549 \frac{m^3 N O_2}{kg \text{ fuel}} = V_{O_2}$$

$$n \cdot \frac{79}{100} A_T = 1,25 \cdot \frac{79}{100} 10,45 = 10,320 \frac{m^3 N N_2}{kg \text{ fuel}} = V_{N_2}$$

El volumen de gases secos: $V_0 = 12,50 \frac{m^3 N \text{ gases}}{kg \text{ fuel}}$

Sumando el vapor de agua, el volumen de gases húmedos: $V_R = 14,34 \frac{m^3 N \text{ gases}}{kg \text{ fuel}}$

Para hallar la composición:

- En base húmeda: $\% i = \frac{V_i}{V_R} \cdot 100$

- En base seca: $\% i = \frac{V_i}{V_0} \cdot 100$

Por ejemplo: $\% CO_2 = \frac{1,624}{14,34} \cdot 100 = 11,33 \%$

| Composición | Base húmeda | Base seca |
|-------------|-------------|-----------|
| % CO_2 | 11,33 | 12,99 |
| % SO_2 | 0,08 | 0,09 |
| % O_2 | 3,83 | 4,39 |
| % N_2 | 71,98 | 82,53 |
| % H_2O | 12,79 | - |

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (VIII)

- El resultado del aparato de Orsat, a partir de la composición en base seca, teniendo en cuenta que en la primera cámara además de CO₂ se absorbe SO₂:

$$\% \text{CO}_2 = 12,99 + 0,09 = 13,1 \%, \quad \% \text{O}_2 = 4,4 \%, \quad \% \text{N}_2 = 82,5\%$$

e) Poder calorífico

$$\text{PCI} = 12925 - 3200 d_r - 70 (\%S) = 12925 - 3200 \cdot 0,965 - 70 \cdot 1,5 = 9732 \text{ kcal/kg fuel}$$

Para calcular el PCS se debe tener en cuenta el calor latente de condensación del vapor de agua a 1 atm y 273 K (598,3 kcal/kg). Se consideran el vapor de agua aportado en la pulverización, la humedad del combustible y el vapor de agua generado en la combustión. No se considera el vapor de agua del aire, ya que el PC es una característica del combustible, no del comburente.

$$w = 0,504 + 1,12 = 1,624 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O/kg fuel}$$

$$1,624 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{kg fuel}} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{22,4 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}} \cdot \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} = 1,305 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{kg fuel}}$$

$$\text{PCS} = \text{PCI} + m_{\text{vapor}} Q_{\text{condensación}} = 9732 + 1,305 \cdot 598,3 = 10513 \text{ kcal/kg fuel}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (IX)

f) Temperatura de llama

La temperatura adiabática de llama: $T_A = \frac{Q_c + Q_a + Q_f + Q_v}{c_m V}$

$$Q_c = PCS = 10513 \text{ kcal /kg fuel}$$

$$Q_a = A_R C_a T_a = 13,27 \text{ m}^3\text{N aire/kg fuel} \cdot 0,310 \text{ kcal/m}^3\text{N}^\circ\text{C} \cdot 25 \text{ }^\circ\text{C} = 103 \text{ kcal/kg fuel}$$

$$Q_f = C_f T_f = 0,440 \text{ kcal/kg fuel}^\circ\text{C} \cdot 100 \text{ }^\circ\text{C} = 44 \text{ kcal/kg fuel}$$

$$Q_v = m_v H_v = 0,4 \text{ kg vapor/kg fuel} \cdot 660 \text{ kcal/kg vapor} = 264 \text{ kcal/kg fuel}$$

Sustituyendo los valores calculados, c_m ($0,310 \text{ kcal/m}^3\text{N}^\circ\text{C}$) y el volumen de gases ($14,34 \text{ m}^3\text{N gases/kg fuel}$) en la ecuación de T_A :

$$T_A = \frac{(10513 + 103 + 44 + 264) \frac{\text{kcal}}{\text{kg fuel}}}{0,390 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3\text{N gases } ^\circ\text{C}} \cdot 14,34 \frac{\text{m}^3\text{N gases}}{\text{kg fuel}}} = 1953 \text{ }^\circ\text{C} \leftarrow \text{Temperatura adiabática de llama}$$

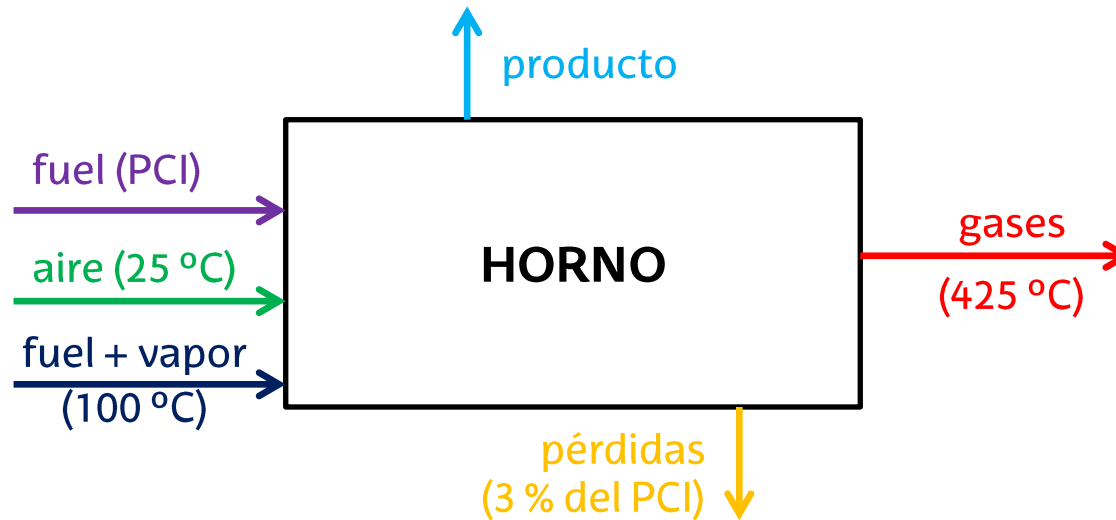
$$\eta_p = \frac{T_{LL}}{T_A} \longrightarrow T_{LL} = 0,70 \cdot 1953 \text{ }^\circ\text{C} = \boxed{1367 \text{ }^\circ\text{C}} \leftarrow \text{Temperatura real de llama}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (X)

g) Rendimiento térmico del horno

Diagrama de flujo de calor del proceso:



Balance térmico (para 100 kg de fuel quemado):

$$Q_c + Q_a + Q_f + Q_v = Q_p + Q_h + P$$

↑
Calor aportado al
producto (calor útil)

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (XI)

Entradas (100 kg fuel):

$$Q_c = 100 \text{ kg fuel} \cdot 9732 \text{ kcal /kg fuel} = 973200 \text{ kcal}$$

$$Q_a = 100 \text{ kg fuel} \cdot 103 \text{ kcal/kg fuel} = 10300 \text{ kcal}$$

$$Q_f = 100 \text{ kg fuel} \cdot 44 \text{ kcal/kg fuel} = 4400 \text{ kcal}$$

$$Q_v = 100 \text{ kg fuel} \cdot 264 \text{ kcal/kg fuel} = 26400 \text{ kcal}$$

Salidas (100 kg fuel):

$$Q_h = 100 \text{ kg fuel} \cdot 14,34 \text{ m}^3\text{N/kg fuel} \cdot 0,345 \text{ kcal/m}^3\text{N}^\circ\text{C} \cdot 425 \text{ }^\circ\text{C} = 210260 \text{ kcal}$$

$$P = 0,03 \cdot 97320 \text{ kcal} = 29196 \text{ kcal}$$

Sustituyendo en el balance térmico la única variable desconocida es el calor útil aportado al producto: $Q_p = 774844 \text{ kcal}$:

$$\eta_t = \frac{Q_p}{Q_c} = \frac{774844}{973200} = 0,796 \longrightarrow \eta_t = 79,6 \%$$

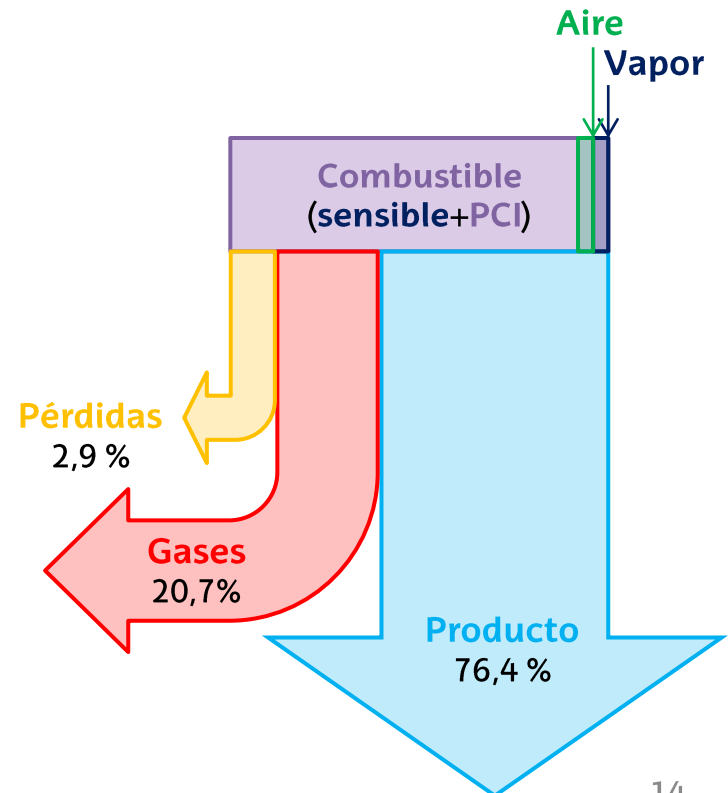
$$\eta_c = \frac{Q_c - Q_h}{Q_c} = \frac{973200 - 210260}{973200} = 0,783 \longrightarrow \eta_c = 78,3 \%$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.1. SOLUCIÓN (XII)

h) Balance térmico y diagrama de Sankey (100 kg fuel quemado)

| Entradas | Q(kcal) | Salidas | Q(kcal) | % |
|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|
| Fuel | 973200 | Producto | 774844 | 76,4 |
| Aire | 10300 | Gases | 210260 | 20,7 |
| Fuel | 4400 | Pérdidas | 29196 | 2,9 |
| Vapor | 26400 | | | |
| Total: | 1014300 | Total: | 1014300 | 100,0 |



PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (I)

a) Cálculo del volumen de aire teórico:

Al tratarse de un combustible gaseoso se tomará como referencia para el cálculo **100 m³N de gas**. Las reacciones de combustión teórica son:

| Composición | % volumen | Reacción combustión |
|-----------------|-----------|----------------------------------|
| CO | 45 | $C + O_2 \rightarrow CO_2$ |
| H ₂ | 50 | $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$ |
| CO ₂ | 5 | - |

$$\frac{45 \text{ m}^3\text{N CO}}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{1/2 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N CO}} = 0,225 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$\frac{50 \text{ m}^3\text{N H}_2}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{1/2 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N H}_2} = 0,250 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$O_T = 0,475 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$0,475 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{100 \text{ m}^3\text{N aire}}{21 \text{ m}^3\text{N O}_2} = 2,26 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{m}^3\text{N gas}} \rightarrow A_T = 2,26 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (II)

Cálculo del volumen de gases de combustión (combustión teórica)

$$\frac{45 \text{ m}^3\text{N CO}}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3\text{N CO}_2}{1 \text{ m}^3\text{N CO}} = 0,450 \frac{\text{m}^3\text{N CO}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$\frac{5 \text{ m}^3\text{N CO}_2}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} = 0,050 \frac{\text{m}^3\text{N CO}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

↓
CO₂ del combustible

$$V_{\text{CO}_2} = 0,50 \frac{\text{m}^3\text{N CO}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$2,26 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{79 \text{ m}^3\text{N N}_2}{100 \text{ m}^3\text{N aire}} = 1,785 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

↓
N₂ del aire

$$V_T(\text{secos}) = 0,450 + 0,050 + 1,785 = 2,29 \frac{\text{m}^3\text{N gases combustión}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$\frac{50 \text{ m}^3\text{N H}_2}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3\text{N H}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3\text{N H}_2} = 0,50 \frac{\text{m}^3\text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3\text{N gas}} \longrightarrow V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,50 \frac{\text{m}^3\text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

PROBLEMAS DE BALANES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (III)

b) Exceso de aire. Volumen de aire y gases de combustión

Balace de CO₂: $\frac{(\%CO_2)}{100} V_0 = (V_{CO_2})_{\text{combustión teórica}}$

$$\frac{15}{100} V_0 = 0,50 \frac{\text{m}^3\text{N CO}_2}{\text{m}^3\text{N gas}} \longrightarrow V_0 = 3,33 \frac{\text{m}^3\text{N gases de combustión}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

Se plantea el balace de O₂: $\frac{\%O_2}{100} \cdot V_0 = \frac{21}{100} \cdot (n - 1) \cdot A_T$

$$\frac{7}{100} \cdot 3,33 = \frac{21}{100} \cdot (n - 1) \cdot 2,26 \longrightarrow n = 1,49$$

$$A_0 = nA_T = 1,49 \cdot 2,26 \longrightarrow A_0 = 3,37 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{kg fuel}}$$

c) Aire ambiental

Cálculo del vapor de agua presente en el aire de combustión: $w_0 = \frac{\phi P_{\text{sat}}(T)}{P - \phi P_{\text{sat}}(T)} A_0$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (IV)

$$w_0 = \frac{(0,80 \cdot 23,78) \text{ mmHg}}{(755 - 0,80 \cdot 23,78) \text{ mmHg}} \cdot 3,37 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{m}^3\text{N gas}} \longrightarrow w_0 = 0,087 \frac{\text{m}^3\text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

El aire húmedo en condiciones normales: $A_R = A_0 + w_0$

$$A_R = 3,37 + 0,087 \longrightarrow A_R = 3,46 \frac{\text{m}^3\text{N aire húmedo}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

El aire ambiental (en condiciones ambientales): $\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T}$

$$\frac{760 \text{ mmHg} \cdot 3,37 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{kg fuel}}}{273 \text{ K}} = \frac{755 \text{ mmHg} \cdot V}{(25 + 273) \text{ K}} \longrightarrow V = 3,80 \frac{\text{m}^3 \text{ aire ambiental}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

Volumen de gases de combustión. Cálculo del vapor de agua:

- Humedad del aire: $w_1 = 0,087 \frac{\text{m}^3\text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3\text{N gas}}$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (V)

- El combustible no tiene humedad: $W_2 = 0$
- Vapor de agua de la combustión del H_2 (apartado a): $w_3 = 0,50 \frac{m^3 NH_2O}{m^3 N \text{ gas}}$

$$\text{Sumando: } w = 0,087 + 0,50 = 0,587 \frac{m^3 NH_2O}{m^3 N \text{ gas}}$$

$$V_R = V_0 + w = 3,33 + 0,587 = 3,92 \frac{m^3 N \text{ gases de combustión}}{m^3 N \text{ gas}}$$

d) Poder calorífico:

$$PCS = 0,45 \frac{m^3 N CO}{m^3 N \text{ gas}} 3030 \frac{kcal}{m^3 N CO} + 0,50 \frac{m^3 N H_2}{m^3 N \text{ gas}} 3060 \frac{kcal}{m^3 N H_2} = 2893,5 \frac{kcal}{m^3 N \text{ gas}}$$

$$0,50 \frac{m^3 N H_2O}{m^3 N \text{ gas}} \cdot \frac{1 \text{ kmol } H_2O}{22,4 m^3 N H_2O} \cdot \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} = 0,402 \frac{m^3 N H_2O}{m^3 N \text{ gas}} \leftarrow \text{vapor de la combustión del } H_2 \text{ del combustible}$$

$$PCI = PCS + m_{\text{vapor}} \cdot \lambda_{\text{condensación}} = 2893,5 - 0,402 \cdot 598,3 = 2653,0 \frac{kcal}{m^3 N \text{ gas}}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (VI)

e) Temperatura adiabática de llama

La temperatura adiabática de llama: $T_A = \frac{Q_c + Q_a + Q_f}{c_m V}$

El aire y el combustible no se precalientan ($Q_a = Q_f = 0$). Sustituyendo Q_c (PCS = 2893,5 kcal/m³N), c_m (0,310 kcal/m³N°C) y el volumen de gases (3,92 m³N gases/m³N):

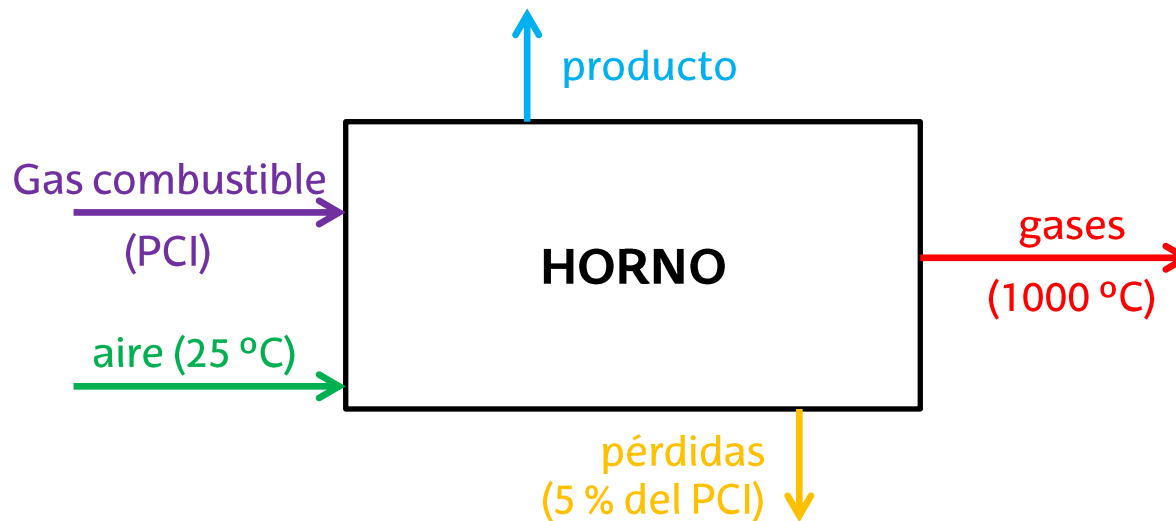
$$T_A = \frac{2893,5 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3\text{N gas}}}{0,40 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3\text{N gases } ^\circ\text{C}} \cdot 3,92 \frac{\text{m}^3\text{N gases}}{\text{m}^3\text{N gas}}} = 1845 \text{ } ^\circ\text{C}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (VII)

f) Rendimiento térmico y rendimiento de la combustión del horno

Diagrama de flujo de calor del proceso:



Balance térmico (para $1 \text{ m}^3\text{N}$ de gas quemado, se desprecia el calor aportado por el aire de combustión, que entra al horno a temperatura ambiente):

$$Q_c = Q_p + Q_h + P$$

↑
Calor en gases de combustión a
1000 °C ($c_h = 0,310 \text{ kcal/m}^3\text{N}^\circ\text{C}$)

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (VIII)

Entradas (1 m³N de gas):

$$Q_c = PCI = 2653,0 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Salidas (1 m³N de gas):

$$Q_h = V_R \cdot C_h(1000 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot T = 3,92 \text{ m}^3\text{N gases/m}^3\text{N gas} \cdot 0,380 \text{ kcal/m}^3\text{N}^\circ\text{C gases} \cdot 1000 \text{ }^\circ\text{C} = 1489,6 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

$$P = 0,05 \cdot 2653,0 \text{ kcal} = 132,7 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Sustituyendo en el balance térmico la única variable desconocida es el calor útil aportado al producto: $Q_p = 1030,8 \text{ kcal/m}^3\text{N}$.

Cálculo de los rendimientos térmico y de la combustión:

$$\eta_t = \frac{Q_p}{Q_c} = \frac{1030,8}{2653,0} = 0,389 \longrightarrow \boxed{\eta_t = 38,9 \%}$$

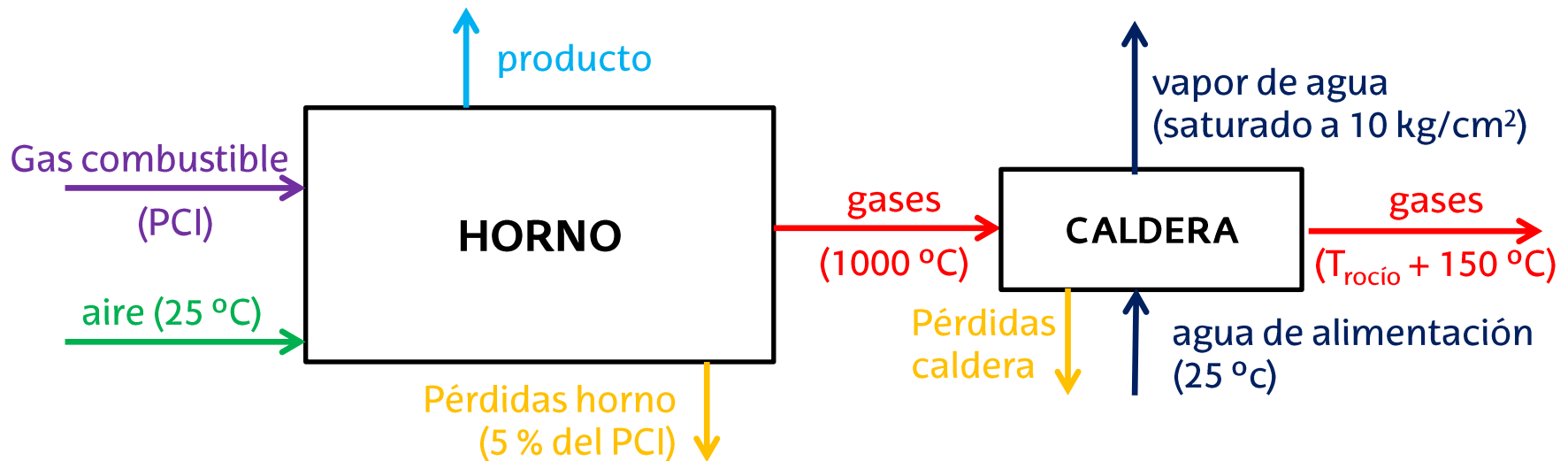
$$\eta_c = \frac{Q_c - Q_h}{Q_c} = 1 - \frac{1489,6}{2653,0} = 0,439 \longrightarrow \boxed{\eta_c = 43,9 \%}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (IX)

g) Rendimiento térmico con caldera de recuperación

Diagrama de flujo de calor del proceso:



Balance térmico en la caldera (para 1 m³N de gas quemado, se desprecia el calor aportado por el agua de alimentación a la caldera a 25 °C):

$$Q_h (1000 \text{ °C}) = Q_v + Q_h (T_{\text{rocío}} + 150 \text{ °C}) + P_c$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (X)

Temperatura de rocío de los gases de combustión:

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = y_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{R}}} \cdot P = \frac{0,587 \text{ m}^3\text{N H}_2\text{O}}{3,92 \text{ m}^3\text{N gases}} \cdot 755 \text{ mm Hg} = 113,1 \text{ mm Hg}$$

Tabla 3.1: $T_{\text{rocío}} = 54 \text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura de los gases de combustión a la salida de la caldera: $54 + 150 = 204 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{h}} (204 \text{ }^\circ\text{C}) = V_{\text{R}} \cdot c_{\text{h}}(204 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot T = 3,92 \text{ m}^3\text{N gases/m}^3\text{N gas} \cdot 0,380 \text{ kcal/m}^3\text{N gases} \\ \text{ }^\circ\text{C} \cdot 204 \text{ }^\circ\text{C} = 303,9 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

En la caldera se aprovecha el 95 % del calor cedido por los gases de combustión, las pérdidas en la caldera son el 5 % del calor cedido por los gases:

$$P_{\text{c}} = 0,05 \cdot [Q_{\text{h}} (1000 \text{ }^\circ\text{C}) - Q_{\text{h}} (204 \text{ }^\circ\text{C})] = 0,05 \cdot (1489,6 - 303,9) = 59,3 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Sustituyendo en el balance térmico de la caldera la única variable desconocida es el calor útil aportado al vapor: $Q_{\text{v}} = 1126,4 \text{ kcal/m}^3\text{N}$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (XI)

La cantidad de vapor de agua producida al quemar 1000 m³N de gas:

La entalpía del vapor de agua saturado a 10 kg/cm² es 664 kcal/kg vapor:

$$Q_v = m_v H_v \rightarrow 1126,4 \text{ kcal/m}^3\text{N} = m_v 664 \text{ kcal/kg vapor}$$

$$m_v = 1,696 \text{ kg vapor/m}^3\text{N}$$

Si se queman 1000 m³N de gas se producen 1696 kg vapor de agua

El rendimiento térmico del proceso, además del calor aportado al producto calentado en el horno, tiene en cuenta el vapor aportado al vapor:

$$\eta_t = \frac{Q_p + Q_v}{Q_c} = \frac{1030,8 + 1126,4}{2653,0} = 0,813 \rightarrow \eta_t = 81,3 \%$$

El rendimiento térmico ha aumentado considerablemente con la caldera de recuperación (de 38,3 % a 81,3 %). El rendimiento de la combustión depende del calor aportado por el combustible y del calor de los gases de combustión por lo que no ha variado respecto del apartado anterior.

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2. SOLUCIÓN (XII)

h) Balance térmico y diagrama de Sankey

(1 m³N de gas quemado)

| Entradas | Q(kcal) | Salidas | Q(kcal) | % |
|---------------|---------------|------------------|---------------|--------------|
| Combustible | 2653,0 | Producto | 1030,8 | 38,9 |
| | | Pérdidas horno | 132,7 | 5,0 |
| | | Vapor | 1126,4 | 42,5 |
| | | Pérdidas caldera | 59,3 | 2,2 |
| | | Gases | 303,9 | 11,5 |
| Total: | 2653,0 | Total: | 2653,0 | 100,0 |

