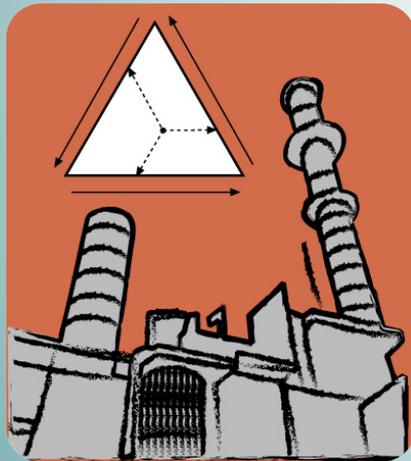


# Operaciones y Procesos

## Bloque 02. Operaciones Unitarias Importantes



**José Manuel de la Iglesia Ceballos**

DPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA Y QUÍMICA INORGÁNICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)

## **Bloque Temático II: Operaciones unitarias importantes.**

2.2.- Operaciones basadas en la transferencia de materia: Conceptos básicos. Destilación y rectificación. Extracción. Adsorción, absorción, lixiviación.

Practica 1<sup>a</sup>: Extracción líquido-líquido

Resolución de Ejercicios Balance de Materia. (PA)

2.2.- Operaciones basadas en transferencia de calor: Conceptos básicos. Cambiadores de calor. Evaporación.

2.3.- Operaciones basadas en la transferencia simultánea de calor y de materia: Conceptos básicos. Equipos: enfriamiento de líquidos, liofilización.

Practica 2<sup>a</sup>: Destilación continua computarizada.

Resolución de Ejercicios Balance de Energía. (PA)

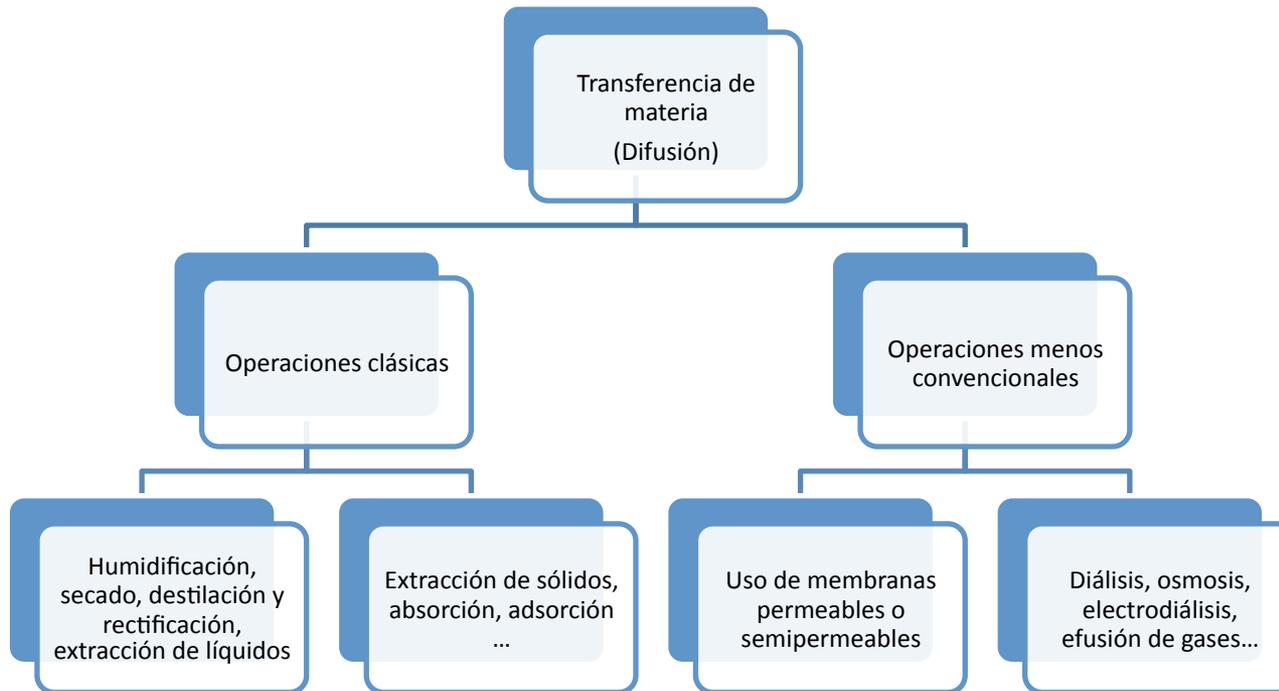
2.4.- Operaciones basadas en transferencia de cantidad de movimiento: Conceptos básicos. Equipos: circulación de fluidos en conducciones, flujo a través de lechos de sólidos.

2.5.- Operaciones con sólidos: Contenidos teóricos. Equipos: cristalización, secado, filtración.

## 2.1.- Operaciones basadas en la transferencia de materia.-

**Difusión:** Movimiento de un componente individual a través de una mezcla, llegando en algunos casos a moverse por una segunda mezcla que se encuentra en contacto con la primera. Para ello es necesaria la influencia de un estímulo físico, y se puede llegar a una separación total o parcial de este componente.

La causa más frecuente de la difusión es un gradiente de concentración en el componente que difunde.



## Humidificación

La humidificación es una operación que consiste en aumentar la cantidad de vapor presente en una corriente gaseosa; el vapor puede aumentar pasando el gas a través de un líquido que se evapora en el gas. Esta transferencia hacia el interior de la corriente gaseosa tiene lugar por difusión y en la interfase hay, simultáneamente, transferencia de calor y de materia.

Los procesos que tiene lugar en la operación de humidificación son:

- 1.- Una corriente de agua caliente se pone en contacto con una de aire seco (o con bajo contenido en humedad).
- 2.- Parte del agua se evapora, enfriándose así la interfase.
- 3.- El seno del líquido cede entonces calor a la interfase, y por lo tanto se enfría.
- 4.- A su vez, el agua evaporada en la interfase se transfiere al aire, por lo que se humidifica.

### **Humedad molar o saturación molar:**

Relación entre el número de moles de vapor y de gas contenido en una determinada masa gaseosa.

$$Y_m = n_v / n_g = p_v / p_g = p_v / (P - p_v)$$

### **Humedad absoluta o saturación absoluta:**

Relación entre el peso de vapor y el peso de gas contenido en una masa gaseosa.

$$Y = (M_v / M_g) * Y_m$$

$M_v$  y  $M_g$  son, respectivamente, las masas moleculares del vapor y del gas.

### **Humedad relativa o saturación relativa:**

Cociente entre la presión parcial del vapor y la tensión del vapor a la misma temperatura.

$$\partial = p_v / p_v^*$$

### **Humedad porcentual o saturación porcentual:**

Relación entre la humedad existente en la masa gaseosa y la que tendría si estuviera saturada.

$$\partial_p = Y / Y^* = (p_v / p_v^*) (P - p_v^* / P - p_v)$$



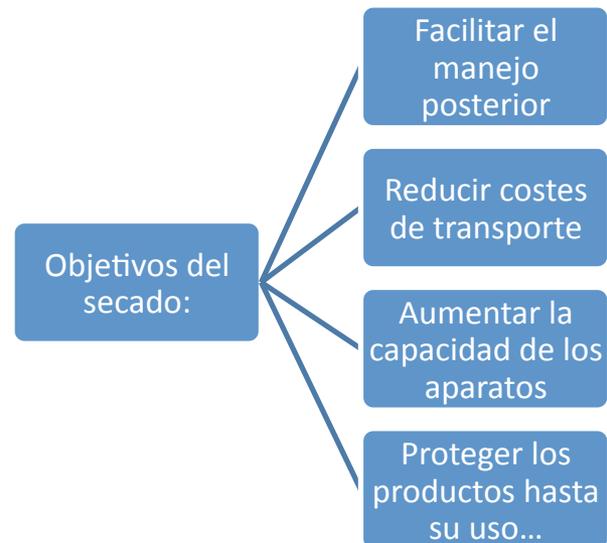
Tabla 1. Presión de vapor del agua líquida entre 0 °C y 373 °C

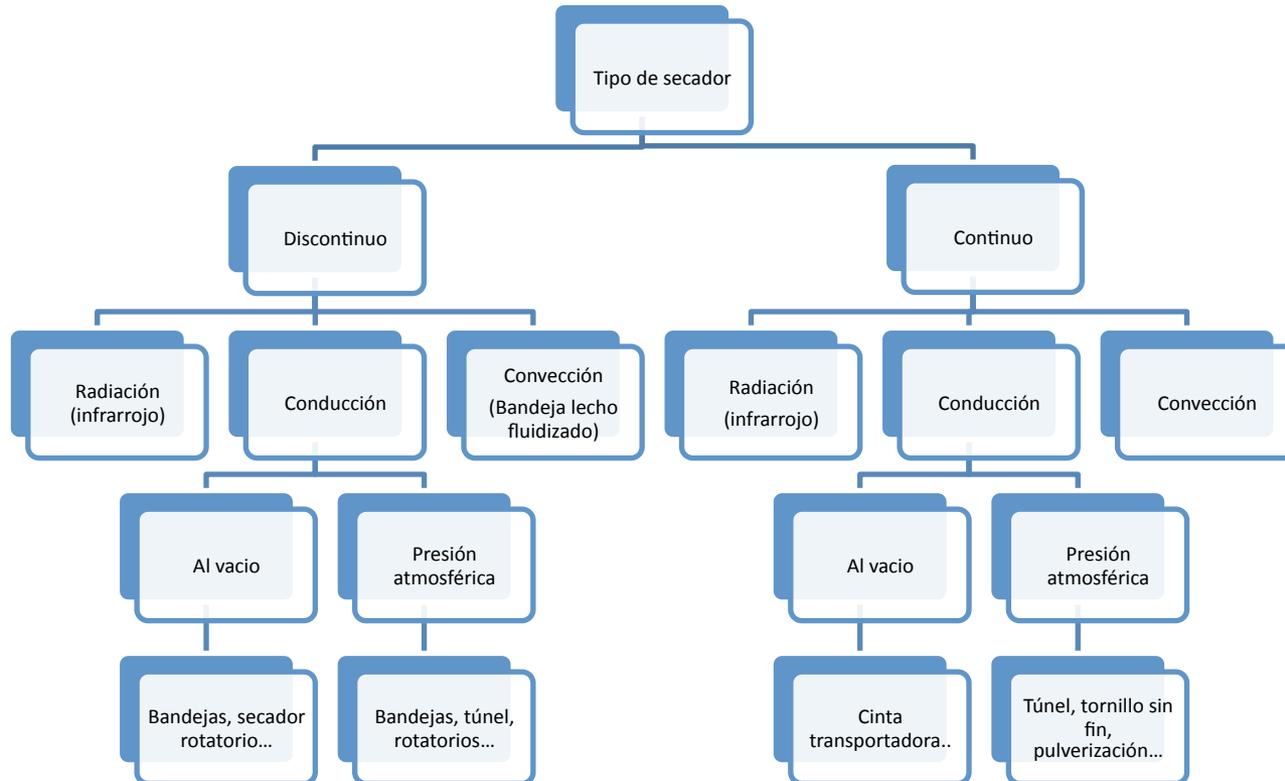
T/°C	P/mmHg	P/hPa	T/°C	P/mmHg	P/hPa	T/°C	P/mmHg	P/hPa
0	4.5840	6.1115	47	79.709	106.27	95	634.61	846.08
0.01	4.58780	6.11657	48	83.834	111.77	96	658.34	877.71
1	4.9286	6.5709	49	88.147	117.52	97	682.78	910.30
2	5.2954	7.0599	50	92.648	123.52	98	707.98	943.90
3	5.6861	7.5808	51	97.343	129.78	99	733.95	978.52
4	6.1021	8.1355	52	102.24	136.31	100	760.00	1013.3
5	6.5449	8.7258	53	107.35	143.12	101	787.57	1050.0
6	7.0158	9.3536	54	112.67	150.22	102	815.86	1087.7
7	7.5164	10.021	55	118.23	157.62	103	845.12	1126.7
8	8.0482	10.730	56	124.01	165.33	104	875.06	1166.7
9	8.6130	11.483	57	130.03	173.36	105	906.07	1208.0
10	9.2123	12.282	58	136.29	181.71	106	937.92	1250.5
11	9.8483	13.130	59	142.82	190.41	107	970.60	1294.0
12	10.522	14.028	60	149.61	199.46	108	1004.42	1339.12
13	11.237	14.981	61	156.67	208.88	109	1038.92	1385.11
14	11.993	15.990	62	164.02	218.67	110	1074.56	1432.63
15	12.795	17.058	63	171.65	228.85	111	1111.20	1481.48
16	13.642	18.188	64	179.59	239.43	112	1148.74	1531.53
17	14.539	19.384	65	187.83	250.42	113	1187.42	1583.10
18	15.487	20.647	66	196.39	261.83	114	1227.25	1636.20
19	16.489	21.983	67	205.28	273.68	115	1267.98	1690.50
20	17.546	23.393	68	214.51	285.99	120	1489.14	1985.36
21	18.663	24.882	69	224.09	298.76	125	1740.93	2321.05
22	19.841	26.453	70	234.03	312.01	130	2026.10	2701.24
23	21.085	28.111	71	244.33	325.75	135	2347.26	3129.42
24	22.395	29.858	72	255.02	340.00	140	2710.92	3614.26
25	23.776	31.699	73	266.11	354.78	145	3116.76	4155.34
26	25.231	33.639	74	277.59	370.09	150	3570.48	4760.25
27	26.763	35.681	75	289.49	385.95	175	6694.08	8924.71
28	28.376	37.831	76	301.82	402.39	200	11 659.16	15 544.27
29	30.071	40.092	77	314.58	419.41	225	19 123.12	25 495.40
30	31.855	42.470	78	327.80	437.03	250	29 817.84	39 753.85
31	33.730	44.969	79	341.48	455.27	275	44 580.84	59 436.23
32	35.700	47.596	80	355.63	474.14	300	64 432.8	85 903.3
33	37.769	50.354	81	370.28	493.67	325	90 447.6	120 587
34	39.942	53.251	82	385.43	513.87	350	124 001.6	165 321.9
35	42.221	56.290	83	401.10	534.76	360	139 893.2	186 508.9
36	44.613	59.479	84	417.30	556.35	365	148 519.2	198 009.3
37	47.121	62.823	85	434.04	578.67	368	150 320.4	200 410.7
38	49.750	66.328	86	451.33	601.73	367	152 129.2	202 822.3
39	52.506	70.002	87	469.21	625.56	368	153 960.8	205 264.2
40	55.391	73.849	88	487.67	650.17	369	155 815.2	207 736.5
41	58.413	77.878	89	506.73	675.58	370	157 692.4	210 239.2
42	61.577	82.096	90	526.41	701.82	371	159 584.8	212 762.2
43	64.886	86.508	91	546.72	728.90	372	161 507.6	215 325.8
44	68.349	91.124	92	567.68	756.84	373	163 468.4	217 939.9
45	71.968	95.950	93	589.31	785.68	373.946	165 452.0	220 584.5
46	75.749	100.99	94	611.61	815.41			

La **presión de vapor** o más comúnmente presión de saturación es la presión a la que a cada temperatura las fases líquida y vapor se encuentran en equilibrio; su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas. En la situación de equilibrio, las fases reciben la denominación de líquido saturado y vapor saturado

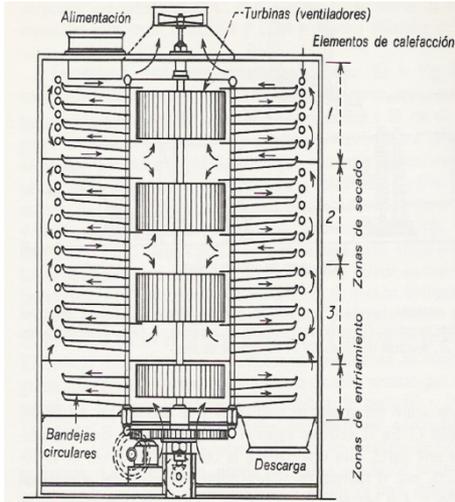
## SECADO DE SOLIDOS

Consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones.

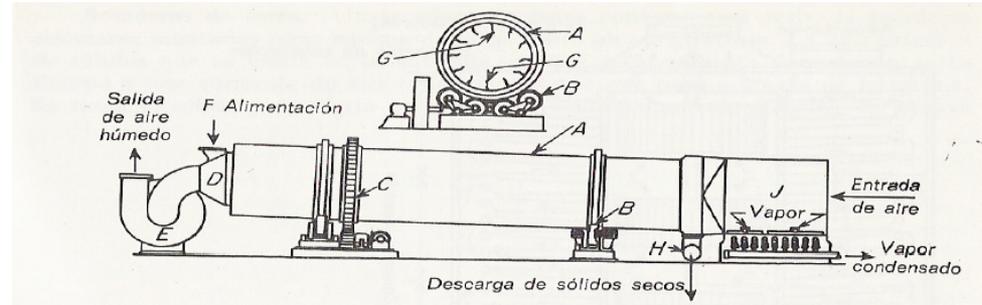




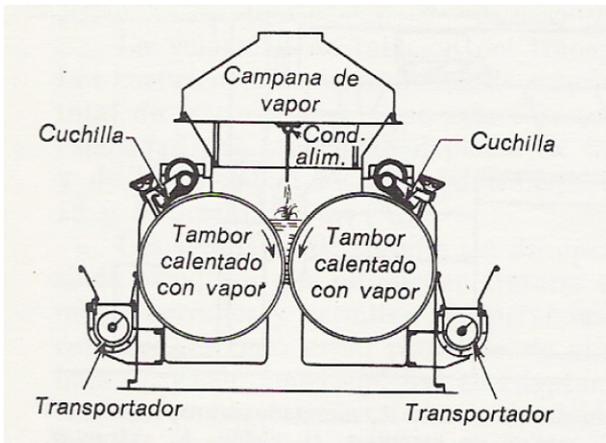
Algunos equipos de secado:



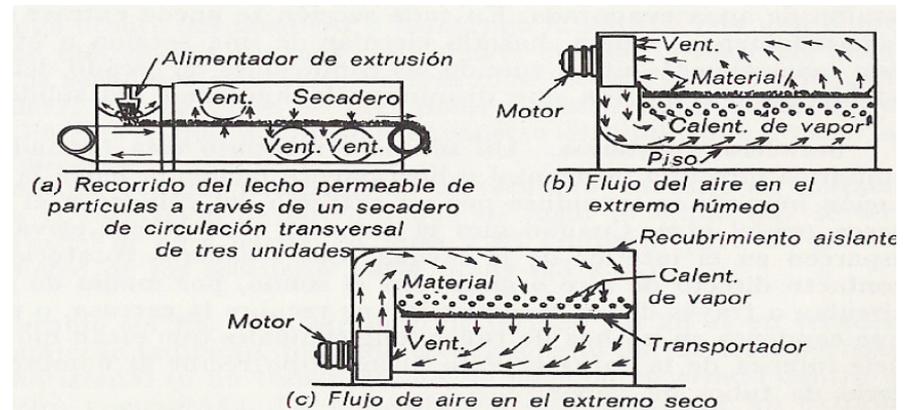
Turbosecador



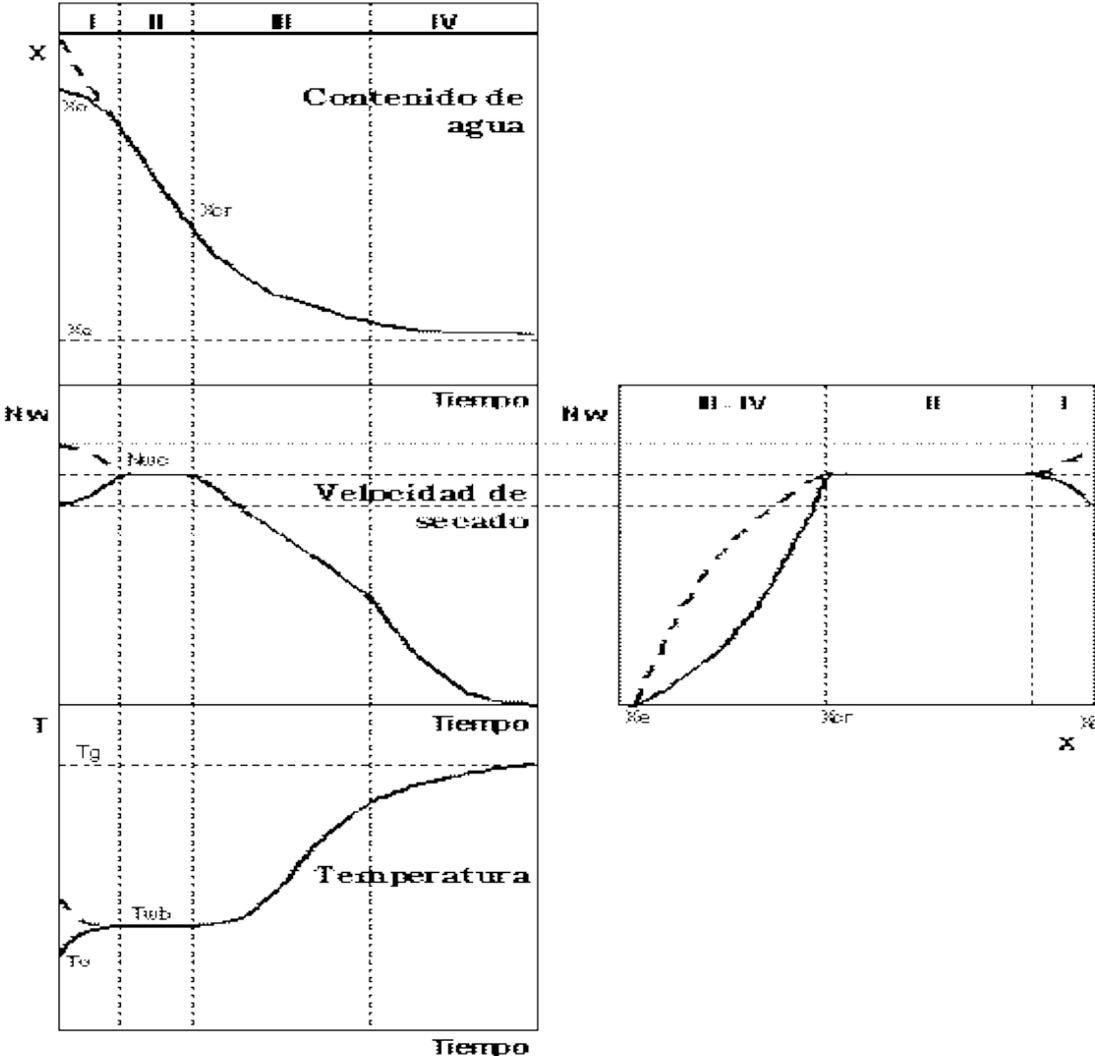
Secador rotatorio



Secador doble tambor y alimentación central



Secadores de tamiz transportador



Los mecanismos que controlan el secado de sólido dependen de su estructura y de los parámetros de secado (temperatura  $T$ , velocidad  $v$  y humedad relativa del aire), contenido de humedad, dimensiones, superficie expuesta a la velocidad de transferencia, y contenido de humedad de equilibrio de la partícula. Durante el secado con aire constante, la curva de secado puede ser dividida en los siguientes cuatro períodos de velocidad de secado

**I- Período Inicial:** la evaporación ocurre como desde una superficie libre y, usualmente, la temperatura incrementa desde su valor inicial ( $T_0$ ) hasta la temperatura de bulbo húmedo del aire ( $T_{wb}$ ).

**II- Período de velocidad constante ( $N_{wc}$ ):** durante este período el secado aún se lleva a cabo por evaporación de la humedad desde una superficie saturada (evaporación desde una superficie libre) y el material permanece a  $T_{wb}$ .

**III- Primer período de velocidad descendente:** El contenido de humedad al final del período de velocidad constante es el contenido de humedad crítico ( $X_{cr}$ ).

**IV- Segundo período de velocidad descendente:** Este período representa las condiciones correspondientes a una velocidad de secado totalmente independiente de las condiciones externas.



Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



El modelo que permite realizar el ajuste a las curvas y estimar el tiempo de secado es el siguiente:

$$t = \frac{1}{k(x_0 - x_{eq})} \ln \frac{(x_0 - x_i)(x_{1eq} - x_{eq})}{(x_0 - x_{1eq})(x_i - x_{eq})}$$

Este método ha sido probado en la práctica para el estudio de la cinética de secado de sólidos porosos y capiloporosos.

Novoa (1995) estima el coeficiente de transferencia de masa mediante la expresión:

$$K_g = m_s \cdot k \cdot (x_i - x_{eq}) / A$$

donde:

k = coeficiente de velocidad de secado (min<sup>-1</sup>)

K<sub>g</sub> = coeficiente de transferencia de masa (kg/m<sup>2</sup> · min)

m<sub>s</sub> = peso del material seco ( kg)

x<sub>i</sub> = humedad del material en un instante de tiempo ( kg/kg)

x<sub>eq</sub> = humedad de equilibrio ( kg/kg)

x<sub>1eq</sub> = contenido de humedad del material durante el período inicial de secado o humedad crítica ( kg/kg)

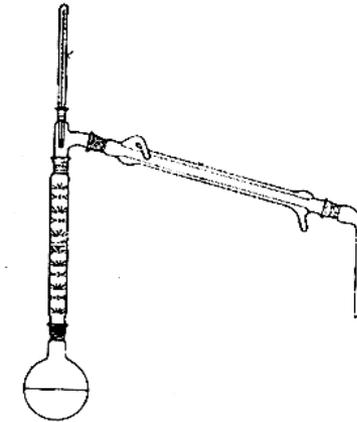
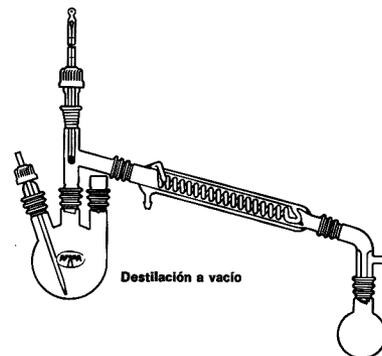
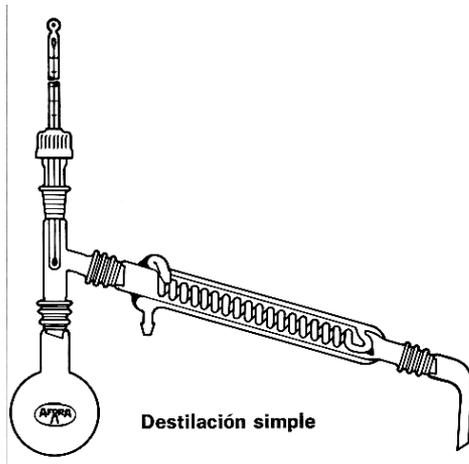
x<sub>0</sub> = humedad inicial del material ( kg/kg)



## Destilación y rectificación

La **destilación** es la operación de separar, mediante evaporización y condensación, los diferentes componentes líquidos, sólidos disueltos en líquidos o gases licuados de una mezcla, aprovechando los diferentes puntos de ebullición de cada una de las sustancias ya que el punto de ebullición es una propiedad intensiva, es decir, no varía en función de la masa o el volumen, aunque sí en función de la presión

Entre los métodos de aislamiento y purificación de sustancias destaca por su sencillez la destilación, en sus múltiples variedades: A presión atmosférica, destilación fraccionada, a vacío o por arrastre de vapor, cada una de ellas con un campo de aplicación.



De la complejidad de una instalación industrial de destilación nos puede dar una idea la foto, obtenida en la WEB de PETRONOR:

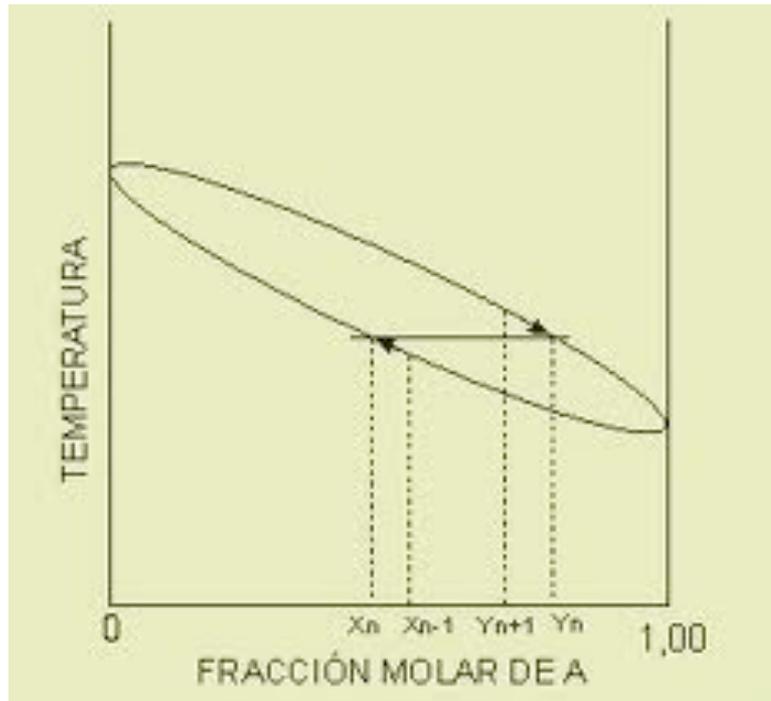


## DESTILACIÓN SIMPLE:

Consiste en la vaporización parcial de una mezcla produciendo un vapor más rico en componentes volátiles que la mezcla inicial, quedando lógicamente un residuo más rico en los componentes menos volátiles.



En el primer tipo, Destilación de equilibrio, se lleva la mezcla líquida hasta una temperatura intermedia entre la del principio y final de la ebullición, permitiendo que el vapor formado alcance un equilibrio con el líquido a esa temperatura



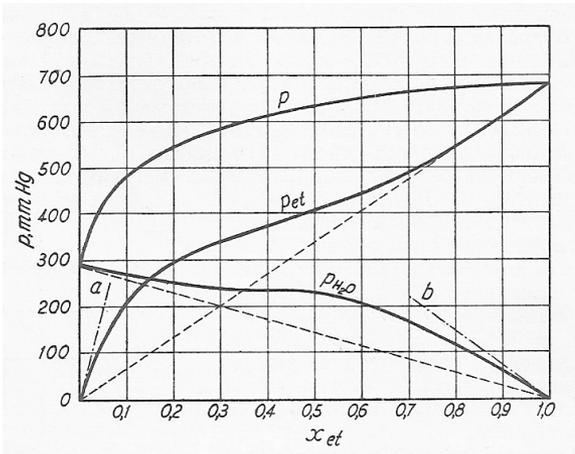
El diagrama de la figura podría representar la destilación del sistema  $S_2C-Cl_4C$



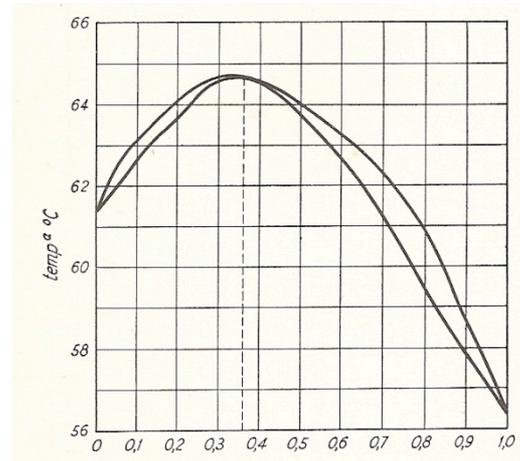
Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



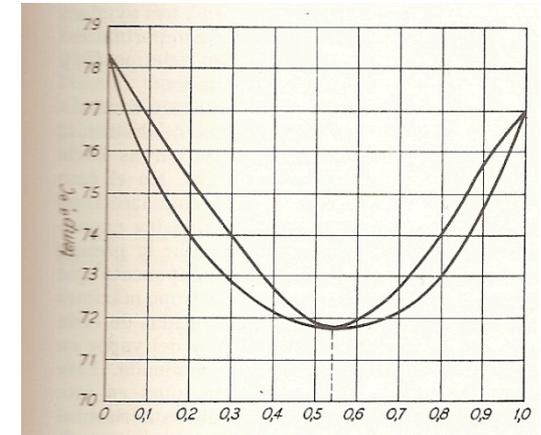
En el segundo tipo, Destilación diferencial o abierta, se calienta la mezcla hasta que se alcanza la ebullición, retirando continuamente los vapores producidos. De esta manera el líquido se empobrece en los componentes más volátiles y se incrementa la temperatura de ebullición. Los vapores producidos son cada vez más pobres en componentes volátiles y aumenta su temperatura de condensación.



(a)



(b)



(c)

Diagrama presión de vapor-composición de la mezcla, para etanol-agua (a).

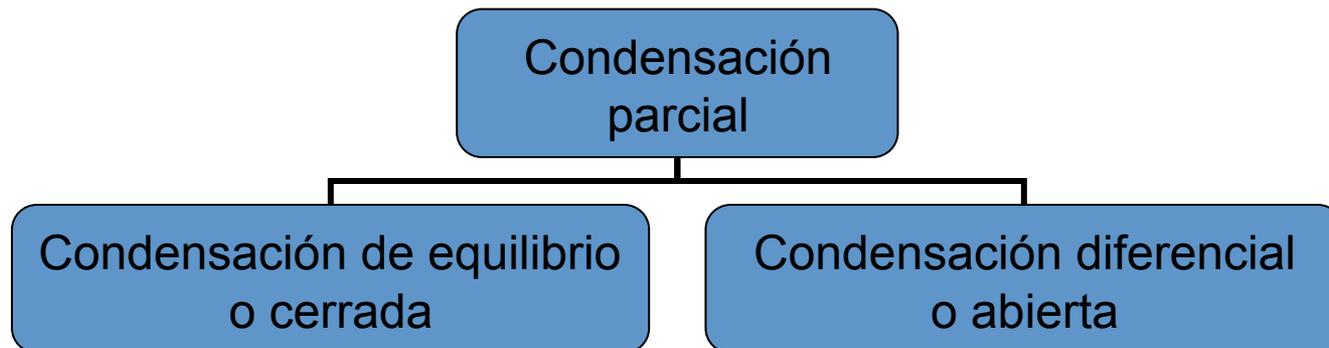
Diagramas de ebullición,  $T_e/x_i$ :

(b) acetona-cloroformo (azeótropo)

(c) acetato de etilo-etanol (azeótropo)

El proceso inverso a la destilación se conoce como **condensación**.

Enfriando de una mezcla de vapores se produce un líquido menos rico en los componentes más volátiles que el vapor inicial. Al igual que la destilación, existen dos modos de condensación:





En la **condensación cerrada** el líquido producido está en contacto con el vapor, estando ambos en equilibrio. La temperatura es intermedia entre la inicial y la final de condensación.

$$\left. \begin{array}{l} V_0 = V + L \\ V_0 y = V x + L y \end{array} \right\} \frac{L}{V} = \frac{y - y_0}{y_0 - x}$$

L = cantidad líquido condensado; V = vapor residual;  $y_0$  = composición líquido inicial; x, y = composición líquido condensado y vapor residual

En la **condensación abierta**, el líquido condensado se retira continuamente de la presencia del vapor, operando a la temperatura de condensación, que disminuye continuamente al enriquecerse los vapores en el componente más volátil.

$$\ln \frac{V_0}{V} = \int_{y_0}^y \frac{dy}{y - x}$$



## **RECTIFICACIÓN.-**

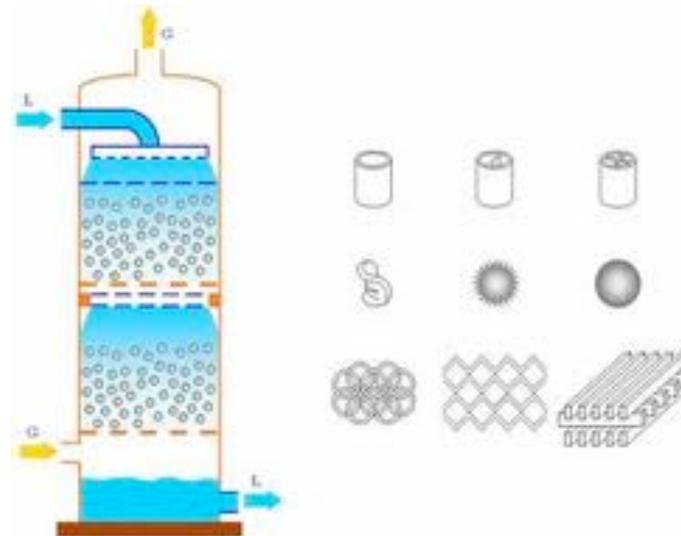
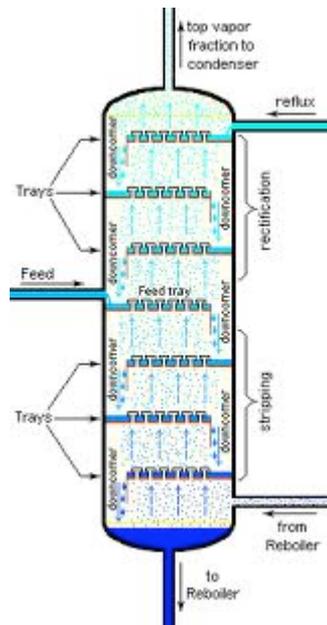
En esta operación circulan en contracorriente el vapor de una mezcla con su condensado en un equipo llamado columna de rectificación.

El equipo de rectificación más sencillo está formado por la columna, donde se verifica el contacto entre líquido y vapor; el calderín, situado en la parte baja y donde se produce el calentamiento que origina la ebullición; y el condensador de reflujo, situado en la parte superior de la columna y donde se produce el líquido que desciende en contacto con el vapor.

## Tipos de columnas de rectificación

Columnas de platos

Columnas de relleno



A la hora de plantearse el diseño o el análisis de una columna hay que considerar los siguientes aspectos:

1. Caudal, composición, presión y temperatura del alimento.
2. Grado de separación deseado entre dos de los componentes.
3. Presión de operación (que ha de ser inferior a la presión crítica de la mezcla)
4. Pérdida de presión del vapor, especialmente para operaciones a vacío.
5. Razón de reflujo mínima y razón de reflujo de operación.
6. Mínimo número de etapas y número de etapas reales (eficiencia de la etapa).
7. Tipo de condensador (total, parcial o una combinación de ambos).
8. Tipo de caldera (total o parcial).
9. Tipo de contacto (columna de pisos, de relleno, o de ambos tipos).
10. Altura de la columna.
11. Piso de entrada del alimento.
12. Diámetro de la columna.
13. Dispositivos internos de la columna.

Los tipos más comunes de columnas de platos son las de plato de tapa circular o capucha las de plato de válvula y las de plato de orificios o malla. Las más estudiadas son las de tapa circular disponiéndose para ellas de un número mayor de tablas y ecuaciones empíricas.

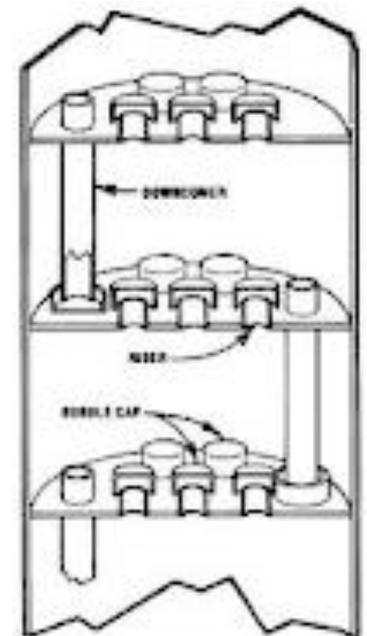
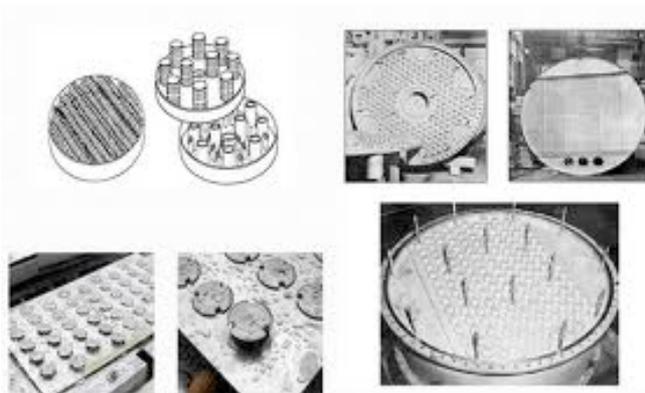
Los factores a considerar en el diseño de las columnas de platos necesarios para la operación, además de la determinación del número de etapas teóricas, son:

Diámetro de la columna

La eficiencia de operación de los platos.

La pérdida de presión a lo largo de cada plato.

La forma de los platos y su tamaño



El tipo común de una torre empaquetada o torre de relleno consiste en una carcasa cilíndrica que contiene un material de relleno inerte. En ellos el líquido y el gas circulan a contracorriente con una amplia área de contacto entre líquido y gas.

Las propiedades que debe tener el relleno son:

1. Baja pérdida de presión. Lo que implica un área transversal libre elevada.
2. Alta capacidad. También relacionada con un área transversal libre elevada.
3. Bajo peso y baja retención de líquido.\_
4. Gran superficie activa por unidad de volumen.\_
5. Gran volumen libre por unidad de volumen.\_
6. Alta durabilidad, resistencia a la corrosión, bajo coste.

## Tipos de relleno

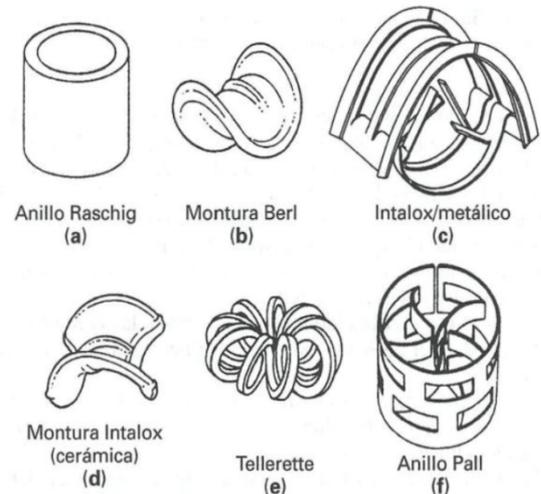
Los productos típicos de relleno y sus características son:

### RELLENO ALEATORIO.

- Anillo Pall (Pall ring) en tamaño de 5/8 a 3 in
- Silla Intalox (Intalox Saddle) en tamaño de 1/4 a 2 in
- Anillo Raschig (Raschig ring) en tamaño de 1/4 a 3 in
- Anillo Lessing (Lessing ring) en tamaño de 3 a 6 in
- Silla Berl (Berl saddle) en tamaño de 1/4 a 2 in

### RELLENO ESTRUCTURADO

- A base de anillos raschig o partición cruzada





Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



## **Cálculos en el diseño de torres.**

No incluiremos aquí una relación de las formulas usadas para el diseño de torres. Para su conocimiento y dominio vamos a estudiar algunos de los ejercicios incluidos en la bibliografía recomendada:

Del texto de McCabe, Smith y Harriott, “Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”, 6ª Ed. en castellano, consultamos los ejercicios 18.1; 18.2 y 18.3



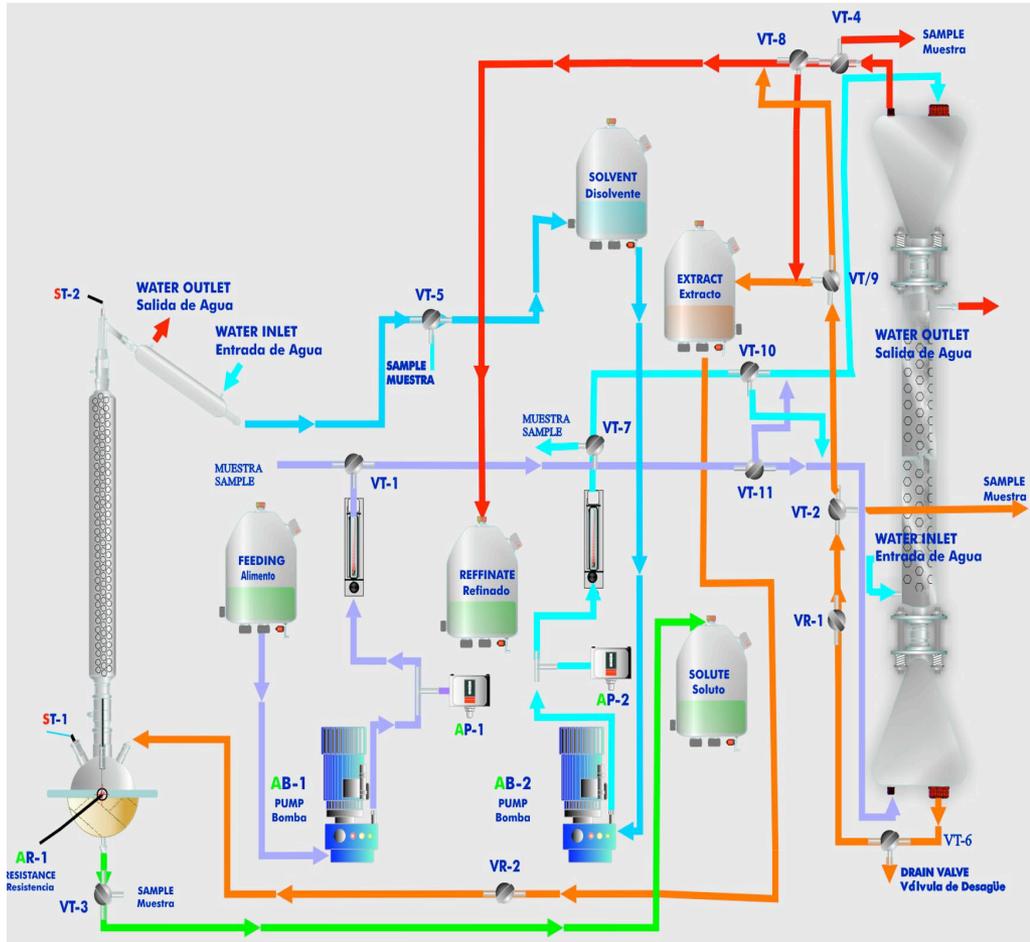
## Extracción Líquido - Líquido

Es un proceso químico empleado para separar una mezcla utilizando la diferencia de solubilidad de sus componentes entre dos líquidos inmiscibles, como por ejemplo agua-cloroformo.

En esta operación se extrae del seno de un líquido A una sustancia (solute) poniendo A en contacto con otro líquido B, inmiscible con el primero, que tiene mayor afinidad por el soluto, pasando la sustancia del seno del líquido A al seno de B.

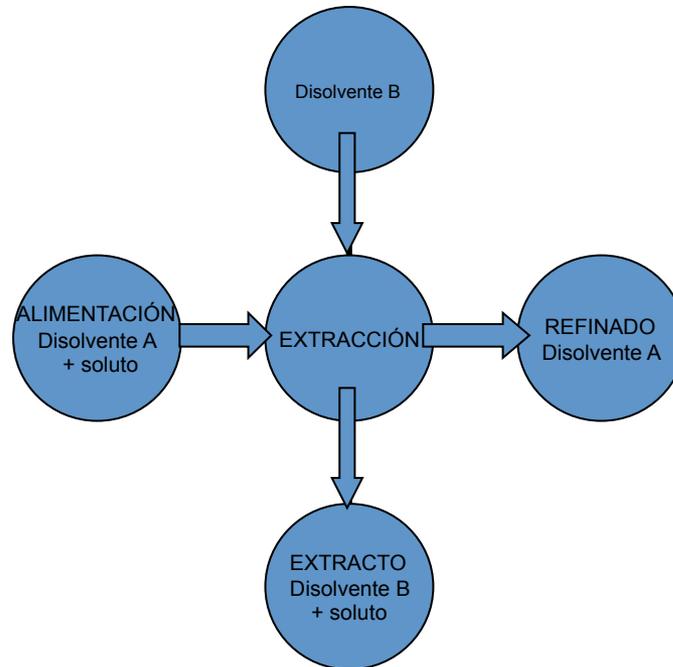
El proceso de lixiviación líquido-líquido separa dos sustancias miscibles o polares (yodo+agua) entre sí por medio de una tercera sustancia, por ejemplo cloroformo, que sea miscible con la sustancia a extraer (yodo) pero no sea miscible con la sustancia de separación (agua).

La transferencia del componente disuelto se puede mejorar por la adición de agentes "formadores de complejos" al disolvente de extracción.



Esquema de la unidad de separación líquido-líquido usada en nuestro laboratorio.

Observamos que se cumple el diagrama:





Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



## SELECCIÓN DEL DISOLVENTE

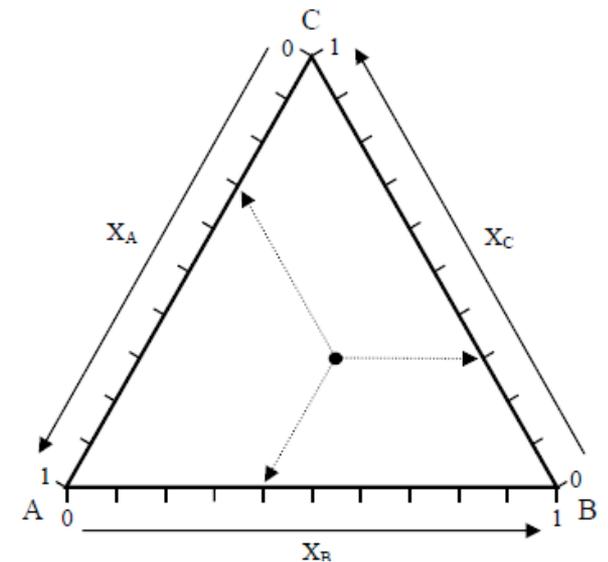
- **Capacidad del disolvente:** capacidad de disolver el soluto, en presencia del diluyente
- **Densidad de Extracto y Refinado diferentes:** de manera que el extractor pueda operar
- **Baja viscosidad:** permite mejor manejo
- **Tensión interfacial:** baja tensión interfacial promueve la dispersión de una fase en otra
- **Inerte**
- **No corrosivo**
- **Fácil recuperación del disolvente**

### Tabla de disolventes de extracción comúnmente utilizados

Nombre	Fórmula	Densidad (g/mL)	Punto de ebullición (°C)	Peligrosidad
<b>Disolventes de extracción menos densos que el agua</b>				
Éter dietílico	(CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O	0,7	35	Muy inflamable, tóxico
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	≈ 0,7	> 60	Inflamable
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,9	80	Inflamable, tóxico, carcinógeno
Tolueno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	0,9	111	Inflamable
Acetato de etilo	CH <sub>3</sub> COOCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	0,9	78	Inflamable, irritante
<b>Disolventes de extracción más densos que el agua</b>				
Diclorometano	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	1,3	41	Tóxico
Cloroformo	CHCl <sub>3</sub>	1,5	61	Tóxico
Tetracloruro de carbono	CCl <sub>4</sub>	1,6	77	Tóxico

Una de las formas de recoger los datos de equilibrio en sistemas ternarios son los diagramas triangulares. En la figura se muestra un diagrama triangular equilátero. Los vértices del triángulo representan compuestos puros, un punto sobre un lado correspondería a una mezcla binaria y un punto en el interior del triángulo representaría una mezcla ternaria.

La composición de una mezcla puede determinarse por lectura directa en el diagrama. La concentración de los componentes en el diagrama se muestra como fracción molar o fracción másica.



Llamaremos Coeficiente de Distribución o Coeficiente de Reparto “ $K_i$ ” entre las 2 fases separadas R y E, a la relación entre las concentraciones que alcanza ese componente en ambas fases en EQUILIBRIO.

$$K_i = \frac{[i]_e}{[i]_r}$$

$K_i$  depende de:

- Disolvente empleado.
- Composición de la mezcla.
- Temperatura.

## **EQUIPOS PARA EXTRACCIÓN Líquido-Líquido**

### **Extracción por etapas:**

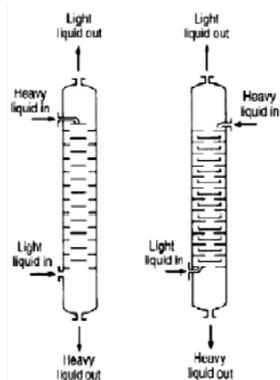
- Mezclador - sedimentador
- Torres platos perforados
- Columnas de bandejas

### **Extracción por contacto continuo:**

- Torres de pulverización
- Torres de relleno
- Columnas pulsadas
- Extractores centrífugos

## Algunas formas de extracción:

### Extracción por etapas: COLUMNAS

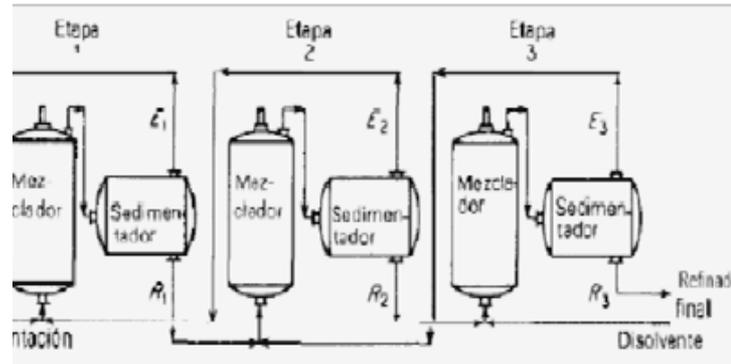


a) Platos      b) Bandejas

Redispersión pobre entre etapas.  
Bajas eficiencias.



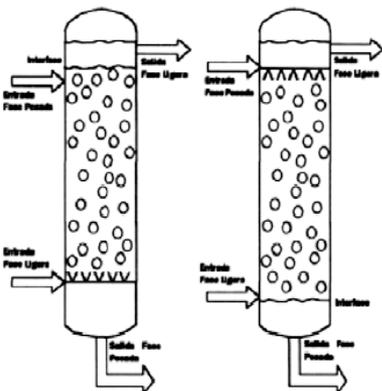
### Extracción por etapas: MEZCLADOR SEDIMENTADOR



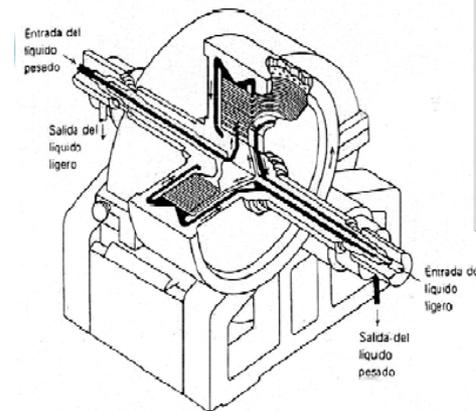
Sedimentación por gravedad.

### 2. Extracción por contacto diferencial: EXTRACTOR CENTRIFUGO

### Extracción por contacto diferencial: COLUMNAS SPRAY



El tamaño de gota es un factor crítico.



Extractor Podbielniak.

Líquidos con poca diferencia de densidades.

Fase ligera dispersada

Fase pesada dispersada

## Absorción

Es la operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido con el, cual forma solución (un soluto, o varios solutos, se absorben de la fase gaseosa y pasan a la líquida). Este proceso implica una difusión molecular turbulenta o una transferencia de masa del soluto a través del gas, que no se difunde y está en reposo, hacia un líquido, también en reposo. Un ejemplo es la absorción de amoníaco del aire por medio de agua líquida o una salmuera o el  $\text{SO}_2$  procedente de una tostación mediante DMA. Al proceso inverso de la absorción se le llama empobrecimiento o desabsorción; cuando el gas es aire puro y el líquido es agua pura, el proceso se llama deshumidificación.



*Foto de la WEB de Rubenplast,  
Fabricante de diversos equipos*



Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



LAVADOR DE GASES.

Generalmente, el diseño pretende determinar:

1. El mejor disolvente;
2. La velocidad óptima del gas a través de la columna, es decir, el diámetro de ésta;
3. La altura de la columna y sus elementos interiores, lo que significa la altura y el tipo de relleno o el número de pisos de contacto;
4. El caudal óptimo del disolvente a través del absorbedor;
5. Las temperaturas de las corrientes que entran a la columna y que salen de ella y la cantidad de calor a eliminar para compensar el calor de disolución y otros efectos térmicos;
6. Las presiones a las que deberán operar las columnas de absorción.
7. El diseño mecánico de los recipientes (normalmente columnas o torres),



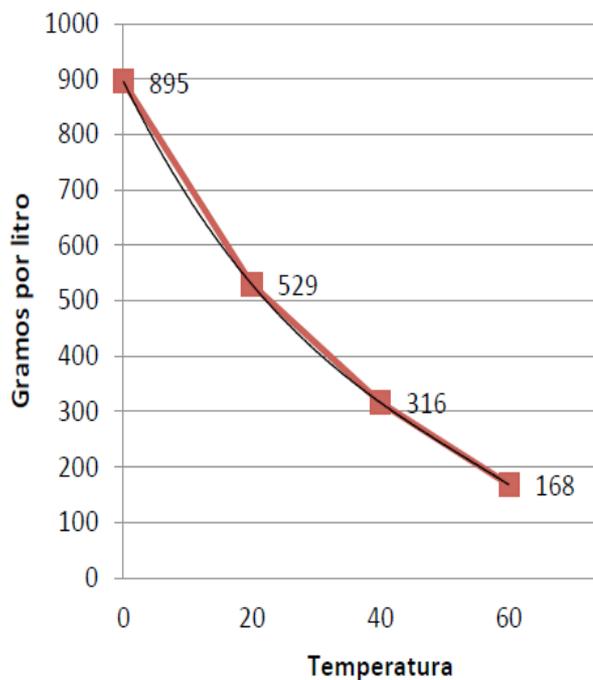
Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



En el planteamiento del problema de diseño de una unidad de absorción de gases se especifican, generalmente, las magnitudes siguientes:

1. caudal de gas;
2. composición del gas, al menos con respecto al componente o a los componentes que deben absorberse;
3. presión de operación y pérdida de carga admisible a través del aparato;
4. mínimo grado de recuperación de uno o más solutos, y, posiblemente,
5. el disolvente a utilizar.

Tablas de solubilidades en agua:



Solubilidades en agua de diversos compuestos

$$p = B x \quad (p, \text{ presión parcial en atm; } x, \text{ fracción molar del soluto en el líquido})$$

Compuesto	TEMPERATURA, °C							Constante dada
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	80°	
Aire . . . . .	4,32	5,49	6,64	7,71	8,70	9,46	10,7	$B \cdot 10^{-4}$
CO <sub>2</sub> . . . . .	0,728	1,04	1,42	1,86	2,33	2,83	—	$B \cdot 10^{-3}$
H <sub>2</sub> S . . . . .	2,68	3,67	4,83	6,09	7,45	8,84	13,5	$B \cdot 10^{-2}$
CO . . . . .	3,52	4,42	5,36	6,20	6,96	7,61	8,45	$B \cdot 10^{-4}$
CH <sub>4</sub> . . . . .	2,24	2,97	3,76	4,49	5,20	5,77	6,82	$B \cdot 10^{-4}$
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> . . . . .	5,52	7,68	10,2	12,7	—	—	—	$B \cdot 10^{-3}$
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> . . . . .	0,72	0,96	1,21	1,46	—	—	—	$B \cdot 10^{-3}$
H <sub>2</sub> . . . . .	5,79	6,36	6,83	7,29	7,51	7,65	7,55	$B \cdot 10^{-4}$

Solubilidad del NH<sub>3</sub> en H<sub>2</sub>O

Peso de NH <sub>3</sub> por 100 de H <sub>2</sub> O	Presión parcial de NH <sub>3</sub> , mm Hg a temp. °C					
	0°	10°	20°	30°	40°	50°
100	947					
90	785					
80	636	987				
70	500	780				
60	380	600	945			
50	275	439	686			
40	190	301	470	719		
30	119	190	298	454	692	
20	64	103,5	166	260	395	596
10	25,1	41,8	69,6	110	167	247
5	11,2	19,1	31,7	51,0	76,5	115
2,5			15,0	24,4	37,6	55,7
2			12,0	19,3	30	44,5
1					15,4	22,2

La **adsorción**, se define como la acumulación de material (llamado adsorbato) en una superficie (sólida o líquida), es muy diferente de la absorción, que se realiza en todo el volumen.

Tipos de adsorción:

- 1.- Física : la especie adsorbida) conserva su naturaleza química
- 2.- Química: la especie adsorbida sufre una transformación para dar lugar a una especie distinta.

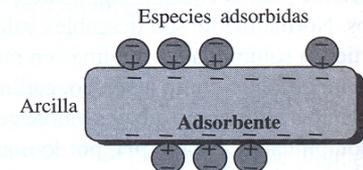
Diferencias notables:

- I) En la absorción física, el gas se adsorbe formando capas sucesivas, mientras que en la química la adsorción queda restringida a una monocapa.
- II) La energía de adsorción es mayor en la quimisorción que en el caso de la fisorción.

La adsorción es un proceso reversible

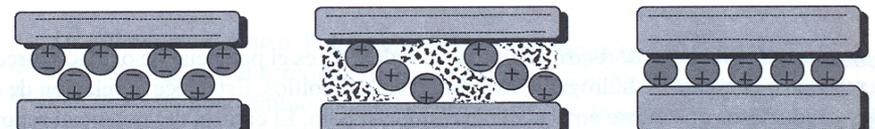
### ADSORCIÓN

Ejemplo: Interacción entre una capa sencilla de mineral de arcilla y grupos polares



### QUIMIADSORCIÓN

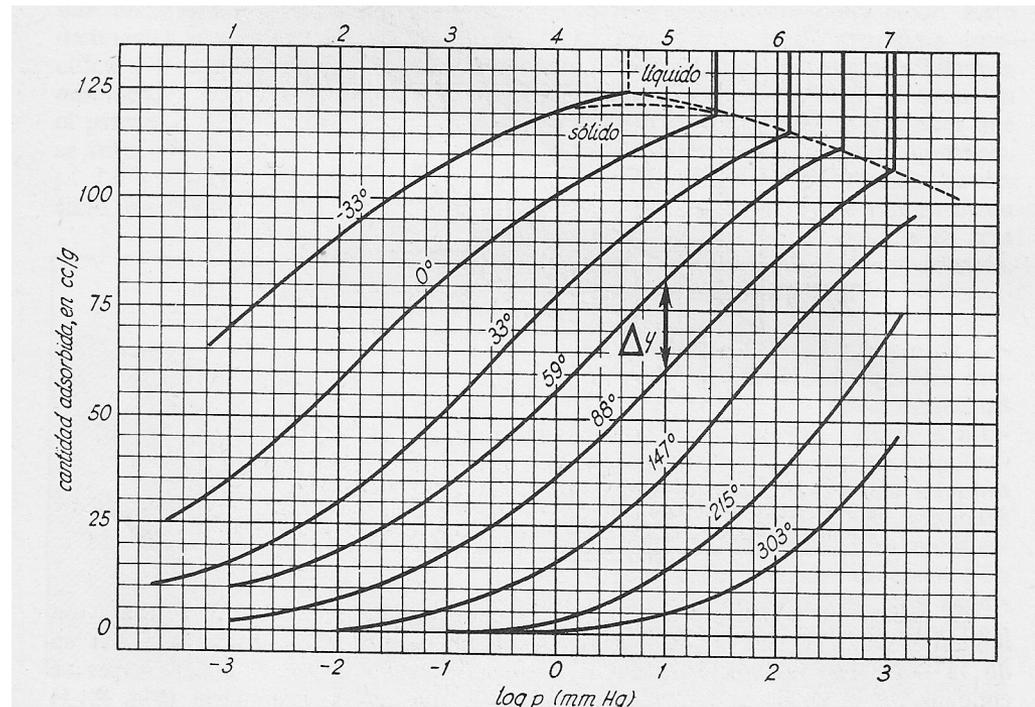
Ejemplo: Componentes orgánicos sobre arcillas

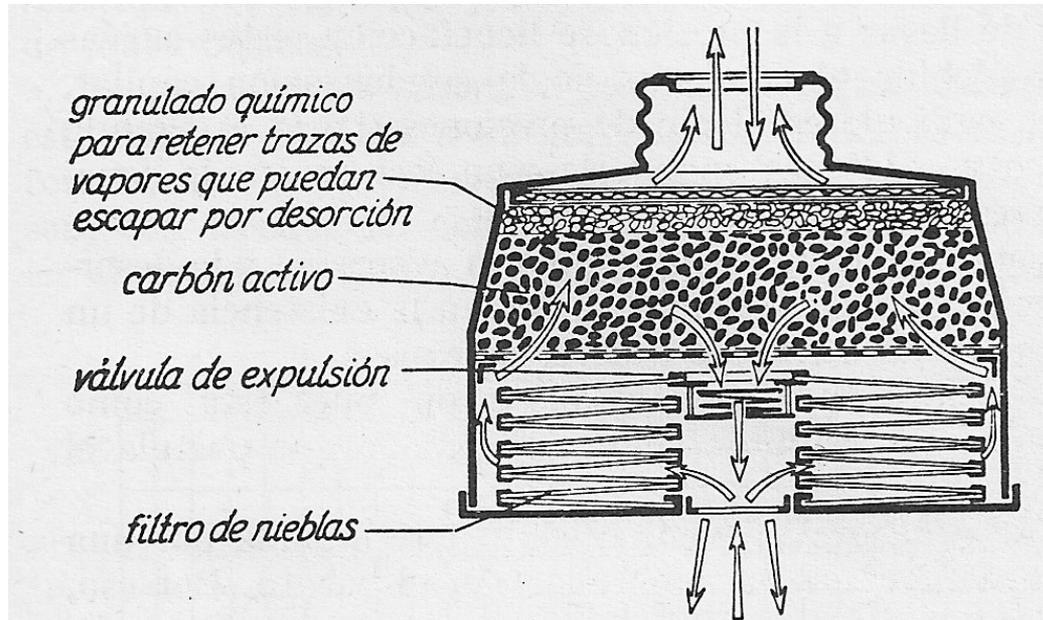


El carbón activo, por su gran superficie específica, es ampliamente usado en la absorción: La grafica adjunta representa las isotermas de absorción del benceno sobre dicho carbón.

Observamos que la temperatura influye desfavorablemente pues la adsorción es, como toda condensación, exotérmica.

(grafica del texto “Elementos de Ingeniería Química” de Vian-Ocon)





Aplicación de cartucho filtrante, usado como careta antigas.

(Dibujo del texto de Vian-Ocon)

## **Desorción (Stripping)**

La desorción es la operación inversa a la absorción. Se puede efectuar:

- I) Pasando una corriente de aire u otro gas para invertir el equilibrio de adsorción.
- II) Pasar por el lecho del adsorbente una corriente que mejore las propiedades de este.
- III) Elevando la temperatura



Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



**Aplicaciones** en las que se emplea éste proceso de adsorción como separación son: purificación de agua, tratamiento de aguas residuales, quitar olores, sabores o colores no deseados por ejemplo en aceites, jarabes de azúcar, en la deshumidificación de gasolinas, o en el secado de aire.

Otra aplicación muy extendida es la obtención de nitrógeno, haciendo pasar un caudal de aire comprimido por el lecho adsorbente, compuesto por carbón molecular, especialmente manufacturado para ese propósito.



Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º

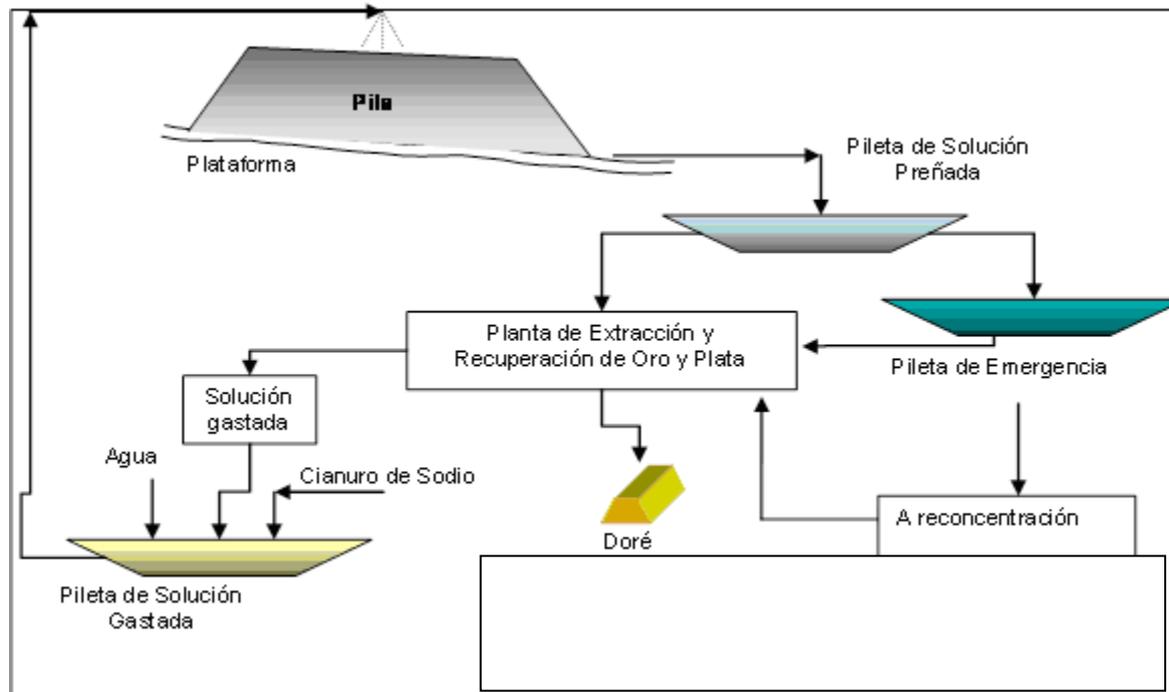


## Lixiviación

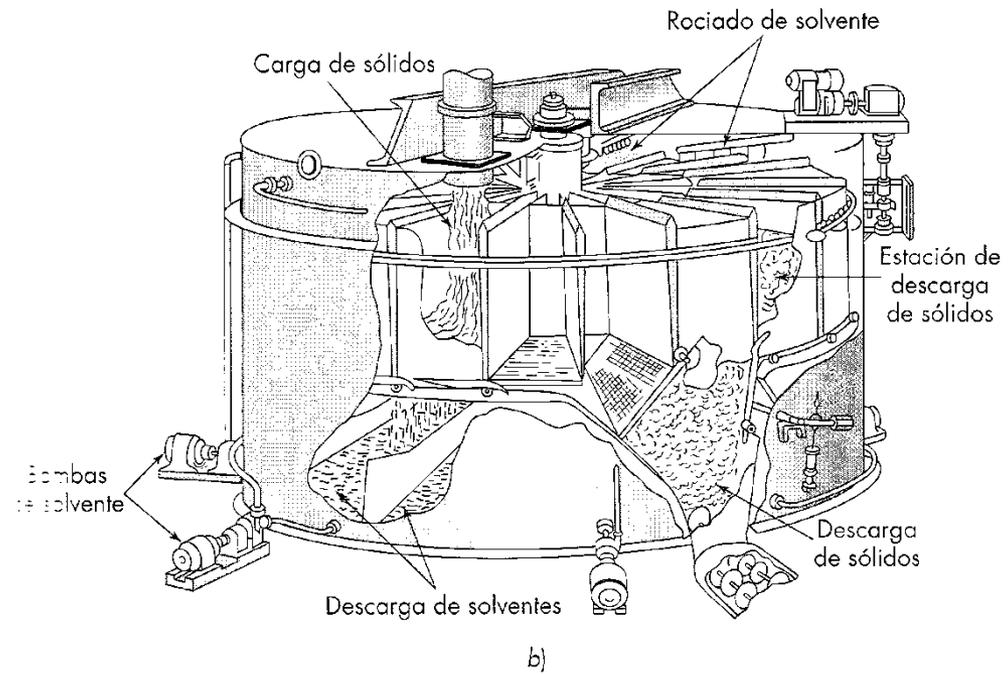
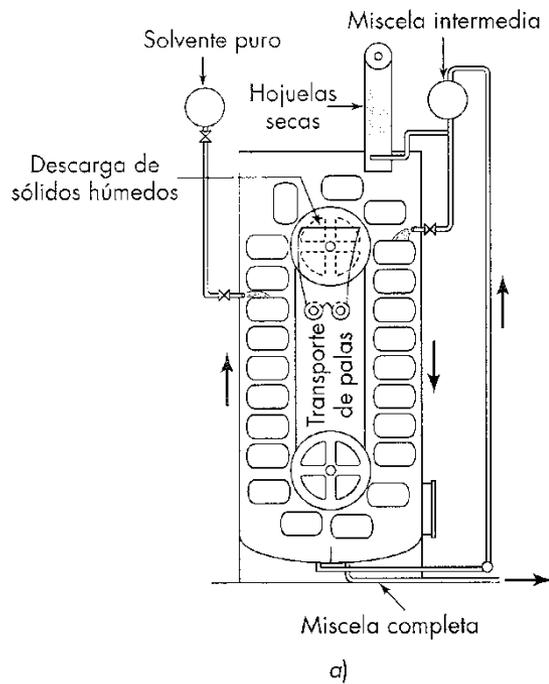
Extracción sólido-líquido, es un proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la elución de uno o más de los componentes solubles del sólido. Difiere poco del lavado o filtrado de sólidos.

Algunos ejemplos:

- El azúcar se separa de la remolacha con agua caliente.
- Los aceites vegetales se recuperan a partir de semillas mediante la lixiviación con disolventes orgánicos.
- La extracción de colorantes se realiza a partir de materias sólidas por lixiviación con alcohol o sosa.



La lixiviación se usa ampliamente en tratamientos metalúrgicos.



Lixiviación en lecho móvil: (a) extractor Bollman; (b) Rotocel

El primero nos permite extraer aceite de soja.



Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



Las figuras anteriores pertenecen al texto “Operaciones unitarias en ingeniería Química” de McCABE, Smith y Harriot.

Consultaremos el capítulo 23, en la sexta edición, para profundizar en la teoría y ejercicios de esta operación.



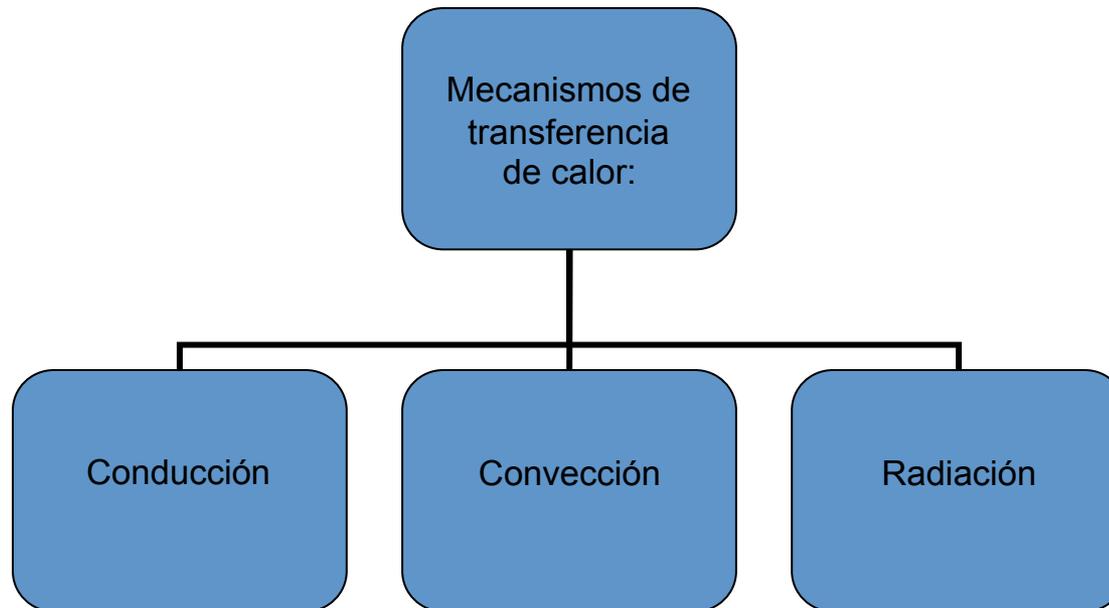
Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



2.2.- Operaciones basadas en transferencia de calor:

Conceptos básicos.

Cambiadore de calor. Evaporación.





Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



## CONDUCCIÓN:

Se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).



Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



## CONVECCIÓN

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende.



Escuela Universitaria de Energía y Minas  
Operaciones y Procesos  
BLOQUE 2º



## **RADIACIÓN**

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica.



Nahle, Nasif. 2006. *Transferencia de Calor*. Biology Cabinet. [http://www.biocab.org/Transferencia\\_Calor.html](http://www.biocab.org/Transferencia_Calor.html)