

Unidades temáticas

- Generalidades de los procesos de transformación
- Abordaje de problemas vinculados a los procesos de transformación
- Balances de materia
- Modelado matemático y problemas numéricos
- Aspectos económicos / financieros
- Operaciones Unitarias y Servicios Auxiliares
- Balances de energía

Balances de Materia

Balances

Generalidades

Balances

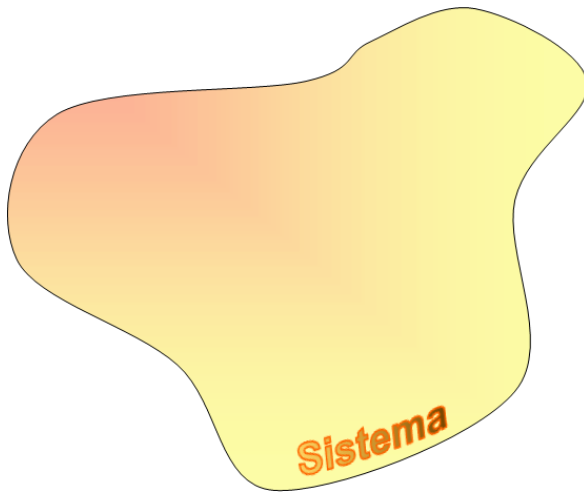
Cuando hablamos de "BALANCE"
nos referimos al balance de una
"propiedad extensiva" en un
"sistema"



Sistema y Propiedades

- **Sistema.** Una parte del universo que queremos estudiar.
(Debe estar unívocamente definido.)

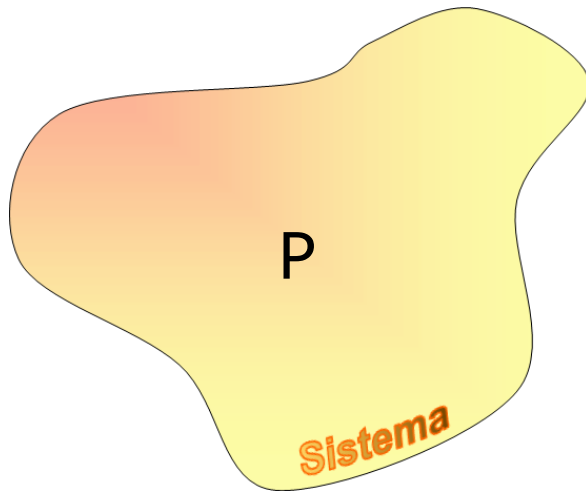
Caracterizamos un sistema por sus “propiedades” (a través de las magnitudes de esas propiedades)



Propiedad extensiva

- **Propiedad extensiva.** Es una propiedad del sistema

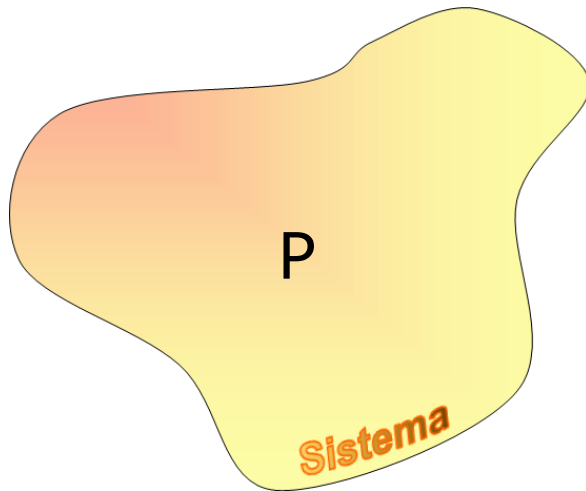
Es aditiva, esto es, si dividimos el sistema en partes, el valor de la propiedad para el sistema es la suma de los valores para todas sus partes (y por lo tanto, el valor de una propiedad extensiva depende de la cantidad de sistema).



Propiedad extensiva

En cada instante esa propiedad (P) tiene una magnitud dada. De forma que es aplicable la pregunta ¿cuánto hay de la propiedad P en el sistema?

La magnitud o cantidad de P la expresamos **numéricamente** como la cantidad de unidades que hemos convenido tomar como referencia.



(El valor numérico será diferente si cambiamos de unidad)

En cada instante la propiedad P tiene un valor (único para todo el sistema) pero ese valor puede variar con el tiempo.

$$P_{\text{sistema}}(t) \quad (\text{es función de } t)$$

Balances

Cuando hablamos de "BALANCE"
nos referimos al balance de una
"propiedad extensiva" en un
"sistema"

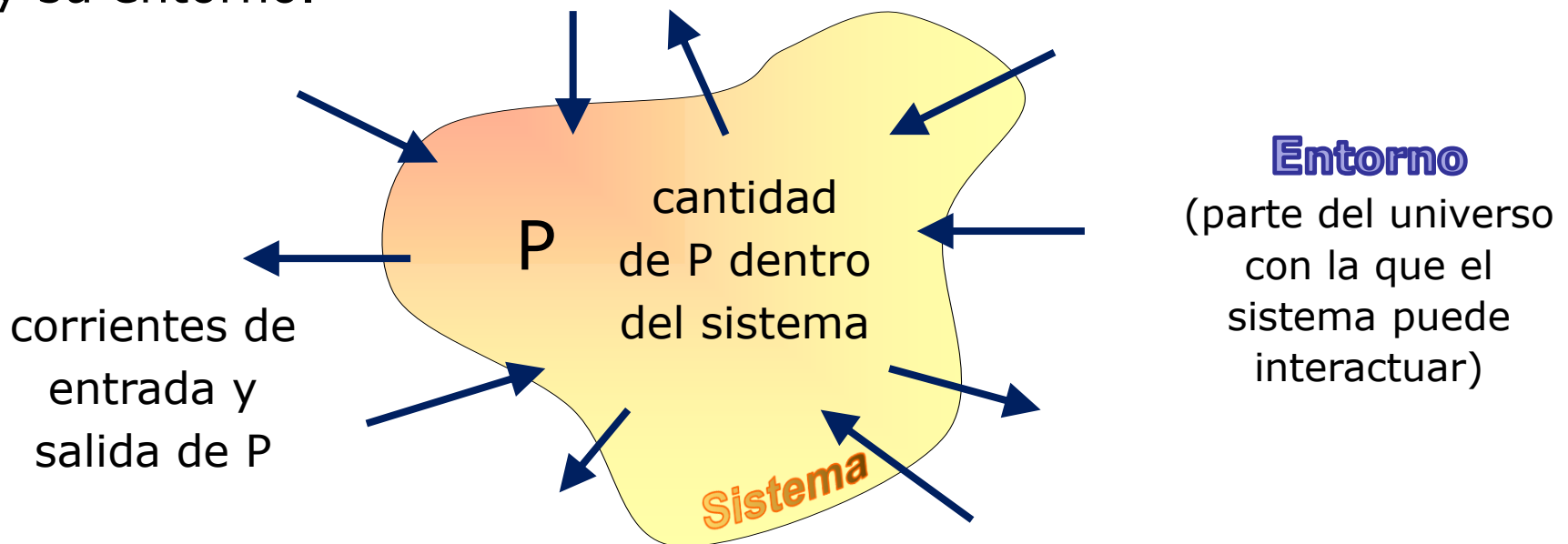
Propiedad extensiva P

Intercambio entre el sistema y su entorno

Dada un sistema y una propiedad extensiva P del sistema, nos interesará conocer cuánto de P hay en el sistema en un momento dado y cómo varía la cantidad de P en el tiempo.

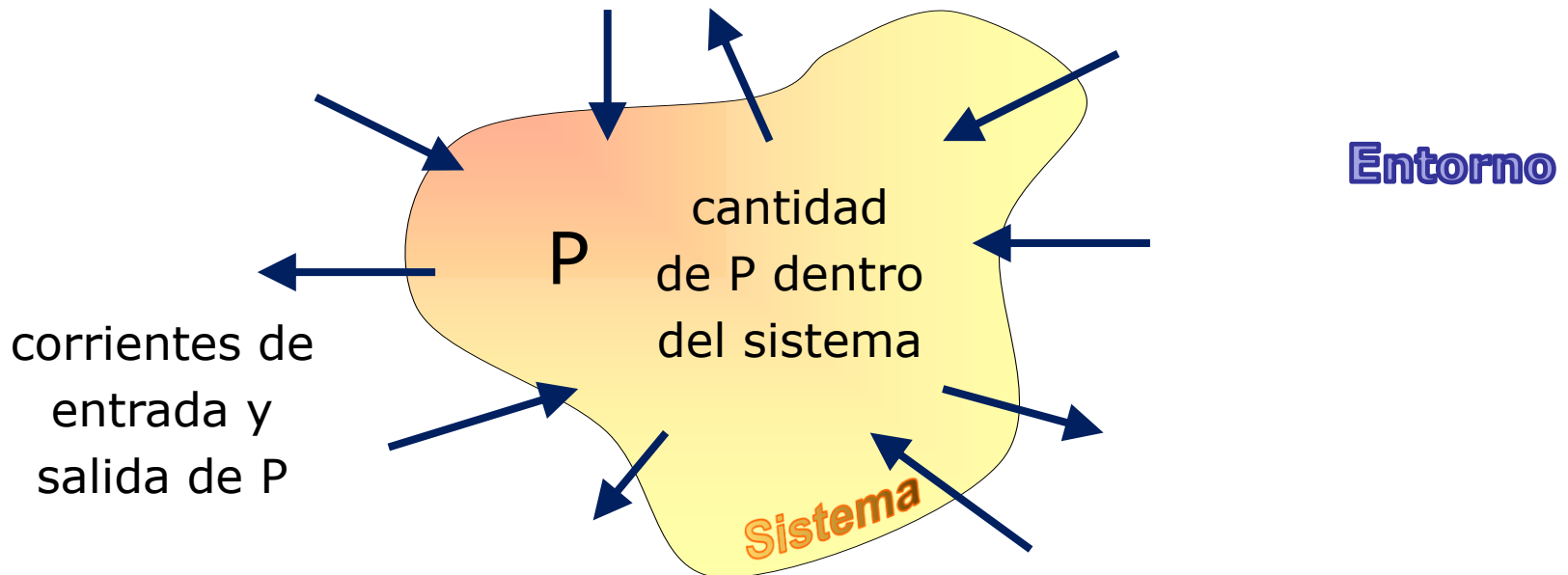
$$P_{\text{sistema}}(t)$$

Es posible que la propiedad P se intercambie entre el sistema y su entorno.



Nos interesará conocer...

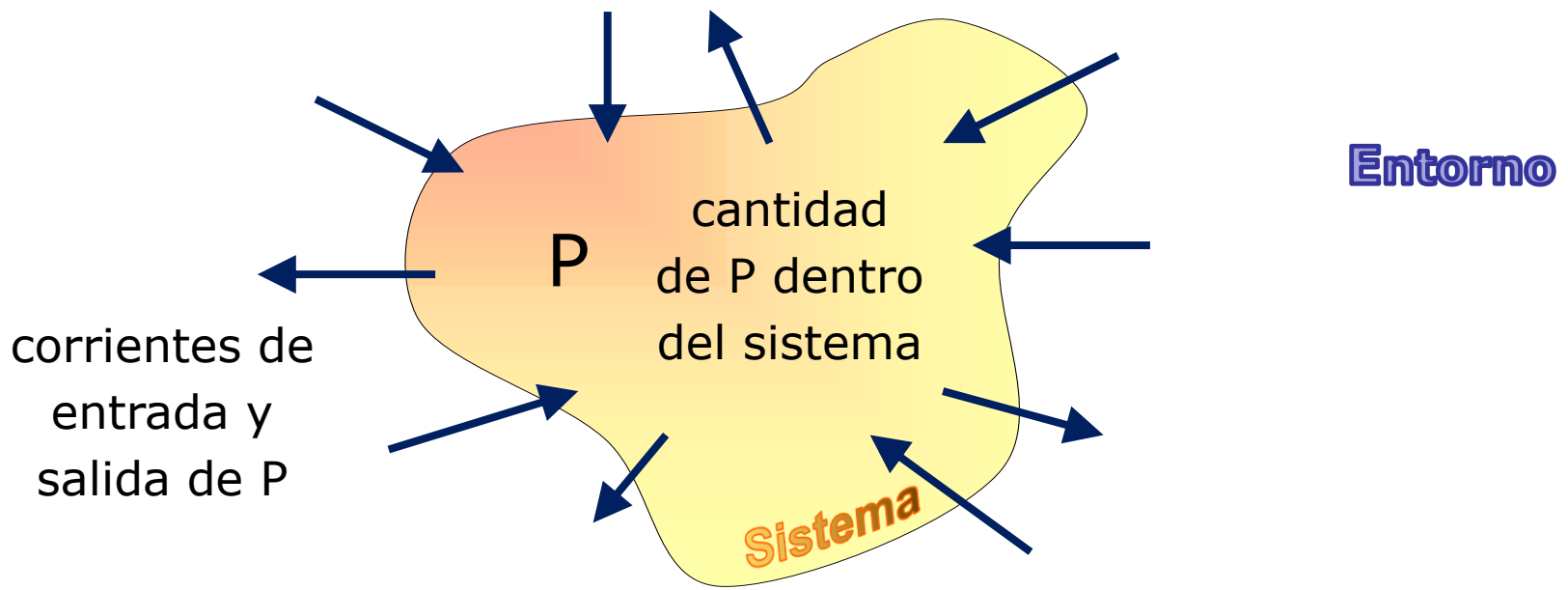
- Para un intervalo de tiempo, el cambio total de P del sistema y las contribuciones a dicho cambio (y entre ellas, las cantidades de P intercambiadas entre el sistema y el entorno)
- Para un momento dado, la velocidad de cambio de P en el sistema y la velocidad de las diferentes contribuciones a dicho cambio



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



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 + Δt

Ecuación de
Balance



Considerando velocidades de cambio...

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

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

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

(estos cocientes serían velocidades de cambio promedio)

... y haciendo límites para cuando $\Delta t \rightarrow 0$

$$\dot{P}_{\text{acum}} = \dot{P}_{\text{entrada}} - \dot{P}_{\text{salida}} + \dot{P}_{\text{formacion}} - \dot{P}_{\text{consumo}}$$

Considerando velocidades de cambio...

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

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

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

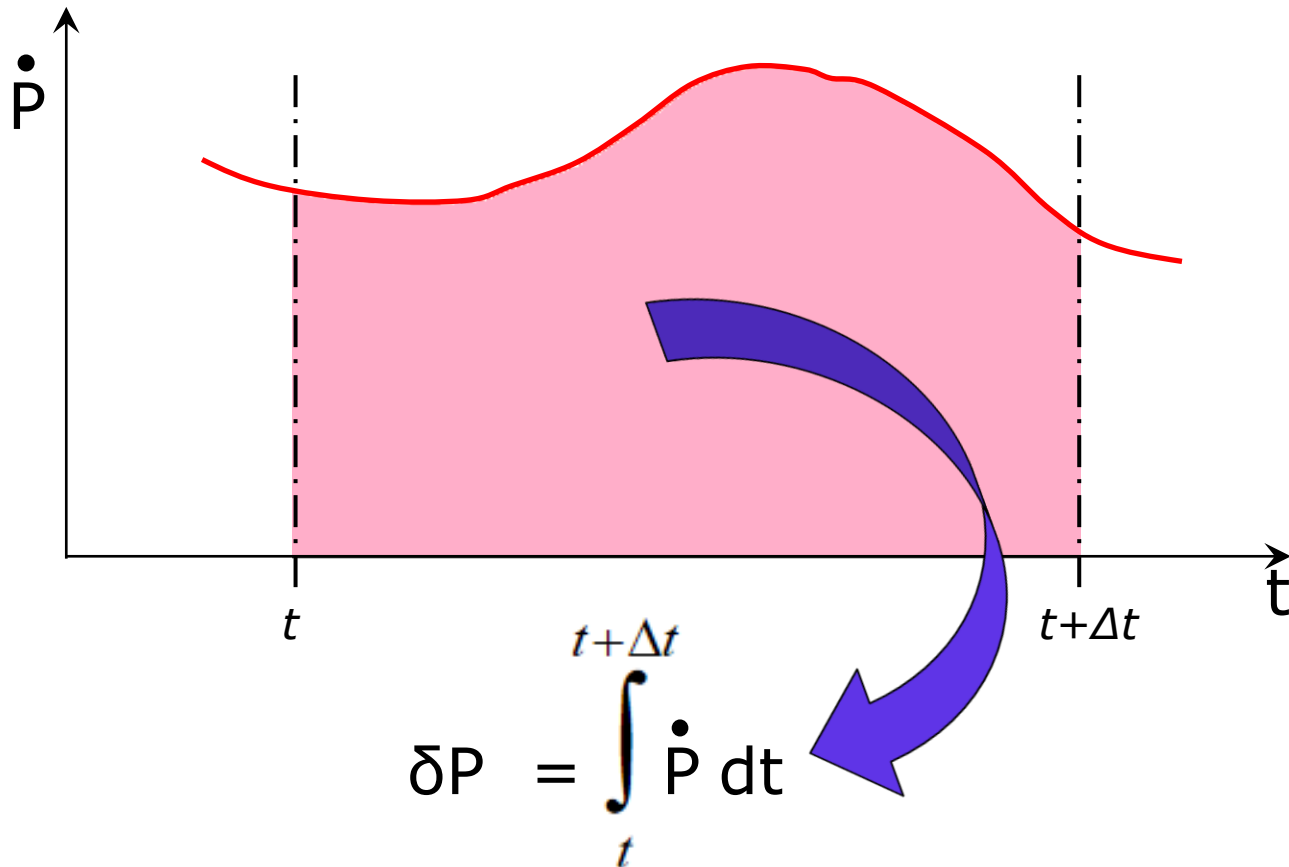
todas las velocidades medidas en el mismo instante

Ecuación de Balance
Diferencial



Relación entre ambas

\dot{P} es la velocidad de cambio o flujo (que puede variar con t)
 δP es la cantidad que cambió o fluyó entre t y $t+\Delta t$



Si la propiedad P es "invariante"...

Una propiedad se considera "invariante" si no es posible que se generen o que se consuman cantidades de esa propiedad.

Si ese es el caso, en la ecuación de balance de dicha propiedad los términos de formación y consumo son siempre nulos.

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

$$\dot{P}_{\text{acum}} = \dot{P}_{\text{entrada}} - \dot{P}_{\text{salida}} + \cancel{\dot{P}_{\text{formacion}}} - \cancel{\dot{P}_{\text{consumo}}}$$

Balances de uso en la ingeniería de procesos

- A los efectos de analizar los procesos de transformación, son de particular interés los **balances de materia** y los **balances de energía** (en los sistemas donde se llevan a cabo dichos procesos)
- Para áreas más específicas de la Ingeniería (Química, Mecánica,...) también interesarán otros balances (por ej. balances de cantidad de movimiento) que serán aprendidos en cursos posteriores a éste.
- En los estudios económicos de la actividad de las empresas también interesarán los balances de valor.

Sistemas de interés en la ingeniería de procesos

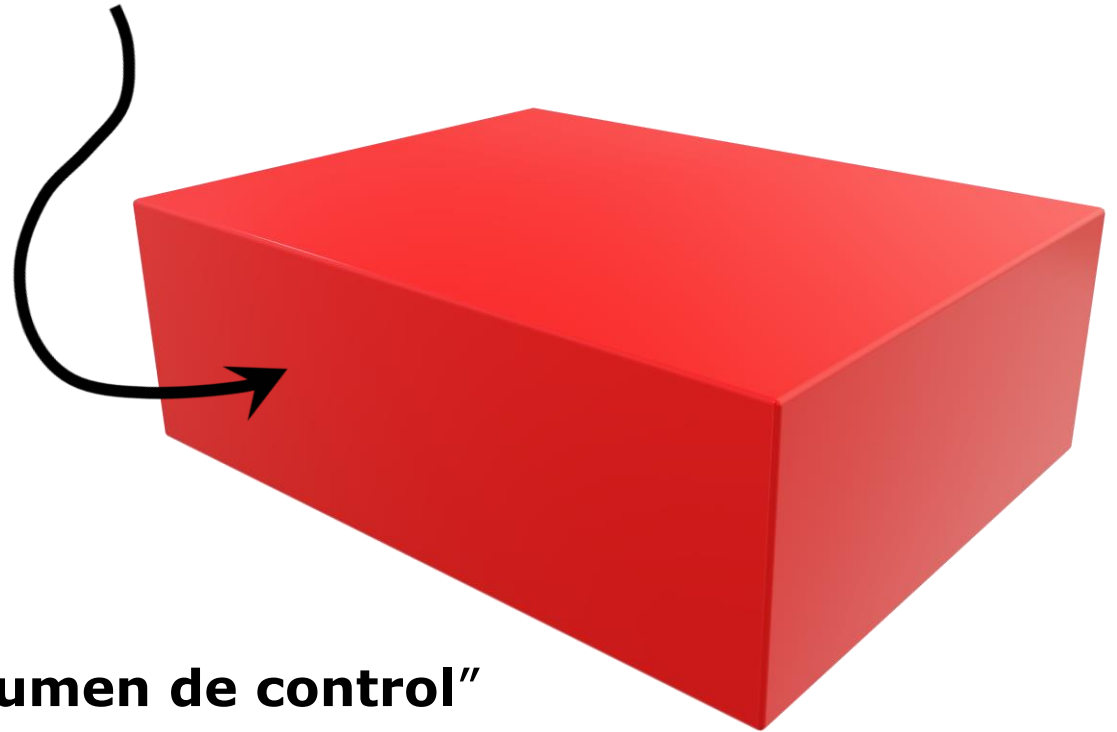
A menudo nos va a interesar estudiar

- una parte de una planta donde se lleva a cabo un proceso de transformación, o
- una parte del proceso, o
- un equipo donde se lleva a cabo una simple operación unitaria,
- o incluso una porción de materia dentro de un equipo



Sistemas de interés en la ingeniería de procesos

El sistema a estudiar tiene que estar bien definido (bien delimitado, por una **frontera** que lo separe del resto del universo)



Se usa el término “**volumen de control**” para referir al espacio (tridimensional) ocupado por el sistema.

Balances de Materia

¿Para qué se hacen Balances de Materia?

Para poder conocer:

- cantidades o flujos de materia de los materiales que participan de los procesos, o cantidades que se transforman como consecuencia de tales procesos
- cantidades presentes de esos materiales dentro de cierta área física o cambios en el "stock" (inventario)
- composición de diversas corrientes de materiales
- relaciones entre las anteriores (ej. tiempo necesario para llenar un depósito, tamaño requerido para almacenar las cantidades de materiales, relación necesaria entre ciertos flujos para asegurar ciertas condiciones)

¿Cómo “mediremos” la cantidad de materia?

masa

cantidad de
unidades

cantidad de
átomos

volumen ?

cantidad de
moléculas

Unidades usadas para «cantidad de materia»

- Una forma de medir la **cantidad de materia** es a través de la **masa**.
- Otra forma de medir la **cantidad de materia** es a través de la **cantidad de moles**.
- 1 mol es la cantidad de materia conformada por una cantidad de partículas elementales igual al **Número de Avogadro** ($6,02214076 \times 10^{23}$)

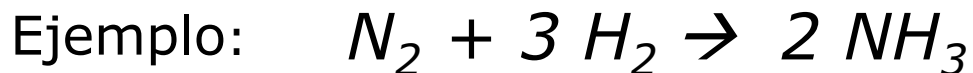
Una partícula elemental puede ser un átomo, una molécula, un ion, cualquier otra partícula o grupo especificado.

- Relación entre cantidad de masa y cantidad de moles:

$$[\text{cantidad de moles}] = \frac{[\text{cantidad de masa}]}{[\text{masa de un mol}]}$$

Unidades usadas para «cantidad de materia»

- Cuando ocurren reacciones químicas puede ser útil medir la **cantidad de materia** a través de la **cantidad de moles**.
- En las reacciones químicas, los cambios de moles de las especies intervinientes están relacionados entre sí por factores sencillos (números enteros en general pequeños) que surgen de los coeficientes estequiométricos de la reacción química.



	Nitrógeno	Hidrógeno	Amoníaco
Cambio de kgs por cada kg de nitrógeno consumido	- 1	- 0,215897	+ 1,215897
Cambio de moles por cada mol de nitrógeno consumido	- 1	- 3	+ 2

¿Se puede usar el volumen para medir la cantidad de materia?

- No. Una misma cantidad de materia puede tener diferentes volúmenes si varía la densidad.
- El volumen podría considerarse como proporcional a la masa si en todo el tiempo la densidad de cada una de las especies involucradas se mantuviera constante (y para ello se requiere que no ocurran reacciones químicas, ni cambios de fase, ni cambios de presión ni de temperatura)
- Para el caso de mezcla de gases de comportamiento ideal, la relación de volúmenes es igual a la relación de moles

$$V_i = N_i (RT/P) \therefore V_i/V_j = N_i/N_j$$

Balances globales - Balances parciales

Dependiendo de lo que querramos averiguar, convendrá hacer balances globales o balances parciales:

- ✓ **Balances Globales:** se considera la materia total, sin distinguir entre las sustancias presentes.
- ✓ **Balances Parciales:** se considera sólo un componente específico, el que a su vez puede ser:
 - un insumo del proceso (ej.: envases)
 - un sólo compuesto (ej.: un reactivo)
 - una fase (ej. la materia al estado líquido)
 - un radical o grupo de átomos (ej.: $\text{SO}_4^{=}$)
 - un tipo de átomos (ej.: Carbono)

Ecuaciones de balance de una propiedad extensiva P

Ecuación de balance entre dos "tiempos" diferentes

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

todos los cambios medidos entre t y t + Δt

Ecuación de balance diferencial (velocidades de cambio)

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

todas las velocidades medidas en el mismo instante

Ecuaciones de balance (...y si $P = M$)

Ecuación de balance entre dos "tiempos" diferentes

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

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

Ecuación de balance diferencial (velocidades de cambio)

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

todas las velocidades medidas en el mismo instante

¿La cantidad de materia es “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

En el contexto de la industria de procesos, en general, no ocurren reacciones nucleares.

¿Cuándo aplica “sin formación ni consumo”?

La cantidad de materia es invariante en los siguientes casos:
Depende de si consideramos cantidad de masa o

cantidad de moles, y de si tienen lugar reacciones químicas, o reacciones nucleares.

- Balance de masa global si no hay reacciones nucleares
- Balance de masa de una especie si no hay reacciones de ningún tipo
- Balance de moles (global o una especie) si no hay reacciones de ningún tipo
- Balance de un elemento (cantidad de átomos) si no hay reacciones nucleares

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 (δ) se refieren a lo que pasó entre el instante inicial y el instante final.

ΔM es el cambio de masa en el sistema en ese mismo lapso de tiempo

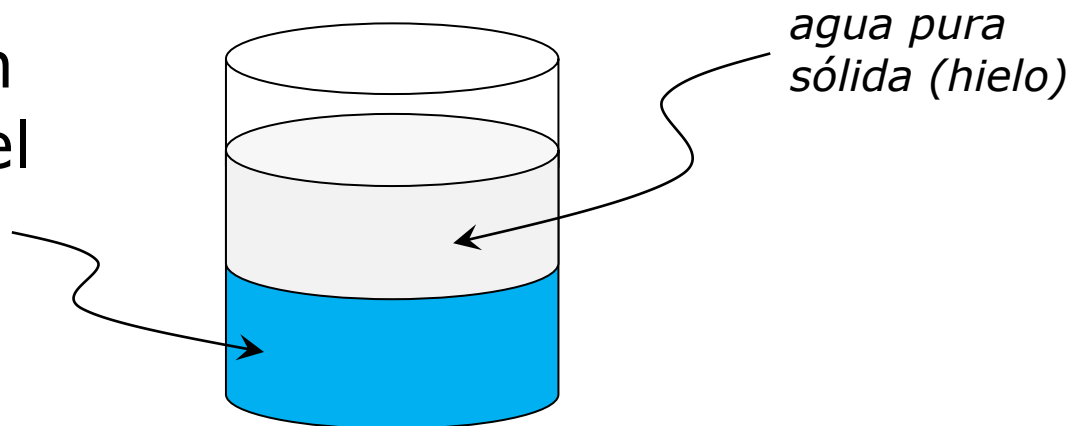
EJEMPLO

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).

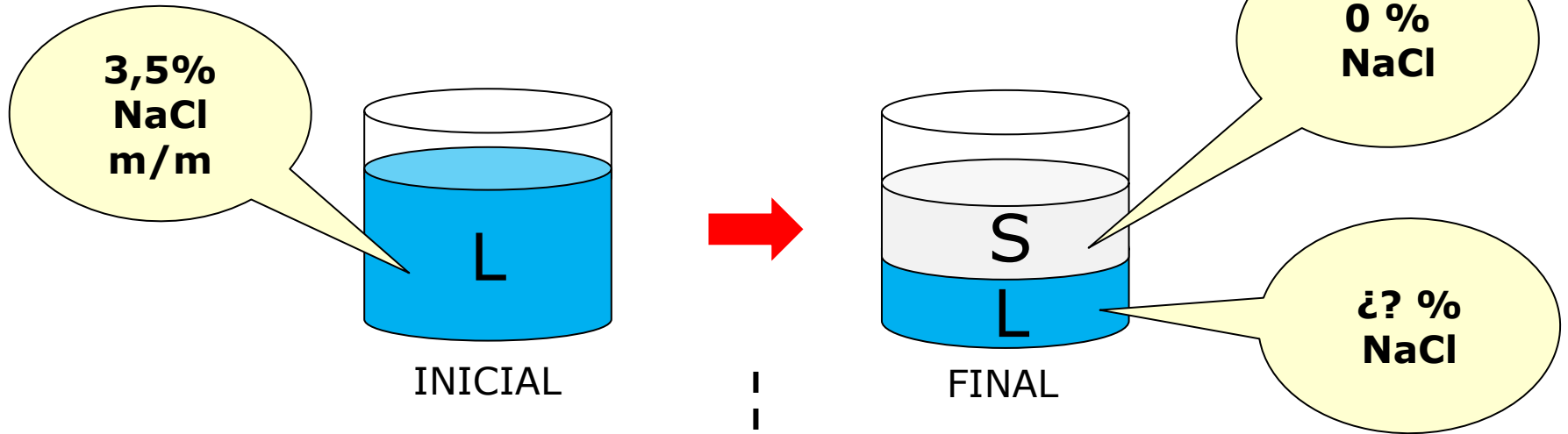
El agua marina se enfría hasta -2°C y como consecuencia se separan 53 kgs de hielo (agua pura al estado sólido).

¿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_{NaCl} ?

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

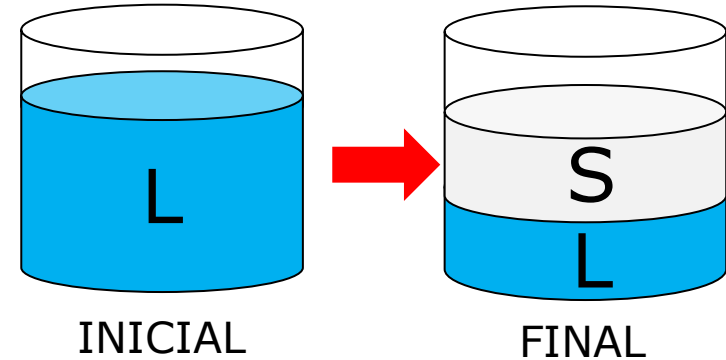
EJEMPLO

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?

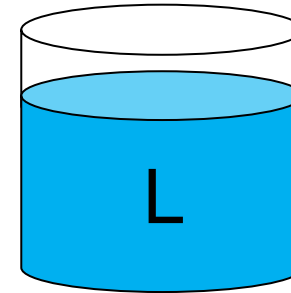
EJEMPLO

Proceso en lotes

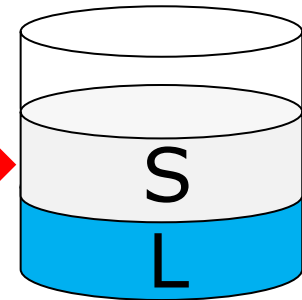
Estado Inicial (todo fase líquida)

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

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



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

... y se los suele representar con la letra ω

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

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

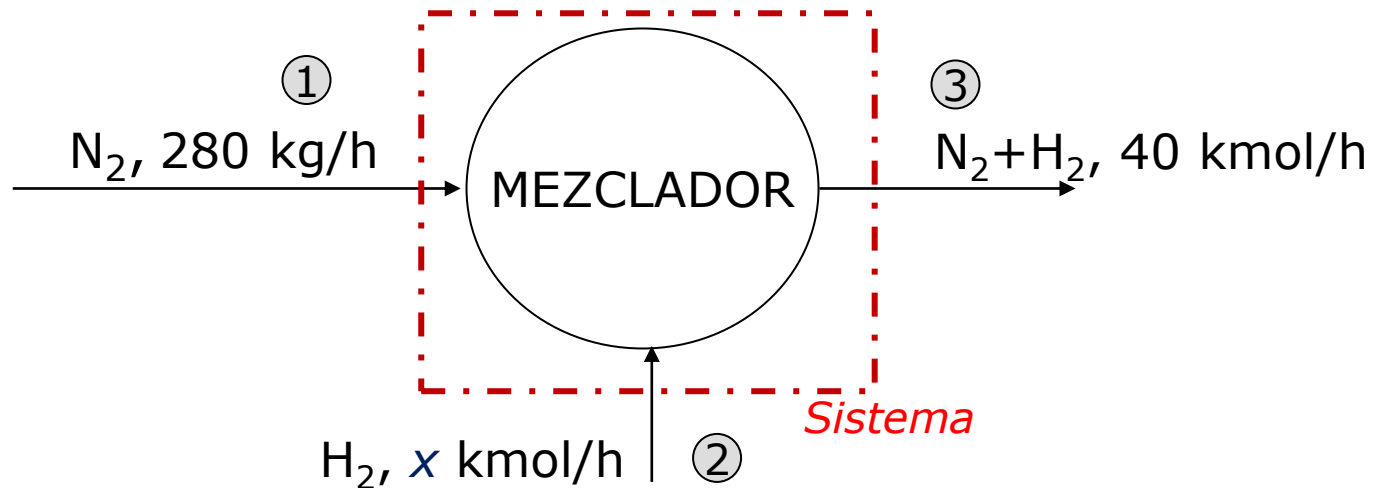
Una corriente de Nitrógeno, N_2 (g) de 280 kg/h se mezcla con una corriente de Hidrógeno, H_2 (g).

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)



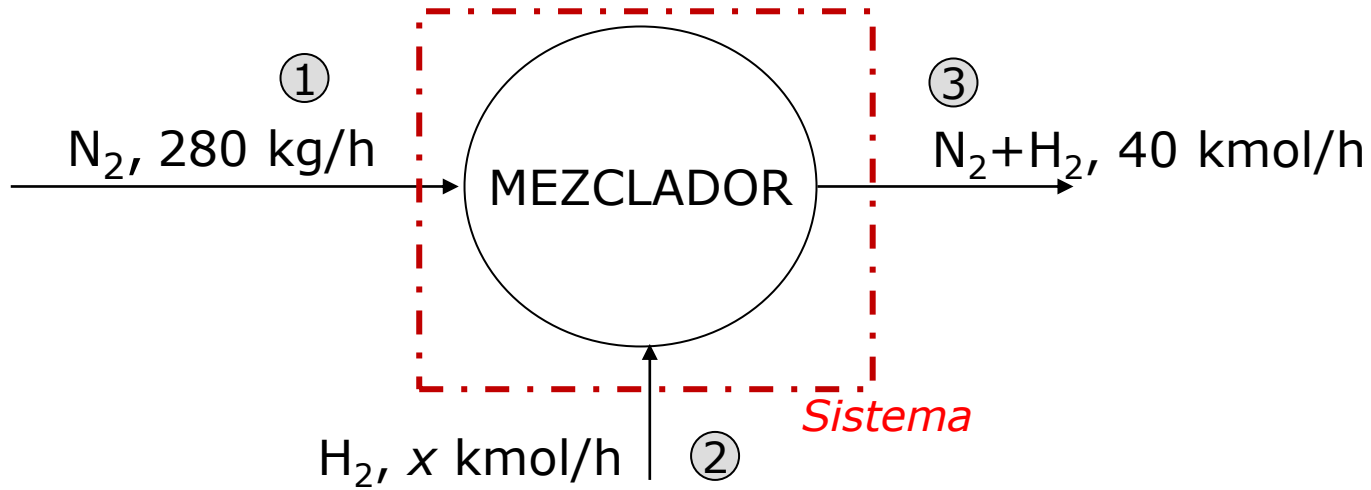
Para hallar x haremos balance de materia diferencial (velocidades de flujo) en el sistema: mezclador.

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

En este caso, como nos piden x expresado en kmol/h , escogeremos "moles".

Realizando el Balance de masa

Transformamos las unidades de masa a moles



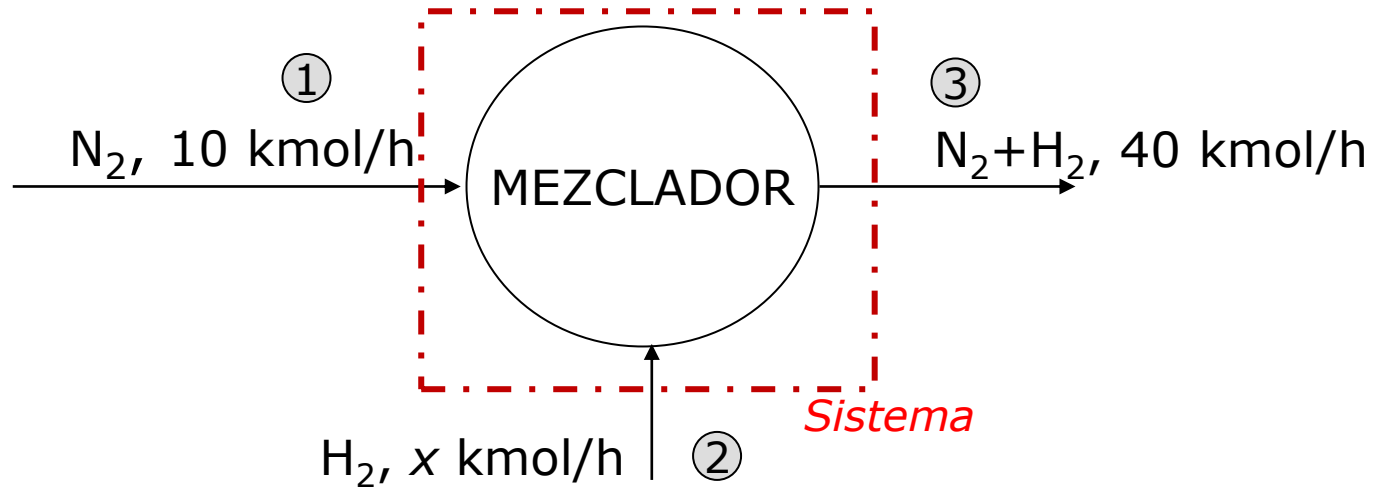
cantidad de moles = (cantidad de gramos)/PM

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

PM del nitrógeno

Realizando el Balance de masa

Transformamos las unidades de masa a moles



Tipo de régimen: ¿Variable o Estacionario? → ESTACIONARIO

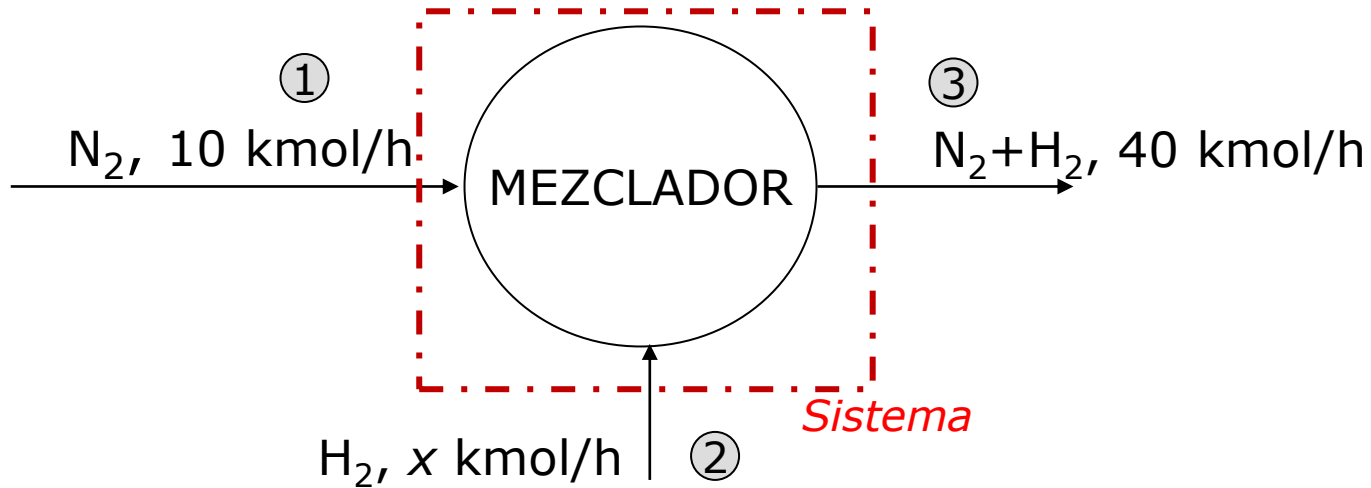
¿Propiedad Invariante?

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

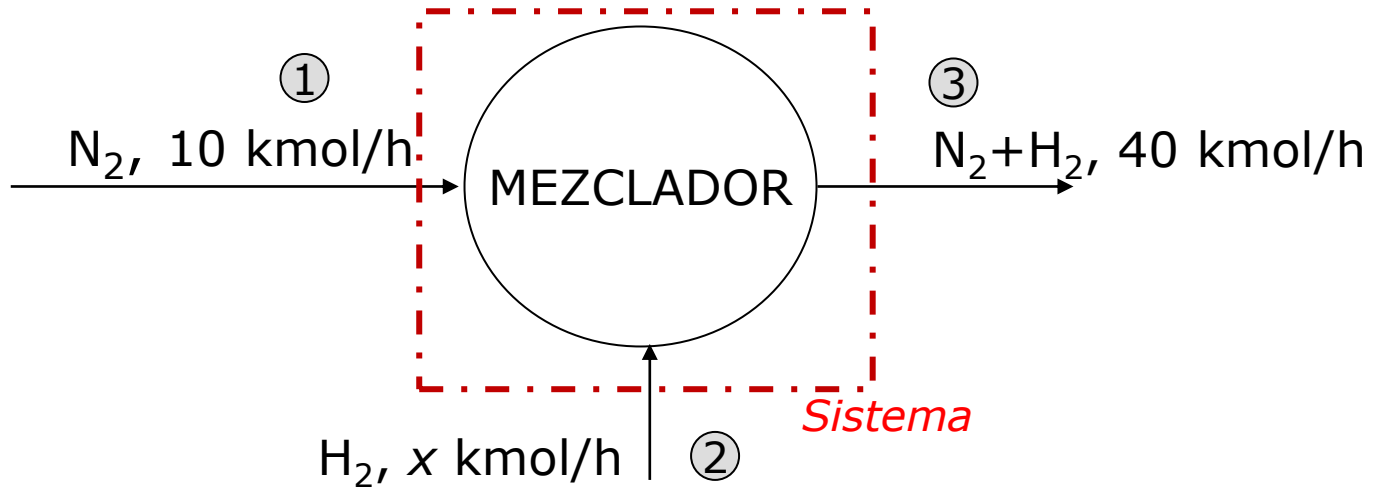
¿Propiedad Invariante? → SÍ, INVARIANTE

→ 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 H_2S , 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 H_2S 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°C)

Considere estado estacionario.



Para facilitar el análisis...

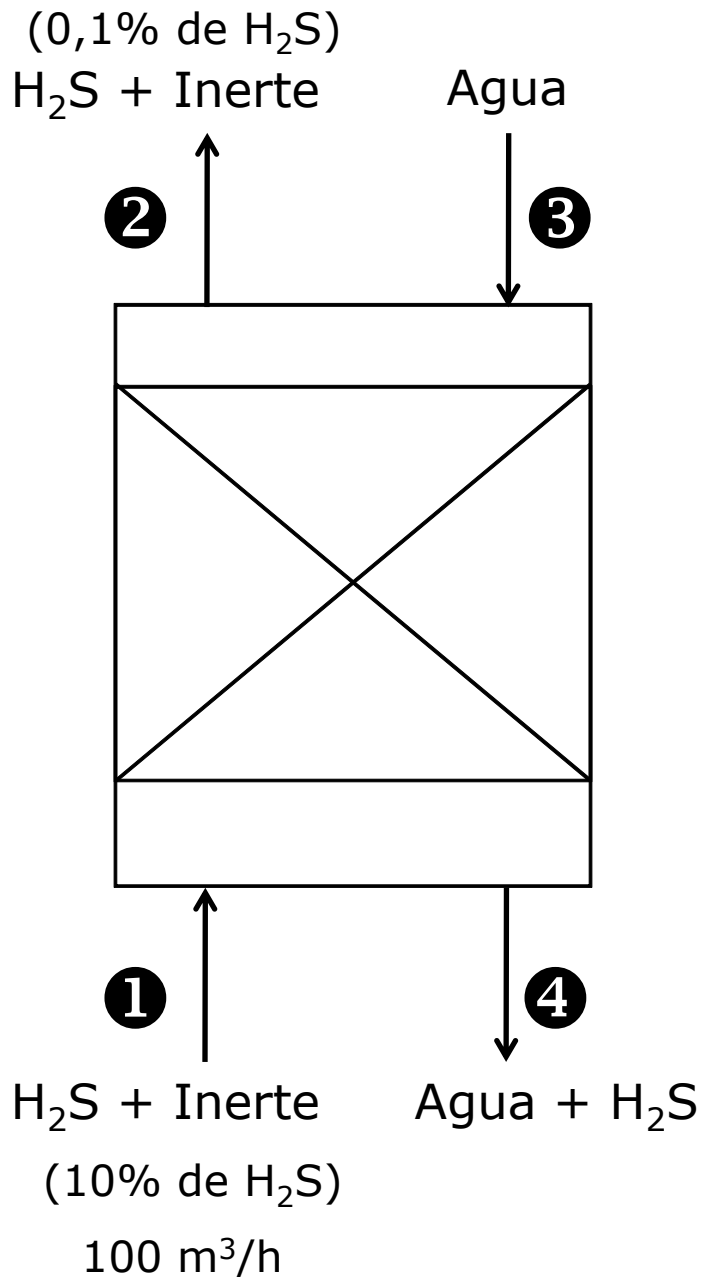
Dibujamos el diagrama de bloques (que obviamente, debe incluir todas las corrientes de materiales que participan)

Para facilidad de identificación, numeramos las corrientes...

incorporamos los datos de composición de los que disponemos

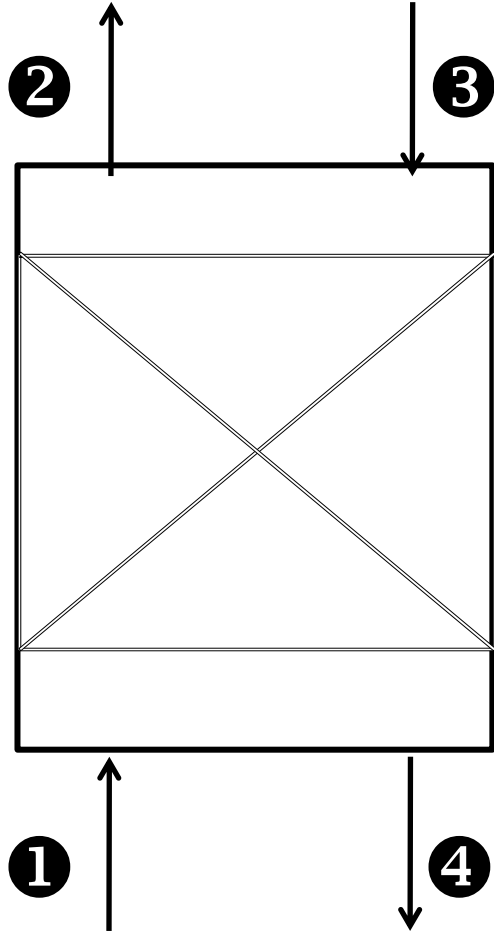
... e identificamos la incognita (lo que queremos averiguar):

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



(0,1% de H₂S)
H₂S + Inerte

Agua



H₂S + Inerte
(10% de H₂S)
100 m³/h

Agua + H₂S

"la cantidad de H₂S absorbida
cada segundo por el agua"

*"Como el sistema está en
estado estacionario y no hay
reacción química, todo el H₂S
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 H₂S absorbida
cada segundo por el agua" = ω_{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

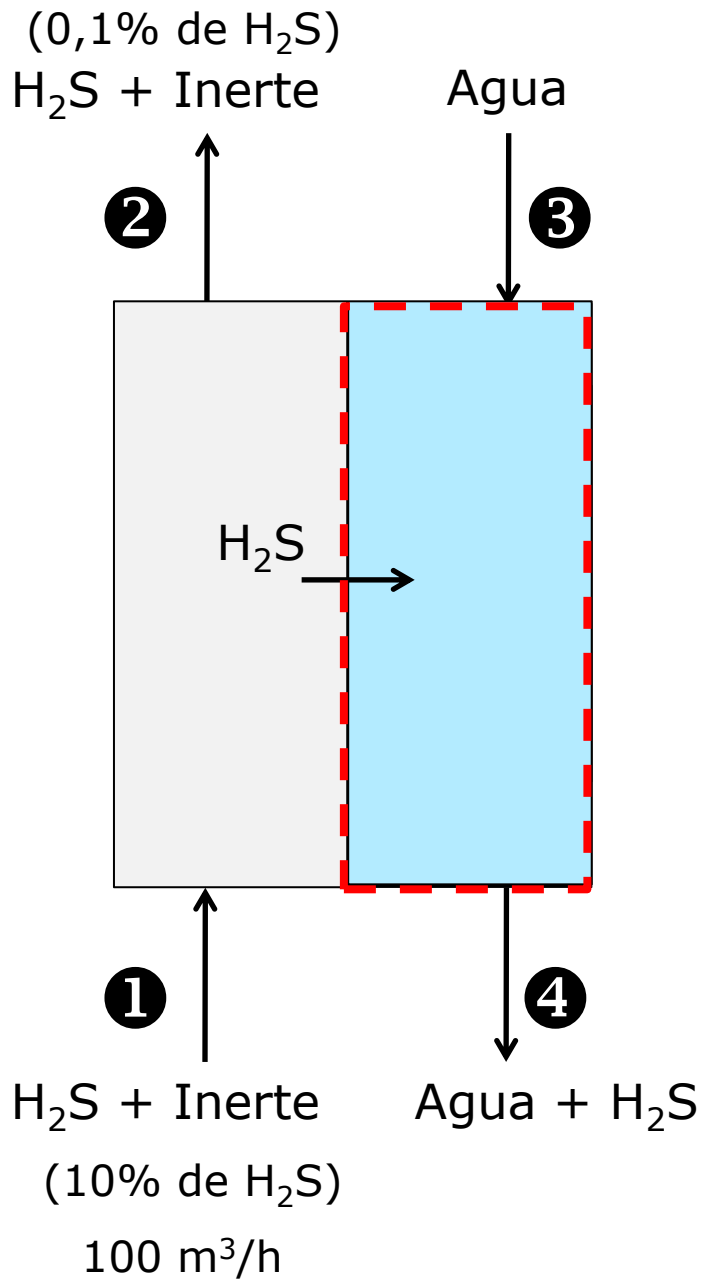
+ H_2S que se absorbe

+ H_2S que se genera en la fase L

= H_2S que se acumula en la fase L

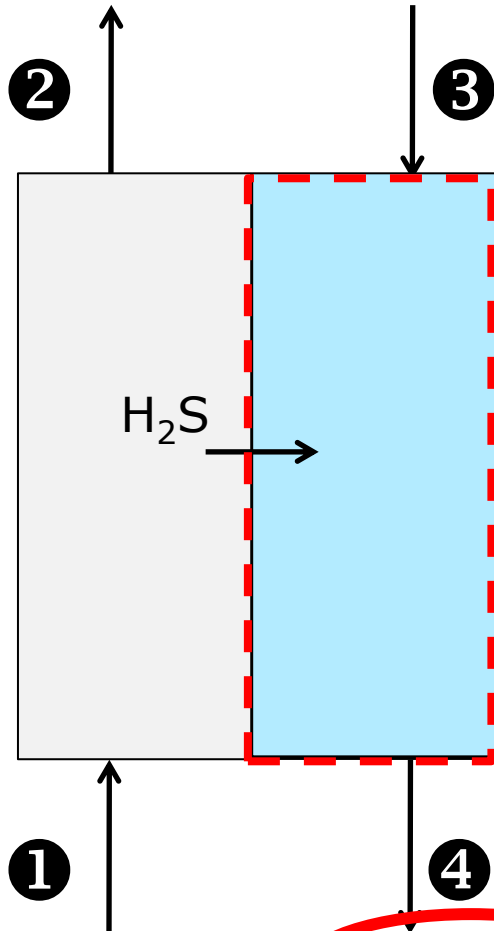
+ H_2S que se destruye en la fase L

+ H_2S que sale junto con el agua



(0,1% de H₂S)
H₂S + Inerte

Agua



H₂S + Inerte
(10% de H₂S)
100 m³/h

Agua + H₂S

“la cantidad de H₂S absorbida
cada segundo por el agua”

Haremos balance de H₂S

y escogemos como sistema a estudiar:

la fase líquida (L)

Balance de H₂S en la fase L

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

Igualando los términos no nulos:

“la cantidad de H₂S absorbida
cada segundo por el agua” = $\omega_{4,\text{H}_2\text{S}}$

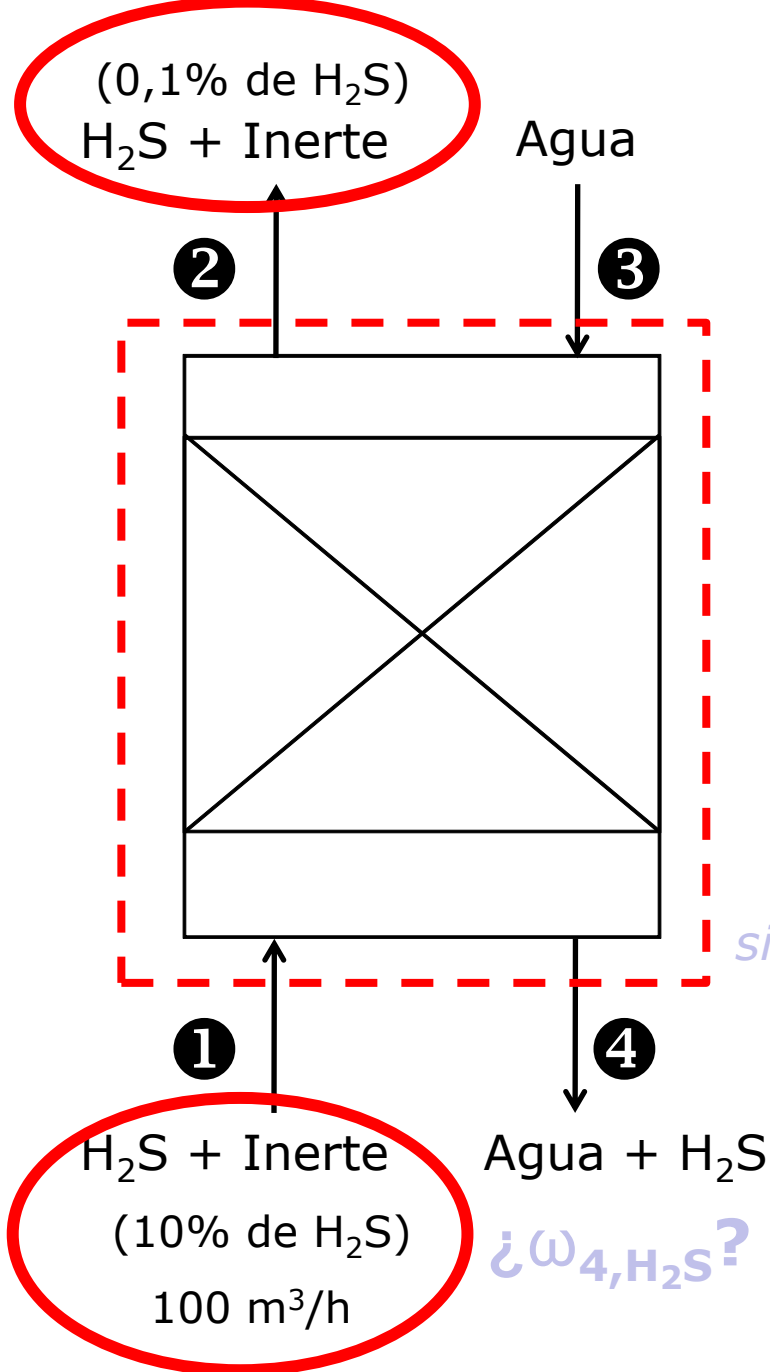
“la cantidad de H_2S absorbida cada segundo por el agua” es la que se va con el agua en la corriente ④.

Para determinar ω_{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 H₂S)
H₂S + Inerte

Agua

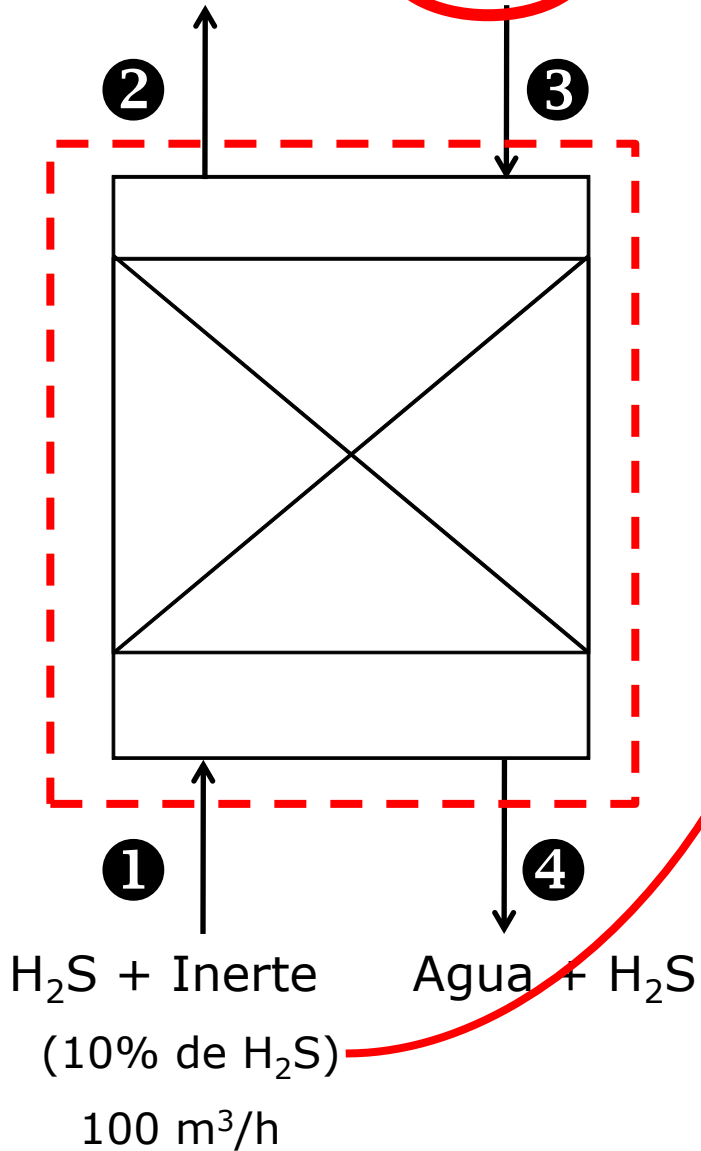
$$\omega_{1,H_2S} + \omega_{3,H_2S} = \omega_{2,H_2S} + \omega_{4,H_2S}$$

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

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

Cálculo de ω_{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 H₂S)
H₂S + 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 ω_{1,H_2S}

$$\omega_{1,H_2S} = 0,1 \omega_1 \quad (2) \quad \text{Pero, y... } \omega_1 ?$$

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

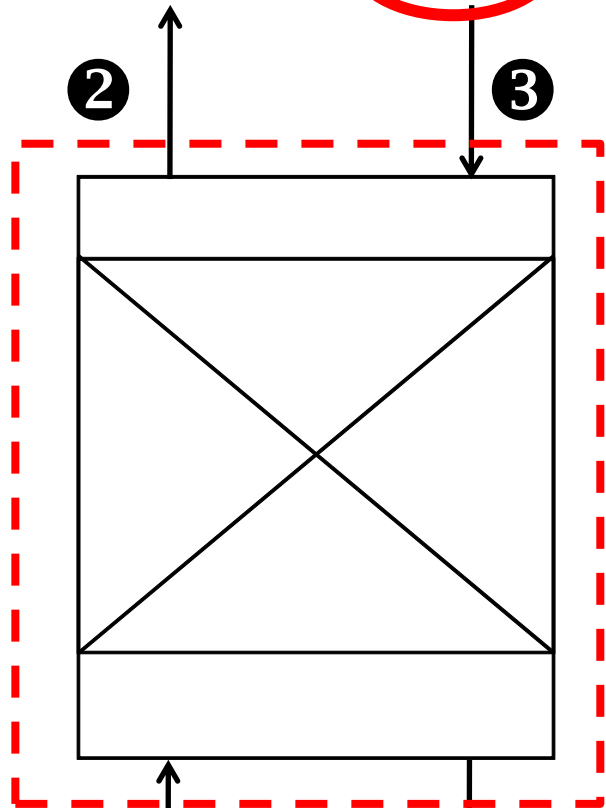
¿Cuántos litros son 100 m³?

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

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

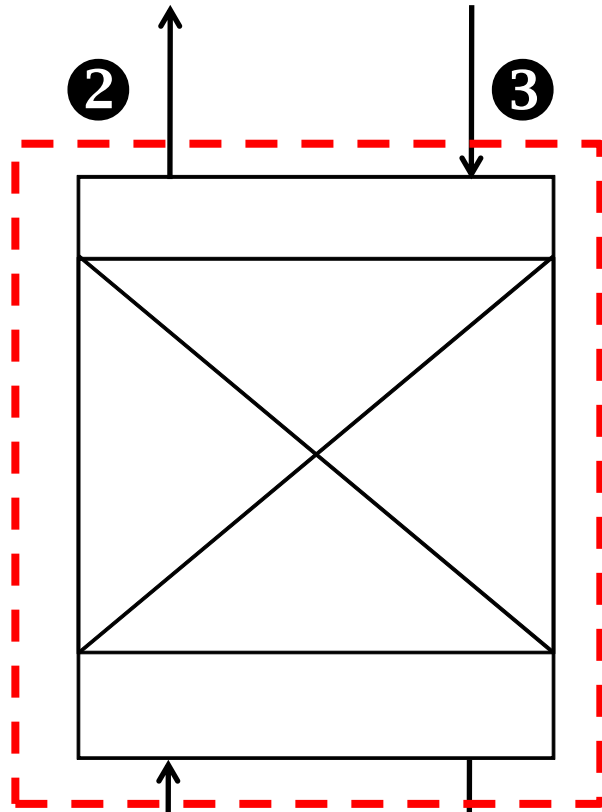
①
H₂S + Inerte
(10% de H₂S)
100 m³/h

④
Agua + H₂S



(0,1% de H₂S)
H₂S + Inerte

Agua



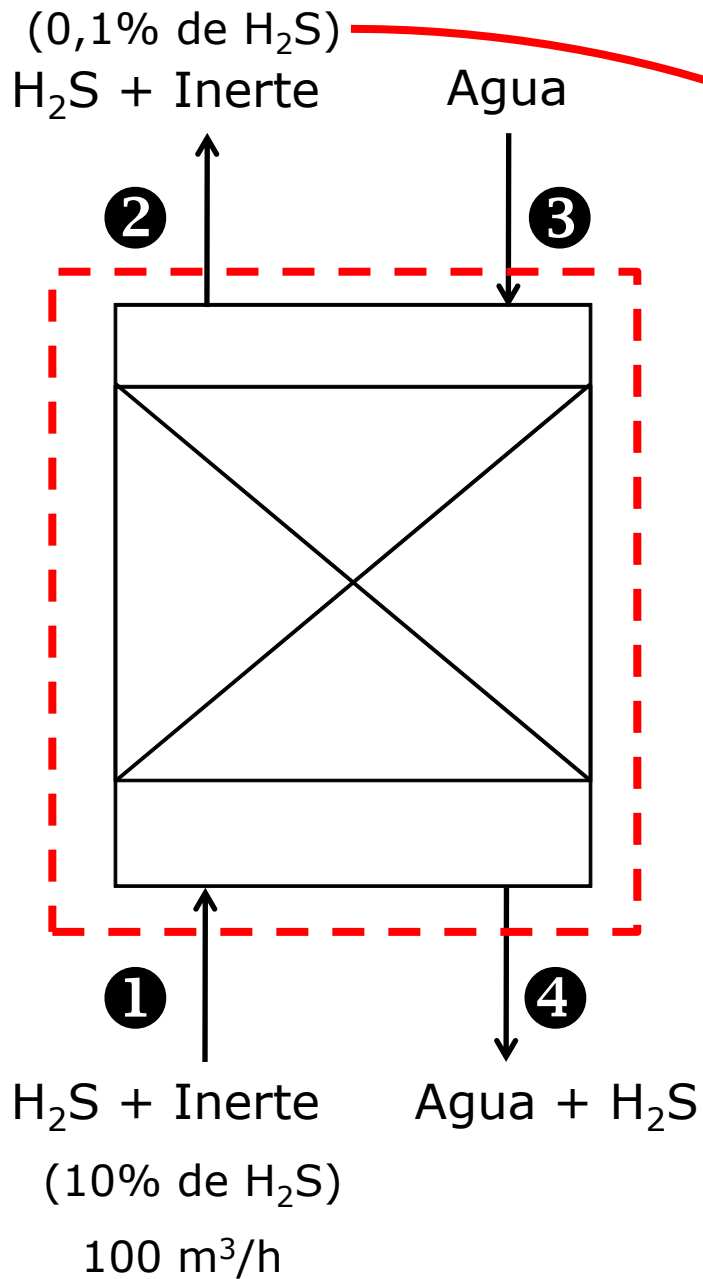
1
H₂S + Inerte
(10% de H₂S)
100 m³/h

4
Agua + H₂S

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

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 ω_{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)

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

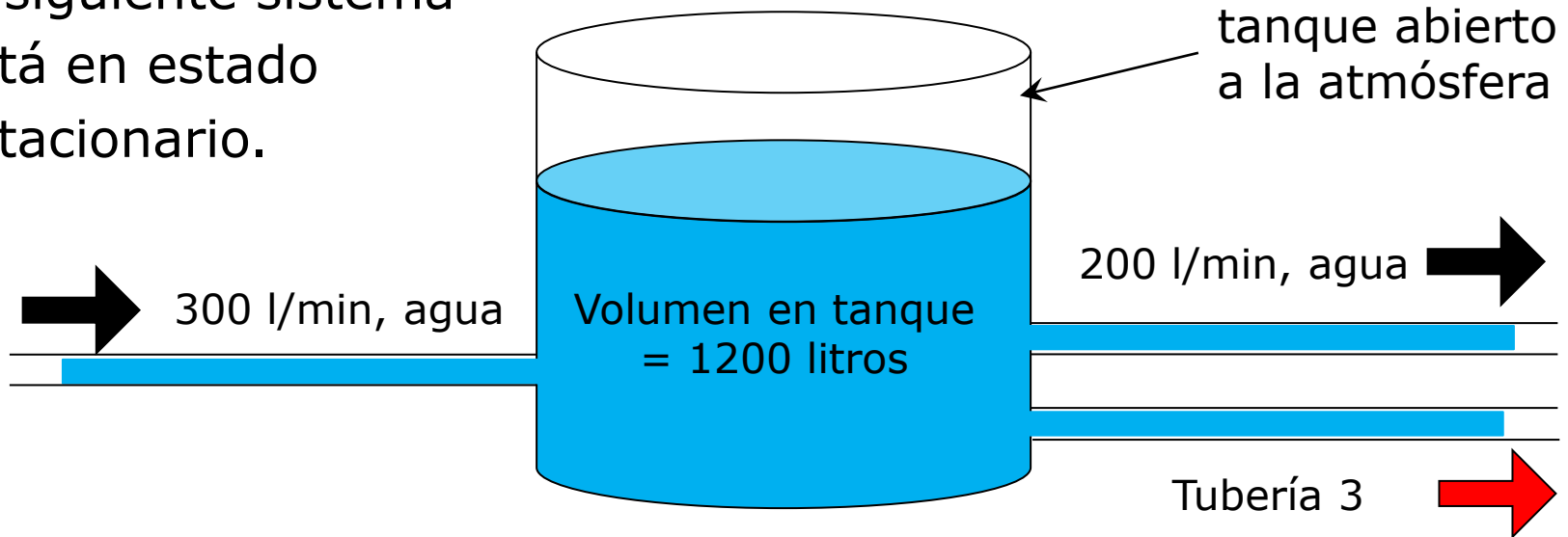
$\xrightarrow{\hspace{10em}}$
4,2 g/s

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

EJEMPLO

¿Un problema de Fluidodinámica?

El siguiente sistema está en estado estacionario.



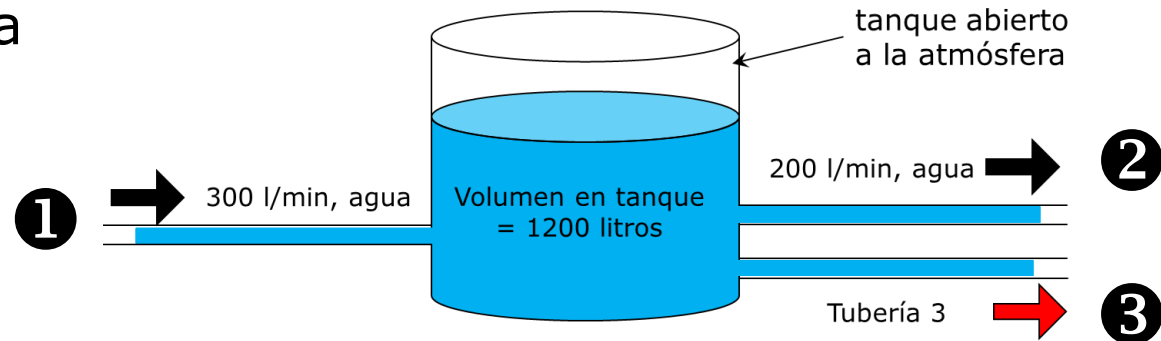
El tanque es cilíndrico, tiene un diámetro (interior) de 1,20 m y una altura total de 2 m. Las tuberías son cilíndricas y tienen un diámetro (interior) de 4,0 cm. El agua está a 20°C y 1 bar (en todo el sistema).

¿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 (ρ) de todas las corrientes son idénticas, por lo tanto

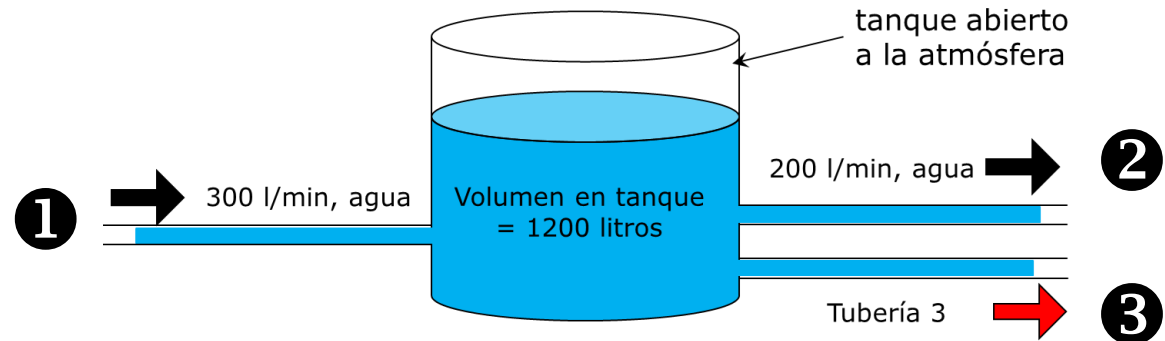
$$\omega_3/\rho = \omega_1/\rho - \omega_2/\rho$$

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

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

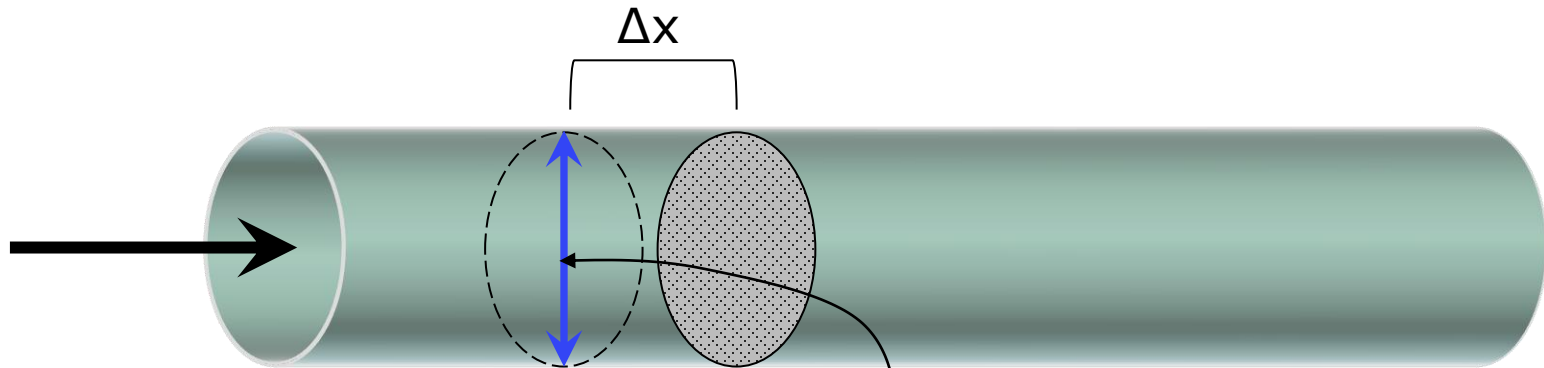
EJEMPLO

¿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) = $A \Delta x$

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

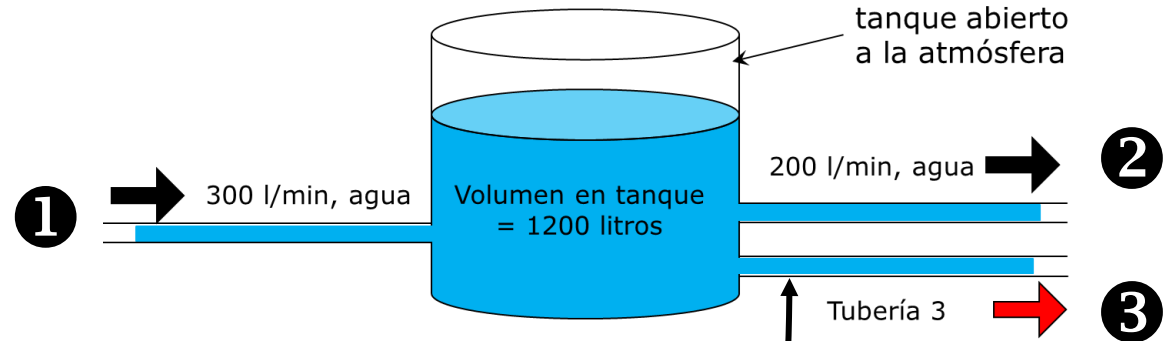
$q = (A \Delta x) / \Delta t = A (\Delta x / \Delta t) = u A$

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

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

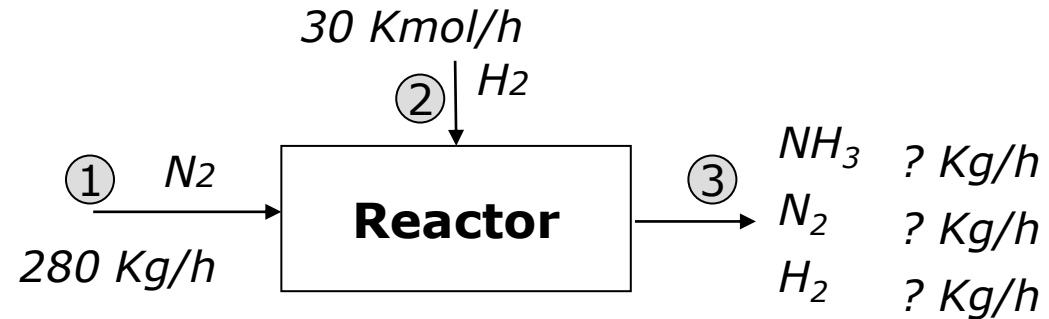
EJEMPLO

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



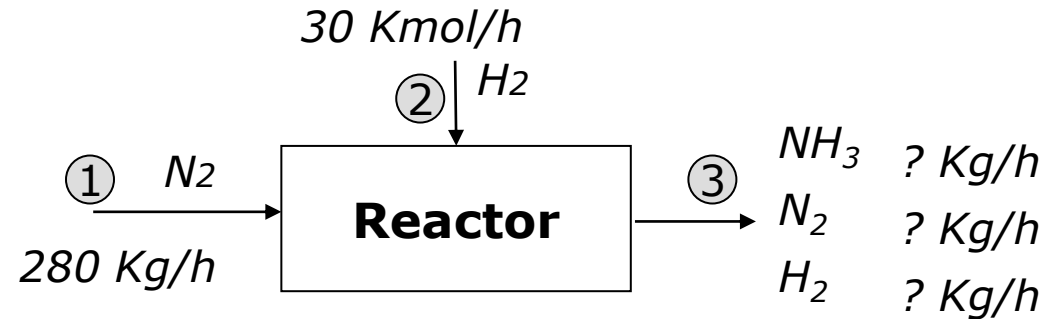
Numeramos las corrientes y ponemos los datos y las incógnitas

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 Kg/h) e H_2 (30 Kmole/h). La reacción procede hasta la conversión de un 25% de N_2 . Calcular los flujos máxicos 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"

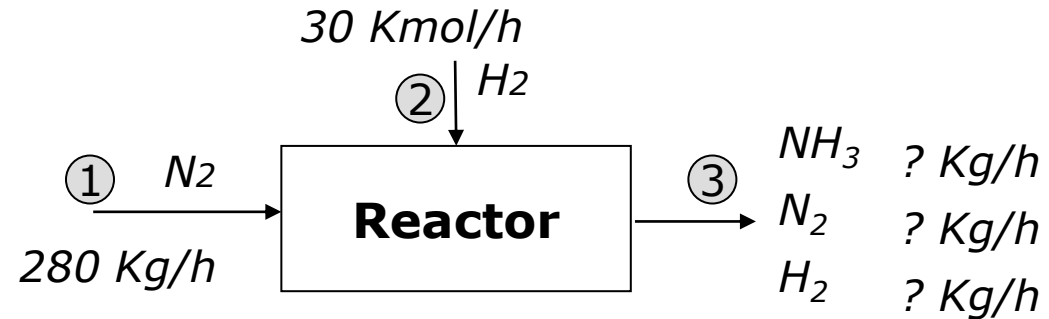
Base de cálculo a usar

¿Estudiamos cambios entre un Δt 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"

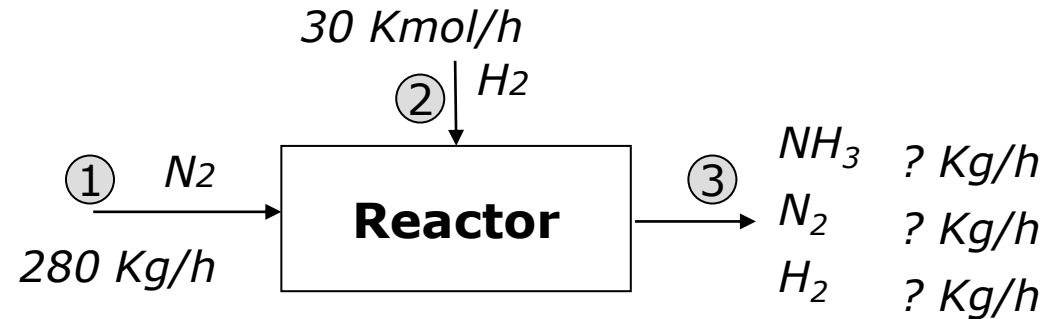
Base de cálculo a usar

¿Estudiamos cambios entre un Δt 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 Δt o velocidad de cambio?

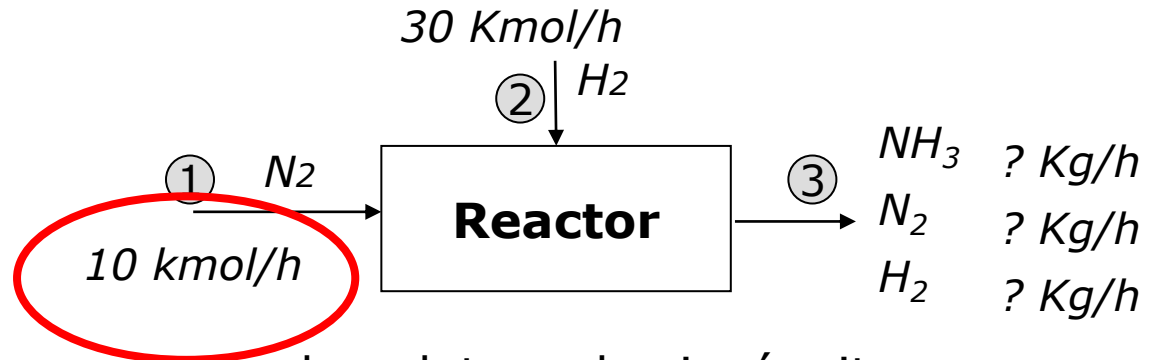
→ *Velocidades de cambio*

¿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 $N_2 = 10 \text{ kmol}$

Resolución

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

¿Reactivo limitante?

→ N_2 y H_2 están en proporciones estequiométricas (cualquiera de los 2 puede ser tomado como "limitante")

Ecuaciones de balance para las especies intervinientes (N_2 , H_2 , 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 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 (N_2 , H_2 , NH_3)

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

Balance de N_2 $\omega_{3,\text{N}_2} = 10 + 0 - 0,25 \times 10 = 7,5 \text{ kmol/h}$

Balance de H_2 $\omega_{3,\text{H}_2} = 30 + 0 - 3 \times (0,25 \times 10) = 22,5 \text{ kmol/h}$

Balance de 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