

## PROGRAMA DE CURSO

### OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA Y SEPARACIÓN

#### A. Antecedentes generales del curso:

Departamento	Ingeniería Química Biotecnología y Materiales					
Nombre del curso	Operaciones de transferencia de masa y separación	Código	BT4315	Créditos	6	
Nombre del curso en inglés	<i>Unit Operations and Separation Processes</i>					
Horas semanales	Docencia	3	Auxiliares	1,5	Trabajo personal	5,5
Carácter del curso	Obligatorio	X		Electivo		
Requisitos	IQ3312: Fenómenos de transporte					

#### B. Propósito del curso:

El curso tiene como propósito que el estudiantado utilice conceptos tales como separación binaria, procesos dentro y fuera del equilibrio, y cascadas en contracorriente, entre otros, para resolver, mediante ecuaciones, problemas de separación y diseño de operaciones unitarias. Asimismo, selecciona operaciones unitarias de separación considerando, como criterio de optimización del proceso, las propiedades físico – químicas de las mezclas y propiedades de las biomoléculas a separar, la pureza y eficiencia requerida y el costo e impacto asociados a cada operación unitaria.

Otro aspecto esencial del curso, es que el estudiantado pueda diseñar, a nivel conceptual, configuraciones de operaciones de separación y secuencias de proceso óptimas.

El curso tributa a las siguientes competencias específicas (CE) y genéricas (CG):

CE1: Implementar y operar soluciones científico-tecnológicas a problemas relacionados con el ámbito de la industria biotecnológica y áreas afines, a nivel de modelo, prototipo o escala piloto, utilizando criterios técnicos e innovación.

CE2: Optimizar procesos en el ámbito de la industria biotecnológica y áreas afines, aplicando herramientas de la ciencia de la ingeniería.

CE5: Evaluar procesos y/o proyectos de ingeniería en el área de la biotecnología, considerando aspectos técnicos, económicos, éticos, legales, reglamentarios, ambientales y sociales.

CE6: Modelar y resolver problemas complejos en las distintas áreas de aplicación de la biotecnología, tales como industria, biomedicina, medioambiente, biotecnología vegetal y animal y políticas públicas asociadas a la biotecnología, aplicando conocimientos y herramientas científicas y tecnológicas.

#### CG1: Comunicación académica y profesional

Comunicar en español de forma estratégica, clara y eficaz, tanto en modalidad oral como escrita, puntos de vista, propuestas de proyectos y resultados de investigación fundamentados, en situaciones de comunicación compleja, en ambientes sociales, académicos y profesionales.

#### CG4: Trabajo en equipo

Trabajar en equipo, de forma estratégica y colaborativa, en diversas actividades formativas, a partir de la autogestión de sí mismo y de la relación con el otro, interactuando con los demás en diversos roles: de líder, colaborador u otros, según requerimientos u objetivos del trabajo, sin discriminar por género u otra razón.

#### CG5: Sustentabilidad

Concebir, proponer y aplicar nuevas estrategias de solución a problemas de ingeniería y ciencias en el marco del desarrollo sostenible, considerando la finitud de recursos, la interacción entre diferentes actores sociales, ambientales y económicos, además de las regulaciones correspondientes.

### C. Resultados de aprendizaje:

Competencias específicas	Resultados de aprendizaje
CE1, CE2	RA1: Utiliza conceptos tales como separación binaria, procesos dentro y fuera del equilibrio, y cascadas en contracorriente, para resolver, mediante ecuaciones, problemas de separación de compuestos y diseño de operaciones unitarias de separación.
CE2, CE6	RA2: Selecciona operaciones unitarias de separación adecuadas, considerando las propiedades fisicoquímicas de las mezclas a separar, la pureza y eficiencia requerida y el costo asociado a cada operación unitaria, a fin de establecer secuencias óptimas de procesos de separación.
CE1, CE6	RA3: Diseña, a nivel conceptual, configuraciones de operaciones de separación de biomoléculas, considerando eficiencias y costos de cada una de las etapas necesarias para alcanzar el grado de separación requerido.
Competencias genéricas	Resultados de aprendizaje
CG1	RA4: Reporta, con su equipo, en forma escrita y oral, resultados de una investigación acotada de diseños y aplicaciones particulares de operaciones unitarias, considerando cálculos, teorías, leyes, principios y especificaciones para el diseño.

CG4	RA5: Trabaja con su equipo en una exposición oral sobre de diseños y aplicaciones particulares de operaciones unitarias, coordinando una distribución equitativa de las tareas en cada una de las labores, en un clima de colaboración y búsqueda de acuerdos.
CG5	RA6: Utiliza e interpreta modelos para especificar los impactos de tipo ambiental y económicos de los procesos de separación y sus efluentes con el fin de determinar criterios con los cuales disminuir la concentración de sustancias indeseadas.

#### D. Unidades temáticas:

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
1	RA1, RA2, RA3, RA6	Tipos de procesos de separación y sistemas binarios	2 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p>1.1 <b>Tipos de operaciones de separación</b></p> <p>1.1.2. <b>Sistemas líquido-vapor.</b> Sistemas ideales y no ideales. Aplicación de ley de Raoult y ley de Dalton en sistemas ideales y no ideales. Coeficientes de partición. Volatilidad y volatilidad relativa. Evaporación flash. Diagramas de equilibrio líquido-vapor: diagramas de concentraciones en fases y diagramas entalpía-concentración. Tie-lines.</p> <p>1.1.3. <b>Sistemas líquido-líquido.</b> Solubilidad y solubilidad relativa. Miscibilidad de solventes. Coeficientes de partición de solutos entre solventes inmiscibles y parcialmente miscibles. Diagramas ternarios de sistemas líquido-líquido. Tie-lines. Separación de fases y puntos de inversión de fases.</p> <p>1.2. <b>Sistemas líquido-sólido.</b> Solubilidad de sólidos en líquidos. Equilibrio sólido-líquido. Retención de líquidos en sólidos porosos insolubles. Diagramas de equilibrio sólido-líquido y tie-lines.</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identifica tipos de separaciones en sistemas vapor-líquido, líquido-líquido, líquido-sólido y separaciones en equilibrio, describiéndolas.</li> <li>2. Selecciona procesos de separación según las propiedades fisicoquímicas de los componentes a separar y los impactos de tipo ambiental y económicos.</li> <li>3. Realiza cálculos de equilibrio de separación entre fases, en ejemplos y problemas de la industria de procesos químicos.</li> <li>4. Construye ecuaciones que describen la cinética en problemas de separación, considerando la transferencia de masa.</li> </ol>	

<p>1.3. <b>Cálculo de equilibrio y separaciones en equilibrio.</b> Uso de diagramas de equilibrio, líquido-vapor, líquido-líquido y sólido-líquido para separaciones de una etapa.</p> <p>1.4. <b>Elementos de transferencia de masa.</b> Ecuaciones de difusión, advección y reacción. Coeficiente de difusión. Coeficiente de transporte de masa en capas límites. Coeficiente de transporte de masa global en interfases líquido-líquido, líquido-vapor, sólido-líquido.</p>	
<p>Bibliografía de la unidad</p>	<p>[1] Judson, cap. 5.</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
2	RA1, RA2, RA6	Procesos de separación multietapa y destilación fraccionada de mezclas binarias	2 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p><b>2.1. Configuraciones de operaciones unitarias de destilación.</b> Cálculo de configuraciones con flujo en co-corriente; corriente-cruzada y contracorriente. Comparación de la eficiencia energética de dichas configuraciones.</p> <p><b>2.2. Separaciones multietapa binarias.</b> Cálculo y diseño de condiciones de operación para separaciones multietapa binarias. Balances de masa general y por etapas. Líneas de operación.</p> <p><b>2.3. Cálculo de operaciones de destilación fraccionada binaria.</b> Descripción del diseño y operación de torres de destilación, platos, empaques y equipos auxiliares. Velocidad de transferencia de masa líquido-vapor y métodos para mantener un valor alto. Supuestos auxiliares y simplificaciones. Calores latentes de vaporización similares.</p> <p><b>2.4. Método de cálculo de McCabe-Thiele.</b> Velocidad de reflujo. Cálculo del número mínimo de etapas con reflujo máximo. Cálculo del reflujo mínimo. Cálculo del número de etapas para un reflujo seleccionado. Determinación del punto óptimo de alimentación. Determinación de la posición de salidas laterales. Cálculo de las concentraciones de líquido y vapor en cada etapa. Eficiencia de etapas. Cálculo del consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento. Dimensionamiento y selección de platos o empaque. Dimensionamiento del ancho de la</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Compara el proceso multietapa en corriente con el proceso de equilibrio de una sola etapa, considerando que el primero produce separaciones más eficientes.</li> <li>2. Calcula y selecciona configuraciones de unidades de separación para lograr eficiencias requeridas y minimizar impactos de tipo ambiental y económicos.</li> <li>3. Utiliza el método de McCabe-Thiele en cálculos de purezas, rendimientos, eficiencias y diseño de configuraciones óptimas de columnas de destilación.</li> </ol>	

columna de destilación. Problemas de flujo en columnas de destilación: inundación y chorreo en platos, canalización y ensuciamiento en empaques.	
Bibliografía de la unidad	[1] Judson, cap. 5.

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
3	RA3, RA4, RA5, RA6	Métodos gráficos y computacionales generales para separaciones binarias multietapas	2 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p><b>3.1. Balances diferenciales de flujos en contracorriente por etapas.</b> Cálculo de flujos netos en secciones transversales a los flujos. Flujos netos de masa y energía. Componentes inertes (no separables) y cálculos en base a concentraciones referidas a inertes.</p> <p><b>3.2. Métodos computacionales y gráficos generales para separaciones binarias multietapas.</b> Construcción gráfica de líneas y puntos de operación en gráficos de equilibrio, partición o separación de fases. Resolución iterativa computacional de problemas de separación multietapas. Simulación de separaciones en software de cálculo (Excel, Octave, MATLAB, DWSIM).</p> <p><b>3.3. Aplicaciones a problemas de destilación.</b> Calores latentes de destilación desiguales. Líneas de operación curvas. Diagramas de entalpía- concentración. Método de Ponchon-Savarit. Desviaciones de la idealidad, supuestos de equilibrio y</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Utiliza métodos gráficos y de resolución computacional y software de cálculo para el cálculo de separaciones binarias multietapas, considerando especificaciones de pureza, recuperación, operación e impactos.</li> <li>Diseña la operación de sistemas de destilación para la separación de sustancias con calores latentes de vaporización desiguales y líneas de operación curvas.</li> <li>Utiliza el método de Ponchon – Savarit en el diseño de torres de destilación.</li> <li>Usa parámetros de purificación de una columna de destilación con operación continua, comprendiendo la relación entre dichos parámetros y la configuración de operación de la columna.</li> </ol>	

problemas de transferencia de masa.	
Bibliografía de la unidad	[1] Judson, cap. 6. [2] Mac Cabe.

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
4	RA1, RA3, RA6	Procesos de separación multicomponente	4,5 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p><b>4.1. Destilación multicomponente.</b> Selección de compuestos clave para la separación (clave liviana y pesada). Cálculo del número mínimo de platos y del reflujo mínimo. Cálculo del número de platos de las secciones de agotamiento y enriquecimiento. Cálculo del plato de entrada óptimo para la alimentación. Cálculo de razones de separación de los compuestos en función de la separación de los compuestos clave. Cálculo de las composiciones en cada etapa. Cálculos de demandas de servicios y dimensionamiento.</p> <p><b>4.2. Lixiviación y extracción sólido-líquido.</b> Equipos de extracción continua sólido-líquido. Recirculación de solvente purificado. Cálculo de extracción sólido-líquido en flujos cruzados y múltiples etapas a contracorriente. Supuestos y simplificaciones. Concentraciones en función de inertes y balances de masa. Razón solvente/sólido mínima. Número mínimo de etapas de extracción. Cálculo de número de etapas, concentraciones en cada etapa, y eficiencia global de extracción para requerimientos de pureza y recuperación finales. Efecto de la retención de líquido en el sólido y de la velocidad de transferencia de masa. Economía básica de procesos sólido-líquido.</p> <p><b>4.3. Extracción líquido-líquido.</b> Equipos de extracción continua líquido-líquido. Cálculo de extracción líquido-líquido en flujos cruzados y</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diseña operaciones de destilación para mezclas multicomponentes, procesos de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.</li> <li>2. Describe el funcionamiento de los sistemas de separación por membranas, incluyendo unidades de diálisis, microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), y osmosis reversa (OR).</li> <li>3. Diseña conceptualmente operaciones de diálisis, diafiltración, MF, UF, NF y OR continuos o por lotes, considerando principios de separación fuera del equilibrio.</li> </ol>	

múltiples etapas a contracorriente. Supuestos y simplificaciones. Sistemas con solventes totalmente inmiscibles o parcialmente miscibles. Recirculación de solvente purificado. Balances de masa globales. Razón solvente/alimentación mínima. Número mínimo de etapas de extracción. Cálculo de número de etapas, concentraciones en cada etapa, y eficiencia global de extracción para requerimientos de pureza y recuperación finales. Pérdida de solventes en las corrientes de proceso. Efecto de la velocidad de transferencia de masa en cada etapa. Economía básica de procesos líquido-líquido.

#### 4.4. **Absorción/desorción gas-líquido.**

Equipos para absorción/desorción de gases. Cálculo de absorción/desorción gas-líquido en múltiples etapas a contracorriente. Supuestos y simplificaciones. Sistemas con gases inertes y líquidos no volátiles. Recirculación de líquido purificado. Balances de masa globales. Razón gas/líquido o líquido/gas mínima. Número mínimo de etapas de extracción. Cálculo de número de etapas, concentraciones en cada etapa, y eficiencia global de extracción para requerimientos de pureza y recuperación finales. Desviaciones de la idealidad: pérdida de gases y líquidos en las corrientes de proceso. Efecto de la velocidad de transferencia de masa en cada etapa. Economía básica de procesos de absorción/desorción.

#### 4.5. **Procesos de Separación por Membranas.**

Membranas semipermeables y aplicaciones de procesos de microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración

<p>(NF), y osmosis reversa (OR). Módulos de membranas: tipos y patrones de flujos. Procesos de filtración por membranas batch y semi-continuos. Procesos de paso único. Diálisis y diafiltración. Procesos de filtración con flujo tangencial (FFT). Procesos continuos de filtración por membranas. Selectividad de membranas. Polarización de la concentración, ensuciamiento y ciclos de mantenimiento y limpieza. Relaciones de flux, concentración y presión en membranas. Cálculos de flujos de permeado. Procesos de paso múltiple con recirculación y FFT. Procesos FFT batch, feed-and-bleed (FAB) continuos, diafiltración batch y diafiltración FAB continua. Configuraciones de proceso y cascadas de membranas en contracorriente para enriquecimiento o agotamiento.</p>	
<p>Bibliografía de la unidad</p>	<p>[1] Mac Cabe.          [2] Geankoplis, cap. 13.          [3] Seader.</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
5	RA1, RA2, RA3	Operaciones de separación mediante medios sólidos	2,5 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p><b>5.1. Procesos de adsorción.</b> Fenómenos de adsorción en superficies. Sorbentes y propiedades deseables de éstos. Resinas de intercambio iónico. Adsorción química y física. Isotermas de adsorción: isotermas de Langmuir y Freundlich. Isotermas de intercambio iónico. Modos de operación para operaciones de adsorción. Adsorción por lotes y continua en estanques agitados. Velocidades de adsorción y limitaciones para la transferencia de masa en procesos de adsorción. Soluciones analíticas y numéricas de procesos de adsorción. Economía básica de procesos de adsorción/desorción. Adsorción en lecho fijo. Cálculos de altura de lecho, diámetro de lecho y tiempos de ciclo para adsorción en lecho fijo. Efectos difusivos en la adsorción de lecho fijo.</p> <p><b>5.2. Cromatografía.</b> Descripción, ventajas y desventajas. Tipos y adsorbentes (resinas cromatográficas). Separación de compuestos biológicos y no biológicos mediante cromatografía. Cromatografía de proteínas y ácidos nucleicos. Cromatografía de intercambio iónico, cromatografía de interacción hidrofóbica, cromatografía de interacción con iones metálicos, cromatografía de afinidad. Análisis y cálculo de separaciones cromatográficas en etapas discretas. Soluciones analíticas y aproximación gaussiana de la forma de los picos cromatográficos. Escalamiento de procesos cromatográficos. Equipos y disposiciones para el escalamiento.</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Explica cómo funcionan las resinas de intercambio iónico y cromatográficas, utilizando conceptos como quimisorción, adsorción física, área específica y equilibrio (isotermas) de adsorción.</li> <li>2. Identifica cada uno de los pasos involucrados en la adsorción de un soluto, considerando qué pasos pueden controlar la velocidad de adsorción.</li> <li>3. Describe los modos principales para poner en contacto el adsorbente con un fluido que contiene soluto (s) a ser adsorbido.</li> <li>4. Enumera y explica los supuestos para la adsorción ideal de lecho fijo, considerando los conceptos de ancho de la zona de transferencia de masa y avance en la adsorción de lecho fijo.</li> <li>5. Calcula la altura, así como el diámetro del lecho y el tiempo de ciclo para la adsorción de lecho fijo.</li> <li>6. Describe la electroforesis de biomoléculas y los diferentes modos electroforéticos, incluyendo factores que afectan la movilidad, denaturantes utilizados, pH y electrolitos, contenido, gradientes de campo eléctrico, así como los efectos de la electroosmosis y el calentamiento convectivo de Joule.</li> </ol>	

<p>Operación continua: cromatografía anular rotatoria, cromatografía de lecho móvil y lecho móvil simulado. Economía básica de procesos cromatográficos.</p> <p>5.3. <b>Electroforesis.</b> Definición y condiciones para la electroforesis de moléculas. Campo eléctrico fijo, en gradiente y variable (pulsado). Efecto de agentes denaturantes, pH y electrolitos. Movilidad electroforética. Efectos electroosmóticos. Calentamiento convectivo de Joule. Modos electroforéticos: electroforesis en gel nativo, SDS-PAGE, enfoque isoeléctrico. isotacoforesis. electroforesis en gel 2-D. electroforesis en gel de campo pulsado. Escalamiento y economía de operaciones de electroforesis.</p>	
<p>Bibliografía de la unidad</p>	<p>[3] Geankoplis. [4] Seader.</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
6	RA3, RA5, RA6	Tópicos especiales de diseño y aplicación de operaciones de separación especializadas	2 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p>6.1. <b>Operaciones especializadas de destilación.</b> Descripción y usos de la destilación reactiva y destilación de mezclas azeotrópicas.</p> <p>6.2. <b>Operaciones especializadas de secado y procesos gas-líquido o gas-sólido.</b> Descripción y usos de la liofilización, fluidización, secadores rotatorios y torres de enfriamiento.</p> <p>6.3. <b>Operaciones especializadas de membranas.</b> Descripción y usos de operaciones de permeación de gases, pervaporación y electrodiálisis.</p> <p>6.4. <b>Otras operaciones unitarias especializadas.</b> Descripción y usos de operaciones de precipitación electrostática y extracción con fluidos supercríticos.</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Analiza el diseño de otras operaciones unitarias, considerando las ecuaciones de diseño, el dimensionamiento de equipos y las propiedades de separación de cada operación y la aplicación de los conceptos tratados.</li> <li>2. Trabaja con su equipo para preparar la exposición, demostrando organización, colaboración y acuerdos respecto de la entrega de resultados.</li> <li>3. Expone, en forma oral junto a su equipo, sobre diseños y aplicaciones particulares de operaciones unitarias, presentando, con claridad, su propuesta en la que utiliza con precisión conceptos y procesos relacionados.</li> </ol>	
Bibliografía de la unidad		<p>[2] Mac Cabe. [3] Geankoplis, cap.13. [4] Seader.</p>	

### E. Estrategias de enseñanza - aprendizaje:

El curso considera las siguientes estrategias

- Clases expositivas, aula invertida.
- Exposiciones orales (seminario).
- Resolución de problemas.

## F. Estrategias de evaluación:

Al inicio del semestre, el cuerpo académico informará sobre la propuesta de evaluación, incluyendo tipos de evaluación, cantidad, ponderaciones correspondientes y las fechas asignadas.

El curso considera diversas instancias de evaluación:

Tipo de evaluación	RA asociado
<b>Ejercicios y tareas, incluyendo informes</b> (entre 6 y 8 por semestre)	Evalúa RA1, RA2, RA3, RA4, RA6.
<b>Exposición oral en sesiones de seminario:</b> En grupos de 4 integrantes, la/os estudiantes deben preparar una presentación sobre un tema de la última unidad de operaciones unitarias, donde se discutan aspectos de diseño y aplicaciones reales.	Evalúa RA4, RA6.
<b>Examen</b>	Evalúa RA1, RA2, RA3

Se contempla una ponderación sugerida, adaptable según el cuerpo docente, como sigue:

### Calificación de pruebas escritas:

**Controles:** 70%

**Ejercicios y tareas:** 30%

Cada prueba escrita será calificada con una nota entre 1,0 y 7,0. La inasistencia o no entrega de cualquiera de las evaluaciones escritas será calificada con nota 1,0. La nota promedio ponderado de controles es reprobatoria por sí misma, al igual que la nota promedio ponderada de ejercicios, tareas e informes breves de laboratorio.

### Calificación de la exposición de seminario:

La exposición de seminario será calificada con una nota entre 1 y 7, considerando aspectos como la calidad del contenido, la calidad y claridad de la presentación de la información y la calidad de las respuestas entregadas al cuerpo docente y a los estudiantes del curso. La nota de seminario es reprobatoria por sí misma. Se considera que la asistencia a las sesiones de seminario es obligatoria para todos los estudiantes y se penaliza con 1 punto de la nota de seminario por cada inasistencia no justificada adecuadamente.

### Calificación final:

La nota final está compuesta por la ponderación del promedio de pruebas escritas en un 80% y la nota de la exposición de seminario en un 20% (incluyendo descuentos por inasistencia, si correspondiera).

## G. Recursos bibliográficos:

### Bibliografía obligatoria:

- [1] Judson, C. (2013). *Separation Processes*. King Dover Publications: Cap. 5 y 6.
- [2] Mac Cabe, W., Smith, J., Harriot, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering*. Mc Graw Hill.
- [3] Geankoplis, C.J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles*. Prentice Hall, Cap. 13.
- [4] Seader, J.D., Henley, E.J., Roper, D.K. (2010). *Separation Process Principles*. John Wiley.

### Bibliografía complementaria:

- [5] D.F. Rudd, D.F. (S/F). *Process Synthesis*.
- [6] Powers, J.J. Siirola Prentice Hall, 1973 Cap. 6.

## H. Datos generales sobre elaboración y vigencia del programa de curso:

Vigencia desde:	Primavera, 2022
Elaborado por:	Álvaro Olivera
Validado por:	CTD de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales (IQBM) Ajuste posmonitoreo
Revisado por:	Área de Gestión Curricular