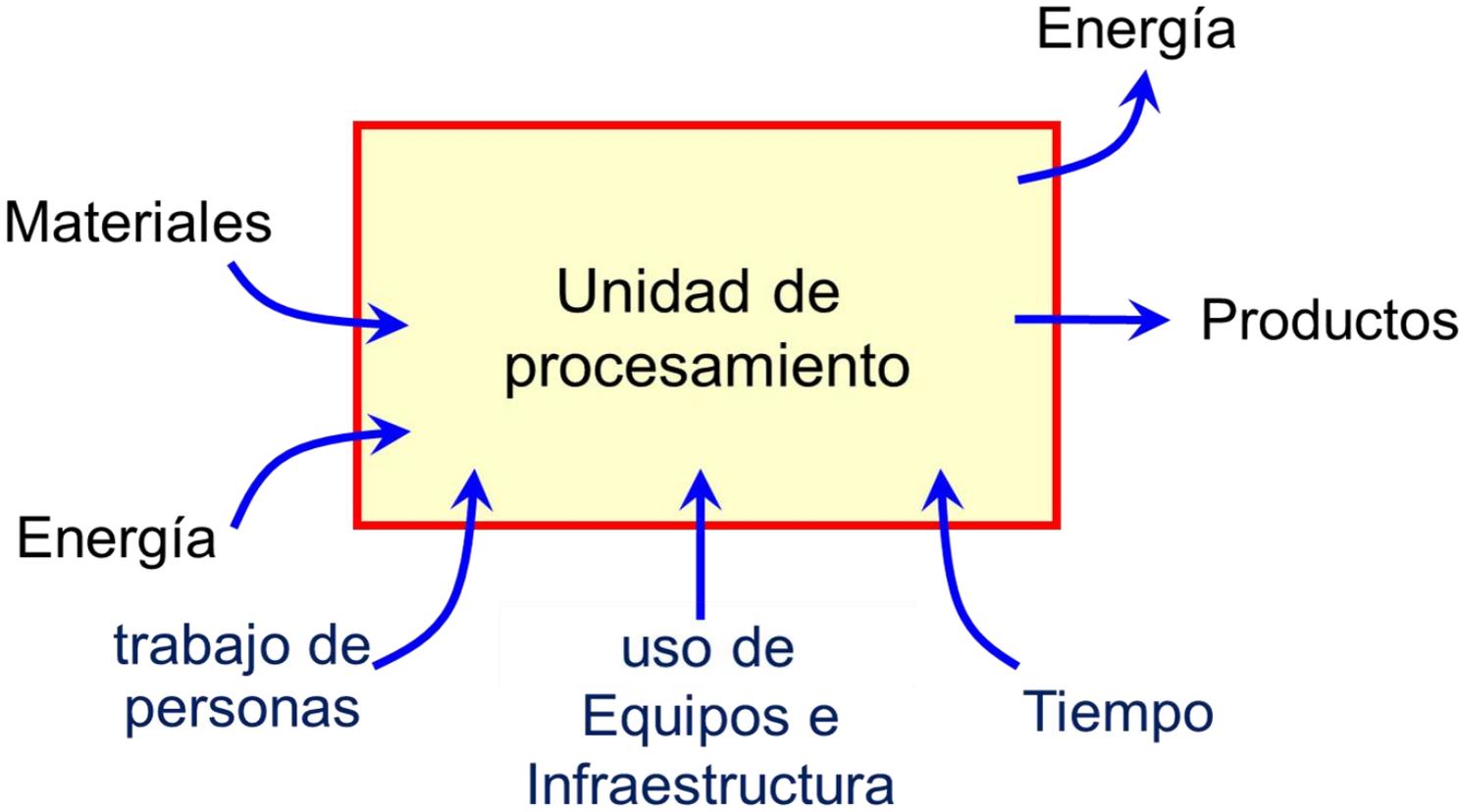


# Balances de Energía

# Energía

## Generalidades

# Uso de energía en la Planta de Procesos



# ¿Para qué necesitamos energía?

---

Necesitamos energía para:

- Movimiento (de fluidos, de sólidos, de personas,...)
- Comprimir gases y vapores
- Calentamiento (aumento de temperatura, cambios de fase)
- Enfriamiento (por debajo de la temperatura ambiente)

(... para que puedan ocurrir las Operaciones Unitarias necesarias)

- Otros (Iluminación, Oficinas...)

---

En nuestras actividades diarias, pero en la industria de procesos en particular, nos veremos enfrentados con frecuencia a preguntas tales como:

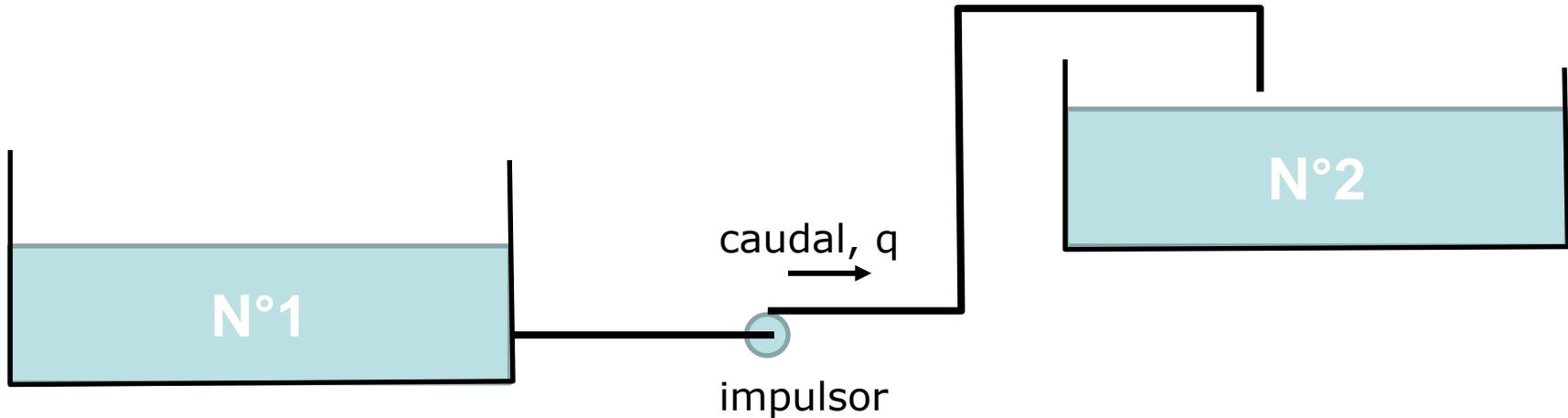
- ¿cuánta energía necesitaremos para llevar adelante tal o cual operación o proceso?

(ya sea porque querramos saber cuánto nos costará esa energía, o para dimensionar el equipamiento de suministro de esa energía, ...o de generación,... o de transmisión de esa energía, etc...)

- ¿cuánta energía se desperdicia?

(para por ej. evaluar cuánto podríamos ahorrar si la recuperamos, si vale la pena, etc...)

# Ejemplos de problemas a encarar



*¿Cuál será el consumo de electricidad del impulsor para hacer que el fluido escurra desde el tanque 1 al tanque 2 manteniendo el caudal  $q$ ?*

## Ejemplos de problemas a encarar

---

*Dos corrientes del proceso se mezclan en un reactor continuo y ocurre una reacción exotérmica. Determinar la temperatura de salida de la corriente de salida del reactor.*

# Ejemplos de problemas a encarar

---

*¿Cuál será el consumo de combustible requerido para mantener cierto equipo en funcionamiento?*

En nuestras actividades diarias, pero en la industria de procesos en particular, nos veremos enfrentados con frecuencia a preguntas tales como:

- ¿cuánta energía necesitaremos para llevar adelante tal o cual operación o proceso? (ya sea porque querramos saber cuánto nos costará esa energía, o para dimensionar el equipamiento de suministro de esa energía, ...o de generación,... o de trasmisión de esa energía, etc...)
- ¿cuánta energía se desperdicia? (para por ej. evaluar cuánto podríamos ahorrar si la recuperamos, si vale la pena, etc...)
- .... ?

Para poder contestar estas preguntas, lo primero es aprender a calcular las cantidades de energía requeridas, las generadas, las transferidas

... y para esto, la herramienta de cálculo es “ **Balances de Energía** ”.

# Balances de Energía

# Ecuación General de Balance de Energía

Algunas clases atrás vimos la ecuación de balance de una propiedad extensiva en un sistema...

Para un intervalo de tiempo ...

Cambio (acumulación) de P en el sistema =

- + cantidad de P que entra a través de la frontera
- cantidad de P que sale a través de la frontera
- + cantidad de P que se forma dentro del sistema
- cantidad de P que se consume dentro del sistema

$$\Delta P = \delta P_{\text{entrada}} - \delta P_{\text{salida}} + \delta P_{\text{formada}} - \delta P_{\text{consumida}}$$

todos los cambios medidos entre t y t +  $\Delta t$

Ecuación de  
Balance



Para un intervalo de tiempo ...

Cambio (acumulación) de P en el sistema =

- + cantidad de P que entra a través de la frontera
- cantidad de P que sale a través de la frontera
- + cantidad de P que se forma dentro del sistema
- cantidad de P que se consume dentro del sistema

$$\Delta P = \delta P_{\text{entrada}} - \delta P_{\text{salida}} + \delta P_{\text{formada}} - \delta P_{\text{consumida}}$$

todos los cambios medidos entre t y t +  $\Delta t$

Ecuación de  
Balance



# Balance de Energía para un intervalo de tiempo ...

Cambio (acumulación) de P en el sistema =

- + cantidad de P que entra a través de la frontera
- cantidad de P que sale a través de la frontera
- + cantidad de P que se forma dentro del sistema
- cantidad de P que se consume dentro del sistema

$$\Delta P = \delta P_{\text{entrada}} - \delta P_{\text{salida}} + \delta P_{\text{formada}} - \delta P_{\text{consumida}}$$

todos los cambios medidos entre t y t +  $\Delta t$

Ecuación de  
Balance



# Balance de Energía para un intervalo de tiempo ...

Cambio (acumulación) de E en el sistema =

- + cantidad de E que entra a través de la frontera
- cantidad de E que sale a través de la frontera
- + cantidad de E que se forma dentro del sistema
- cantidad de E que se consume dentro del sistema

$$\Delta E = \delta E_{\text{entrada}} - \delta E_{\text{salida}} + \delta E_{\text{formada}} - \delta E_{\text{consumida}}$$

todos los cambios medidos entre t y t +  $\Delta t$

# Balance de Energía considerando velocidades de cambio...

Velocidad de cambio (acumulación) de E en el sistema =

- + velocidad de entrada de E a través de la frontera
- velocidad de salida de E a través de la frontera
- + velocidad de formación de E dentro del sistema
- velocidad de consumo de E dentro del sistema

$$\dot{E}_{\text{acum}} = \dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}} + \dot{E}_{\text{formación}} - \dot{E}_{\text{consumo}}$$

todas las velocidades medidas en el mismo instante

Balance de Energía  
considerando velocidad y cambio

Velocidad cambio

ma =

+ vel

## NOTA IMPORTANTE

Estas ecuaciones son de  
aplicación en cualquier  
sistema

(dentro y fuera del estudio de  
los procesos de  
transformación)

mo

stante

# Resumen de ecuaciones generales

Ecuación de cambio de energía de un sistema en un intervalo de tiempo

$$\Delta E = \delta E_{\text{entrada}} - \delta E_{\text{salida}} + \delta E_{\text{formada}} - \delta E_{\text{consumida}}$$

todos los cambios medidos entre  $t$  y  $t + \Delta t$

Ecuación de velocidad de cambio de energía en un sistema

$$\dot{E}_{\text{acum}} = \dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}} + \dot{E}_{\text{formación}} - \dot{E}_{\text{consumo}}$$

todas las velocidades medidas en el mismo instante

# La Energía de un Sistema

---

Energía Total ( $E_T$ ) de un Sistema es la energía total que posee el sistema en un momento dado:

$$E_T = U + E_p + E_c$$

$U$  = energía interna

$E_p$  = energía potencial (gravitatoria) =  $M g z$

$E_c$  = energía cinética =  $\frac{1}{2} M v^2$

El intercambio de energía del sistema con el entorno ocurre a través de intercambios de calor ( $Q$ ), trabajo fluente ( $W_{\text{flujo}}$ ), trabajo no fluente ( $W_{\text{ext}}$ ) y materia que transporta energía.

El trabajo fluente o de flujo ( $W_{\text{flujo}}$ ) efectuado por una masa que se mueve es  $P V$  siendo ( $P$  la presión y  $V$  el volumen barrido)

# Términos de la Ecuación de Balance

---

## Término de Acumulación

Energía total del sistema en un instante dado,  $t_0$  ,

$$E_T (t_0) = U (t_0) + E_P (t_0) + E_C (t_0)$$

Luego de un cierto intervalo  $\Delta t$ , la energía total del sistema pasa a ser

$$E_T (t_0 + \Delta t) = U (t_0 + \Delta t) + E_P (t_0 + \Delta t) + E_C (t_0 + \Delta t)$$

El cambio de energía (energía total acumulada en el sistema en el intervalo  $\Delta t$ ) es:

$$E_T (t_0 + \Delta t) - E_T (t_0) = \Delta E = \Delta U + \Delta E_P + \Delta E_C$$

# Términos de la Ecuación de Balance

---

## Términos de Formación y Consumo

Salvo que existan reacciones nucleares (en las cuales podría ocurrir conversión entre masa y energía), en las situaciones que encontramos en la industria de procesos no hay creación ni destrucción de energía dentro del sistema.

# Términos de la Ecuación de Balance

---

## Términos de entrada y salida

Entrada – Salida =

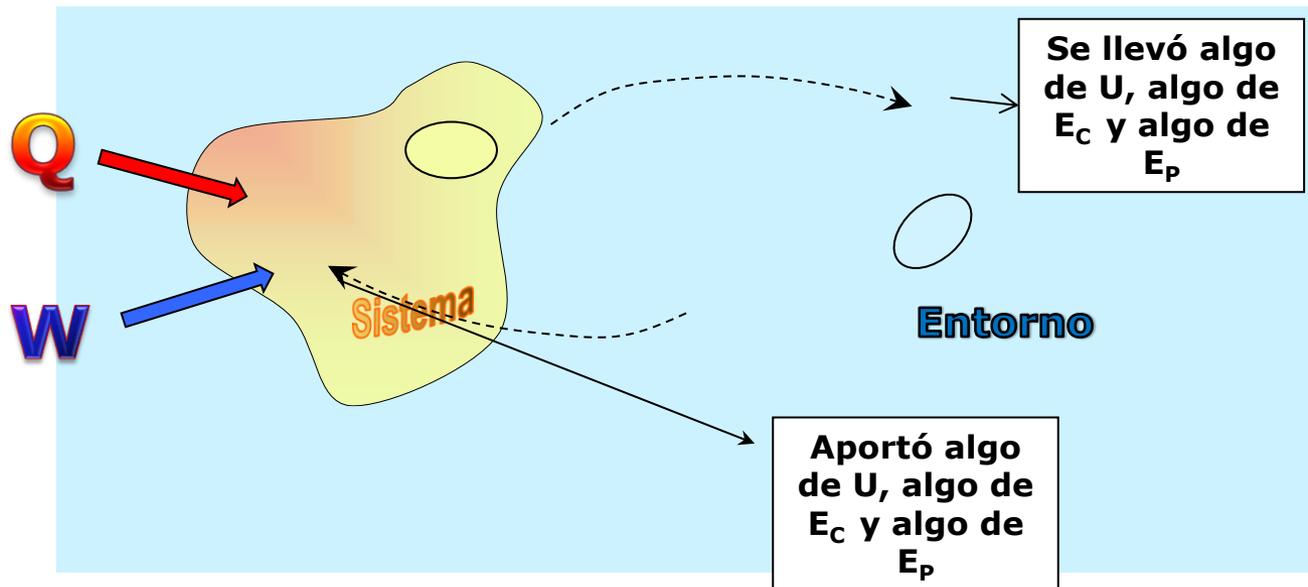
Esto es el intercambio de energía del sistema con el entorno.

Dicho intercambio ocurre a través de:

- materia intercambiada y que transporta energía,
- intercambios de calor ( $Q$ ),
- Intercambios de trabajo fluente ( $W_{\text{flujo}}$ ) e
- intercambio de trabajo no fluente ( $W_{\text{ext}}$ )

# Intercambio de Energía con el Entorno

---



Existen dos formas de intercambio de energía con el entorno:

- Energía interna y externa que transporta la masa intercambiada con el entorno.
- Energía que se transfiere por las fronteras del sistema (energías en tránsito) : Calor , Trabajo

# Términos de la Ecuación de Balance

## Términos de entrada y salida

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \sum M_i (u_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (u_j + v_j^2/2 + gz_j) + Q + W_{\text{ext}} + W_{\text{flujo}}$$

Ingreso y egreso de energía con las corrientes de masa que ingresan y egresan del sistema

$M_i$  es la masa de la corriente  $i$ ,  $u_i$  es su energía interna específica,  $v_i$  es su velocidad, y  $z_i$  su altura respecto a cierto nivel de referencia.

# Términos de la Ecuación de Balance

---

## Términos de entrada y salida

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \sum M_i (u_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (u_j + v_j^2/2 + gz_j)$$

$$+ Q + W_{\text{ext}} + W_{\text{flujo}}$$

Calor y trabajo de árbol  
recibido desde los  
alrededores

# Términos de la Ecuación de Balance

## Términos de entrada y salida

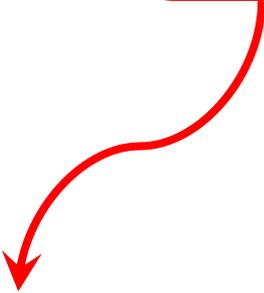
$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \sum M_i (u_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (u_j + v_j^2/2 + gz_j) \\ + Q + W_{\text{ext}} + W_{\text{flujo}}$$

Trabajo efectuado sobre el sistema por las corrientes que ingresan y egresan

# Términos de la Ecuación de Balance

## Términos de entrada y salida

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \sum M_i (u_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (u_j + v_j^2/2 + gz_j) \\ + Q + W_{\text{ext}} + W_{\text{flujo}}$$


$$W_{\text{flujo}} = \sum P_i V_i - \sum P_j V_j$$

El trabajo fluente o de flujo ( $W_{\text{flujo}}$ ) efectuado por una masa que se mueve es  $P V$  siendo ( $P$  la presión y  $V$  el volumen barrido)

# Términos de la Ecuación de Balance

## Términos de entrada y salida

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \sum M_i (u_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (u_j + v_j^2/2 + gz_j) \\ + Q + W_{\text{ext}} + W_{\text{flujo}}$$

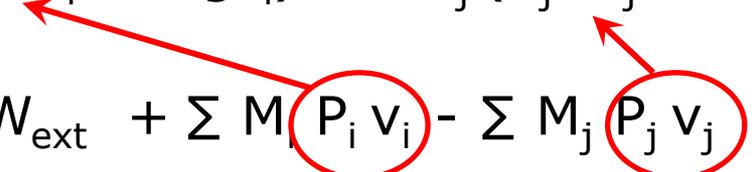
$$W_{\text{flujo}} = \sum P_i V_i - \sum P_j V_j = \sum M_i P_i v_i - \sum M_j P_j v_j$$

El trabajo fluente o de flujo ( $W_{\text{flujo}}$ ) efectuado por una masa que se mueve es  $P V$  siendo ( $P$  la presión y  $V$  el volumen barrido)

# Términos de la Ecuación de Balance

---

## Términos de entrada y salida

$$\begin{aligned} \text{Entrada} - \text{Salida} = & \sum M_i (u_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (u_j + v_j^2/2 + gz_j) \\ & + Q + W_{\text{ext}} + \sum M_i P_i v_i - \sum M_j P_j v_j \end{aligned}$$


Combinando con los términos de energía de las corrientes...

# Términos de la Ecuación de Balance

---

## Términos de entrada y salida

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \sum M_i (u_i + P_i v_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (u_j + P_j v_j + v_j^2/2 + gz_j) + Q + W_{\text{ext}}$$

Pero...  $u_i + P_i v_i = h_i$

= entalpía específica (por definición de entalpía)

# Términos de la Ecuación de Balance

---

## Términos de entrada y salida

$$\begin{aligned} \text{Entrada} - \text{Salida} = & \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) \\ & + Q + W_{\text{ext}} \end{aligned}$$

Pero...  $u_i + P_i v_i = h_i$

= entalpía específica (por definición de entalpía)

# Términos de la Ecuación de Balance

---

## Términos de entrada y salida

$$\begin{aligned} \text{Entrada} - \text{Salida} = & \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) \\ & + Q + W_{\text{ext}} \end{aligned}$$

# Ecuación de Balance de Energía

Entrada - Salida + Formación - Consumo = Acumulación

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) \\ + Q + W_{\text{ext}}$$

$$\text{Energía total acumulada} = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_C$$

$$\text{Formación} - \text{Consumo de Energía total} = 0$$

$$Q + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_C$$

# Ecuación de Balance de Energía

$$Q + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_C$$

Esta es la ecuación de cambio entre dos instantes  $t$  y  $t + \Delta t$

También se puede plantear la ecuación de velocidad de cambio para un instante dado  $t$  :

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_C$$

donde  $q$  es el flujo neto de calor que ingresa al sistema,  $\dot{w}_{\text{ext}}$  es el flujo neto de trabajo no fluente efectuado sobre el sistema, y donde  $m_i$  y  $m_j$  son los flujos máxicos de las corrientes de entrada y salida respectivamente

# Casos particulares

---

$$Q + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_c$$

# Casos particulares (1)

## Sistema cerrado

$$Q + W_{\text{ext}} + \cancel{\sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i)} - \cancel{\sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j)} = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_C$$

No entra ni sale materia ( $M_i, M_j = 0$ ).

La ecuación de balance queda reducida a:

$$Q + W_{\text{ext}} = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_C$$

## Casos particulares (2)

### Estado estacionario, una única corriente de entrada y otra única de salida

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_c$$

Por estar en estado estacionario, los términos  $\dot{U}$ ,  $\dot{E}_p$  y  $\dot{E}_c$  son 0.

Una única corriente de entrada y otra única de salida, sin acumulación de masa (por estado estacionario), entonces ambas corrientes son de la misma magnitud.

$$\sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = m[-\Delta h - \Delta(v^2/2) - g \Delta z]$$

Aquí,  $\Delta h$  = diferencia de entalpía específica entre salida y entrada

$\Delta z$  = diferencia de nivel entre salida y entrada

$\Delta(v^2/2)$  = diferencia del término  $(v^2/2)$  entre salida y entrada

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} = m[\Delta h + \Delta(v^2/2) + g \Delta z]$$

## Casos particulares (2)

### Estado estacionario, una única corriente de entrada y otra única de salida

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_c$$

Por estar en estado estacionario, los términos  $\dot{U}$ ,  $\dot{E}_p$  y  $\dot{E}_c$  son 0.

Una única corriente de entrada y otra única de salida, sin acumulación de masa (por estado estacionario), entonces ambas corrientes son de la misma magnitud.

$$\sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = m(-\Delta h - \Delta(v^2/2) - g \Delta z)$$

Aquí,  $\Delta h$  = diferencia de entalpía específica entre salida y entrada

$\Delta z$  = diferencia de nivel entre salida y entrada

$\Delta(v^2/2)$  = diferencia del término  $(v^2/2)$  entre salida y entrada

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} = m(\Delta h + \Delta(v^2/2) + g \Delta z)$$

## Casos particulares (3)

Equipo industrial operando en régimen (estado estacionario), sin intercambio de calor ni trabajo de árbol con el entorno, y aportes despreciables de energía cinética y potencial.

$$\cancel{q} + \cancel{\dot{w}}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + \cancel{v_i^2/2 + gz_i}) - \sum m_j (h_j + \cancel{v_j^2/2 + gz_j}) = \cancel{\dot{U}} + \cancel{\dot{E}_p} + \cancel{\dot{E}_c}$$

No intercambia calor ni trabajo con el entorno

Estado estacionario: No hay acumulación de energía en el sistema.

Aportes despreciables de energía cinética y potencial

$$\sum m_i h_i - \sum m_j h_j = 0$$

Estas condiciones aplican en muchas de las operaciones unitarias que tienen lugar en los procesos de transformación.

## Una particularidad de los B de E...

### Ecuación de Balance de Energía total

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_c$$

Para resolver las ecuaciones de balance en sistemas abiertos será necesario (entre otras cosas) conocer las entalpías de las corrientes de entrada y salida.

¿  $h_i$  ?

## Una particularidad de los B de E...

### Ecuación de Balance de Energía total

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_c$$

Para resolver las ecuaciones de balance en sistemas abiertos será necesario (entre otras cosas) conocer las entalpías de las corrientes de entrada y salida.

¿Cómo conocer las entalpías de las corrientes?

# Obtención de los valores de entalpía

# Valores de entalpía de una corriente

---

## Caso: Sustancia Pura en una Fase

La entalpía es función de estado.

Para una sustancia pura en una sola fase, el "estado termodinámico" queda determinado si se conocen dos de las siguientes:  $P$ ,  $T$ ,  $v$ ,  $u$ ,  $h$ ,  $s$ , cualquier otra función de estado

Existen tablas y gráficos que dan los valores de las propiedades termodinámicas (incluyendo la entalpía) para las sustancias más comunes, a diferentes condiciones de  $T$  y  $P$ .

Existen softwares que dan valores de las propiedades termodinámicas para una elección dada de 2 de ellas.

# Valores de entalpía de una corriente

---

## Caso: Sustancia Pura en dos Fases en equilibrio

Para una sustancia pura presente en dos fases en equilibrio, basta conocer sólo una de las anteriores (todas las demás quedan determinadas – regla de las fases)

En ocasiones podremos calcular el cambio de entalpía que sufre una corriente entre que entra y que sale del sistema a partir de otros cambios físicos o químicos conocidos.

# Tablas y gráficos para sustancias puras

- ✓ Listan propiedades termodinámicas de la sustancia para distintas temperaturas y presiones
- ✓ Las hay para estados en una sola fase (en general vapor) o para estados en equilibrio (líquido-vapor, sólido-líquido, etc...)

Ejemplo: Tabla para equilibrio líquido – vapor para una sustancia pura

Temp. T	Presión p	Volumen espec., V		Energía interna, U		Entalpía H		Entropía S	
		Líquido Sat	Vapor Sat	Líquido Sat	Vapor Sat	Líquido Sat	Vapor Sat	Líquido Sat	Vapor Sat
K	kPa	cm <sup>3</sup> /g		kJ /kg		kJ /kg		kJ /kg.K	

- ✓ Se utiliza interpolación (lineal) para valores que no están en tabla, pero están dentro de su rango

**TABLE 2-237 Saturated Benzene\***

$T, \text{K}$	$P, \text{bar}$	$v_f, \text{m}^3/\text{kg}$	$v_g, \text{m}^3/\text{kg}$	$h_f, \text{kJ}/\text{kg}$	$h_g, \text{kJ}/\text{kg}$	$s_f, \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$s_g, \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$c_{pf}, \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$\mu_f, 10^{-4} \text{Pa}\cdot\text{s}$	$k_f, \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
290	0.0860	1.133. $\cdot 10^{-3}$	3.569. $\cdot 10^{-1}$	371.1	810.3	2.172	3.686	1.719	6.75	0.147
300	0.1382	1.147. $\cdot 10^{-3}$	2.292. $\cdot 10^{-1}$	388.3	820.4	2.229	3.670	1.746	5.80	0.144
310	0.2139	1.162. $\cdot 10^{-3}$	1.525. $\cdot 10^{-1}$	405.9	830.8	2.286	3.657	1.774	5.14	0.141
320	0.3206	1.176. $\cdot 10^{-3}$	1.046. $\cdot 10^{-1}$	423.8	841.5	2.344	3.650	1.804	4.52	0.138
330	0.4665	1.192. $\cdot 10^{-3}$	7.379. $\cdot 10^{-1}$	442.1	852.4	2.400	3.643	1.836	3.95	0.135
340	0.6615	1.207. $\cdot 10^{-3}$	5.332. $\cdot 10^{-1}$	460.8	863.6	2.455	3.641	1.868	3.55	0.132
350	0.9162	1.224. $\cdot 10^{-3}$	3.938. $\cdot 10^{-1}$	479.6	875.0	2.510	3.641	1.890	3.23	0.129
360	1.2419	1.241. $\cdot 10^{-3}$	2.965. $\cdot 10^{-1}$	498.7	886.7	2.564	3.642	1.920	2.99	0.126
370	1.6517	1.259. $\cdot 10^{-3}$	2.233. $\cdot 10^{-1}$	518.1	898.6	2.617	3.646	1.950	2.72	0.123
380	2.1588	1.277. $\cdot 10^{-3}$	1.767. $\cdot 10^{-1}$	537.7	910.6	2.669	3.651	1.989	2.46	0.120
390	2.7774	1.297. $\cdot 10^{-3}$	1.393. $\cdot 10^{-1}$	557.6	922.9	2.592	3.657	2.030	2.24	0.117
400	3.5228	1.318. $\cdot 10^{-3}$	1.112. $\cdot 10^{-1}$	577.9	935.2	2.644	3.665	2.070	2.05	0.114
410	4.4091	1.340. $\cdot 10^{-3}$	8.972. $\cdot 10^{-2}$	598.6	947.8	2.823	3.674	2.110	1.88	0.111
420	5.4540	1.363. $\cdot 10^{-3}$	7.309. $\cdot 10^{-2}$	619.7	960.4	2.873	3.684	2.160	1.73	0.107
430	6.6739	1.388. $\cdot 10^{-3}$	6.003. $\cdot 10^{-2}$	641.3	973.0	2.924	3.695	2.210	1.60	0.104
440	8.0861	1.415. $\cdot 10^{-3}$	4.965. $\cdot 10^{-2}$	663.5	985.6	2.974	3.706	2.260	1.48	0.101
450	9.7088	1.444. $\cdot 10^{-3}$	4.131. $\cdot 10^{-2}$	686.3	998.2	3.025	3.718	2.320	1.37	0.098
460	11.451	1.475. $\cdot 10^{-3}$	3.455. $\cdot 10^{-2}$	709.7	1010.7	3.075	3.730	2.380	1.28	0.095
470	13.660	1.510. $\cdot 10^{-3}$	2.901. $\cdot 10^{-2}$	733.8	1022.9	3.126	3.742	2.450	1.10	0.092
480	16.028	1.548. $\cdot 10^{-3}$	2.441. $\cdot 10^{-2}$	758.6	1034.9	3.179	3.753	2.519	1.12	0.089
490	18.685	1.591. $\cdot 10^{-3}$	2.059. $\cdot 10^{-2}$	784.3	1046.4	3.230	3.765	2.590	1.05	0.086
500	21.651	1.640. $\cdot 10^{-3}$	1.736. $\cdot 10^{-2}$	810.9	1057.3	3.284	3.777	2.670	0.98	0.083
510	24.952	1.697. $\cdot 10^{-3}$	1.462. $\cdot 10^{-2}$	838.5	1067.5	3.336	3.785	2.750	0.91	
520	28.613	1.765. $\cdot 10^{-3}$	1.226. $\cdot 10^{-2}$	867.2	1076.6	3.391	3.794	2.839	0.84	
530	32.669	1.849. $\cdot 10^{-3}$	1.020. $\cdot 10^{-2}$	897.2	1084.3	3.446	3.800	2.941	0.77	
540	37.161	2.126. $\cdot 10^{-3}$	8.349. $\cdot 10^{-3}$	928.8	1089.5	3.504	3.802		0.70	
550	42.144	2.258. $\cdot 10^{-3}$	6.616. $\cdot 10^{-3}$	963.2	1090.4	3.565	3.797		0.65	
560	47.696	2.512. $\cdot 10^{-3}$	4.696. $\cdot 10^{-3}$	1007.3	1077.6	3.642	3.769		0.60	
562.2	48.979	3.290. $\cdot 10^{-3}$	3.290. $\cdot 10^{-3}$	1043.0	1043.0	3.706	3.706			

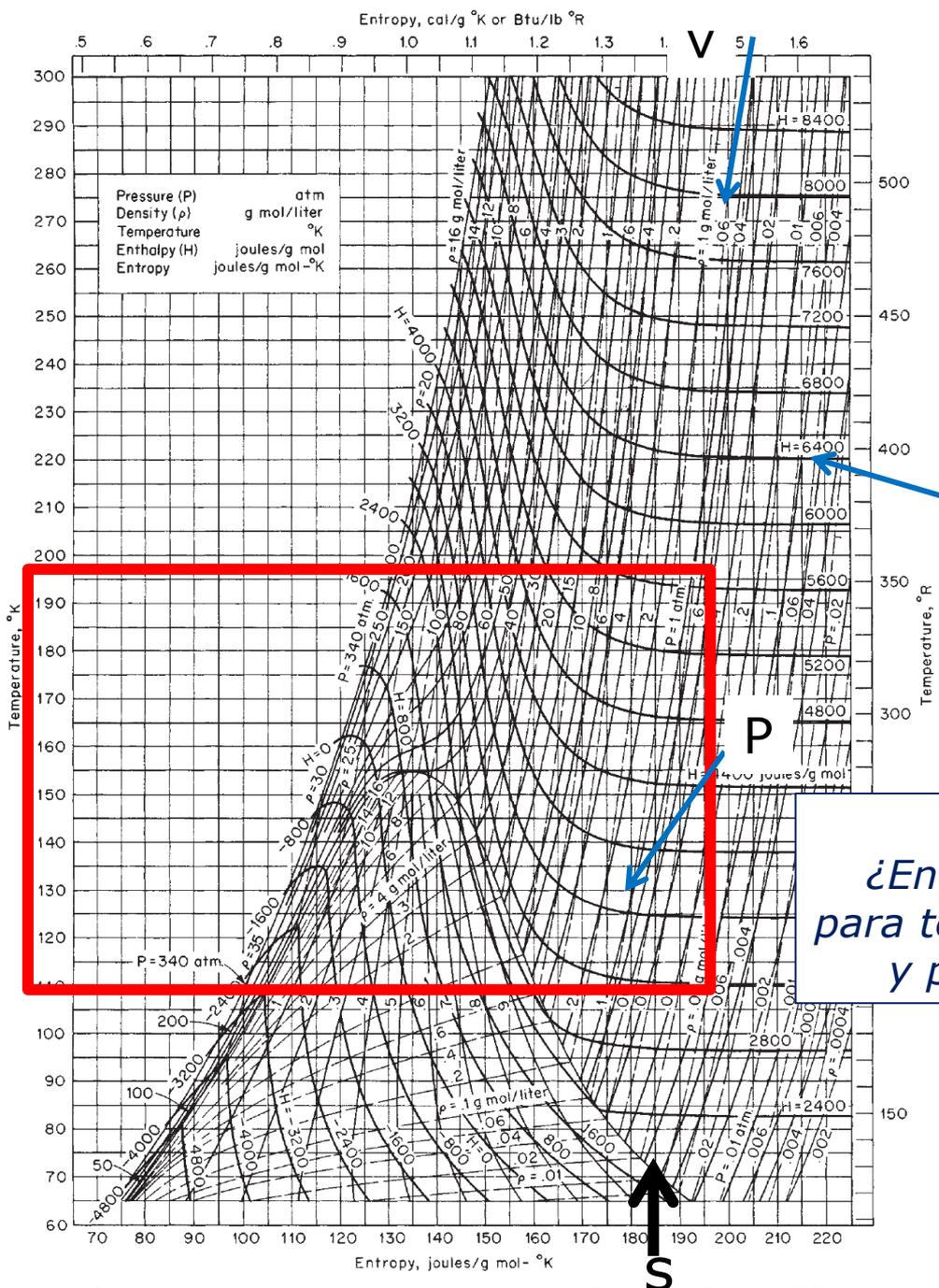
\*Converted from a tabulation by Counsell, Lawrenson, and Lees, Nat. Phys. Lab. Teddington (U.K.) Rep. Chem. 52, 1976. Another tabulation by Kesselman et al., in Vargaftik (ed.), *Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases*, Hemisphere, Washington and London, 1975, shows some differences. The notation 1.133. $\cdot 6$  signifies  $1.133 \times 10^{-6}$ . Other tables are given by Goodwin, R. D., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 17, 4 (1988): 1541–1636.

**TABLE 2-350 Saturated Solid/Vapor Water\***

Temp., °F	Pressure, lb/in <sup>2</sup> abs.	Volume, ft <sup>3</sup> /lb		Enthalpy, Btu/lb		Entropy, Btu/(lb)(°F)	
		Solid	Vapor	Solid	Vapor	Solid	Vapor
-160	4.949.-8	0.01722	3.607.+9	-222.05	990.38	-0.4907	3.5549
-150	1.620.-7	0.01723	1.139.+9	-218.82	994.80	-0.4801	3.4387
-140	4.928.-7	0.01724	3.864.+8	-215.49	999.21	-0.4695	3.3301
-130	1.403.-6	0.01725	1.400.+8	-212.08	1003.63	-0.4590	3.2284
-120	3.757.-6	0.01726	5.386.+7	-208.58	1008.05	-0.4485	3.1330
-110	9.517.-6	0.01728	2.189.+7	-204.98	1012.47	-0.4381	3.0434
-100	2.291.-5	0.01729	9.352.+6	-201.28	1016.89	-0.4277	2.9591
-90	5.260.-5	0.01730	4.186.+6	-197.49	1021.31	-0.4173	2.8796
-80	1.157.-4	0.01731	1.955.+6	-193.60	1025.73	-0.4069	2.8045
-70	2.443.-4	0.01732	9.501.+5	-189.61	1030.15	-0.3965	2.7336
-60	4.972.-4	0.01734	4.788.+5	-185.52	1034.58	-0.3862	2.6664
-50	9.776.-4	0.01735	2.496.+5	-181.34	1039.00	-0.3758	2.6028
-45	1.354.-3	0.01736	1.824.+5	-179.21	1041.21	-0.3707	2.5723
-40	1.861.-3	0.01737	1.343.+5	-177.06	1043.42	-0.3655	2.5425
-35	2.540.-3	0.01737	9.961.+4	-174.88	1045.63	-0.3604	2.5135
-30	3.440.-3	0.01738	7.441.+4	-172.68	1047.84	-0.3552	2.4853
-25	4.627.-3	0.01739	5.596.+4	-170.46	1050.05	-0.3501	2.4577
-20	6.181.-3	0.01739	4.237.+4	-168.21	1052.26	-0.3449	2.4308
-15	8.204.-3	0.01740	3.228.+4	-165.94	1054.47	-0.3398	2.4046
-10	1.082.-2	0.01741	2.475.+4	-163.65	1056.67	-0.3347	2.3791
-5	1.419.-2	0.01741	1.909.+4	-161.33	1058.88	-0.3295	2.3541
0	1.849.-2	0.01742	1.481.+4	-158.98	1061.09	-0.3244	2.3297
5	2.396.-2	0.01743	1.155.+4	-156.61	1063.29	-0.3193	2.3039
10	3.087.-2	0.01744	9.060.+3	-154.22	1065.50	-0.3142	2.2827
15	3.957.-2	0.01744	7.144.+3	-151.80	1067.70	-0.3090	2.2600
16	4.156.-2	0.01745	6.817.+3	-151.32	1068.14	-0.3080	2.2555
18	4.581.-2	0.01745	6.210.+3	-150.34	1069.02	-0.3060	2.2466
20	5.045.-2	0.01745	5.662.+3	-149.36	1069.90	-0.3039	2.2378
22	5.552.-2	0.01746	5.166.+3	-148.38	1070.38	-0.3019	2.2291
24	6.105.-2	0.01746	4.717.+3	-147.39	1071.66	-0.2998	2.2205
26	6.708.-2	0.01746	4.311.+3	-146.40	1072.53	-0.2978	2.2119
28	7.365.-2	0.01746	3.943.+3	-145.40	1073.41	-0.2957	2.2034
30	8.080.-2	0.01747	3.608.+3	-144.40	1074.29	-0.2937	2.1950
31	8.461.-2	0.01747	3.453.+3	-143.90	1074.73	-0.2927	2.1908
32	8.858.-2	0.01747	3.305.+3	-143.40	1075.16	-0.2916	2.1867

\*Condensed from *Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1967 and 1972. Reproduced by permission. The validity of many standard reference tables has been critically reviewed by Jancso, Pupezin, and van Hook, *J. Phys. Chem.*, 74 (1970): 2984. This source is recommended for further study. The notation 4.949.-8, 3.607.+9, etc., means  $4.949 \times 10^{-8}$ ,  $3.607 \times 10^9$ , etc.

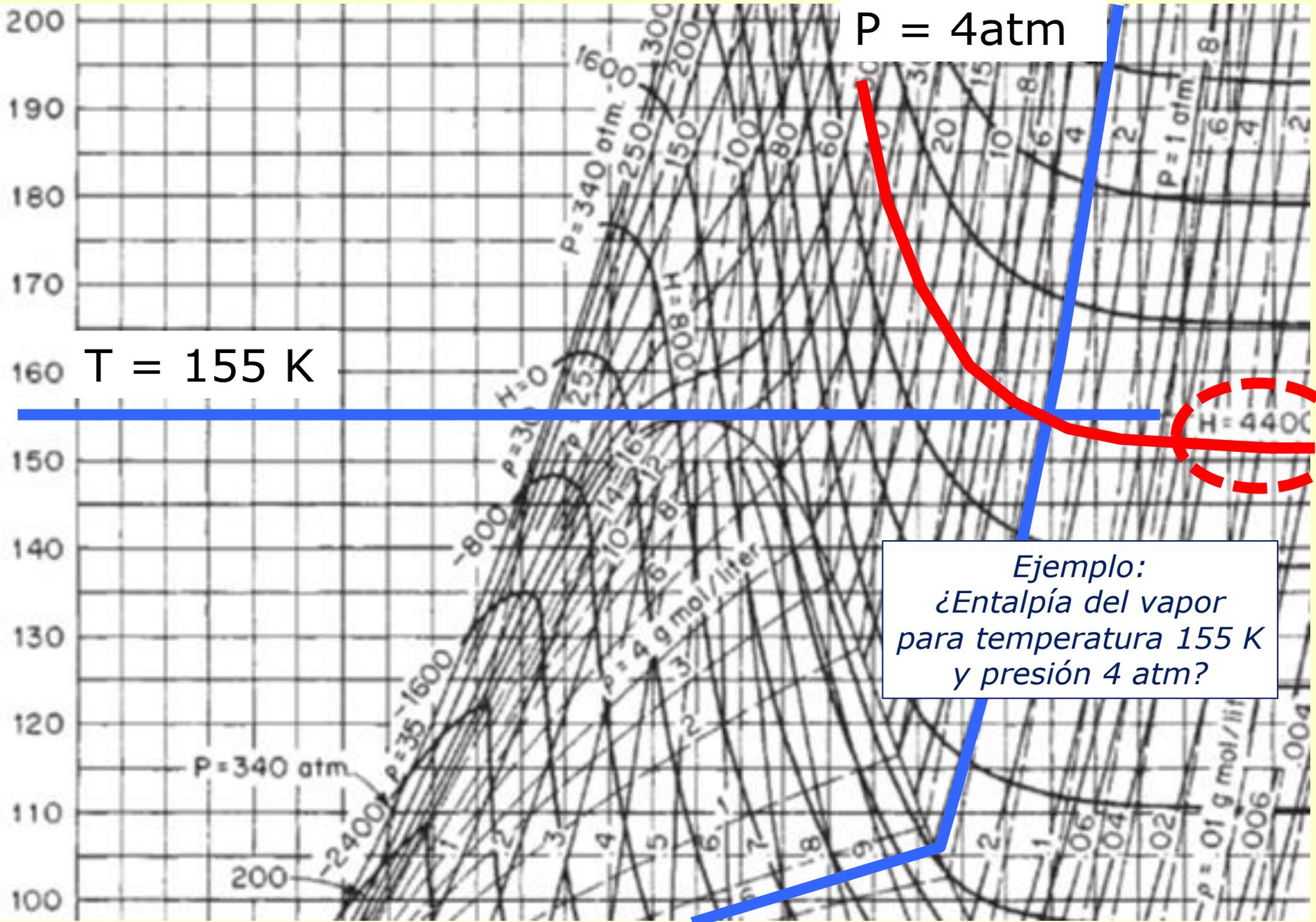
T →



Ejemplo:  
 ¿Entalpía del vapor  
 para temperatura 155 K  
 y presión 4 atm?

Diagrama  
 T-s

FIG. 2-15 Temperature-entropy chart for oxygen. Pressure  $P$ , atm; density  $\rho$ , (g-mol)/L; temperature, K; enthalpy  $H$ , J/(g-mol); entropy, J/(g-mol-K). (NBS Chart D-56. Reproduced by permission.)



$P = 4 \text{ atm}$

$T = 155 \text{ K}$

*Ejemplo:  
¿Entalpía del vapor  
para temperatura 155 K  
y presión 4 atm?*

$H = 4400$

# Valores de entalpía de una corriente

---

## Caso: Mezcla de sustancias

Si la corriente que entra o que sale es una mezcla de sustancias, la entalpía de la mezcla es la suma de las entalpías de cada parte.

Si la corriente  $i$  es una mezcla de varias sustancias  $k$  en fracciones  $x_k$  (de forma que  $\sum x_k = 1$ ), entonces la entalpía específica de la corriente  $i$  viene dada por

$$h_i = \sum x_k h_k$$

donde  $h_k$  son las entalpías específicas de cada sustancia componente.

# Cambios de entalpía

---

En ocasiones nos convendrá calcular el cambio de entalpía que sufre la masa de un sistema cerrado o de una corriente entre que entra y que sale del sistema a partir de otros cambios físicos o químicos conocidos.

Cambios de entalpía:

- por variación de temperatura (sin cambios de fase, sin reacción química): **calor sensible**
- por cambios de fases: **calor latente**
- por disolución de componentes: **calor de disolución**
- por cambio de especie química: **calor de reacción**
- por variación de presión: cambios menores de entalpía

# Cambios de entalpía

## Caso: Sustancia Pura sin cambio de fases

Para una sustancia pura en una fase, dado que  $h = h(T, P)$ , podemos poner:  $dh = (\partial h/\partial T)_P dT + (\partial h/\partial P)_T dP$

o bien,  $dh = c_p dT + (\partial h/\partial P)_T dP$

(donde  $c_p$  es la capacidad calorífica específica (o calor específico) a presión constante que también es función de estado – depende de T y P)

En procesos a P constante, el cambio de entalpía específica depende del cambio de temperatura que sufre el sistema según:

$$\Delta h = \int c_p dT$$

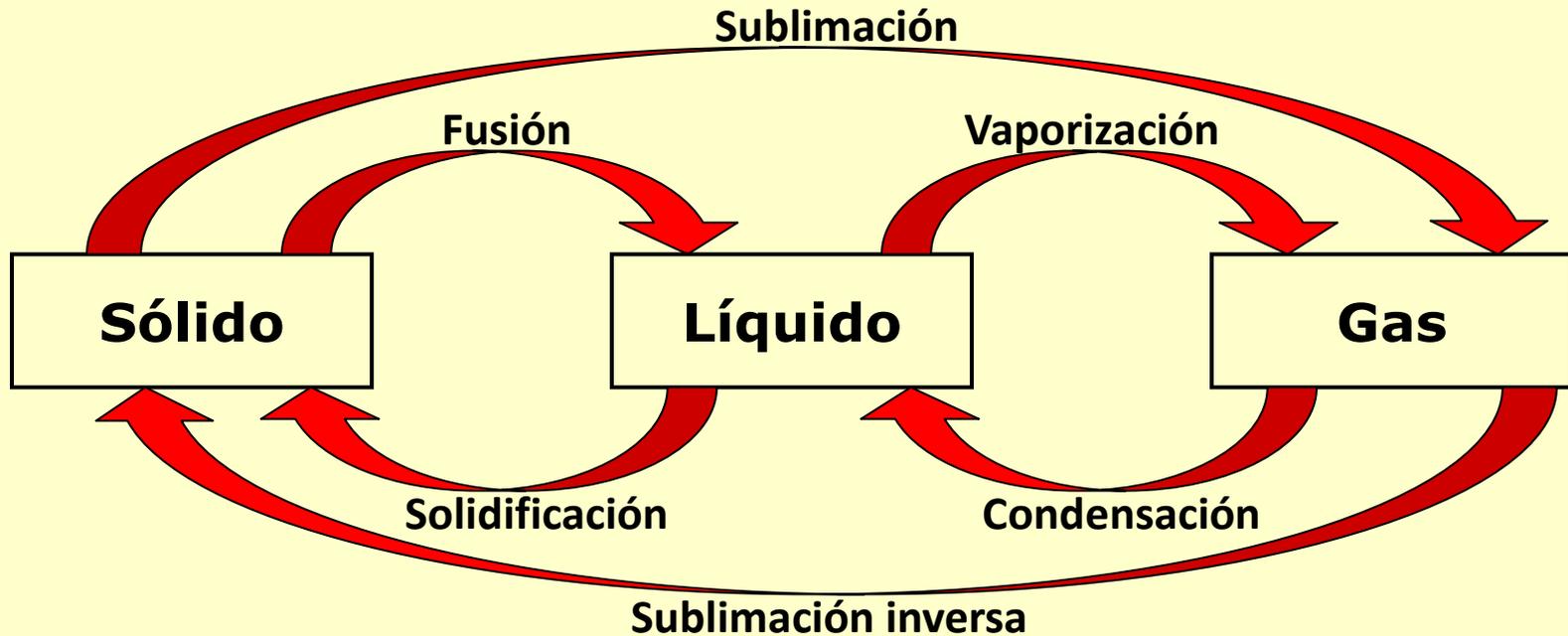
Si a su vez, si  $c_p$  es constante en el intervalo de temperaturas

$$\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$$

... y si el sistema es cerrado y homogéneo,  $\Delta H = m c_p (T_2 - T_1)$

# Cambios de entalpía

## Caso: Sustancia Pura que sufre cambios de fase



Para conocer los cambios de entalpía asociados a cambios de fase consultaremos tablas o gráficos con propiedades termodinámicas de las sustancias en cuestión (tablas y gráficos como los que vimos en diapositivas anteriores).

# Cambios de entalpía

---

## Caso: Sustancias que sufren cambios químicos

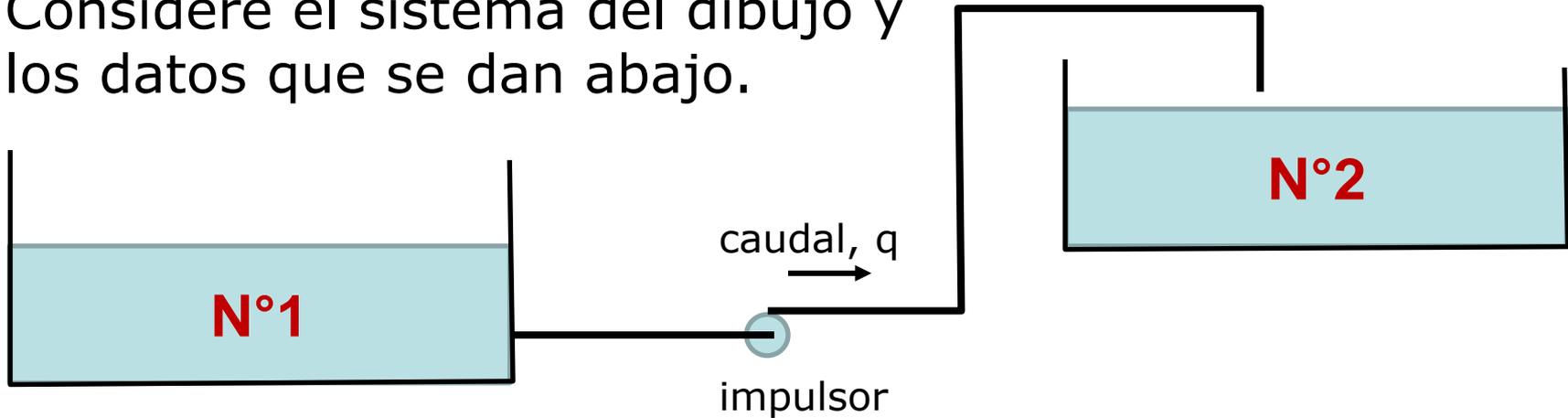
Para conocer los cambios de entalpía asociados a cambios químicos debemos tomar en cuenta los calores de reacción.

Veremos esto en detalle más adelante...

Ejemplos de  
Balances de Energía  
(en sistemas con  
procesos sin reacciones  
químicas)

# Ejemplo 1: En EE sin intercambio de calor ("Balance fluidodinámico")

Considere el sistema del dibujo y los datos que se dan abajo.



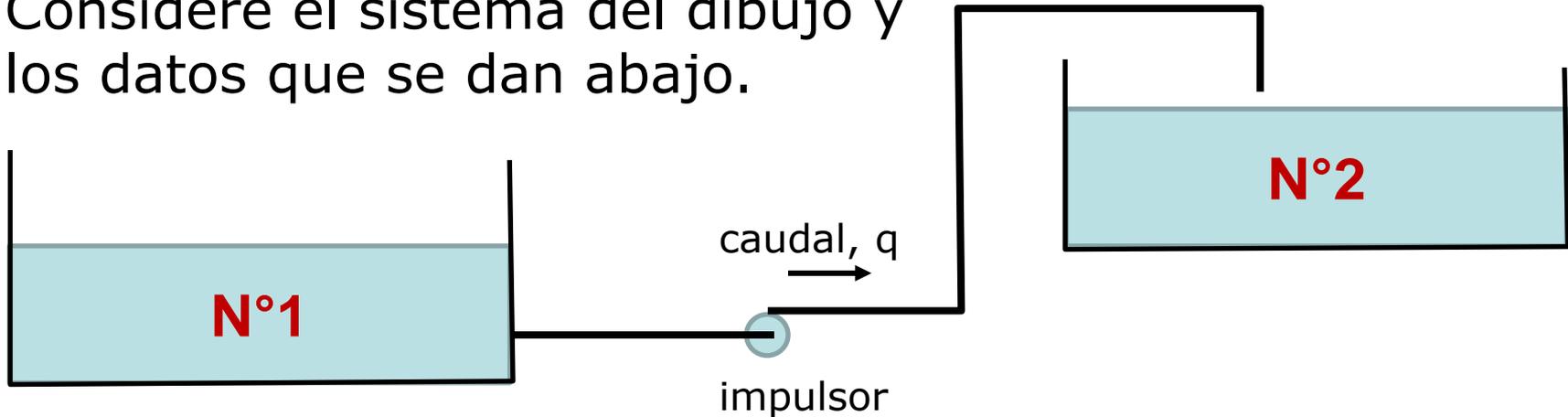
El impulsor bombea agua desde el reservorio N°1 al N°2.

La tubería es de 5 cm de diámetro, tiene una longitud total de 200 m y está aislada térmicamente lo que asegura que no hay intercambio de calor con el entorno.

La tubería descarga 20 mts por encima del nivel del N°1.

# Ejemplo 1: En EE sin intercambio de calor ("Balance fluidodinámico")

Considere el sistema del dibujo y los datos que se dan abajo.

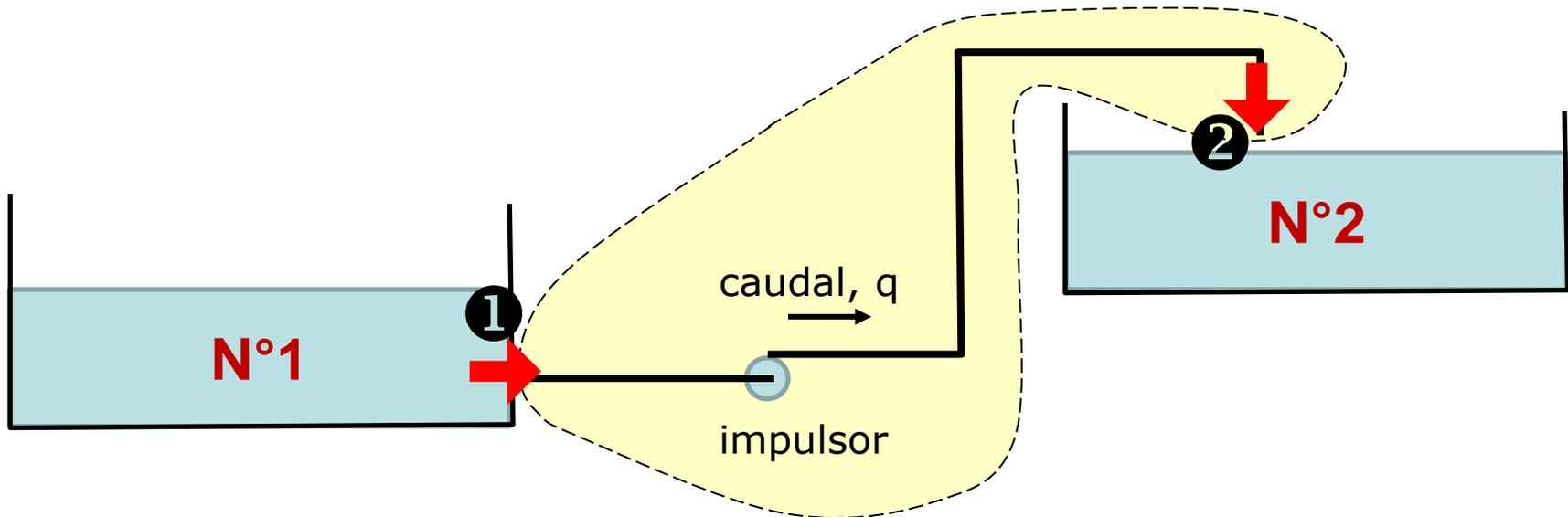


Para poder mantener un caudal constante de 300 l/min se necesita que el impulsor entregue un trabajo de 7.500 J/min.

¿Por qué será necesario aportar ese trabajo al agua? ¿A qué otro u otros términos de la ecuación de balance de energía va a parar ese trabajo?

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_c$$

# Ejemplo 1: En EE sin intercambio de calor ("Balance fluidodinámico")



El sistema es la tubería con el impulsor (y accesorios)  
Estado estacionario, una única corriente de entrada y  
otra única de salida

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} = m [\Delta h + \Delta(v^2/2) + g \Delta z]$$

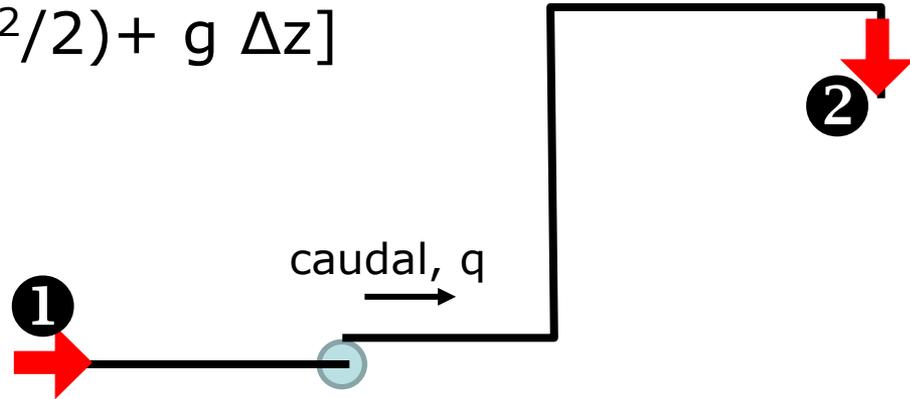
$$\text{donde } \Delta h = h_2 - h_1$$

$$\Delta(v^2/2) = v_2^2/2 - v_1^2/2$$

$$\Delta z = z_2 - z_1$$

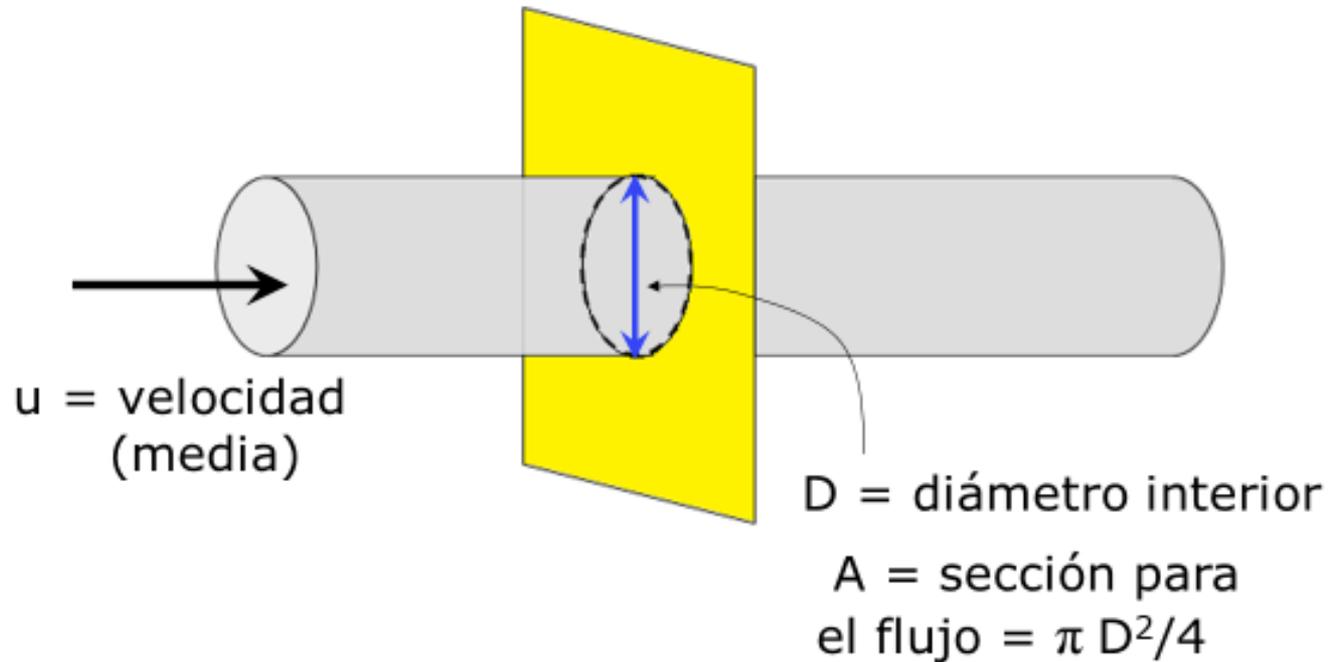
# Ejemplo 1: En EE sin intercambio de calor ("Balance fluidodinámico")

$$\cancel{q} + \dot{w}_{\text{ext}} = m [\Delta h + \Delta(v^2/2) + g \Delta z]$$



$q = 0$  (la tubería está aislada térmicamente)

$\Delta(v^2/2)$  ?



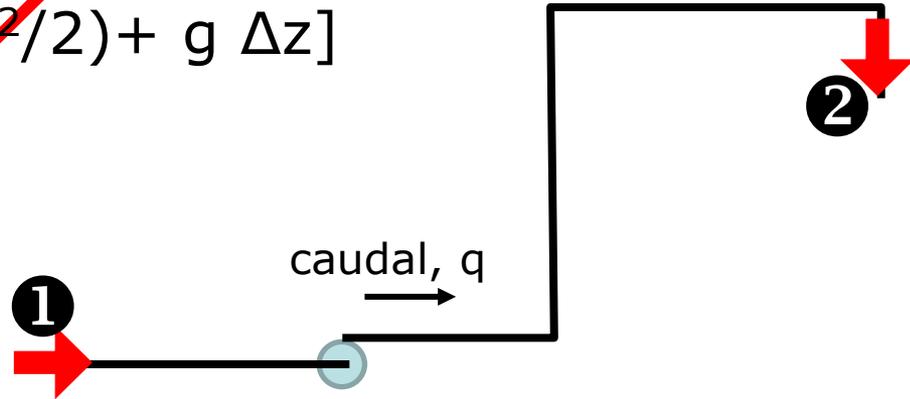
$$\text{Caudal} = q = u A$$

$$\text{Flujo másico} = \omega = q \rho = u \rho A$$

Si el flujo másico ( $\omega$ ), la densidad ( $\rho$ ) y la sección ( $A$ ) no cambian, entonces la velocidad media ( $u$ ) tampoco.

# Ejemplo 1: En EE sin intercambio de calor ("Balance fluidodinámico")

$$\cancel{q} + \dot{w}_{\text{ext}} = m [\Delta h + \cancel{\Delta(v^2/2)} + g \Delta z]$$



$q = 0$  (la tubería está aislada térmicamente)

$\Delta(v^2/2) = 0$  (las velocidades en los dos extremos de la tubería son la misma pues la densidad del agua y la sección es la misma)

$\Delta z = z_2 - z_1 > 0$  (el punto 2 está más alto que el punto 1)

$\Delta h > 0$  (hay rozamiento que provoca un aumento de temperatura y consecuentemente de  $h$ )

$$\dot{w}_{\text{ext}} = m [\Delta h + g \Delta z]$$

## Ejemplo 2: En EE con intercambio de calor (sin cambios de fase)

Consideremos un intercambiador de calor operando de manera continua y en estado estacionario, en el que una corriente de agua marina se enfría según:



¿Podremos saber cuál es la temperatura de salida del agua marina sin medirla?

Considerar que el  $C_p$  de todas las corrientes es el mismo.

## Ejemplo 2: En EE con intercambio de calor (sin cambios de fase)



### Sistema: Intercambiador de calor

- No intercambia calor ni trabajo con el entorno
- No hay acumulación de energía en el sistema (estado estacionario)
- Los cambios en energía cinética y energía potencial del agua marina y de la salmuera al pasar por el intercambiador son despreciables.

La ecuación de balance queda reducida a:

$$\sum m_i h_i - \sum m_j h_j = 0$$

## Ejemplo 2: En EE con intercambio de calor (sin cambios de fase)



$$\sum m_i h_i - \sum m_j h_j = 0$$

Ingresan dos corrientes (1,4) y egresan dos corrientes (2,3)

$$\Rightarrow m_1 h_1 + m_4 h_4 - m_2 h_2 - m_3 h_3 = 0$$

Pero  $m_1 = m_2$  y  $m_4 = m_3$ , de donde:

$$m_1 (h_1 - h_2) + m_4 (h_4 - h_3) = 0$$

... de un  
Balance de  
Masa

## Ejemplo 2: En EE con intercambio de calor (sin cambios de fase)



$$m_1 (h_1 - h_2) + m_4 (h_4 - h_3) = 0$$

$$\Delta h_{\text{agua marina}} \equiv h_2 - h_1$$

$$\Delta h_{\text{salmuera}} \equiv h_3 - h_4$$

## Ejemplo 2: En EE con intercambio de calor (sin cambios de fase)



$$m_1 (h_1 - h_2) + m_4 (h_4 - h_3) = 0$$

$$\Delta h_{\text{agua marina}} \equiv h_2 - h_1$$

$$\Delta h_{\text{salmuera}} \equiv h_3 - h_4$$

## Ejemplo 2: En EE con intercambio de calor (sin cambios de fase)



$$m_1 (h_1 - h_2) + m_4 (h_4 - h_3) = 0$$

Sin cambio de fase  $\rightarrow h_1 - h_2 = c_{p1}(T_1 - T_2)$  y  $h_4 - h_3 = c_{p4}(T_4 - T_3)$

~~$$m_1 c_p (T_1 - T_2) + m_4 c_p (T_4 - T_3) = 0$$~~

Dado que el  $c_p$  de todas las corrientes es el mismo  
(independiente de la cantidad de sal y de la temperatura)...

$$m_1 (T_1 - T_2) + m_4 (T_4 - T_3) = 0$$

$$100 * (20 - T_2) + 50 * ((-2) - 14) = 0$$

$$T_2 = 12^\circ \text{ C}$$

Un par de  
consideraciones ...

1

## Ejemplo 2: En EE con intercambio de calor (sin cambios de fase)



### Sistema: Intercambiador de calor

- No intercambia calor ni trabajo con el entorno
- No hay acumulación de energía en el sistema (estado estacionario)
- Los cambios en energía cinética y energía potencial del agua marina y de la salmuera al pasar por el intercambiador son despreciables.

La ecuación de balance queda reducida a:

$$\sum m_i h_i - \sum m_j h_j = 0$$

## ¿Qué tan válida es esa suposición?

Comparemos el cambio de entalpía de las corrientes (calor intercambiado), con la energía cinética y potencial de las corrientes

## Velocidad de transferencia de calor entre las corrientes

$$\dot{Q} = w C_p \Delta T = 50 \text{ kg/min} * 1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} * (14 - (-2)) ^\circ\text{C} = 800 \text{ kcal/min}$$

## Velocidad de entrada de energía cinética (corriente agua marina)

Si la tubería por donde circula la corriente tiene 2,5 cm de diámetro ...

$$\text{Sección para el flujo} = \pi D^2/4 = \pi (0,025)^2/4 = 0,00049 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal volumétrico} = (100 \text{ l/min}) \langle \rangle 0,1 \text{ m}^3/\text{min} \langle \rangle 0,00167 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Velocidad del líquido en la tubería} = 0,00167 / 0,00049 = 3,4 \text{ m/s}$$

$$\dot{E}_C = w v^2/2 = 100 \text{ kg/min} * (3,4 \text{ m/s})^2/2 = 578 \text{ J/min} = 0,14 \text{ kcal/min}$$

## Velocidad de cambio energía potencial (agua marina)

Supongamos que la diferencia de altura entre los puntos de entrada y salida de la salmuera son 5 metros

$$\dot{E}_p = w g \Delta z = 100 \text{ kg/min} * 9,8 \text{ m/s}^2 * 5 \text{ m} = 4900 \text{ J/min} = 1,17 \text{ kcal/min}$$

$$\cancel{q} + \cancel{w_{\text{ext}}} + \sum m_i (h_i + \cancel{v_i^2/2 + gz_i}) - \sum m_j (h_j + \cancel{v_j^2/2 + gz_j}) = \cancel{\dot{U}} + \cancel{\dot{E}_p} + \cancel{\dot{E}_c}$$

Supusimos que  $\sum m_i (v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (v_j^2/2 + gz_j) = 0$

pero  $\sum m_i (v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (v_j^2/2 + gz_j) = 0 + 1170 = 1170 \text{ cal/min}$

ii  $1170 \gg 0$  !!

¿da para despreciar?

$$\cancel{q} + \cancel{w}_{\text{ext}} + \underbrace{\sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j)} = \cancel{\dot{U}} + \cancel{\dot{E}_P} + \cancel{\dot{E}_C}$$

En realidad (si no despreciamos)..

$$\begin{aligned} & \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \\ & \left[ \sum m_i h_i - \sum m_j h_j \right] + \left[ \sum m_i (v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (v_j^2/2 + gz_j) \right] = \\ & \qquad \qquad \qquad 800.000 + 1.170 \quad \text{cal/min} \end{aligned}$$

Veán que los 800.000 son el resultado de

$$\left. \begin{array}{l} 50 \text{ kg/min} \\ 1000 \text{ cal/kg} \cdot ^\circ\text{C} \\ 12 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right\} \text{ sólo 2 cifras significativas}$$

800.000

801.170

Otra forma de verlo..

En nuestro cálculo, al despreciar, llegamos a

$$100*(20 - T_2) + 50*((-2)-14) = 0$$

de donde despejamos

$$T_2 = - 50*16/100 + 20 = 12$$

Si hubiéramos hecho todo el trabajo necesario para obtener los datos geométricos que permitieran calcular los cambios de energía cinética y potencial, podríamos haber puesto

$$100*(20 - T_2) + 50*((-2)-14) + 1,17 = 0$$

y al despejar, habríamos llegado a

$$T_2 = (- 50*16 + 1,17)/100 + 20 = 12,0117$$

Aún así, ese esfuerzo habría sido en vano, pues los datos sólo me permiten asegurar dos cifras significativas e informar 12 (ni siquiera podría informar: 12,0)

Otra forma de ver  
En nuestro cálcul  
de de  
e  
y

**Lo que “despreciamos”  
representaba menos de un  
0,2% del cambio energético de  
las corrientes.**

**Es un % bastante inferior a la  
incertidumbre con la que  
seguramente se han medido los  
datos (temperaturas, caudales)**

**En el resultado final, impactaría  
en la centésima de °C**

Aún así, ese estru  
me permiten asegu  
(ni siquiera podría informar: 12,0  
atos solo  
rmar 12

Se podría argumentar...

*Después de "haber visto" cuánto impactaría el cambio de energía cinética y de energía potencial es fácil decir "valió la pena despreciarlos".*

*Ahora bien, si para despreciarlos tengo que calcularlos primero... en definitiva el esfuerzo es el mismo.*

Con la práctica aprenderán cuándo es válido despreciar algunos términos de la ecuación de energía. En general, en I/C los cambios de  $E_C$  y  $E_p$  de las corrientes y los intercambios de calor con el ambiente son despreciables frente a los cambios de  $H$  de las corrientes que intercambian calor entre sí.

2

Pense

¿Les parece que resolver este problema es la mejor manera para conocer la temperatura de salida del agua marina?

problema”

lor

contin

marina se enfría según

manera

corriente de agua

Agua marina  
100 Kg/min, 20° C

Agua marina enfriada **¿T?**



Salmuera  
14° C

Salmuera (fría)  
50 Kg/min, -2° C

¿Podremos saber cuál es la temperatura de salida del agua marina sin medirla?

Considerar que el  $C_p$  de todas las corrientes es el mismo.



Un problema más realista sería:



*"Diseñe un intercambiador de calor para poder reducir los costos de enfriar el agua marina, preenfriando con la salmuera que descartamos"*

(problema de diseño)

Otro problema más realista sería:



*"Notamos que hay algún problema pues el agua dejó de pre enfriarse como venía haciendo. Investigue qué está pasando con el pre enfriador y vea de corregirlo"*

(problema durante la operación)

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)

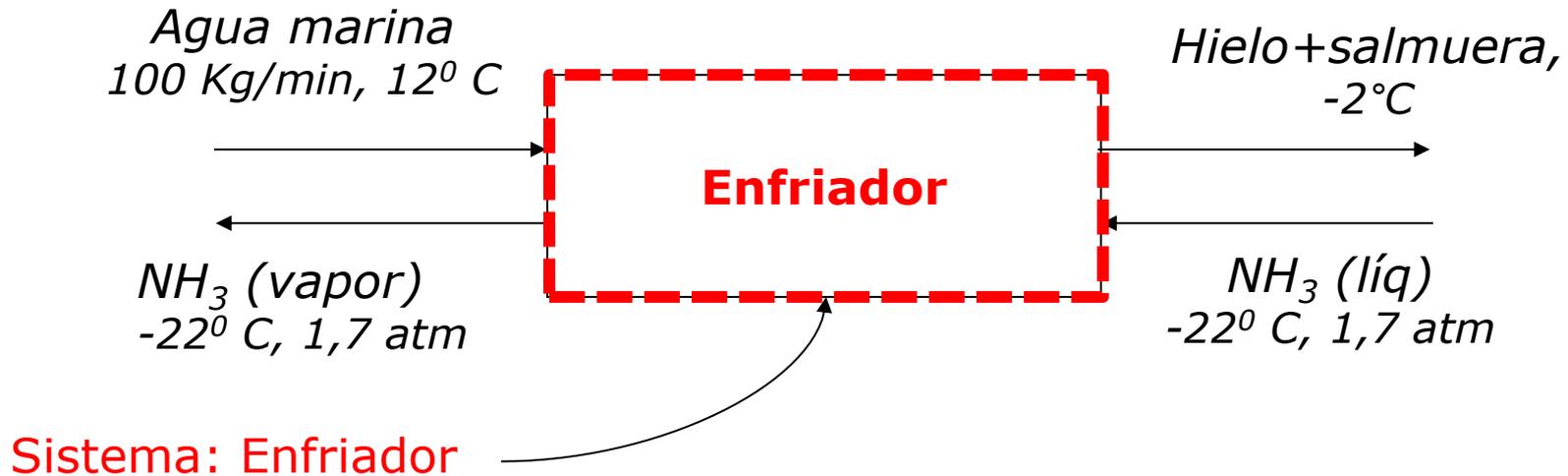


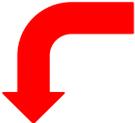
En estado estacionario... ¿qué flujo de amoníaco es necesario para enfriar y parcialmente congelar el agua de mar?  
El hielo que se forma es el 53 % en peso de la corriente.

NOTA 1: En el Enfriador, las corrientes de agua marina y de amoníaco intercambian calor pero no entran en contacto directo

NOTA 2: A los efectos de este ejercicio, suponer que el agua marina y la salmuera tienen las mismas propiedades que el agua líquida. El calor latente de fusión a -2 °C es  $\Delta h_f = 334 \text{ kJ/kg}$  y el  $C_p = 4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)



 Veamos la ecuación de B.E.

---

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_c$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)



## Sistema: Enfriador

- No intercambia calor ni trabajo con el entorno
- No hay acumulación de energía en el sistema.
- Los cambios en energía cinética y energía potencial del agua marina y de la salmuera al pasar por el intercambiador son despreciables.
- Ingresan dos corrientes (1,3) y egresan dos corrientes (2,4)

$$\sum m_i h_i - \sum m_j h_j = 0$$
$$[m_1 h_1 + m_3 h_3] - [m_2 h_2 + m_4 h_4] = 0$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)



$$[m_1 h_1 + m_3 h_3] - [m_2 h_2 + m_4 h_4] = 0$$

... pero  $m_1 = m_2$  y  $m_3 = m_4$

$$m_1 (h_1 - h_2) + m_3 (h_3 - h_4) = 0$$

$$m_3 = m_1 (h_1 - h_2) / (h_4 - h_3)$$

$$\text{¿ } h_4 - h_3 = \Delta h_{\text{NH}_3} \text{?}$$



$$\rightarrow \Delta h_{\text{NH}_3} = \Delta h_{\text{vaporización, 1,7 atm}} =$$

**¿FUENTE?**

¿por  
qué?

De tablas (en bibliografía especializada en propiedades de sustancias)

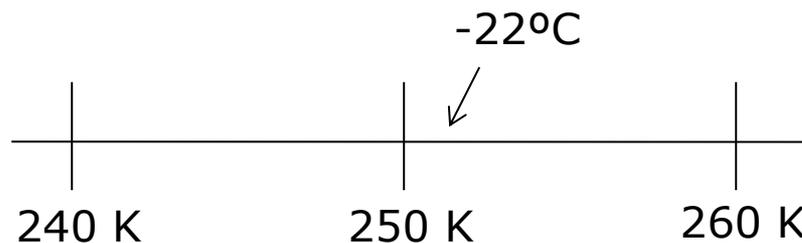
-22°C = 251 K

TABLE 2-232 Saturated Ammonia\*

T, K	P, bar	$v_f$ , m <sup>3</sup> /kg	$v_g$ , m <sup>3</sup> /kg	$h_f$ , kJ/kg	$h_g$ , kJ/kg	$s_f$ , kJ/(kg·K)	$s_g$ , kJ/(kg·K)	$c_{pf}$ , kJ/(kg·K)	$\mu_f$ , 10 <sup>-4</sup> Pa·s	$k_f$ , W/(m·K)
195.5'	0.0608	1.327.-3	15.648	-1110.1	380.1	4.203	11.827	4.73	4.25	0.715
200	0.0865	1.372.-3	11.237	-1088.8	388.5	4.311	11.698	4.61	4.07	0.709
210	0.1775	1.394.-3	5.729	-1044.1	406.7	4.529	11.438	4.38	3.69	0.685
220	0.3381	1.417.-3	3.135	-1000.6	424.1	4.731	11.207	4.35	3.34	0.661
230	0.6044	1.442.-3	1.822	-957.0	440.7	4.925	11.002	4.38	3.02	0.638
240	1.0226	1.468.-3	1.115	-912.9	456.2	5.113	10.817	4.43	2.73	0.615
250	1.6496	1.495.-3	0.712	-868.2	470.6	5.294	10.650	4.48	2.45	0.592
260	2.5529	1.524.-3	0.472	-823.1	483.8	5.471	10.498	4.54	2.20	0.569

Véase que el dato -22°C y 1,7 atm es redundante !!!

T(K)	h liq (kJ/kg)	h vap (kJ/kg)	$\Delta h$ (kJ/kg)
240	-912,9	456,2	1369,1
250	-868,2	470,6	1338,8
260	-823,1	483,8	1306,9



-22°C = 251 K

**¡¡INTERPOLAR!!**

$$\Delta h_{\text{vaporización}} = 1336 \text{ kJ/kg}$$

De gráficos...

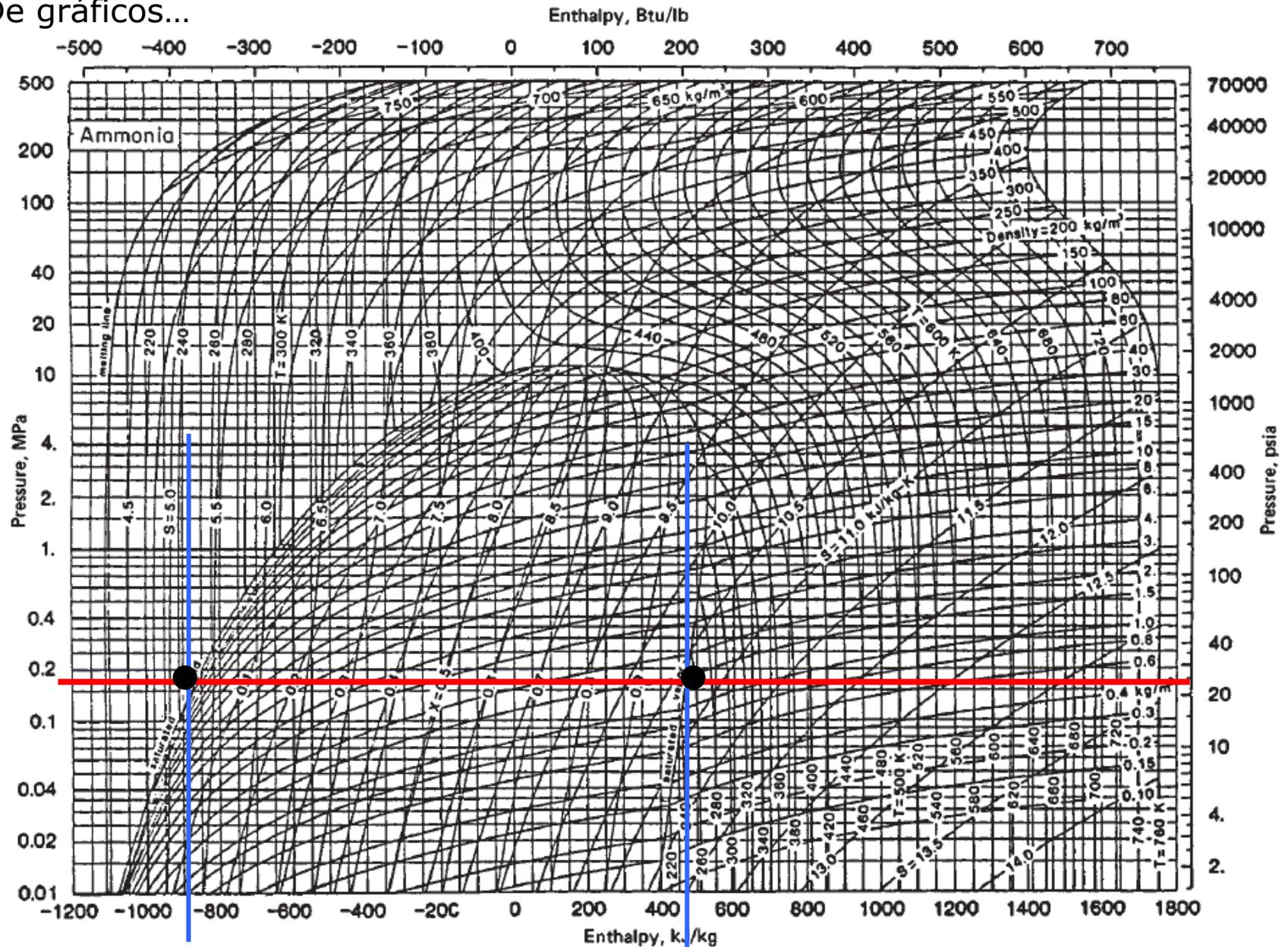


FIG. 2-6 Enthalpy-log-pressure diagram for ammonia. 1 MPa = 10 bar. (Copyright 1981 by the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers and reproduced by permission of the copyright owner.)

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)



$$[m_1 h_1 + m_3 h_3] - [m_2 h_2 + m_4 h_4] = 0$$

... pero  $m_1 = m_2$  y  $m_3 = m_4$

$$m_1 (h_1 - h_2) + m_3 (h_3 - h_4) = 0$$

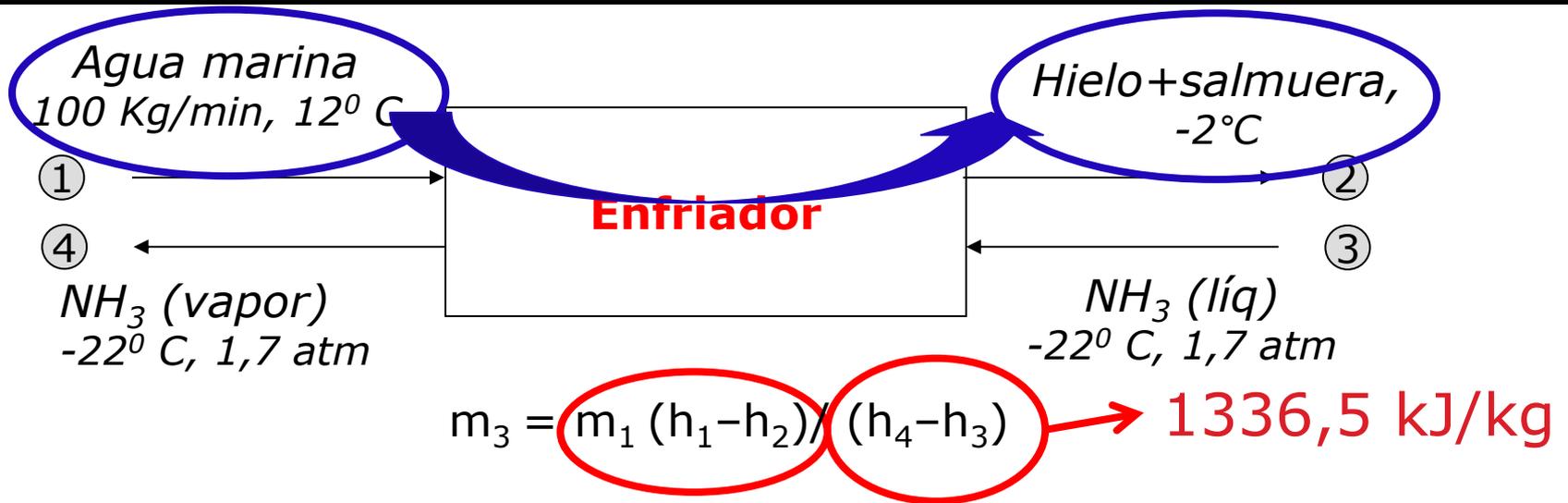
$$m_3 = m_1 (h_1 - h_2) / (h_4 - h_3)$$

$$\text{¿ } h_4 - h_3 = \Delta h_{\text{NH}_3} \text{?}$$



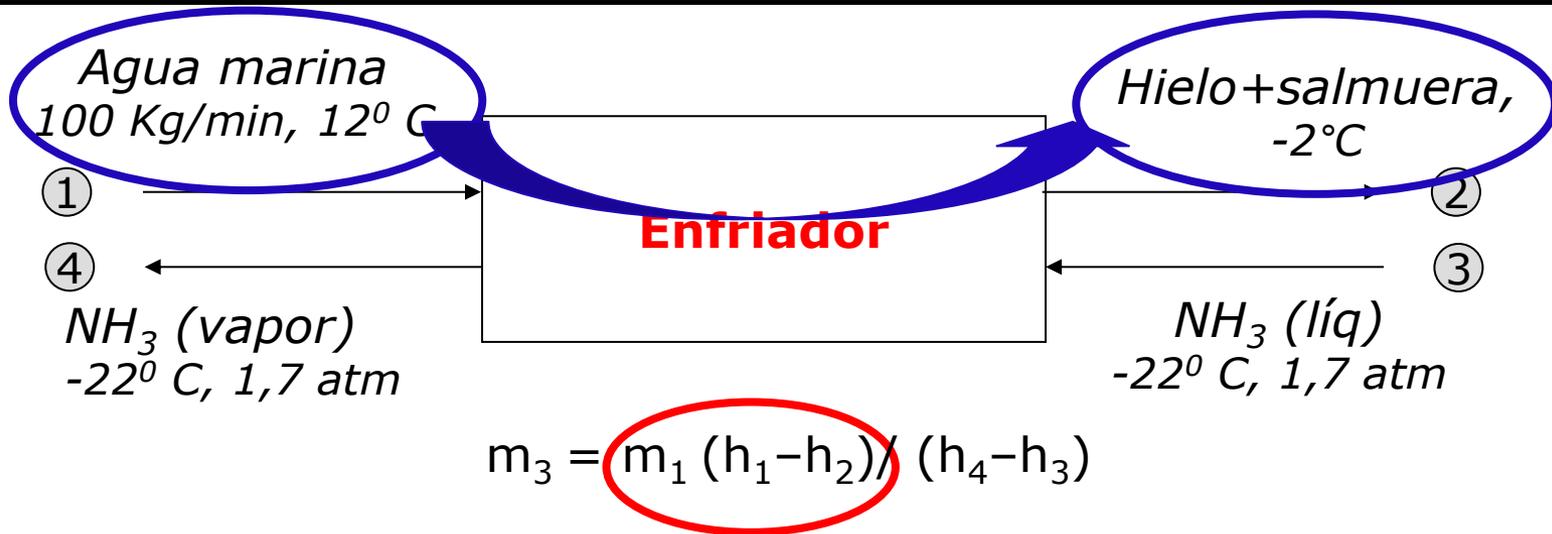
$$\Rightarrow \Delta h_{\text{NH}_3} = \Delta h_{\text{vaporización, } 1,7 \text{ atm}} = 1336,5 \text{ kJ/kg}$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)



Según datos: el hielo que se forma es el 53 % en peso de la corriente.

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)



Según datos: el hielo que se forma es el 53 % en peso de la corriente.

$$\underbrace{\text{Agua marina, } 12^{\circ} \text{ C}}_{m_1 h_1} \quad \Rightarrow \quad \underbrace{\text{53\% Hielo + (resto) salmuera, } -2^{\circ} \text{ C}}_{m_1 h_2}$$

$$\begin{aligned}
 m_1 h_1 &= m_1 h_{\text{ag.mar,12C}} \\
 &= (0,53 m_1) h_{\text{ag.mar,12C}} \\
 &+ (0,47 m_1) h_{\text{ag.mar,12C}}
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{aligned}
 m_1 h_2 &= \\
 &= (0,53 m_1) h_{\text{hielo,-2C}} \\
 &+ (0,47 m_1) h_{\text{salm.,-2C}}
 \end{aligned}$$

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{ag.mar,12C}} - h_{\text{hielo,-2C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{ag.mar,12C}} - h_{\text{salm.,-2C}})$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{salm.},-2\text{C}})$$

Según el enunciado...

NOTA 2: A los efectos de este ejercicio, suponer que el agua marina y la salmuera tienen las mismas propiedades que el agua líquida. El calor latente de fusión a  $-2\text{ °C}$  es  $\Delta h_f = 334\text{ kJ/kg}$  y el  $C_p = 4,18\text{ kJ/kg °C}$

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{agua},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{agua},12\text{C}} - h_{\text{agua},-2\text{C}})$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{salm.},-2\text{C}})$$

Según el enunciado...

NOTA 2: A los efectos de este ejercicio, suponer que el agua marina y la salmuera tienen las mismas propiedades que el agua líquida. El calor latente de fusión a  $-2\text{ °C}$  es  $\Delta h_f = 334\text{ kJ/kg}$  y el  $C_p = 4,18\text{ kJ/kg °C}$

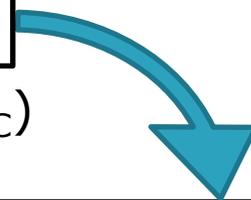
$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{agua},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}}) \\ + 0,47 m_1 (h_{\text{agua.},12\text{C}} - h_{\text{agua.},-2\text{C}})$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{salm.},-2\text{C}})$$

Según el enunciado...

NOTA 2: A los efectos de este ejercicio, suponer que el agua marina y la salmuera tienen las mismas propiedades que el agua líquida. El calor latente de fusión a  $-2\text{ °C}$  es  $\Delta h_f = 334\text{ kJ/kg}$  y el  $C_p = 4,18\text{ kJ/kg °C}$

$$m_1 (h_1 - h_2) = \boxed{0,53 m_1 (h_{\text{agua},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}})} + 0,47 m_1 (h_{\text{agua.},12\text{C}} - h_{\text{agua.},-2\text{C}})$$


$$m_1 (h_1 - h_2) = \boxed{0,53 m_1 (h_{\text{agua},12\text{C}} - h_{\text{agua},-2\text{C}}) + 0,53 m_1 (h_{\text{agua},-2\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}})} + 0,47 m_1 (h_{\text{agua.},12\text{C}} - h_{\text{agua.},-2\text{C}})$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{salm.},-2\text{C}})$$

Según el enunciado...

NOTA 2: A los efectos de este ejercicio, suponer que el agua marina y la salmuera tienen las mismas propiedades que el agua líquida. El calor latente de fusión a  $-2\text{ °C}$  es  $\Delta h_f = 334\text{ kJ/kg}$  y el  $C_p = 4,18\text{ kJ/kg °C}$

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{agua},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}}) \\ + 0,47 m_1 (h_{\text{agua.},12\text{C}} - h_{\text{agua.},-2\text{C}})$$

$$m_1 (h_1 - h_2) = \boxed{0,53 m_1 (h_{\text{agua},12\text{C}} - h_{\text{agua},-2\text{C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{agua.},12\text{C}} - h_{\text{agua.},-2\text{C}})} + 0,53 m_1 (h_{\text{agua},-2\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}})$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{ag.mar,12C}} - h_{\text{hielo,-2C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{ag.mar,12C}} - h_{\text{salm.,-2C}})$$

Según el enunciado...

NOTA 2: A los efectos de este ejercicio, suponer que el agua marina y la salmuera tienen las mismas propiedades que el agua líquida. El calor latente de fusión a  $-2\text{ °C}$  es  $\Delta h_f = 334\text{ kJ/kg}$  y el  $C_p = 4,18\text{ kJ/kg °C}$

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{agua,12C}} - h_{\text{hielo,-2C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{agua.,12C}} - h_{\text{agua.,-2C}})$$

$$m_1 (h_1 - h_2) = 1 m_1 (h_{\text{agua,12C}} - h_{\text{agua,-2C}}) + 0,53 m_1 (h_{\text{agua,-2C}} - h_{\text{hielo,-2C}})$$

$$\Delta h_{\text{agua}} = C_p \Delta T_{\text{agua}}$$

(pues proceso a  $P$  constante,  
sin cambio de fase)

$$\Delta h_{\text{fusión,-2°C}}$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}}) + 0,47 m_1 (h_{\text{ag.mar},12\text{C}} - h_{\text{salm.},-2\text{C}})$$

Según el enunciado...

NOTA 2: A los efectos de este ejercicio, suponer que el agua marina y la salmuera tienen las mismas propiedades que el agua líquida. El calor latente de fusión a  $-2\text{ °C}$  es  $\Delta h_f = 334\text{ kJ/kg}$  y el  $C_p = 4,18\text{ kJ/kg °C}$

$$m_1 (h_1 - h_2) = 0,53 m_1 (h_{\text{agua},12\text{C}} - h_{\text{hielo},-2\text{C}}) \\ + 0,47 m_1 (h_{\text{agua.},12\text{C}} - h_{\text{agua.},-2\text{C}})$$

$$m_1 (h_1 - h_2) = m_1 C_p \Delta T_{\text{agua}} + 0,53 m_1 \Delta h_{\text{fusión agua},-2\text{°C}}$$

$$m_1 (h_1 - h_2) = 100 * 4,18 * [12 - (-2)] + 53 * 334 = 23554\text{ kJ/min}$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)

Volviendo al balance de energía en el sistema....

$$m_3 = m_1 (h_1 - h_2) / (h_4 - h_3) \rightarrow 1336,5 \text{ kJ/kg}$$

23554 kJ/min

... de donde

$$\text{Flujo de amoníaco} = m_3 = 17,6 \text{ kg/min}$$

$$m_1 (h_1 - h_2) = 100 * 4,18 * [12 - (-2)] + 53 * 334 = 23554 \text{ kJ/min}$$

# Ejemplo 3: En EE con intercambio de calor (con cambios de fase)

Volviendo al balance de energía en el sistema....

$$m_3 = m_1 (h_1 - h_2) / (h_4 - h_3) \rightarrow 1336,5 \text{ kJ/kg}$$

235

*Hasta ahora, para determinar el flujo másico de una corriente habíamos usado balances de masa.*

*Como vimos en este ejemplo, en algunos casos usaremos balances de energía para determinar flujos másicos.*

## Ejemplo 4: Balance completo (y sencillo)

Una columna de destilación procesa 100 Kg/h de una mezcla 60% de amoníaco y 40% de agua.

El producto de cabeza contiene 99% de  $\text{NH}_3$  y el fondo 0,5% de  $\text{NH}_3$ .

En el condensador se extraen 1.000.000 Kcal/h.

Se desea conocer qué calor debe entregarse en el evaporador de fondo. (Considere estado estacionario).

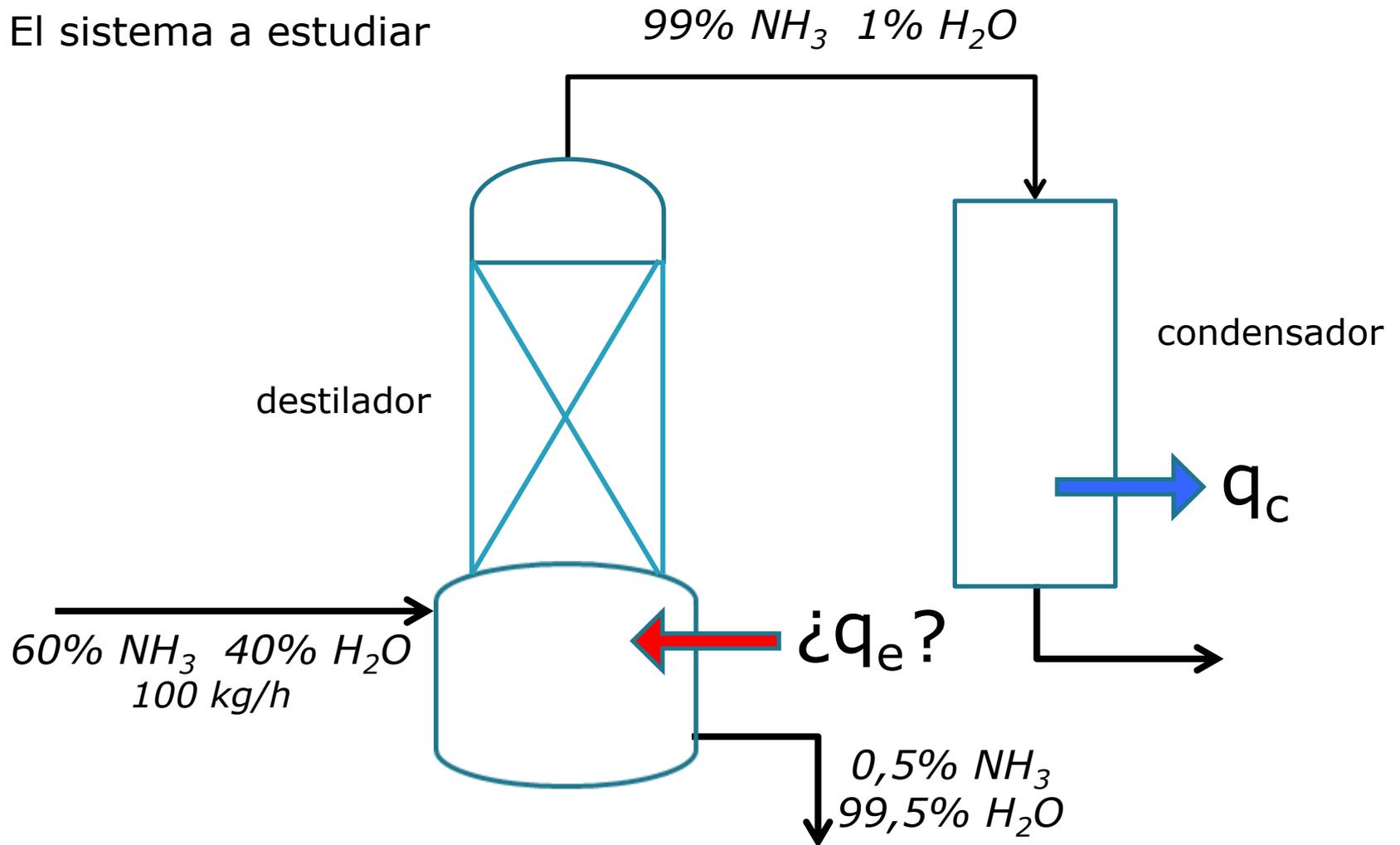
Datos: A partir de las composiciones y propiedades físicas de las corrientes se han calculado las entalpías de las mismas según:

Alimentación a la columna	133 Kcal/Kg
Destilado (a la salida del condensador)	119 Kcal/Kg
Fondo (a la salida de la columna)	195 Kcal/Kg

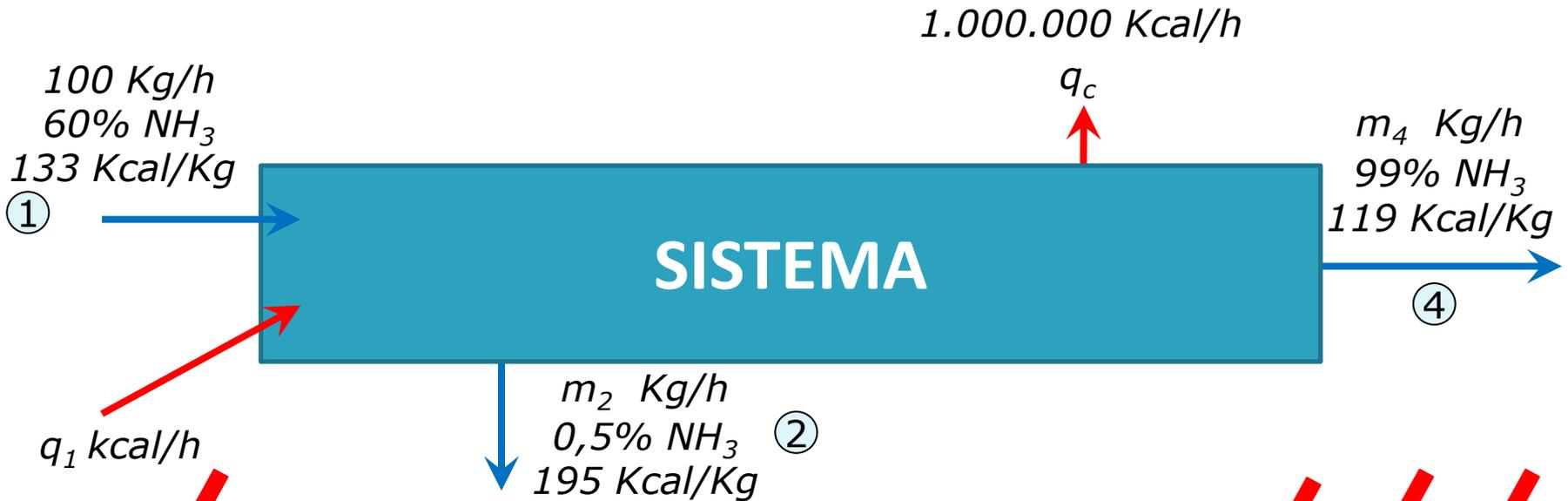
*(todas las entalpías se tomaron con respecto a la misma temperatura de referencia)*

# Ejemplo 4: Balance completo (y sencillo)

El sistema a estudiar



# Balance de energía



$$q + \dot{W}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + \cancel{v_i^2/2} + \cancel{gz_i}) - \sum m_j (h_j + \cancel{v_j^2/2} + \cancel{gz_j}) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_c$$

No intercambia trabajo con el entorno

Régimen estacionario: no hay acumulación de energía en el sistema.

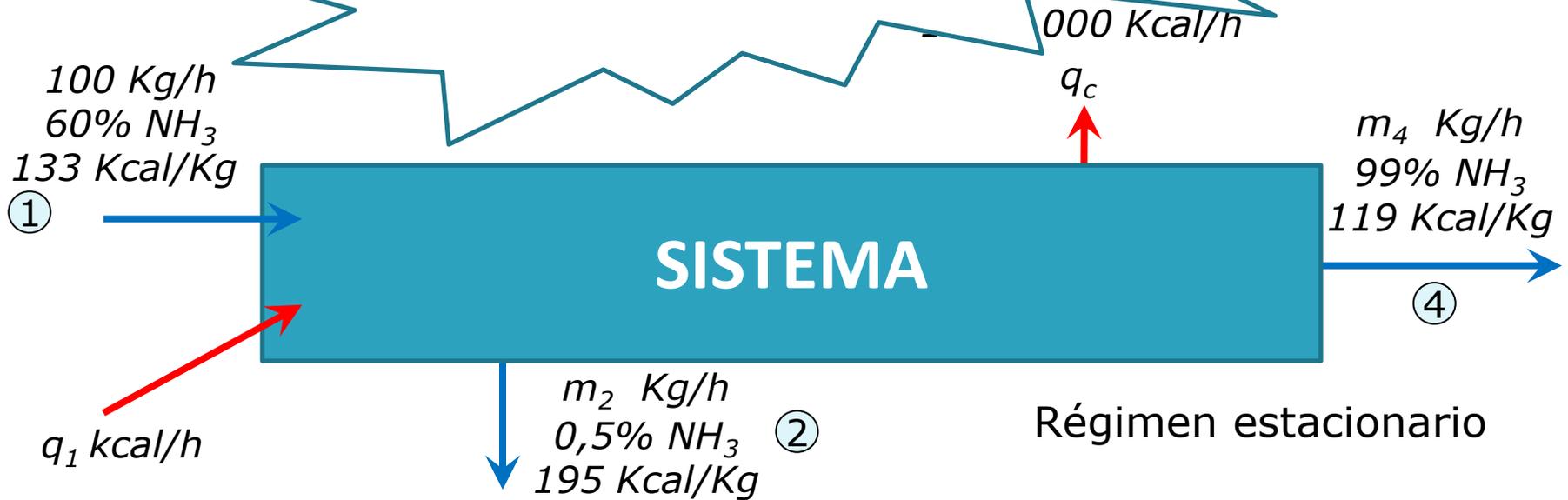
Aportes despreciables de energía cinética y potencial

$$q_1 - q_c + m_1 h_1 - m_2 h_2 - m_4 h_4 = 0$$

$$q_1 + 133 \cdot 100 = 1.000.000 + m_2 \cdot 195 + m_4 \cdot 119$$

$$\dot{m}_2? \quad \dot{m}_4?$$

# Balance de masa



(Balance total)

$$m_1 = 100 = m_2 + m_4$$

(Balance de NH<sub>3</sub>)

$$m_{1,\text{NH}_3} = 60 = m_{2,\text{NH}_3} + m_{4,\text{NH}_3} = 0,005 m_2 + 0,99 m_4$$

Resolviendo:

➤  $m_2 = 40$  kg/h

➤  $m_4 = 60$  kg/h

# (volviendo al) Balance de energía



$$q_1 + 133 \cdot 100 = 1.000.000 + m_2 \cdot 195 + m_4 \cdot 119$$

$$q_1 + 133 \cdot 100 = 1.000.000 + 40 \cdot 195 + 60 \cdot 119$$

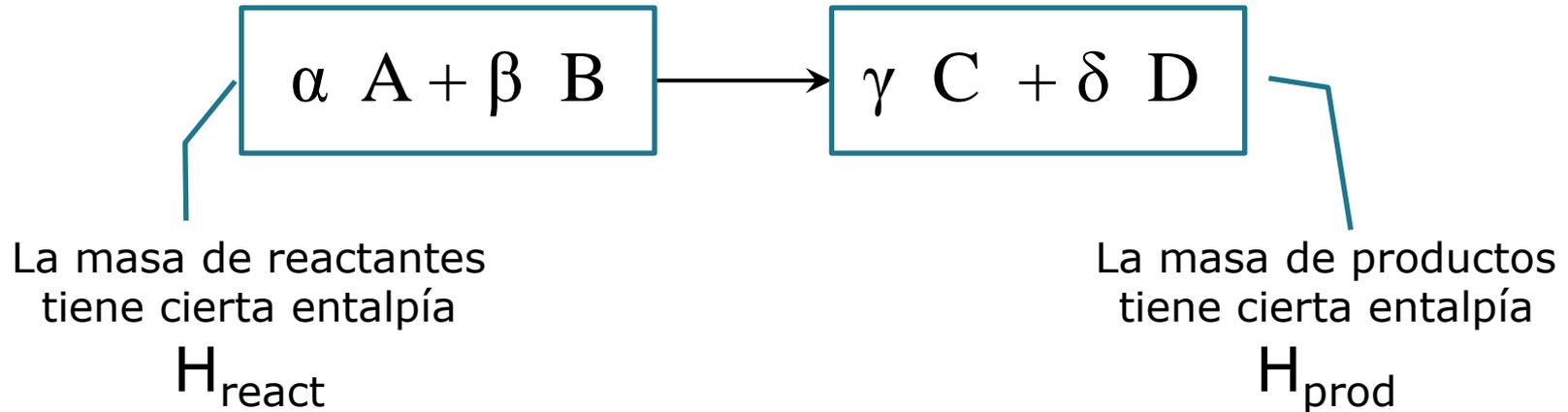
$$\rightarrow q_1 = 1.001.640 \text{ Kcal/h}$$

# Balances de Energía

(en sistemas con  
procesos con reacciones  
químicas)

# Cambios de Entalpía en una reacción química

Supongamos a modo de ejemplo la siguiente reacción química...



La reacción química tiene asociado un cambio del contenido energético (entalpía) de la masa involucrada:  $\Delta H = H_{\text{prod}} - H_{\text{react}}$

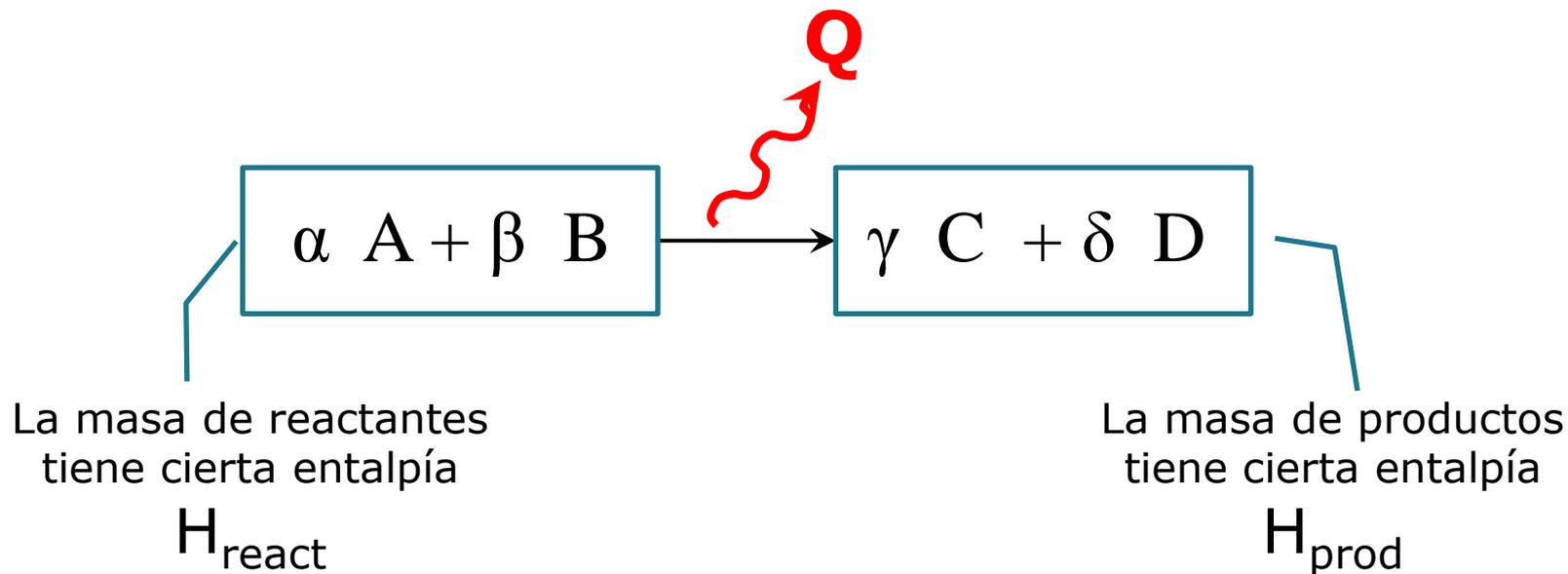
(Véase que el conjunto de átomos de reactantes y de productos es el mismo... Los átomos de un lado y del otro son los mismos... y no hay ni más ni menos átomos....)

¿Por qué  $H_{\text{react}}$  y  $H_{\text{prod}}$  pueden llegar a ser diferentes?

# Cambios de Entalpía en una reacción química

Supongamos a modo de ejemplo la siguiente reacción química...

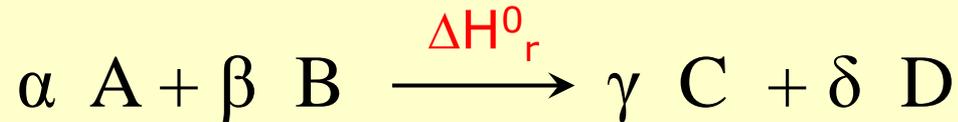
En ocasiones, representamos el "calor" liberado en la reacción...



$$\Delta H = H_{\text{prod}} - H_{\text{react}} = -Q$$

# Relación entre Calor de reacción y Calores de formación

---



$$\Delta H_r^0 = \gamma \Delta H_{f,C}^0 + \delta \Delta H_{f,D}^0 - \alpha \Delta H_{f,A}^0 - \beta \Delta H_{f,B}^0$$

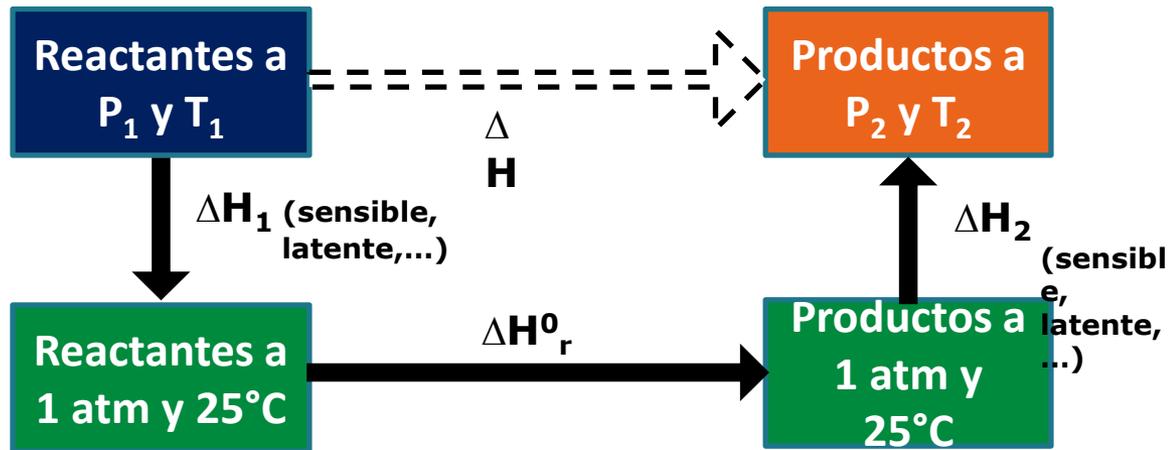
Podemos calcular el calor estándar de reacción a partir de los calores estándares de formación de las especies intervinientes.

Para cualquier reacción podemos poner:

$$\Delta H_r^0 = \sum \alpha_{\text{prod}} \Delta H_{f,\text{prod}}^0 - \sum \alpha_{\text{react}} \Delta H_{f,\text{react}}^0$$

## ¿y si la reacción no es a 1 atm y 25°C?

Consideremos por ejemplo...



$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_r^0 + \Delta H_2$$

*(Por ser "función de estado" el  $\Delta H$  de un cambio depende sólo de los estados inicial y final y no del camino seguido)*

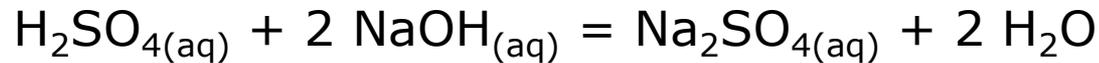
# Balances de Energía

(en sistemas con  
procesos con reacciones  
químicas)

# Ejemplo 5: Balance con Reacción química (proceso batch)

A un reactor batch se cargan 100 kg de una solución acuosa de Acido Sulfúrico al 24,5% en peso, inicialmente a 30°C. Luego se cargan 200 kg de solución acuosa de Hidróxido de Sodio al 10% en peso inicialmente a 20°C. Se agita por 30 min con un mezclador que consume 1 kW y entrega al reactor sólo el 70% de la energía que consume.

Ácido y base reaccionan completamente a presión atmosférica según



El reactor tiene una masa de 500 kg de acero y está completamente aislado (no intercambia calor con el ambiente).

Calcule la temperatura de la solución acuosa resultante (se asume que se logra el equilibrio térmico).

El cambio de entalpía estándar de la reacción a  $T = 25^\circ\text{C}$  y  $P = 1 \text{ atm}$  es  $\Delta H_r^0 = -1,38 \times 10^5 \text{ kJ/kmol de Na}_2\text{SO}_4$ .

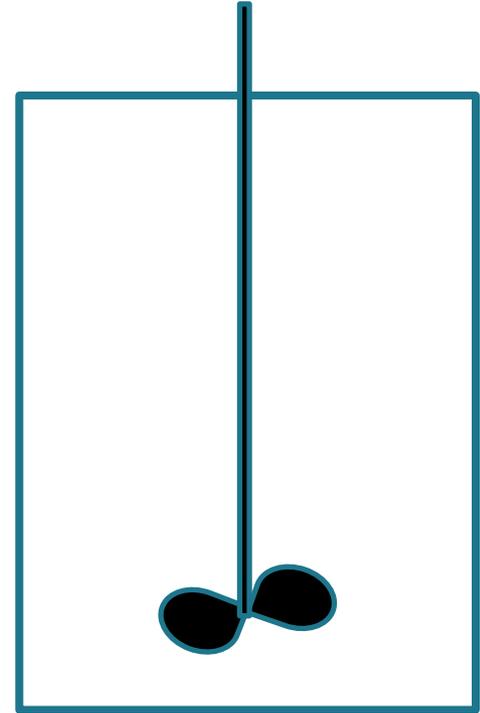
El  $c_p$  de todas las soluciones acuosas intervinientes es  $4,185 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$  (independiente de la composición y temperatura) y la capacidad calorífica del acero =  $0,44 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$

# Lo primero... imaginar el proceso y entender “la letra”

---

## **Estado inicial (1)**

Reactor vacío



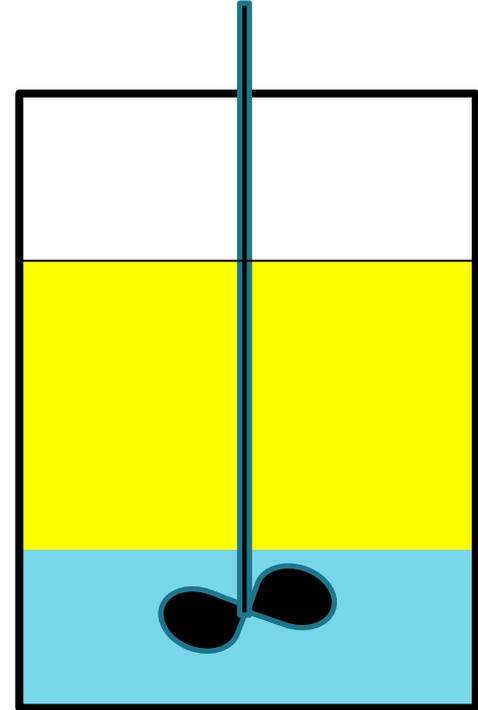
# Lo primero... imaginar el proceso y entender “la letra”

## Estado inicial (1)

Reactor vacío

## Durante el proceso

- Al principio, se cargan 100 kg de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  aq 24,5% en peso, a 20°C
- Luego, se cargan 200 kg de NaOH aq, 10% en peso, a 20 °C
- Luego se mezcla por 30 min; se produce la reacción hasta completarse.



# Lo primero... imaginar el proceso y entender “la letra”

## Estado inicial (1)

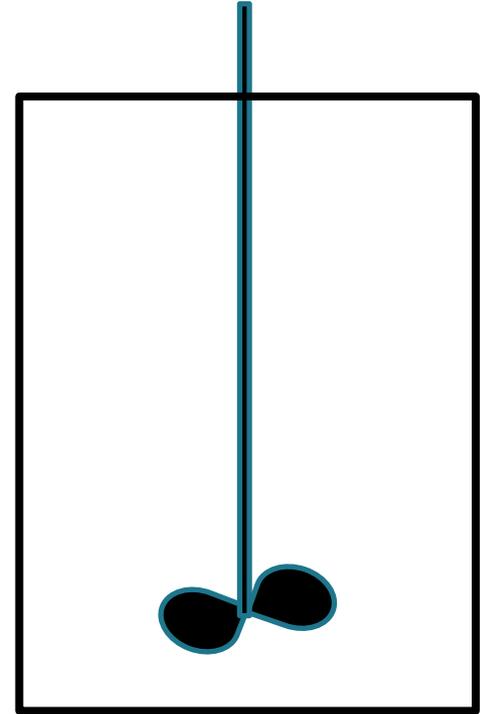
Reactor vacío

## Durante el proceso

- Al principio, se cargan 100 kg de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  aq 24,5% en peso, a 20°C
- Luego, se cargan 200 kg de NaOH aq, 10% en peso, a 20 °C
- Luego se mezcla por 30 min; se produce la reacción hasta completarse.
- Al llegar a equilibrio interno, la temperatura será homogénea
- Al final, se descargan los productos.

## Estado final (2)

Reactor vacío



# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

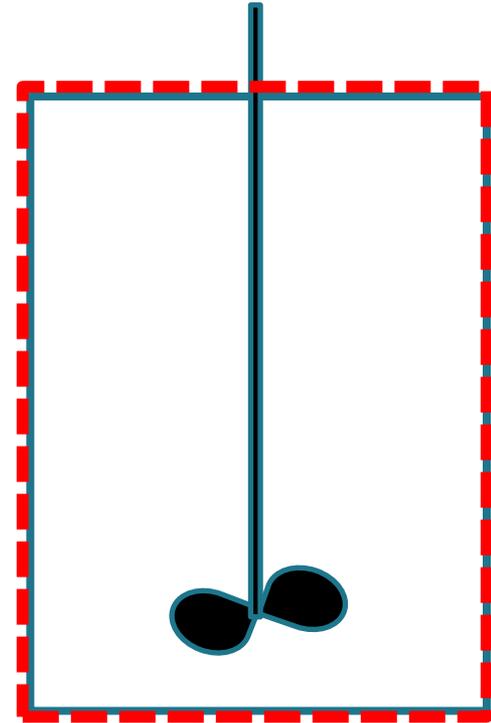
El **sistema** a estudiar es el Reactor y su contenido

## Ecuación de Balance de Energía

$$Q + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_C$$

En este caso, los  $\Delta$  refieren al cambio sufrido por el sistema durante el proceso. Esto es, las diferencias entre el estado final y el inicial del reactor.

$M_i$  y  $M_j$  refieren a las masas que entraron y salieron durante el proceso

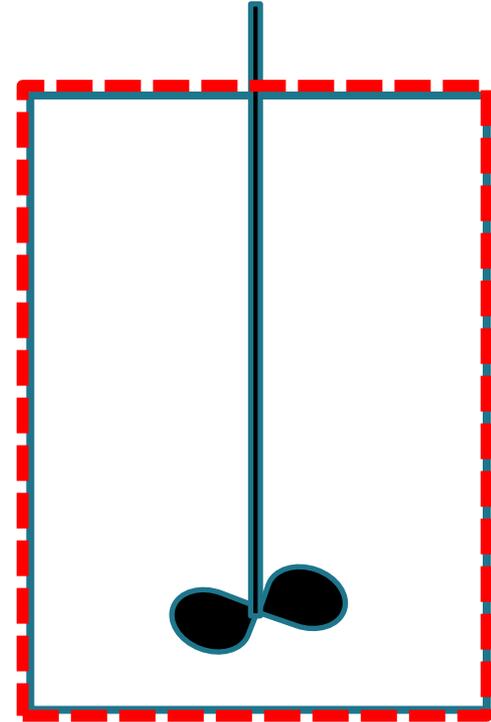


# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

El **sistema** a estudiar es el Reactor y su contenido

## Ecuación de Balance de Energía

$$Q + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_C$$



El cambio de temperatura del sistema se verá reflejado en el cambio de energía interna ( $\Delta U$ ).

# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

## Análisis de términos de la ecuación

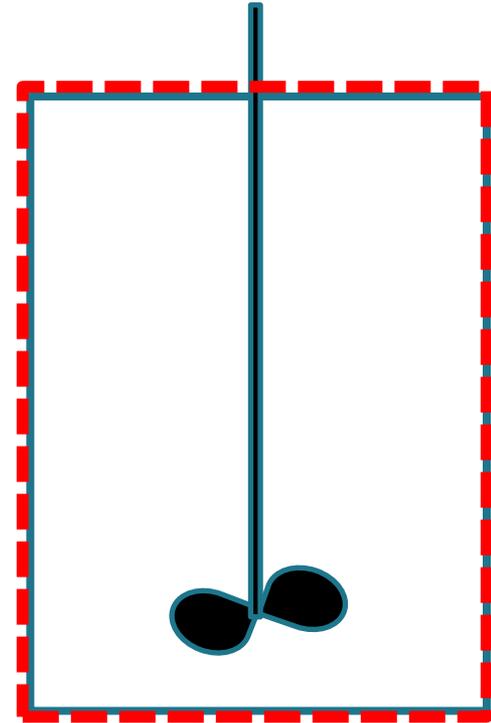
$$\cancel{Q} + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_C$$

$Q = 0$  (El reactor está aislado y no intercambia calor con el entorno)

$W_{\text{ext}} \neq 0$  (Durante 30 min el agitador estuvo haciendo trabajo sobre el sistema)

El motor consumió 1 kW durante 30 min y el sistema tenía una eficiencia del 70%

Trabajo recibido por el sistema:  $1 \text{ kJ/s} * 1800 \text{ s} * 0,7 = 1260 \text{ kJ}$



# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

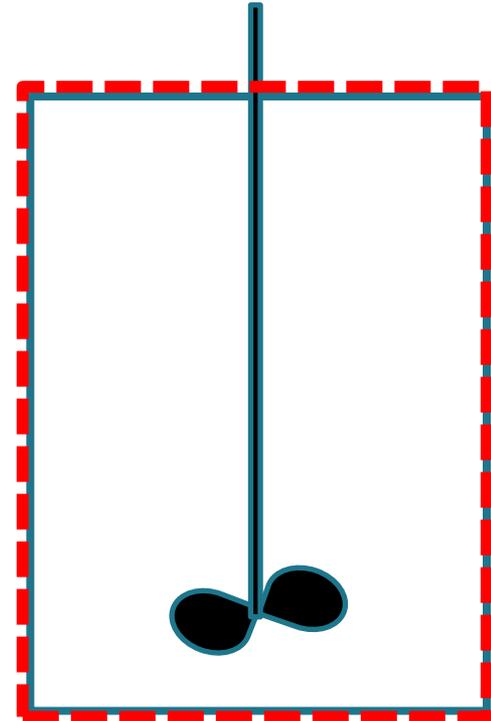
## Análisis de términos de la ecuación

$$\cancel{Q} + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum M_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \Delta U + \cancel{\Delta E_p} + \cancel{\Delta E_c}$$

$\Delta E_p = \Delta E_c = 0$  El sistema no sube ni baja, e inicia y termina en reposo.

$\Delta U \neq 0$  (El reactor estaba inicialmente a 20°C y cuando se vacía queda a la temperatura que alcanzó el sistema luego de la reacción).

$$\Delta U = (\text{masa de reactor}) * C_{\text{cal}} * (T_2 - 20) = 500 \text{ kg} * 0,44 \text{ kJ / (kg} \cdot \text{°C)} * (T_2 - 20) = 220 \text{ kJ/°C} * (T_2 - 20)$$



# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

## Análisis de términos de la ecuación

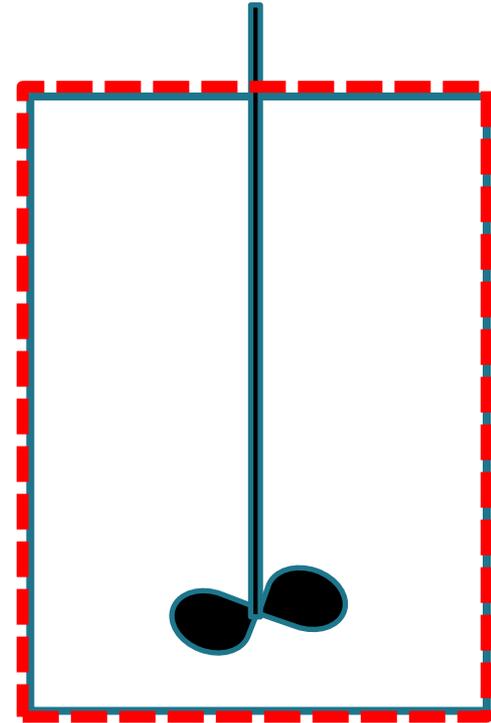
$$\cancel{Q} + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + \cancel{v_i^2/2 + gz_i}) - \sum M_j (h_j + \cancel{v_j^2/2 + gz_j}) = \Delta U + \cancel{\Delta E_P} + \cancel{\Delta E_C}$$

Podemos despreciar los términos de energía cinética y potencial de los reactivos al entrar y los productos al salir.

La ecuación queda:

$$1260 \text{ kJ} + \sum M_i h_i - \sum M_j h_j = 220 \text{ kJ/}^\circ\text{C} * (T_2 - 20)$$

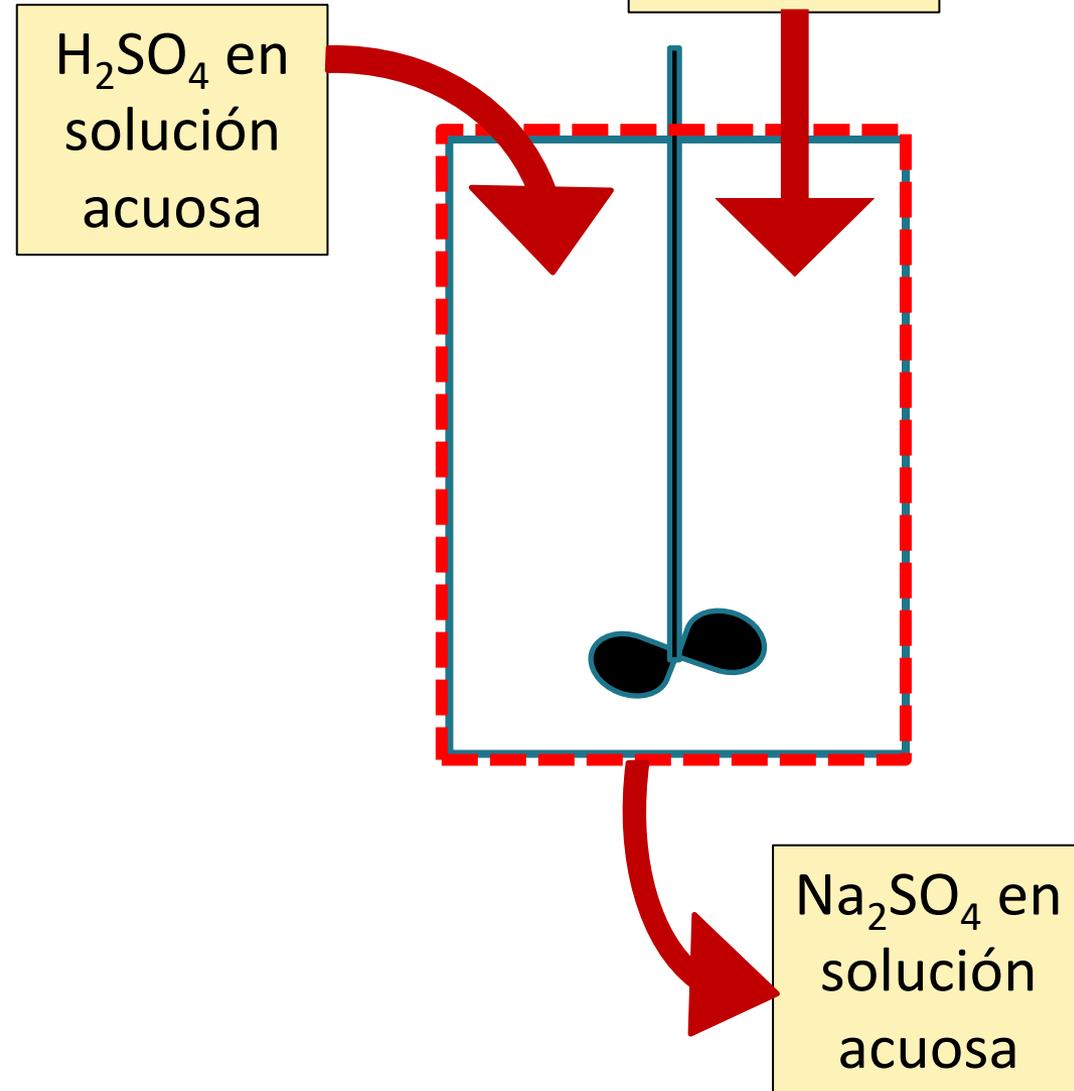
$$- 5660 \text{ kJ} + 220 * T_2 (^\circ\text{C}) = \sum M_i h_i - \sum M_j h_j$$



# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

$$\sum M_i h_i - \sum M_j h_j$$

Veamos cuáles son los materiales que entran y que salen, sus masas y sus entalpías específicas









# El balance de materia que entra y que sale

Datos de las corrientes de reactivos

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5				75,5			
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0		180,0			
<b>3</b>									

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kmol usando los PM

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5				75,5			
2	200 kg NaOH, 10%			20,0		180,0			
3									

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol

PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol

PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kmol usando los PM

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>									

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol

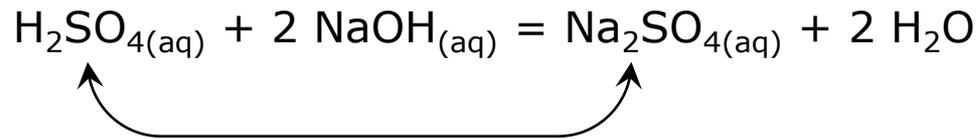
PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol

PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kmol de sulfato de sodio a partir de la ec esteq



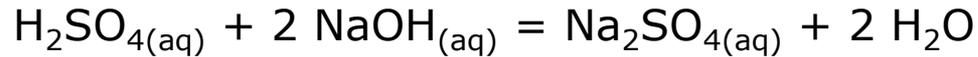
Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>									

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol  
PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol  
PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kmol de sulfato de sodio a partir de la ec esteq



Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>									0,25

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol  
PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol  
PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kg de sulfato de sodio usando el PM

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
2	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
3									0,25

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kg de sulfato de sodio usando el PM

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>								35,5	0,25

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol  
 PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol  
 PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

¿Cuánto queda de sulfúrico y/o soda sin reaccionar?

Reactivos estaban en proporciones estequiométricas: 2 moles de NaOH por mol de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Se consumen totalmente.

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>								35,5	0,25

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol  
PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol  
PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

¿Cuánto queda de sulfúrico y/o soda sin reaccionar?

Reactivos estaban en proporciones estequiométricas: 2 moles de NaOH por mol de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Se consumen totalmente.

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>		0	0	0	0			35,5	0,25

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol  
PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol  
PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kg de agua que salen por diferencia (sabiendo que no queda masa en el reactor)

Corriente	kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1 100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
2 200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
3	0	0	0	0			35,5	0,25

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol  
PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol  
PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kg de agua que salen por diferencia (sabiendo que no queda masa en el reactor)

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>	300 kg	0	0	0	0			35,5	0,25

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kg de agua que salen por diferencia (sabiendo que no queda masa en el reactor)

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>	300 kg	0	0	0	0	264,5		35,5	0,25

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kmol de agua que salen usando el PM

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>	300 kg	0	0	0	0	264,5		35,5	0,25

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol

PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol

PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

Cálculo de los kmol de agua que salen usando el PM

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>	300 kg	0	0	0	0	264,5	14,69	35,5	0,25

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

<b>Corriente</b>		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>	300 kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 11,83%					264,5	14,69	35,5	0,25

PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol

PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol

PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# El balance de materia que entra y que sale

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,19		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0,50	180,0	10,00		
<b>3</b>	300 kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 11,83%					264,5	14,69	35,5	0,25

Materia que entra

$M_1 = 100 \text{ kg}$  (solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en agua 24,5% m/m)

$M_2 = 200 \text{ kg}$  (solución de NaOH, en agua 10% m/m)

Materia que sale

$M_3 = 300 \text{ kg}$  (solución de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en agua 11,83% m/m)

$$\sum M_i h_i - \sum M_j h_j = M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3$$

# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

## Análisis de términos de la ecuación

$$\cancel{Q} + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + \cancel{v_i^2/2 + gz_i}) - \sum M_j (h_j + \cancel{v_j^2/2 + gz_j}) = \Delta U + \cancel{\Delta E_P} + \cancel{\Delta E_C}$$

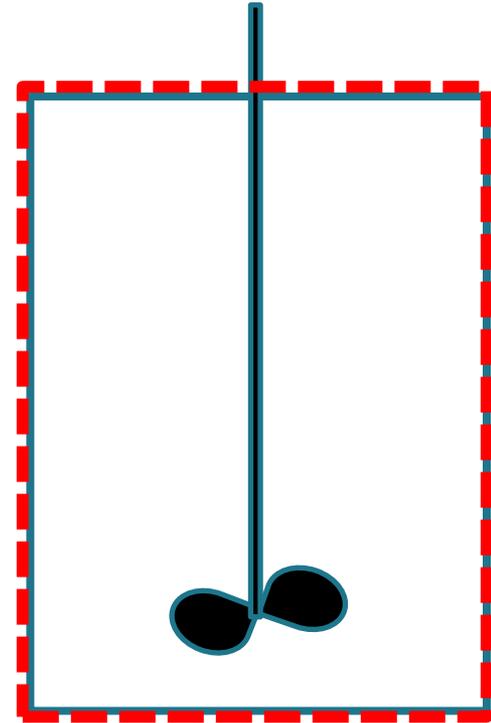
Podemos despreciar los términos de energía cinética y potencial de los reactivos al entrar y los productos al salir.

La ecuación queda:

$$1260 \text{ kJ} + \sum M_i h_i - \sum M_j h_j = 220 \text{ kJ/}^\circ\text{C} * (T_2 - 20)$$

$$- 5660 \text{ kJ} + 220 * T_2 (^\circ\text{C}) = \sum M_i h_i - \sum M_j h_j$$

$$\sum M_i h_i - \sum M_j h_j = M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3$$



# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

## Análisis de términos de la ecuación

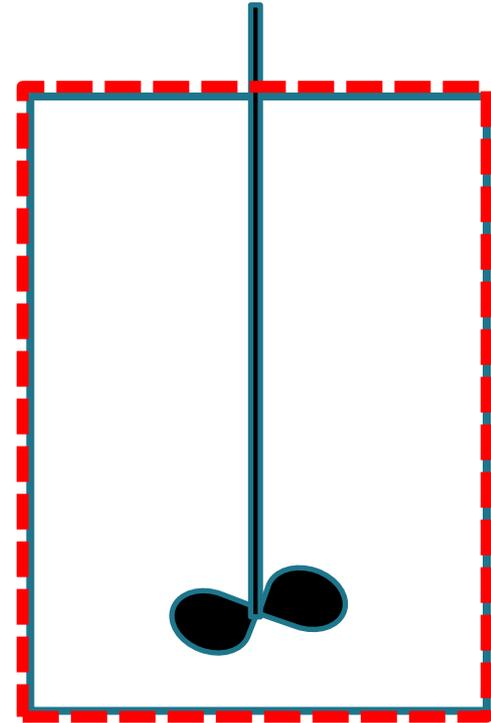
$$\cancel{Q} + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + \cancel{v_i^2/2 + gz_i}) - \sum M_j (h_j + \cancel{v_j^2/2 + gz_j}) = \Delta U + \cancel{\Delta E_P} + \cancel{\Delta E_C}$$

Podemos despreciar los términos de energía cinética y potencial de los reactivos al entrar y los productos al salir.

La ecuación queda:

$$1260 \text{ kJ} + \sum M_i h_i - \sum M_j h_j = 220 \text{ kJ/}^\circ\text{C} * (T_2 - 20)$$

$$- 5660 \text{ kJ} + 220 * T_2 (^\circ\text{C}) = M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3$$



# Balance de energía

---

$$\dot{Q} = M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3 ?$$

No tenemos como datos las entalpías individuales  $h_i$

Sí tenemos como dato el calor de reacción estándar (cambio de entalpía estándar de la reacción).

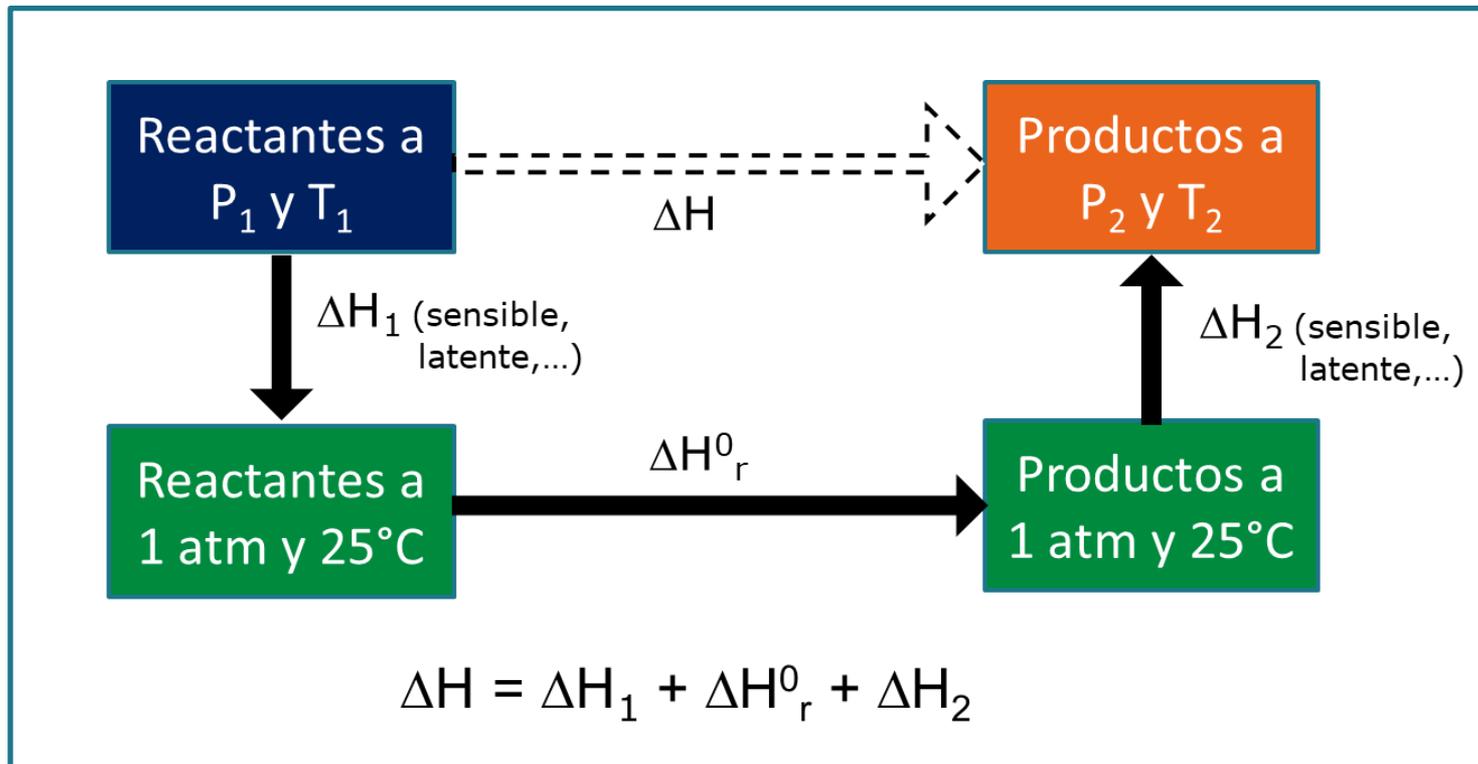
Con ese dato podemos relacionar las entalpías de los productos con la de los reactivos

(véase que en definitiva lo que necesitamos conocer no son "las"  $h_i$ , sino el cambio entre las  $h_i$  que entran y las  $h_j$  que sale)

# Balance de energía

$$\dot{Q} = M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3 ?$$

Como tenemos el dato del cambio de entalpía estándar de la reacción (a 25°C), nos conviene referir las  $h_i$  a sus valores a 25°C



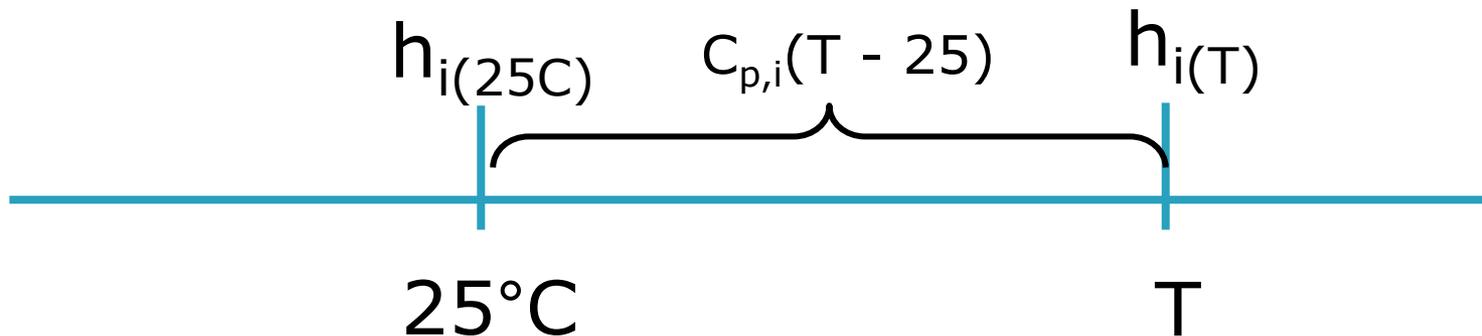
# Balance de energía

$$\dot{Q} = M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3 ?$$

Como tenemos el dato del cambio de entalpía estándar de la reacción (a 25°C), nos conviene referir las  $h_i$  a sus valores a 25°C

Para cualquier corriente, si no hay cambio de fases en el intervalo de temperaturas 25°C - T, se cumple que:

$$h_i = h_i(T \text{ °C}, 1\text{atm}) = h_i(25\text{°C}, 1\text{atm}) + C_{p,i} (T - 25)$$



# Balance de energía

---

$$\dot{Q} = M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3 ?$$

Como tenemos el dato del cambio de entalpía estándar de la reacción (a 25°C), nos conviene referir las  $h_i$  a sus valores a 25°C

Para cualquier corriente, si no hay cambio de fases en el intervalo de temperaturas 25°C - T, se cumple que:

$$h_i = h_i (T \text{ °C}, 1\text{atm}) = h_i (25\text{°C}, 1\text{atm}) + C_{p,i} (T - 25)$$

$$h_1 = h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (30\text{°C}, 1\text{atm}) = h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25\text{°C}, 1\text{atm}) + C_p \cdot 5$$

$$h_2 = h_{\text{NaOH aq}} (20\text{°C}, 1\text{atm}) = h_{\text{NaOH aq}} (25\text{°C}, 1\text{atm}) + C_p (-5)$$

$$h_3 = h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (T_2\text{°C}, 1\text{atm}) = h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25\text{°C}, 1\text{atm}) + C_p (T_2 - 25)$$

# Balance de energía

---

$$M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3$$

$$h_1 = h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (30^\circ\text{C}, 1\text{atm}) = h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + C_p \cdot 5$$

$$h_2 = h_{\text{NaOH aq}} (20^\circ\text{C}, 1\text{atm}) = h_{\text{NaOH aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + C_p (-5)$$

$$h_3 = h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (T_2^\circ\text{C}, 1\text{atm}) = h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + C_p (T_2 - 25)$$

Reemplazando...

$$\begin{aligned} M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3 &= M_1 h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + M_1 C_p \cdot 5 \\ &\quad + M_2 h_{\text{NaOH aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + M_2 C_p (-5) \\ &\quad - M_3 h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) - M_3 C_p (T_2 - 25) \end{aligned}$$

Reordenando...

$$\begin{aligned} M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3 &= \\ &= M_1 h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + M_2 h_{\text{NaOH aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) - M_3 h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) \\ &\quad + M_1 C_p \cdot 5 + M_2 C_p (-5) - M_3 C_p (T_2 - 25) \end{aligned}$$

# Balance de energía

$$M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3$$

$$= M_1 h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + M_2 h_{\text{NaOH aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) - M_3 h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm})$$

$$+ M_1 C_p 5 + M_2 C_p (-5) - M_3 C_p (T_2 - 25)$$

$$M_1 h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + M_2 h_{\text{NaOH aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) - M_3 h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) =$$

$$= + 24,5 \text{ kg } h_{\text{H}_2\text{SO}_4} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + 75,5 \text{ kg } h_{\text{H}_2\text{O}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) \\ + 20 \text{ kg } h_{\text{NaOH}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + 180 \text{ kg } h_{\text{H}_2\text{O}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) \\ - 35,5 \text{ kg } h_{\text{Na}_2\text{SO}_4} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) - 264,5 \text{ kg } h_{\text{H}_2\text{O}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm})$$

$$= + 24,5 \text{ kg } h_{\text{H}_2\text{SO}_4} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + 20 \text{ kg } h_{\text{NaOH}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) \\ - 35,5 \text{ kg } h_{\text{Na}_2\text{SO}_4} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) - 9 \text{ kg } h_{\text{H}_2\text{O}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm})$$

$$= 0,25 \text{ kmol } [h_{\text{H}_2\text{SO}_4} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + 2 h_{\text{NaOH}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) - h_{\text{Na}_2\text{SO}_4} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) \\ - 2 h_{\text{H}_2\text{O}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm})] = 0,25 \text{ kmol } * (-\Delta H^0_r)$$

$$= 0,25 \text{ kmol } * 1,38 \times 10^5 \text{ kJ/mol} = \boxed{34\,500 \text{ kJ}}$$

# Balance de energía

$$M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3$$

$$= M_1 h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + M_2 h_{\text{NaOH aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) - M_3 h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm})$$

$$+ M_1 C_p 5 + M_2 C_p (-5) - M_3 C_p (T_2 - 25)$$

$$M_1 C_p 5 + M_2 C_p (-5) - M_3 C_p (T_2 - 25) =$$

$$= C_p [100 * 5 + 200 * (-5) - 300 * (T_2 - 25)] =$$

$$= 4,186 * [7000 - 300 * T_2] \text{ kJ}$$

$$M_1 h_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) + M_2 h_{\text{NaOH aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) - M_3 h_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ aq}} (25^\circ\text{C}, 1\text{atm}) =$$

$$= 0,25 \text{ kmol} * 1,38 * 10^5 \text{ kJ/mol} = 34 500 \text{ kJ}$$

# Balance de energía

---

$$M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3$$

$$= 4,186 * [7000 - 300 * T_2] \text{ kJ} + 34\,500 \text{ kJ}$$

# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

## Análisis de términos de la ecuación

$$\cancel{Q} + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + \cancel{v_i^2/2 + gz_i}) - \sum M_j (h_j + \cancel{v_j^2/2 + gz_j}) = \Delta U + \cancel{\Delta E_P} + \cancel{\Delta E_C}$$

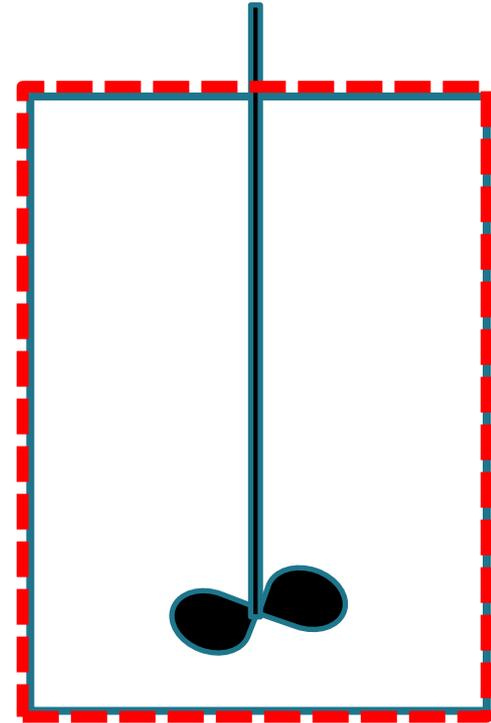
Podemos despreciar los términos de energía cinética y potencial de los reactivos al entrar y los productos al salir.

La ecuación queda:

$$1260 \text{ kJ} + \sum M_i h_i - \sum M_j h_j = 220 \text{ kJ/}^\circ\text{C} * (T_2 - 20)$$

$$- 5660 \text{ kJ} + 220 * T_2 (^\circ\text{C}) = M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3$$

$$= 4,186 * [7000 - 300 * T_2] \text{ kJ} + 34 500 \text{ kJ}$$



# El sistema problema y la ecuación de balance de energía

## Análisis de términos de la

$$\cancel{Q} + W_{\text{ext}} + \sum M_i (h_i + \cancel{v_j^2/2 + gz_j}) - \sum M_j (h_j + \cancel{v_j^2/2 + gz_j}) =$$

Podemos despreciar los términos de energía cinética y potencial reactivos al entrar y los productos al salir.

La ecuación queda:

$$1260 \text{ kJ} + \sum M_i h_i - \sum M_j h_j = 220 \text{ kJ/}^\circ\text{C} * (T_2 - 20)$$

$$- 5660 \text{ kJ} + 220 * T_2 (^\circ\text{C}) = M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3$$

$$= 4,186 * [7000 - 300 * T_2] \text{ kJ} + 34 500 \text{ kJ}$$

$$T_2 = 47 \text{ }^\circ\text{C}$$

Comprobamos que en el rango de temperaturas de trabajo no hay cambios de fase

## Ejemplo 6: Balance con Reacción química (proceso continuo, estacionario)

---

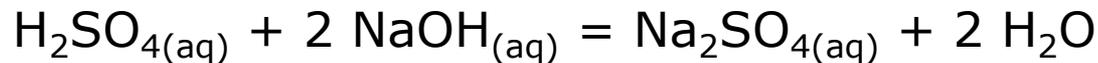
Consideraremos que el proceso del ejemplo 5 se realiza de manera continua en estado estacionario.

# Ejemplo 6: Balance con Reacción química (proceso continuo, estacionario)

---

Se neutraliza, en un reactor continuo y en estado estacionario una corriente de 1 kg/s de una solución acuosa de Acido sulfúrico al 24,5% en peso a 30°C con una corriente acuosa de Soda al 10% en peso de 2 kg/s cuya temperatura es de 20°C.

El cambio de entalpía estándar de la reacción a  $T = 298 \text{ K}$  y  $P = 1 \text{ atm}$



en las condiciones indicadas es de  $\Delta H_r^0 = -1,38 \times 10^5 \text{ kJ/kmol}$  de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

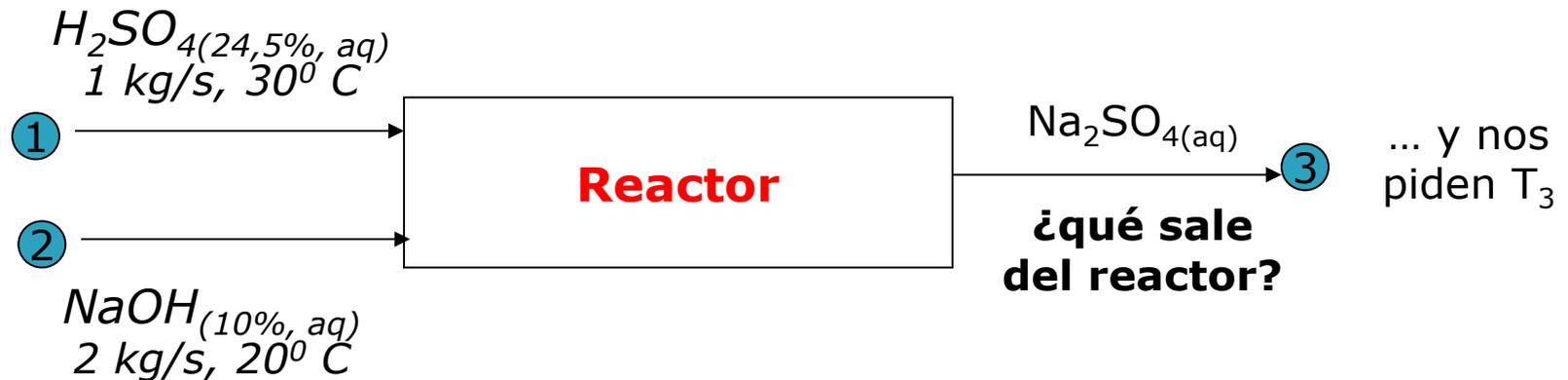
Calcular la temperatura de la solución acuosa de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  que sale continuamente del tanque suponiendo que el mismo está aislado térmicamente.

Notas: considere para todas las corrientes  $C_p = 4,185 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

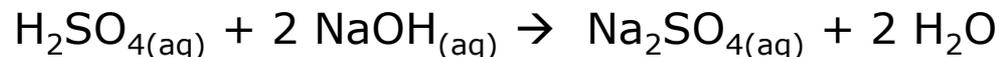
La reacción de neutralización entre ácido y base fuerte se completa. El aporte de trabajo por el agitador es 0,7 kW.

# Lo primero... imaginar el proceso y entender “la letra”

Las especies intervinientes, la reacción, las proporciones... son todas las mismas que en el ejemplo anterior. Pero en este caso, el reactor es continuo y el proceso tiene lugar en estado estacionario

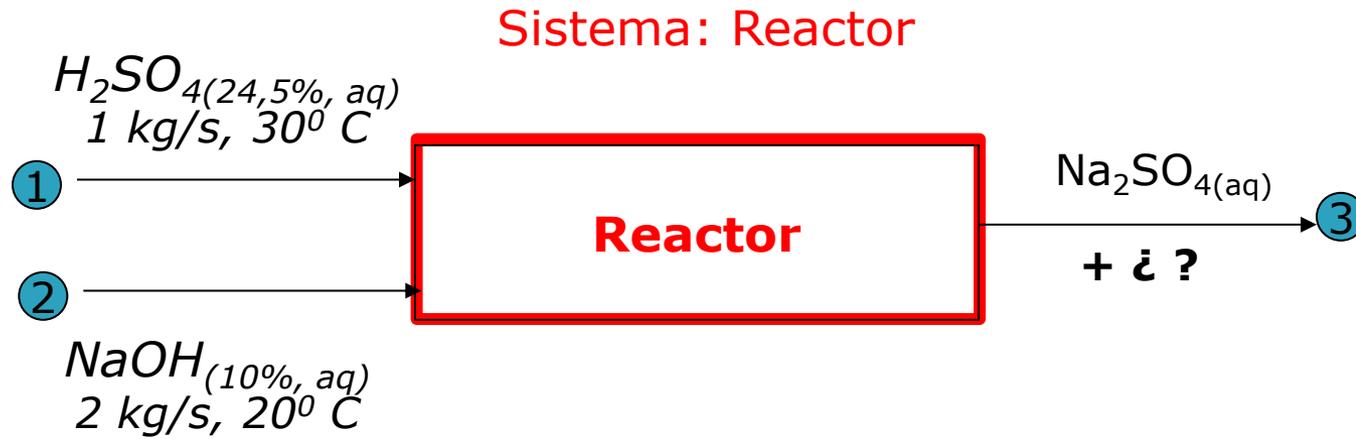


Sabemos que

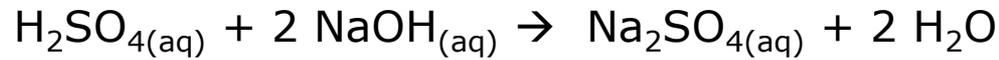


El agua que se forma se agrega al agua de la solución

# El balance de materia que entra y que sale



Sabemos que



NOTA: Las cantidades de reactivos que entran por segundo son 1/100 de las cantidades involucradas en cada lote del ejemplo anterior. Si tomamos como base de análisis, 100 segundos, entonces las cantidades serían las mismas

# El balance de materia que entra y que sale

Cantidades de kg y kmol que entran y salen por segundo

<b>Corriente</b>		kg $\text{H}_2\text{SO}_4$	kmol $\text{H}_2\text{SO}_4$	kg NaOH	kmol NaOH	kg $\text{H}_2\text{O}$	kmol $\text{H}_2\text{O}$	kg $\text{Na}_2\text{SO}_4$	kmol $\text{Na}_2\text{SO}_4$
<b>1</b>									
<b>2</b>									
<b>3</b>									

$$\text{PM } \text{H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM } \text{Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM } \text{NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM } \text{H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cantidades de kg y kmol que entran y salen por segundo

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	1 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%								
2									
3									

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cantidades de kg y kmol que entran y salen por segundo

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	1 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%								
2	2 kg NaOH, 10%								
3									

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cantidades de kg y kmol que entran y salen en 100 segundos  
(multiplicamos las cantidades anteriores x 100)

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	1 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%								
2	2 kg NaOH, 10%								
3									

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cantidades de kg y kmol que entran y salen en 100 segundos

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	1 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%								
<b>2</b>	2 kg NaOH, 10%								
<b>3</b>									

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cantidades de kg y kmol que entran y salen en 100 segundos  
(Resultan las mismas cantidades que vimos en el caso anterior)

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%								
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%								
<b>3</b>									

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cantidades de kg y kmol que entran y salen en 100 segundos  
(Resultan las mismas cantidades que vimos en el caso anterior)

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,185		
<b>2</b>	200 kg NaOH, 10%			20,0	0.50	180	10,0		
<b>3</b>	300 kg					264,5	14,69	35,5	0,25

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cantidades de kg y kmol que entran y salen por segundo  
(dividimos por 100 las cantidades anteriores)

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	100 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	24,5	0,25			75,5	4,185		
2	200 kg NaOH, 10%			20,0	0.50	180	10,0		
3	300 kg					264,5	14,69	35,5	0,25

$$\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM Na}_2\text{SO}_4 = 142 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM H}_2\text{O} = 18 \text{ g/mol}$$

# El balance de materia que entra y que sale

Cantidades de kg y kmol que entran y salen por segundo

Corriente		kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg NaOH	kmol NaOH	kg H <sub>2</sub> O	kmol H <sub>2</sub> O	kg Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kmol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>1</b>	1 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24,5%	0,245	0,0025			0,755	0,04185		
<b>2</b>	2 kg NaOH, 10%			0,200	0.005	1,80	0,10		
<b>3</b>	3 kg					2,645	0,1469	0,355	0,0025

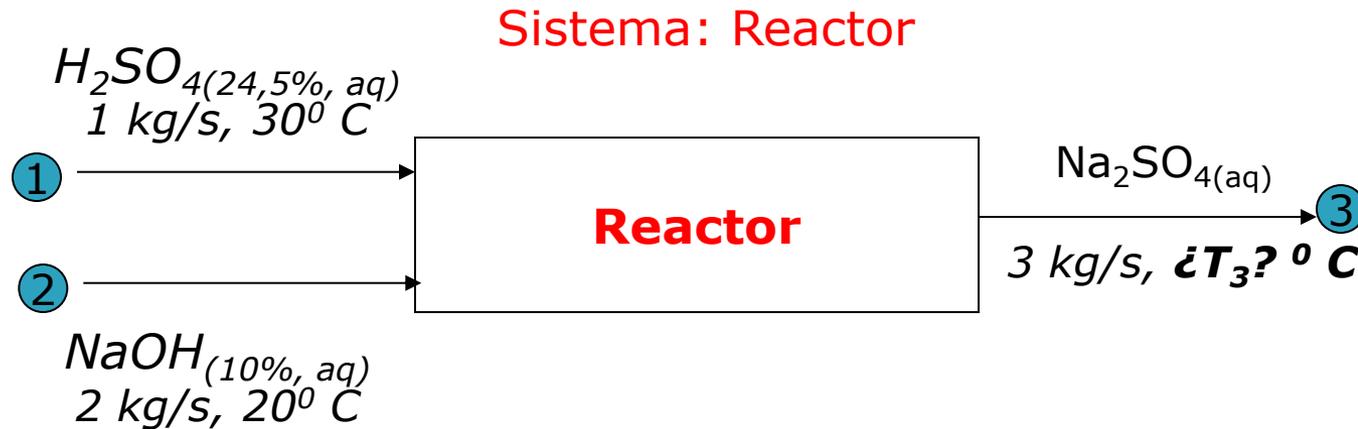
PM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98 g/mol

PM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 142 g/mol

PM NaOH = 40 g/mol

PM H<sub>2</sub>O = 18 g/mol

# Balance de energía



## Ecuación de Balance de Energía

Como el proceso es continuo y está en estado estacionario nos conviene usar la ecuación de velocidades de cambios

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_c$$

# Balance de energía

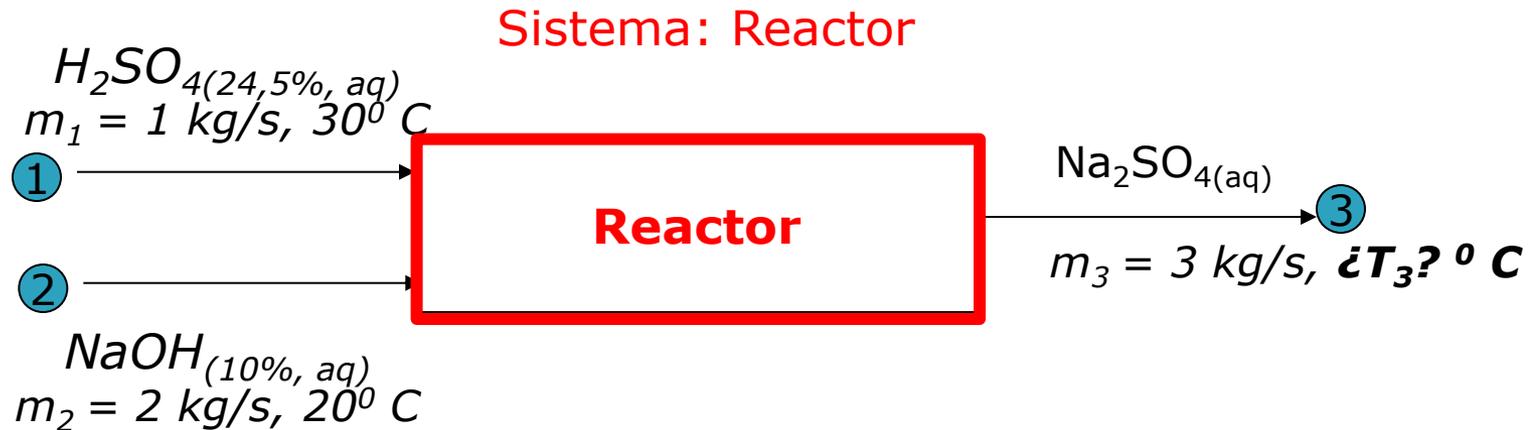
$$\cancel{Q} + \dot{W}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + \cancel{v_i^2/2 + gz_i}) - \sum m_j (h_j + \cancel{v_j^2/2 + gz_j}) = \cancel{\dot{U}} + \cancel{\dot{E}_p} + \cancel{\dot{E}_c}$$

- No se intercambia calor con el entorno (dato)
- No hay acumulación de energía en el sistema (estado estacionario) Véase que en este caso, el metal del reactor tampoco sufre variaciones de temperatura.
- Los cambios en energía cinética y energía potencial de las corrientes al pasar por el intercambiador son despreciables.
- La velocidad de trabajo realizado sobre el sistema es 0,7 kW (dato)
- Ingresan dos corrientes (1,2) y egresan una corriente (3)

La ecuación de balance queda reducida a:

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 - m_3 h_3 = - 0,7 \text{ kJ/s}$$

# Balance de energía



La ecuación de balance queda reducida a:

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 - m_3 h_3 = - 0,7 \text{ kJ/s}$$

Para aprovechar los cálculos ya realizados en el ejemplo anterior, si multiplicamos ambos términos por 100s, llegamos a:

$$M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3 = - 70 \text{ kJ}$$

donde  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$  son las cantidades de materia involucradas en el proceso batch del ejemplo anterior.

# Balance de energía

---

$$M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3 = - 70 \text{ kJ}$$

donde  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$  son las cantidades de materia involucradas en el proceso batch del ejemplo anterior.

Dado que las condiciones de temperatura, presión y concentraciones son idénticas, también son idénticas las entalpías de las corrientes y en consecuencia es válido que:

$$M_1 h_1 + M_2 h_2 - M_3 h_3 = 4,186 * (7000 - 300*T_3) \text{ kJ} + 34 500 \text{ kJ}$$
$$- 70 \text{ kJ} = 4,186 * (7000 - 300*T_3) \text{ kJ} + 34 500 \text{ kJ}$$

$$**T_3 = 51 °C**$$

(NOTA: Al ser un proceso en estado estacionario, el reactor permanece siempre a la misma temperatura. Eso es una diferencia con respecto al caso batch anterior. Como en el caso batch el reactor estaba inicialmente a 20°C fue necesario "gastar" energía para calentarlo a la temperatura final, y por eso, ésta había llegado sólo a 47°C)

# Balances de Energía

(en sistemas con  
procesos transitorios)

# Ecuación de Balance de Energía (estado transitorio)

Para estos casos aplica la ecuación de velocidad de cambio para un instante dado  $t$

$$q + \dot{w}_{\text{ext}} + \sum m_i (h_i + v_i^2/2 + gz_i) - \sum m_j (h_j + v_j^2/2 + gz_j) = \dot{U} + \dot{E}_p + \dot{E}_c$$

Pero en procesos que no están en estado estacionario, tanto los flujos  $m$  como las propiedades  $h$ ,  $v$  y  $z$  de cada corriente, como los flujos de calor y trabajo pueden variar con el tiempo (ser funciones de  $t$ ), y a su vez  $\dot{U}$ ,  $\dot{E}_p$  y  $\dot{E}_c$  no sólo no son necesariamente 0 sino que también pueden variar con el tiempo.

Verán problemas en casos particulares en cursos venideros.  
El abordaje general de este tipo de problemas escapa el alcance de este curso introductorio.