

Tema 2.

OPERACIONES BÁSICAS

MÓDULO I

ASPECTOS BÁSICOS DE LA INGENIERÍA DE PROCESOS

Fundamentos de Ingeniería Ambiental.
Elisabet Segredo Morales
Oliver Díaz López
Enrique González Cabrera

Tema 2. OPERACIONES BÁSICAS

Concepto de operación básica

Tipos de operaciones básicas en la ingeniería ambiental

Modos de operaciones, contacto entre fases y tipos de flujo.

Fundamentos de Ingeniería Ambiental.

Elisabet Segredo Morales

Oliver Díaz López

Enrique González Cabrera

Procesos industriales y ambientales.

Operación básica/unitaria:

Cada una de las acciones necesarias de transporte, adecuación y/o transformación de las materias primas implicadas en un proceso.

o bien

Una operación de separación o de tratamiento con características propias, bien definidas y una función específica diferenciada, que se aplica de forma general y repetida en muchos procesos químicos con la misma finalidad.

El conjunto de operaciones básicas interconectadas de forma óptima permite llevar a cabo un proceso químico industrial.



Procesos industriales y ambientales.

Operación básica/unitaria:

Las operaciones básicas tienen principios científicos comunes y tienen técnicas de cálculo semejantes, independientemente de la industria en la que se apliquen y del producto que esté siendo obtenido.

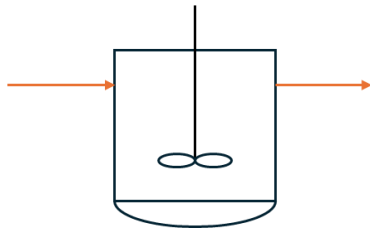
Ejemplos: filtración, absorción, adsorción, extracción, transporte de fluidos.



Procesos industriales y ambientales.

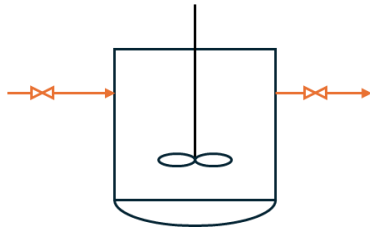
Operaciones continuas, discontinuas y semicontinuas:

Según el modo en que las corrientes de alimento y producto entren y salgan del equipo a lo largo del tiempo.



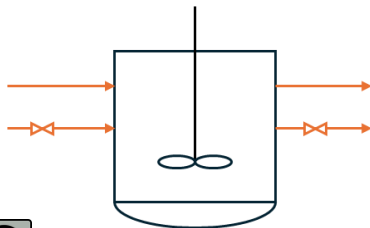
OPERACIÓN CONTINUA:

- Entrada y salida continua de las corrientes
- El tiempo no es una variable



OPERACIÓN DISCONTINUA:

- No hay entrada y salida continua de corrientes
- Periodos: Carga, descarga y/o transformación
- El tiempo es una variable



OPERACIÓN SEMICONTINUA:

- Entrada y salida continua de alguna de las corrientes
- Periodos: Carga, descarga y/o transformación para el resto de corrientes
- El tiempo es una variable

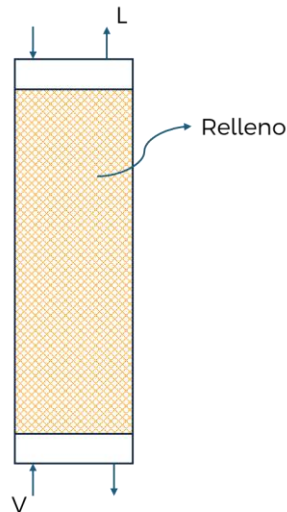


Procesos industriales y ambientales.

Contacto entre fases inmiscibles: continuo o discontinuo:

Un modo muy utilizado de conseguir este objetivo consiste en mezclar intensamente las fases inmiscibles para facilitar la transferencia de materia.

- **CONTACTO CONTINUO:** una de las dos fases fluye sobre la otra sin interrupción, ambas fases están en contacto permanente.



Sillas Intalox



Relleno helicoidal de vidrio



Anillos Lessing metálicos



Anillos Raschig de diferentes materiales y tamaños



Procesos industriales y ambientales.

- CONTACTO INTERMITENTE: discontinuo o por etapas. Se lleva a cabo mezclando ambas fases íntimamente durante un cierto tiempo, separándose a continuación y volviendo a someterlas al mismo proceso. Cada una de las veces que se mezclan se denominan etapas
Si en cada etapa dura lo suficiente para que se produzca equilibrio, se denomina etapa ideal.



Procesos industriales y ambientales.

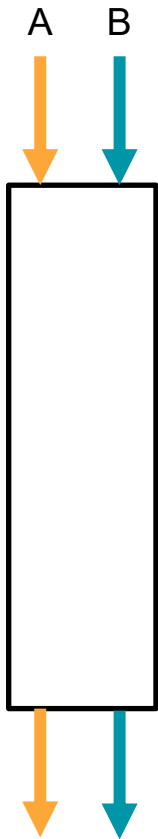
Flujo en paralelo, contracorriente y cruzado: .

- **FLUJO EN PARALELO:** cuando las corrientes se mueven en el mismo sentido y dirección. Nunca supera los resultados obtenidos en una única etapa ideal.
- **FLUJO EN CONTRACORRIENTE:** las corrientes se mueven en la misma dirección, pero en sentido opuesto. Los resultados obtenidos son equivalentes a la sucesión de varias etapas ideales.
- **FLUJO CRUZADO:** las corrientes se mueven en direcciones diferentes, por ejemplo, perpendiculares entre sí. Los resultados obtenidos son equivalentes a la sucesión de varias etapas ideales.

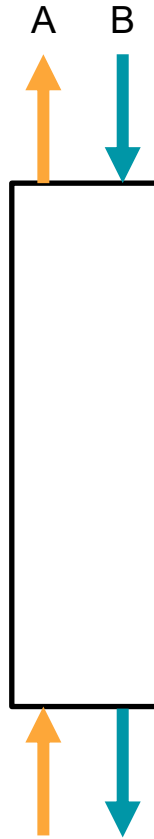


Procesos industriales y ambientales.

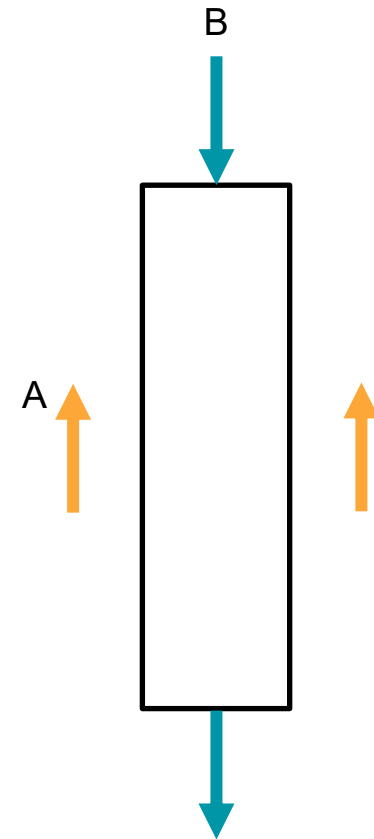
Flujo en paralelo, contracorriente y cruzado:



FLUJO PARALELO



FLUJO A CONTRACORRIENTE



FLUJO CRUZADO



Procesos industriales y ambientales.

Clasificación de las operaciones básicas:

Criterio	Fase y mecanismo	Operación básica
Según las fases que intervienen	Gas-Líquido	Absorción/deabsorción Rectificación Humidificación/deshumidificación Evaporación
	Líquido-Líquido	Extracción
	Líquido-Sólido	Adsorción/desorción Intercambio iónico Lixiviación Cristalización
	Gas-Sólido	Adsorción/desorción Secado Liofilización
Según el mecanismo controlante	Transferencia de materia	Rectificación Absorción/deabsorción Adsorción/desorción Extracción Lixiviación Intercambio iónico
	Transmisión de calor	Evaporación
	Transmisión de materia y calor	Humidificación/deshumidificación Secado Cristalización Liofilización



Procesos industriales y ambientales.

Clasificación de las operaciones básicas:

Métodos de trabajo en las operaciones básicas	
Modos de operación	Continua
	Discontinua
	Semicontinua
Modos de contacto entre fases	Continuo (relleno)
	Por etapas (pisos)
Tipos de flujo	En contracorriente
	En paralelo
	Cruzado
Régimen de funcionamiento	Estacionario
	No estacionario



Equilibrio entre fases.

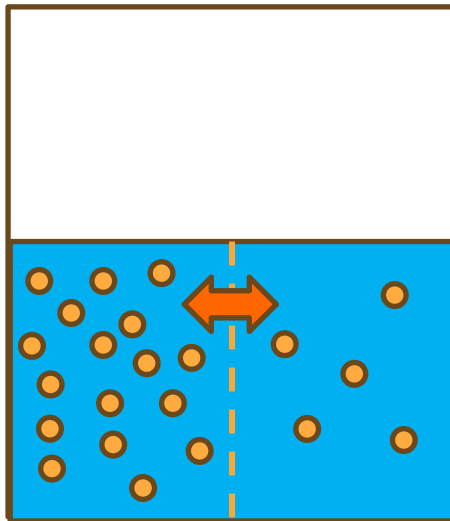
Si dos fases se ponen en contacto, se produce espontáneamente el transporte selectivo de componentes de una fase a otra para aproximarse a los valores de equilibrio establecidos por la termodinámica.

Un sistema monofásico homogéneo consigue su equilibrio cuando todos sus componentes tienen una concentración uniforme.

Cuando alguno de los componentes está a diferente concentración se establece un gradiente (diferencia de concentración) que es la fuerza impulsora para que se produzca una transferencia desde la zona de mayor concentración a la zona de menor, hasta que se iguale en ambas zonas.

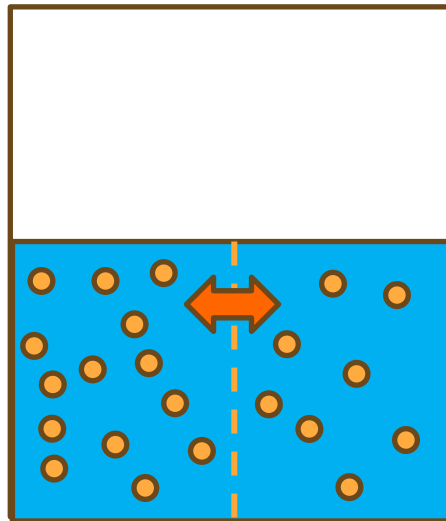


Equilibrio entre fases.



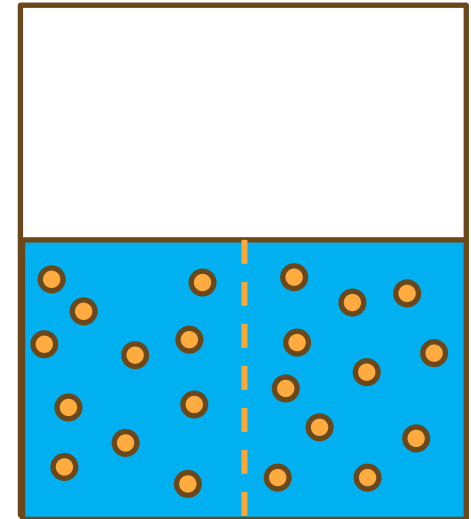
Inicial

Diferencia de concentraciones
Gradiente de concentraciones



Transferencia de materia

Se puede producir transferencia del
soluta o del disolvente.



Final

Equilibrio
Se igualan las concentraciones



Equilibrio entre fases.

En sistemas multifásicos la situación se complica.

La condición final de equilibrio no implica la igualdad de las concentraciones de todos los componentes en todas las fases, sino que, dependiendo de las condiciones de temperatura y presión, cada componente se reparte entre las fases de acuerdo con ciertas proporciones

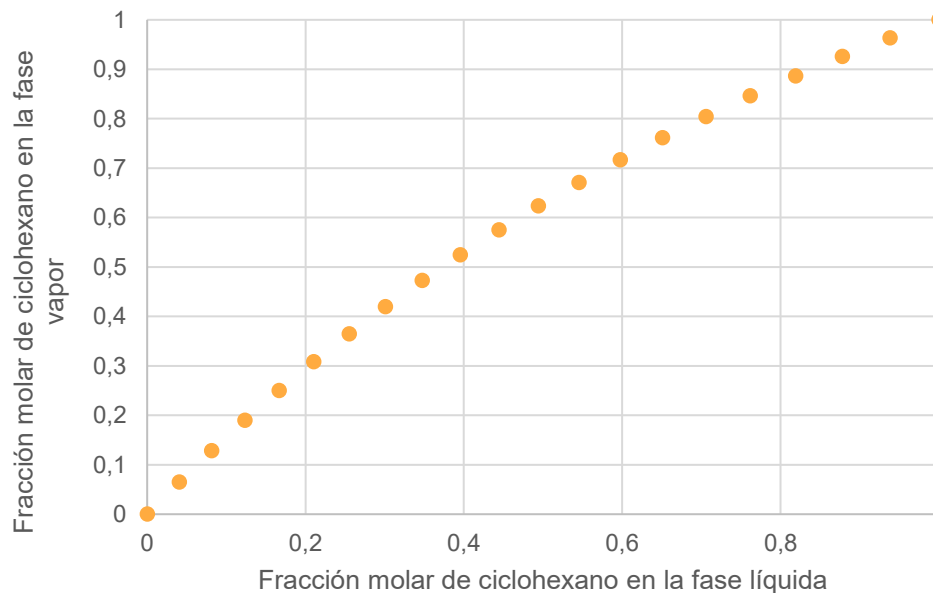


Diagrama de equilibrio de un sistema ciclohexano-(n-heptano) a 0,95 bar.



Equilibrio químico.

Una reacción química es un proceso por el cual los átomos de los reactivos se reordenan y combinan para formar productos según unas proporciones definidas que se representan por las relaciones estequiométricas.

$aA + bB \rightarrow cC + dD$	irreversible, los productos no vuelven a combinarse para formar reactivos
$aA + bB \leftrightarrow cC + dD$	Reversible, los productos pueden volver a combinarse para dar los reactivos

Donde A y B son reactivos, C y D productos y a, b, c y d son los coeficientes estequiométricos.



Equilibrio químico.

En reacciones reversibles los reactivos y los productos pueden coexistir permanentemente en cantidades relativas fijas.



La descripción más precisa de estas situaciones está contenida en la constante de equilibrio, que para sistemas ideales a temperaturas constantes:

$$K = \frac{C_C^c \cdot C_D^d}{C_A^a \cdot C_B^b}$$

Donde A y B son reactivos, C y D productos y a, b, c y d son los coeficientes estequiométricos.



Cinética química.

El equilibrio químico determina el hasta dónde se transforman las especies que participan en una reacción, pero no el tiempo que se tarda en alcanzar dicha transformación.

Velocidad de reacción: número de moles de reactivo/producto que se consumen/generan por unidad de tiempo y volumen de mezcla de reacción.



$$-r_A = -\frac{1}{V} \frac{dN_A}{dt}$$

Donde:

V: volumen de reacción

N_A : número de moles del reactivo o producto

t: tiempo

Para una mezcla de volumen o densidad constante:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt}$$

Donde:

C_A : concentración de reactivo o producto

El signo negativo indica desaparición, se aplica cuando la velocidad se refiere a alguno de los reactivos. Cuando se refiere a los productos, debe eliminarse el signo negativo



Cinética química.

La velocidad de reacción nos indicará el tamaño del reactor, el tiempo que tardará la reacción en llevarse a cabo.

La velocidad no se puede determinar de forma fiable a partir de la estequiometría. Las ecuaciones de velocidad deben ser empíricas, es decir, obtenerse a partir de experimentos.

Las velocidades de reacción de reacciones homogéneas suelen depender de las concentraciones de los reactivos y productos elevadas a determinados exponentes → órdenes de reacción.



Cinética química.

Las velocidades de reacción de reacciones homogéneas suelen depender de las concentraciones de los reactivos y productos elevadas a determinados exponentes → órdenes de reacción.



Donde α y β son los órdenes de reacción de A y B respectivamente y $n = \alpha + \beta$ es el orden global de la reacción.

k es la constante de velocidad

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

Donde:

k_0 : factor de frecuencia o preexponencial

E_a : Energía de activación

R: constante de los gases ideales

T: temperatura

El orden de reacción no tiene por qué coincidir con los coeficientes estequiométricos.



Operaciones básicas físicas.

En todas las operaciones básicas físicas hay transporte de al menos una de las tres propiedades extensivas fundamentales; materia, energía y/o cantidad de movimiento.

Aquella propiedad cuyo transporte sea más lento será la etapa controlante y la que determine la velocidad global del proceso. Es la que se toma en cuenta en el diseño de equipos.

El diseño de las instalaciones en las que se llevan a cabo las operaciones básicas requiere conocer la velocidad con la que se realiza el transporte de estas propiedades, flujo de propiedad.



Operaciones básicas físicas.

Flujo de propiedad.

$$\text{Flujo de propiedad} = \frac{\text{cantidad de propiedad extensiva transportada}}{\text{tiempo} \cdot \text{superficie}}$$

Propiedad extensiva	Flujo de propiedad
Materia (kg)	kg/m ² s
Energía (J)	W/m ²
Cantidad de movimiento (kg·m/s)	N/m ²

El flujo de propiedad se puede producir en el seno de una sola fase (líquida o gaseosa) o por contacto entre fases no miscibles como consecuencia del gradiente de concentración de propiedad.



Operaciones básicas físicas.

Concentración de propiedad.

$$\text{Concentración de propiedad} = \frac{\text{cantidad de propiedad}}{\text{Volumen}}$$

Propiedad extensiva	Concentración de propiedad
Materia (kg)	Densidad ρ (kg/m ³)
Energía (J)	$\rho C_p T$ J/m ³
Cantidad de movimiento (kg·m/s)	ρV kg/m ² s



Mecanismos de transporte.

El transporte de la masa, la energía y la cantidad de movimiento puede llevarse a cabo mediante dos mecanismos, dependiendo de cómo sea el régimen de circulación del fluido.

- Transporte molecular (lento): las tres propiedades extensivas se transportan debido al movimiento de moléculas individuales. Es el que se produce en flujos en reposo o que circulan en régimen laminar.
- Transporte turbulento (rápido): Las tres propiedades extensivas se transportan principalmente debido al desplazamiento de grupos de moléculas. Se produce en fluidos que circulan en régimen turbulento.



Mecanismos de transporte.

Experimento de Reynolds:

Hizo circular un fluido por una conducción de vidrio al que le inyectaba en su centro una fina capa de colorante, observando la permanencia de dicha vena a lo largo de la conducción:

A velocidades bajas:



- No se produce mezcla.
- Las partículas del fluido circulan siguiendo una trayectoria recta
- No hay mezcla macroscópica del fluido
- El mecanismo de transporte de las propiedades extensivas: Transporte molecular.
- El régimen de circulación del fluido en estas condiciones: Régimen laminar.

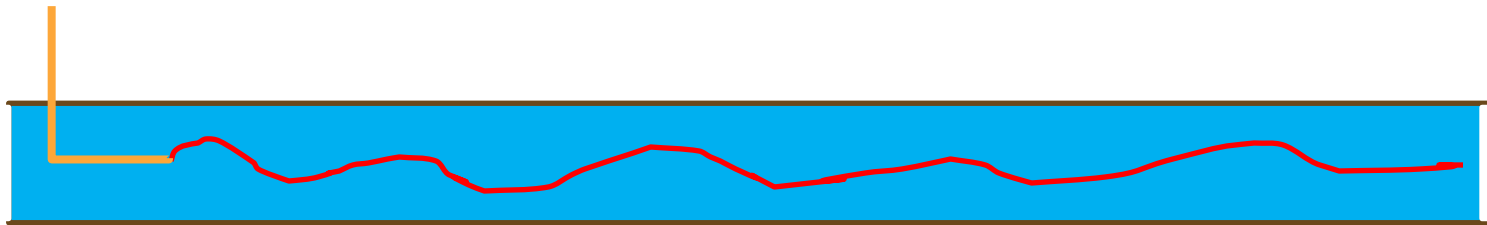


Mecanismos de transporte.

Experimento de Reynolds:

Hizo circular un fluido por una conducción de vidrio al que le inyectaba en su centro una fina capa de colorante, observando la permanencia de dicha vena a lo largo de la conducción:

A velocidades mayores:



- La trayectoria del fluido se hace inestable, se ondea y ensancha
- El régimen de circulación es de transición.

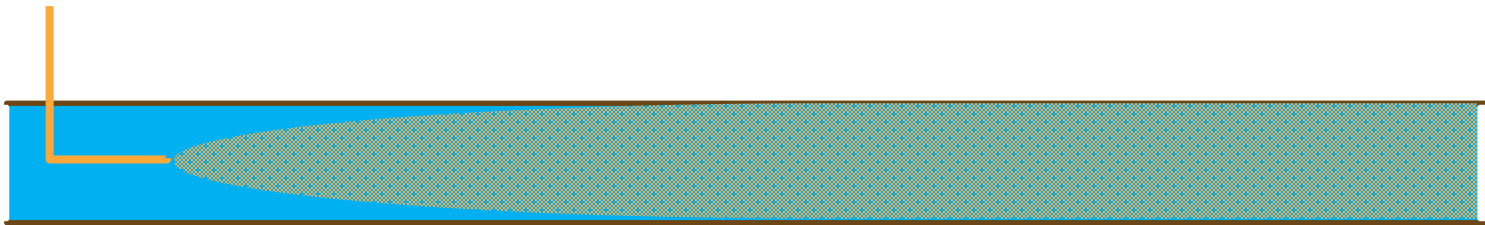


Mecanismos de transporte.

Experimento de Reynolds:

Hizo circular un fluido por una conducción de vidrio al que le inyectaba en su centro una fina capa de colorante, observando la permanencia de dicha vena a lo largo de la conducción:

A velocidades altas:



- La vena se destruye rápidamente, dispersándose en todas las direcciones, mezcla rápida.
- Los elementos del fluido se desplazan en todas las direcciones.
- El mecanismo de transporte de las propiedades extensivas en el transporte turbulento.
- El régimen de circulación es Régimen turbulento.



Mecanismos de transporte.

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\mu}$$

Donde:

- v es la velocidad media del fluido (Q/S)
- ρ es la densidad del fluido
- D es el diámetro de la conducción
- μ es la viscosidad del fluido.

En función del valor del número de Reynolds:

Régimen	Re
Laminar	< 2100
Transición	2100-4000
Turbulento	> 4000



Transporte molecular.

Para el mecanismo de transporte molecular los flujos de propiedad se expresan a través de las siguientes leyes

Propiedad	Ley
Materia	Ley de Fick
Energía	Ley de Fourier
Cantidad de movimiento	Ley de Newton

LEY DE FICK:

Ec. Cinética que expresa la velocidad de transporte de materia por mecanismo molecular. Se aplica al transporte de un componente a través de un fluido en reposo o en circulación mediante un régimen laminar en el que existe un gradiente de concentración.



Transporte molecular.

LEY DE FICK:

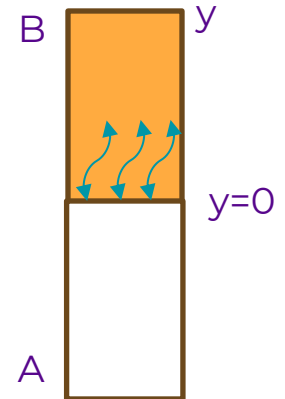
Ec. Cinética que expresa la velocidad de transporte de materia por mecanismo molecular. Se aplica al transporte de un componente a través de un fluido en reposo o en circulación mediante un régimen laminar en el que existe un gradiente de concentración.

$$j_{Ay} \left(\frac{kg_A}{m^2s} \right) = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy}$$

$$J_{Ay} \left(\frac{mol_A}{m^2s} \right) = -D_{AB} \frac{dC_A}{dy}$$

Donde:

- j_{Ay} o J_{Ay} Flujo de materia en la dirección y
- D_{AB} coeficiente de difusión molecular, es una propiedad física del fluido (m^2/s).
- $\frac{d\rho_A}{dy}$ o $\frac{dC_A}{dy}$ gradiente de concentración de materia en la dirección y
- ρ_A o C_A concentración de materia (kg/m^3 o mol/m^3)



Transporte molecular.

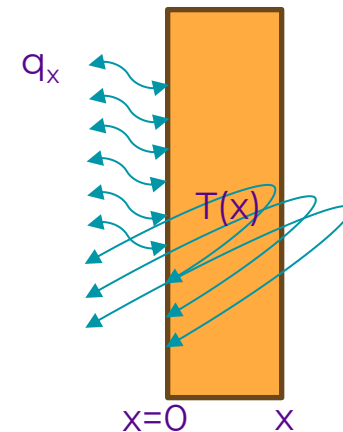
LEY DE FOURIER:

Ec. Cinética que expresa la velocidad de transporte de energía por mecanismo molecular. Se aplica tanto a fluidos en reposo o en régimen laminar y a sólidos.

$$q_x \left(\frac{J}{m^2 s} \right) = -k \frac{dT}{dx}$$

Donde:

- q_x Flujo de energía en la dirección x ($J/m^2 s$ ó W/m^2)
- k Conductividad térmica o calorífica, propiedad física del material ($J/m \cdot s \cdot K$)
- $\frac{dT}{dx}$ gradiente de temperatura en la dirección x



Transporte molecular.

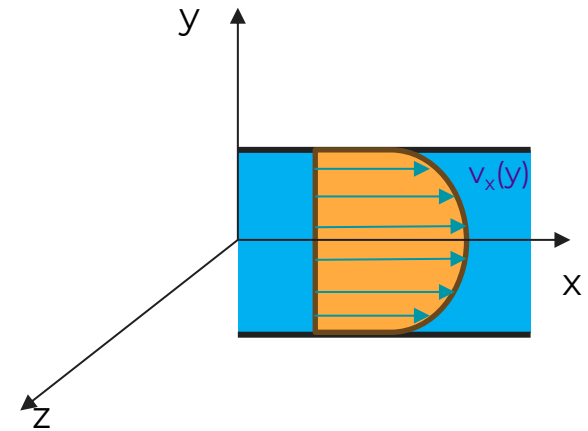
LEY DE NEWTON:

Ec. Cinética que expresa la velocidad de transporte de cantidad de movimiento por mecanismo molecular.

$$\tau_{yx} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}} \right) = -\mu \frac{dv_x}{dy}$$

Donde:

- τ_{yx} Flujo de cantidad de movimiento N/m²
- v_x velocidad en la dirección x (m/s)
- $\frac{dv_x}{dy}$ gradiente de velocidad en la dirección y
- μ viscosidad dinámica del fluido. Propiedad física del fluido, medida de a resistencia del fluido a moverse, Pa·s (kg/m·s)



Transporte turbulento.

En el flujo turbulento se requiere un estudio empírico que da como resultado los coeficientes empíricos, en función de los cuales se expresan los flujos de las tres propiedades. Son función de las propiedades del flujo, del fluido y de la geometría del sistema

Propiedad	
Materia	
Energía	
Cantidad de movimiento	

Donde:

- k_p o k_c Coeficiente individual de transferencia de materia (m/s). Función de las propiedades del flujo, del fluido y de la geometría del sistema
- h : Coeficiente individual de transmisión de calor (J/m² s K)
- f factor de rozamiento (adimensional). Además, depende de la velocidad y de la rugosidad de la conducción



Equilibrio físico.

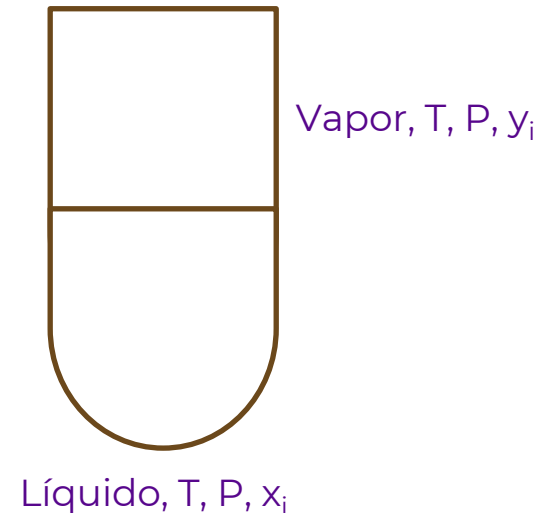
Los sistemas tienden a evolucionar de manera espontánea hasta el equilibrio. El flujo de cualquiera de las propiedades es proporcional a la diferencia entre las condiciones del sistema en cualquier momento y las condiciones de equilibrio.

EQUILIBRIOS LÍQUIDO-VAPOR. LEY DE RAOULT.

$$y_i P = x_i P_i^{sat}$$

Donde:

- y_i composición del componente i en la fase vapor
- P presión total del sistema
- x_i composición del componente i en la fase líquida
- P_i^{sat} presión de vapor o de saturación del componente i



Equilibrio físico.

Los sistemas tienden a evolucionar de manera espontánea hasta el equilibrio. El flujo de cualquiera de las propiedades es proporcional a la diferencia entre las condiciones del sistema en cualquier momento y las condiciones de equilibrio.

EQUILIBRIOS LÍQUIDO-GAS (SISTEMAS IDEALES). LEY DE HENRY.
Para sistemas soluto-disolvente

$$y_i P = x_i H_i$$

Donde:

- y_i composición del componente i en la fase vapor
- P presión total del sistema
- x_i composición del componente i en la fase líquida
- H_i constante de Henry para el componente i



