



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BASES DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TEMA 3.- BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

Actividades prácticas: resolución

Escuela de Ingeniería de Bilbao

Departamento de Ingeniería
Química y del Medio Ambiente

Maite de Blas Martín

Jose Antonio García Fernández

M^a Carmen Gómez Navazo



CONSIDERACIONES PREVIAS

Este documento recoge los enunciados, los cálculos numéricos y las explicaciones oportunas para la resolución de las actividades prácticas propuestas:

Recomendaciones

- Se recomienda resolver las actividades a medida que se revisan los materiales de estudio del Tema 3, ya que los enunciados de las actividades prácticas también se incluyen en los propios materiales, tras haber visto los conceptos teóricos necesarios para su resolución.
- Una vez resuelta la actividad práctica, comprobar que el procedimiento de cálculo es correcto consultando este documento.

Material y recursos

- **Calculadora.**
- **Datos:** todos los datos necesarios para la resolución se incluyen en los enunciados y/o en los materiales de estudio.

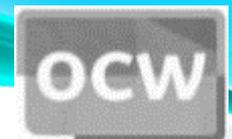
A continuación, se indican las actividades prácticas (incluidas en este documento) y a realizar en cada apartado del **Tema 3**:

Tema 3.- Contenido teórico		Actividades prácticas
3.1. Leyes de conservación de la materia y de la energía		-
3.2. Balances de materia	3.2.1. Balances de materia sin reacción química	3.1, 3.2
	3.2.2. Balances de materia con reacción química	3.3, 3.4
3.3. Balances de energía	3.3.1. Cálculo de la entalpía: compuestos puros y mezclas	3.5, 3.6
	3.3.2. Sistemas con reacción química	3.7
3.4. Aplicación de los balances de materia y energía: condensadores		3.8



TEMA 3.- Balances de materia y energía

3.2. Balances de materia



3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia **sin** reacción química

Actividad práctica 3.1. Se requiere una corriente de aire húmedo enriquecida en oxígeno para el tratamiento aerobio de los fangos secundarios obtenidos en el tratamiento de un agua residual urbana. Para ello, se dispone de un equipo en el que se mezclan una corriente de aire (1) con oxígeno puro (2) y con una corriente de agua (3). Los datos de los flujos de entrada son:

- Aire seco (21 % O_2 y 79 % N_2 , en volumen o en moles).
- Oxígeno puro, con un caudal molar correspondiente a un 30% de la corriente molar de aire.
- Agua líquida, con un caudal de $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

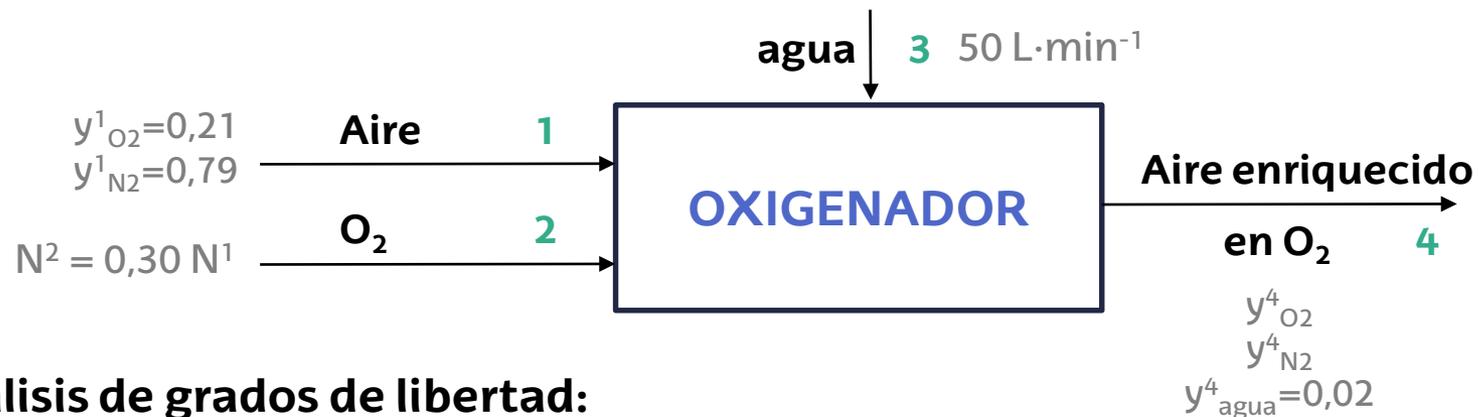
La corriente gaseosa de salida (4) tiene un 2% (en moles de agua).

- a) Representar el diagrama de flujo del proceso y realizar el análisis de grados de libertad.
- b) Calcular los caudales de aire, oxígeno y aire húmedo enriquecido en oxígeno, así como la composición de la corriente gaseosa de salida.

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia sin reacción química

a) Diagrama de flujo del proceso:



Análisis de grados de libertad:

$$GL = V - E - \text{datos} \quad (\text{n}^\circ \text{ de grados de libertad})$$

$V = \text{n}^\circ$ de variables linealmente independientes: 3 entradas (N^1, N^2, N^3), 1 salida (N^4) y 3 composiciones independientes ($y^1_{N_2}, y^4_{N_2}, y^4_{O_2}$) = 7

$E = \text{n}^\circ$ de ecuaciones linealmente independientes: 3 componentes (O_2, N_2, agua) = 3

Datos = 1 caudal (N^3), 2 composiciones independientes ($y^1_{O_2}, y^4_{\text{agua}}$), 1 relación ($N^2 = 0,30 N^1$) = 4

$$GL = 7 - 3 - 4 = 0 \rightarrow \text{el problema está especificado}$$

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia sin reacción química

b) Antes de plantear los balances de materia, es necesario especificar el caudal de la corriente 3 en términos molares:

$$50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \frac{1 \text{ kg}}{1 \text{ L}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{18 \text{ kg}} = 2,78 \text{ kmol} \cdot \text{min}^{-1} = N^3$$

Balances de materia en términos molares ($\text{kmol} \cdot \text{min}^{-1}$), para cada uno de los componentes, balance global y la relación:

		 Sustituir los valores conocidos	
O₂:	$y^1_{\text{O}_2} N^1 + N^2 = y^4_{\text{O}_2} N^4$	$\rightarrow 0,21 N^1 + N^2 = y^4_{\text{O}_2} N^4$	Ecuación [3.1.1]
N₂:	$y^1_{\text{N}_2} N^1 = y^4_{\text{N}_2} N^4$	$\rightarrow 0,79 N^1 = y^4_{\text{N}_2} N^4$	Ecuación [3.1.2]
Agua:	$N^3 = y^4_{\text{agua}} N^4$	$\rightarrow 2,78 = 0,02 N^4$	Ecuación [3.1.3]
Global:	$N^1 + N^2 + N^3 = N^4$	$\rightarrow N^1 + N^2 + 2,78 = N^4$	Ecuación [3.1.4]
Relación:		$N^2 = 0,30 N^1$	Ecuación [3.1.5]

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia sin reacción química

La secuencia de resolución es la siguiente:

Ecuación [3.1.3] $\rightarrow N^4 = 138,89 \text{ kmol}\cdot\text{min}^{-1}$

Ecuación [3.1.5] en [3.1.4] $\rightarrow N^1 + 0,30 N^1 + 2,78 = 138,89 \rightarrow N^1 = 104,70 \text{ kmol}\cdot\text{min}^{-1}$

$\rightarrow N^2 = 0,3 \cdot 104,7 = 31,41 \text{ kmol}\cdot\text{min}^{-1}$

Ecuación [3.1.1] $\rightarrow 0,21 \cdot 104,7 + 31,41 = y_{O_2}^4 \cdot 138,89 \rightarrow y_{O_2}^4 = 0,38$

Ecuación [3.1.2] $\rightarrow 0,79 \cdot 104,7 = y_{N_2}^4 \cdot 138,89 \rightarrow y_{N_2}^4 = 0,60$

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos:

Caudales molares	Composición molar de la corriente de salida (4):
Aire: $N^1 = 104,70 \text{ kmol}\cdot\text{min}^{-1}$	$y_{O_2}^4 = 0,38$
Oxígeno: $N^2 = 31,41 \text{ kmol}\cdot\text{min}^{-1}$	$y_{N_2}^4 = 0,60$
Aire enriquecido: $N^4 = 138,89 \text{ kmol}\cdot\text{min}^{-1}$	$y_{\text{agua}}^4 = 0,02$
	Total = $\sum_{i=1}^n y_i^4 = 1$

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia **sin** reacción química

Actividad práctica 3.2. Se dispone de un sistema para el tratamiento primario de aguas residuales: 1.- **Sedimentador primario**, y 2.- **Espesador de fangos primarios** por gravedad (fig. 3.3a).

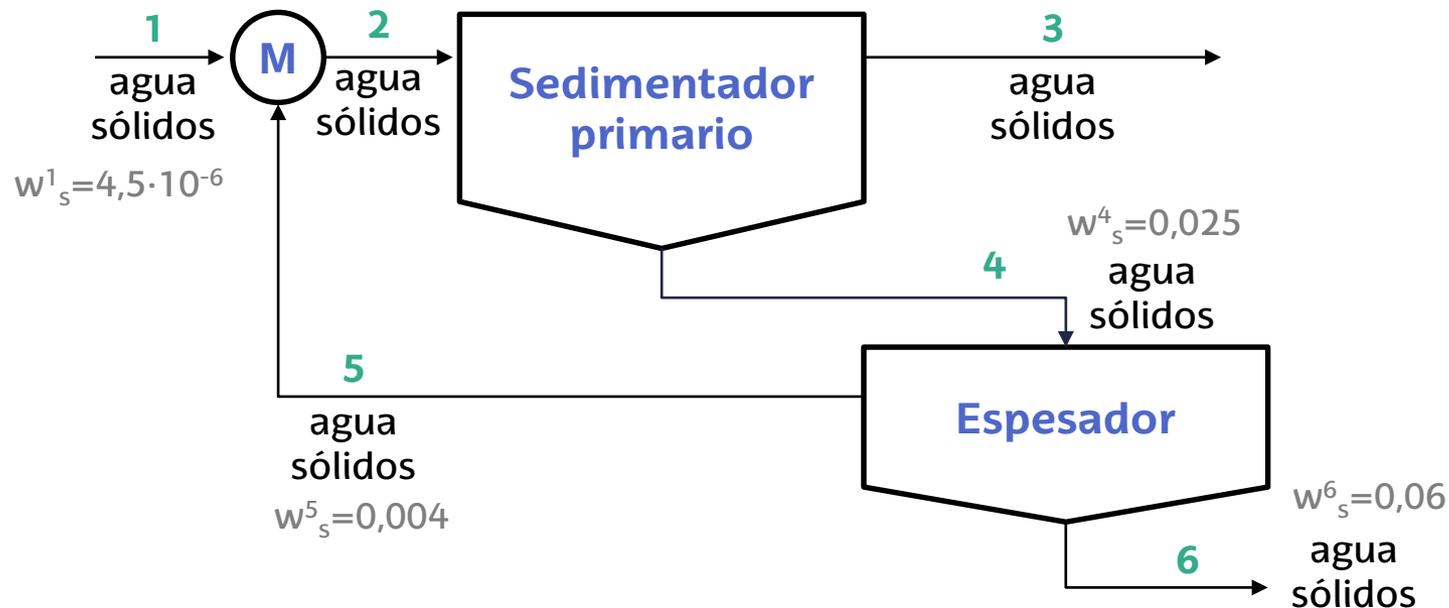


Figura 3.3a. Diagrama de flujo del tratamiento primario de aguas residuales para eliminar sólidos en suspensión: sedimentador y espesador de fangos. Fuente: elaboración propia

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia **sin** reacción química

La corriente de agua residual de entrada al **sedimentador primario** tiene una concentración de sólidos en suspensión (SS) de $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (considerar que la densidad del agua es $1 \text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$). Tras la sedimentación, la corriente de fangos obtenida contiene un 2,5% de sólidos en suspensión.

La corriente sobrenadante de agua de salida del decantador se conduce al tratamiento secundario, mientras que los fangos primarios se conducen a un espesador primario. En dicho **espesador** los fangos se concentran por gravedad hasta un 6 % en peso en SS. El líquido sobrenadante, que contiene un 0,4 % de SS, es recirculado a la entrada del decantador.

- a) Realizar el análisis de grados de libertad de los equipos y del proceso.
- b) Determinar los caudales de fangos de salida de ambos equipos, así como el caudal y concentración de la corriente de salida del sedimentador.
- b) Calcular el rendimiento de eliminación de SS del espesador.

Dato: el rendimiento de eliminación de SS del sedimentador es del 75 % (el 75% de los SS de la corriente de alimentación se elimina con los fangos de fondo).

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia sin reacción química

a) Análisis de grados de libertad: $GL = V - E - \text{datos}$

Se trata de un proceso físico sin reacción química y con dos componentes: agua y sólidos en suspensión (SS). Los equipos de los que consta el proceso son:

- Mezclador: en el que se mezclan la corriente de alimentación y el agua clarificada en el espesador,
- Sedimentador primario: en el que sedimenta el agua residual para la eliminación de sólidos en suspensión.
- Espesador: en el que se concentran los fangos por gravedad.

En la tabla de la página siguiente se recoge el análisis de grados de libertad de cada equipo y del proceso general. A modo de ejemplo, para el **mezclador**:

Variables (V) = nº de variables linealmente independientes: 2 entradas (F^1, F^5), una salida (F^2) y 3 composiciones independientes de SS (w^1_s, w^5_s, w^2_s) = 6

E = nº de ecuaciones linealmente independientes: 2 ecuaciones (**SS, agua**)

Datos = 2 composiciones (w^1_s, w^5_s)

$GL = 6 - 2 - 2 = 2 \rightarrow$ problema subespecificado en el mezclador

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia **sin** reacción química

Análisis de grados de libertad:

GL		Equipo	Mezclador	Sedimentador primario	Espesador	Proceso
Variables			6	6	6	12
Ecuaciones			2	2	2	6
Datos	Caudal		-	-	-	-
	Composición		2	1	3	4
	Rendimiento eliminación		-	1	-	1
GL			2	2	1	1

El proceso general (GL=1) está subespecificado, pero puede resolverse si se establece una base de cálculo o referencia (los valores de composiciones no cambian y los de caudales serán proporcionales). Para facilitar el proceso de resolución, se comienza por el espesador (GL=1). La referencia establecida es:



$$F^6 = 120 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1} \rightarrow \text{GL} = 0 \text{ (en el espesador y en el proceso general)}$$

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia **sin** reacción química

b) Se plantean los **balances de materia** globales y de SS para cada equipo, todos ellos expresados en $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, donde F_i son los caudales máxicos de cada corriente y w_s^i la fracción en masa de SS de cada corriente:

Espesador:

Global: $F^4 = F^5 + F^6$

Sustituir los valores conocidos
 $\rightarrow F^4 = F^5 + 120$

Ecuación [3.2.1]

SS: $w_s^4 \cdot F^4 = w_s^5 \cdot F^5 + w_s^6 \cdot F^6$

$\rightarrow 0,025 \cdot F^4 = 0,004 \cdot F^5 + 0,06 \cdot 120$

Ecuación [3.2.2]

Resolución: ecuación [3.2.1] en [3.2.2] $\rightarrow 0,025 \cdot (F^5 + 120) = 0,004 \cdot F^5 + 0,06 \cdot 120$

$F^5 = 200 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$

$F^4 = 320 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$

Sedimentador:

Global: $F^2 = F^3 + F^4$

Sustituir los valores conocidos
 $\rightarrow F^2 = F^3 + 320$

Ecuación [3.2.3]

SS: $w_s^2 \cdot F^2 = w_s^3 \cdot F^3 + w_s^4 \cdot F^4$

$\rightarrow w_s^2 \cdot F^2 = w_s^3 \cdot F^3 + 0,025 \cdot 320$

Ecuación [3.2.4]

Rendimiento de eliminación: $0,75 = \frac{w_s^4 \cdot F^4}{w_s^2 \cdot F^2} = \frac{0,025 \cdot 320}{w_s^2 \cdot F^2}$

$w_s^2 \cdot F^2 = 10,67$

Ecuación [3.2.5]

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia **sin** reacción química

Mezclador:

Global: $F^1 + F^5 = F^2$ $\rightarrow F^1 + 200 = F^2$ Ecuación [3.2.6]

Sólidos: $w_s^1 \cdot F^1 + w_s^5 \cdot F^5 = w_s^2 \cdot F^2$ $\rightarrow 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot F^1 + 0,004 \cdot 200 = w_s^2 \cdot F^2$ Ecuación [3.2.7]

La secuencia de resolución es la siguiente:

Ecuación [3.2.5] en [3.2.7]: $4,5 \cdot 10^{-4} \cdot F^1 + 0,004 \cdot 200 = 10,67$ $\rightarrow F^1 = 21925,9 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

Ecuación [3.2.6]: $21925,9 + 200 = F^2$ $\rightarrow F^2 = 22125,9 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

Ecuación [3.2.3]: $22125,9 = F^3 + 320$ $\rightarrow F^3 = 21805,9 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

Ecuación [3.2.4]: $10,67 = w_s^3 \cdot 21805,9 + 0,025 \cdot 320$ $\rightarrow w_s^3 = 1,22 \cdot 10^{-4}$

La concentración de SS a la salida del sedimentador primario:

$$1,22 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg SS}}{\text{kg agua}} \cdot \frac{\text{kg agua}}{1 \text{ L agua}} \cdot \frac{10^6 \text{ mg SS}}{1 \text{ kg SS}} = 122,4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

c) El rendimiento de eliminación del espesador es:

$$\eta_E = \frac{w_s^6 \cdot F^6}{w_s^4 \cdot F^4} \cdot 100 = \frac{0,06 \cdot 120}{0,025 \cdot 320} \cdot 100 = 90 \%$$

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.1. Balances de materia sin reacción química

En la figura 3.3b se recogen los resultados obtenidos para el sistema formado por: 1.- **Sedimentador primario**, y 2.- **Espesador** de fangos primarios por gravedad (fig. 3.3b).

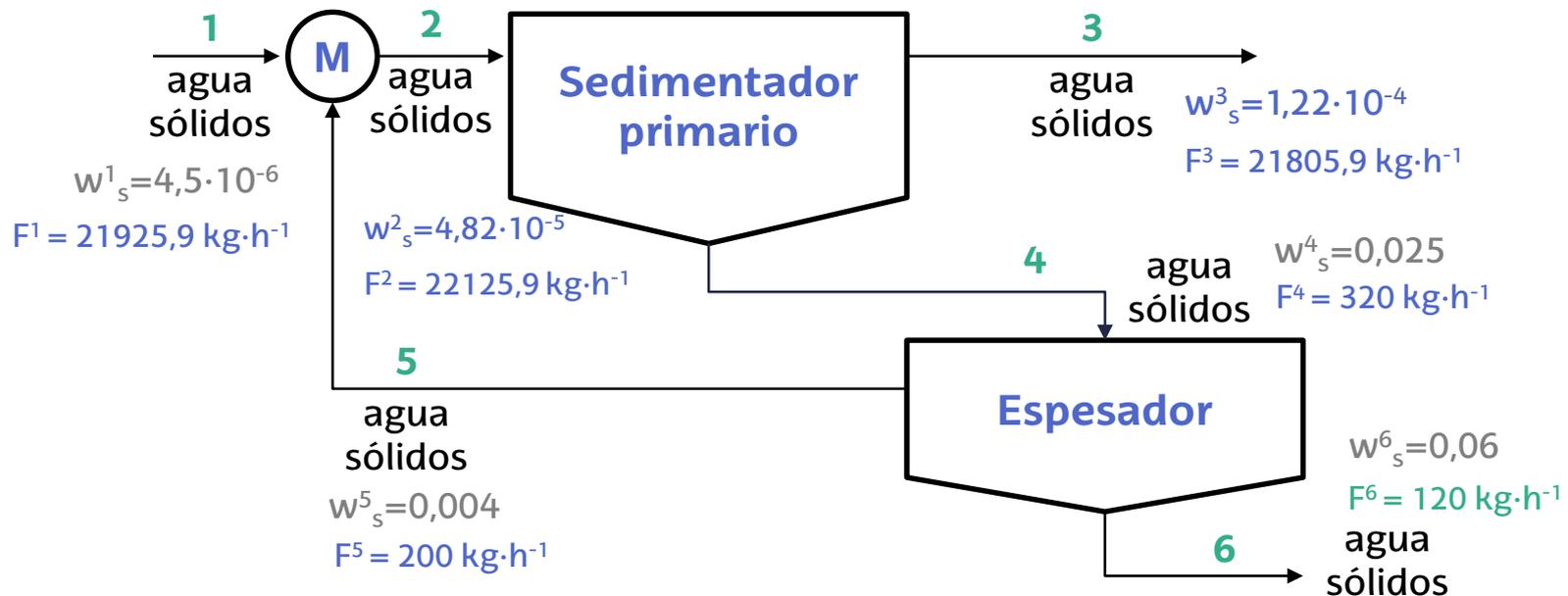


Figura 3.3b. Diagrama de flujo del tratamiento primario de aguas residuales para eliminar sólidos en suspensión: sedimentador y espesador de fangos. Fuente: elaboración propia

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.2. Balances de materia con reacción química

Actividad práctica 3.3. Un gas proveniente de un proceso de tratamiento tiene la siguiente composición en volumen: 28,0% CO, 3,5% CO₂, 0,5% O₂ y 68% de N₂ (fig. 3.4). El gas se quema en una caldera con un exceso de aire del 20%, obteniéndose una conversión de CO del 98%. Realizar el análisis de grados de libertad y calcular la composición de los gases de salida en % en volumen.

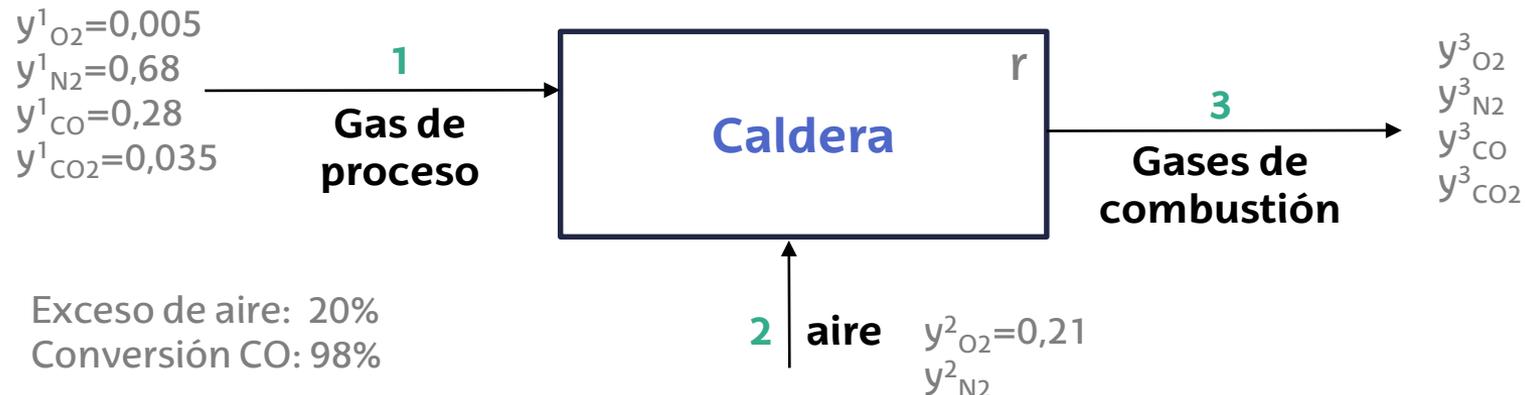
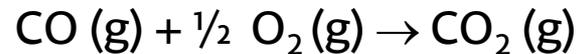


Figura 3.4. Diagrama de flujo de una caldera en la que se quema un combustible gaseoso de la composición dada. Fuente: elaboración propia

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.2. Balances de materia con reacción química

Se trata de un proceso con reacción química (r):



El análisis de grados de libertad (GL): **GL = V - E - datos**

V = n° de variables linealmente independientes: 2 entradas (N^1 , N^2), una salida (N^3), 7 composiciones ($y^1_{\text{O}_2}$, $y^1_{\text{N}_2}$, y^1_{CO} , $y^2_{\text{O}_2}$, $y^3_{\text{O}_2}$, $y^3_{\text{N}_2}$, y^3_{CO}) y una reacción química (r) = 11

E = n° de ecuaciones linealmente independientes: 4 componentes (O_2 , N_2 , CO , CO_2) = 4

Datos = 4 composiciones independientes ($y^1_{\text{O}_2}$, $y^1_{\text{N}_2}$, y^1_{CO} , $y^2_{\text{O}_2}$), exceso de aire (20%) y conversión del CO (98%) = 6

$\text{GL} = 11 - 4 - 6 = 1$ -> el problema está subespecificado

GL=1, pero el problema puede resolverse si se establece una base de cálculo o referencia, por ejemplo el caudal de gas que se quema en la caldera:

$N^1 = 100 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$ (cálculos por cada 100 mol h^{-1} de gas quemado)

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.2. Balances de materia con reacción química

Antes de plantear los balances de materia, se procede a calcular el caudal de aire utilizado para la combustión, sabiendo que el gas de combustión contiene un 28% de CO, 0,5 % de oxígeno y que se emplea un 20% de exceso de aire:

$$100 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \frac{28 \text{ mol CO}}{100 \text{ mol}} \cdot \frac{1/2 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol CO}} = 14 \text{ mol O}_2 \cdot \text{h}^{-1} \quad (\text{O}_2 \text{ para la combustión de CO})$$

$$100 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \frac{0,5 \text{ mol O}_2}{100 \text{ mol}} = 0,5 \text{ mol O}_2 \cdot \text{h}^{-1} \quad (\text{O}_2 \text{ del combustible} \rightarrow \text{se resta})$$

$$(14 - 0,5) = 13,5 \text{ mol O}_2 \cdot \text{h}^{-1} \frac{100 \text{ mol aire}_2}{21 \text{ mol O}_2} \cdot \frac{120 \text{ mol aire}_2}{100 \text{ mol aire}} = 77,14 \text{ mol aire} \cdot \text{h}^{-1} = N^2$$

La conversión del CO (reactivo limitante) es la relación en términos de caudales molares (n^i_{CO}) entre el CO que reacciona (entrada – salida) y el CO a la entrada:

$$X_{\text{CO}} = \frac{n^1_{\text{CO}} - n^3_{\text{CO}}}{n^1_{\text{CO}}} \cdot 100 = \frac{y^1_{\text{CO}} N^1 - y^3_{\text{CO}} N^3}{y^1_{\text{CO}} N^1} \cdot 100 = 98 \%$$

Sustituyendo los valores conocidos: $y^1_{\text{CO}} N^1 = 0,28 \cdot 100 = 28 \text{ mol CO} \cdot \text{h}^{-1}$

$$\frac{28 - y^3_{\text{CO}} N^3}{28} = 0,98 \quad \rightarrow \quad y^3_{\text{CO}} N^3 = 0,56 \quad \text{Ecuación [3.3.1]}$$

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.2. Balances de materia con reacción química

Balances de materia en términos molares ($\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$), para cada uno de los componentes, el balance global y la relación, en términos generales:

$$N_{\text{sal}}^i = N_{\text{ent}}^i + \gamma_i r$$

γ_i : coeficiente estequiométrico negativo \Rightarrow i reactivo
 γ_i : coeficiente estequiométrico positivo \Rightarrow i producto

r (velocidad macroscópica) para la reacción: $\text{CO (g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{(g)} \rightarrow \text{CO}_2 \text{(g)}$

$$\begin{aligned}
 \text{O}_2: \quad & y_{\text{O}_2}^3 N^3 = y_{\text{O}_2}^1 N^1 + y_{\text{O}_2}^2 N^2 - \frac{1}{2} r \\
 & y_{\text{O}_2}^3 N^3 = 0,005 \cdot 100 + 0,21 \cdot 77,14 - \frac{1}{2} r = 16,7 - \frac{1}{2} r \quad \text{Ecuación [3.3.2]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{N}_2: \quad & y_{\text{N}_2}^3 N^3 = y_{\text{N}_2}^1 N^1 + y_{\text{N}_2}^2 N^2 \\
 & y_{\text{N}_2}^3 N^3 = 0,68 \cdot 100 + 0,79 \cdot 77,14 = 128,94 \quad \text{Ecuación [3.3.3]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CO:} \quad & y_{\text{CO}}^3 N^3 = y_{\text{CO}}^1 N^1 - r \\
 & y_{\text{CO}}^3 N^3 = 0,28 \cdot 100 - r = 28 - r \quad \text{Ecuación [3.3.4]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2: \quad & y_{\text{CO}_2}^3 N^3 = y_{\text{CO}_2}^1 N^1 + r \\
 & y_{\text{CO}_2}^3 N^3 = 0,035 \cdot 100 + r = 3,5 + r \quad \text{Ecuación [3.3.5]}
 \end{aligned}$$

Sistema resoluble: 5 ecuaciones ([3.3.1]-[3.3.5]) y 5 incógnitas linealmente independientes ($N^3, r, y_{\text{O}_2}^3, y_{\text{N}_2}^3, y_{\text{CO}}^3$) ya que: $y_{\text{CO}_2}^3 + y_{\text{N}_2}^3 + y_{\text{CO}}^3 + y_{\text{CO}_2}^3 = 1$

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.2. Balances de materia con reacción química

La secuencia de resolución es la siguiente:

Ecuación [3.3.1] en [3.3.4]: $0,56 = 28 - r \rightarrow r = 27,44 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

Ecuación [3.3.2]: $y^3_{\text{O}_2} N^3 = 16,7 - \frac{1}{2} r \rightarrow y^3_{\text{O}_2} N^3 = 2,98 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

Ecuación [3.3.3]: resuelta (el N_2 es inerte) $\rightarrow y^3_{\text{N}_2} N^3 = 128,94 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

Ecuación [3.3.4]: resuelta (CO: conversión) $\rightarrow y^3_{\text{CO}} N^3 = 0,56 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

Ecuación [3.3.5]: $y^3_{\text{CO}_2} N^3 = 3,5 + r \rightarrow y^3_{\text{CO}_2} N^3 = 30,94 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

suma

Sumando se obtiene: $N^3 (y^3_{\text{CO}_2} + y^3_{\text{N}_2} + y^3_{\text{CO}} + y^3_{\text{CO}_2}) = N^3 = 163,42 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

Conocido el dato del caudal de gas de salida puede calcularse la fracción molar de cada componente del gas, para el CO , a partir de la Ecuación [3.3.2]:

$$y^3_{\text{O}_2} = \frac{2,98 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}}{163,42 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}} = 0,018 \quad \rightarrow \% \text{ O}_2 = 1,8 \%$$

De la misma manera, para el resto de componentes del gas, N_2 , CO y CO_2 , a partir de las ecuaciones [3.3.3], [3.3.4] y [3.3.5] respectivamente:

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.2. Balances de materia con reacción química

$$y^3_{N_2} = \frac{128,94 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}}{163,42 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}} = 0,789 \quad \rightarrow \% N_2 = 78,9 \%$$

$$y^3_{CO} = \frac{0,56 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}}{163,42 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}} = 0,003 \quad \rightarrow \% CO = 0,3 \%$$

$$y^3_{CO_2} = \frac{30,94 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}}{163,42 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}} = 0,190 \quad \rightarrow \% O_2 = 19,0 \%$$

Los resultados de la composición del gas de salida (fracciones molares y porcentajes en volumen) se recogen en la siguiente tabla:

Componente	Fracción molar (y^3_i)	Porcentaje en volumen (i%)
O ₂	0,018	1,8 %
N ₂	0,789	78,9 %
CO	0,003	0,3 %
CO ₂	0,190	19,0 %
Total:	1,000	100 %

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.2. Balances de materia con reacción química

Actividad práctica 3.4. Resolver la actividad práctica 3.3 utilizando el balance en átomos.

El diagrama del proceso es idéntico al de la actividad práctica 3.3 (ver fig. 3.4).

La reacción química del proceso es: $\text{CO (g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{(g)} \rightarrow \text{CO}_2 \text{(g)}$

Al plantear el balance por átomos, el análisis de grados de libertad varía respecto a la actividad práctica 3.3.

Análisis de grados de libertad (GL): $\text{GL} = \text{V} - \text{E} - \text{datos}$

V = n° de variables linealmente independientes: 2 entradas (N^1, N^2), una salida (N^3), 7 composiciones ($y^1_{\text{O}_2}, y^1_{\text{N}_2}, y^1_{\text{CO}}, y^2_{\text{O}_2}, y^3_{\text{O}_2}, y^3_{\text{N}_2}, y^3_{\text{CO}}$) = 10 (no se tiene en cuenta la reacción química).

E = n° de ecuaciones linealmente independientes: 3 átomos (C, O, N) = 3

Datos = 4 composiciones independientes ($y^1_{\text{O}_2}, y^1_{\text{N}_2}, y^1_{\text{CO}}, y^2_{\text{O}_2}$), exceso de aire (20%) y conversión del CO (98%) = 6

$\text{GL} = 10 - 3 - 6 = 1 \rightarrow$ el problema está subespecificado

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.2. Balances de materia con reacción química

GL=1, al igual que en la actividad práctica 3.3, por lo que el problema puede resolverse si se establece una base de cálculo o referencia:

$$N^1 = 100 \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}$$

El caudal de aire (N^2) y el dato de la conversión de la ecuación [3.3.1] no varían para el balance en átomos:

$$N^2 = 77,14 \text{ mol aire}\cdot\text{h}^{-1} \quad \boxed{y^3_{\text{CO}} N^3 = 0,56} \quad \text{Ecuación [3.3.1]}$$

El balance de átomos se plantea de la siguiente forma, donde A=C, O y N:

$$\text{Átomos del elemento A}|_{\text{entrada}} = \text{Átomos del elemento A}|_{\text{salida}}$$

$$\begin{aligned}
 \text{C: } & 1\cdot y^1_{\text{CO}} N^1 + 1 y^1_{\text{CO}_2} N^3 = 1\cdot y^3_{\text{CO}} N^3 + 1 y^3_{\text{CO}_2} N^3 \\
 & 0,28\cdot 100 + 0,035\cdot 100 = \boxed{31,5 = y^3_{\text{CO}} N^3 + y^3_{\text{CO}_2} N^3} \quad \text{Ecuación [3.4.1]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{O: } & 2\cdot y^1_{\text{O}_2} N^1 + 1 y^1_{\text{CO}} N^1 + 2\cdot y^1_{\text{CO}_2} N^1 + 2\cdot y^2_{\text{O}_2} N^2 = 2\cdot y^3_{\text{O}_2} N^3 + 1\cdot y^3_{\text{CO}} N^3 + 2 y^3_{\text{CO}_2} N^3 \\
 & 2\cdot 0,035\cdot 100 + 1\cdot 0,28\cdot 100 + 2\cdot 0,005\cdot 100 + 2\cdot 0,21\cdot 77,14 = 2\cdot y^3_{\text{O}_2} N^3 + 1\cdot y^3_{\text{CO}} N^3 + 2 y^3_{\text{CO}_2} N^3 \\
 & \boxed{68,4 = 2\cdot y^3_{\text{O}_2} N^3 + 1\cdot y^3_{\text{CO}} N^3 + 2 y^3_{\text{CO}_2} N^3} \quad \text{Ecuación [3.4.2]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{N: } & 2\cdot y^1_{\text{N}_2} N^1 + 2 y^2_{\text{N}_2} N^2 = 2\cdot y^3_{\text{N}_2} N^3 \\
 & 0,68\cdot 100 + 0,79\cdot 77,14 = \boxed{128,94 = y^3_{\text{N}_2} N^3} \quad \text{Ecuación [3.4.3]}
 \end{aligned}$$

3.2. BALANCES DE MATERIA

3.2.2. Balances de materia con reacción química

Sistema resoluble: 4 ecuaciones – 4 incógnitas linealmente independientes

$$(N^3, y^3_{O_2}, y^3_{N_2}, y^3_{CO}) \text{ ya que: } y^3_{CO_2} + y^3_{N_2} + y^3_{CO} + y^3_{CO_2} = 1$$

La secuencia de resolución es la siguiente:

Ecuación [3.3.1]

$$\rightarrow y^3_{CO} N^3 = 0,56$$

Ecuación [3.3.1] en [3.4.1]:

$$31,5 = 0,56 + y^3_{CO_2} N^3$$

$$\rightarrow y^3_{CO_2} N^3 = 30,94 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$$

Ecuación [3.4.2]

$$68,4 = 2 \cdot y^3_{O_2} N^3 + 0,56 + 2 \cdot 30,94$$

$$\rightarrow y^3_{O_2} N^3 = 2,98 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$$

Ecuación [3.4.3]

$$128,94 = y^3_{N_2} N^3$$

$$\rightarrow y^3_{N_2} N^3 = 128,94 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$$

suma

Sumando se obtiene: $N^3 (y^3_{CO} + y^3_{CO_2} + y^3_{O_2} + y^3_{N_2}) = N^3 = 163,42 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

Con el valor de N^3 , se obtienen las fracciones molares de CO, CO₂, O₂ y N₂ en la corriente de salida a partir de las ecuaciones [3.3.1], [3.4.1], [3.4.2] y [3.4.3]:

$$y^3_{CO} = 0,003$$

$$y^3_{CO_2} = 0,190$$

$$y^3_{O_2} = 0,018$$

$$y^3_{N_2} = 0,789$$

$$\% \text{ CO} = 0,03 \%$$

$$\% \text{ CO}_2 = 19 \%$$

$$\% \text{ O}_2 = 19,0 \%$$

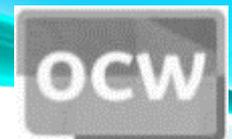
$$\% \text{ N}_2 = 78,9 \%$$

Por tanto, los resultados coinciden con los de la resolución de la actividad práctica 3.3 recogidos en la tabla de la diapositiva 21.



TEMA 3.- Balances de materia y energía

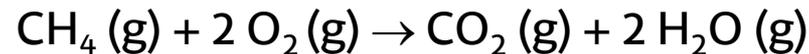
3.3. Balances de energía



3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

Actividad práctica 3.5. Calcular la entalpía de reacción estándar ($\Delta H_r^0_{298K}$) asociada a la reacción:



Datos: entalpías de formación estándar (1 atm, 25 °C):

$$\Delta H_f^0, \text{CH}_4 (\text{g}) = -17,96 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$\Delta H_f^0, \text{CO}_2 (\text{g}) = -94,44 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$\Delta H_f^0, \text{H}_2\text{O} (\text{g}) = -58,04 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Para calcular el valor de la entalpía de reacción estándar (298 K y 1 atm):

$$\Delta H_r^0 = \sum \Delta H_f^0 (\text{productos}) - \sum \Delta H_f^0 (\text{reactivos})$$

$\Delta H_f^0 (\text{O}_2(\text{g})) = 0$
(estado estándar)

Para la reacción dada:

$$\Delta H_r^0_{298K} = \Delta H_f^0 (\text{CO}_2 (\text{g})) + 2 \Delta H_f^0 (\text{H}_2\text{O} (\text{g})) - \Delta H_f^0 (\text{CH}_4(\text{g})) - 2 \Delta H_f^0 (\text{O}_2(\text{g}))$$

$$\Delta H_r^0_{298K} = -94,44 + 2 \cdot (-58,04) - (-17,96) - 0 = -192,56 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Se trata de una reacción de combustión, exotérmica (se libera calor)

3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

Actividad práctica 3.6. Calcular la entalpía de reacción estándar a 35 °C ($\Delta H_{r, 308 K}^{\circ}$) asociada a la reacción: $\text{CH}_4 (\text{g}) + 2 \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2 (\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O} (\text{g})$

Datos: $\Delta H_{r, 298 K}^{\circ} = -192,56 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$, calores específicos promedio en fase gas en $\text{cal}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$: $C_p(\text{CH}_4) = 10,0$; $C_p(\text{O}_2) = 7,3$; $C_p(\text{CO}_2) = 9,9$; $C_p(\text{H}_2\text{O}) = 8,2$.

Para calcular la entalpía de reacción a una temperatura diferente a la temperatura estándar, se utiliza la **Ley de Kirchoff**:

$$\Delta H_{r, 308 K}^{\circ} = \Delta H_{r, 298 K}^{\circ} + \int_{298 K}^{308 K} \sum \nu_i c_{p,i} dt$$

ν_i : coeficiente estequiométrico con signo (+ producto, - reactivo)

$$\Delta H_{r, 308 K}^{\circ} = \Delta H_{r, 298 K}^{\circ} + \int_{298 K}^{308 K} [1 \cdot C_p(\text{CO}_2) + 2 \cdot C_p(\text{H}_2\text{O}) - 1 \cdot C_p(\text{CH}_4) - 2 \cdot C_p(\text{O}_2)] dt$$

$$\Delta H_{r, 308 K}^{\circ} = -192,56 + \int_{298 K}^{308 K} [1 \cdot 9,9 + 2 \cdot 8,2 - 1 \cdot 10 - 2 \cdot 7,3] \cdot 10^{-3} dT \text{ (kcal}\cdot\text{mol}^{-1})$$

$$\Delta H_{r, 308 K}^{\circ} = -192,56 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1} + 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot \text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot^{\circ}\text{K}^{-1} (308 - 298) \text{ K}$$

$$\Delta H_{r, 308 K}^{\circ} = -192,54 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$$

3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

Actividad práctica 3.7. Se quema metanol líquido con un 100 % de exceso de aire. Se desea calcular la temperatura más alta que deberán soportar las paredes del quemador, de manera que se pueda seleccionar un material apropiado de construcción. Considerar que el metanol se suministra a 25 °C, el aire se precalienta a 100 °C y la conversión de metanol es completa.

- Representar el diagrama de flujo del proceso y realizar el análisis de grados de libertad.
- Calcular la temperatura de salida de los gases de combustión considerando el sistema adiabático. Es decir, sin pérdidas de calor al exterior.

Datos:

C_p (cal mol⁻¹ K⁻¹), valores de T en K

$$\text{CO}_2(\text{g}) = 6,34 + 0,01 T$$

$$\text{O}_2(\text{g}) = 6,12 + 0,003 T$$

$$\text{N}_2(\text{g}) = 6,46 + 0,0014 T$$

$$\text{H}_2\text{O}(\text{g}) = 8,15 + 0,001 T$$

$$\text{H}_2\text{O}(\text{l}) = 18 \text{ (cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$$

Entalpías de formación estándar (298 K):

$$\text{CH}_3\text{OH}(\text{l}): -56,99 \text{ kcal mol}^{-1}$$

$$\text{CO}_2(\text{g}): -94,05 \text{ kcal mol}^{-1}$$

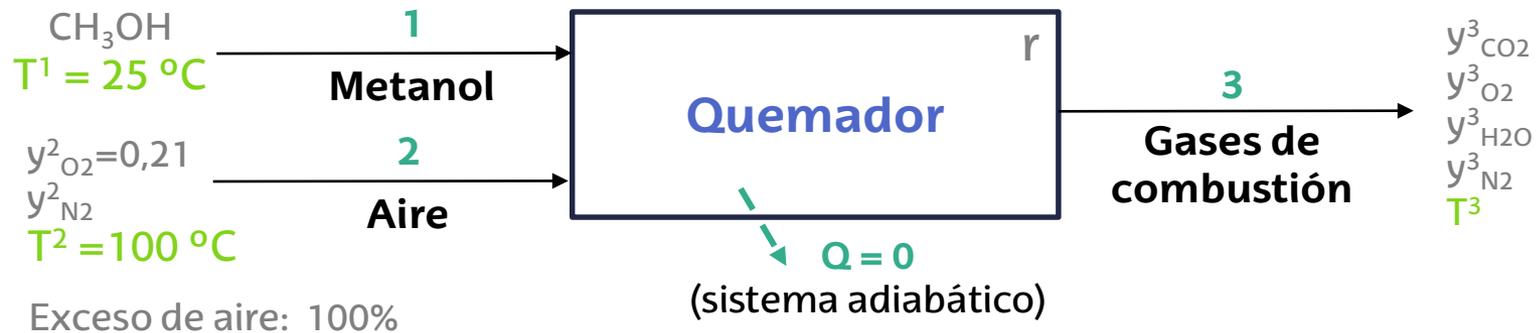
$$\text{H}_2\text{O}(\text{l}): -68,32 \text{ kcal mol}^{-1}$$

Calor de vaporización del agua: 10,52 kcal·mol⁻¹

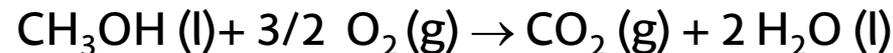
3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

a) Diagrama de flujo del proceso:



La reacción química (r) que ocurre es la combustión del metanol:



Se considera la temperatura de alimentación del metanol ($25\text{ }^\circ\text{C}$) para la que el metanol y el agua se encuentran en estado líquido.

Se plantea el análisis de grados de libertad (GL): $GL = V - E - \text{datos}$, por un lado para el balance de materia y por otro para el balance de materia y energía:

3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

Análisis de GL del balance de materia:

$V = n^\circ$ de variables linealmente independientes: 2 entradas (N^1, N^2), una salida (N^3), 4 composiciones ($y^2_{O_2}, y^3_{CO_2}, y^3_{CO}, y^3_{H_2O}$) y una reacción química (r) = 8

$E = n^\circ$ de ecuaciones linealmente independientes: 5 componentes ($CH_3OH, O_2, N_2, CO, CO_2$) = 5

Datos = 1 composición ($y^2_{O_2}$) y exceso de aire (100 %) = 2

$$GL = 8 - 5 - 2 = 1 \rightarrow \text{el problema está subespecificado}$$

Análisis de GL del balance materia y de energía:

$V = n^\circ$ de variables linealmente independientes: 8 (del balance de masa), 3 temperaturas (T^1, T^2, T^3) y calor intercambiado (Q) = 12

$E = n^\circ$ de ecuaciones linealmente independientes: 5 componentes (del balance de masa) y 1 ecuación del balance de energía = 6

Datos = 2 datos (del balance de masa), 2 temperaturas (T^1, T^2) y (Q) = 5

$$GL = 12 - 6 - 5 = 1 \rightarrow \text{el problema está subespecificado}$$

3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

GL=1, pero el problema puede resolverse si se establece una base de cálculo:

$$N^1 = 1 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \text{ (se quema 1 mol CH}_3\text{OH} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$$

Antes de plantear los balances de materia, se procede a calcular el caudal de aire utilizado para la combustión, sabiendo que el gas de combustión no contiene oxígeno y que se emplea un 100 % de exceso de aire:

$$1 \text{ mol CH}_3\text{OH} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \frac{3/2 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} \cdot \frac{100 \text{ mol aire}}{21 \text{ mol O}_2} \cdot \frac{200 \text{ mol aire}_2}{100 \text{ mol aire}} = 14,29 \text{ mol aire} \cdot \text{h}^{-1} = N^2$$

(100 % exceso de aire)

Balances de materia para cada componente:

CH₃OH: $0 = N^1 - r \rightarrow r = 1 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$ (conversión total, reacciona todo el CH₃OH)

CO₂: $y^3_{\text{CO}_2} N^3 = 0 + r$ ↳ Sustituir r $y^3_{\text{CO}_2} N^3 = 1 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

H₂O: $y^3_{\text{H}_2\text{O}} N^3 = 0 + 2r$ ↳ Sustituir r $y^3_{\text{H}_2\text{O}} N^3 = 2 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

O₂: $y^3_{\text{O}_2} N^3 = y^2_{\text{O}_2} N^2 - 3/2 r$ $y^3_{\text{O}_2} N^3 = 0,21 \cdot 14,29 - 3/2 \cdot 1 = 1,5 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

N₂: $y^3_{\text{N}_2} N^3 = y^2_{\text{N}_2} N^2 =$ $y^3_{\text{N}_2} N^3 = 0,79 \cdot 14,29 = 11,29 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

Sumando todos los componentes CH₃OH, CO₂, H₂O, O₂ y N₂

$$N^3 (y^3_{\text{CO}_2} + y^3_{\text{H}_2\text{O}} + y^3_{\text{O}_2} + y^3_{\text{N}_2}) = 15,79 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \rightarrow N^3 = 15,79 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$$

3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

Para hallar la composición del gas se salida (corriente 3), se sustituye el valor de N^3 en la ecuación de cada componente:

$$\text{CO}_2: y^3_{\text{CO}_2} N^3 = 1 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \rightarrow y^3_{\text{CO}_2} = \frac{1 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}}{15,79 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}} = 0,063 \rightarrow \% \text{CO}_2 = 6,3 \%$$

$$\text{H}_2\text{O}: y^3_{\text{H}_2\text{O}} N^3 = 2 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \rightarrow y^3_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}}{15,79 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}} = 0,127 \rightarrow \% \text{H}_2\text{O} = 12,7 \%$$

$$\text{O}_2: y^3_{\text{O}_2} N^3 = 1,5 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \rightarrow y^3_{\text{O}_2} = \frac{1,5 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}}{15,79 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}} = 0,095 \rightarrow \% \text{O}_2 = 9,5 \%$$

$$\text{N}_2: y^3_{\text{N}_2} N^3 = 11,28 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \rightarrow y^3_{\text{N}_2} = \frac{11,28 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}}{15,79 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}} = 0,715 \rightarrow \% \text{O}_2 = 71,5 \%$$

Los resultados de la composición del gas de salida (fracciones molares y porcentajes en volumen) se recogen en la siguiente tabla:

Componente	Fracción molar (y^3_i)	Porcentaje en volumen (i%)
CO ₂	0,063	6,3 %
H ₂ O	0,127	12,7 %
O ₂	0,095	9,5 %
N ₂	0,715	71,5 %
Total:	1,000	100 %

3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

Balace de energía:

La ecuación general del balance de energía es:

$$Q + W_S = \sum_j r_j \Delta H_{rj}(p_R, T_R, \pi_R) + \sum_{i=1}^n N_i^{\text{sal}} h_i \Big|_R^{\text{sal}} - \sum_{i=1}^n N_i^{\text{ent}} h_i \Big|_R^{\text{ent}}$$

Para el sistema abierto con una reacción (r), dos entradas (1 y 2) y una salida (3):

$$Q + W_S = r \Delta H_{r, \text{Ref.}}^0 + H^3 - H^2 - H^1$$

El sistema es adiabático ($Q = 0$) y en el proceso no se transfiere trabajo ($W_S = 0$).

Además, se establece un **estado de referencia** arbitrario:

- Presión: 1 atm, temperatura: 298 K
- Fases para los componentes: $\text{CH}_3\text{OH}(\text{l})$, $\text{O}_2(\text{g})$, $\text{CO}_2(\text{g})$, $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

$H^1=0$ (temperatura 298 K), por lo que la ecuación del balance de energía:

$$Q + W_S = r \Delta H_{r, 298 \text{ K}}^0 + H^3 - H^2 - H^1$$

$$0 = r \Delta H_{r, 298 \text{ K}}^0 + N^3 h^3 - N^2 h^2$$

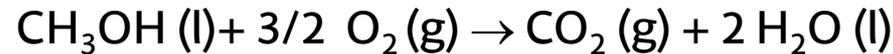
Ecuación [3.7]

Donde h^3 y h^2 son las entalpías específicas en $\text{cal}\cdot\text{mol}^{-1}$

3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

Primeramente, se calcula el valor de la entalpía de la entalpía de reacción a 298 K y 1 atm (entalpía de reacción estándar), para la reacción:



$\Delta H_f^\circ(\text{O}_2(\text{g}))=0$
(estado estándar)

$$\Delta H_r^\circ_{298 \text{ K}} = \Delta H_f^\circ(\text{CO}_2 (\text{g})) + 2 \Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O} (\text{l})) - \Delta H_f^\circ(\text{CH}_3\text{OH}(\text{g})) - 3/2 \Delta H_f^\circ(\text{O}_2(\text{g}))$$

$$\Delta H_r^\circ_{298 \text{ K}} = -94,05 + 2 \cdot (-68,32) - (-56,99) - 0 = -173,7 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1} = -173,7 \cdot 10^3 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Es una reacción de combustión, exotérmica (se libera calor)

A continuación, se calculan los valores de las entalpías específicas de las corrientes 2 y 3.

h²: teniendo en cuenta que la corriente se encuentra a 100 °C = 373 K:

$$h^2 = y^2_{\text{O}_2} \int_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} C_p(\text{O}_2) dT + y^2_{\text{N}_2} \int_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} C_p(\text{N}_2) dT$$

$$h^2 = 0,21 \int_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} (6,12 + 0,003 T) dT + 0,79 \int_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} (6,46 + 0,0014 T) dT$$

$$h^2 = 0,21 \cdot [6,12 T + 0,0015 \cdot T^2]_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} + 0,79 [6,46 T + 0,0007 \cdot T^2]_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}}$$

$$h^2 = 0,21 (2491,5 - 1957,0) + 0,79 (2507,0 - 1987,2) = 522,9 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$$

3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

h^3 : la corriente se encuentra a una temperatura T^3 que se debe calcular:

$$\begin{aligned}
 h^3 = & y^3_{\text{CO}_2} \int_{298 \text{ K}}^{T^3} C_p(\text{CO}_2) dT + y^3_{\text{O}_2} \int_{298 \text{ K}}^{T^3} C_p(\text{O}_2) dT + y^3_{\text{N}_2} \int_{298 \text{ K}}^{T^3} C_p(\text{N}_2) dT + \\
 & + y^3_{\text{H}_2\text{O}} \left[\underbrace{\int_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} C_p(\text{H}_2\text{O}(l)) dT}_{\text{Agua líquida: desde 298 K a 273 K (punto de ebullición)}} + \underbrace{\Delta H_{\text{H}_2\text{O,LV}}}_{\text{Evaporación: L} \rightarrow \text{V}} + \underbrace{\int_{373 \text{ K}}^{T^3} C_p(\text{H}_2\text{O}(g)) dT}_{\text{Vapor de agua: desde 373 K (punto de ebullición) a } T^3} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h^3 = & 0,063 \int_{298 \text{ K}}^{T^3} (6,34 + 0,01 T) dT + 0,095 \int_{298 \text{ K}}^{T^3} (6,12 + 0,003 T) dT + \\
 & + 0,715 \int_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} (6,46 + 0,0014 T) dT + 0,127 \left[\int_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} 18 dT + 10,52 \cdot 10^3 + \right. \\
 & \left. + \int_{373 \text{ K}}^{T^3} C_p(8,15 + 0,001 T) dT \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h^3 = & 0,063 \cdot [6,34 T + 0,005 \cdot T^2]_{298 \text{ K}}^{T^3} + 0,095 \cdot [6,12 T + 0,0015 \cdot T^2]_{298 \text{ K}}^{T^3} + \\
 & + 0,715 [6,46 T + 0,0007 \cdot T^2]_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} + 0,127 \left[[18 T]_{298 \text{ K}}^{373 \text{ K}} + 10,52 \cdot 10^3 + \right. \\
 & \left. + [8,15 T + 0,0005 \cdot T^2]_{373 \text{ K}}^{T^3} \right]
 \end{aligned}$$

$$h^3 = 0,0010 (T^3)^2 + 6,635 T^3 - 641,21 \quad (\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1}, \text{ en función de } T^3)$$

3.3. BALANCES DE ENERGÍA

3.3.2. Sistemas con reacción química

Se sustituyen los valores en el balance de energía, ecuación [3.7]

$$0 = r \Delta H_r^0_{\text{Ref.}} + N^3 h^3 - N^2 h^2$$

$$0 = 1 \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1} \cdot 173,7 \cdot 10^3 \text{ cal}\cdot\text{mol}^{-1} + 15,79 \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1} [0,0010 (T^3)^2 + 6,635 T^3 - 641, 21] - 14,29 \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1} (522,9 \text{ cal}\cdot\text{mol}^{-1})$$

$$0,016 (T^3)^2 + 104,7 \cdot T^3 - 1,56 \cdot 10^5 = 0$$

Se obtiene una ecuación de 2º grado en la que T^3 es la incógnita. De la resolución se obtienen dos valores, uno negativo que no tiene sentido físico y otro positivo: $T^3 = 1250 \text{ K} \rightarrow 977 \text{ °C}$.

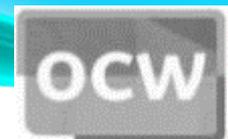
Por tanto, en las condiciones dadas, **977 °C** será la temperatura máxima que tendrán que soportar las paredes del horno.



TEMA 3.-

Balances de materia y energía

3.4. Aplicación de los balances de materia y energía: condensadores



Actividad práctica 3.8. Se alimenta un condensador (fig. 3.10) con una corriente de vapor de **acetona** pura, con un caudal de $10 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$, a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm ósfera. La acetona sale del condensador como líquido subenfriado a $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Se utiliza un condensador de contacto indirecto, de simple paso y que opera a contracorriente. El líquido refrigerante es **agua** que entra a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y sale a $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Realizar el análisis de grados de libertad.
- Calcular el caudal másico de agua de refrigeración necesario.

Datos:

Acetona:

Temperatura de condensación a 1 atm : $56 \text{ }^\circ\text{C}$

Capacidad calorífica promedio del vapor: $C_p = 0,084 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Capacidad calorífica promedio del líquido: $C_p = 0,13 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Calor de condensación en punto normal de ebullición: $\Delta H_v = 25,1 \text{ kJ mol}^{-1}$

Agua:

Capacidad calorífica (agua líquida): $C_p = 0,0754 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

3.4. APLICACIÓN DE LOS BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA: CONDENSADORES

En la figura 3.10 se recoge el diagrama de flujo del proceso:

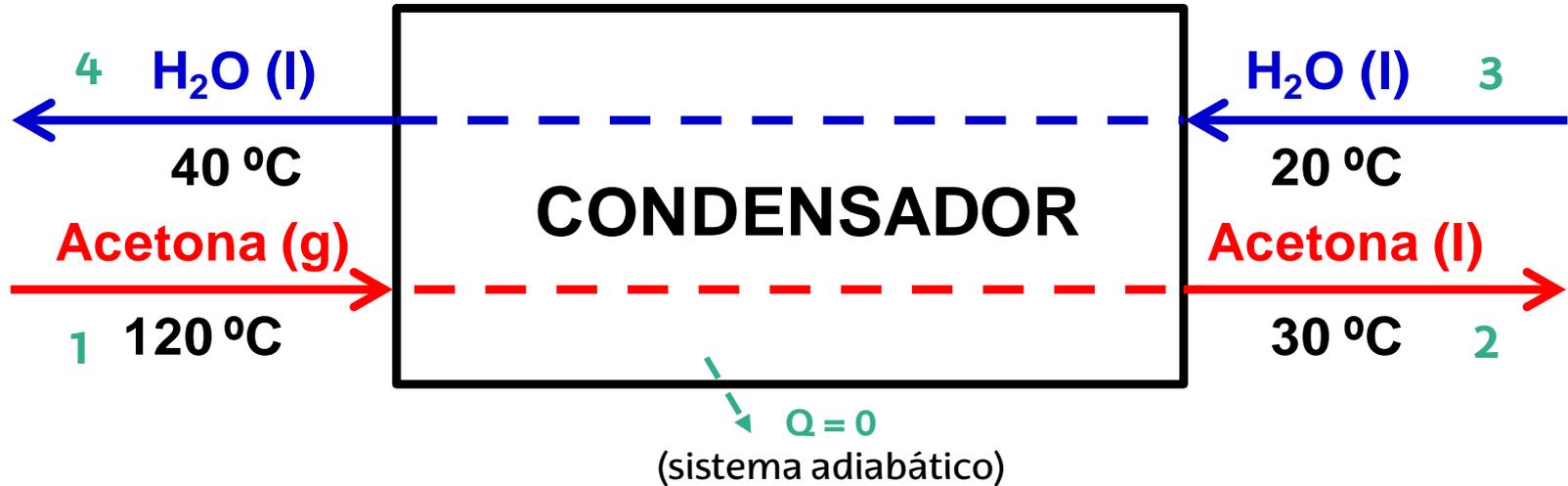


Figura 3.10. Esquema de un condensador de acetona en el que se emplea agua como fluido refrigerante. Fuente: elaboración propia

A continuación, se realiza el análisis de grados de libertad:

Análisis de GL del balance de materia:

$V = n^{\circ}$ de variables linealmente independientes: 2 entradas (N^1, N^3) y 2 salidas (N^2, N^4) = 4 (las corrientes son puras: las composiciones no son variables)

$E = n^{\circ}$ de ecuaciones linealmente independientes: 2 componentes (acetona, agua) = 2

Datos = un caudal (N^1)

$$GL = 4 - 2 - 1 = 1 \rightarrow \text{el problema está subespecificado}$$

Análisis de GL del balance materia y de energía:

$V = n^{\circ}$ de variables linealmente independientes: 4 (del balance de masa), 4 temperaturas (T^1, T^2, T^3, T^4) y calor intercambiado (Q) = 9

$E = n^{\circ}$ de ecuaciones linealmente independientes: 2 componentes (del balance de masa) y una ecuación del balance de energía = 3

Datos = un dato (del balance de masa), 4 temperaturas (T^1, T^2, T^3, T^4) y (Q) = 6

$$GL = 9 - 3 - 6 = 0 \rightarrow \text{el problema está especificado}$$

Del análisis de GL se deduce que el balance de materia y energía está especificado y, aunque el balance de masa esté subespecificado, depende del balance de energía. Se plantean a continuación ambos balances:

Balance de materia:

Acetona: $N^1 = N^2$

Agua: $N^3 = N^4$

El caudal de acetona (CH_3COCH_3 , $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) en términos molares:

$$10 \text{ kg acetona} \cdot \text{min}^{-1} \frac{1000 \text{ mol acetona}}{58 \text{ kg acetona}} = 172,4 \text{ mol acetona} \cdot \text{min}^{-1} = N^1 = N^2$$

Balance de energía:

La ecuación general del balance de energía es:

$$Q + W_s = \sum_j r_j \Delta H_{rj}(p_R, T_R, \pi_R) + \sum_{i=1}^n N_i^{\text{sal}} h_i \Big|_R^{\text{sal}} - \sum_{i=1}^n N_i^{\text{ent}} h_i \Big|_R^{\text{ent}}$$

Para el sistema abierto sin reacción, adiabático ($Q = 0$), proceso en el que no se transfiere trabajo ($W_s = 0$), 2 entradas (1 y 3) y 2 salidas (2 y 4):

$$0 = H^2 - H^1 + H^4 - H^3$$

Se establece el **estado de referencia** arbitrario:

- Presión: 1 atm, temperatura: 20 °C (de la corriente n°3: entrada del agua)
- Fases para los componentes: acetona (l), agua (l)

$H^3=0$ (temperatura 20 °C), por lo que la ecuación del balance de energía:

$$0 = H^2 - H^1 + H^4 \quad \text{Ecuación [3.8]}$$

A continuación, se calculan las entalpías de las corrientes 1, 2 y 4:

H¹: teniendo en cuenta que la corriente de acetona se encuentra a 120 °C:

$$H^1 = N^1 \left[\underbrace{\int_{20\text{ °C}}^{56\text{ °C}} C_p(\text{acetona(l)})dT}_{\text{Acetona líquida: de 20 °C a 56 °C (punto de ebullición)}} + \underbrace{\Delta H_{\text{acetona,LV}}}_{\text{Evaporación: L} \rightarrow \text{V}} + \underbrace{\int_{56\text{ °C}}^{120\text{ °C}} C_p(\text{acetona (g)}) dT}_{\text{Acetona (vapor): de 56 °C (punto de ebullición) a 120 °C}} \right]$$

$$H^1 = 172,4 \text{ mol} \cdot \text{min}^{-1} [0,13 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} (56-20) \text{ °C} + 24,1 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} + 0,084 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} (120-56) \text{ °C}] = 6060,9 \text{ kJ} \cdot \text{min}^{-1}$$

H²: teniendo en cuenta que la corriente de acetona se encuentra a 30 °C:

$$H^2 = N^2 \int_{20\text{ °C}}^{30\text{ °C}} C_p(\text{acetona(l)}) dT = N^2 \int_{20\text{ °C}}^{30\text{ °C}} 0,13 dT$$

$$H^2 = 172,4 \text{ mol} \cdot \text{min}^{-1} [0,13 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} (30-20)\text{°C}] = 224,1 \text{ kJ} \cdot \text{min}^{-1}$$

H⁴: teniendo en cuenta que la corriente de agua se encuentra a 40 °C:

$$H^4 = N^4 \int_{20\text{ °C}}^{40\text{ °C}} C_p(\text{agua (l)}) dT = N^4 \int_{20\text{ °C}}^{40\text{ °C}} 0,0754 dT$$

$$H^4 = N^4 [0,0754 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} (40-20)\text{°C}] = 1,51 N^4 \text{ kJ} \cdot \text{min}^{-1}$$

Sustituyendo los valores en la Ecuación [3.8], la única incógnita es el caudal molar de agua:

$$0 = H^2 - H^1 + H^4$$

$$0 = 224,1 - 6060,9 + 1,51 N^4 \text{ (kJ} \cdot \text{min}^{-1}\text{)}$$

$$N^4 = 3865,4 \text{ mol agua} \cdot \text{min}^{-1} = N^3$$

El caudal másico de agua:

$$3865,4 \text{ mol agua} \cdot \text{min}^{-1} \frac{18 \text{ kg agua}}{1000 \text{ mol agua}} = 69,6 \text{ kg agua} \cdot \text{min}^{-1}$$