

# Balances de Materia

Ejemplos

## Veremos casos de...

---

- Proceso en lotes
- Proceso continuo
  - Estado estacionario
  - Estado no estacionario (transitorio)

- 
- Sin reacciones químicas
  - Con reacciones químicas

## Caso: Proceso en lotes

---

Para los procesos en lotes resulta de particular interés conocer los cambios que ocurren en cada proceso comparando entre el "antes" y el "después".

La ecuación que aplica es:

$$\Delta M = \delta M_{\text{entrada}} - \delta M_{\text{salida}} + \delta M_{\text{formada}} - \delta M_{\text{consumida}}$$

Las cantidades ( $\delta$ ) se refieren a lo que pasó entre el instante inicial y el instante final.

$\Delta M$  es el cambio de masa en el sistema en ese mismo lapso de tiempo

# EJEMPLO

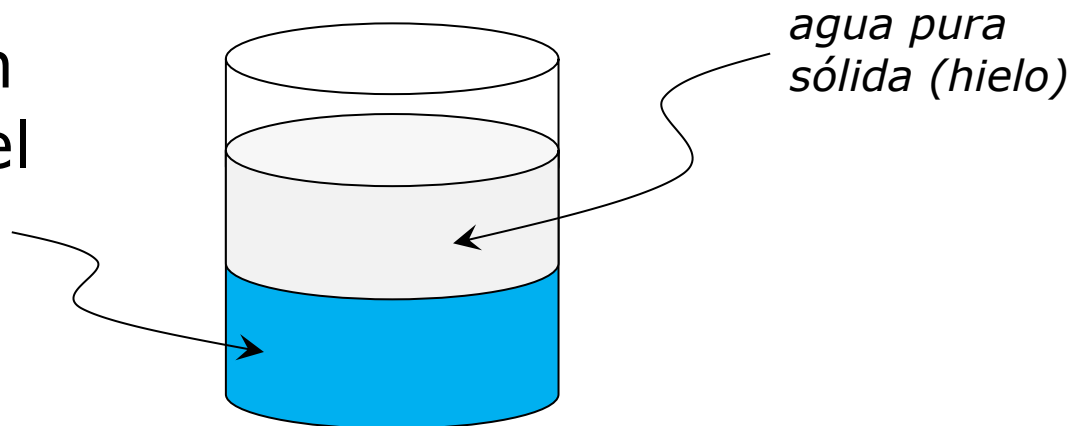
## Proceso en lotes

---

Un tanque contiene 100 kg de agua marina (asuma que es una solución acuosa de NaCl con una concentración de 3,5% de NaCl m/m).

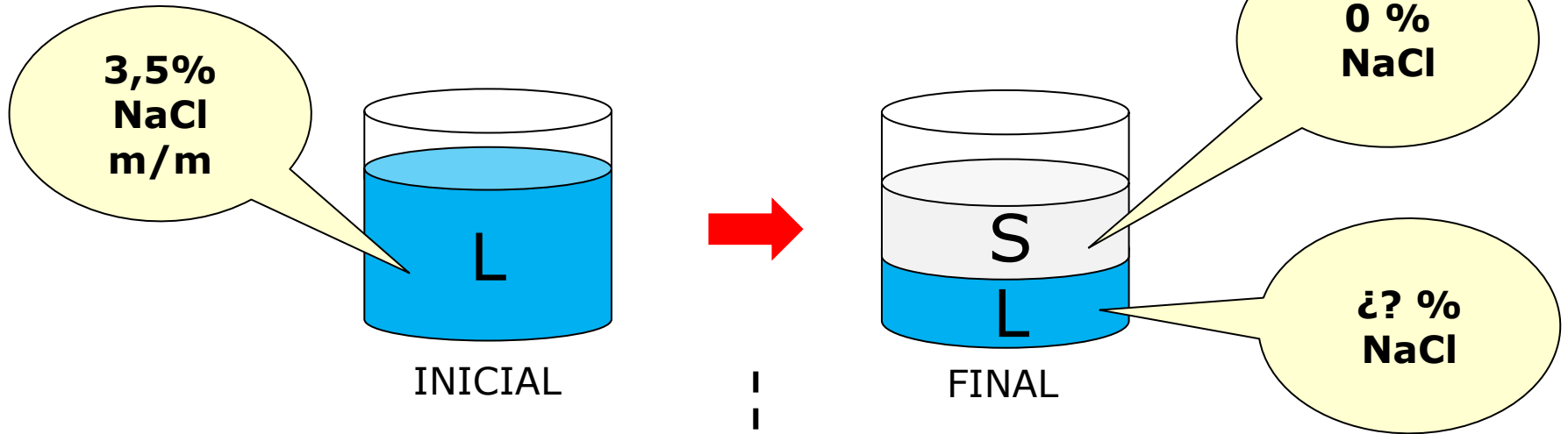
El agua marina se enfría hasta  $-2^{\circ}\text{C}$  y como consecuencia se separan 53 kgs de hielo (agua pura al estado sólido).

¿Qué concentración de NaCl queda en el líquido resultante?



# EJEMPLO

## Proceso en lotes



Estado Inicial  
(todo fase líquida)

$$M_{\text{liq}} = 100 \text{ kg y}$$
$$x_{\text{NaCl}} = 3,5 \%$$

Estado Final  
(fase líquida + fase sólida)

(todo el NaCl "se queda"  
en la fase líquida)

¿  $x_{\text{NaCl}}$  ?

*¿Cuánto NaCl y cuánto líquido quedan en la fase L al final?*

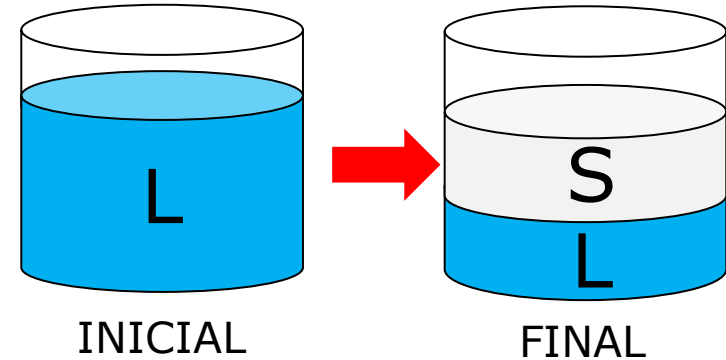
# EJEMPLO

## Proceso en lotes

Estado Inicial (todo fase líquida)

$$M_{\text{liq}} = 100 \text{ kg y } x_{\text{NaCl}} = 3,5 \%$$

$$\rightarrow M_{\text{NaCl}} = 0,035 * 100 = 3,5 \text{ kg}$$



### Balances de masa

Balance  
líquida

$$M_{\text{liq final}} = M_{\text{liq ini}} + \cancel{M_{\text{liq ent}}} - \cancel{M_{\text{liq sal}}} + \cancel{M_{\text{liq form}}} - M_{\text{liq cons}}$$

$$M_{\text{liq final}} = M_{\text{liq ini}} - M_{\text{liq cons}} = 100 - 53 = 47$$

Balance  
NaCl

$$M_{\text{NaCl final}} = M_{\text{NaCl ini}} + \cancel{M_{\text{NaCl ent}}} - \cancel{M_{\text{NaCl sal}}} + \cancel{M_{\text{NaCl form}}} - \cancel{M_{\text{NaCl cons}}}$$

(todo el NaCl "se queda" en la fase líquida)

*¿Cuánto NaCl y cuánto líquido quedan en la fase L al final?*

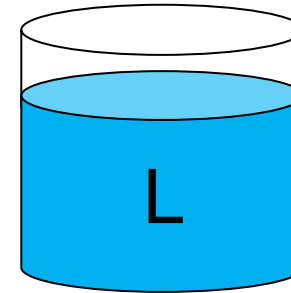
# EJEMPLO

## Proceso en lotes

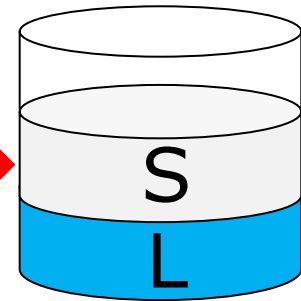
Estado Inicial (todo fase líquida)

$$M_{\text{liq}} = 100 \text{ kg y } x_{\text{NaCl}} = 3,5 \%$$

$$\rightarrow M_{\text{NaCl}} = 0,035 * 100 = 3,5 \text{ kg}$$



INICIAL



FINAL

### Balances de masa

Balance  
fase  
líquida

$$M_{\text{liq final}} = M_{\text{liq ini}} + M_{\text{liq ent}} - M_{\text{liq sal}} + M_{\text{liq form}} - M_{\text{liq cons}}$$

$$M_{\text{liq final}} = M_{\text{liq ini}} - M_{\text{liq cons}} = 100 - 53 = 47 \text{ kg}$$

Balance  
NaCl

$$M_{\text{NaCl final}} = M_{\text{NaCl ini}} + M_{\text{NaCl ent}} - M_{\text{NaCl sal}} + M_{\text{NaCl form}} - M_{\text{NaCl cons}}$$

(todo el NaCl "se queda" en la fase líquida)

En la fase líquida al final quedan:

$$M_{\text{NaCl}} = 3,5 \text{ kg y } M_{\text{liq}} = 47 \text{ kg}$$

$\rightarrow$

$$x_{\text{NaCl}} = 7,4 \%$$

## Caso: Proceso continuo, régimen estacionario

Si el proceso es continuo puede interesar conocer las velocidades de cambio...

La ecuación que aplica es:

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

todas las velocidades medidas en el mismo instante

$\dot{M}_{\text{entrada}}$  y  $\dot{M}_{\text{salida}}$  son los flujos de materia de entrada y salida al sistema respectivamente ...

... y se los suele representar con la letra  $\omega$

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



# Caso: Proceso continuo, régimen estacionario

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

Si el régimen es estacionario, entonces las propiedades del sistema son constantes en el tiempo.

Entre esas propiedades, también la cantidad de materia de cada especie:

$$M(t) = \text{constante} \rightarrow \text{Velocidad de acumulación} \\ = dM/dt = \dot{M}_{\text{acum}} = 0$$

$$\omega_{\text{salida}} - \omega_{\text{entrada}} = \dot{M}_{\text{formación}} - \dot{M}_{\text{consumo}}$$

# Caso: Proceso continuo, régimen estacionario sin formación ni consumo

$$\omega_{\text{salida}} - \omega_{\text{entrada}} = \dot{M}_{\text{formación}} - \dot{M}_{\text{consumo}}$$

$$\omega_{\text{salida}} = \omega_{\text{entrada}}$$

*Esta situación es la que se encuentra en sistemas donde ocurre una operación unitaria que involucra sólo procesos físicos y que está en estado estacionario (situación que tiene lugar en muchas operaciones unitarias y equipos cuando la planta está operando "en régimen")*

# Ejemplo

## Sistema sin reacción química

---

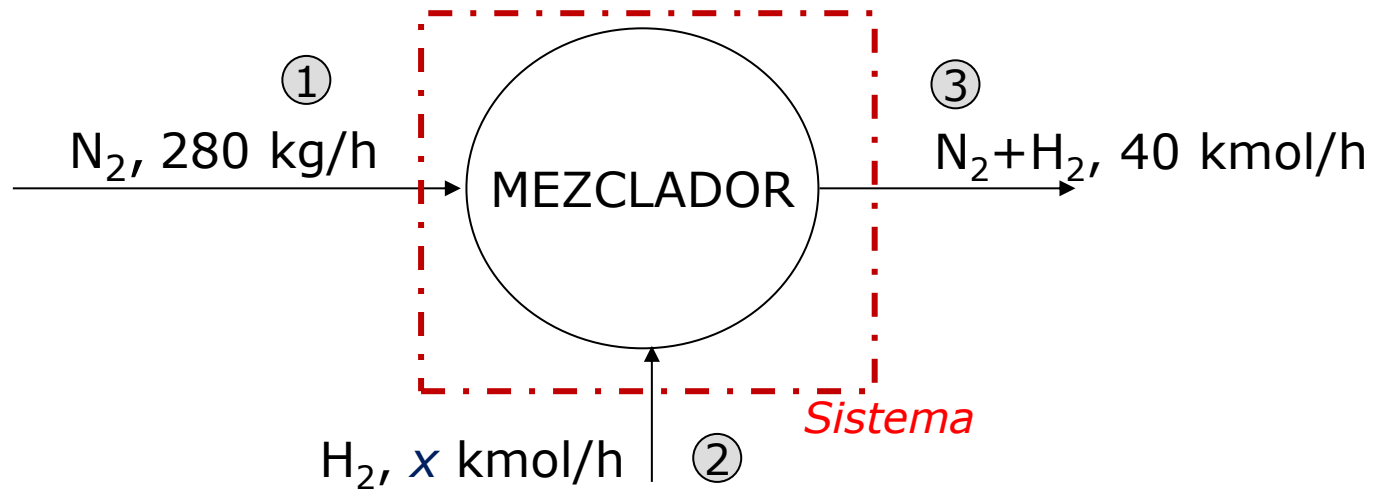
Una corriente de Nitrógeno,  $N_2$  (g) de 280 kg/h se mezcla con una corriente de Hidrógeno,  $H_2$  (g).

A la salida del mezclador se obtiene una corriente de 40 kmol/h de ( $N_2+H_2$ ).

Calcular cuántos kmol/h de  $H_2$  deben suministrarse.

# Realizando el Balance de materia

Dibujamos el diagrama de flujo (para visualizar mejor el proceso en estudio y las corrientes que entran y salen)



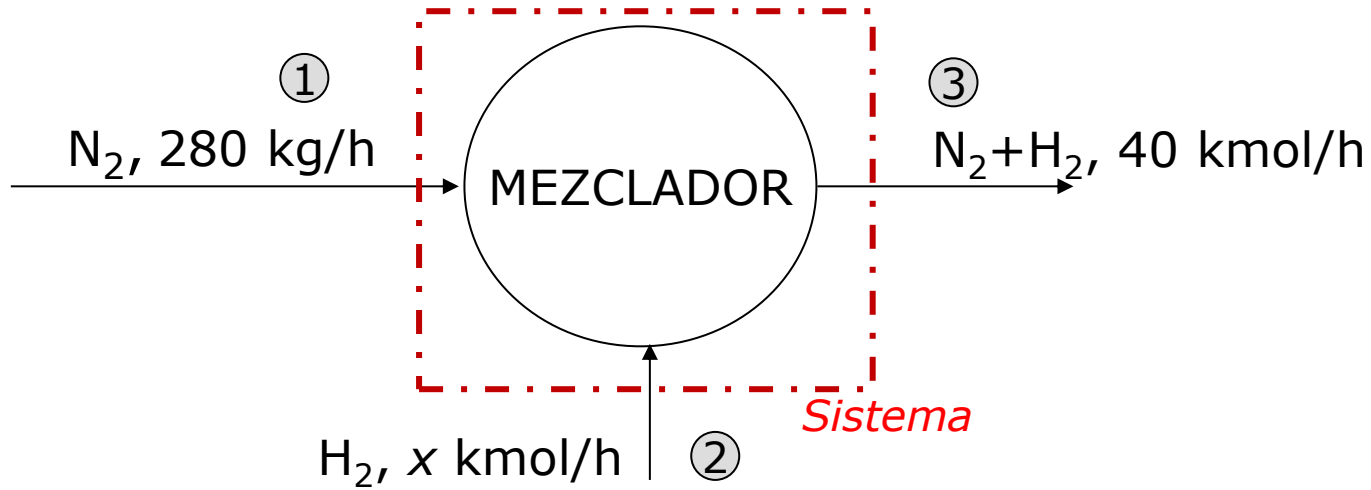
Para hallar  $x$  haremos balance de materia diferencial (velocidades de flujo) en el sistema: mezclador.

Escogemos base de cálculo (¿balance de masa? moles? partículas?...)

En este caso, como nos piden  $x$  expresado en  $\text{kmol/h}$ , escogeremos "moles".

# Realizando el Balance de masa

Transformamos las unidades de masa a moles



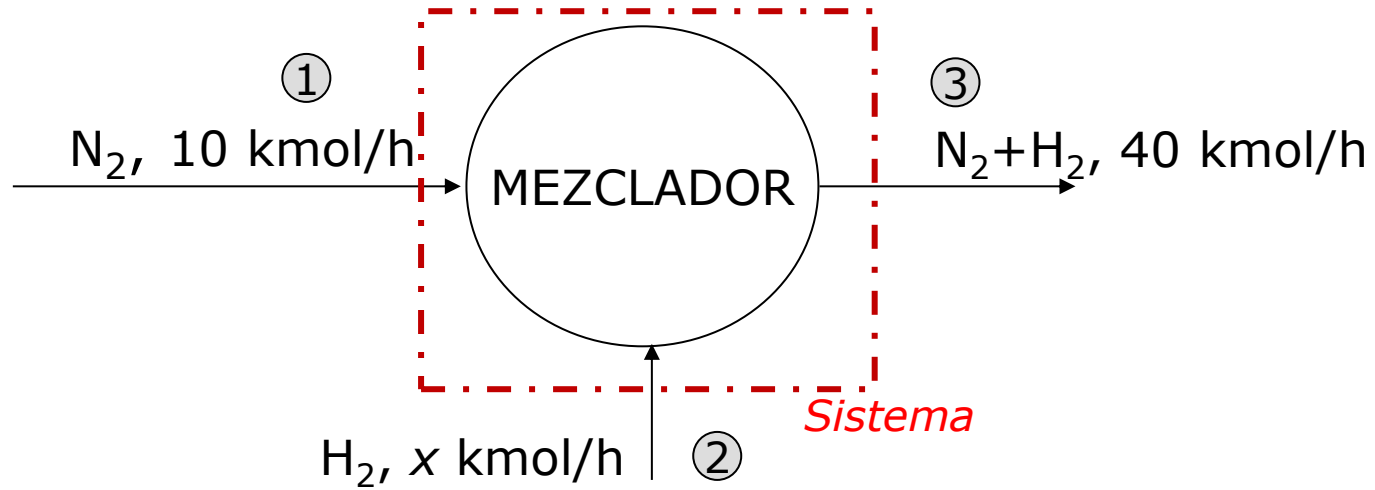
cantidad de moles = (cantidad de gramos)/PM

$$280 \text{ kg de } \text{N}_2 = 280.000 / 28 = 10.000 \text{ mol}$$

PM del nitrógeno

# Realizando el Balance de masa

Transformamos las unidades de masa a moles



Tipo de régimen: ¿Variable o Estacionario? → ESTACIONARIO

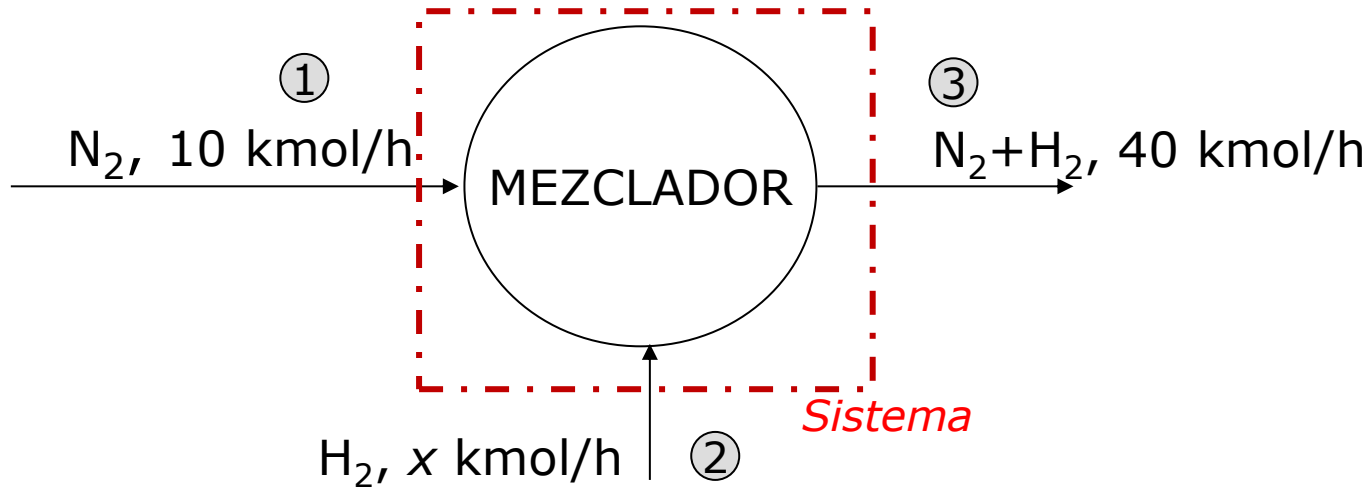
¿Propiedad Invariante?

# Recordemos los casos "invariante"

	PARA BALANCE GLOBAL		PARA BALANCE DE UNA SUSTANCIA		BALANCE DE UNA ESPECIE ATOMICA
	masa total	moles de todas las sustancias	masa de cada sustancia	moles de cada sustancia	masa o moles de cada átomo
sin reacciones químicas ni nucleares	invariante	invariante	invariante	invariante	invariante
con reacciones químicas	invariante	puede variar	puede variar	puede variar	invariante
con reacciones nucleares	puede variar	puede variar	puede variar	puede variar	puede variar

# Realizando el Balance de masa

Transformamos las unidades de masa a moles



Tipo de régimen: ¿Transitorio o Estacionario? → ESTACIONARIO

¿Propiedad Invariante? → SÍ, INVARIANTE

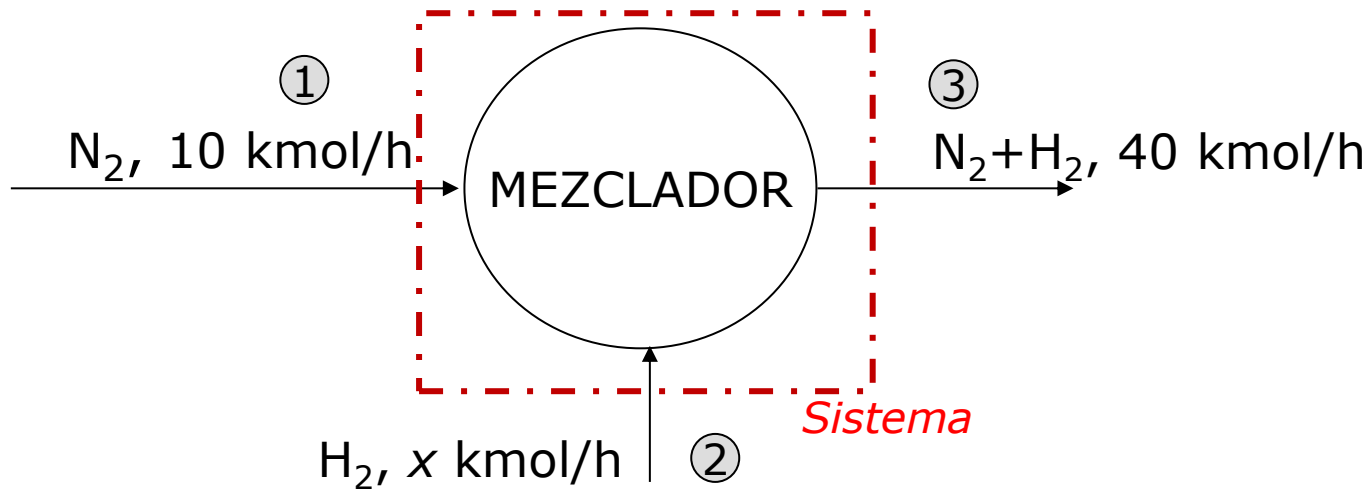
→ no hay generación ni consumo dentro del sistema.

La ecuación de balance queda reducida a:

$$W_{\text{salida}} = W_{\text{entrada}}$$



# Realizando el Balance de materia



Balance global

$$W_3 = W_1 + W_2$$

$$40 = 10 + x$$

La ecuación de balance queda reducida a:  $W_{\text{salida}} = W_{\text{entrada}}$

$$x = 30 \text{ kmol/h de H}_2$$

# EJEMPLO

## *(Balance de una especie)*

Como etapa previa a la depuración de cierta corriente de gas residual, con un 10% de  $\text{H}_2\text{S}$ , se rebaja su contenido en este gas tóxico hasta el 0.1%.

Para realizar la operación se ha decidido emplear una columna de absorción, utilizándose agua como disolvente.

¿Cuál será la cantidad de  $\text{H}_2\text{S}$  absorbida cada segundo por el agua, si el caudal de gas es de  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ , medido en condiciones normales? (1 atm,  $0^\circ\text{C}$ )

Considere estado estacionario.



## Para facilitar el análisis...

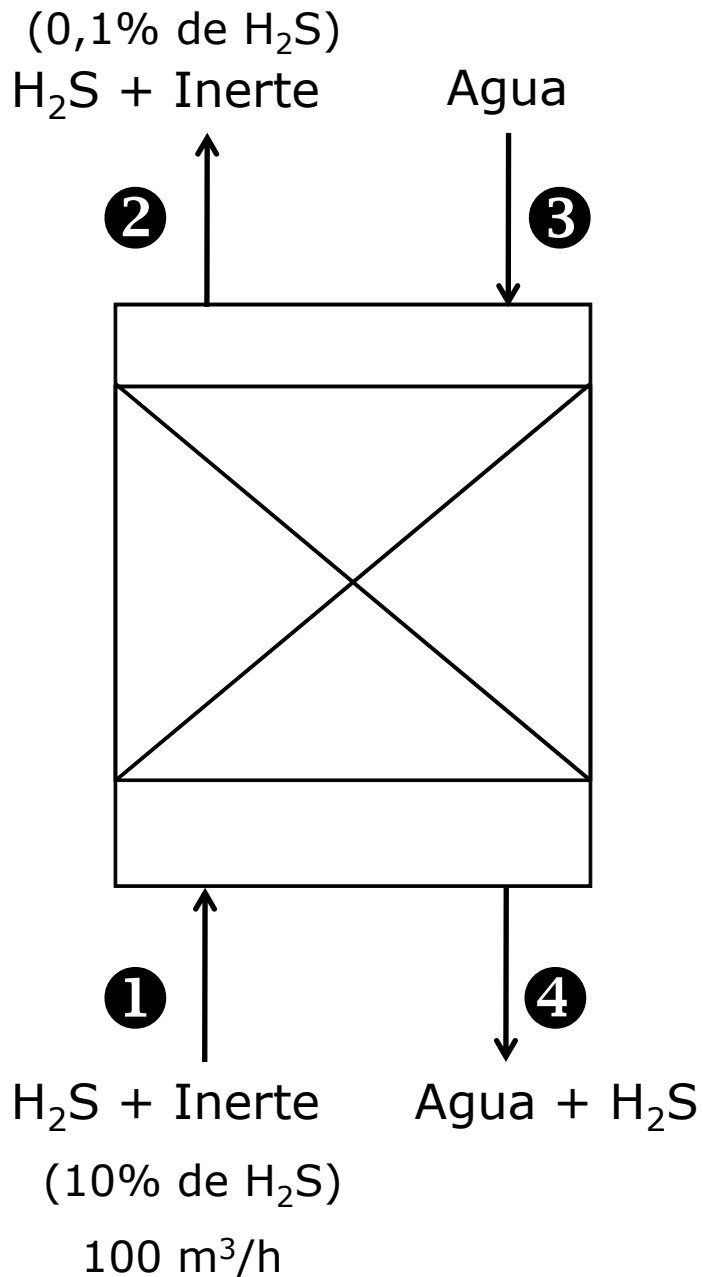
Dibujamos el diagrama de bloques (que obviamente, debe incluir todas las corrientes de materiales que participan)

Para facilidad de identificación, numeramos las corrientes...

incorporamos los datos de composición de los que disponemos

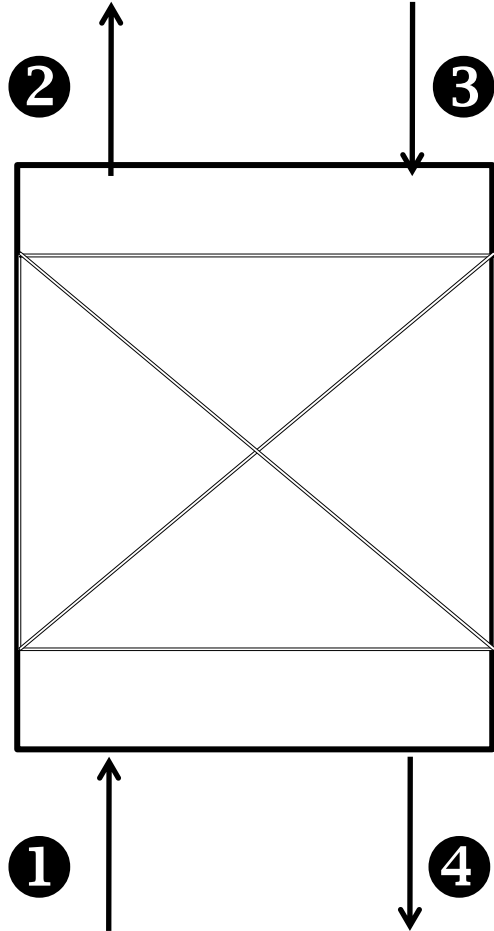
... e identificamos la incognita (lo que queremos averiguar):

“la cantidad de  $\text{H}_2\text{S}$  absorbida cada segundo por el agua”



(0,1% de H<sub>2</sub>S)  
H<sub>2</sub>S + Inerte

Agua



H<sub>2</sub>S + Inerte  
(10% de H<sub>2</sub>S)  
100 m<sup>3</sup>/h

Agua + H<sub>2</sub>S

"la cantidad de H<sub>2</sub>S absorbida  
cada segundo por el agua"

*"Como el sistema está en  
estado estacionario y no hay  
reacción química, todo el H<sub>2</sub>S  
que es absorbido por el agua  
tiene que irse con ésta, por lo  
que la velocidad a la que se  
absorbe es igual a la velocidad  
a la que sale por 4"*

"la cantidad de H<sub>2</sub>S absorbida  
cada segundo por el agua" =  $\omega_{4,H_2S}$

“la cantidad de  $H_2S$  absorbida cada segundo por el agua”

Haremos balance de  $H_2S$

y escogemos como sistema a estudiar:

**la fase líquida (L)**

Balance de  $H_2S$  en la fase L

$H_2S$  que ingresa junto con el agua

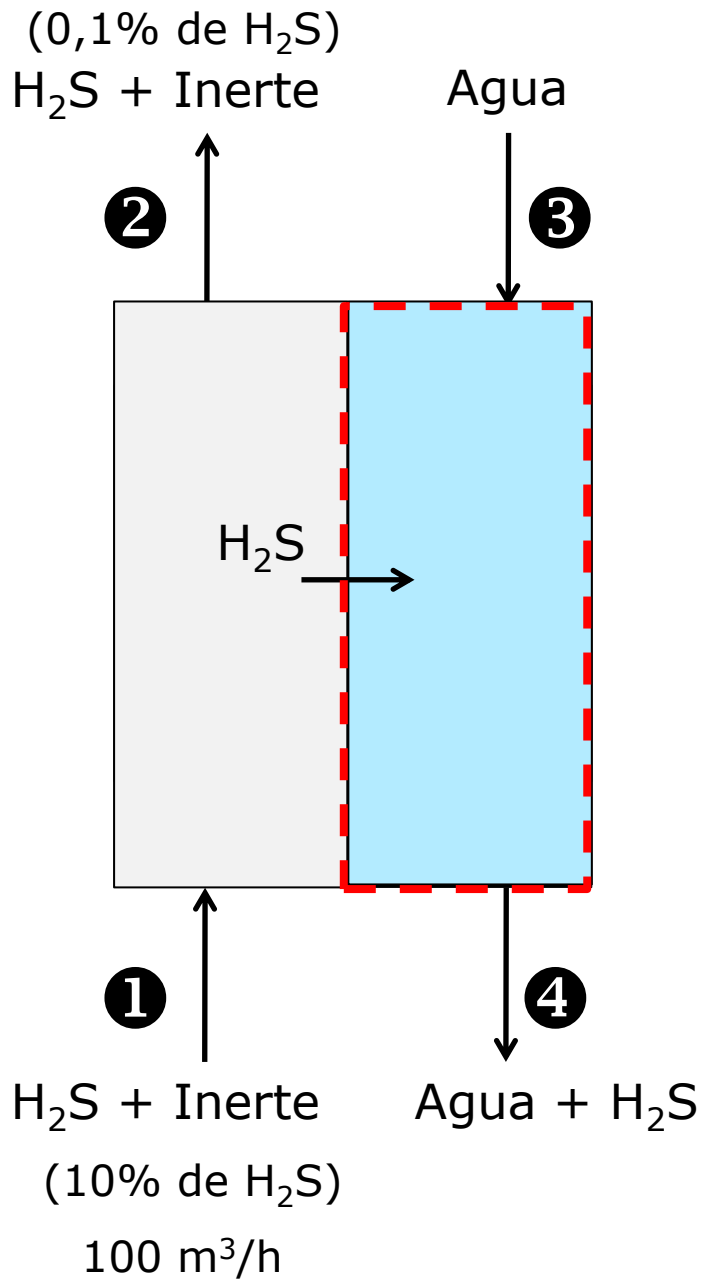
+  $H_2S$  que se absorbe

+  $H_2S$  que se genera en la fase L

=  $H_2S$  que se acumula en la fase L

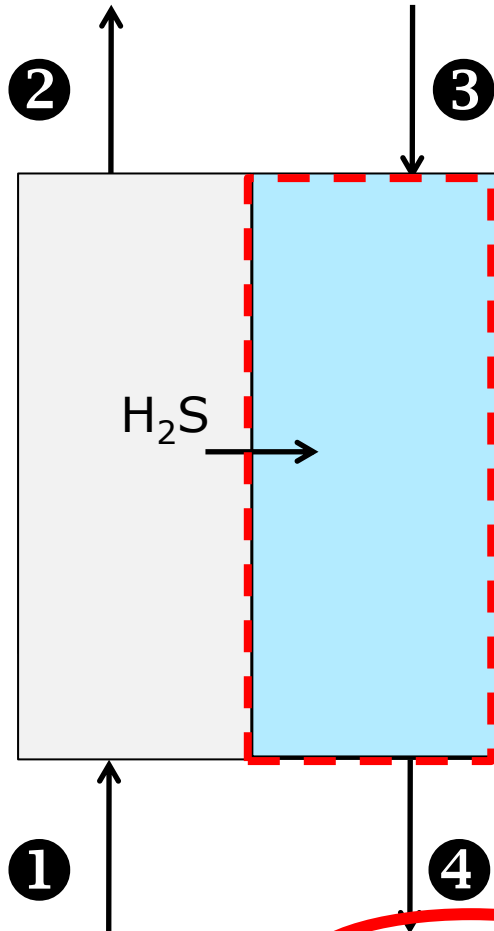
+  $H_2S$  que se destruye en la fase L

+  $H_2S$  que sale junto con el agua



(0,1% de H<sub>2</sub>S)  
H<sub>2</sub>S + Inerte

Agua



H<sub>2</sub>S + Inerte  
(10% de H<sub>2</sub>S)  
100 m<sup>3</sup>/h

Agua + H<sub>2</sub>S

“la cantidad de H<sub>2</sub>S absorbida  
cada segundo por el agua”

Haremos balance de H<sub>2</sub>S

y escogemos como sistema a estudiar:

**la fase líquida (L)**

Balance de H<sub>2</sub>S en la fase L

$$\begin{aligned} & \text{--- H}_2\text{S que ingresa junto con el agua ---} & 0 \\ & + \text{H}_2\text{S que se absorbe} & \text{(incognita)} \\ & + \text{H}_2\text{S que se genera en la fase L} & 0 \\ & = \text{H}_2\text{S que se acumula en la fase L} & 0 \\ & + \text{H}_2\text{S que se destruye en la fase L} & 0 \\ & + \text{H}_2\text{S que sale junto con el agua} & \omega_{4,\text{H}_2\text{S}} \end{aligned}$$

Igualando los términos no nulos:

“la cantidad de H<sub>2</sub>S absorbida  
cada segundo por el agua” =  $\omega_{4,\text{H}_2\text{S}}$

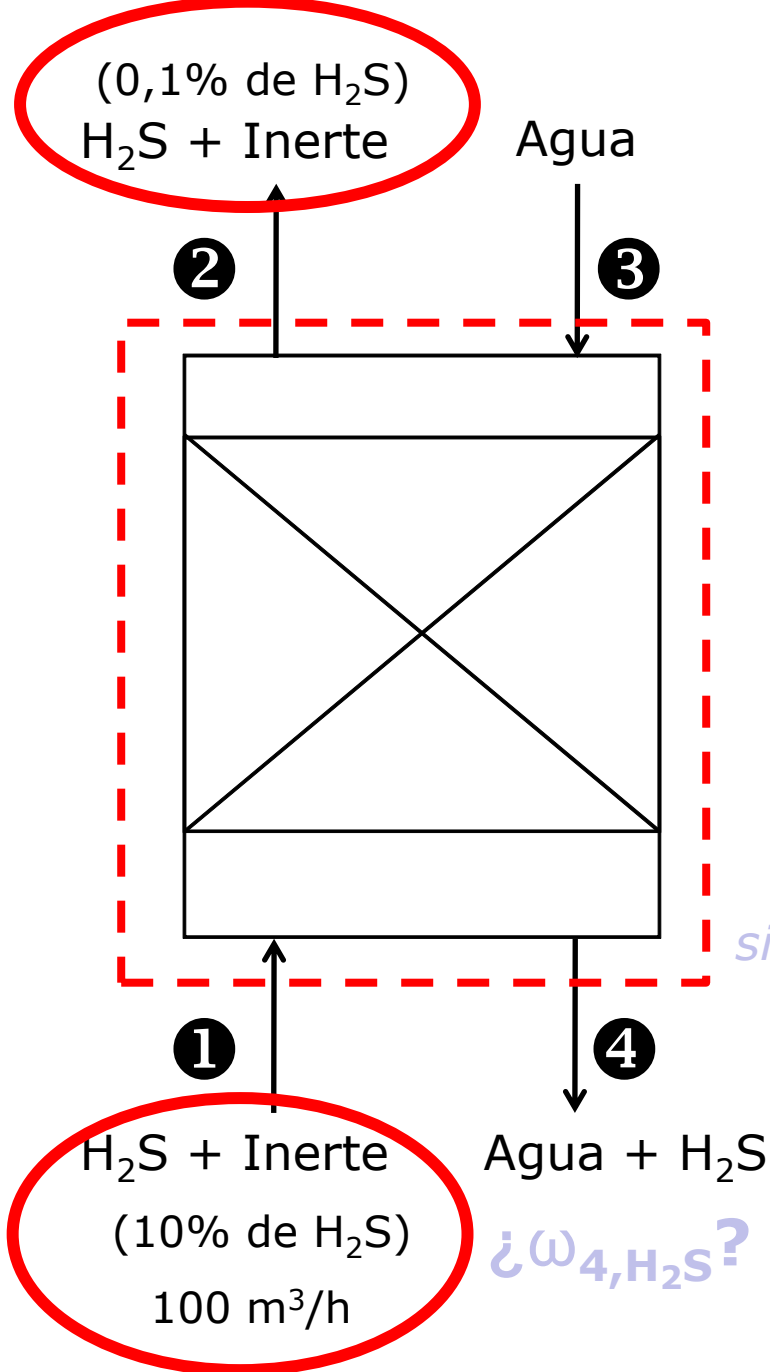
“la cantidad de  $H_2S$  absorbida cada segundo por el agua” es la que se va con el agua en la corriente ④.

Para determinar  $\omega_{4,H_2S}$  con los datos disponibles debemos usar datos de las corrientes ① y ②

Haremos **balance de  $H_2S$**  pero esta vez escogemos como sistema a estudiar toda la columna de absorción

*Frontera del sistema a estudiar*

Elegimos como unidad: moles/h



(0,1% de H<sub>2</sub>S)  
H<sub>2</sub>S + Inerte

Agua

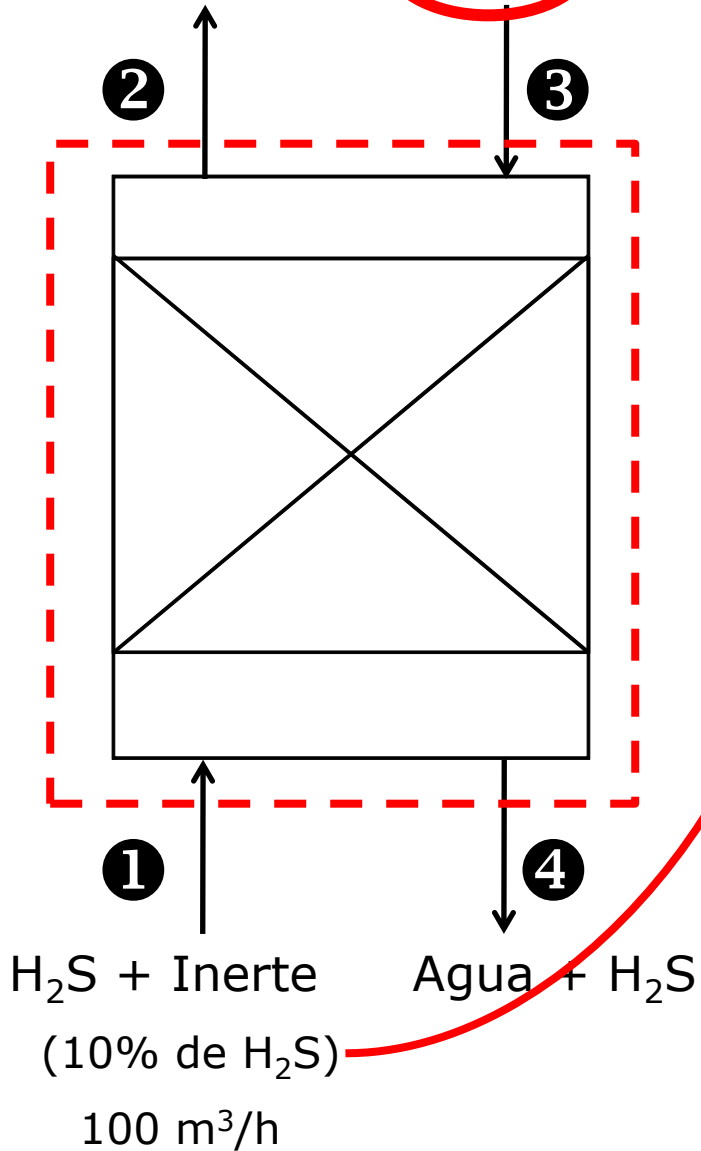
$$\omega_{1,H_2S} + \omega_{3,H_2S} = \omega_{2,H_2S} + \omega_{4,H_2S}$$

pero  $\omega_{3,H_2S} = 0$

$$\omega_{4,H_2S} = \omega_{1,H_2S} - \omega_{2,H_2S} \quad (1)$$

Cálculo de  $\omega_{1,H_2S}$

$$\omega_{1,H_2S} = 0,1 \omega_1 \quad (2)$$

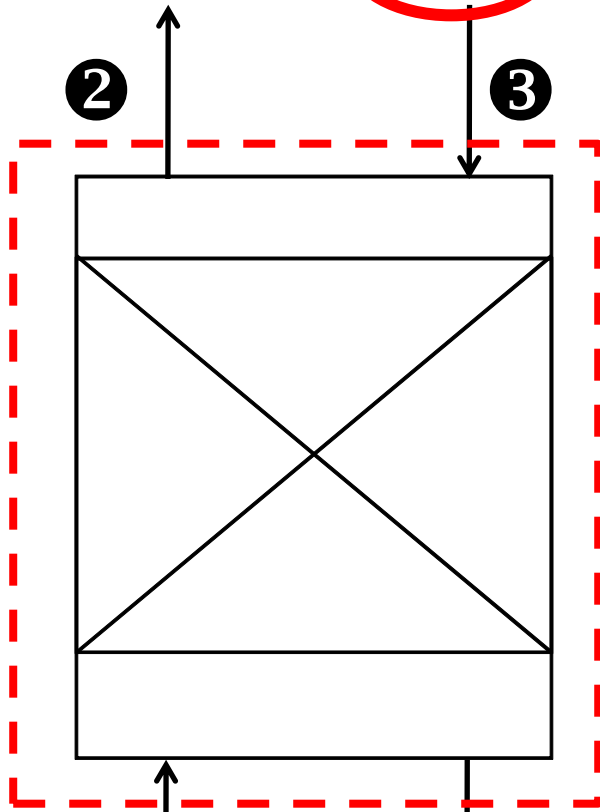


en mezclas de gases  
ideales, las  
proporciones  
volumétricas son las  
proporciones  
molares)



(0,1% de H<sub>2</sub>S)  
H<sub>2</sub>S + Inerte

Agua



$$\omega_{1,H_2S} + \omega_{3,H_2S} = \omega_{2,H_2S} + \omega_{4,H_2S}$$

pero  $\omega_{3,H_2S} = 0$

$$\omega_{4,H_2S} = \omega_{1,H_2S} - \omega_{2,H_2S} \quad (1)$$

Cálculo de  $\omega_{1,H_2S}$

$$\omega_{1,H_2S} = 0,1 \omega_1 \quad (2)$$

Pero, y...  $\omega_1$  ?

(Sabemos por DATO:  $\omega_1 = 100 \text{ m}^3/\text{h}$  )  
(a 1 atm, 0°C)

¿Cuántos litros son 100 m<sup>3</sup>?

$$\frac{100000 \text{ l/h}}{22,4 \text{ l/mol}} = 4464 \text{ mol/h}$$

De (2),  $\omega_{1,H_2S} = 446,4 \text{ mol/h}$

H<sub>2</sub>S + Inerte

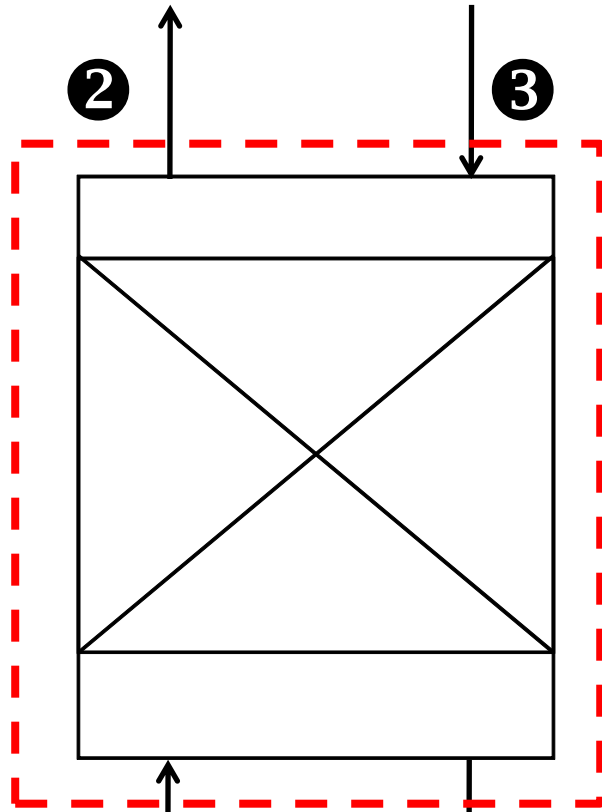
Agua + H<sub>2</sub>S

(10% de H<sub>2</sub>S)

100 m<sup>3</sup>/h

(0,1% de H<sub>2</sub>S)  
H<sub>2</sub>S + Inerte

Agua



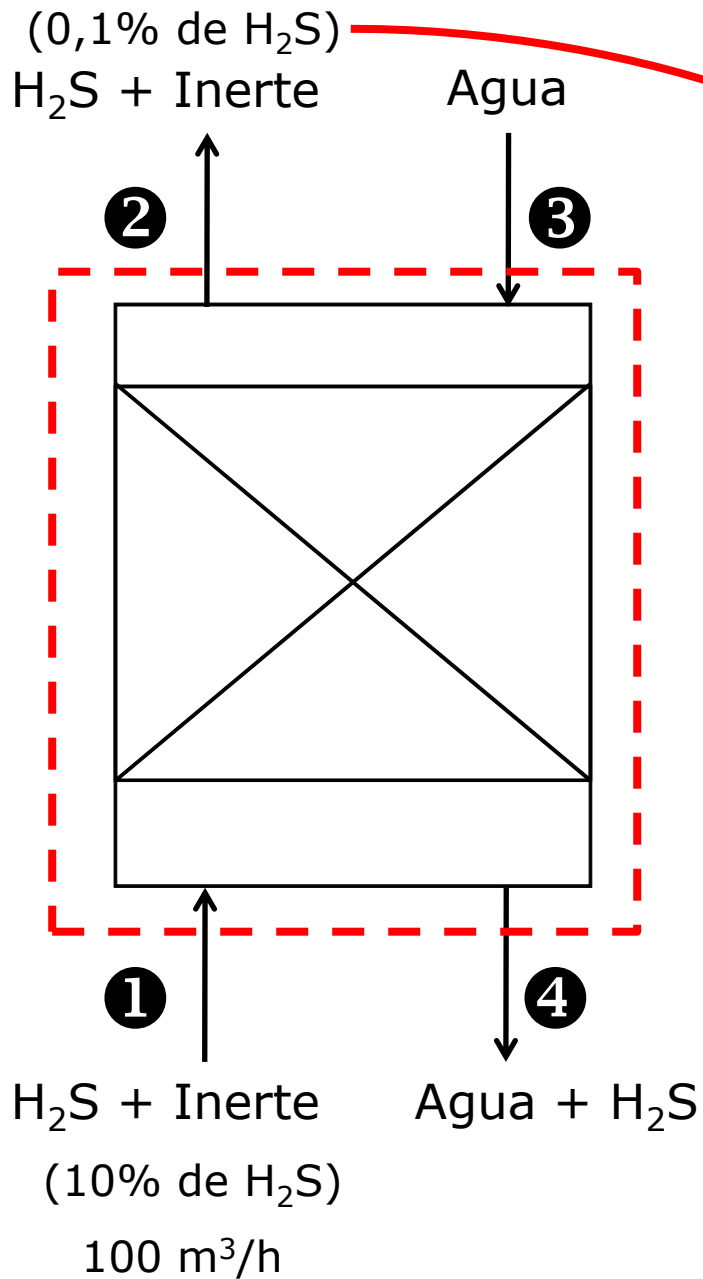
H<sub>2</sub>S + Inerte  
(10% de H<sub>2</sub>S)  
100 m<sup>3</sup>/h

Agua + H<sub>2</sub>S

$$\omega_{1,H_2S} + \omega_{3,H_2S} = \omega_{2,H_2S} + \omega_{4,H_2S}$$

pero  $\omega_{3,H_2S} = 0$

$$\omega_{4,H_2S} = 446,4 \text{ mol/h} - \omega_{2,H_2S} \quad (1)$$



$$\omega_{4,H_2S} = 446,4 \text{ mol/h} - \omega_{2,H_2S} \quad (1)$$

Cálculo de  $\omega_{2,H_2S}$

$$\omega_{2,H_2S} = 0,001 \omega_2 \quad (3) \quad \dots \text{ pero } \omega_2 \text{ no es dato.}$$

Sin embargo...  $\omega_2 = \omega_{2,\text{inerte}} + \omega_{2,H_2S} \quad (4)$

De (3) y (4),  $\omega_{2,H_2S} = (1/999)^* \omega_{2,\text{inerte}} \quad (5)$

Del BM de inerte  $\omega_{2,\text{inerte}} = \omega_{1,\text{inerte}} \quad (6)$

Pero  $\omega_{1,\text{inerte}} = \omega_1 - \omega_{1,H_2S} = 4464 - 446$   
 $= 4018 \text{ mol/h}$

De (5) y (6),  $\omega_{2,H_2S} = \mathbf{4,0 \text{ mol/h}}$

De (1)

$$\omega_{4,H_2S} = \mathbf{446,4 - 4,0 = 442,4 \text{ mol/h}}$$

$$\longrightarrow \mathbf{4,2 \text{ g/s}}$$

$$\div 3600 \text{ s/h, x PM}$$

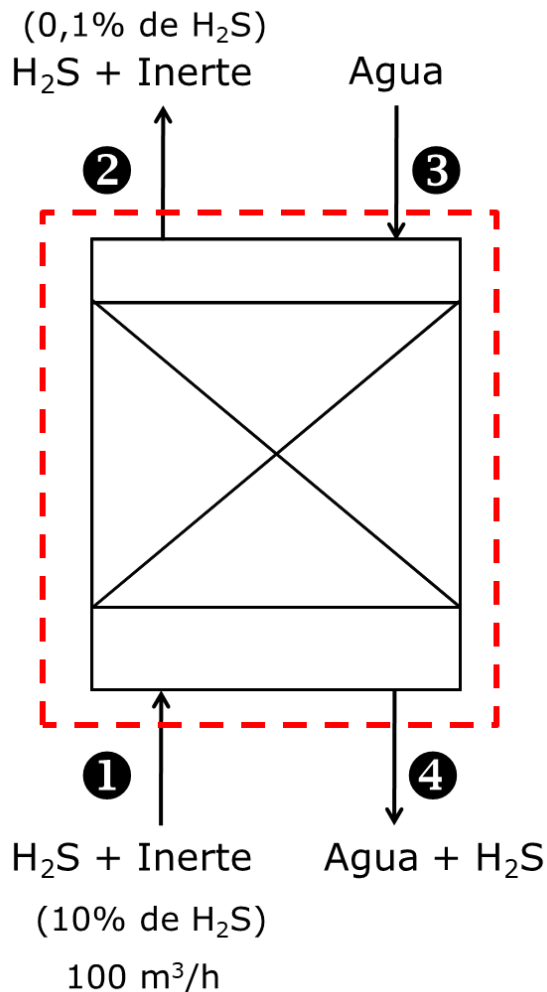
## *(Algunas reflexiones sobre lo que hicimos)*

---

En este “problema” utilizamos balances de materia junto con otras herramientas (por ej. conducta gas ideal) para calcular una velocidad de disolución (en este caso, de un contaminante que se pretende sacar lavando una corriente de gases que se emite a la atmósfera).

Los BM en sí fueron muy sencillos. La eventual dificultad estuvo en darnos cuenta qué balances hacer para llegar desde el enunciado hasta el resultado deseado.

# (Algunas reflexiones sobre lo que hicimos)



Hicimos 3 balances de materia:

1) de **H<sub>2</sub>S** en **la fase líquida**

(para relacionar lo que se nos pedía con alguna de las corrientes que cruzaban la frontera del equipo)

2) de **H<sub>2</sub>S** en **el sistema completo**

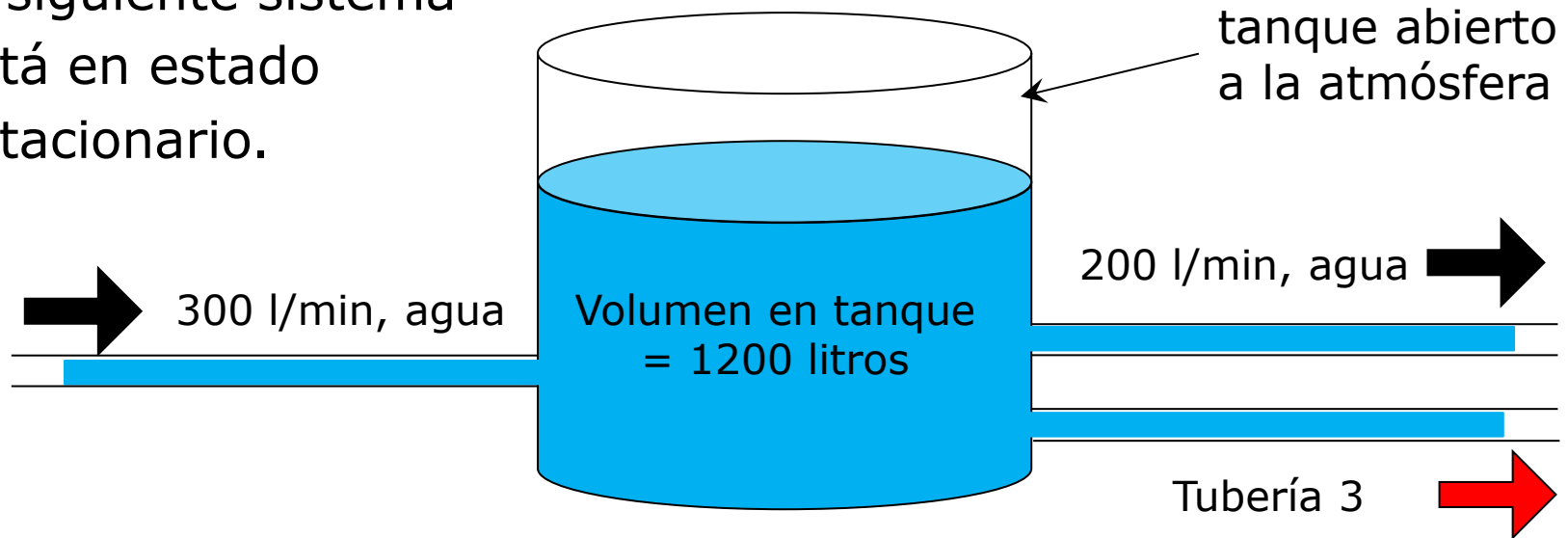
3) de **inerte** en **el sistema completo**

1) y 3) no requirieron hacer ninguna cuenta... sólo sirvieron para relacionar corrientes (de alguna manera, nos parecieron obvios, muy intuitivos)

# EJEMPLO

## ¿Un problema de Fluidodinámica?

El siguiente sistema está en estado estacionario.



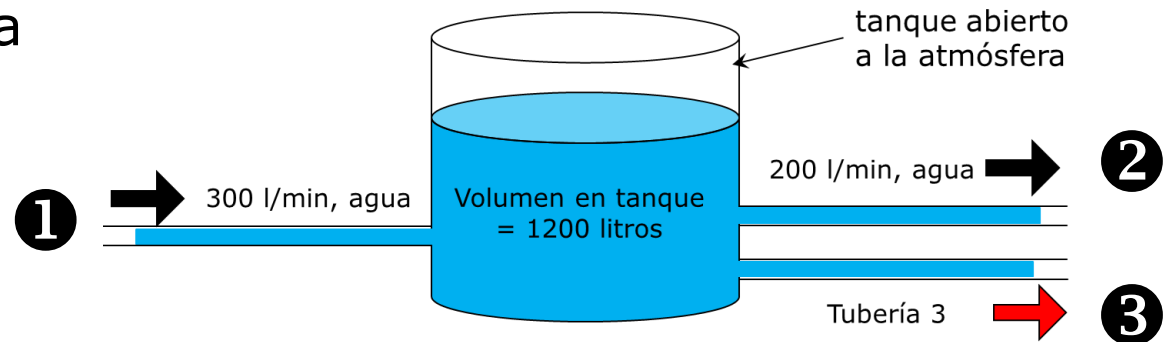
El tanque es cilíndrico, tiene un diámetro (interior) de 1,20 m y una altura total de 2 m. Las tuberías son cilíndricas y tienen un diámetro (interior) de 4,0 cm. El agua está a 20°C y 1 bar (en todo el sistema).

***¿cuál es el caudal por la tubería 3?***

# EJEMPLO

## ¿Un problema de Fluidodinámica?

El siguiente sistema está en estado estacionario.



(Sin acumulación, generación ni consumo)

$$\omega_1 = \omega_2 + \omega_3 \quad \Rightarrow \quad \omega_3 = \omega_1 - \omega_2$$

Dado que el agua está a la misma P y T en todo el sistema, las densidades ( $\rho$ ) de todas las corrientes son idénticas, por lo tanto

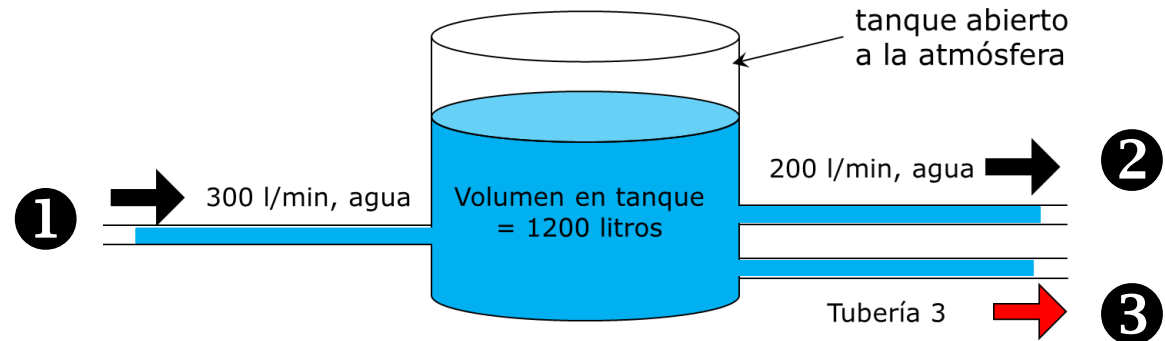
$$\omega_3/\rho = \omega_1/\rho - \omega_2/\rho$$

$$q_3 = q_1 - q_2 \quad (\text{donde } q = \omega/\rho = \text{caudal volumétrico})$$

$$q_3 = 100 \text{ l/min}$$

# EJEMPLO

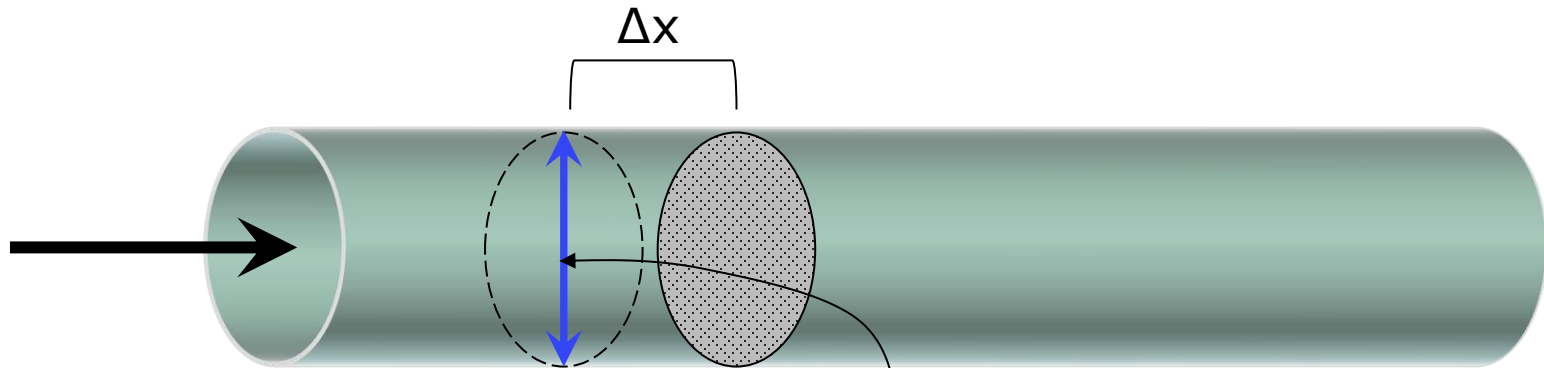
¿Un problema de Fluidodinámica?



$$q_3 = 100 \text{ l/min}$$

***... y ¿a qué velocidad circula el agua por la tubería 3?***





$u$  = velocidad  
(media)

$D$  = diámetro interior

Caudal =  $q = (\text{volumen desplazado}) / \Delta t$

$V$  (volumen desplazado) =  $A \Delta x$

$A = \text{sección para el flujo} = \pi D^2/4$

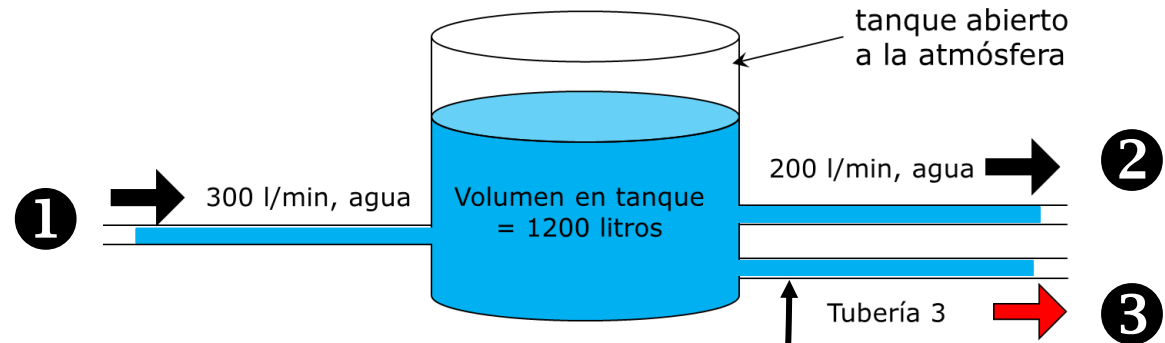
$q = (A \Delta x) / \Delta t = A (\Delta x / \Delta t) = u A$

$\rightarrow u = q / A = q 4 / (\pi D^2)$

Flujo másico =  $\omega = q \rho = u \rho A$

# EJEMPLO

¿Un problema de Fluidodinámica?



$$q_3 = 100 \text{ l/min}$$

**... y ¿a qué velocidad circula el agua por la tubería 3?**

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Sección de la tubería}} = \frac{100\,000 \text{ cm}^3/\text{min}}{(4 \cdot 4 \cdot \pi / 4 \text{ cm}^2)}$$

$$= 7900 \text{ cm/min} \quad < > \quad 1,3 \text{ m/s}$$

# Caso: régimen estacionario, con reacciones químicas

---

## Conceptos (básicos) que manejaremos:

Reactivos en proporciones estequiométricas: la relación entre los moles presentes de los reactivos es igual a la relación entre los coeficientes estequiométricos respectivos.

Si la cantidad de reactivos es distinta a la relación estequiométrica:

- el reactivo presente en menor proporción que la estequiométrica es el reactivo limitante
- se dice que los demás reactivos están en exceso.

Grado de conversión de un reactivo: la relación entre los moles de reactivo consumidos en la reacción y los moles suministrados de ese reactivo inicialmente.

Grado de conversión o de avance de la reacción es el grado de conversión del reactivo limitante y lo representaremos con  $R$

# Conceptos básicos

---

**Conversión:** Relación entre moles de reactivo consumidos en la reacción y moles de reactivo suministrados inicialmente.

$$X_i = \frac{\text{moles de } i \text{ consumidos}}{\text{moles de } i \text{ suministrados}}$$

Generalmente se refiere al reactivo limitante, en ese caso denotaremos el grado de conversión con R

# EJEMPLO

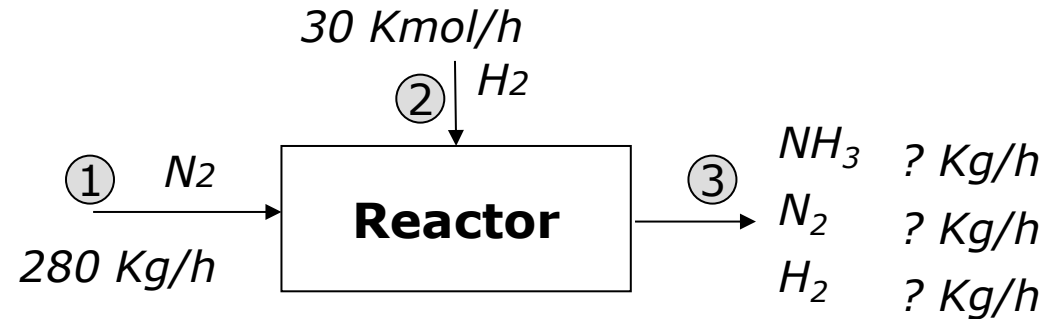
## Sistema con reacción química

---

En un reactor de producción de amoníaco se introducen corrientes gaseosas de  $N_2$  (280 Kg/h) e  $H_2$  (30 Kmol/h). La reacción procede hasta la conversión de un 25% de  $N_2$ . Calcular los flujos másicos de salida.

# Resolución

Diagrama de bloques



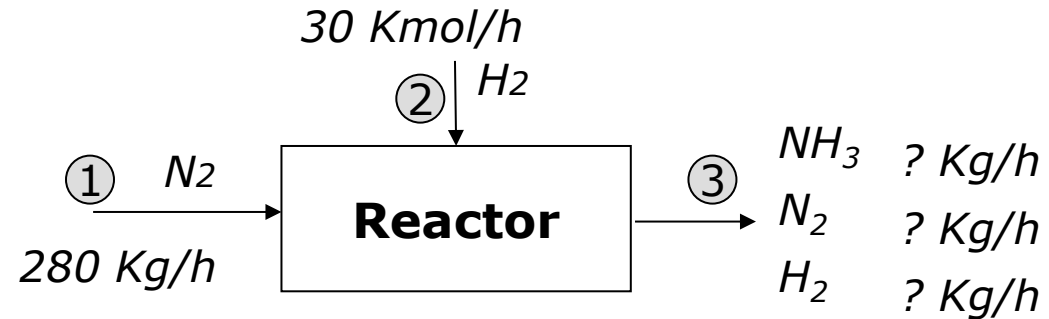
Numeramos las corrientes y ponemos los datos y las incógnitas

Estequiometría de la reacción:  $N_2 + 3 H_2 \longrightarrow 2 NH_3$

En un reactor de producción de amoníaco se introducen corrientes gaseosas de  $N_2$  ( $280 \text{ Kg/h}$ ) e  $H_2$  ( $30 \text{ Kmol/h}$ ). La reacción procede hasta la conversión de un 25% de  $N_2$ . Calcular los flujos másicos de salida.

# Resolución

Diagrama de bloques



Numeramos las corrientes y ponemos los datos y las incógnitas

Estequiometría de la reacción:  $N_2 + 3 H_2 \longrightarrow 2 NH_3$

Sistema a estudiar: Reactor

Tipo de régimen: ¿Variable o Estacionario? → ESTACIONARIO

→ "En los balances el término de acumulación es 0"

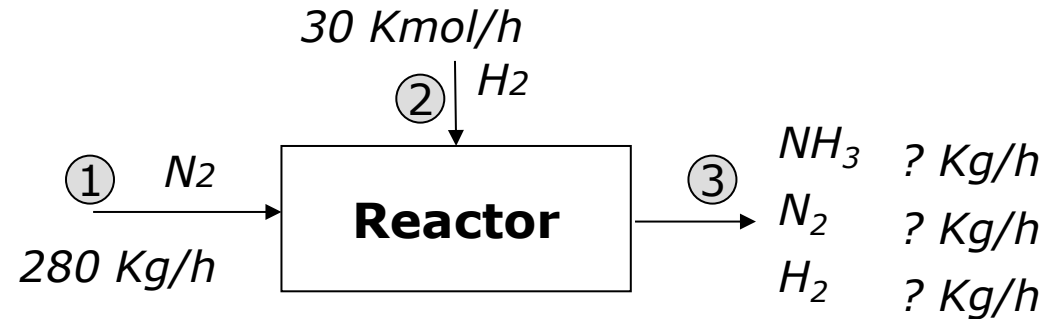
Base de cálculo a usar

¿Estudiamos cambios entre un  $\Delta t$  o velocidad de cambio?

¿Usamos unidades de masa o de cantidad de moléculas?

# Resolución

Diagrama de bloques



Numeramos las corrientes y ponemos los datos y las incógnitas

Estequiometría de la reacción:  $N_2 + 3 H_2 \longrightarrow 2 NH_3$

Sistema a estudiar: Reactor

Tipo de régimen: ¿Variable o Estacionario? → ESTACIONARIO

→ "En los balances el término de acumulación es 0"

Base de cálculo a usar

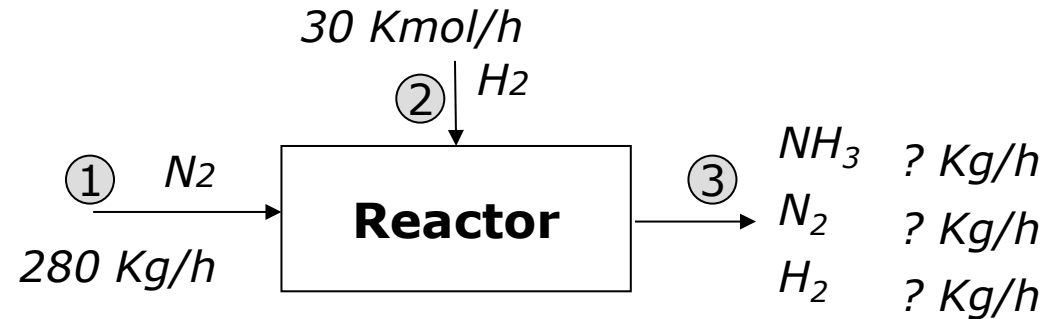
¿Estudiamos cambios entre un  $\Delta t$  o velocidad de cambio?

→ *Velocidades de cambio*



# Resolución

Diagrama de bloques



Numeramos las corrientes y ponemos los datos y las incógnitas

Estequiometría de la reacción:  $N_2 + 3 H_2 \longrightarrow 2 NH_3$

Sistema a estudiar: Reactor

Tipo de régimen: ¿Variable o Estacionario? → ESTACIONARIO

→ "En los balances el término de acumulación es 0"

Base de cálculo a usar

¿Estudiamos cambios entre un  $\Delta t$  o velocidad de cambio?

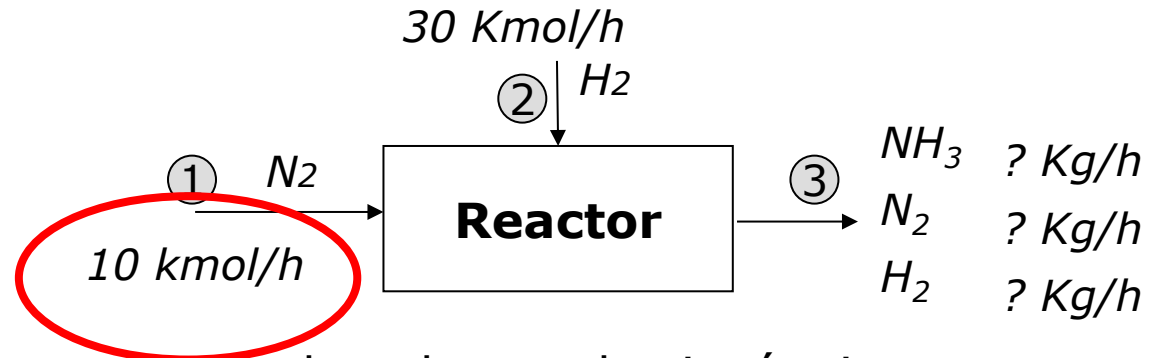
→ *Velocidades de cambio*

¿Usamos unidades de masa o de cantidad de moléculas?

→ *unidad de cantidad de partículas* → *moles*

# Resolución

Diagrama de bloques



Numeramos las corrientes y ponemos los datos y las incógnitas



Sistema a estudiar: Reactor

Tipo de régimen: ¿Variable o Estacionario? → ESTACIONARIO

→ "En los balances el término de acumulación es 0"

Base de cálculo a usar

Usaremos ecuaciones de velocidades de cambio

Convertimos todos los flujos a moles.

En este caso, debemos convertir los 280 kg de N<sub>2</sub> = 10 kmol

# Resolución

Estequiometría de la reacción:  $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \longrightarrow 2 \text{NH}_3$

¿Reactivo limitante?

→  $\text{N}_2$  y  $\text{H}_2$  están en proporciones estequiométricas (cualquiera de los 2 puede ser tomado como "limitante")

Ecuaciones de balance para las especies intervinientes ( $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ )

$$\omega_{\text{salida}} = \omega_{\text{entrada}} + \text{vel. formación} - \text{vel. consumo}$$

*(por ser en estado estacionario el término de acumulación es 0)*

Balance de  $\text{N}_2$  (unidades → kmol/h)

$$\omega_{\text{salida}} = \omega_{3,\text{N}_2}$$

$$\omega_{\text{entrada}} = 10 \text{ kmol/h}$$

$$\text{vel. formación} = 0$$

$$\text{vel. consumo} = 0,25 \times \omega_{\text{entrada}} \quad (\text{el } \text{N}_2 \text{ se comporta como "limitante"})$$

$$\omega_{3,\text{N}_2} = 10 + 0 - 0,25 \times 10 = 7,5 \text{ kmol/h}$$

# Resolución

Estequiometría de la reacción:  $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \longrightarrow 2 \text{NH}_3$

Ecuaciones de balance para las especies intervinientes ( $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ )

$$\omega_{\text{salida}} = \omega_{\text{entrada}} + \text{vel. formación} - \text{vel. consumo}$$

Balance de  $\text{N}_2$       $\omega_{3,\text{N}_2} = 10 + 0 - 0,25 \times 10 = 7,5 \text{ kmol/h}$

Balance de  $\text{H}_2$       $\omega_{3,\text{H}_2} = 30 + 0 - 3 \times (0,25 \times 10) = 22,5 \text{ kmol/h}$

Balance de  $\text{NH}_3$       $\omega_{3,\text{NH}_3} = 0 + 2 \times (0,25 \times 10) - 0 = 5 \text{ kmol/h}$

Despejando y multiplicando por los PM  
Flujos máxicos de salida:

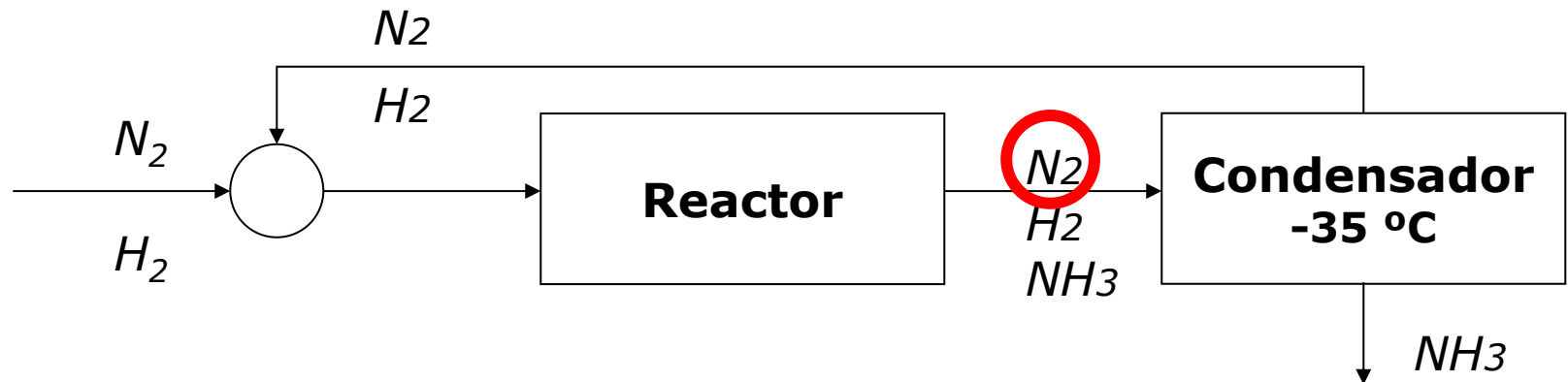
$$\begin{aligned} 7,5 \text{ kmol/h} \times 28 &= 210 \text{ kg/h } \text{N}_2 \\ 22,5 \text{ kmol/h} \times 2 &= 45 \text{ kg/h } \text{H}_2 \\ 5 \text{ kmol/h} \times 17 &= 85 \text{ kg/h } \text{NH}_3 \end{aligned}$$

Factores estequiométricos, aplicados a la conversión del reactivo tomado como limitante

# EJEMPLO

## Sistema con recirculación

El siguiente proceso se alimenta con una corriente de 10 Kmol/h de  $N_2$  y 30 Kmol de  $H_2$ . La conversión en el reactor es del 15% y la recirculación es completa. Considerar estado estacionario. Calcular el flujo molar de Nitrógeno a la salida del reactor.



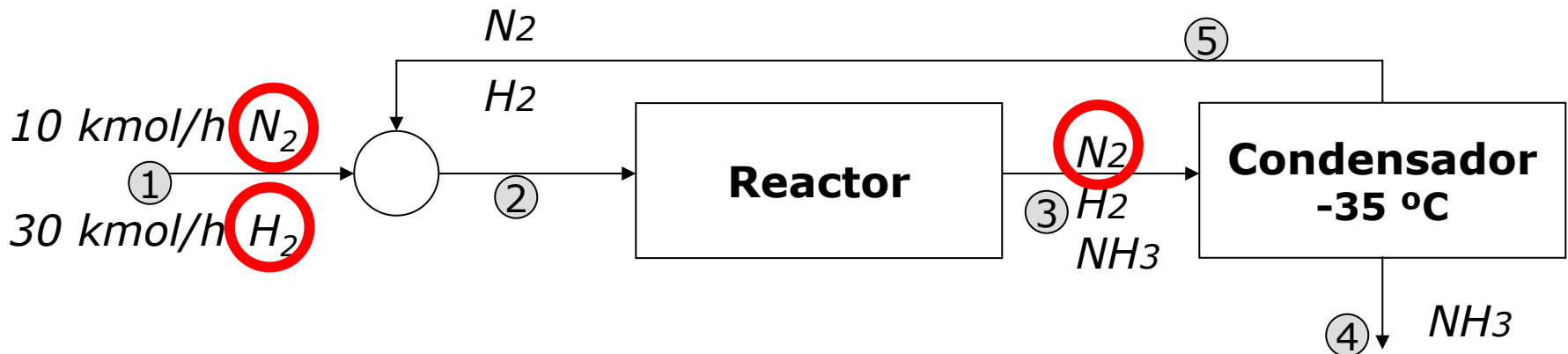
# Resolución

Planteamos el diagrama de bloques

(en este caso, viene dado en el enunciado del problema)

Numeramos las corrientes (para referenciar con más facilidad)

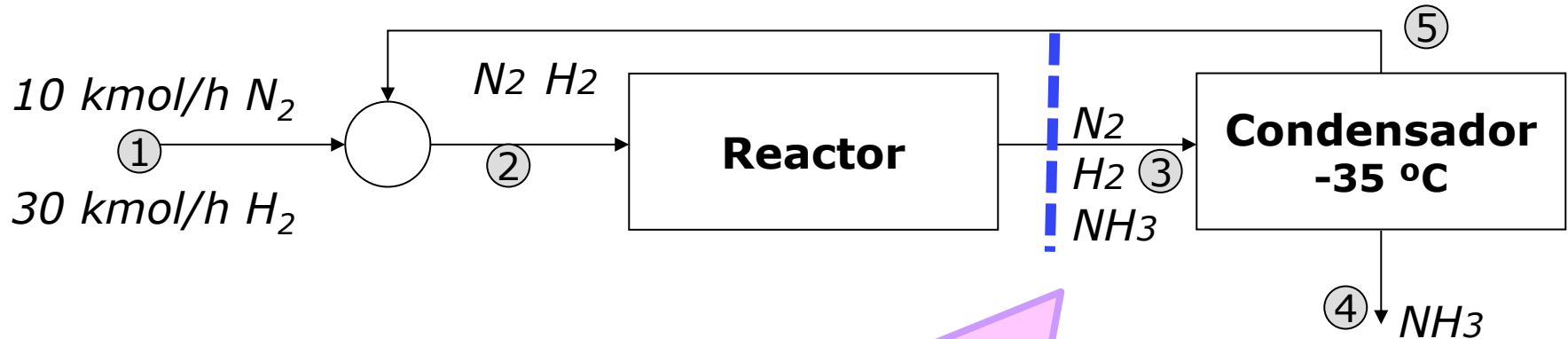
Individualizamos las corrientes con datos y las incógnitas problema



Flujos de entrada, estequiometría de la reacción, reactivo limitante, son iguales al Ejemplo anterior. Elegimos hacer balances diferenciales y usar como unidades: kmol/h

¿Qué tomamos como sistema para efectuar los balances?

# Resolución

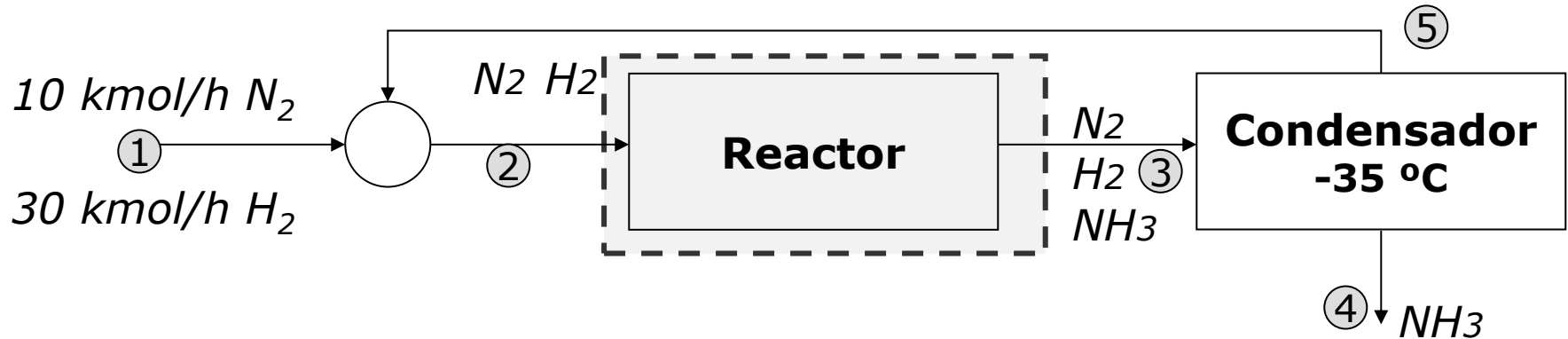


Tal vez convenga que en la elección del sistema, una de sus fronteras sea la salida del reactor.

Así de esa manera, hacemos que  $\omega_{3,N_2}$  aparezca en alguna de las ecuaciones del BM.

Pero... ¿y  $\omega_{3,N_2}$  ?

# Resolución



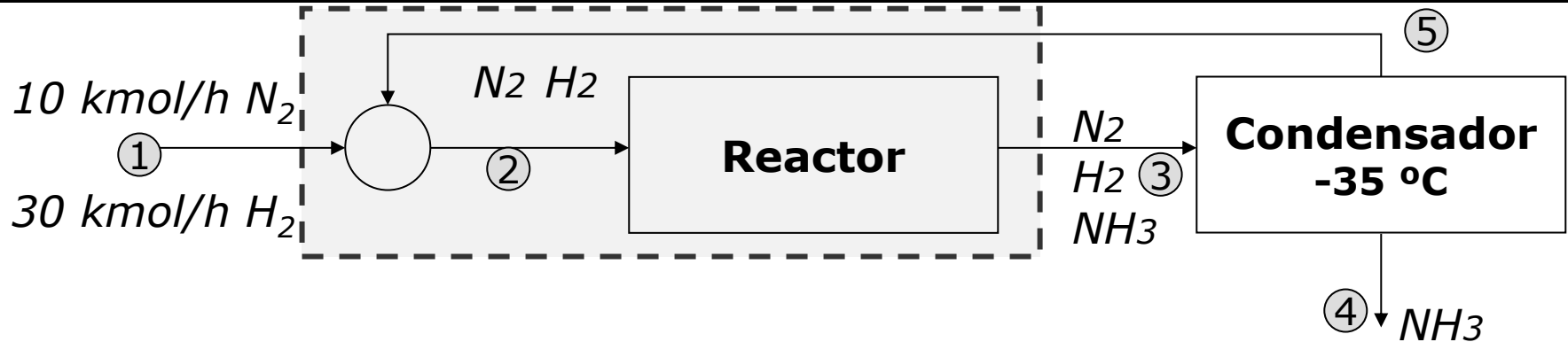
Si elegimos hacer balance en : **Reactor**

Ecuaciones de balance	(Balance de $N_2$ )	$\omega_{3,N_2} = \omega_{2,N_2} - \text{vel cons. } N_2$	M = 6
	(Balance de $H_2$ )	$\omega_{3,H_2} = \omega_{2,H_2} - \text{vel cons. } H_2$	
	(Balance de $NH_3$ )	$\omega_{3,NH_3} = \text{vel form. } NH_3$	
Relaciones de conversión	(estequiometría)	$\text{vel cons. } N_2 = 1/3 \text{ vel cons. } H_2 = 1/2 \text{ vel form. } NH_3$	
	(grado de avance)	$\text{vel cons. } N_2 = 0,15 \omega_{2,N_2}$	
Incógnitas:	$\omega_{2,N_2}$ , $\omega_{2,H_2}$ , $\omega_{3,H_2}$ , $\omega_{3,N_2}$ , $\omega_{3,NH_3}$ , vel cons. $N_2$ , vel cons. $H_2$ , vel form. $NH_3$	N = 8	

M < N    sistema no definido    →    faltan datos



# Resolución



Si elegimos hacer balance en : Mezclador y Reactor

Ecuaciones balance	{	(Balance de N <sub>2</sub> )	$\omega_{3,N_2} = 10 + \omega_{5,N_2} - \text{vel cons } N_2$	M = 8
		(Balance de H <sub>2</sub> )	$\omega_{3,H_2} = 30 + \omega_{5,H_2} - \text{vel cons } H_2$	
		(Balance de NH <sub>3</sub> )	$\omega_{3,NH_3} = 0 + 0 + \text{vel form } NH_3$	

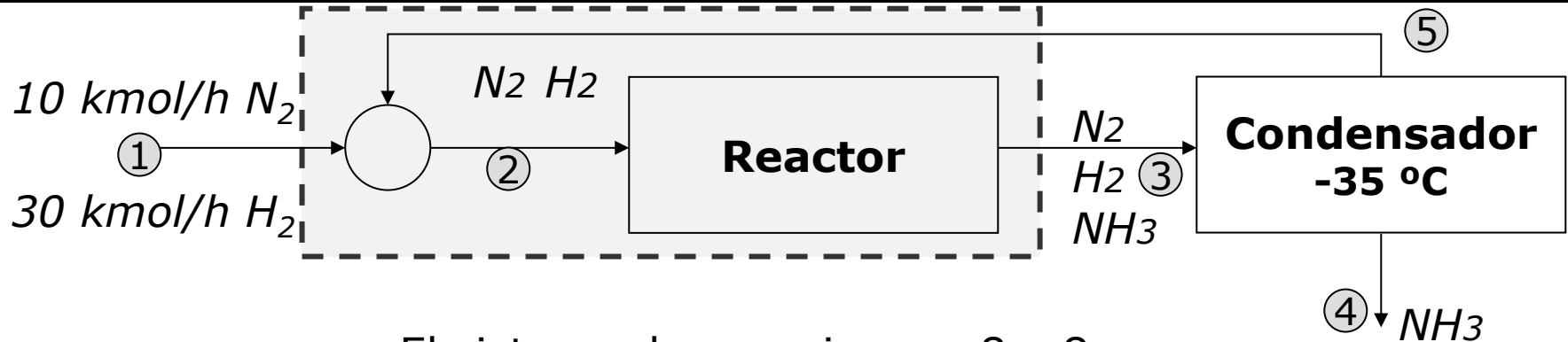
Ecuaciones por recirculación  $\omega_{3,N_2} = \omega_{5,N_2}$        $\omega_{3,H_2} = \omega_{5,H_2}$

Relaciones de conversión	{	(estequiometría)	$\text{vel cons. } N_2 = 1/3 \text{ vel cons. } H_2 = 1/2 \text{ vel form. } NH_3$
		(grado de avance)	$\text{vel cons. } N_2 = 0,15 \omega_{2,N_2}$

Incógnitas:  $\omega_{5,N_2}, \omega_{5,H_2}, \omega_{3,H_2}, \omega_{3,N_2}, \omega_{3,NH_3},$  N = 8  
 $\text{vel cons. } N_2, \text{ vel cons. } H_2, \text{ vel form. } NH_3$

M = N      sistema definido      → **solución única** ✓

# Resolución



El sistema de ecuaciones 8 x 8:

(Balance de  $N_2$ )       $\omega_{3,N_2} = 10 + \omega_{5,N_2} - \text{vel cons } N_2$       (1)

(Balance de  $H_2$ )       $\omega_{3,H_2} = 30 + \omega_{5,H_2} - \text{vel cons } H_2$       (2)

(Balance de  $NH_3$ )       $\omega_{3,NH_3} = 0 + 0 + \text{vel form } NH_3$       (3)

Relaciones de conversión       $\text{vel formación } NH_3 = 2 \times \text{vel consumo } N_2$       (4)

Relaciones de conversión       $\text{vel formación } NH_3 = 2/3 \times \text{vel consumo } H_2$       (5)

Relaciones de conversión       $\text{vel consumo } N_2 = 0,15 \times (10 + \omega_{5,N_2})$       (6)

Ecuaciones por recirculación       $\omega_{3,N_2} = \omega_{5,N_2}$       (7)

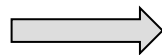
Ecuaciones por recirculación       $\omega_{3,H_2} = \omega_{5,H_2}$       (8)

# Resolución

## Operando...

(Balance de N <sub>2</sub> )	$\omega_{3,N_2} = 10 + \omega_{5,N_2} - \text{vel cons N}_2$	(1)
(Balance de H <sub>2</sub> )	$\omega_{3,H_2} = 30 + \omega_{5,H_2} - \text{vel cons H}_2$	(2)
(Balance de NH <sub>3</sub> )	$\omega_{3,NH_3} = 0 + 0 + \text{vel form NH}_3$	(3)
Ecuaciones por conversión	vel formación NH <sub>3</sub> = 2 x vel consumo N <sub>2</sub>	(4)
	vel formación NH <sub>3</sub> = 2/3 x vel consumo H <sub>2</sub>	(5)
	vel consumo N <sub>2</sub> = 0,15 x (10 + $\omega_{5,N_2}$ )	(6)
Ecuaciones por recirculación	$\omega_{3,N_2} = \omega_{5,N_2}$	(7)
	$\omega_{3,H_2} = \omega_{5,H_2}$	(8)

$$\omega_{3,N_2} = 10 + \omega_{3,N_2} - 0,15 \times (10 + \omega_{3,N_2})$$



$$\omega_{3,N_2} = 56,7 \text{ kmol/h}$$

Ya hemos resuelto algunos problemas...

A esa altura podemos analizar cuáles fueron los pasos que dimos en todos los casos para resolver esos problemas

# Pasos en el abordaje de los problemas que involucran balance de materia

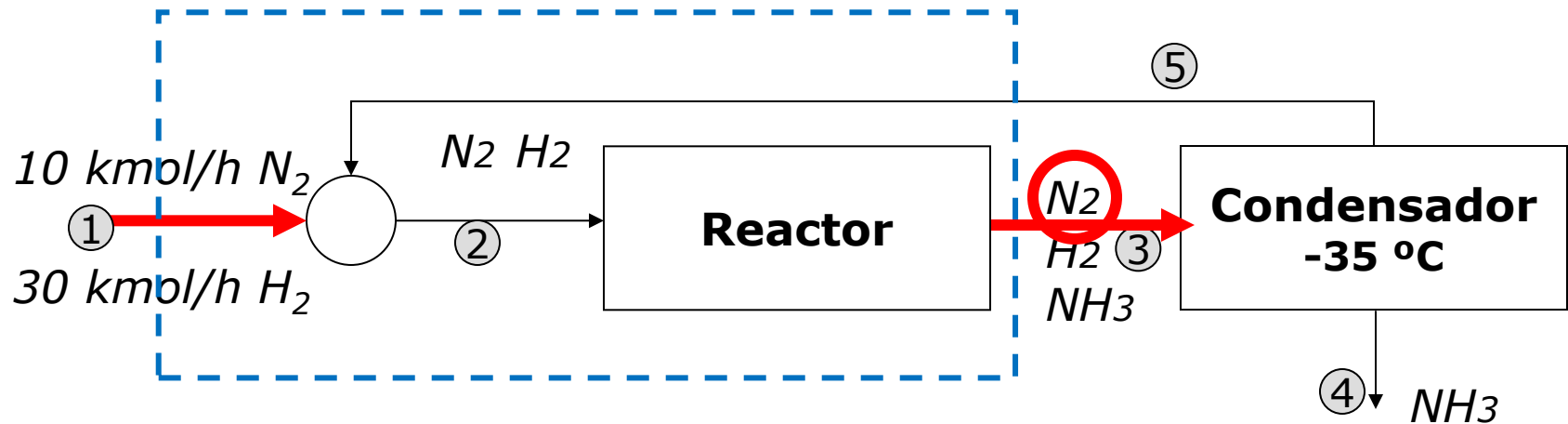
1. Dibujar el diagrama de bloques
2. Nombrar (numerar) las corrientes de materiales para mejor referencia
3. Identificar las corrientes con datos y las que tienen las incógnitas que pretendemos averiguar
4. Elegir si balance entre un  $\Delta t$  o balance diferencial, y transformar las unidades a masa o moles

**PASOS PRELIMINARES PARA  
DEJAR BIEN CLARO EL PLANTEO  
DEL PROBLEMA**

# Pasos en el abordaje de los problemas que involucran balance de materia

1. Dibujar el diagrama de bloques
2. Nombrar los flujos de materiales para el sistema
3. Identificar los datos conocidos y las que tenemos que averiguar
4. Elegir si se trata de un balance entre un  $\Delta t$  o balance diferencial, y transformar las unidades a masa o moles
5. Elegir el sistema a analizar

LOS PASOS QUE SIGUEN SON  
LOS QUE REQUIEREN MAYOR  
DESTREZA



En lo posible, cualquier elección que se haga de sistema a analizar debería tener las corrientes con datos y con la(s) incógnita(s) como entradas o salidas

Otra cosa que debemos tomar en cuenta en la elección del sistema a analizar es que quede bien determinado...

# Ecuaciones que se obtienen de Balances de Materia

Podemos formular una ecuación de balance por cada especie interviniente (podemos también usar la ecuación de balance de materia global pero ésta no será independiente de las anteriores)

Supongamos que intervienen  $n$  especies (A, B, ..... N)

$$\text{Ec. 1 (Balance de A)} \quad w_{A,\text{salida}} + \dot{M}_{A,\text{acum}} = w_{A,\text{entrada}} + \dot{M}_{A,\text{formación}} - \dot{M}_{A,\text{consumo}}$$

$$\text{Ec. 2 (Balance de B)} \quad w_{B,\text{salida}} + \dot{M}_{B,\text{acum}} = w_{B,\text{entrada}} + \dot{M}_{B,\text{formación}} - \dot{M}_{B,\text{consumo}}$$

.....

.....

$$\text{Ec. n (Balance de N)} \quad w_{N,\text{salida}} + \dot{M}_{N,\text{acum}} = w_{N,\text{entrada}} + \dot{M}_{N,\text{formación}} - \dot{M}_{N,\text{consumo}}$$

$$\text{Ec. (n+1) (Balance Global)} \quad w_{\text{tot},\text{salida}} + \dot{M}_{\text{tot},\text{acum}} = w_{\text{tot},\text{entrada}} + \dot{M}_{\text{tot},\text{formación}} - \dot{M}_{\text{tot},\text{consumo}}$$

***Se pueden formular (n+1) balances, pero sólo n serán independientes.***

Podemos formular tantas ecuaciones de balance de materia como especies intervinientes)



# Ecuaciones que se obtienen a partir de las Relaciones estequiométricas

---

Supongamos que tiene lugar una reacción química donde intervienen  $n$  especies según



Entonces, considerando los cambios de moles...

$$\begin{aligned} (\text{vel cons } \mathbf{A}) / a &= (\text{vel cons } \mathbf{B}) / b = \dots = (\text{vel cons } \mathbf{I}) / i = \\ &= (\text{vel form } \mathbf{J}) / j = (\text{vel form } \mathbf{K}) / k = \dots = (\text{vel form } \mathbf{N}) / n \end{aligned}$$

Una reacción química en la que intervengan  $n$  especies, aportará:

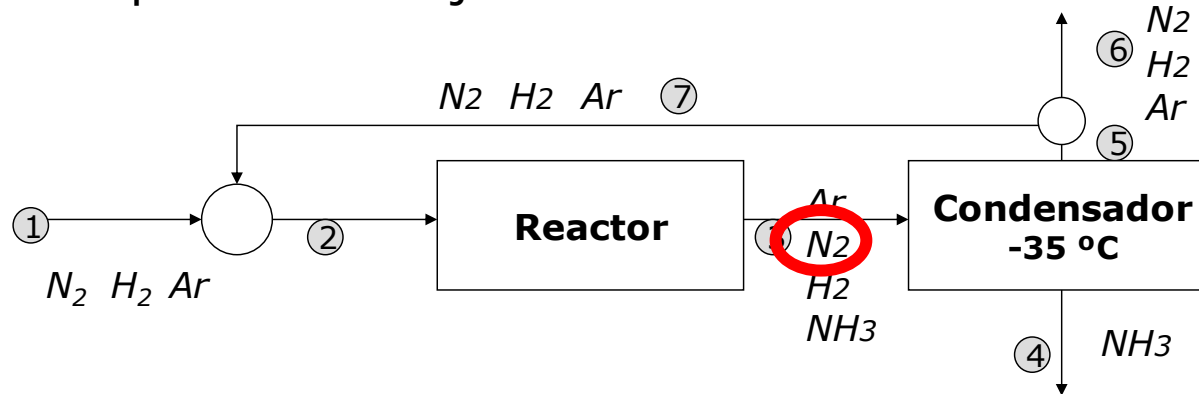
- $n$  incógnitas (las conversiones –cantidades generadas o consumidas– de cada especie)
- $(n-1)$  ecuaciones que vinculan dichas conversiones

**Cada reacción química independiente tiene como efecto el aumentar en 1 los grados de libertad del sistema de ecuaciones** (agrega 1 incógnita, por ej. el grado de conversión de la reacción).

# EJEMPLO

## Sistema con recirculación y purga

Siguiendo con el proceso del ejercicio anterior ...



Ahora se considera la entrada de Argón ( $PA = 40$ ) en la corriente de suministro, cuyo porcentaje en peso con relación al nitrógeno es del 3% en la corriente.

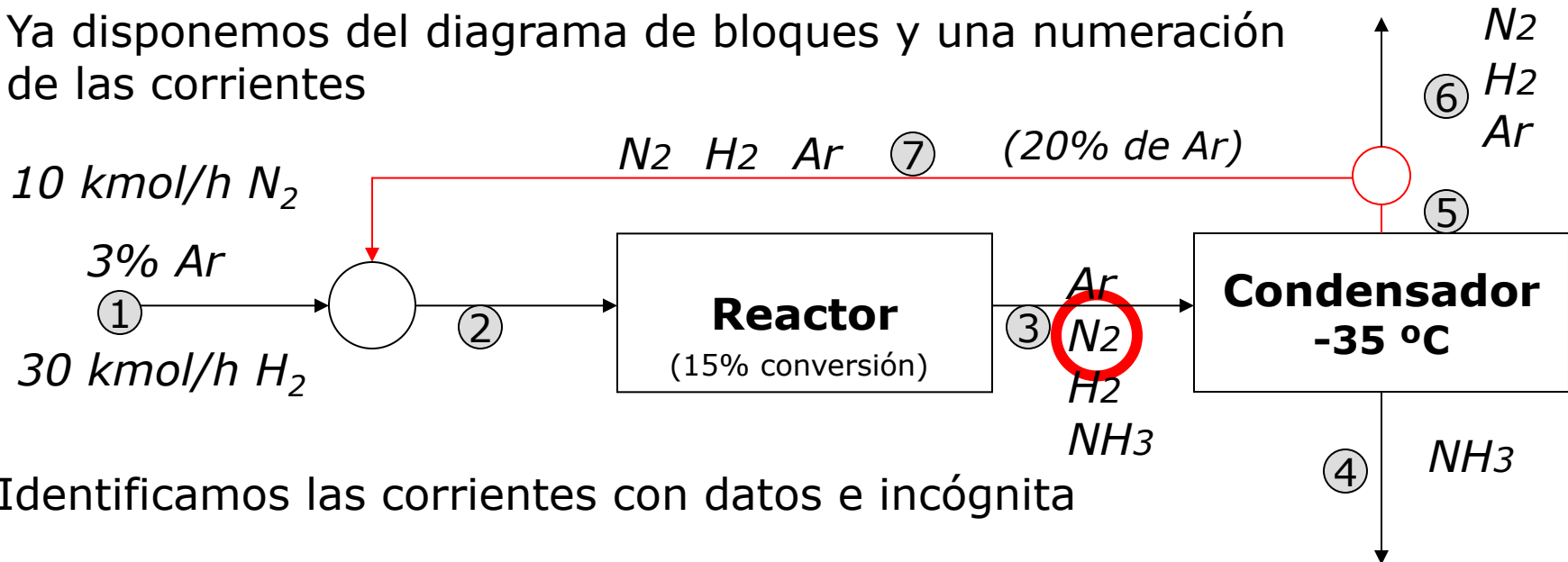
Para un buen funcionamiento del proceso la fracción molar del Argón no puede superar el valor de 0,2 en la recirculación, por lo que se agrega una purga al proceso en la recirculación luego del condensador para mantener esa fracción en 0,2.

La conversión en el reactor, expresada en Nitrógeno, es del 15%.

Calcular el caudal de la corriente de  $N_2$  que ingresa al condensador en régimen de equilibrio.

# Resolución

Ya disponemos del diagrama de bloques y una numeración de las corrientes



Identificamos las corrientes con datos e incógnita

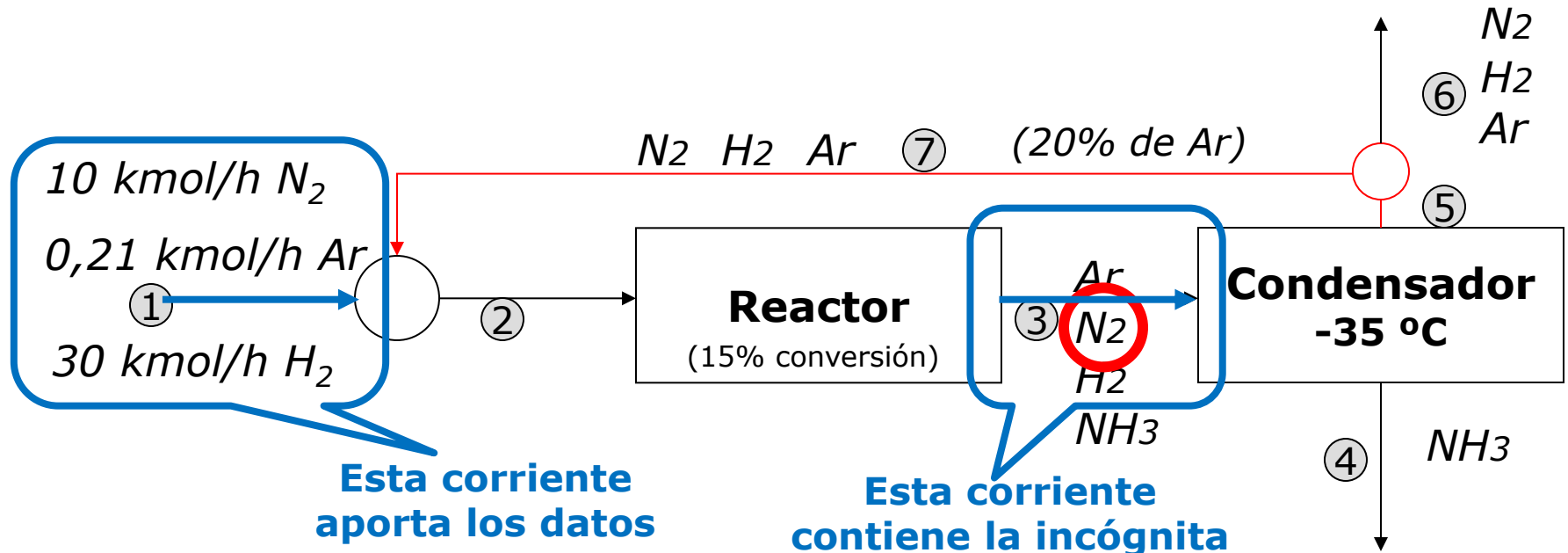
Estado estacionario + datos de flujos → haremos balance diferencial

Transformar las unidades a masa o moles: *flujos en kmoles*

3% Ar en peso del N<sub>2</sub> que ingresa =  $0,03 \times 10 \times 28 = 8,4 \text{ kg/h} \rightarrow 0,21 \text{ kmol/h}$

*kg/h de N<sub>2</sub> que ingresan*

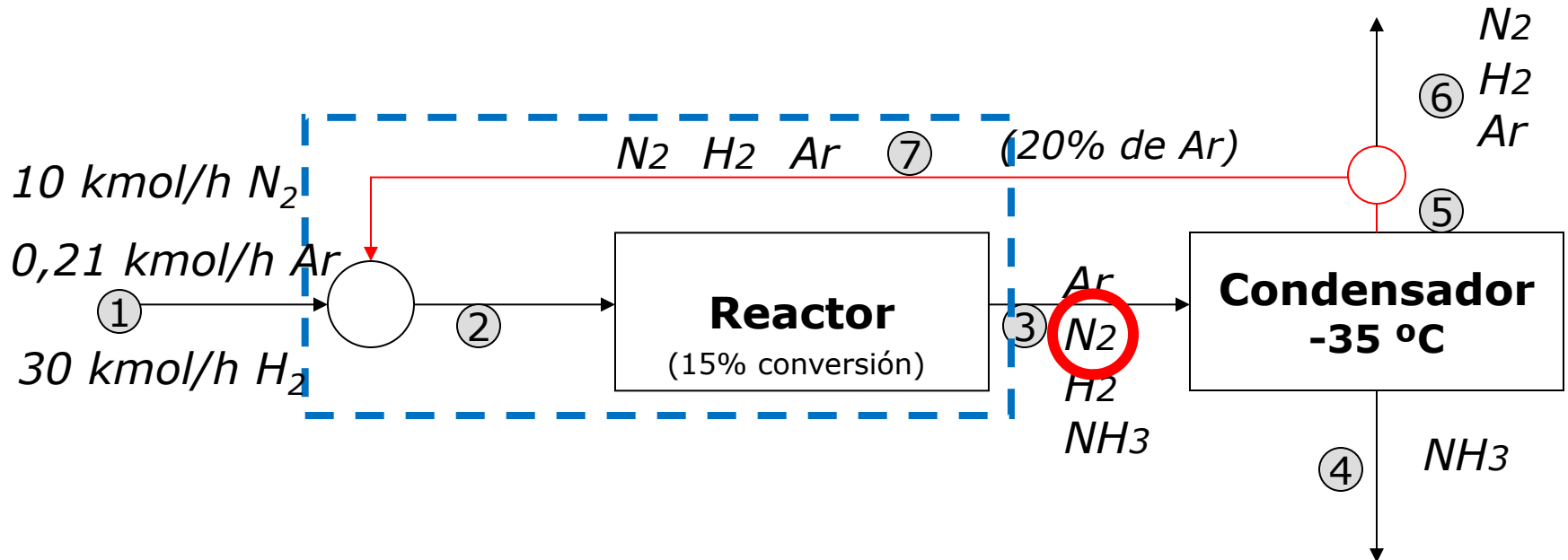
# Resolución



Elegir el sistema a analizar (donde haremos balances)

La primer elección es un sistema tal que las corrientes con datos y con la incógnita atraviesen sus fronteras (de esta manera, datos e incógnitas aparecen en las ecuaciones de balance)

# Resolución

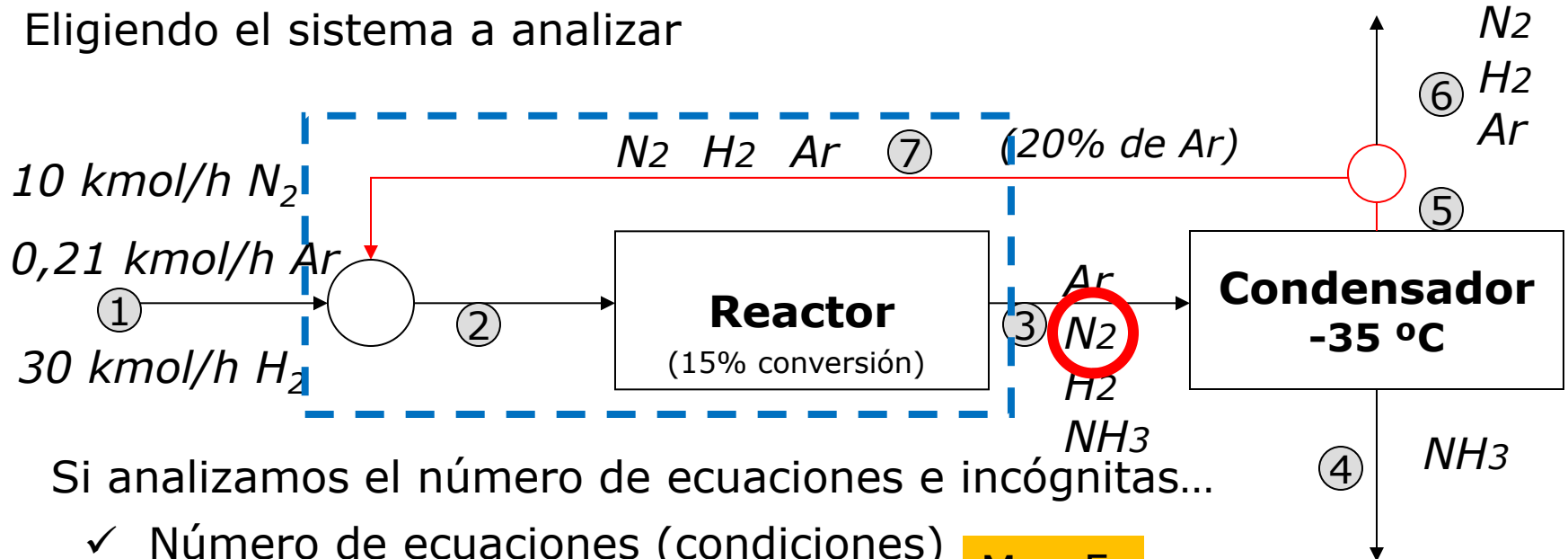


Elegir el sistema a analizar (donde haremos balances)

La primer elección es un sistema tal que las corrientes con datos y con la incógnita atraviesen sus fronteras (de esta manera, datos e incógnitas aparecen en las ecuaciones de balance)

# Resolución

Eligiendo el sistema a analizar



Si analizamos el número de ecuaciones e incógnitas...

- ✓ Número de ecuaciones (condiciones)  **$M = 5$** 
  - + 4 balances de 4 especies
  - 1 dependencia por reacción química (= 3 incógnitas y 2 ec. indep)
  - + 1 condición por grado de avance
  - + 1 relación (% molar de Ar en corriente 7)

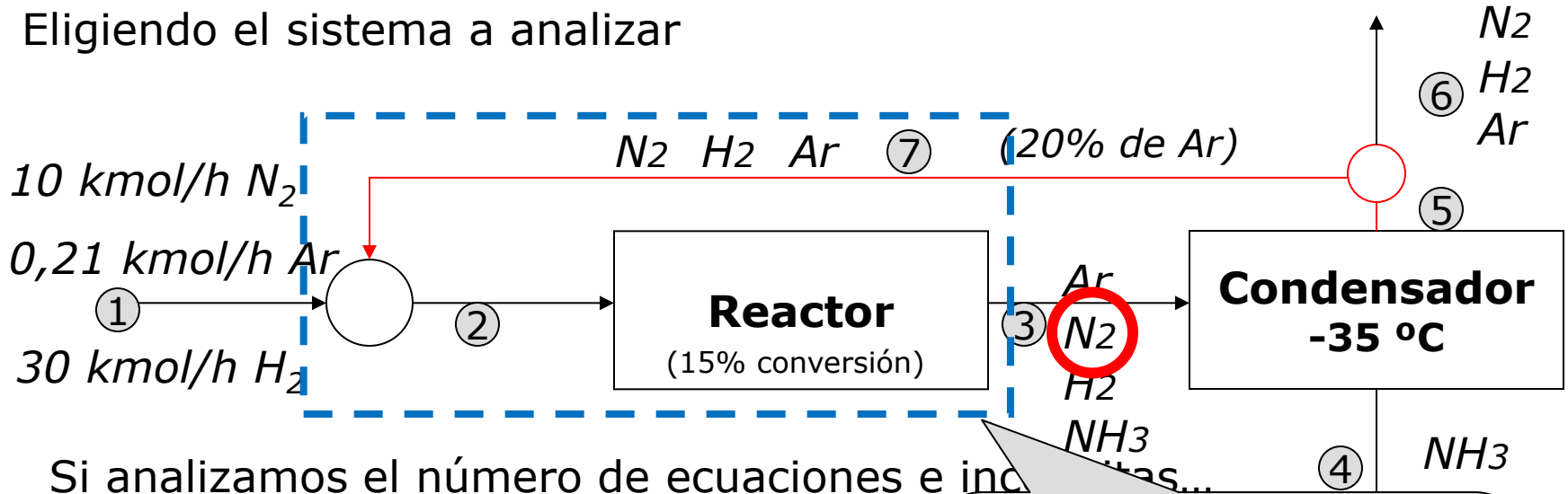
- ✓ Número de variables,  **$N = 7$**

Flujos de las especies presentes en las corrientes 3 y 7

$M < N$ , sistema NO DETERMINADO

# Resolución

Eligiendo el sistema a analizar



Si analizamos el número de ecuaciones e incógnitas...

- ✓ Número de ecuaciones (condiciones)
  - + 4 balances de 4 especies
  - 1 dependencia por reacción química
  - + 1 condición por grado de avance
  - + 1 relación (% molar de Ar en corriente)

✓ Número de variables,  **$N = 7$**

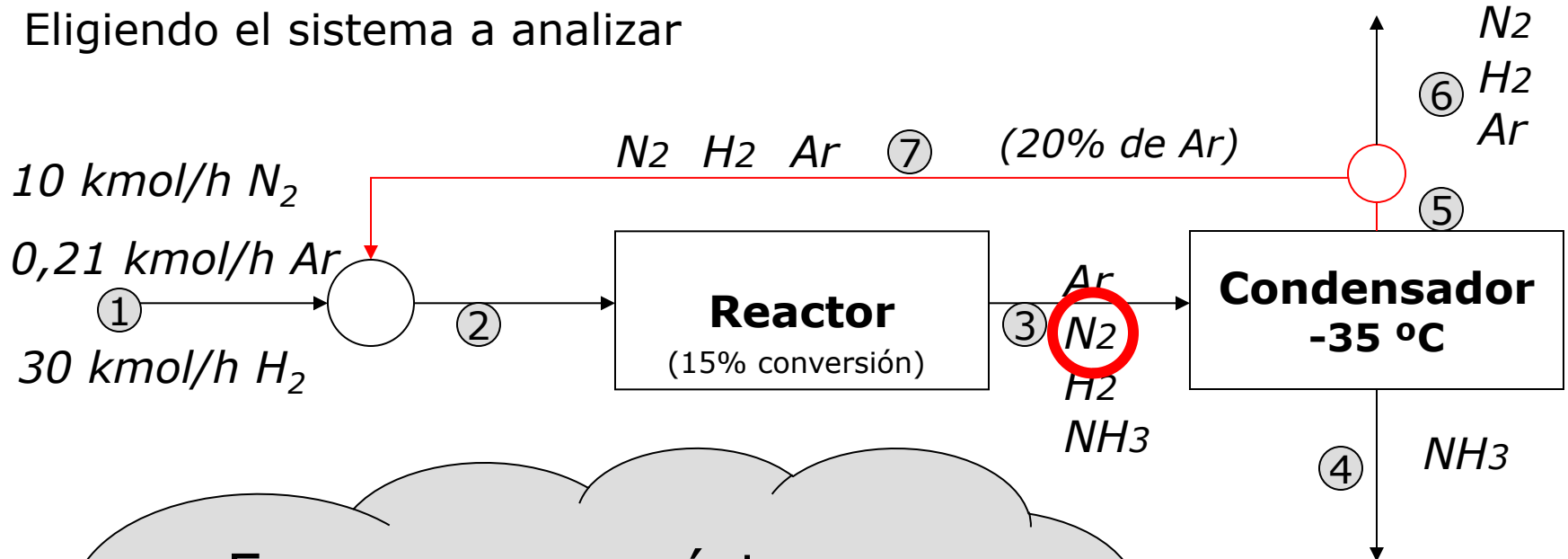
Flujos de las especies presentes en las corrientes 3 y 7

$M < N$ , sistema NO DETERMINADO

LA ELECCION DE ESTE SISTEMA NO SIRVE PUES NO QUEDA DETERMINADO

# Resolución

Eligiendo el sistema a analizar

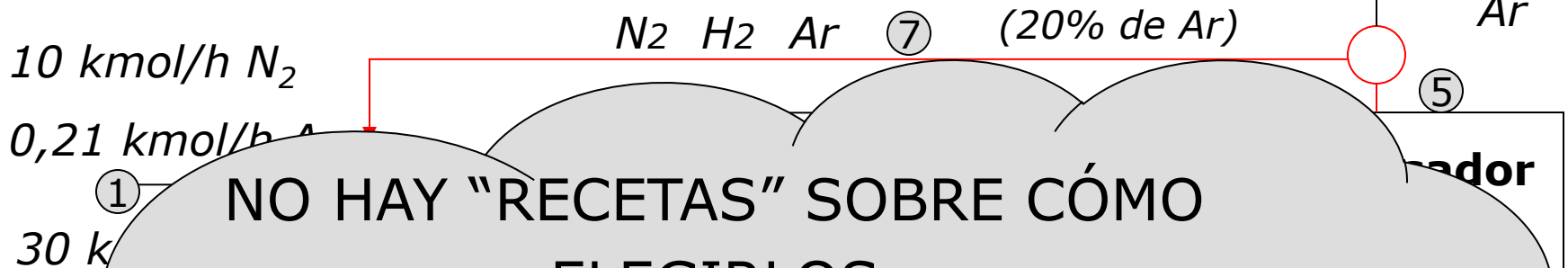


En casos como éste,  
deberemos realizar más  
de un balance en  
sistemas diferentes



# Resolución

Eligiendo el sistema a analizar

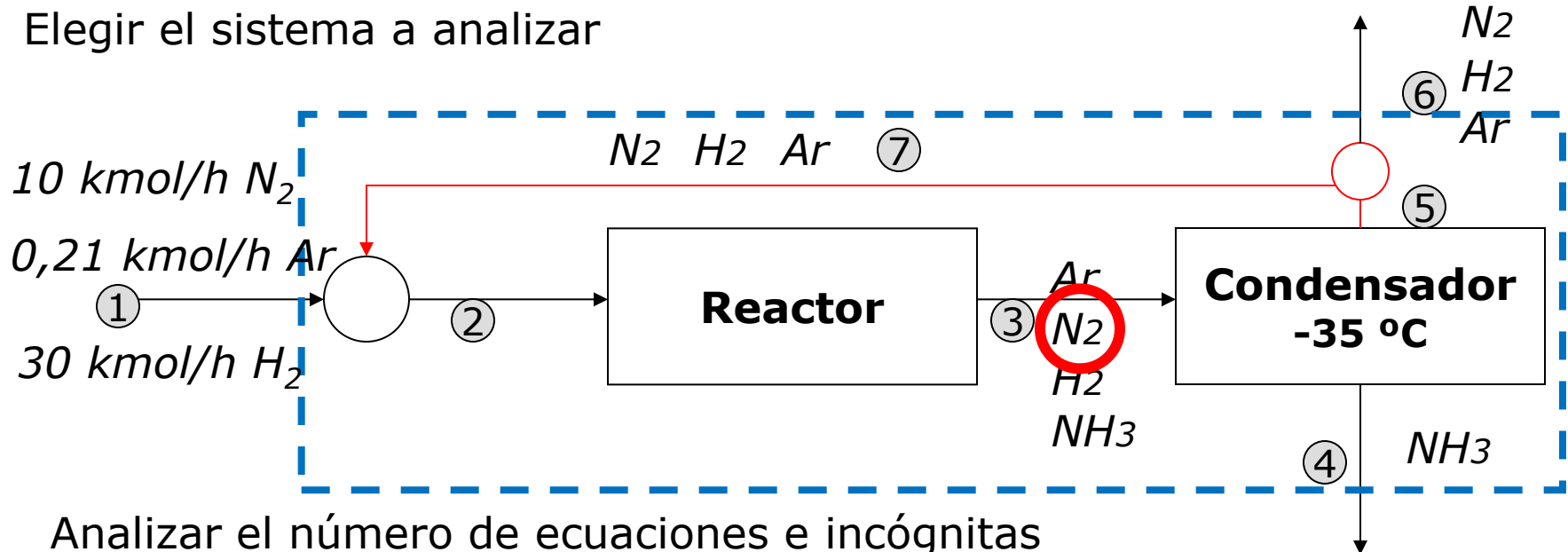


NO HAY "RECETAS" SOBRE CÓMO ELEGIRLOS

En este caso, empezaremos probando con el sistema completo (por su frontera pasan las corrientes con "datos") (veremos si queda "Determinado")

# Realizando el Balance de materia

Elegir el sistema a analizar



✓ Número de ecuaciones,  $M = 4$

+ 4 balances de 4 especies

- 1 dependencia por reacción química

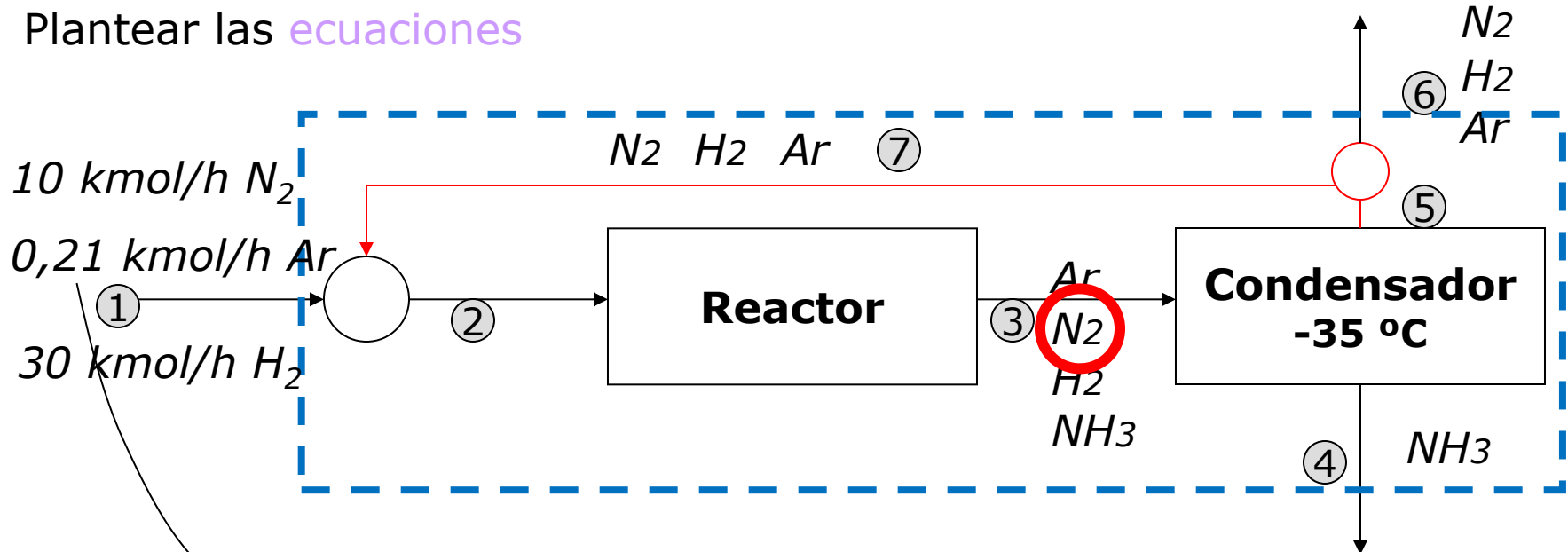
+ 1 condición por fracción molar de Argón

✓ Número de variables,  $N = 4$  (corrientes 4 y 6)

$M = N$ , sistema DETERMINADO

# Realizando el Balance de materia

Plantear las ecuaciones

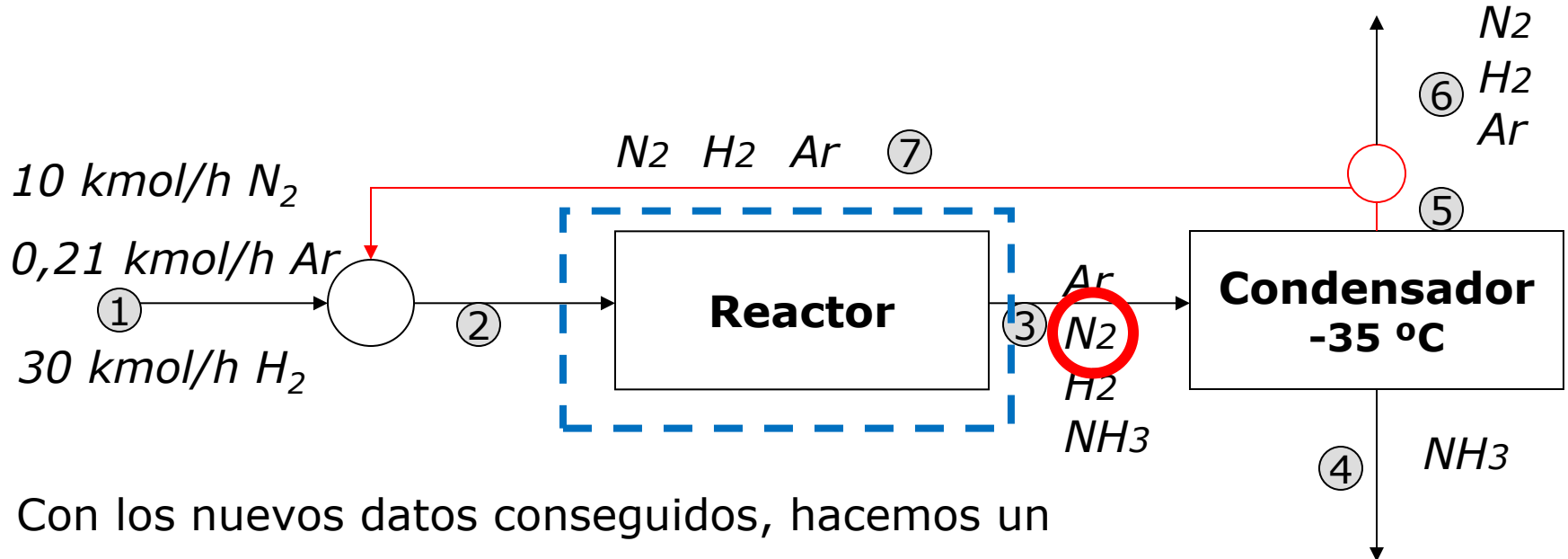


Balance del proceso (unidades  $\rightarrow$  kmol/h)

- $\blacktriangleright W_{6,Ar} = W_{1,Ar}$
  - $\blacktriangleright W_{6,Ar} = 0,2 (W_{6,N2} + W_{6,H2} + W_{6,Ar})$
  - $\blacktriangleright W_{6,N2} = 10 - R$
  - $\blacktriangleright W_{6,H2} = 30 - 3R$
  - $\blacktriangleright W_{4,NH3} = 0 + 2R$
- (donde R = conversión extensiva de la reacción en N<sub>2</sub> en kmol/h)

$$\begin{aligned}
 R &= 9,79 \\
 W_{6,N2} &= 0,21 \\
 W_{6,H2} &= 0,63 \\
 W_{4,NH3} &= 19,58 \\
 W_{6,Ar} &= 0,21
 \end{aligned}$$

# Realizando el Balance de masa



Con los nuevos datos conseguidos, hacemos un segundo balance.

Sistema a analizar:  $N_2$  en el Reactor

- $w_{3,N_2} = w_{2,N_2} - 0,15 w_{2,N_2}$
- siendo  $0,15 w_{2,N_2} = R$

De donde...

$$w_{3,N_2} = 55,5 \text{ kmol/h}$$

$$R = 9,79$$

$$w_{6,N_2} = 0,21$$

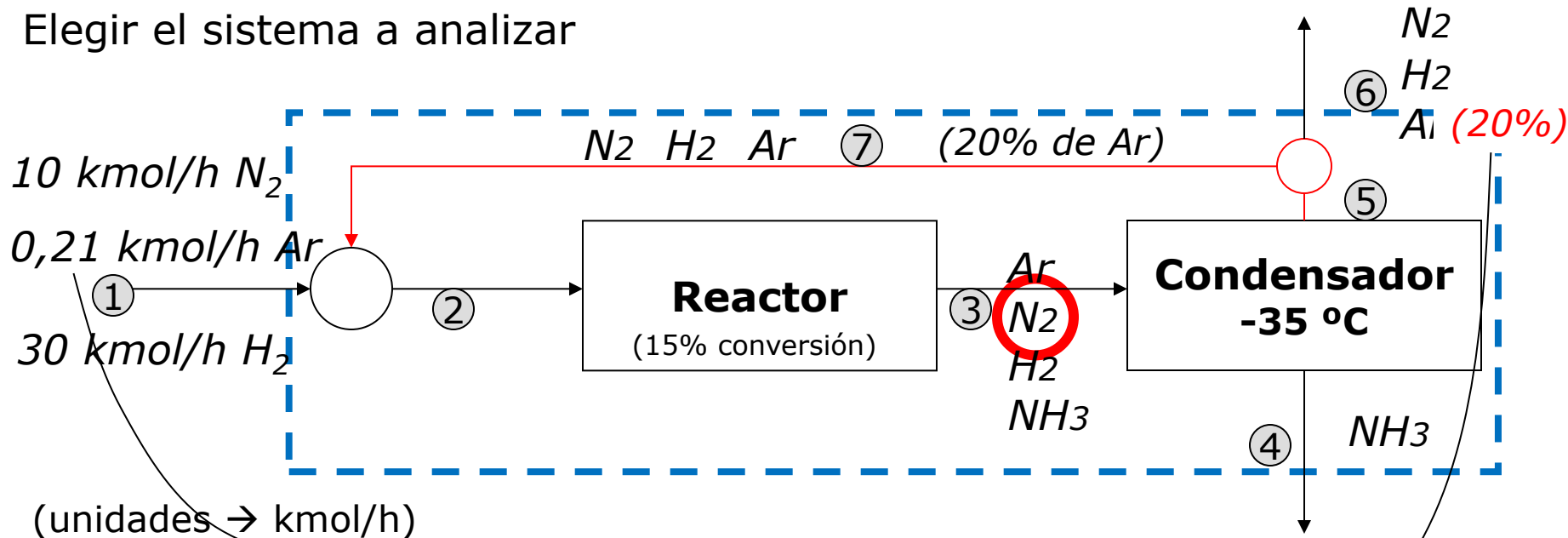
$$w_{6,H_2} = 0,63$$

$$w_{4,NH_3} = 19,58$$

$$w_{6,Ar} = 0,21$$

# Resolución

Elegir el sistema a analizar



➤  $\omega_{6,Ar} = \omega_{1,Ar} = 0,21$

La proporción de Ar en 6 es la misma que en 7

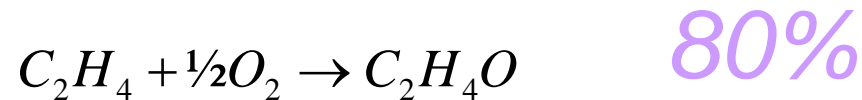
➤  $\omega_{6,Ar} = 0,2 (\omega_{6,N_2} + \omega_{6,H_2} + \omega_{6,Ar})$

# EJEMPLO

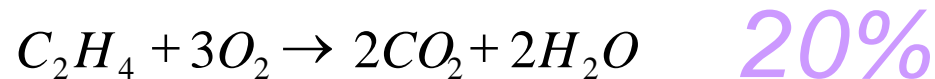
## (reacciones en paralelo)

---

El óxido de etileno ( $C_2H_4O$ ) se produce por oxidación parcial de etileno ( $C_2H_4$ ) con exceso de aire sobre un catalizador de plata. La reacción básica es:

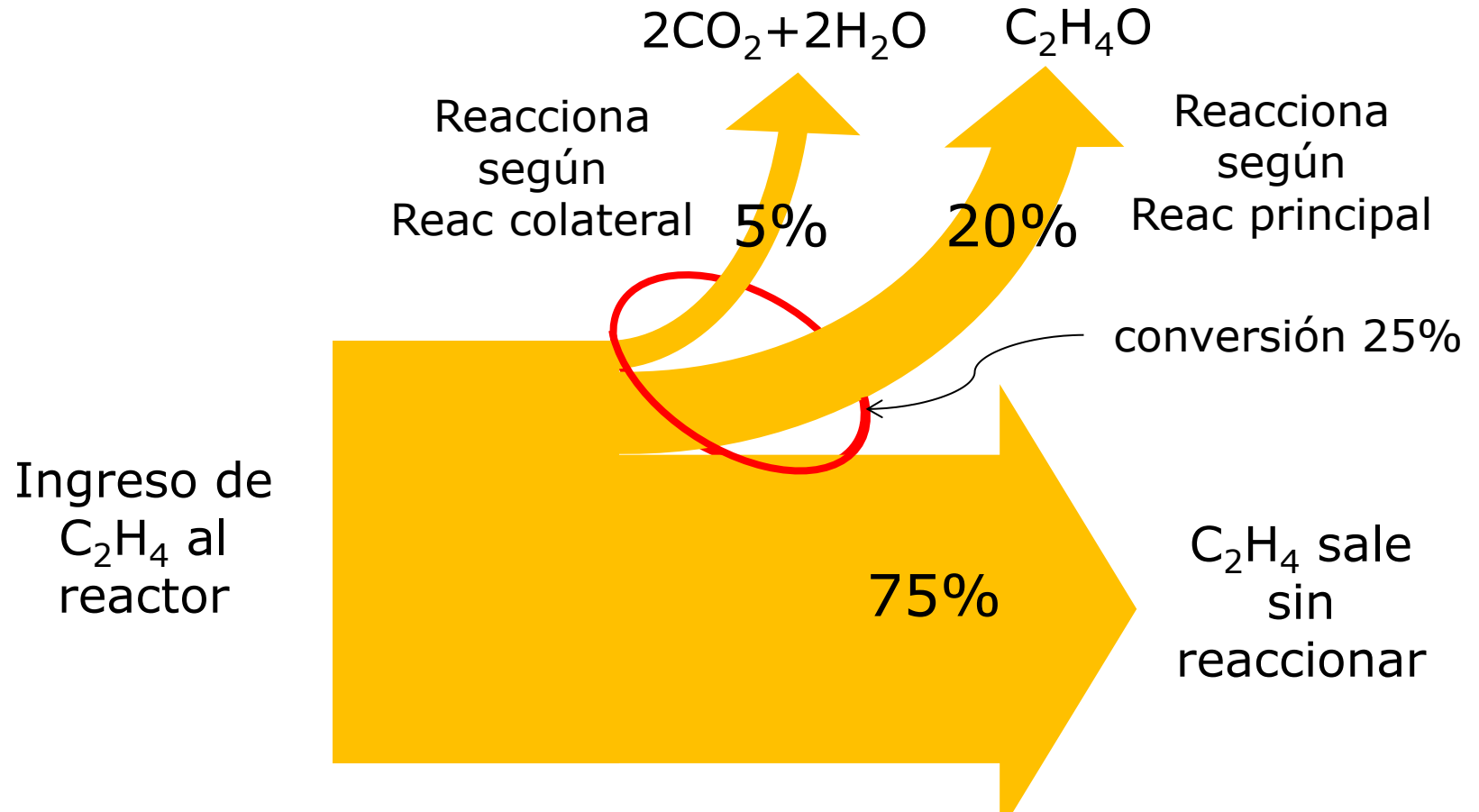


Sin embargo, también se produce una reacción colateral de oxidación del etileno a dióxido de carbono y agua según la ecuación:



Suponer que con una alimentación conteniendo 10% de etileno y 90% de aire, y una conversión de etileno del 25%, las reacciones principal / colateral proceden en una relación 80%/ 20%.

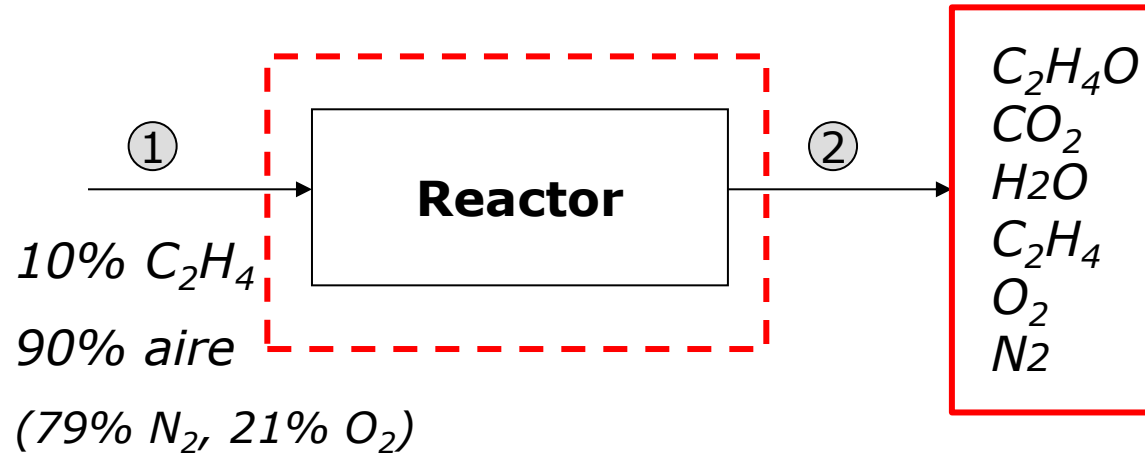
Calcular la **composición de la corriente de salida** del reactor cuando el sistema está en régimen.



Suponer que con una alimentación conteniendo 10% de etileno y 90% de aire, y una conversión de etileno del 25%, las reacciones principal / colateral proceden en una relación 80%/ 20%.

# Resolución

Diagrama de bloques, identificación de corrientes y datos



Sistema a analizar: el Reactor

Base de cálculo: 1 kmol de alimentación

0,1 kmol  $C_2H_4$   
0,9 kmol aire

Cantidad de incógnitas: 6 (caudales de salida de las 6 especies)

Cantidad de ecuaciones:

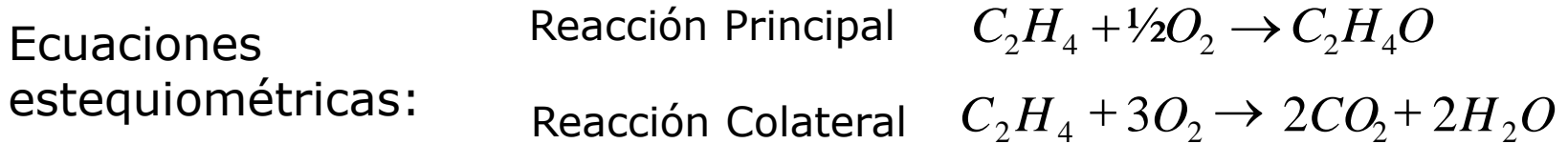
6 (balances de masa de cada especie)

- 2 (ecuaciones estequiométricas)

2 (grado de conversión de cada reacción, 20% y 5% respect.)



# Resolución



Ecuaciones de balance de masa para cada especie:

(No hay acumulación pues el sistema está "en régimen" (estado estacionario)).

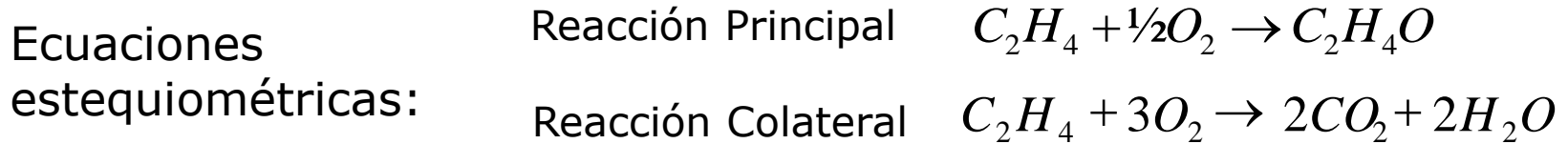
$$\text{salida} = \text{entrada} + \text{generación} - \text{consumo}$$

Cálculo de la generación - consumo (base = 1 kmol de alimentación)

Un 10% de la alimentación (0,1 kmol) es  $C_2H_4$ . De éstos, 20% se convierten a través de la reacción principal y 5% se convierten a través de la reacción colateral.

	$C_2H_4$	$O_2$	$O$	$C_2H_4O$
REAC PRINC	-0,02	20% de 0,1 kmol		
REAC COLAT	-0,005	5% de 0,1 kmol		
AMBAS				

# Resolución



Ecuaciones de balance de masa para cada especie:

(No hay acumulación pues el sistema está "en régimen" (estado estacionario)).

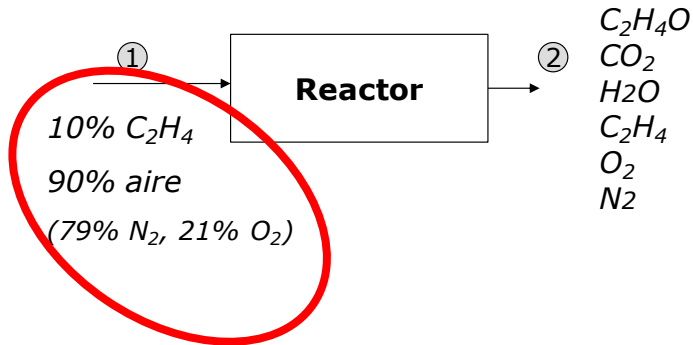
$$\text{salida} = \text{entrada} + \text{generación} - \text{consumo}$$

Cálculo de la generación - consumo (base = 1 kmol de alimentación)

Un 10% de la alimentación (0,1 kmol) es  $C_2H_4$ . De éstos, 20% se convierten a través de la reacción principal y 5% se convierten a través de la reacción colateral.

	$C_2H_4$	$O_2$	$CO_2$	$H_2O$	$C_2H_4O$
REAC PRINC	-0,02	-0,01			0,02
REAC COLAT	-0,005	-0,015	0,01	0,01	
AMBAS	-0,025	-0,025	0,010	0,010	0,020

# Resolución



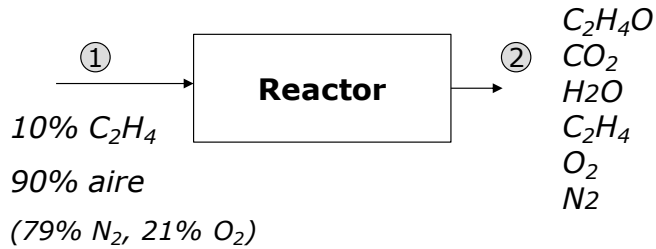
generación - consumo (base = 1 kmol de alimentación)

	$C_2H_4$	$O_2$	$CO_2$	$H_2O$	$C_2H_4O$
REAC PRINC	-0,02	-0,01			0,02
REAC COLAT	-0,005	-0,015	0,01	0,01	
<b>AMBAS</b>	<b>-0,025</b>	<b>-0,025</b>	<b>0,010</b>	<b>0,010</b>	<b>0,020</b>

Balance de cada especie (base =1 kmol de alimentación)

	entrada (kmol)	generación - consumo (kmol)	salida (kmol)	Composición % v/v
$C_2H_4O$	0			
$CO_2$	0			
$H_2O$	0			
$C_2H_4$	0,1			
$O_2$	$0,9 \times 0,21 = 0,189$			
$N_2$	$0,9 \times 0,79 = 0,711$			

# Resolución



generación - consumo (base = 1 kmol de alimentación)

	$C_2H_4$	$O_2$	$CO_2$	$H_2O$	$C_2H_4O$
REAC PRINC	-0,02	-0,01			0,02
REAC COLAT	-0,005	-0,015	0,01	0,01	
<b>AMBAS</b>	<b>-0,025</b>	<b>-0,025</b>	<b>0,010</b>	<b>0,010</b>	<b>0,020</b>

Balance de cada especie (base = 1 kmol de alimentación)

	entrada (kmol)	generación - consumo (kmol)	salida (kmol)	Composición % v/v
$C_2H_4O$	0	0,02		
$CO_2$	0	0,01		
$H_2O$	0	0,01		
$C_2H_4$	0,1	-0,025		
$O_2$	$0,9 \times 0,21 = 0,189$	-0,025		
$N_2$	$0,9 \times 0,79 = 0,711$	0		

# Resolución

①  
10%  $C_2H_4$   
90% aire  
(79%  $N_2$ , 21%  $O_2$ )



②  
 $C_2H_4O$   
 $CO_2$   
 $H_2O$   
 $C_2H_4$   
 $O_2$   
 $N_2$

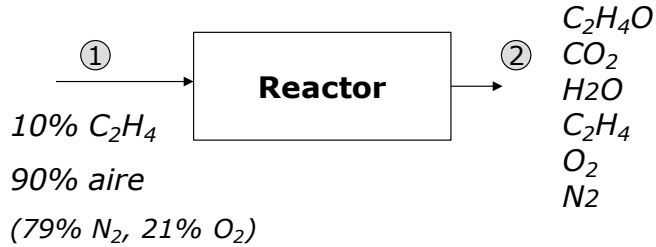
generación - consumo (base = 1 kmol de alimentación)

	$C_2H_4$	$O_2$	$CO_2$	$H_2O$	$C_2H_4O$
REAC PRINC	-0,02	-0,01			0,02
REAC COLAT	-0,005	-0,015	0,01	0,01	
AMBAS	-0,025	-0,025	0,010	0,010	0,020

Balance de cada especie (base = 1 kmol de alimentación)

	1 kmol	generación - consumo (kmol)	salida (kmol)	Composición % v/v
$C_2H_4O$	<b>+</b>	<b>+</b>		
$CO_2$				
$H_2O$				
$C_2H_4$				
$O_2$				
$N_2$				

# Resolución



generación - consumo (base = 1 kmol de alimentación)

	$C_2H_4$	$O_2$	$CO_2$	$H_2O$	$C_2H_4O$
REAC PRINC	-0,02	-0,01			0,02
REAC COLAT	-0,005	-0,015	0,01	0,01	
<b>AMBAS</b>	<b>-0,025</b>	<b>-0,025</b>	<b>0,010</b>	<b>0,010</b>	<b>0,020</b>

Balance de cada especie (base = 1 kmol de alimentación)

	entrada (kmol)	generación - consumo (kmol)	salida (kmol)	Composición % v/v
$C_2H_4O$	0	0,02	0,02	2,0
$CO_2$	0	0,01	0,01	1,0
$H_2O$	0	0,01	0,01	1,0
$C_2H_4$	0,1	-0,025	0,075	7,6
$O_2$	$0,9 \times 0,21 = 0,189$	-0,025	0,164	16,6
$N_2$	$0,9 \times 0,79 = 0,711$	0	0,711	71,8