



TEMA 4: BALANCES TÉRMICOS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN

ACTIVIDADES PRÁCTICAS, SOLUCIONES (II)

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 (II)

II) Problemas de balances térmicos:

Problemas 4.3.1 y 4.3.2



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

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1 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
CH ₄	87,2	CH ₄ + 2 O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O
C ₂ H ₆	5,9	C ₂ H ₆ + 7/2 O ₂ → 2 CO ₂ + 3H ₂ O
C ₃ H ₈	3,0	C ₃ H ₈ + 5 O ₂ → 3 CO ₂ + 4 H ₂ O
N ₂	2,7	-
CO ₂	1,2	-

$$\begin{aligned}
 & \frac{87,2 \text{ m}^3\text{N CH}_4}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{2 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N CH}_4} = 1,744 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}} \\
 & \frac{5,9 \text{ m}^3\text{N C}_2\text{H}_6}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{7/2 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N C}_2\text{H}_6} = 0,207 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}} \\
 & \frac{3,0 \text{ m}^3\text{N C}_3\text{H}_8}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{5 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N C}_3\text{H}_8} = 0,150 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} & \frac{87,2 \text{ m}^3\text{N CH}_4}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{2 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N CH}_4} = 1,744 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}} \\ & \frac{5,9 \text{ m}^3\text{N C}_2\text{H}_6}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{7/2 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N C}_2\text{H}_6} = 0,207 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}} \\ & \frac{3,0 \text{ m}^3\text{N C}_3\text{H}_8}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{5 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N C}_3\text{H}_8} = 0,150 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}} \right\} O_T = 2,101 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

PROBLEMAS DE BALANES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1 SOLUCIÓN (II)

$$2,101 \frac{\text{m}^3 \text{NO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{100 \text{m}^3 \text{N aire}}{21 \text{m}^3 \text{NO}_2} = 10,00 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \longrightarrow A_T = 10,00 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

Cálculo del volumen de gases de combustión (combustión teórica)

$$\frac{87,2 \text{ m}^3 \text{N CH}_4}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{N CO}_2}{1 \text{ m}^3 \text{N CH}_4} = 0,872 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{5,9 \text{ m}^3 \text{N C}_2\text{H}_6}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{2 \text{ m}^3 \text{N CO}_2}{1 \text{ m}^3 \text{N C}_2\text{H}_6} = 0,118 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{3,0 \text{ m}^3 \text{N C}_3\text{H}_8}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{3 \text{ m}^3 \text{N CO}_2}{1 \text{ m}^3 \text{N C}_3\text{H}_8} = 0,090 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{1,2 \text{ m}^3 \text{N CO}_2}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} = 0,012 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

↓
CO₂ del combustible

$$V_{\text{CO}_2} = 1,092 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1 SOLUCIÓN (III)

$$\frac{2,7 \text{ m}^3\text{N N}_2}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} = 0,027 \frac{\text{m}^3\text{N N}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

↓
N₂ del combustible

$$10,00 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{79 \text{ m}^3\text{N N}_2}{100 \text{ m}^3\text{N aire}} = 7,900 \frac{\text{m}^3\text{N aire}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

↓
N₂ del aire

$$V_{\text{N}_2} = 7,927 \frac{\text{m}^3\text{N N}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$V_T(\text{secos}) = 1,092 + 7,927 = 9,02 \frac{\text{m}^3\text{N gases combustión}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

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

Balance de CO₂ y CO: $\frac{(\% \text{CO}_2 + \% \text{CO})}{100} V_0 = (V_{\text{CO}_2})_{\text{combustión teórica}}$

$$\frac{7,3 + 0,5}{100} V_0 = 1,092 \frac{\text{m}^3\text{N CO}_2}{\text{m}^3\text{N gas}} \longrightarrow V_0 = 14,00 \frac{\text{m}^3\text{N gases de combustión}}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

PROBLEMAS DE BALANES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1 SOLUCIÓN (IV)

El nitrógeno se obtiene por diferencia: $N_2 = 100 - 7,3 - 0,5 - 7,2 = 85 \%$

$$\text{Balance de } N_2: \frac{\% N_2}{100} \cdot V_0 = \frac{79}{100} \cdot n \cdot A_T + (N_2)_{\text{combustible}}$$

$$\frac{75}{100} \cdot 14,00 = \frac{79}{100} n \cdot 10,00 + 0,027 \rightarrow n = 1,50$$

$$A_0 = n \cdot A_T = 1,50 \cdot 10,00 \rightarrow A_0 = 15,00 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

c) Aire ambiental

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

$$w_0 = \frac{(0,70 \cdot 23,78) \text{ mmHg}}{(745 - 0,70 \cdot 23,78) \text{ mmHg}} 15,00 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \rightarrow w_0 = 0,343 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

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

$$A_R = 15,00 + 0,343 \rightarrow A_R = 15,34 \frac{\text{m}^3 \text{N aire húmedo}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1 SOLUCIÓN (V)

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

$$\frac{760 \text{ mmHg} \cdot 15,34 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}}}{273 \text{ K}} = \frac{745 \text{ mmHg} \cdot V}{(25 + 273) \text{ K}} \longrightarrow V = 17,08 \frac{\text{m}^3 \text{ aire ambiental}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

d) Volumen y composición de gases de combustión

A partir del análisis de gases secos se obtiene el volumen de cada componente:

$$\frac{7,3}{100} \cdot 14,00 = 1,022 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{0,5}{100} \cdot 14,00 = 0,070 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{7,2}{100} \cdot 14,00 = 1,008 \frac{\text{m}^3 \text{N O}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{85}{100} \cdot 14,00 = 11,900 \frac{\text{m}^3 \text{N N}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$V_0 = 14,00 \frac{\text{m}^3 \text{N gases secos}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

PROBLEMAS DE BALANES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1 SOLUCIÓN (VI)

Cálculo del vapor de agua:

- Humedad del aire: $w_1 = 0,343 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$
- El combustible no tiene humedad: $w_2 = 0$
- Vapor de agua de la combustión del hidrógeno del combustible:

$$\left. \begin{aligned} \frac{87,2 \text{ m}^3 \text{N CH}_4}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{2 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3 \text{N CH}_4} &= 1,744 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \\ \frac{5,9 \text{ m}^3 \text{N C}_2\text{H}_6}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{3 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3 \text{N C}_2\text{H}_6} &= 0,177 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \\ \frac{3,0 \text{ m}^3 \text{N C}_3\text{H}_8}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{4 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3 \text{N C}_3\text{H}_8} &= 0,120 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \end{aligned} \right\} w_3 = 2,041 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

Sumando: $w = 2,384 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}/\text{m}^3 \text{N gas}$

$$V_R = V_0 + w = 14,00 + 2,384 = 16,38 \frac{\text{m}^3 \text{N gases de combustión}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1. SOLUCIÓN (VII)

Para hallar la composición: $\% i = \frac{V_i}{V_R} \cdot 100$

Por ejemplo: $\% \text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_R} \cdot 100 = \frac{1,022}{16,38} \cdot 100 = 6,2 \%$

Gases de combustión	Composición (%)
% CO ₂	6,2
% CO	0,4
% O ₂	6,2
% N ₂	72,6
% H ₂ O	14,6

e) Temperatura de rocío de los gases de combustión

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = y_w \cdot P = \frac{V_w}{V_R} \cdot P = \frac{2,834 \text{ m}^3 \text{NH}_2\text{O}}{16,38 \text{ m}^3 \text{N gases}} \cdot 745 \text{ mm Hg} = 108,3 \text{ mm Hg}$$

Tabla 3.1: $T_{\text{rocío}} = 53 \text{ }^\circ\text{C}$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.1. SOLUCIÓN (VIII)

f) Poder calorífico

$$PCS = \sum_{i=1}^n y_i PCS_i = 0,872 \cdot 9530 + 0,059 \cdot 16700 + 0,030 \cdot 23770 = 10009 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$2,041 \frac{\text{m}^3 \text{NH}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{22,4 \text{ m}^3 \text{NH}_2\text{O}} \cdot \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} = 1,640 \frac{\text{m}^3 \text{NH}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \leftarrow \text{vapor de la combustión del hidrógeno del combustible}$$

$$PCI = PCS + m_{\text{vapor}} \cdot \lambda_{\text{condensación}} = 10009 - 1,640 \cdot 598,3 = 9028 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

g) Temperatura adiabática de llama

El aire y el combustible no se precalientan ($Q_a = Q_f = 0$), Q_c ($PCS = 10009 \text{ kcal/m}^3 \text{N}$), c_m ($0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T \text{ kcal/m}^3 \text{N} \cdot ^\circ\text{C}$) y V_R ($16,38 \text{ m}^3 \text{N/kg fuel}$):

$$T_A = \frac{Q_c + Q_a + Q_f}{c_m V} = \frac{10009}{(0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T_A) \cdot 16,38}$$

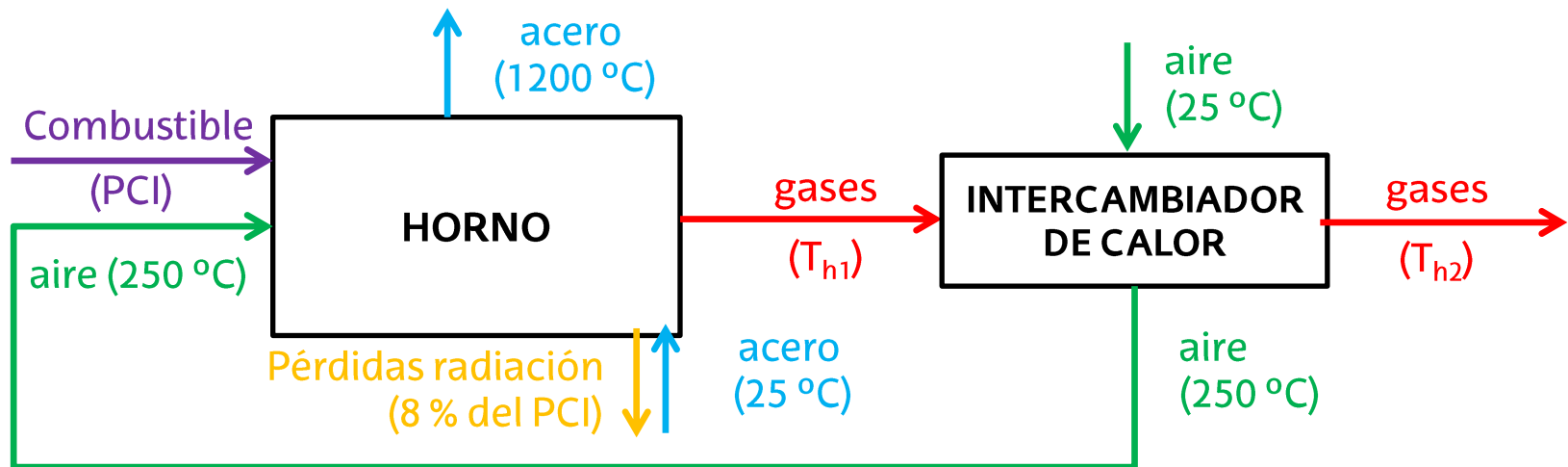
Resolviendo la ecuación: $5,08 \cdot 10^{-4} T_A^2 + 5,24 T_A - 10009 = 0 \rightarrow T_A = 1647 \text{ } ^\circ\text{C}$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.2. SOLUCIÓN (I)

a) Rendimiento térmico del proceso: horno con intercambiador de calor

Diagrama de flujo de calor del proceso:



Balace térmico del horno (para 1 m³N de gas quemado, se desprecia el calor aportado por el acero a 25 °C):

$$Q_c + Q_a = Q_p + Q_{h1} (T_{h1}) + P_h$$

↑
acero

↑
pérdidas por radiación en el horno

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.2. SOLUCIÓN (II)

Entradas (1 m³N de gas):

$$Q_c = 9028 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

$$Q_a = A_R \cdot c_a \cdot T_a$$

Tabla 3.4: interpolación lineal

$$c_a(250 \text{ }^\circ\text{C}) = \sum_{i=1}^n y_i c_i(250 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,978 \cdot 0,316 + 0,022 \cdot 0,369 = 0,317 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3\text{N }^\circ\text{C}}$$

Fraciones molares del vapor y del aire seco: $y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,343}{15,34} = 0,022$; $y_a = \frac{15,00}{15,34} = 0,978$

$$Q_a = 15,34 \text{ m}^3\text{N aire/m}^3\text{N gas} \cdot 0,317 \text{ kcal/m}^3\text{N gas }^\circ\text{C} \cdot 250 \text{ }^\circ\text{C} = 1216 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Salidas (1 m³N de gas):

$$Q_p = F \cdot c_{\text{acero}} \cdot T_{\text{acero}} = 11 \text{ kg/m}^3\text{N gas} \cdot 0,175 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C} \cdot 1200 \text{ }^\circ\text{C} = 2310 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

$$Q_{h1} = V_R \cdot c_h(T_{h1}) \cdot T_{h1} = 16,38 \cdot [0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T_{h1}] \cdot T_{h1} \text{ (kcal/m}^3\text{N)}, T_{h1} \text{ es incógnita}$$

$$P_h = 0,08 \cdot 9028 = 722 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Sustituyendo en el balance térmico del horno, la única variable desconocida es el calor de los gases de combustión a la salida: $Q_{h1} = 7212 \text{ kcal/m}^3\text{N}$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.2.3 SOLUCIÓN (III)

A partir de Q_{h1} puede calcularse la temperatura a la salida del horno:

$$Q_{h1} = 16,38 [0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T_{h1}] T_{h1} = 7212 \text{ (kcal/m}^3\text{N)}$$

Resolviendo la ecuación: $5,08 \cdot 10^{-4} T_{h1}^2 - 5,24 T_{h1} - 7212 = 0 \rightarrow T_{h1} = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$

Cálculo de los rendimientos:

$$\eta_t = \frac{Q_p}{Q_c} = \frac{2310}{9028} = 0,256 \rightarrow \eta_t = 25,6 \%$$

$$\eta_c = \frac{Q_c - Q_h}{Q_c} = 1 - \frac{7212}{9028} = 0,201 \rightarrow \eta_c = 20,1 \%$$

Balance térmico del intercambiador de calor (para 1 m³N de gas quemado):

$$Q_{h1} (T_{h2}) = Q_p + Q_{h2} (T_{h2}) + P_i$$

Se desprecia el calor aportado por el aire a 25 °C y las pérdidas de calor son el 2 % del PCI del combustible ($P_i = 0,02 \cdot 9028 = 181 \text{ kcal/m}^3\text{N}$). La única variable desconocida es el calor de los gases a la salida del intercambiador:

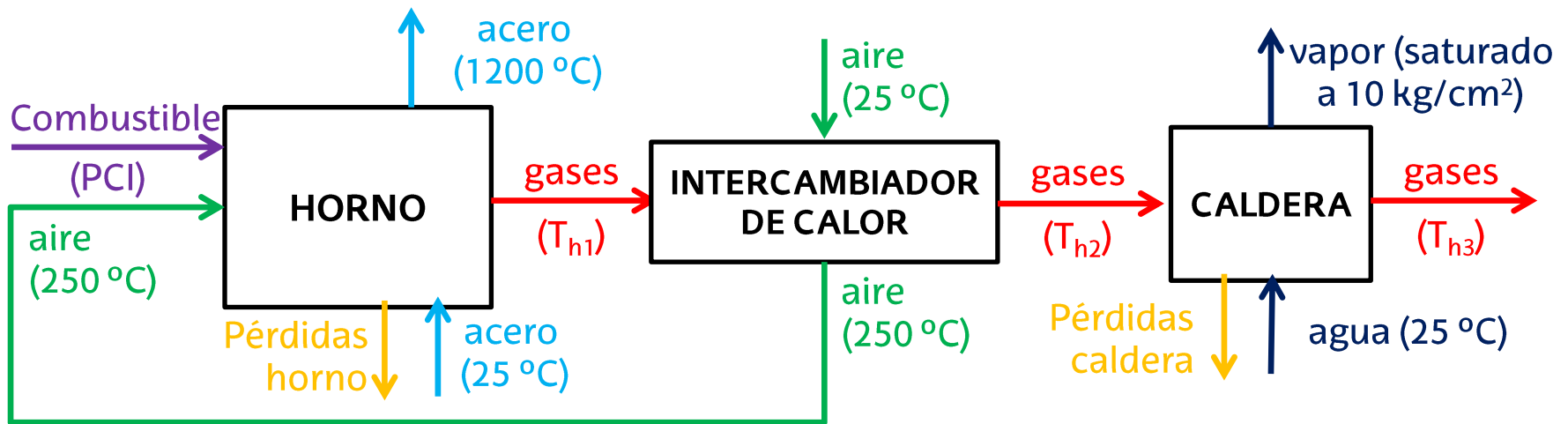
$$Q_{h2} = 5815 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.2. SOLUCIÓN (IV)

b) Rendimiento térmico: horno, intercambiador de calor y caldera

Diagrama de flujo de calor del proceso:



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

$$Q_{h2} = Q_v + Q_{h3} + P_c$$

Los gases de combustión se enfrían hasta

$$T_{\text{rocío}} + 200 \text{ °C} = 53 + 200 = 253 \text{ °C}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.2. SOLUCIÓN (V)

El calor de los gases de combustión a la salida de la caldera:

$$Q_{h3} = V_R \cdot C_h(T_{h3}) \cdot T_{h3} = 16,38 [0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} \cdot 253] \cdot 253 = 1359 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Se aprovecha el 85 % del calor cedido por los gases de combustión, las pérdidas en la caldera son el 15 % del calor cedido por los gases:

$$P_c = 0,15 \cdot [Q_{h2} - Q_{h3}] = 0,15 \cdot (5815 - 1359) = 668 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Sustituyendo en el balance térmico de la caldera la única variable desconocida es el calor útil aportado al vapor: $Q_v = 3788 \text{ kcal/m}^3\text{N}$

Cantidad de vapor de agua producida:

La entalpía del vapor de agua saturado a 10 kg/cm^2 es $664 \text{ kcal/kg vapor}$:

$$Q_v = m_v H_v$$

$$3788 \text{ kcal/m}^3\text{N} = m_v 664 \text{ kcal/kg vapor} \longrightarrow m_v = 5,70 \text{ kg vapor/m}^3\text{N}$$

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.2 SOLUCIÓN (VI)

c) Rendimiento térmico: horno, intercambiador de calor y caldera

Teniendo en cuenta el calor aportado al acero y al vapor:

$$\eta_t = \frac{Q_p + Q_v}{Q_c} = \frac{2310 + 3788}{9028} = 0,675 \longrightarrow \boxed{\eta_t = 67,5 \%}$$

El rendimiento térmico ha aumentado considerablemente con la caldera de recuperación (de 25,6 % a 67,5 %).

Balance térmico

(1 m³N de gas)

Entradas	Q(kcal)	Salidas	Q(kcal)	%
Combustible	9028	Acero	2310	22,5
Aire	1216	Pérdidas horno	722	7,0
		Aire	1216	11,9
		Pérdidas intercambiador	181	1,8
		Vapor	3788	37,0
		Pérdidas caldera	668	6,5
		Gases	1359	13,3
Total:	10244	Total:	10244	100,0

PROBLEMAS DE BALANCES TÉRMICOS

PROBLEMA 4.3.2 SOLUCIÓN (VII)

Diagrama de Sankey
(1 m³N de gas)

