

**INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA  
QUÍMICA**

**INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE  
ALIMENTOS**

**OPERACIONES  
UNITARIAS**

2023



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# OPERACIONES UNITARIAS



Ya vimos que la Ingeniería Química y la Ingeniería de Alimentos estudian procesos de producción, es decir, son ingenierías de proceso.

La variedad de procesos e industrias que requieren de los servicios de los Ingenieros Químicos y los Ingenieros de Alimentos es enorme.



La gama de productos que pueden producirse industrialmente es muy vasta.

# OPERACIONES UNITARIAS

## EJEMPLOS DE PRODUCTOS DERIVADOS DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

Pulpa de papel



Fertilizantes



Detergentes



Gasolina



Pinturas



Bioetanol



Desinfectantes



# OPERACIONES UNITARIAS

## EJEMPLOS DE PRODUCTOS DERIVADOS DE LA INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Leche pasteurizada



Productos lácteos: manteca, yogur, queso



Leche en polvo



Carne fresca y productos cárnicos



Bebidas: agua, jugos, refrescos, bebidas alcohólicas



Panificados



# OPERACIONES UNITARIAS

¿Cómo abordamos el estudio de una gama tan amplia de productos y procesos de producción?

¿Estudiamos cada proceso de producción por separado?

*¿Qué les parece? ¿Es viable? ¿Y qué pasa si luego las tecnologías van cambiando?*

# OPERACIONES UNITARIAS

Recordemos:

## INGENIERÍA

Aplicación práctica de la ciencia para desarrollar una producción industrial eficiente

≠

## CIENCIA

Conocimiento básico de las reacciones químicas, los principios de la termodinámica y la transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa

≠

## TECNOLOGÍA

Aplicación práctica de conceptos de ciencia e ingeniería. Es un instrumento, equipo o máquina como resultado de la ingeniería

# OPERACIONES UNITARIAS

Si encaramos el estudio de los procesos desde los procesos particulares de producción de un producto, seguramente quedemos ceñidos a la tecnología utilizada en la producción de ese producto específico

La Ingeniería Química y la Ingeniería de Alimentos deben manejar un conocimiento más general, aplicable a todos los procesos de producción y que no pierda vigencia en el tiempo. Este conocimiento es el asiento sobre el cual se construyen las soluciones tecnológicas de acuerdo a las herramientas con las que se cuenta en cada momento.

*Esto es gran parte de lo que nos diferencia como Ingenieros de Procesos*

# OPERACIONES UNITARIAS

¿A qué me estoy refiriendo?

# OPERACIONES UNITARIAS

Pulpa de papel

Detergentes

Leche pasteurizada

Productos lácteos: manteca, yogur, queso

Gasolina

**¿PUEDEN TENER TODOS ESTOS PROCESOS ALGO EN**

Leche en polvo

**COMÚN?** Pesca y productos cárnicos

Bioetanol

Desinfectantes

Panificados

Bebidas: agua, jugos, refrescos, bebidas  
alcohólicas

Pinturas

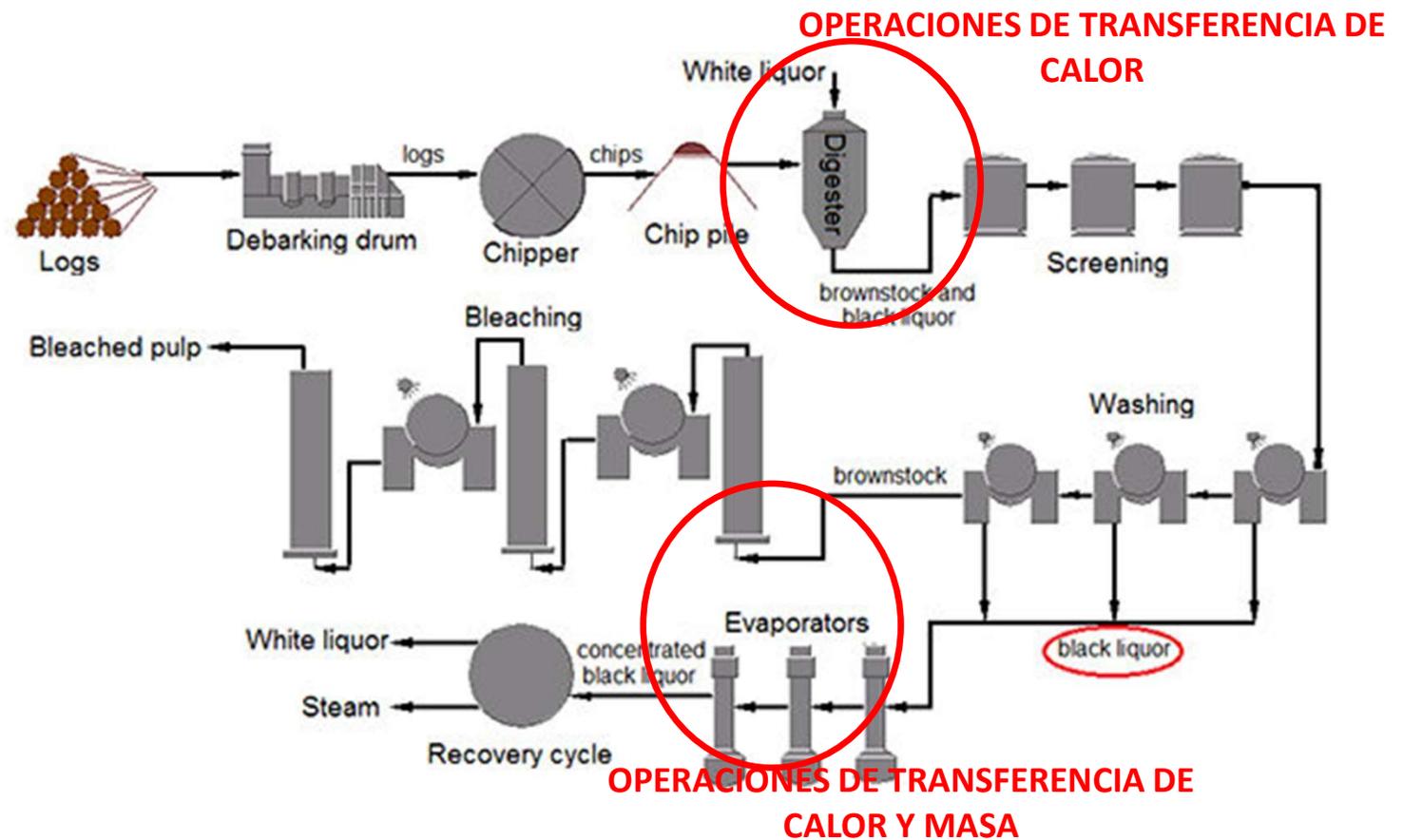
Alimentos listos para consumir

# OPERACIONES UNITARIAS

Veamos los diagramas de flujo de cada proceso de producción

# OPERACIONES UNITARIAS

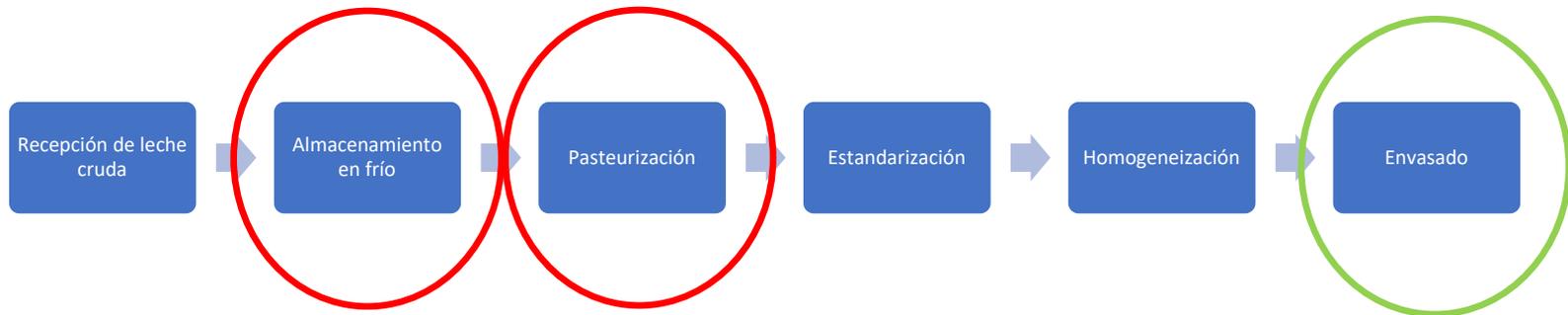
## PULPA DE CELULOSA





# OPERACIONES UNITARIAS

## LECHE FRESCA PASTEURIZADA



**OPERACIONES DE  
INTERCAMBIO DE CALOR**

## LECHE EN POLVO



**OPERACIONES DE  
INTERCAMBIO DE CALOR**

**OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE  
CALOR Y MASA**

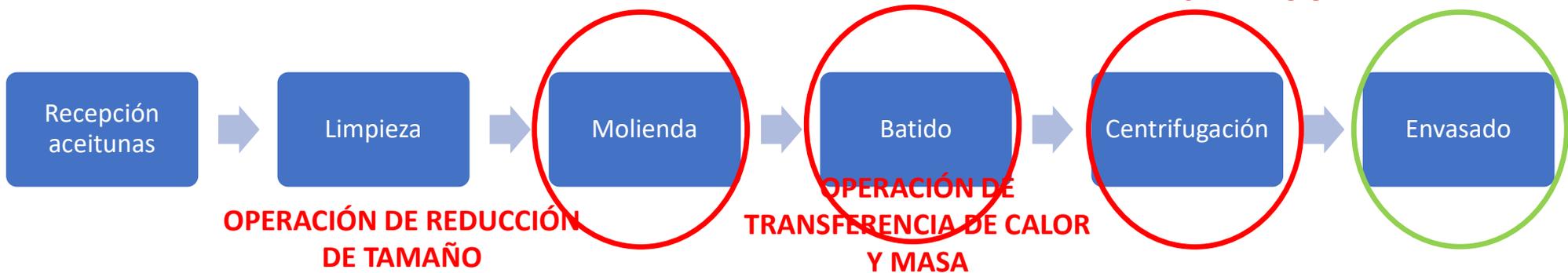
# OPERACIONES UNITARIAS

## QUESO



**OPERACIONES DE  
INTERCAMBIO DE CALOR**

## ACEITE DE OLIVA



**OPERACIÓN DE REDUCCIÓN  
DE TAMAÑO**

**OPERACIÓN DE  
TRANSFERENCIA DE CALOR  
Y MASA**

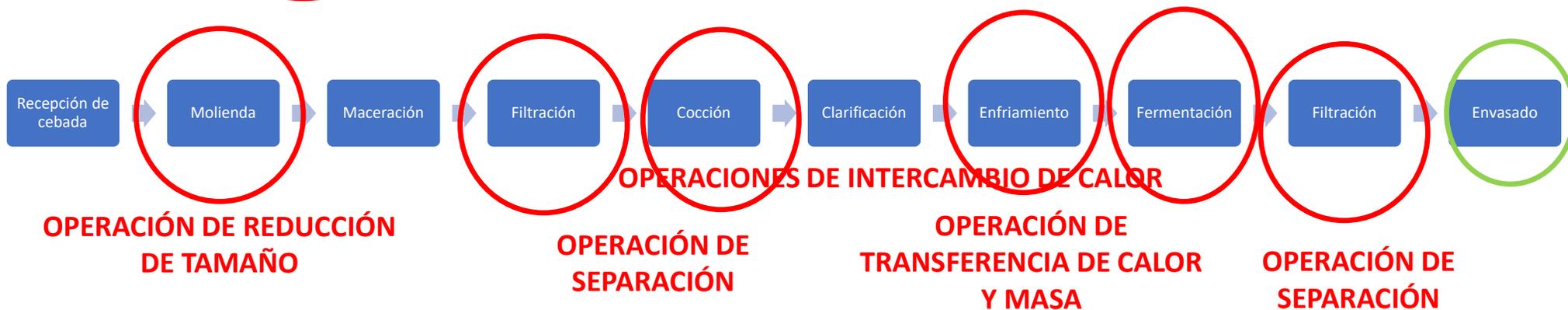
**OPERACIÓN DE  
SEPARACIÓN**

# OPERACIONES UNITARIAS

## VERDURAS CONGELADAS



## CERVEZA



# OPERACIONES UNITARIAS

Podemos ver que hay operaciones/etapas que se repiten en todos los procesos:

Operaciones donde se transfiere calor: enfriamiento, calentamiento, pasteurización, congelado, cocción

Operaciones donde se transfiere masa: evaporación, secado, fermentación, destilación, separación

Operaciones mecánicas y de transporte de fluidos: homogeneización, descremado, envasado, molienda



En Ingeniería de Procesos, estas operaciones se estudian en sí mismas, ya que tienen técnicas comunes y se basan en los mismos principios científicos

# OPERACIONES UNITARIAS

A estas etapas se las denomina OPERACIONES UNITARIAS

Este abordaje es típico de la Ingeniería Química y la Ingeniería de Alimentos: mediante el estudio sistemático de estas operaciones en sí mismas (operaciones que evidentemente constituyen la trama de la industria y las líneas de producción), se unifica y simplifica el tratamiento de todos los procesos.

McCabe, Smith & Harriot, 2002

# OPERACIONES UNITARIAS

PROCESO = OPERACIONES UNITARIAS + REACCIONES QUÍMICAS



Las operaciones unitarias involucran procesos físicos (transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa).

# OPERACIONES UNITARIAS

El estudio de las Operaciones Unitarias implica básicamente:

- Estudio y modelado de los fenómenos de transporte que intervienen (transporte de cantidad de movimiento, calor y masa)
- Estudio de equipos para llevar a cabo la operación (criterios de selección)
- Dimensionamiento de equipos

En FING:



# OPERACIONES UNITARIAS

Existen múltiples formas de organizar el estudio de las Operaciones Unitarias

## Transferencia de calor y masa 1

- Transferencia de calor por conducción, convección y radiación
- Pérdidas de calor y aislaciones
- Intercambiadores de calor: camisa y tubos, tubos concéntricos, superficie extendida, serpentines y camisas, pasteurización, esterilización
- Transferencia de masa
- Absorción gaseosa

## Transferencia de calor y masa 2

- Condensación y condensadores
- Ebullición y evaporadores
- Humidificación y enfriamiento evaporativo
- Secado
- Extracción sólido-líquido y líquido-líquido
- Destilación

## Bioingeniería

- Fermentación
- Esterilización

# OPERACIONES UNITARIAS

Por tipo de Operación:

## Operaciones mecánicas y de transporte de fluidos

- Flujo y bombeo de fluidos
- Agitación y mezcla
- Separaciones: filtración, tamizado, sedimentación, centrifugación
- Reducción de tamaño: molinos, homogeneización

## Operaciones de transferencia de calor

### SIN CAMBIO DE FASE:

- Transferencia de calor por conducción, convección y radiación (intercambiadores de calor)

### CON CAMBIO DE FASE:

- Evaporación y ebullición
- Condensación
- Congelado

## Operaciones de transferencia de masa

- Absorción gaseosa
- Humidificación
- Destilación
- Extracción
- Secado
- Separaciones: Adsorción, membranas, cristalización

# OPERACIONES UNITARIAS

Veamos muy brevemente en qué consisten las Operaciones Unitarias más comunes

# OPERACIONES UNITARIAS

OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

# OPERACIONES UNITARIAS

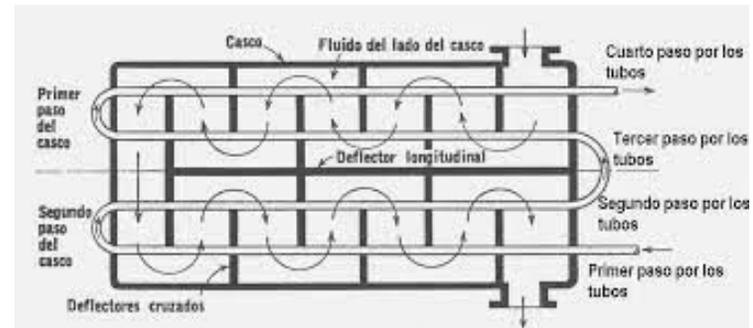
## TRANSFERENCIA DE CALOR (Calentamiento/Enfriamiento)

Se ponen en contacto dos fluidos a diferentes temperaturas, buscando una transferencia de calor eficiente.

### Superficie extendida

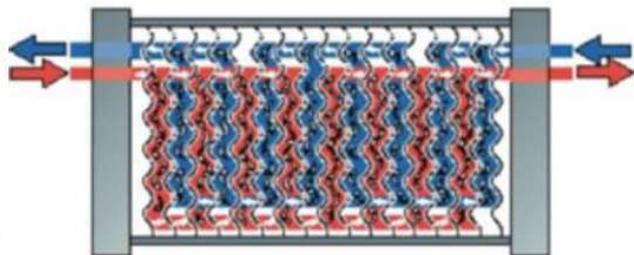


## Intercambiadores de camisa y tubos

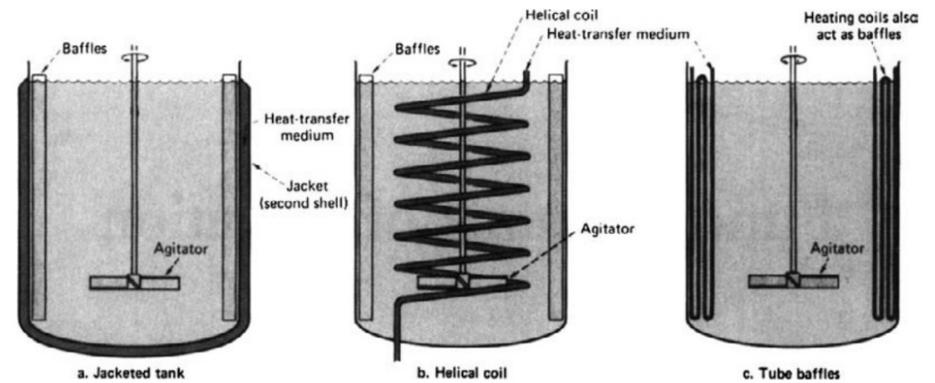


# OPERACIONES UNITARIAS

Pasteurización: intercambiador de calor de placas



Reactores: serpentines y camisas



# OPERACIONES UNITARIAS

Ecuaciones de dimensionamiento

$$Q = A_o U_o \Delta T_{medio}$$

**Ecuación de  
Transferencia  
de calor**

$$\Delta T_{medio} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

$$U_o = \left[ \frac{1}{h_i} \frac{A_o}{A_i} + R_{di} \frac{A_o}{A_i} + R_w \frac{A_o}{A_{ML}} + R_{do} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1}$$

$$R_d = \frac{x_{inc}}{k_{inc}} \quad R_w = \frac{x_{pared}}{k_{pared}}$$

Variables importantes:  
Área de transferencia  
Velocidad de fluidos  
Temperaturas  
Factores geométricos

# OPERACIONES UNITARIAS

## EVAPORACIÓN

Transferencia de calor con cambio de fase

**Solución, emulsión o suspensión :**

- Solute no volátil
- Solvente volátil

En la gran mayoría de los sistemas de evaporación el solvente es agua



Aporte de energía para vaporizar parte del solvente



**Solución concentrada de licor espeso**

En la mayoría de los casos es el Producto valioso



**Vapor**

No suele ser el producto de interés y es desechado o recuperado dependiendo de su valor

# OPERACIONES UNITARIAS

Evaporadores:



## EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE EVAPORADORES

### Industria de alimentos:

- Jugos de frutas concentrados, pasta de tomate, purés
- Productos lácteos: leche en polvo (previo al secado spray), leche condensada
- Azúcar (previo a la cristalización)
- Café instantáneo (previo al secado spray o liofilización)
- Productos hidrolizados (proteínas, almidones, etc.)
- Obtención de aceites vegetales (luego de la extracción por solvente)

### Industria Química

- Producción de sales (previo a la etapa de cristalización)
- Dióxido de titanio
- Soda caustica
- Proceso Kraft: Concentración de licor negro previo a su quema en caldera de recuperación
- Obtención de agua potable a partir de agua de mar

### Industria farmacéutica

### Tratamiento de efluentes

- Reducción del volumen de efluente y recuperación de agua

# OPERACIONES UNITARIAS

## ECUACIONES FUNDAMENTALES

Balances de masa y energía

Relaciones de equilibrio

Ecuación de transferencia

- Requerimientos de energía, consumo de vapor y agua de enfriamiento
- Determinación del área de transferencia de calor
- Predicción de comportamiento al variar las condiciones de operación
- Resolver problemas de optimización

# OPERACIONES UNITARIAS

## CONDENSACIÓN

Transferencia de calor con cambio de fase

Aparecen a continuación de cualquier equipo donde se produzca generación de vapor (evaporadores, columnas de destilación, etc.)

Se pueden condensar vapores puros o mezclas de vapores.

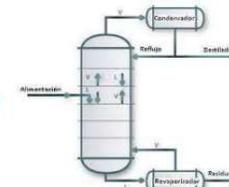


## APLICACIONES

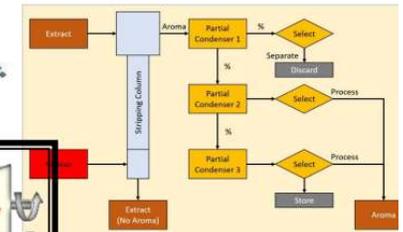
Ciclos de refrigeración



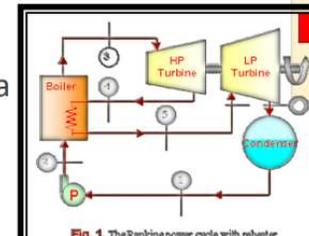
Torres de destilación



Recuperación de aromas y sabores



Ciclos de potencia



Evaporadores

# OPERACIONES UNITARIAS

Ecuaciones de dimensionamiento

$$U_{c,bal,disp} = \frac{U_{o,s} \cdot A_{o,s} + U_{o,c} \cdot A_{o,c}}{A_{o,s} + A_{o,c}}$$

$$\Delta T_{balanceado} = \frac{Q_{Total}}{\frac{Q_S}{\Delta T_S} + \frac{Q_C}{\Delta T_C}}$$

- $U_{os}, U_{oc}$  : Coeficientes limpios, disponibles
- $A_{os}, A_{oc}$  : Áreas requeridas, limpias
- Subíndice C: intercambio por condensación
- Subíndice S: intercambio por calor sensible

# OPERACIONES UNITARIAS

OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA

# OPERACIONES UNITARIAS

## DESTILACIÓN Operación de separación

Operación que se utiliza para separar componentes de una solución líquida, basado en cómo se distribuyen los componentes entre la fase líquida y la fase vapor.

Se lleva a cabo en columnas de destilación, que constan de “platos” apilados dentro de una columna cilíndrica. La mezcla líquida se alimenta por la parte superior y en la parte inferior se vaporiza parcialmente. Los vapores ascienden por la columna y posteriormente se condensan en condensadores, obteniendo el destilado.

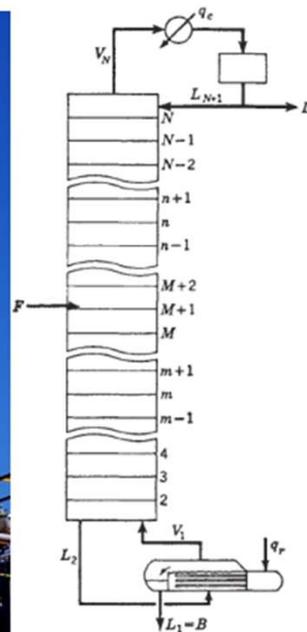


<https://www.youtube.com/watch?v=BaBMXgVBQKk>

# OPERACIONES UNITARIAS

## Aplicaciones:

- Refinación de petróleo
- Bebidas alcohólicas
- Aceites esenciales



## Dimensionamiento:

El grado de separación de las fases depende de:

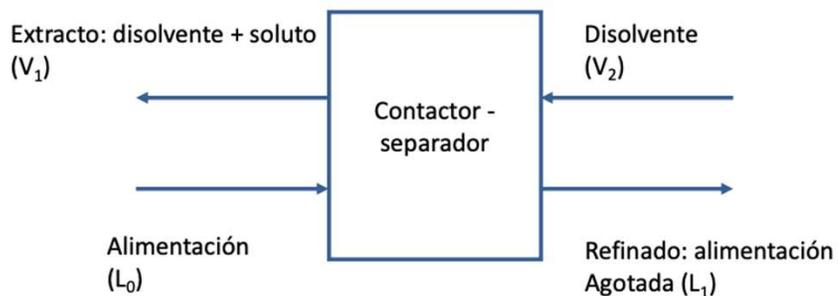
- Volatilidad relativa de los componentes
- Número de platos
- Relación de flujos fase vapor y líquida

# OPERACIONES UNITARIAS

## EXTRACCIÓN LÍQUIDO - LÍQUIDO Operación de separación

Operación que busca separar componentes en solución mediante su distribución entre dos fases inmiscibles líquidas.

### Extracción de equilibrio en una sola etapa



### Ejemplos

- Uso de un solvente:

Solución de ac. acético y agua se pone en contacto con acetato de etilo

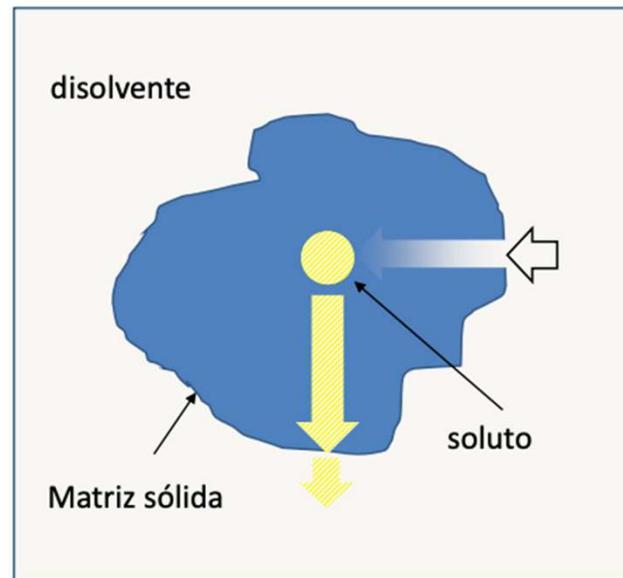
- Uso de dos solventes:

La mezcla de acetona y ac. acético se pone en contacto con agua y cloroformo. La acetona es extraída por el cloroformo y el ac. acético por el agua

# OPERACIONES UNITARIAS

## EXTRACCIÓN SÓLIDO – LÍQUIDO (LIXIVIACIÓN) Operación de separación

Operación que busca separar componentes que se encuentran en una matriz sólida, utilizando un solvente líquido en el cual se distribuyen selectivamente los componentes.



1. disolvente difunde del seno de la solución a la superficie del sólido (rápida)
2. disolvente difunde a través de la matriz sólida
3. Se disuelve ( o reacciona) el soluto en el disolvente (rápida)
4. Difunde el soluto disuelto a través de la matriz sólida
5. Solute se transfiere de la superficie del sólido al seno de la disolución

# OPERACIONES UNITARIAS

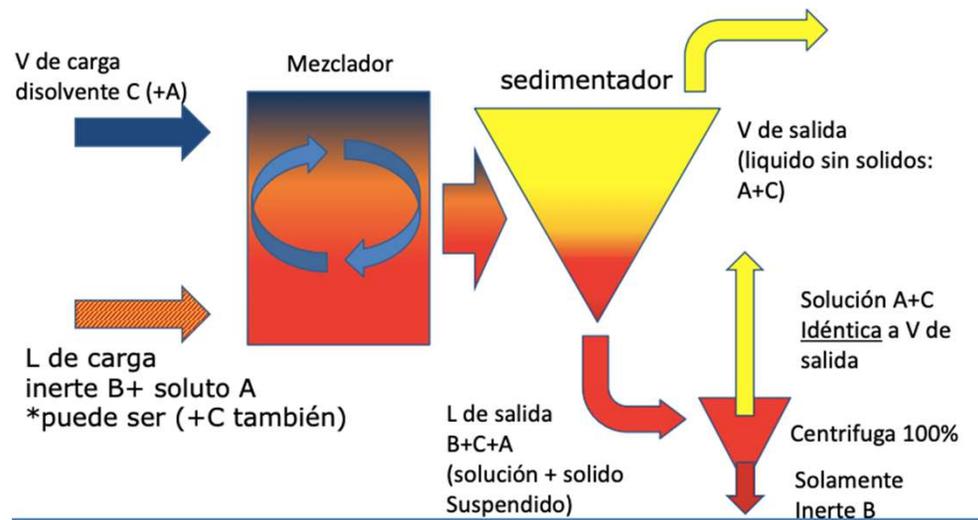
## Aplicaciones:

Procesos biológicos: extracción de taninos de corteza de árboles

Industrias alimenticias: azúcar de remolacha (agua caliente); aceites vegetales (hexano, acetona, éter); café instantáneo (15 a 30%; 60%; partículas de 300  $\mu\text{m}$  y 0.2kg/m<sup>3</sup>); té instantáneo (de 5 a 20%; 40%)

Industria farmacéutica: extractos vegetales de raíces, hojas y tallos, etc.

## Esquema equipo extractor



# OPERACIONES UNITARIAS

## ABSORCIÓN GASEOSA

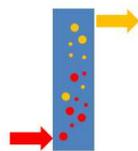
Operación de transferencia de masa

Operación que busca enriquecer una fase líquida con un compuesto gaseoso. El objetivo puede ser recuperar un soluto gaseoso de interés o eliminar un componente indeseado.

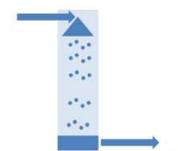
Los equipos buscan un contacto entre la fase gaseosa y líquida que permita una buena transferencia de masa.

### A) Equipos de fase dispersa gaseosa

- ✓ Tanques de burbujeo con agitación
- ✓ Torres de platos con campanas de burbujeo
- ✓ Torre de platos perforados
- ✓ Torres con rejillas



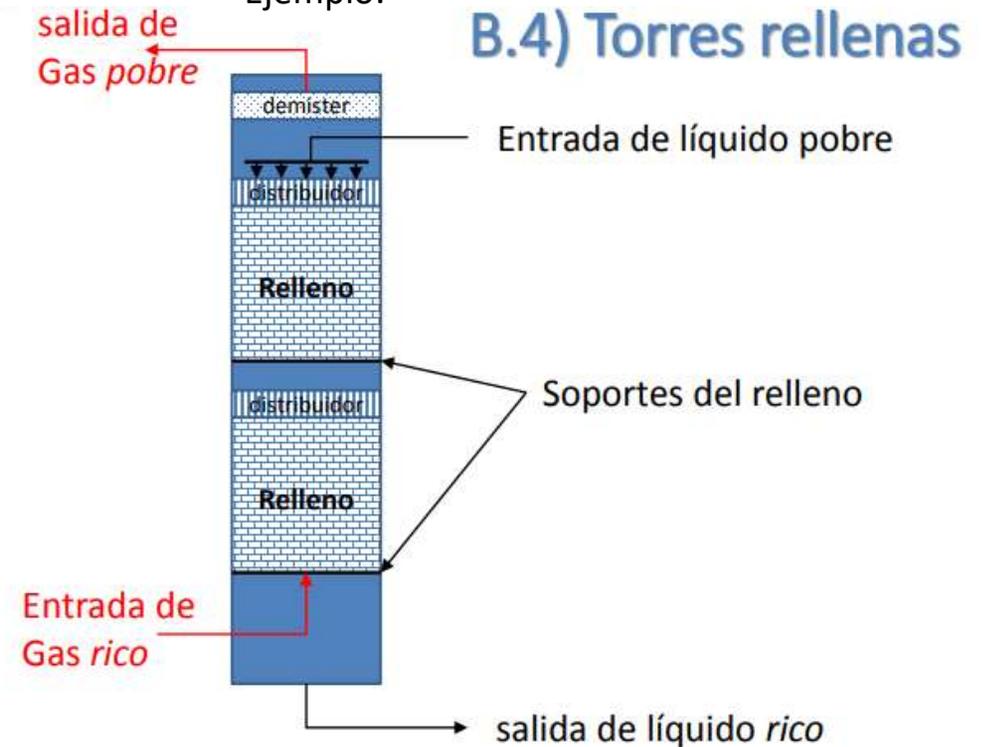
Torre o columna de absorción es lo mismo



### B) Equipos de fase dispersa líquida

- ✓ Celáreos
- ✓ Torres de paredes mojadas
- ✓ Torres spray
- ✓ Torres con chicanas
- ✓ Torres rellenas

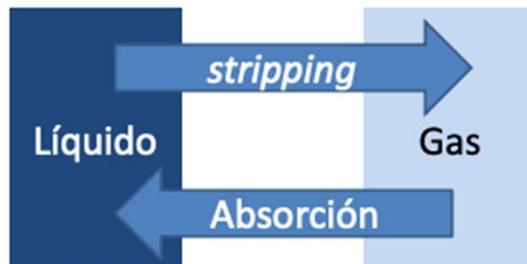
Ejemplo:



# OPERACIONES UNITARIAS

Aplicaciones:

- Control de emisión de efluentes gaseosos: el compuesto gaseoso a eliminar se absorbe en una corriente líquida de agua (por ejemplo). La desventaja es la generación de un efluente líquido.
- Purificación de aire con amoníaco, con una corriente de agua.
- *Stripping* con vapor para separar compuestos volátiles y solubles



# OPERACIONES UNITARIAS

## Dimensionamiento

### Absorción en contracorriente

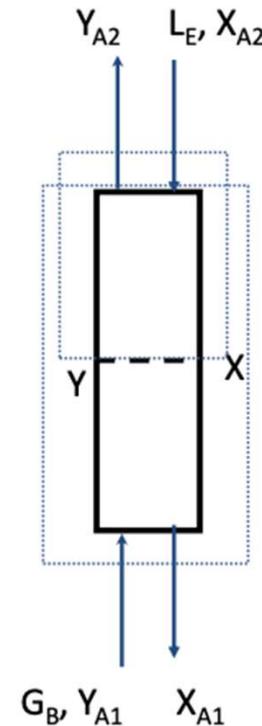
- Balance Global del compuesto A

$$L_E(X_{A_1} - X_{A_2}) = G_B(Y_{A_1} - Y_{A_2})$$

- Balance parcial del compuesto A

$$L_E(X_{A_1} - X_A) = G_B(Y_{A_1} - Y_A)$$

$$Y_A = Y_{A_2} + \frac{L_E}{G_B}(X_A - X_{A_2}) \quad \text{Línea de operación}$$



# OPERACIONES UNITARIAS

## SECADO

Operación de transferencia de calor y masa

Operación unitaria que tiene como objetivo separar una sustancia volátil (generalmente agua) de un sólido no volátil, por medios térmicos, y arrastre con un gas inerte (generalmente aire), para dar origen a un producto generalmente sólido.



Secador spray



Secador rotatorio

Fruta deshidratada



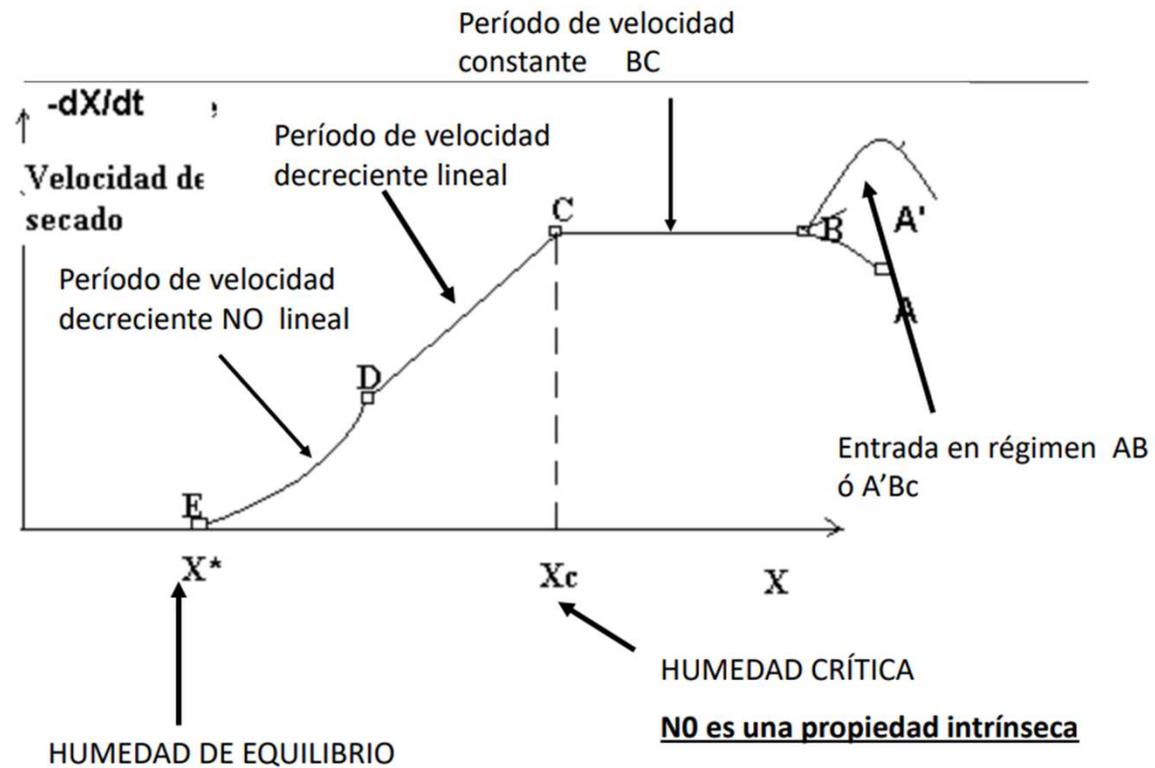
Madera



Leche en polvo

# OPERACIONES UNITARIAS

## Cinética de secado



# OPERACIONES UNITARIAS

DIRECTOS	CONTINUOS	ROTATORIOS ■ BANDA CONTÍNUA ■ TRANSP. NEUMÁTICO ■ SPRAY ■
	DISCONTÍNUO	CIRCULACION A TRAVÉS ■ TUNEL ■ BANDEJAS CON CIRCULACION ATRAVES BANDEJAS FLUJO PARALELO ■ LECHO FLUIDO ■
INDIRECTOS	CONTINUOS	ROTATORIOS ■ TAMBOR ROTATORIO ■ TRANSPORTADOR TORNILLO ROTATORIOS CON TUBOS DE VAPOR BANDEJA ROTATORIA SECADORES DE MICROONDAS ■
	DISCONTÍNUO	RECIPIENTE AGITADO LIOFILIZADORES ROTATORIOS A VACIO BANDEJAS A VACIO

El tipo de secador a elegir depende de la materia prima a secar, escala del proceso, posibilidad de inversión, velocidad de secado, requerimientos del producto seco final, etc.

# OPERACIONES UNITARIAS



## CALCULOS BÁSICOS

---

### OBJETIVOS:

1. Selección de un determinado tipo y tamaño
2. Encontrar las condiciones operativas para el equipo seleccionado y especificaciones para el equipo auxiliar, o las nuevas condiciones operativas en un equipo existente para un nuevo producto.
3. Determinar las condiciones óptimas de operación para un secador en funcionamiento.

# OPERACIONES UNITARIAS

En todos los casos, el estudio de las Operaciones Unitarias implica:

- Estudio de fenómenos de transporte
- Cálculo de coeficientes de transferencia de calor y masa
- Cálculo de áreas de transferencia
- Cálculo de velocidad de flujo
- Dimensionamiento de equipos
- Selección de variables de funcionamiento para la operación económica, eficiente y efectiva de los equipos

# OPERACIONES UNITARIAS

## BIBLIOGRAFÍA

- McCabe, Smith & Harriet. (2007). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 7ma Edición. Mc. Graw-Hill/Interamericana Editores.  
<http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/14698.pdf>
- Material de los cursos de Transferencia de Calor y Masa 1 y 2