

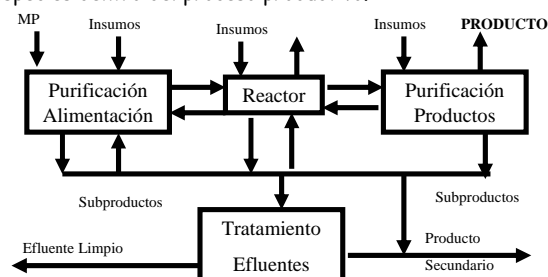
Diseño del Sistema de Separación

Taller de Diseño de Procesos

CONTENIDOS

- Tecnologías de separación.
- Estructura de los sistemas de separación.
- Reducción de la carga de separación.
- Secuenciamiento de operaciones.
- Selección de fenómenos de separación.
- Redes de intercambio de materia.

Los Problemas de Separación se originan al diseñar el Circuito de Reactores y generar la distribución de especies dentro del proceso productivo.

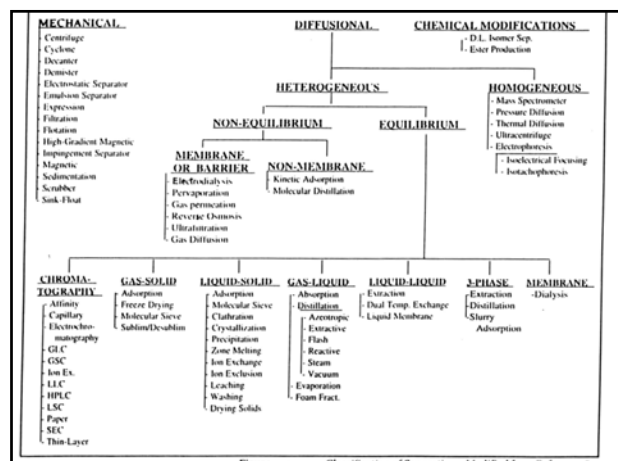
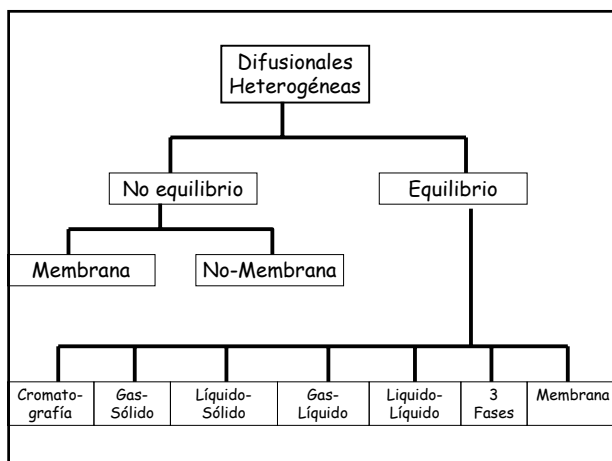
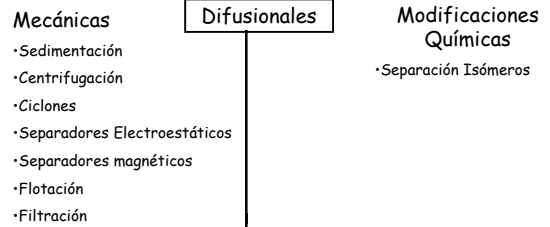


"Al parecer no hay límite en el desarrollo de procesos de separación".

El ingeniero debe crear un ambiente apropiado de separación, en el cual las especies a separar sigan forzosamente un cierto camino.

El ambiente de separación se consigue mediante las condiciones de operación de los equipos y explotando las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de las especies a separar.

Tecnologías de separación



TECNOLOGÍAS DE SEPARACIÓN

Clásicas

- Tamizado, Flotación,
- Prensado, Secado,
- Destilación, Evaporación,
- Absorción, Adsorción,
- Intercambio Iónico,
- Extracción, Lixiviación,
- Cristalización, Filtración,
- Centrifugación, Clarificación,
- Sedimentación, etc.

Nuevas

- Membranas: (ultrafiltración, pervaporación, osmosis inversa, electrodiálisis, diálisis, etc).
- Cromatografías
- Sep. Supercrítica

Name	Feed Phase	Separation Agent	Product Phases	Property Exploited	Practical Example
Equilibrium Separation Processes					
1. Evaporation	Liquid	Heat	Liquid + vapor	Difference in volatility (vapor pressure)	Concentration of fruit juices
2. Flash evaporation	Liquid	Pressure reduction (vacuum)	Liquid + vapor	Same	Flash process for organic separations
3. Distillation	Liquid and/or vapor	Heat	Liquid + vapor	Same (repeated internally)	Removal of light hydrocarbons from crude oil
4. Stripping	Liquid	Noncondensable gas	Liquid + vapor	Same	Removal of CO ₂ and H ₂ S from natural gas by absorption
5. Absorption	Gas	Nonvolatile liquid	Liquid + vapor	Practical solubility	Recovery of antibiotics
6. Extraction	Liquid	Immiscible liquid	Two liquids	Different solubilities of solutes in the two liquid phases	Recovery of antibiotics
7. Crystallization	Liquid	Cooling, or other heat-exchange, concentration, evaporation	Liquid and solids	Difference in freezing temperatures	Freezing process for solvent purification
8. Adsorption	Gas or liquid	Solid adsorbent	Fluid and solid	Difference in adsorption potentials	Drying of gases by solid desiccants
9. Ion exchange	Liquid	Solid resin	Liquid + solid resin	Law of mass action applied to available ionic sites or cations	Water softening
10. Drying of solids	Moist solid	Heat	Dry solid + humid vapor	Evaporation of water	Food dehydration
11. Leaching or washing	Solids	Solvent	Liquid + solid	Practical solubility	Leaching of CuSO ₄ from oxidized ore
TABLE 4.1-1 Classes of Separation Processes (Cont.)					
Name	Feed Phase	Separation Agent	Product Phases	Property Exploited	Practical Example
12. Chelation	Liquid	Chelating molecule and cooling	Liquid + solid	Preferential participation in complex reaction	Hydrolysis process for wastewater disinfection
13. Osmosis	Salt solution	More concentrated salt solution membrane	Two liquids	Tendency to achieve uniform osmotic pressure	Suggested for food dehydration
14. Bubble fractionation	Liquid	Rising air bubbles, sometimes also completing surfactants	Two liquids	Tendency of more dense liquid to rise with air bubbles	Removal of surfactants from laundry waste, etc.
15. Flotation	Mixed powdered solids	Added surfactants, rising air bubbles	Two solids	Tendency of more hydrophobic particles to attach to air bubbles	One flotation: recovery of iron sulfide from waste; another: concentration of ferrous ores
16. Magnetic separation	Mixed powdered solids	Magnetic field	Two solids	Attraction of materials in magnetic field	Concentration of ferrous ores
17. Paper chromatography	Liquid	Capillary, paper or gel phase	Regions of movement	Retention of solutes on stationary phase	Process separation of solutes
18. Freeze drying	Freeze water-containing solid	Heat	Dry solid and water vapor	Sublimation of water	Food dehydration
19. Desublimation	Vapor	Cooling	Solid and vapor	Sublimation of solute from vapor	Purification of phthalic anhydride
20. Gel filtration	Liquid	Solid gel (e.g., cross-linked dextran)	Gel phase and liquid	Differences in molecular size and tendency to adsorb on gel matrix	Purification of pharmaceuticals and biochemical separation of proteins

* From C. J. King, Separation Processes, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.

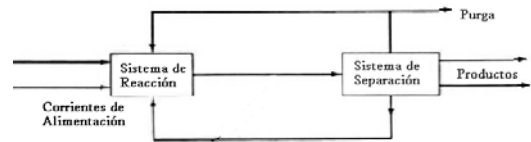
Name	Feed Phase	Separation Agent	Product Phases	Property Exploited	Practical Example
21. Thin-layer chromatography	Fluid	Thin-layer coating	Two fluids	Differences in retention time	Separation of solutes
22. Zone melting	Solid	Heat	Solid of immiscible composition	Same as crystallization	Ultracleaning of metals
Rate-Controlled Separation Processes					
1. Gas-liquid diffusion	Gas	Pressure gradient (compressor work)	Gases	Difference in rate of diffusion (Fick's law)	Separation of O ₂ and N ₂ from air
2. Sweep diffusion	Gas	Conductible vapor	Gases	Difference in diffusion coefficients	Suggested for separation of gases
3. Thermal diffusion	Gas or liquid	Temperature gradient	Gases or liquids	Differences in thermal conductivity	Suggested for separation of gases
4. Mass spectrometry	Gas	Magnetic field	Gases	Differences in mass-to-charge ratio	Separation of ions
5. Electrolysis	Liquid	Selective membrane	Liquids	Differences in ionic conductivity	Recovery of H ₂ SO ₄ from spent sulfuric acid
6. Electrodialysis	Liquid	Anionic and cationic membranes, electric field	Liquids	Tendency of ions to pass through selective membranes	Desalination of brackish water
7. Gas permeation	Gas	Selective membrane	Gases	Differences in solubility and transport rates through membrane	Purification of hydrogen by means of palladium membrane
TABLE 4.1-1 Classes of Separation Processes (Cont.)					
Name	Feed Phase	Separation Agent	Product Phases	Property Exploited	Practical Example
8. Electrophoresis	Liquid containing solutes	Electric field	Liquids	Differences in electrical mobility	Concentration of HCl in H ₂ O
9. Electromembrane filtration	Liquid	Electrical field	Liquids	Differences in electrical mobility	Concentration of HCl in H ₂ O
10. Ultrafiltration	Liquid	Pressure gradient (pumping work) + membrane	Two liquid phases	Differences in molecular size	Separation of large polymers from small molecules
11. Reverse osmosis	Liquid solution	Pressure gradient (pumping work) + membrane	Two liquid solutions	Differences in osmotic pressure	Desalination of seawater
12. Ultrafiltration	Liquid solution containing large molecules or colloids	Pressure gradient (pumping work) + membrane	Two liquid phases	Differences in molecular size	Waste-water treatment; protein concentration; artificial kidney
13. Molecular distillation	Liquid mixtures	Heat and vacuum	Liquid and vapor	Differences in mean free path	Separation of "heavy" and "light" hydrocarbons
Mechanical Separation Processes					
1. Filtration	Liquid + solid	Pressure (vacuum or gravity)	Liquid + solid	Size of solid particles (pore size of filter medium)	Recovery of charcoal from sludge
2. Melt distillation	Gas + solid or liquid	Pressure (vacuum or gravity)	Gas + solid or liquid	Same	Removal of SO ₂ from stack gas
3. Settling	Liquid + solid	Gravity	Liquid + solid	Density and size differences	Clarification of fruit juices

Ejemplos de Procesos de Separación

Operación	Agente Separador	Ejemplo
Absorción	solvente	Remoción de CO ₂ y H ₂ S del gas natural con aminas
Adsorción	adsorbente/resina	Separación de meta y para xileno; O ₂ y N ₂ del aire, desmineralización del agua
Cromatografía	adsorbente	Separación de azúcares, proteínas, orgánicos
Cristalización	remoción de calor	Producción de sales
Destilación	calor	Separación de propano/propano, producción de gasolina a partir de petróleo, separación O ₂ , N ₂ y Ar del aire
Secado	calor	Cerámicas, plásticos, alimentos, fármacos, madera
Electrodialisis	membrana	Desalinización de aguas
Evaporación	calor	Concentración de jugos, azúcar, salmueras y pulpas
Extracción	solvente	Recuperación de benceno/tolueno/xileno a partir de gasolina reformada, Remoción de la cafeína del café
Membranas	membrana	Separación de H ₂ desde HC, concentración de aguas, desalinización de aguas, Remoción de CO ₂ del aire
Desorción (stripping)	gas de arrastre	Remoción de benceno de aguas residuales, Recuperación de solventes

REGLAS HEURISTICAS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE SEPARACION

Estructura de los Sistemas de Separación



La forma de llevar a cabo las separaciones, pueden ser variadas, pero ¿cómo se selecciona la más adecuada?

Existe mucha experiencia que ha permitido definir algunas REGLAS HEURISTICA

Reducción de la Carga de Separación

Regla 1

"Mientras sea posible, se debe reducir la carga o flujo másico de separación por medio de división y mezclas de corrientes".

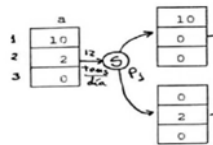
Carga de una separación

Calculo de la carga de una separación

Es igual a la suma de los flujos másico que procesa.

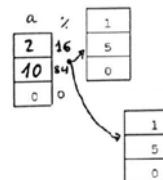
Ejemplo:

$$\text{Carga Separación} = 10 + 2 = 12 \text{ ton/día}$$



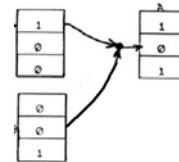
La carga de división o mezcla de flujos es NULA

Ejemplo: División



Carga División = 0 ton/día

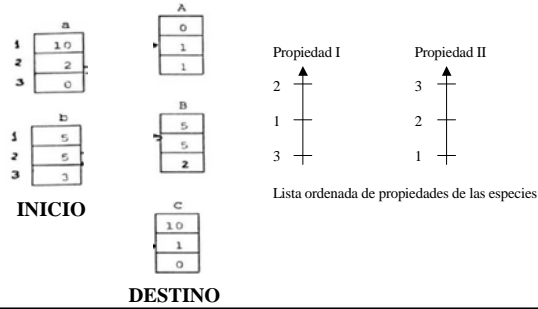
Ejemplo Mezcla



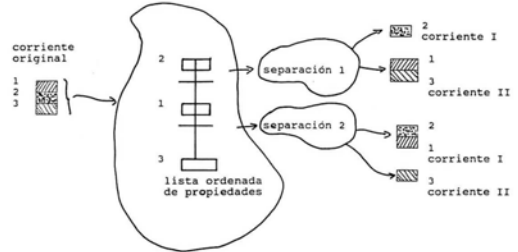
Carga Mezcla = 0 ton/día

Reducción de la Carga de Separación

Ejemplo: Se tienen 2 corrientes (a y b) y se desean producir 3 corrientes (A, B y C), las características son las siguientes:

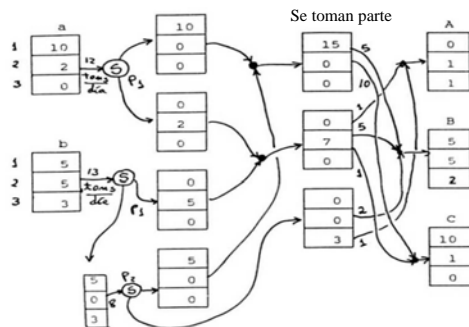


Alternativas de Separación



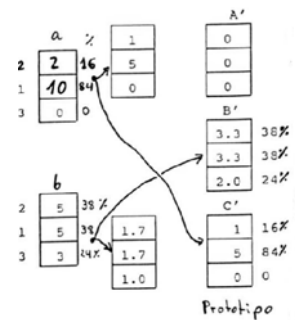
Para Separar las Tres Especies en una Corriente se puede explotar solo una propiedad Físico-Química o Biológicas

MALA ALTERNATIVA, sin uso de reglas



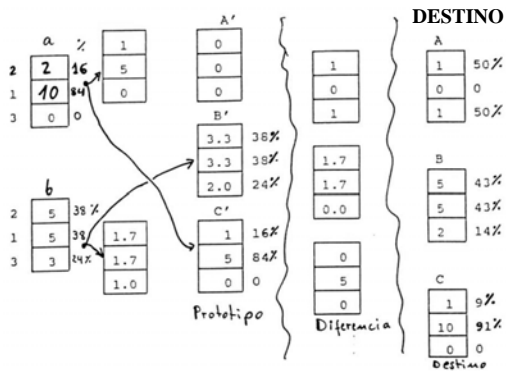
CONSIDERANDO LAS REGLAS

1.- Aplicar divisiones que lleven a corrientes intermedias, similares a las objetivos

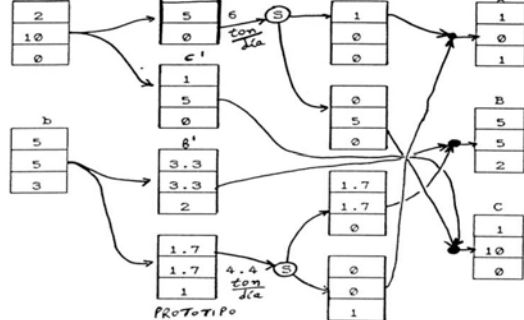


Prototipo de destinos formado por división de corrientes. (a es parecido a C y b es parecido a B).

Se evalúa lo que falta para llegar a las corrientes objetivo



DIVISIONES SEPARACION MEZCLA



Una secuencia de separaciones mucho más eficiente
(Carga de separación = 6 + 4.4 = 10.4 ton/día)

Secuenciamiento de Operaciones

Heurística:

Siendo todos los compuestos similares, intente separar los más abundantes primero.

Ejemplo 1:

Si 8000 ton/h de mineral deben ser procesados por tamizado para obtener la siguiente distribución de tamaños:

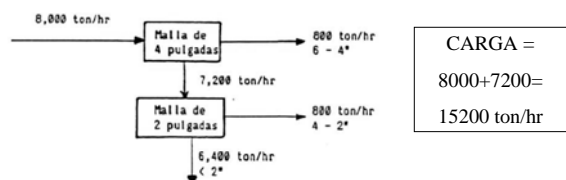
10% entre 6-4"; 10% entre 4-2"; y 80% < 2".

¿Cuál separaría primero de tal manera de separar los 3 tamaños de mineral?

Respuesta

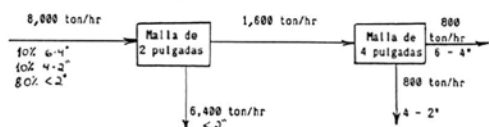
Mineral	%	Flujo (ton/hr)
6-4"	10	800
4-2"	10	800
< 2"	80	6400

Alternativa 1



ALTERNATIVA 2

Remover el material más abundante primero



$$\text{CARGA} = 8000 + 1600 = 9600 \text{ ton/hr}$$

La segunda alternativa que sigue la regla tiene menor carga, luego es la recomendada.

Secuenciamiento de Operaciones

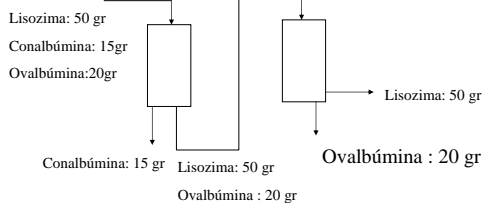
Ejemplo 2:

Se tiene un caldo de proteínas que contiene un 50% de lisozima, 20% ovalbumina, 15% conalbúmina, etc.

Si le interesa purificar ovalbúmina ¿Cuál separaría primero?

Alternativa 1 Separar Conalbúmina Primero

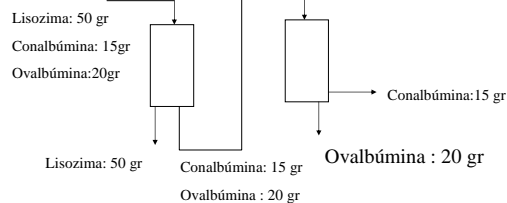
Suponiendo Base de 100 gr



$$\text{CARGA} = 85 + 70 = 155 \text{ gr}$$

Alternativa 1 Separar Lisozima Primero (el más abundante)

Suponiendo Base de 100 gr

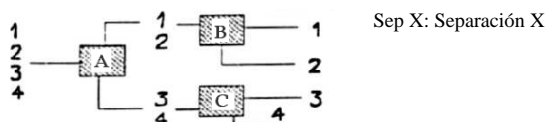


$$\text{CARGA} = 85 + 35 = 120 \text{ gr}$$

Secuenciamiento de Operaciones

Heurística

Siendo todo lo demás igual, intente separar en partes iguales

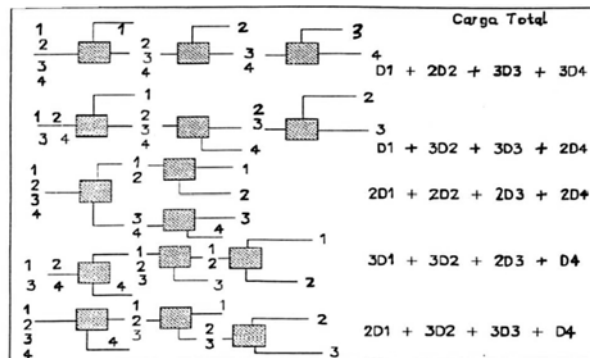


$$\text{CARGA} = \text{Sep A} + \text{Sep B} + \text{Sep C}$$

$$= (D1 + D2 + D3 + D4) + (D1 + D2) + (D3 + D4)$$

$$= 2D1 + 2D2 + 2D3 + 2D4$$

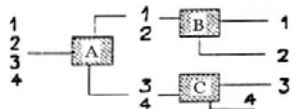
Alternativas para Separar 4 Especies



Asumiendo todas las especies en igual cantidad, (D ton/h)

Secuencia	Carga total
1	9D
2	9D
3	8D
4	9D
5	9D

Separación 3



HEURISTICA "Siendo todo lo demás igual, separar en partes iguales".

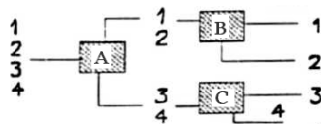
Separación con diferente grado de dificultad

Se introduce el concepto de Costo de Separación (C.S)

$$C.S = \frac{D}{\Delta}$$

D: Flujo Total alimentado

Δ : Diferencia de las propiedades en el punto de separación o corte

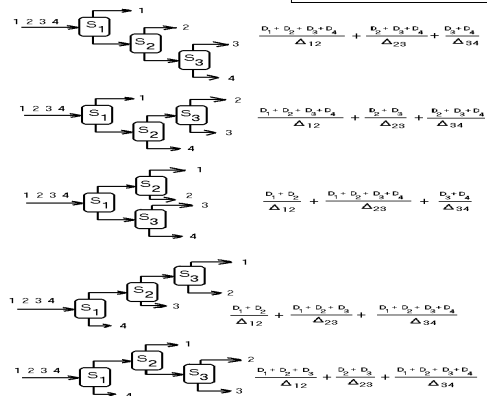


Costo Separación =

$$= \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}{\Delta_{23}} + \frac{D_1 + D_2}{\Delta_{12}} + \frac{D_3 + D_4}{\Delta_{34}}$$

Secuencia de Separación

Costo de separación (C.S)



Considerando:

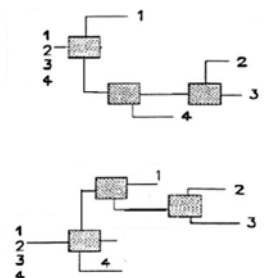
Que todas las corrientes son iguales, $D_1 = D_2 = D_3 = D_4$

Que la separación 2-3 es más difícil (3 veces)

$$\Delta_{12} = \Delta_{34} = 3 * \Delta_{23} = \Delta$$

Secuencia	Costo total
1	$(4 + 9 + 2)D/\Delta = 15D/\Delta$
2	$(4 + 6 + 3)D/\Delta = 13D/\Delta$
3	$(2 + 12 + 2)D/\Delta = 16D/\Delta$
4	$(2 + 9 + 4)D/\Delta = 15D/\Delta$
5	$(3 + 6 + 4)D/\Delta = 13D/\Delta$

Alternativas con menor Costo de Separación Total



Heurística: "Las separaciones difíciles van al final"

HEURISTICA: "Siendo el resto igual, desechar aquellas separaciones que involucren especies que no están normalmente presentes en el proceso. Sin embargo, si se adiciona una especie extraña, se debe remover inmediatamente después de ser utilizada".

Separaciones Directas

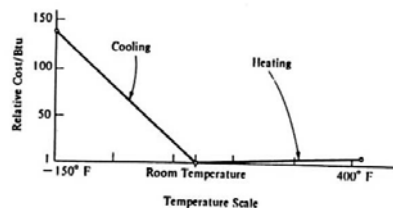
- Destilación
- Evaporación
- Osmosis inversa
- Tamizado
- Cristalización
- etc.

Separaciones Indirectas

- Extracción Líquido/Líquido
- Absorción
- Lixiviación
- Destilación Azeotrópica
- Intercambio Iónico
- etc.

HEURISTICA: "Al utilizar destilación o equipos similares, seleccionar una secuencia que finalmente remueva el producto valioso como destilado, siendo el resto igual".

HEURISTICA: "Siendo el resto de las cosas igual, evitar los alejamientos de las condiciones ambientales, en su defecto, preferir lo alto en vez de lo bajo".



Reglas

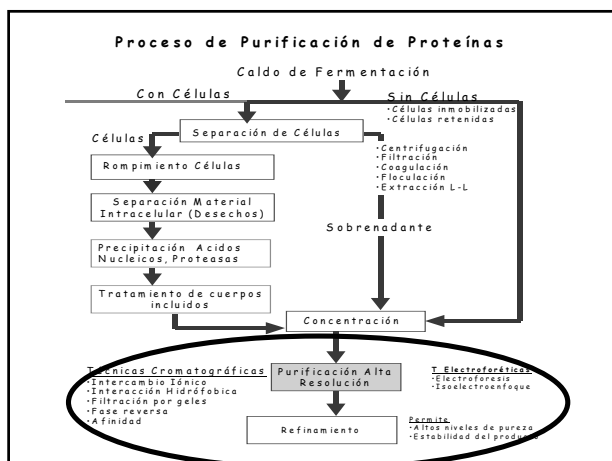
1. Cuando sea posible, reducir la carga de separación por medio de división y mezclas de corrientes
2. Siendo todas las otras cosas iguales, intente separar las especies que se encuentran en mayor cantidad, al principio

3. Siendo todo lo demás igual, separar en partes iguales
4. Remover primero las especies corrosivas
5. Dejar las separaciones difíciles para el final
6. Tratar de no utilizar aquellas separaciones que involucren especies que no están normalmente presentes en el proceso. Sin embargo, si se adiciona una especie, se debe remover lo antes posible

7. Siendo el resto de las cosas igual, evitar los alejamientos de las condiciones ambientales. En su defecto, preferir lo alto en vez de lo bajo.

- Al utilizar destilación o equipos similares, seleccionar una secuencia que finalmente remueva el producto valioso como destilado, siendo el resto igual.
- En un sistema de destilación, se debe preferir aquella secuencia que remueva las especies una a una desde el tope, todo el resto siendo igual.

Ejemplo 1 Purificación de proteínas



Técnicas Cromatográficas

Cromatografía de Intercambio Iónico (IEC): Cromatografía basada en la diferencia de carga. Puede ser catiónica o aniónica.

Cromatografía de Interacción Hidrofóbica (HIC): Cromatografía basada en la diferente hidrofobicidad de las proteínas.

Cromatografía de Filtración por Geles (GF ó SEC): Cromatografía asociada a la diferencia en peso molecular de los compuestos que forman una mezcla. No se recomienda utilizar como primera etapa.

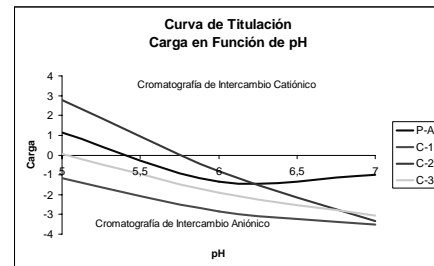
Todas estas cromatografías tienen costos bastante similares

Purificación de Proteínas

Se necesita purificar la proteína P-A , para ello se parte de una mezcla de proteínas.

Proteína	Conc. g/l	pI	Mw KDa	Hidro	Carga		
					pH 5	pH 6	pH 7
P-A	7.70	5.3	80.0	0.48	1.12	-1.36	-1.00
C1	7.06	4.7	85.6	0.48	-1.17	-2.83	-3.50
C2	6.80	5.6	93.4	0.93	2.78	-0.81	-3.32
C3	4.83	5.0	203.0	0.36	0.04	-1.92	-3.07

Curvas de Titulación



Reglas

1. Cuando sea posible, reducir la carga de separación por medio de división y mezclas de corrientes.
2. Siendo todas las otras cosas iguales, intente separar las especies que se encuentran en mayor cantidad, al principio.
3. Siendo todo lo demás igual, separar en partes iguales.
4. Remover primero las especies corrosivas.
5. Dejar las separaciones difíciles para el final.
6. Tratar de no utilizar aquellas separaciones que involucren especies que no están normalmente presentes en el proceso. Sin embargo, si se adiciona una especie, se debe remover lo antes posible.
7. Siendo el resto de las cosas igual, evitar los alejamientos de las condiciones ambientales. En su defecto, preferir lo alto en vez de lo bajo.

R2:

"Eliminar los contaminantes en mayor cantidad primero"

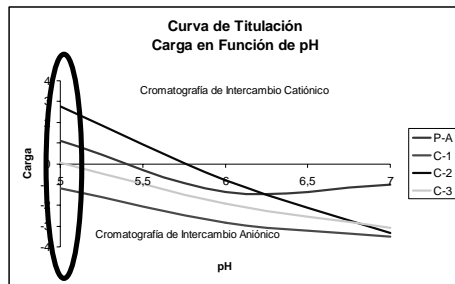
Proteína	Conc. g/l	pI	Mw KDa	Hidro	Carga		
					pH 5	pH 6	pH 7
P-A	7.70	5.3	80.0	0.48	1.12	-1.36	-1.00
C1	7.06	4.7	85.6	0.48	-1.17	-2.83	-3.50
C2	6.80	5.6	93.4	0.93	2.78	-0.81	-3.32
C3	4.83	5.0	203.0	0.36	0.04	-1.92	-3.07

1ª Etapa

El contaminante en mayor porcentaje es C-1.

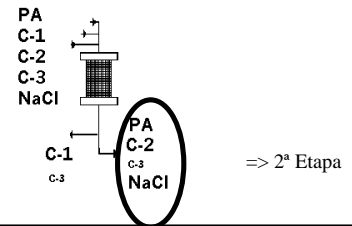
¿Cómo?

Curvas de Titulación



- Para ello se recurre a una cromatografía de Intercambio Catiónico a pH 5.0. Quedan retenidos P-A, C-2 y parte de C-3.
- En esta etapa se adiciona NaCl que se debe eliminar posteriormente.

Diagrama



R2:

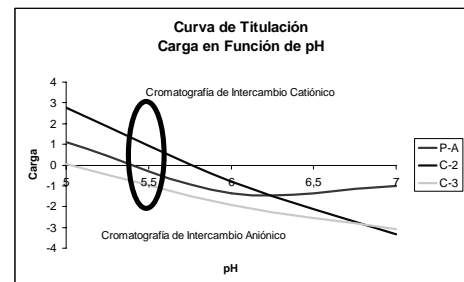
"Eliminar los contaminantes en mayor cantidad primero"

Proteína	Conc. g/l	pI	Mw KDa	Hidro	Carga		
					pH 5	pH 6	pH 7
P-A	7.70	5.3	80.0	0.48	1.12	-1.36	-1.00
C2	6.80	5.6	93.4	0.93	2.78	-0.81	-3.32
C3	4.83	5.0	203.0	0.36	0.04	-1.92	-3.07

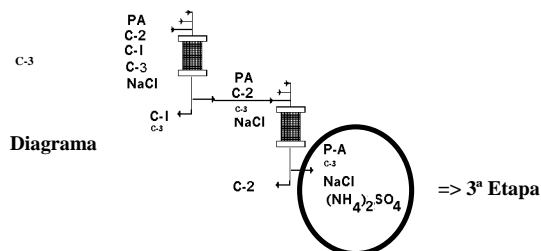
1ª Etapa

El contaminante en mayor porcentaje es C-2.
¿Cómo?

Curvas de Titulación



- Para ello se recurre a una Cromatografía de Interacción Hidrofóbica (HIC), allí se separa P-A y C-3 (remanente) de C-2.
- HIC presenta la ventaja de no necesitar eliminar el NaCl
- En esta etapa se adiciona Sulfato de Amonio que se debe eliminar posteriormente.



R2:

"Eliminar los contaminantes en mayor cantidad primero"

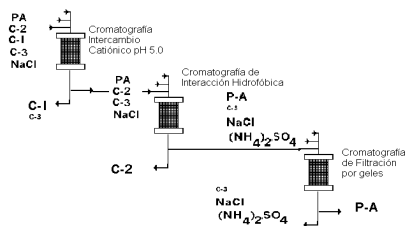
Proteína	Conc. g/l	pI	Mw KDa	Hidro	Carga		
					pH 5	pH 6	pH 7
P-A	7.70	5.3	80.0	0.48	1.12	-1.36	-1.00
C3	4.83	5.0	203.0	0.36	0.04	-1.92	-3.07

1ª Etapa

**El contaminante en mayor porcentaje es C-3.
¿Cómo?**

3ª Etapa

- Se recurre a una **Cromatografía de Filtración por Geles** que separa los residuos de C-3 (mínimos) y principalmente las sales (NaCl y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)



Calcule la carga de separación del proceso.

Si se considera que la separación por GF es 2 veces más difícil que resto ¿Cambiaría la secuencia óptima?

Ejemplo 2: Limitaciones Técnicas

Suero de contaminante a producto comercial

La producción de queso utiliza como materia prima leche y que genera:

- Queso 1Kg
- Suero 8-10 Kg (DBO 140 ton/día, población 60000 personas)

⇒ Es importante la conversión de este contaminante a un producto valioso

¿Cómo convertirlo en producto comercial?

- Suero contiene:
 - 12 – 20% de proteínas
 - Mayoría de los constituyentes solubles de la leche
 - Alto contenido de lactosa (azúcar)
- Si se fracciona en:
 - Fracción alto contenido de proteína (Gran mercado)
 - Fracción alto contenido de lactosa (Menor mercado)

Tiene posibilidades comerciales, en industria química y de alimentos

Alternativas

- Ruta Biológica
 - Fermentación del suero con *S. fragiles*. Esta levadura degrada lactosa y produce biomasa que procesado puede ser utilizado en consumo humano.
- Ruta de separaciones
 - Producir un sólido rico en proteínas y libre de sales
 - Producir un sólido sólido libre de sales y rico en lactosa

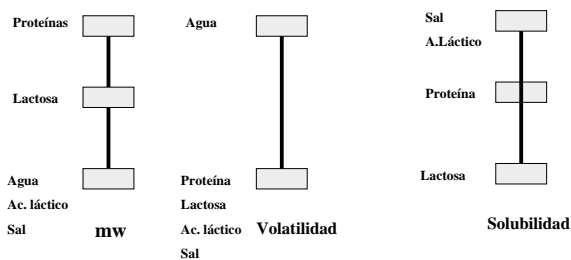
<u>Proteína</u>	α-lactoalbumina 14.4 KDa β-lactoglobulina 36 KDa proteasa-peptona 200 KDa •solubles en agua •precipitan como un gel cuando se concentra el suero por evaporación hasta un 50 a 60% de sólidos.
<u>Lactosa</u> : $C_{12}H_{22}O_{11}$	Mw : 342 •principal azúcar de la leche. •soluble en agua sólo hasta un 10% de sólidos.
<u>Ácido láctico</u> : $CH_3CHOHCOOH$	•Mw 90 •se forma por la acción del <i>Bacillus acidilactici</i> en la lactosa. •líquido viscoso e incoloro •soluble en agua, etanol y éter a cualquier concentración.

<u>Sales Minerales</u>	•Mw 50-100 •sales inorgánicas de sodio y calcio •en solución se encuentran como iones, y por esto son más móviles •Estas sales limitan el sabor de los alimentos.
<u>Agua</u>	•Esta es la única sustancia volátil en el suero. •La evaporación de agua requiere 970 BTU/lb. •Esta vaporización es algo costosa.

Compuestos del suero y sus propiedades

Compuesto	Composición %	mw	Volatilidad	Solubilidad en agua
Agua	93.4	18	Volátil	-
Proteínas	0.9	10000-200000	No-volátil	Hasta 50%
Lactosa	5.0	342	No-volátil	Hasta 10%
Ac.Láctico	0.2	90	No-volátil	Muy Soluble
Sales	0.5	20-100	No-volátil	Muy Soluble

Compuestos del suero y sus propiedades



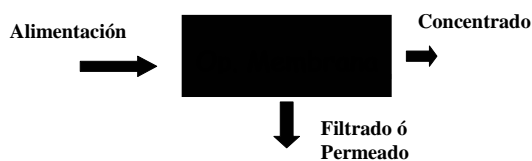
Alternativas de proceso

Eliminar los contaminantes en mayor cantidad primero
¿Cuál? Agua
¿COMO?

- Diferencia de solubilidad y mw de las proteínas y la lactosa.
 - Solubilidad: Si se evapora el agua primero cristaliza la lactosa y luego las proteínas, pero con las sales.
 - Mw: gran diferencias => se pueden aplicar operaciones de membrana. Puede separar las sales y el ac. Láctico desde las proteínas y la lactosa.

Operaciones de membrana

- Se tiene una membrana a través de la cual pueden pasar los compuestos de menor tamaño y quedan los de mayor, ie, la movilidad a través de la membrana depende del tamaño.



Restricciones

- La fuerza impulsora es una presión que se ejerce sobre la solución. Esta presión se ve limitada por la tolerancia de la membrana, por esta razón solo se puede aplicar para sueros concentrados hasta un 25% (algunos casos 10%).

Se puede aplicar ultrafiltración, la membrana solo retiene las Proteínas

Especie	Inicial	Filtrado	Concentrado
Agua	0.934	$0.934 x$	$0.934 (1-x)$
Proteína	0.009	0	0.009
Lactosa	0.050	$0.050 x$	$0.050 (1-x)$
Ac. láctico	0.002	$0.002 x$	$0.002 (1-x)$
Sales	0.005	$0.005 x$	$0.005 (1-x)$

x : Fracción de agua removida

x^* Fracción máxima de agua removida

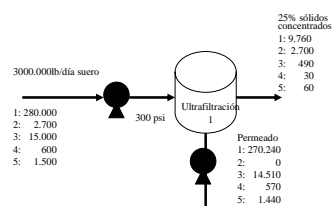
Dado que la concentración máxima de sólidos en el concentrado puede llegar a un 25% \Rightarrow la cantidad de agua debe ser un 75% (Y). Se puede calcular x^* .

$$Y = 0.75 = \frac{0.934 (1-x^*)}{[0.934 (1-x^*) + 0.009 + 0.05 (1-x^*) + 0.002 (1-x^*) + 0.005 (1-x^*)]} \Rightarrow x^* = 0.97$$

Composición del Concentrado y Filtrado obtenido por ultrafiltración

Especie	Composición del producto % pp	
	Concentrado	Filtrado
Agua	75	94
Sólidos	25	6
Proteína	82	-
Lactosa	16	88
Ácido láctico	1	4
Sales	2	9

Por restricciones técnicas sólo se puede separar hasta un 82% de proteína y no completamente de la lactosa. La corriente de lactosa sí puede quedar libre de proteína.



¿ Cómo seguir ?

Evaporando

¿ Cómo seguir ?

Otra ultrafiltración

Conclusiones

- Un equipo de membrana puede ser utilizado para separar el suero en los productos deseados, pero no completamente.
- Los balances de masa nos permiten evaluar las limitaciones en el rendimiento del equipo (82% de concentrado seco). No todas las operaciones se pueden separar al 100%.
- Existen límites técnicos en las operaciones que impiden que sean factibles mayores niveles de recuperación.
- Se requieren de otras operaciones, ie secado.

