



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

# BASES DE INGENIERÍA AMBIENTAL

## TEMA 3.- BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

### Materiales de estudio

Escuela de Ingeniería de Bilbao

Departamento de Ingeniería  
Química y del Medio Ambiente

Maite de Blas Martín

Jose Antonio García Fernández

M<sup>a</sup> Carmen Gómez Navazo



### Competencias

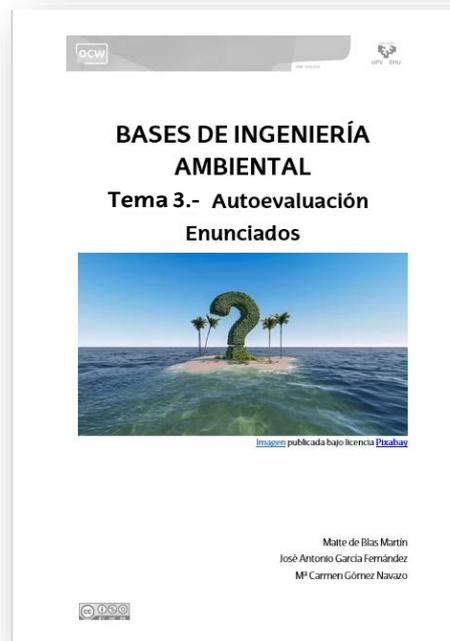
Nº	Descripción de la competencia
C1	Conocer y aplicar los diversos conceptos, tecnologías y medios de la ingeniería ambiental, independientemente del ámbito de especialización, con la finalidad de abordar problemas ambientales de manera integral.
C2	Organizar su propio trabajo, de manera autodirigida y autónoma, para alcanzar los objetivos planteados en el ámbito de la ingeniería ambiental.

### Resultados de aprendizaje

Nº	Descripción del resultado de aprendizaje
RA4	Conocer el contexto, metodología y secuencia de cálculo para resolver balances de materia y energía.
RA5	Organizar, relacionar, analizar y sintetizar los conocimientos sobre balances de materia y energía para resolver problemas mediante métodos y cálculos utilizados en ingeniería ambiental e interpretarlos.

Las actividades para el **Tema 3** son:

- Lectura de los **materiales de estudio** (recogidos en este documento),
- Realización de las **actividades prácticas**
- Realización de las **actividades de autoevaluación**.



**Portada de las actividades de Autoevaluación del Tema 3**

El cronograma recoge la dedicación aproximada a cada actividad del **Tema 3** (ya que su dedicación depende de la dedicación individual de cada estudiante para completar y/o profundizar en determinados conocimientos).

Se recomienda realizar las actividades prácticas a medida que se plantean en los materiales de estudio, de manera simultánea.

	Tiempo estimado	Semanas								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Video y Guía Docente	2 h	■								
Tema 1.- Materiales de estudio	5 h	■	■							
Tema 1.- Autoevaluación	1 h		■							
Tema 2.- - Materiales de estudio	8 h		■	■	■	■	■			
Tema 2.- Actividades prácticas	10 h			■	■	■	■	■		
Tema 2.- Autoevaluación	1 h							■		
Tema 3.- Materiales de estudio	4 h							■	■	■
Tema 3.- Actividades prácticas	8 h							■	■	■
Tema 3.- Autoevaluación	1 h									■

## TEMA 3.- Balances de materia y energía

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

3.2.2. Balances de materia con reacción química

3.3. Balances de energía

3.3.1. Cálculo de la entalpía: compuestos puros y mezclas

3.3.2. Balances de energía con reacción química

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



# TEMA 3.- Balances de materia y energía

## 3.1. Leyes de conservación de la materia y de la energía



Dos principios fundamentales en Ingeniería son los correspondientes a la **conservación de la materia y la energía**. Estos principios establecen que **la materia o la energía ni se crea ni se destruye, únicamente se transforma**. Este enunciado es general y tiene validez en todas las situaciones físicas, con la **excepción** de las **reacciones nucleares** o bajo **condiciones que se aproximen a la velocidad de la luz**, condiciones a las que las y los Ingenieros Ambientales no se enfrentan habitualmente.

Los balances de masa y de energía permiten determinar:

- **Caudales, composiciones y temperaturas** de las distintas corrientes en un proceso o sistema.
- **Calores transferidos** en los equipos, a partir de la información obtenida en puntos del proceso o sistema (normalmente materias primas y productos) y del funcionamiento de equipos y propiedades de los compuestos participantes.

- ✓ Los balances de materia y energía tienen un papel fundamental en el **diseño** preliminar, en el diseño final y en las **operaciones de proceso** en plantas e instalaciones.
- ✓ En el proceso de cálculo se puede ignorar la complejidad interna de los equipos implicados, considerándolos a efectos del balance como **cajas negras** (fig. 3.1) que intercambian materia y energía con sus alrededores por medio de los caudales de las corrientes que entran y salen de ellos.

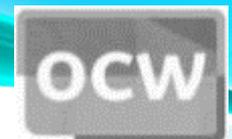


Figura 3.1. Esquema de un sistema considerado “caja negra” a efectos de balances de materia y energía. Fuente: elaboración propia.



# TEMA 3.- Balances de materia y energía

## 3.2. Balances de materia



## 3.2. BALANCES DE MATERIA

Una primera caracterización del balance de materia requiere definir un **volumen de control** (recinto, sistema o proceso) y se define dependiendo del estado / si existe o no reacción química:

**1.- Si se encuentra en estado estacionario o no estacionario**

**Estado estacionario:** no depende del tiempo:

$$[\text{Masa total}]_{\text{entrada}} = [\text{Masa total}]_{\text{salida}}$$

**Estado no estacionario:** depende del tiempo:

$$[\text{Masa total}]_{\text{entrada}} - [\text{Masa total}]_{\text{salida}} = \text{Acumulación}$$

## 3.2. BALANCES DE MATERIA

### 2.- Si existe **reacción química** o no

#### Sistema **sin** reacción química

Se conservan:

- ✓ La masa total y la masa de cada componente.
- ✓ El caudal molar total y caudal molar de cada componente.
- ✓ Los átomos totales y los átomos de cada elemento.

#### Sistema **con** reacción química:

Se conservan:

- ✓ La masa total.
- ✓ Los átomos totales y los átomos de cada elemento.

\*El caudal molar no se conserva: depende de la estequiometría de la reacción.

## 3.2. BALANCES DE MATERIA

De forma general, en régimen **no estacionario** (con variaciones de caudales y composiciones con el tiempo) y si existen reacciones químicas entre los compuestos presentes, la **expresión general de la ley de conservación de la materia** se puede establecer como:

$$[A] = [E] + [G] - [S] - [C]$$

Los distintos términos, expresados generalmente en la unidad de tiempo:

A: Cantidad de materia acumulada en el sistema (estado **no estacionario**).

E: Cantidad de materia que entra en el sistema.

G: Cantidad de materia generada en el sistema (**con reacción química**).

S: Cantidad de materia que sale del sistema.

C: Cantidad de materia que desaparece en el sistema (**con reacción química**).

## 3.2. BALANCES DE MATERIA

### Proceso general de resolución

Los pasos para el cálculo de un balance de masa en un caso general son:

1. Recopilar la **información** existente: diagrama del proceso (se puede simplificar para facilitar los cálculos) y sus variables: caudales, composiciones, relaciones, etc.
2. Comprobar si el problema es resoluble con la información existente mediante un **análisis de grados de libertad**.
3. Plantear las **ecuaciones** del balance.
4. **Resolver** el sistema de ecuaciones.

La nomenclatura (recomendada) es:

$X_a^b$	$\xrightarrow{\quad}$	b: número de corriente
	$\xrightarrow{\quad}$	a: compuesto

w: fracción en peso.

x, y: fracción molar en el líquido y el vapor, respectivamente.

F: caudal másico ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

N: caudal molar ( $\text{moles}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

## 3.2. BALANCES DE MATERIA

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

**Proceso sistemático de resolución: análisis de grados de libertad.**

$$GL = V - E - \text{datos}$$

**GL** = n° de grados de libertad

**V** = n° de variables linealmente independientes (entradas y salidas + composiciones)

**E** = n° de ecuaciones linealmente independientes

**Datos** = caudales, composiciones, relaciones, etc.

**GL = 0**, problema especificado, que tiene solución única.

**GL > 0**, problema subespecificado, faltan datos para su resolución. Si  $GL = 1$ , normalmente, se establece una base de cálculo o referencia.

**GL < 0**, problema sobreespecificado, sobran datos y las posibles soluciones podrían no ser válidas.

## 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  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

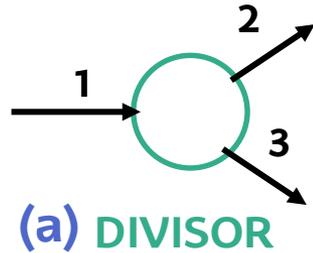
La corriente gaseosa de salida (4) tiene un 2% (en moles de agua).

- 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

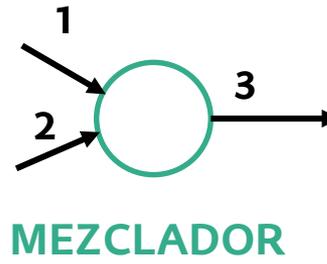
### 3.2.1. Balances de materia **sin** reacción química

Los **divisores** y **mezcladores** (fig. 3.2) se resuelven como equipos independientes, por ejemplo, para caudales ( $F$ ) y composición en masa ( $w_i$ ):



$$F^1 = F^2 + F^3$$

$$w_i^1 = w_i^2 = w_i^3$$



$$F^1 + F^2 = F^3$$

$$w_i^1 F^1 + w_i^2 F^2 = w_i^3 F^3$$

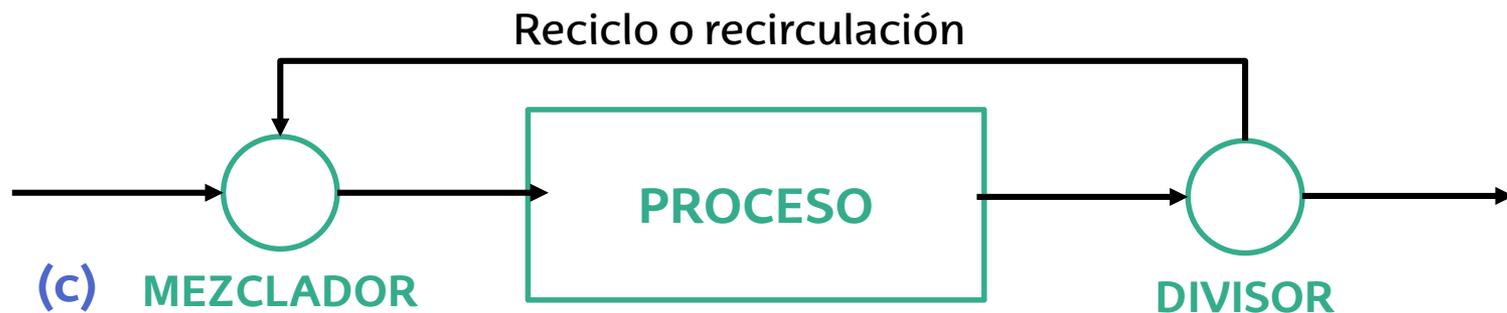
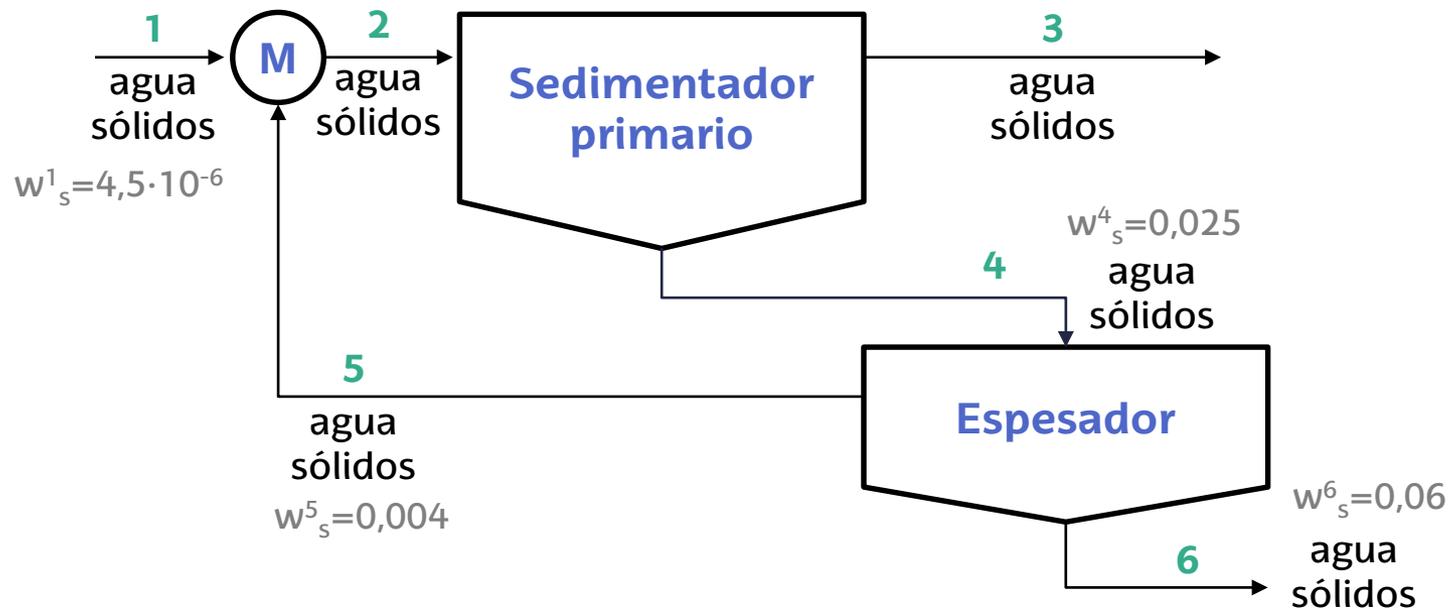


Figura 3.2. Ejemplo de configuraciones: **a)** Divisor, **b)** Mezclador y **c)** Configuración múltiple: mezclador, divisor y recirculación: corriente de salida de vuelta al proceso.  
Fuente: elaboración propia

## 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. 3.3).



**Figura 3.3.** 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

### 3.2.2. Balances de materia **con** reacción química

En los balances de materia con reacción química **no se conserva el número de moles** total o parcial de cada compuesto, ya que su número depende de la estequiometría de las reacciones implicadas en el proceso.

**La masa total sí se conserva**, siempre que no se vean implicadas reacciones de tipo nuclear. No se conserva la masa de cada uno de los compuestos, que podrá variar también en función de las reacciones implicadas.

**Opciones de cálculo:**

**1) Balances por compuesto en moles** utilizando las reacciones químicas del proceso.

**Deben conocerse todas las reacciones químicas que tienen lugar**

**2) Balances por elementos o en átomos**

## 3.2. BALANCES DE MATERIA

### 3.2.2. Balances de materia con reacción química

**1) Balance por compuesto en moles.** Se utiliza la ecuación general de la ley de conservación, incluidos los términos 'generación' y 'consumo' derivados de la existencia de reacciones químicas. Si se considera que el proceso es **estacionario** el término acumulación es "cero":

$$[\text{ENTRADA}] + [\text{GENERACIÓN}] = [\text{SALIDA}] + [\text{CONSUMO}]$$

Los pasos para resolver el balance de materia son los mismos que para procesos sin reacción química, excepto:

- Cálculo de **r (velocidad macroscópica)** para cada reacción.

$$r = \frac{\text{Consumo de reactivos}}{|\text{Coficiente estequiométrico}|} = \frac{\text{Generación de productos}}{|\text{Coficiente estequiométrico}|}$$

- Plantear las ecuaciones de balance, una para cada componente  $i$ .

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

$\gamma_i$ : coef. estequiométrico negativo  $\Rightarrow i$  reactivo

$\gamma_i$ : coef. estequiométrico positivo  $\Rightarrow i$  producto

## 3.2. BALANCES DE MATERIA

### 3.2.2. Balances de materia con reacción química

La **conversión (X)** es una forma habitual de indicar cuánto se consume un determinado reactivo en una reacción química. Se suele calcular sobre el **reactivo limitante**.

$$X_i = \frac{[i]_{\text{entrada}} - [i]_{\text{salida}}}{[i]_{\text{entrada}}}$$

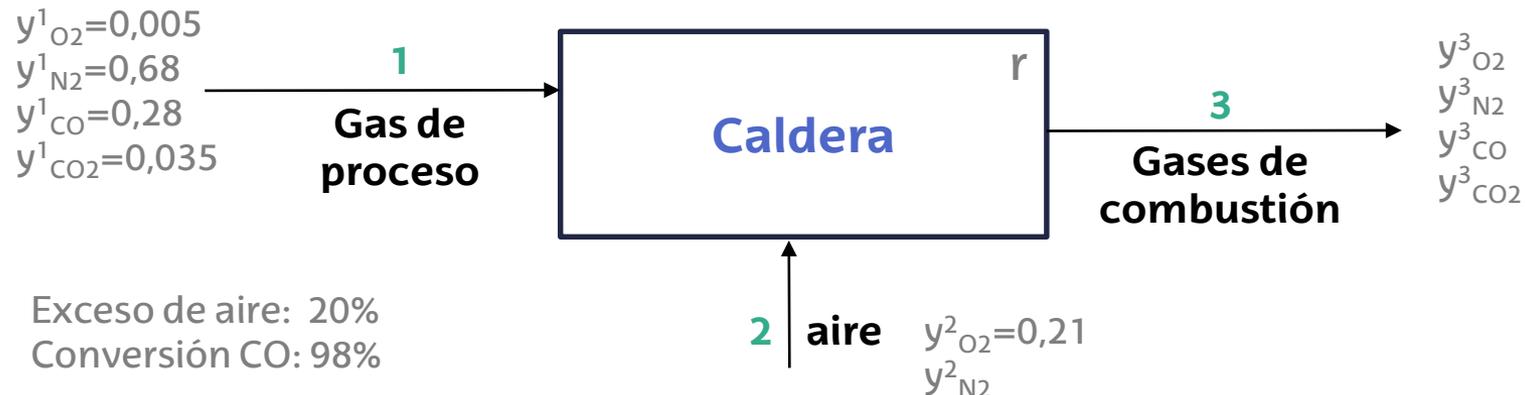
Cuando dos reactivos están presentes en las mismas proporciones (en términos molares) que los coeficientes estequiométricos de la reacción química en la que participan, se dice que están en **proporciones estequiométricas**.

Normalmente, la alimentación a un proceso químico no se encuentra en proporciones estequiométricas, sino que existe un reactivo que desaparece antes que el resto al ir avanzando la reacción. Dicho reactivo se denomina **reactivo limitante**, estando el resto de reactivos en **exceso** respecto de éste.

## 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% CO<sub>2</sub>, 0,5% O<sub>2</sub> y 68% de N<sub>2</sub> (fig. 3.4). Este 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

#### 2) Balances expresados según elementos o átomos.

- Para resolver los balances de masa por componentes planteados hasta ahora es necesario conocer todas las reacciones que tienen lugar.
- Tanto en sistemas sin reacción como con reacción química los **átomos** de cada elemento que participa en un proceso **se conservan**.
- En muchas aplicaciones se hace necesario el empleo de ecuaciones de **balances por elementos** porque:
  - La estequiometría de las reacciones implicadas no se conoce o es muy compleja.
  - Los reactivos son una mezcla compleja de compuestos de la que sólo se conoce el análisis elemental.

## 3.2. BALANCES DE MATERIA

### 3.2.2. Balances de materia con reacción química

Las ecuaciones de balance serán similares al cálculo por componentes.

Estado estacionario:

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

En general, las ecuaciones de balance de elementos son más difíciles de resolver de manera manual debido a que incorporan mayor número de incógnitas en cada ecuación, por lo que es menos probable que se presten a estrategias de solución secuencial.

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



# TEMA 3.- Balances de materia y energía

## 3.3. Balances de energía



## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### Ecuación general del balance de energía

- En muchos sistemas no es suficiente con plantear los balances de materia, ya que también se necesita conocer la temperatura.
- Los balances de energía se basan en el **principio de conservación de la energía** y permiten conocer variables como la temperatura o la cantidad de calor a eliminar o aportar a un sistema.
- Habitualmente, se aplican a **sistemas abiertos** (con movimiento de materia a través de sus límites), en **estado estacionario** y **con/sin reacción química** (fig. 3.5).

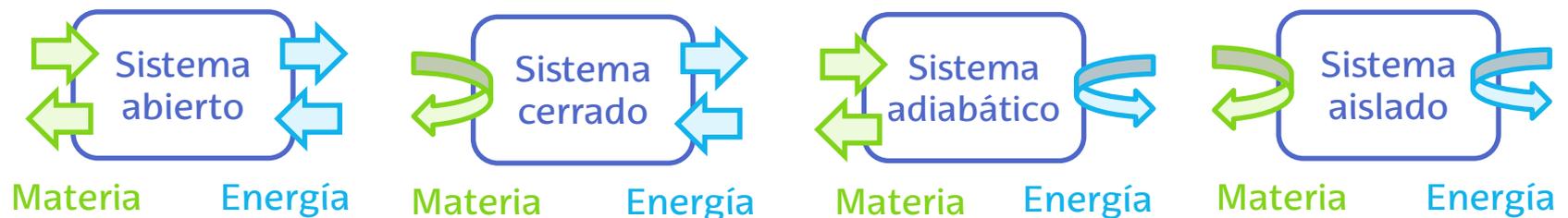


Figura 3.5. Tipos de sistemas en función de los flujos de materia y energía intercambiada con el entorno. Fuente: elaboración propia

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### Ecuación general del balance de energía

- En la mayoría de las ocasiones, la aplicación del principio de conservación de la energía implica una ecuación similar a la obtenida para la materia:

$$[A] = [E] + [G] - [S] - [C]$$

Siendo los términos, expresados generalmente respecto de la unidad de tiempo:

A: Cantidad de energía acumulada en el recinto (estado **no estacionario**).

E: Cantidad de energía recibida del exterior por el sistema.

G: Cantidad de energía generada en el interior del sistema.

S: Cantidad de energía liberada al exterior por el sistema.

C: Cantidad de energía consumida en el interior del sistema.

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### Ecuación general del balance de energía

Las formas en energía son (fig. 3.6):

$W_s$  = trabajo

$Q$  = calor intercambiado

$T_j, T_k$  = temperatura entrada y salida

$p_j, p_k$  = presión entrada y salida

$h_j, h_k$  = entalpía entrada y salida

$z_j, z_k$  = altura potencial entrada y salida

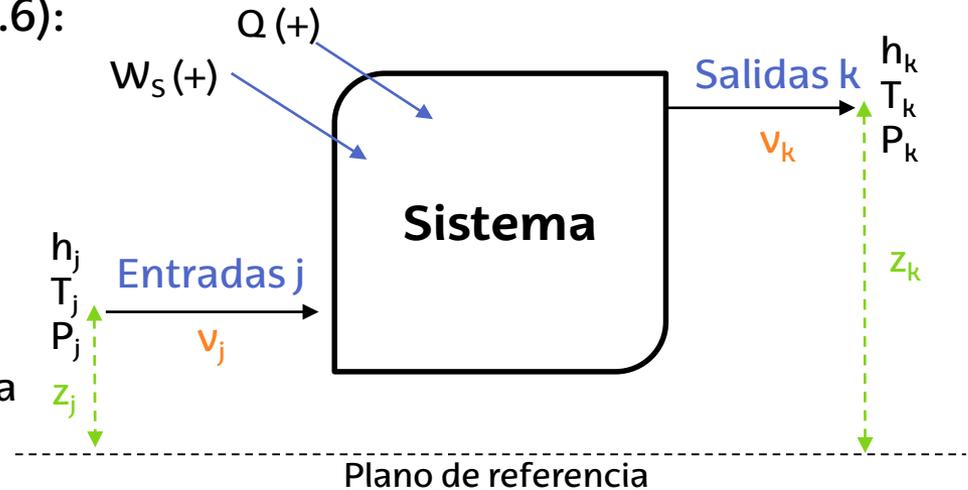


Figura 3.6. Formas de energía respecto de un plano de referencia para el balance de energía: entradas (j) y salidas (k). Elaboración propia a partir de Reklaitis G. V. y Schneider, D. R. (1983)

### Ecuación general del balance de energía (corrientes en masa)

$$0 = \sum_j F_j \left( h_j + \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Energía potencial}}}{gz_j} + \frac{1}{2} v_j^2 \right) - \sum_k F_k \left( h_k + \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Energía cinética}}}{gz_k} + \frac{1}{2} v_k^2 \right) + Q + W_s$$

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### Ecuación general del balance de energía

En la mayoría de las operaciones de la industria química o ambiental las variaciones de **energía potencial** y **energía cinética** son prácticamente despreciables frente al resto de los términos de la ecuación general de energía. Además, si no existe máquina que transfiera trabajo ( $W_s = 0$ ), la ecuación dada se puede reducir a la siguiente expresión:

$$0 = \sum_j F_j \left( h_j + \cancel{gz_j} + \cancel{\frac{1}{2}v_j^2} \right) - \sum_k F_k \left( h_k + \cancel{gz_k} + \cancel{\frac{1}{2}v_k^2} \right) + Q + \cancel{W_s}$$

#### Balance entálpico:

$$0 = \sum_j F_j (h_j) - \sum_k F_k (h_k) + Q \quad (\text{masa})$$

$$0 = \sum_j N_j (h_j) - \sum_k N_k (h_k) + Q \quad (\text{moles})$$

$$0 = \sum_j H_j - \sum_k H_k + Q$$

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### 3.3.1. Cálculo de la entalpía de una corriente

- La **entalpía** de una sustancia depende casi exclusivamente de su **composición química, estado de agregación y temperatura**, siendo prácticamente independiente de la presión (para gases ideales es rigurosamente independiente de la presión).
- Un aspecto importante en su cálculo es que, dado que no se pueden calcular valores absolutos de la entalpía, es una **función de estado**. Por tanto, para poder aplicar esta ecuación se requiere establecer un **estado de referencia** definido de manera general por una **presión** (aunque como hemos dicho afecta habitualmente muy poco), una **temperatura** y la **fase de los compuestos** que participan.

#### 1) Compuestos puros:

Si únicamente existe diferencia de temperatura entre el valor de la corriente y la referencia:

$$h - h^{\text{ref}} \left( \text{J mol}^{-1} \right) = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p \left( \text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1} \right) dT = \bar{c}_p \left( T - T_{\text{ref}} \right)$$

capacidad calorífica promedio a presión constante

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### 3.3.1. Cálculo de la entalpía de una corriente

#### 1) Compuestos puros:

Variación con la temperatura de la capacidad calorífica promedio a presión constante (fig. 3.7)

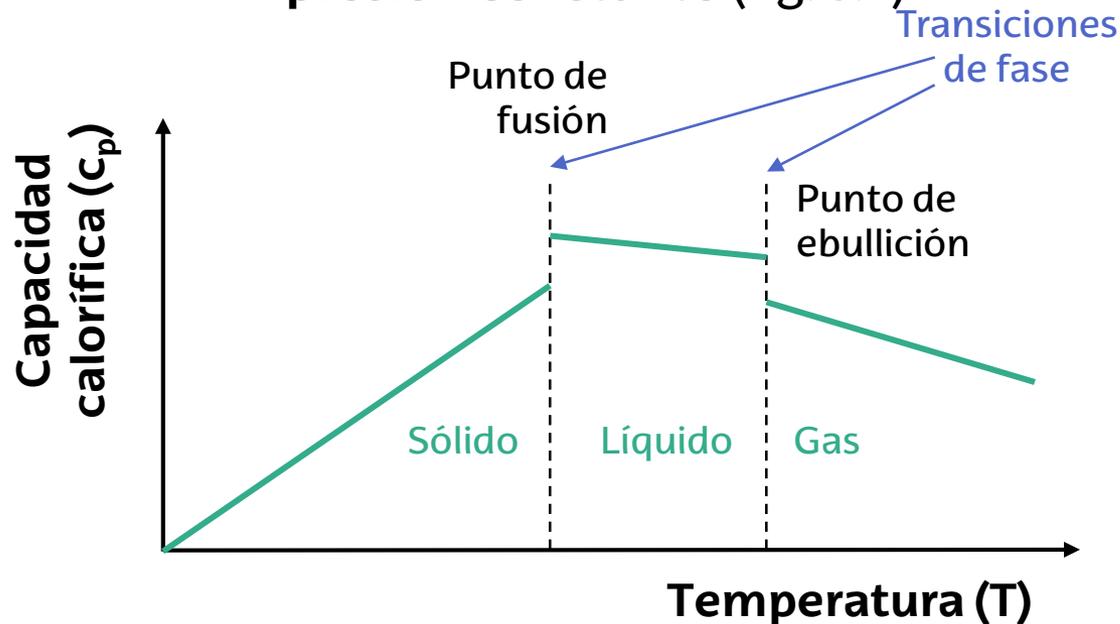


Figura 3.7. Capacidad calorífica vs. temperatura.  
Fuente: elaboración propia

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### 3.3.1. Cálculo de la entalpía de una corriente

#### 1) Compuestos puros:

Las capacidades caloríficas a presión constante de sustancias puras están tabuladas en forma de expresiones polinomiales y se basan en datos experimentales (tabla 3.1):

$$c_p = a + bT + cT^2$$

$$\int_{T_1}^{T_2} c_p dT = \int_{T_1}^{T_2} (a + bT + cT^2) dT = a(T_2 - T_1) + \frac{b}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{c}{3}(T_2^3 - T_1^3)$$

**Tabla. 3.1. Capacidad calorífica de gases ideales (ecuaciones aplicables estrictamente a presiones bajas)  $C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$  ( $J mol^{-1} K^{-1}$ ), T en K**

Sustancias	a	b	c	d
H <sub>2</sub> O	34,0471	-9,65064 10 <sup>-3</sup>	3,29983 10 <sup>-5</sup>	-2,04467 10 <sup>-8</sup>
CH <sub>4</sub>	38,3870	-7,36639 10 <sup>-2</sup>	2,90981 10 <sup>-4</sup>	-2,63849 10 <sup>-7</sup>
N <sub>2</sub>	29,4119	-3,00681 10 <sup>-3</sup>	5,45064 10 <sup>-6</sup>	5,13186 10 <sup>-9</sup>
O <sub>2</sub>	29,8832	-1,13842 10 <sup>-2</sup>	4,33779 10 <sup>-5</sup>	-3,70082 10 <sup>-8</sup>
CO	29,0063	2,49235 10 <sup>-3</sup>	-1,86440 10 <sup>-5</sup>	4,79892 10 <sup>-8</sup>
CO <sub>2</sub>	19,0223	7,96291 10 <sup>-2</sup>	-7,37067 10 <sup>-5</sup>	3,74572 10 <sup>-8</sup>

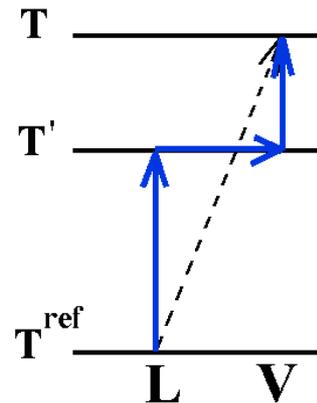
## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### 3.3.1. Cálculo de la entalpía de una corriente

#### 1) Compuestos puros:

Si además de cambios en la temperatura se producen cambios en el estado de agregación del compuesto puro, por ejemplo de líquido a vapor ( $L \rightarrow V$ ), tal y como se representa en la fig. 3.8:

$$h - h^{\text{ref}} = \bar{c}_{pL} (T' - T^{\text{ref}}) + \Delta h_{LV}^{T'} + \bar{c}_{pV} (T - T')$$



**Figura 3.8. Esquema para el cálculo de entalpía de una sustancia pura: desde la temperatura de referencia ( $T^{\text{ref}}$ ), pasando por el cambio de fase ( $T'$ ) hasta la temperatura final ( $T$ ). Fuente: elaboración propia**

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### 3.3.1. Cálculo de la entalpía de una corriente

#### 2) Mezclas:

En aplicaciones habituales de la Ingeniería Ambiental se manejan corrientes formadas por **mezclas** de muchos componentes.

Para una mezcla **ideal** formada por **n componentes**, de composiciones  $x_i$  y entalpías específicas  $h_i$ , la entalpía se puede expresar como el sumatorio de la fracción molar de cada componente de la mezcla, multiplicado por la entalpía de cada componente que forma la mezcla:

$$H = \sum_{i=1}^n x_i h_i$$

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### 3.3.2. Sistemas con reacción química

**Entalpía de reacción,  $\Delta H_r$ :** es la variación de entalpía asociada a una reacción química, a presión y temperatura constantes, por mol o unidad de masa de producto formado o reactivo consumido.

$\Delta H_r$  se denomina normal o estándar ( $\Delta H_r^\circ$ ) en el proceso hipotético en el que los reactivos y productos estuvieran en su estándar.

- $\Delta H_r < 0$ , reacción **exotérmica**
- $\Delta H_r > 0$ , reacción **endotérmica**

Por convenio, el estándar suele ser (aunque se podrían proponer otros):

**P:** 1 atm ó presión media del sistema. A presiones bajas y moderadas,  $\Delta H_r$  es prácticamente independiente de la presión  $\rightarrow \Delta H_r^\circ$  a 1 atm

**T:** suele ser 298 K, aunque existe libertad de elección.

**$\pi$ :** suele ser la fase existente a 1 atm.

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### 3.3.2. Sistemas con reacción química

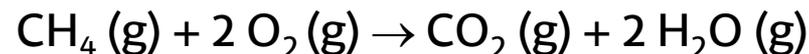
Para calcular el valor de la entalpía de reacción estándar a partir de los valores de las entalpías de formación  $\Delta H_f$  (valores tabulados):

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

(teniendo en cuenta los respectivos coeficientes estequiométricos)

\* Siempre ajustar la reacción química a utilizar

**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):

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

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

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

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### 3.3.2. Sistemas con reacción química

Para calcular la entalpía de reacción a una temperatura diferente a la temperatura estándar (25 °C, a la que suelen encontrarse los valores tabulados), se utiliza la **Ley de Kirchoff**:

$$\Delta H_{r,T_2}^{\circ} = \Delta H_{r,T_1}^{\circ} + \int_{T_1}^{T_2} \sum_i \nu_i c_{pi} dt$$

$\nu_i$ : coeficiente estequiométrico con signo (+ producto, - reactivo)

**Actividad práctica 3.6.** Calcular la entalpía de reacción estándar a 35 °C ( $\Delta H_{r,308K}^{\circ}$ ) 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:**  $\Delta H_{r,298K}^{\circ} = -192,56 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ , calores específicos promedio en fase gas en  $\text{cal}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ :  $C_p(\text{CH}_4) = 10,0$ ;  $C_p(\text{O}_2) = 7,3$ ;  $C_p(\text{CO}_2) = 9,9$ ;  $C_p(\text{H}_2\text{O}) = 8,2$ .

## 3.3. BALANCES DE ENERGÍA

### 3.3.2. Sistemas con reacción química

#### Ecuación general balance de energía en sistemas que reaccionan químicamente.

La ecuación general de balance de energía para **sistemas abiertos** con varias entradas y salidas, en régimen estacionario, considerando mezclas ideales y **con presencia de j reacciones químicas**:

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

**R:** es el estado de referencia **arbitrario**: presión, temperatura y fases ( $p_R, T_R, \pi_R$ ) para todos los componentes  $i$  de las corrientes de entrada (**entrada**) y salida (**salida**).

$h_i$ : entalpía específica de cada componente [ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ] entre el estado de referencia y los estados de las corrientes de entrada y salida.

## 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<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), 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<sup>-1</sup>



## TEMA 3.- Balances de materia y energía

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



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

## Condensadores

Un condensador térmico (fig. 3.9) es un equipo ampliamente utilizado en la industria. Se trata de un ejemplo de aplicación de los balances de energía sin reacción química.

La condensación de un fluido ocurre por intercambio del calor latente de un fluido en estado vapor (estado gaseoso) para dar lugar al líquido condensado. Para enfriar el fluido, se utiliza un fluido refrigerante que se calentará desde su temperatura de alimentación hasta la temperatura de salida.

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

## Condensadores

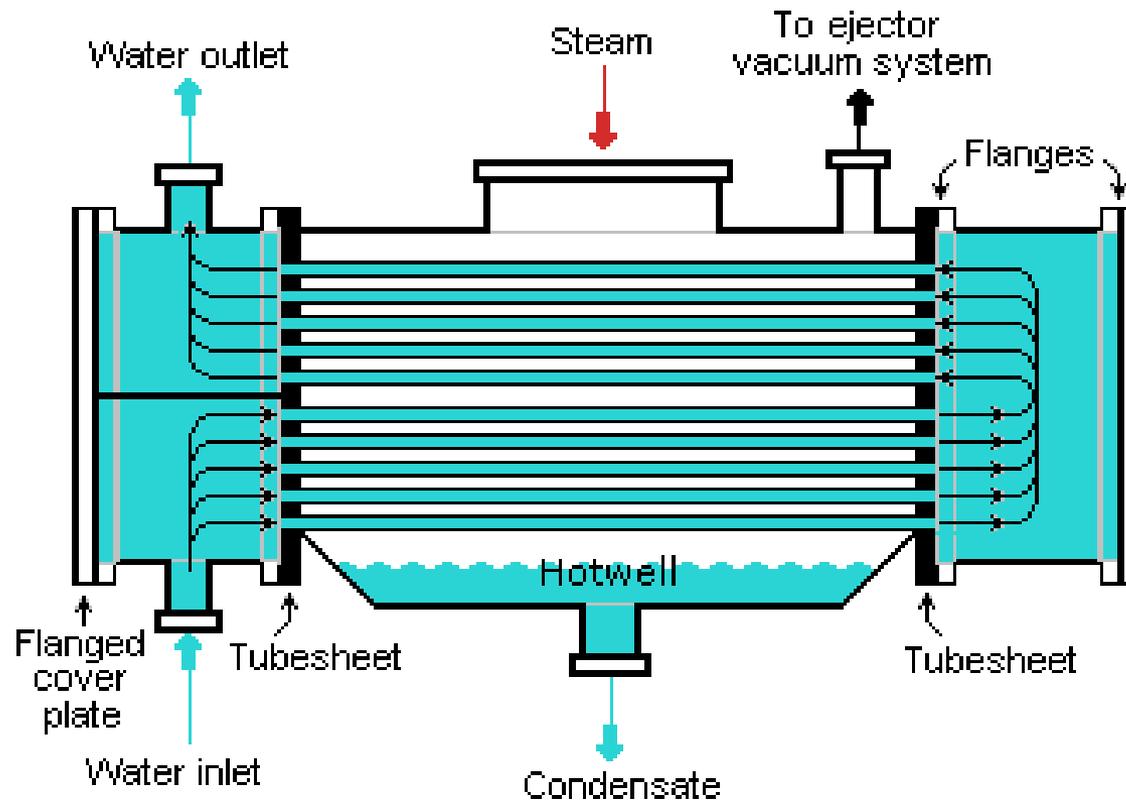


Figura 3.9. Esquema de un condensador. Imagen de [Wikimedia](#), dominio público

**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  $1 \text{ atm}$ 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  $1 \text{ atm}$ :  $56 \text{ }^\circ\text{C}$

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 BALANQUES DE MATERIA Y ENERGÍA: CONDENSADORES

## Actividad práctica 3.8

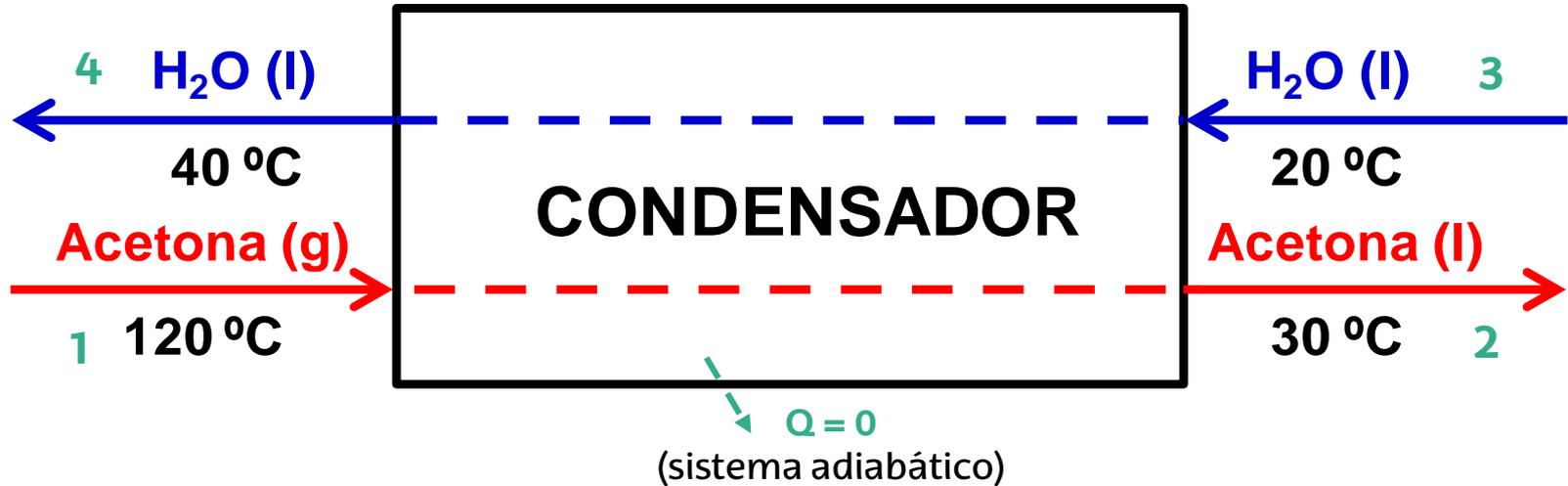


Figura 3.10. Esquema de un condensador de acetona en el que se emplea agua como fluido refrigerante. Fuente: elaboración propia

A continuación, se recogen las principales referencias utilizadas en este tema (el enlace a algunas referencias se han incluido al pie de página de los materiales de estudio):

## Referencias bibliográficas:

Davis, M.L., Masten, S. J. (2005). Ingeniería y Ciencias Ambientales. Editorial: McGraw-Hill.

Davies, M.L. Cornwell, D.A. (2006). Introduction to Environmental Engineering. Editorial: Mc Graw-Hill.

Muñoz, V. (2011). Bases de la Ingeniería Ambiental. Editorial: UNED.

Reklaitis, G. V., Schneider, D. R. (1983). Introduction to material and energy balances. Editorial: Wiley.

Ruiz Zapata, R. (2001). Bases de ingeniería ambiental con aplicaciones al tratamiento de aguas y residuos sólidos. Editorial: Universidad Miguel Hernández de Elche.