



UES

Universidad Estatal de Sonora
La Fuerza del Saber Estimulará mi Espíritu

MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

**Operaciones Unitarias e
Ingeniería de Alimentos I**
Laboratorio



Dra. Martha Patricia Patiño Fierro
Rectora

Mtra. Ana Lisette Valenzuela Molina
**Encargada del Despacho de la Secretaría
General Académica**

Mtro. José Antonio Romero Montaña
Secretario General Administrativo

Lic. Jorge Omar Herrera Gutiérrez
**Encargado de Despacho de Secretario
General de Planeación**

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN.....	4
IDENTIFICACIÓN	7
<i>Carga Horaria de la asignatura</i>	<i>7</i>
<i>Consignación del Documento</i>	<i>7</i>
MATRIZ DE CORRESPONDENCIA	8
NORMAS DE SEGURIDAD Y BUENAS PRÁCTICAS	10
RELACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO POR ELEMENTO DE COMPETENCIA..	11
PRÁCTICAS.....	13
FUENTES DE INFORMACIÓN	29
ANEXOS	31

INTRODUCCIÓN

Como parte de las herramientas esenciales para la formación académica de los estudiantes de la Universidad Estatal de Sonora, se definen manuales de práctica de laboratorio como elemento en el cual se define la estructura normativa de cada práctica y/o laboratorio, además de representar una guía para la aplicación práctica del conocimiento y el desarrollo de las competencias clave en su área de estudio. Su diseño se encuentra alineado con el modelo educativo institucional, el cual privilegia el aprendizaje basado en competencias, el aprendizaje activo y la conexión con escenarios reales.

Con el propósito de fortalecer la autonomía de los estudiantes, su pensamiento crítico y sus habilidades para la resolución de problemas, las prácticas de laboratorio integran estrategias didácticas como el aprendizaje basado en proyectos, el trabajo colaborativo, la experimentación guiada y el uso de tecnologías educativas. De esta manera, se promueve un proceso de enseñanza-aprendizaje dinámico, en el que los estudiantes no solo adquieren conocimientos teóricos, sino que también desarrollan habilidades prácticas y reflexivas para su desempeño profesional.

Propósito del Manual

El manual de prácticas de laboratorio tiene como propósito fortalecer la comprensión teórico-práctica de los principios de mecánica de fluidos y transferencia de calor y masa aplicados a las operaciones unitarias propias de la industria alimentaria. A través del desarrollo de experimentos, el estudiante integrará los fundamentos de termodinámica, balances de materia y energía, así como el análisis de los procesos de secado, destilación, evaporación y cristalización, con el fin de comprender las condiciones de operación y su influencia en la calidad e innovación de los alimentos. Además fomentar el razonamiento crítico y analítico para la solución de problemas reales de ingeniería, promoviendo el uso responsable de los recursos, la aplicación de normativas nacionales e internacionales, y la sensibilidad hacia la calidad, la sostenibilidad y la mejora continua en los procesos de transformación de bienes y servicios alimenticios.

Justificación en el Programa Académico

El estudio de la mecánica de fluidos y la transferencia de calor y masa constituye una base esencial en la formación del ingeniero en Tecnología de Alimentos, ya que permite comprender, analizar y optimizar los procesos de transformación, conservación y producción de alimentos. La aplicación de estos principios en las operaciones unitarias posibilita el diseño y control de equipos e instalaciones que garantizan la eficiencia energética, la calidad del producto y el cumplimiento de normas nacionales e internacionales de inocuidad y sostenibilidad.

El curso de Operaciones Unitarias e Ingeniería de Alimentos I, junto con su componente experimental, proporciona al estudiante las herramientas teóricas y prácticas necesarias para

interpretar los fenómenos de flujo de fluidos, transferencia de calor y de masa que ocurren en operaciones como el secado, la destilación, la evaporación y la cristalización, fundamentales en la industria alimentaria. De esta manera, el laboratorio se convierte en un espacio de aprendizaje aplicado, donde se fortalecen las competencias para analizar, innovar y resolver problemas reales de ingeniería, promoviendo la creatividad, la calidad y la mejora continua en los procesos alimentarios.

Competencias a Desarrollar

1. Competencias Blandas:

- **Análisis de problemas:** el estudiante desarrolla la capacidad de identificar, comprender y resolver situaciones experimentales o técnicas relacionadas con los fenómenos de fluidos y calor. Esta competencia fomenta el pensamiento crítico, la toma de decisiones fundamentadas y la aplicación de conocimientos científicos para encontrar soluciones eficientes y seguras en los procesos alimentarios.
- **Trabajo en equipo:** durante la realización de las prácticas, se promueve la colaboración entre los estudiantes para alcanzar objetivos comunes, distribuyendo responsabilidades y respetando las ideas de los demás. Esta competencia fortalece la comunicación efectiva, la cooperación y la capacidad de liderazgo, esenciales para el desempeño profesional en entornos multidisciplinarios de la industria alimentaria.

2. Competencias Disciplinarias:

- Integra los principios de la mecánica de fluidos, la transferencia de calor y la transferencia de masa para analizar, diseñar y optimizar operaciones unitarias en procesos de transformación de alimentos.
- Aplica los fundamentos de la termodinámica y los balances de materia y energía para determinar las condiciones de operación y evaluar el desempeño de los equipos utilizados en la industria alimentaria.
- Relaciona las variables de proceso (presión, temperatura, caudal, concentración, entre otras) con los cambios físicos y químicos que ocurren durante las operaciones de secado, destilación, evaporación y cristalización.
- Utiliza técnicas experimentales y de medición para obtener, interpretar y analizar datos que describan fenómenos de transporte en sistemas alimentarios, con base en normas de calidad y seguridad industrial.
- Emplea herramientas de cálculo, simulación y representación gráfica para modelar procesos de transferencia de calor y masa, contribuyendo a la toma de decisiones en el diseño y control de procesos alimentarios.

- Evalúa los efectos de las condiciones operativas sobre la calidad e inocuidad de los alimentos, aplicando criterios de sustentabilidad, eficiencia energética e innovación tecnológica.

3. Competencias Profesionales:

- Analiza y evalúa procesos industriales alimentarios aplicando los principios de la mecánica de fluidos, transferencia de calor y transferencia de masa, para optimizar la eficiencia operativa y energética de los sistemas.
- Diseña, selecciona y opera equipos de procesos empleados en operaciones unitarias como secado, destilación, evaporación y cristalización, considerando los requerimientos de calidad, inocuidad y sostenibilidad.
- Integra conocimientos teóricos y experimentales para diagnosticar y resolver problemas en la producción, conservación y transformación de alimentos, aplicando metodologías de ingeniería y herramientas tecnológicas actuales.
- Aplica normativas nacionales e internacionales relacionadas con la seguridad, inocuidad alimentaria, impacto ambiental y eficiencia energética en la operación de procesos industriales.
- Propone soluciones innovadoras en el diseño o mejora de procesos alimentarios, con enfoque en la calidad del producto, la reducción de costos y la sostenibilidad de los recursos.
- Trabaja colaborativamente en entornos interdisciplinarios, comunicando de manera efectiva resultados técnicos y proponiendo estrategias de mejora continua en los procesos de manufactura de alimentos.

IDENTIFICACIÓN

Nombre de la Asignatura		Operaciones Unitarias e Ingeniería de Alimentos I	
Clave	071CE052	Créditos	
Asignaturas Antecedentes	052CP019	Plan de Estudios	21

Área de Competencia	Competencia del curso
Evaluar los sistemas de la industria alimentaria y las problemáticas asociadas a ésta, con el fin de diseñar soluciones innovadoras desde la ingeniería y tecnología de alimentos, considerando la producción sostenible y la normatividad vigente en la materia a nivel nacional o internacional.	Integrar la teoría y cálculos de mecánica de fluidos, y transferencia de calor en las operaciones unitarias, aplicadas en los procesos industriales orientados al análisis de problemas, para la transformación de bienes o servicios alimenticios con sensibilidad a los lineamientos nacionales e internacionales de la industria alimentaria.

Carga Horaria de la asignatura

Horas Supervisadas			Horas Independientes	Total de Horas
Aula	Laboratorio	Plataforma		
5	2	1	1	9

Consignación del Documento

Unidad Académica	Unidad Académica Hermosillo
Fecha de elaboración	07 de noviembre de 2025
Responsables del diseño	Mtra. Ana Karina Celaya Quintana
Validación	
Recepción	

MATRIZ DE CORRESPONDENCIA

Señalar la relación de cada práctica con las competencias del perfil de egreso

PRÁCTICA	PERFIL DE EGRESO
Práctica 1: Flujo difusivo estacionario de NaCl a través de una membrana.	Esta práctica fortalece las competencias científicas, técnicas y analíticas del futuro ingeniero, al aplicar los principios de la transferencia de masa para resolver problemas de separación y transporte en sistemas alimentarios reales. Además, fomenta la innovación tecnológica y la toma de decisiones fundamentadas para el control y mejora de procesos dentro del marco de la calidad y sustentabilidad industrial.
Práctica 2: Curvas de secado de láminas de papa y camote en estufa de aire caliente.	Esta práctica fortalece el dominio del fenómeno de transferencia simultánea de masa y calor, esencial para el diseño y control de procesos de deshidratación industrial. El estudiante aplica principios teóricos en un contexto experimental, promueve la innovación en conservación de alimentos, y desarrolla una visión integral del control de calidad y eficiencia energética en la industria alimentaria.
Práctica 3: Comparación de destilación simple vs fraccionada en mezcla agua-etanol.	Esta práctica consolida los fundamentos de termodinámica aplicada a operaciones de separación, desarrollando la capacidad de analizar, controlar y optimizar procesos industriales en los que intervienen cambios de fase. Además, fomenta la innovación tecnológica y la comprensión integral de los principios de transferencia de energía y masa, esenciales en la ingeniería de procesos alimentarios.

Práctica 4: Evaporación de solución de sacarosa y cristalización por enfriamiento controlado.

Esta práctica integra los principios de transferencia de calor, termodinámica y equilibrio de fases en un proceso real de concentración y cristalización.

Contribuye a formar un ingeniero capaz de controlar, optimizar e innovar procesos de transformación y conservación de alimentos, aplicando criterios de calidad, sustentabilidad y eficiencia energética bajo el marco de la normativa vigente.

NORMAS DE SEGURIDAD Y BUENAS PRÁCTICAS

- 1.- Uso de la bata obligatoria en todo momento.**
- 2.- Por seguridad y orden:**
 - No correr, fumar, vapear, ingerir bebidas ni alimentos
 - Está prohibido el ingreso de personas ajenas a la institución
- 3.- Uso de vestimenta adecuada:**
 - Pantalón de algodón o mezclilla
 - Zapato cerrado
 - Uso de uniforme de acuerdo al PE
- 4.- No traer el cabello largo y suelto ni accesorios.**
- 5.- Es obligación de los usuarios limpiar su mesa de trabajo antes y después de la práctica.**
- 6.- No dejar en los botes de basura ni en las tarjas de lavado los desechos al finalizar la experimentación.**
- 7.- Los objetos punzo cortantes deberán ser desechados en el contenedor correspondiente.**
- 8.- Se deberá cumplir y respetar la calendarización de prácticas fijada.**
- 9.- Los útiles escolares y pertenencias personales deberán ser colocadas en los estantes para mochilas.**
- 10.- El docente deberá asegurarse que los estudiantes utilicen adecuadamente el equipo de protección personal durante el desarrollo de la práctica.**
- 11.- En ausencia del docente, la práctica no podrá ser realizada.**
- 12.- En caso de requerirse sesión extraordinaria, el docente solicitará al encargado del laboratorio el permiso de acuerdo con la disponibilidad en las instalaciones.**
- 13.- El estudiante deberá resarcir los daños que por negligencia o intencionalmente ocasione a los bienes de la Universidad.**
- 14.- Al término de la práctica, el docente deberá cerciorarse que las llaves de gas y agua están debidamente cerradas.**
- 15.- El docente deberá disponer correctamente los residuos peligrosos generados.**
- 16.- Los estudiantes harán la solicitud de materiales y equipos mediante la Libreta.**
- 17.- Los usuarios deberán registrarse en las bitácoras correspondientes.**

RELACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO POR ELEMENTO DE COMPETENCIA

Elemento de Competencia I	EC I
	Aplicar los fundamentos de transferencia de masa y termodinámica para entender las condiciones de operación de un sistema y cómo cambian las propiedades en función del tiempo durante los procesos de transformación de los alimentos siguiendo las normativas nacionales e internacionales con un enfoque en la calidad.

PRÁCTICA	NOMBRE	COMPETENCIA
Práctica No. 1	Flujo difusivo estacionario de NaCl a través de una membrana.	Aplica la Primera Ley de Fick para determinar el flujo másico y el coeficiente de difusión efectivo en sistemas de transferencia de masa. Analiza e interpreta resultados experimentales, discutiendo la influencia de variables como temperatura, área y agitación sobre el proceso difusivo.

Elemento de Competencia II	EC 2
	Aplicar las operaciones unitarias e ingeniería de alimentos con la finalidad de aprender sobre los equipos y procesos de secado empleados en la industria alimentaria, considerando el análisis de problemas y las nuevas tecnologías con enfoque a la calidad, la innovación y la sensibilidad de los lineamientos nacionales e internacional.

PRÁCTICA	NOMBRE	COMPETENCIA
Práctica No. 2	Curvas de secado de láminas de papa y camote en estufa de aire caliente.	Aplicar los fundamentos de transferencia de masa y fenómeno de transporte para obtener e interpretar curvas de secado X vs. t y tasa de secado, identificando los periodos a tasa constante y tasa decreciente, así como las humedades críticas y de equilibrio. Relacionar los hallazgos con la selección y operación de equipos de secado en la industria alimentaria (banda/charolas/lecho fluidizado), considerando calidad del producto y eficiencia energética.

Elemento de Competencia III

EC 3

Analizar las características y fundamentos del sistema de destilación, para la selección y diseño de un destilador, en los procesos de transformación e innovación en la tecnología de alimentos, considerando cálculos de balance de materia y energía, aplicando un enfoque de calidad.

PRÁCTICA	NOMBRE	COMPETENCIA
Práctica No. 3	Comparación de destilación simple vs fraccionada en mezcla agua-etanol.	Aplicar los fundamentos de equilibrio líquido-vapor (ELV) y operaciones de separación para diseñar y ejecutar destilaciones simple y fraccionada de una mezcla hidroalcohólica, construir perfiles T-V y composición por corte, comparar eficiencia de separación y estimar platos teóricos y HETP en una columna empacada, relacionando los resultados con decisiones de operación (reflujo, carga térmica) y de selección de equipo.

Elemento de Competencia IV

EC 4

Analizar las características y fundamentos de la evaporación y cristalización para la selección de equipos en los procesos de transformación e innovación en la tecnología de alimentos, considerando cálculos de coeficiente total, balance de materia y energía, aplicando un enfoque de calidad.

PRÁCTICA	NOMBRE	COMPETENCIA
Práctica No. 4	Evaporación de solución de sacarosa y cristalización por enfriamiento controlado.	Aplicar balances de materia y energía en operaciones de evaporación y cristalización para alcanzar y controlar la supersaturación en soluciones de sacarosa, estimar rendimiento y discutir la cinética de nucleación y crecimiento cristalino en condiciones de laboratorio.



PRÁCTICAS

NOMBRE DE LA PRÁCTICA 1	Flujo difusivo estacionario de NaCl a través de una membrana.
COMPETENCIA DE LA PRÁCTICA	<p>Aplica la Primera Ley de Fick para determinar el flujo másico y el coeficiente de difusión efectivo en sistemas de transferencia de masa.</p> <p>Utiliza adecuadamente instrumentos de medición (conductímetro, cronómetro, termómetro) para la adquisición de datos experimentales.</p> <p>Analiza e interpreta resultados experimentales, discutiendo la influencia de variables como temperatura, área y agitación sobre el proceso difusivo.</p>

FUNDAMENTO TEÓRICO

MATERIALES, EQUIPAMIENTO Y/O REACTIVOS

- Celda de difusión de dos compartimentos.
- Membrana de acetato de celulosa o PTFE.
- Soluciones de NaCl (0.5 M y 0.05 M).
- Conductímetro con celda calibrada.
- Termómetro o sonda digital.
- Cronómetro.
- Agitadores magnéticos con control de rpm.
- Probetas, pipetas y matraces aforados.
- Balanza analítica.
- Micrómetro.
- Agua desionizada.

PROCEDIMIENTO O METODOLOGÍA

- Preparación de la membrana: hidrátala durante 30 minutos en agua desionizada. Mide su espesor L .
- Montaje: coloca la membrana entre los compartimentos de la celda de difusión, asegurando la ausencia de burbujas o fugas.
- Carga de soluciones: llena el lado concentrado con NaCl 0.5 M (C_1) y el lado diluido con agua o NaCl 0.05 M (C_2).
- Inicio del experimento: activa la agitación suave y registra el tiempo inicial.
- Medición: toma lecturas de conductividad del lado diluido cada 2–3 minutos durante aproximadamente 40 minutos, manteniendo la temperatura constante.
- Conversión: usa una curva de calibración conductividad–concentración para obtener $C_2(t)$

- Repetición: realiza la prueba con diferentes velocidades de agitación para analizar el efecto de las resistencias de película.

RESULTADOS ESPERADOS

- Curva de C_2 (t) mostrando un incremento casi lineal en régimen estacionario.
- Gráfica del flujo J frente al gradiente de concentración (C_1-C_2)
- Cálculo del coeficiente de difusión efectivo D_{Def} a partir de la pendiente de la relación lineal.
- Verificación del cumplimiento del régimen estacionario (flujo constante).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Determina D_{Def} usando la ecuación:

$$D_{ef} = \frac{J L}{(C_1 - C_2)}$$

- Compara los valores obtenidos a diferentes velocidades de agitación. Si el flujo aumenta con la agitación, existe una contribución importante de la resistencia de película.
- Compara los valores de D_{Def} con los reportados en la literatura para NaCl en agua ($\sim 1.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) y discute la diferencia debido a la tortuosidad y porosidad de la membrana.
- Evalúa si las suposiciones de estado estacionario se cumplieron y comenta las posibles fuentes de error.

CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

- Se comprobó que el flujo difusivo de NaCl sigue la Primera Ley de Fick bajo condiciones estacionarias.
- La agitación adecuada reduce la resistencia de película, permitiendo medir un D_{Def} más representativo de la membrana.
- La membrana actúa como barrera al transporte, disminuyendo el coeficiente de difusión respecto al valor en solución libre.
- Este experimento permite comprender la importancia del control de variables físicas y de las resistencias en procesos de transferencia de masa.

ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

- Repetir la práctica a diferentes temperaturas para estimar la energía de activación de la difusión mediante la ecuación de Arrhenius.
- Realizar el experimento con otro tipo de membrana (por ejemplo, PTFE vs. acetato de celulosa)

y comparar resultados.

- Simular numéricamente el perfil de concentración en función del tiempo utilizando software como Excel o MATLAB.

EVALUACIÓN Y EVIDENCIAS DE APRENDIZAJE		
Criterios de evaluación	Ejecución de práctica, análisis de datos, trabajo en equipo y conclusiones.	
Rúbricas o listas de cotejo para valorar desempeño	Nivel de Competencia	Descripción
	Sobresaliente (9-10)	Reporte completo con análisis profundo, y conclusiones innovadoras.
	Avanzado (7-8)	Datos precisos pero con discusión limitada.
	Básico (5-6)	Resultados presentados sin análisis crítico, errores mayores al 15%.
	No Aprobado (<5)	Datos incompletos o sin relación con la teoría.
Formatos de reporte de prácticas	Portada, introducción, metodología, resultados y conclusión	

NOMBRE DE LA PRÁCTICA 2	Curvas de secado de láminas de papa y camote en estufa de aire caliente.
COMPETENCIA DE LA PRÁCTICA	Aplicar los fundamentos de transferencia de masa y fenómeno de transporte para obtener e interpretar curvas de secado X vs. t y tasa de secado, identificando los periodos a tasa constante y tasa decreciente, así como las humedades crítica X_c y de equilibrio X_e . Relacionar los hallazgos con la selección y operación de equipos de secado en la industria alimentaria (banda/charolas/lecho fluidizado), considerando calidad del producto y eficiencia energética.

FUNDAMENTO TEÓRICO

El secado convectivo de alimentos ocurre por evaporación del agua desde la superficie y difusión/capilaridad en el interior del sólido. En base seca, el contenido de humedad es

$$X = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \left[\frac{\text{kg agua}}{\text{kg materia seca}} \right]$$

donde $m(t)$ es la masa instantánea y m_s la masa de sólidos secos (constante). La tasa de secado por unidad de área expuesta A se expresa como:

$$R = -\frac{1}{A} \frac{dm_w}{dt} = \frac{m_s}{A} \left(-\frac{dX}{dt} \right) \left[\frac{\text{kg agua}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

- Periodo a tasa constante: la superficie permanece saturada; el control es predominantemente externo (convección), y R depende de la velocidad y temperatura del aire y de las resistencias de película.
- Periodo a tasa decreciente: la superficie pierde saturación; el control pasa a ser interno (difusión/capilaridad).
- Humedad crítica X_c : valor de X en el que el mecanismo dominante cambia de externo a interno (intersección de rectas en la curva $R-X$).
- Humedad de equilibrio X_e : humedad a la que $R \rightarrow 0$ para las condiciones de T y HR del aire (se aproxima con la masa constante experimental).
- Selección de equipo: materiales con láminas delgadas y sensibles a daño superficial se benefician de banda perforada o charolas; productos granulares y con buena fluidización prefieren lecho fluidizado. La case hardening (endurecimiento superficial) es más probable a T altas y humedad del aire baja.

MATERIALES, EQUIPAMIENTO Y/O REACTIVOS

- Estufa de secado con control de temperatura (70–80 °C) y flujo/velocidad de aire (si está

disponible).

- Bandejas perforadas o lisas, balanza analítica (± 0.001 g), micrómetro o calibrador para espesor, cuchillos/mandolina para rebanado uniforme.
- Papa y camote/batata frescos.
- Bolsas herméticas o recipientes para reposo y transporte de muestras.
- Higrómetro/psicrómetro (opcional) para HR ambiente.
- Termómetro de bulbo/sonda, cronómetro.
- Papel aluminio o malla fina (para evitar curvado), papel absorbente.
- (Opcional) Horno de humedad a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ para determinar m_s por gravimetría en muestra testigo.

PROCEDIMIENTO O METODOLOGÍA

A. Preparación y caracterización inicial

- Selección y pelado: elegir tubérculos sin daños. Lavar, pelar (si se define así) y secar con papel.
- Corte uniforme: rebanar con mandolina en láminas de $2.0\text{--}2.5$ mm (definir un espesor objetivo). Medir el espesor promedio de 10 láminas con micrómetro y registrar.
- Muestreo de masas: tomar por alimento 3 réplicas de $\sim 20\text{--}30$ g (conjunto de láminas). Registrar masa inicial m_0 de cada réplica.
- Determinación de materia seca m_s :

Opción 1 (recomendada): preparar una muestra testigo de ~ 5 g y secarla en horno de humedad a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante para calcular m_s y el X_0 de referencia.

Opción 2: estimar m_s como la masa final constante m_f de la cinética principal (introduce mayor incertidumbre; reportarla).

B. Ensayo de secado convectivo

- Condiciones del aire: fijar la temperatura de la estufa (p. ej., $75\text{ }^{\circ}\text{C}$) y, si es posible, registrar la velocidad del aire sobre la muestra (anemómetro). Medir HR ambiente del laboratorio.
- Distribución en bandejas: extender láminas sin traslape, área expuesta A conocida (medir el área ocupada).
- Inicio del secado: introducir bandeja; iniciar cronómetro.
- Pesadas periódicas: cada $5\text{--}10$ min retirar rápidamente la bandeja (<20 s fuera), pesar $m(t)$ y regresar a estufa. Registrar T de aire (y HR si procede).
- Criterio de masa constante: finalizar cuando dos lecturas separadas $15\text{--}20$ min difieran $<0.1\%$ (o <0.02 g). Guardar m_f
- Repetir el procedimiento para camote con las mismas condiciones.
- (Opcional) Repetir una tercera serie a temperatura distinta (p. ej., $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ u $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) para comparar.

C. Datos a registrar

- $m(t)$ por réplica, m_0 , m_f , tiempo t .

- Dimensiones: espesor promedio δ , área A .
- Condiciones de aire: T , HR ambiente, velocidad de aire (si disponible).
- Observaciones: curvado, adhesión, exudado azucarado (camote), cambio de color.

RESULTADOS ESPERADOS

- Curvas X vs. t para papa y camote (promedio de réplicas con barras de desviación).
- Curva R vs. X y R vs. t para identificar periodos.
- Estimaciones de X_c (intersección de regímenes) y X_e (asintótico/masa constante).
- Tiempo total para alcanzar un $X_{objetivo}$ industrial (definir, p. ej., $X=0.10$ b.s.).
- Comparación papa vs. camote (diferencias debidas a almidón/azúcares y microestructura).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Materia seca y humedad:
 - Si hay testigo: $m_s = m_{\text{testigo, seco}} \cdot \frac{m_0}{m_{\text{testigo, húmedo}}}$.
 - Si no: $m_s \approx m_f$ (indicar la incertidumbre).
 - $X(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s}$ (base seca).

- Numéricamente por diferencias finitas centradas:

$$R_i = \frac{m_s}{A} \left(-\frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \right)$$

- Identificación de periodos:

En m vs. t o X vs. t , el **tramo lineal inicial** (pendiente \sim constante) sugiere **tasa constante**.

Posteriormente, la pendiente disminuye \rightarrow **tasa decreciente**.

- Estimación de X_c :

Trazar R vs. X y ajustar dos rectas (tramo inicial y tramo decreciente).

X_c es la **intersección** de ambas rectas.

- Estimación de X_e :

Tomar X asociado a **masa constante** o estimarlo por extrapolación $R \rightarrow 0$.

- Tiempo a objetivo industrial:

Leer en la curva X vs. t el correspondiente a X_{objetivo} .

(Opcional) Integrar la ecuación de secado en cada periodo usando pendientes promedio.

- Discusión **de resistencias**:

Comparar la **influencia de velocidad de aire** sobre el tramo constante (control externo).

Evaluar cómo el **espesor** afecta el tramo decreciente (control interno, **difusividad efectiva**).

Comentar **case hardening** observado a T altas (brillo/corteza superficial) y su impacto en R .

CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

- Sintetizar diferencias cinéticas entre papa y camote.
- Relacionar X_c , X_e y los tiempos de proceso con la selección de secador (p. ej., para láminas frágiles que no fluidizan, preferir charolas/banda; para partículas pequeñas y rígidas, lecho fluidizado).
- Discutir compromisos calidad–energía–capacidad (oscurecimiento, textura, rendimiento).

ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

- **Efecto de espesor**: repetir con 1 mm y 4 mm y comparar RRR y tiempos.
- **Efecto de temperatura**: 65, 75 y 85 °C (evaluar riesgo de pardeamiento).
- ****Cálculo de número de bandejas o longitud de banda** para una capacidad dada (kg/h) usando tiempos medidos.
- **Estimación de De_f** : ajustar el tramo decreciente con el modelo de placa plana (opcional).

EVALUACIÓN Y EVIDENCIAS DE APRENDIZAJE

Criterios de evaluación	Ejecución de práctica, análisis de datos, trabajo en equipo y conclusiones.	
Rúbricas o listas de cotejo para valorar desempeño	Nivel de Competencia	Descripción
	Sobresaliente (9-10)	Reporte completo con análisis profundo, y conclusiones innovadoras.

	Avanzado (7-8)	Datos precisos pero con discusión limitada.
	Básico (5-6)	Resultados presentados sin análisis crítico, errores mayores al 15%.
	No Aprobado (<5)	Datos incompletos o sin relación con la teoría.
Formatos de reporte de prácticas	Portada, introducción, metodología, resultados y conclusión	

NOMBRE DE LA PRÁCTICA 3	Comparación de destilación simple vs fraccionada en mezcla agua-etanol.
COMPETENCIA DE LA PRÁCTICA	Aplicar los fundamentos de equilibrio líquido-vapor (ELV) y operaciones de separación para diseñar y ejecutar destilaciones simple y fraccionada de una mezcla hidroalcohólica, construir perfiles T-V y composición por corte, comparar eficiencia de separación y estimar platos teóricos y HETP en una columna empacada, relacionando los resultados con decisiones de operación (reflujo, carga térmica) y de selección de equipo.

FUNDAMENTO TEÓRICO

En destilación, la separación se basa en diferencias de **volatilidad**: a una presión dada, la fase vapor es más rica en el componente más volátil (**etanol**).

- **Destilación simple (batch sin reflujo)**: la composición del **hervidor** cambia continuamente; cada corte (fracción recolectada) tiene composición diferente.
- **Destilación fraccionada (columna con reflujo)**: incorporar **contactos vapor-líquido** (platos/empacado) + **reflujo** permite acercar la operación al **ELV**, aumentando el enriquecimiento del destilado.
- **Platos teóricos y HETP**: el número de platos teóricos N_t mide la eficiencia de contacto; en columnas empacadas se usa **HETP** (Height Equivalent to a Theoretical Plate):

$$\text{HETP} = \frac{Z_{\text{empacado}}}{N_t}$$

donde Z_{empacado} es la altura efectiva de lecho.

- **Curvas y balances clave**: con las fracciones obtenidas se construyen **curvas T- curvas de operación** (McCabe-Thiele) y **balances de materia y energía** simplificados para comparar rendimiento y consumo específico.

Nota didáctica: no se requiere trabajar cerca del azeótropo; el objetivo es **comparar** desempeño simple vs fraccionada en condiciones seguras y reproducibles

MATERIALES, EQUIPAMIENTO Y/O REACTIVOS

- Destilación simple: matraz de fondo redondo (1–2 L), 50/50 v/v agua–etanol (preparada y verificada), cabeza simple, termómetro en la cabeza, condensador con refrigerante, trampa anti-salpicaduras, manta calefactora con control de potencia, soporte y pinzas.
- Fraccionada: columna empacada (vidrio/metal) con empaque de anillos de Raschig/vidrio (altura conocida), cabezal con divisor de reflujo (válvula o llave), termómetro en cabeza y (si posible) en tope/medio/entrada a columna.
- Medición de composición: alcoholímetro/densímetro con tablas de conversión a % v/v y/o refractómetro (con curva de calibración); probetas/vasos marcados, picnómetro (opcional).
- Monitoreo: manómetro/barómetro (presión ambiente), cronómetro, medidor de potencia (si está disponible).
- Seguridad y otros: EPP (bata, lentes, guantes térmicos), ventilación adecuada, baño de hielo para fracciones, etiquetas y frascos ámbar.

PROCEDIMIENTO O METODOLOGÍA

A) Preparación

- Preparar la carga: mezclar 50/50 v/v agua–etanol (p. ej. 1.0 L totales). Verificar con densímetro o refractómetro inicial.
- Revisar hermeticidad de juntas, flujo de refrigerante, posición del termómetro en cabeza (bulbo a la altura del paso de vapor). Registrar presión ambiente.

B) Destilación simple (sin columna)

- Cargar el matraz con la mezcla. Iniciar calentamiento en potencias moderadas para evitar arrastres.
- Cuando inicie la ebullición y el condensado sea estable, comenzar recolección por cortes: p. ej., 20–30 mL por fracción.
- Para cada fracción: anotar tiempo, temperatura en cabeza, volumen y %EtOH (vía densidad o índice de refracción).
- Continuar hasta que la temperatura en cabeza se aproxime a la del componente menos volátil (agua) y el %EtOH sea bajo (p. ej., <10 % v/v).
- Identificar heads (primeras fracciones), cuerpo y tails (últimas). Registrar potencia eléctrica si se dispone de wattímetro.

C) Destilación fraccionada (con columna empacada)

- Montar la columna empacada (altura efectiva Z_{emp} conocida). Ajustar el reflujo a un valor operativo fijo (p. ej., $R=L/D=2-4$).
- Establecer reflujo total por 10–15 min para alcanzar cuasi-estacionario (temperatura en cabeza estable).
- Conmutar al reflujo operativo (constante) y recolectar cortes del mismo volumen que en la simple. Mantener potencia de calentamiento constante.
- Para cada fracción: registrar tiempo, T en cabeza, volumen, %EtOH, y el ajuste de reflujo (posición de válvula o gasto estimado).
- (Opcional) Tomar muestra del líquido de fondo al final para determinar x_B (composición del hervidor).

D) Cierre

- Apagar calefacción, mantener refrigerante hasta que el sistema esté a temperatura segura. Etiquetar fracciones. Limpiar.

Datos a registrar

- T (cabeza) vs tiempo, volumen y %EtOH de cada fracción.
- Presión ambiente (hPa o mmHg), potencia térmica aplicada (W) o posición de control, reflujo (relación L/D).
- Altura de empaque Z_{emp} , tipo y tamaño de empaque.

Observaciones: inundación, weeping, arrastre, estabilidad del tope.

RESULTADOS ESPERADOS

- En simple: fracciones iniciales con mayor %EtOH, decreciendo conforme avanza la destilación; T en cabeza aumentando gradualmente.
- En fraccionada: mayor enriquecimiento del destilado a igual corte y perfil de T más estable; menor contenido de agua en el tope para un mismo consumo de tiempo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Curvas T – y composición por corte.
- Rendimiento y enriquecimiento

$$\text{Rendimiento de destilado: } Y_D = \frac{\sum V_i y_i}{V_{\text{carga}} x_F} \text{ (en base molar o volumétrica consistente).}$$

Enriquecimiento promedio: \bar{y}_D/x_F donde \bar{y}_D es la composición promedio del destilado

- Curvas de operación (McCabe–Thiele simplificado).
- Cálculo de HETP (columna empacada).
- Balance de energía simplificado.

- Comparación de eficiencia.

CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

- Sintetiza las ventajas de la fraccionada (mayor pureza, control con reflujo) frente a la simple (montaje rápido, menor complejidad).
- Relaciona Nt , HETP y reflujo con la selección/escala de equipos en industria (columna de platos vs empacada).
- Menciona limitaciones: medición de composición (tablas densidad–%EtOH), efectos de pérdidas térmicas y de presión.

ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

- Efecto del reflujo: repetir fraccionada con dos valores de R (p. ej., 2 y 4) y comparar Nt y HETP.
- Perfil axial de T: medir T a distintas alturas para verificar acercamiento al ELV.
- Curva de calibración del refractómetro para agua–etanol (10–90 % v/v).
- Estimación de eficiencia de Murphree si se trabajara con platos discretos (extensión teórica).

EVALUACIÓN Y EVIDENCIAS DE APRENDIZAJE

Criterios de evaluación	Ejecución de práctica, análisis de datos, trabajo en equipo y conclusiones.	
Rúbricas o listas de cotejo para valorar desempeño	Nivel de Competencia	Descripción
	Sobresaliente (9-10)	Reporte completo con análisis profundo, y conclusiones innovadoras.
	Avanzado (7-8)	Datos precisos pero con discusión limitada.
	Básico (5-6)	Resultados presentados sin análisis crítico, errores mayores al 15%.
	No Aprobado (<5)	Datos incompletos o sin relación con la teoría.
Formatos de reporte de prácticas	Portada, introducción, metodología, resultados y conclusión	

NOMBRE DE LA PRÁCTICA 4

Evaporación de solución de sacarosa y cristalización por enfriamiento controlado.

COMPETENCIA DE LA PRÁCTICA

Aplicar balances de materia y energía en operaciones de evaporación y cristalización para alcanzar y controlar la supersaturación en soluciones de sacarosa, estimar rendimiento y discutir la cinética de nucleación y crecimiento cristalino en condiciones de laboratorio.

FUNDAMENTO TEÓRICO

- **Evaporación:** Remoción de solvente (agua) por calentamiento. Balance global:

$$\dot{m}_{\text{alimentación}} = \dot{m}_{\text{licor}} + \dot{m}_{\text{vapor}}$$

En lote: $m_0 = m(t) + m_{\text{evap}}(t)$. Fracción másica de sacarosa se incrementa conforme disminuye $m(t)$.

- **Solubilidad y supersaturación:** $S = C/C^*(T)$, donde C es concentración real y $C^*(T)$ la solubilidad a T . La **zona metaestable** permite crecimiento dominado por superficie; la **zona lábil** favorece nucleación espontánea.
- **Cristalización por enfriamiento:** Al reducir T , C^* baja y se alcanza $S > 1$. La adición de “semilla” (cristales finos) controla la densidad de núcleos y el tamaño final.
- **Balance de energía (lote):**

$$Q_{\text{total}}(0 \rightarrow t) = \int m C_p dT + m_{\text{evap}} \lambda(T_{\text{eb}})$$

donde λ es el calor latente de vaporización del agua (≈ 2250 kJ/kg a 100°C ; ajustar según T y P).

- **Coeficiente global U :** Si existe ΔT_{LM} conocida, $Q = U A \Delta T_{\text{LM}} t$.
- **Rendimiento en cristales:**

$$Y = \frac{m_{\text{cristales secos}}}{m_{\text{sacarosa en alimentación}}}$$

Pureza y tamaño dependen de $S(t)$, enfriamiento, agitación y presencia de impurezas.

MATERIALES, EQUIPAMIENTO Y/O REACTIVOS

- Beaker o “evaporador abierto” (600–1000 mL) montado en baño maría.

- Placa calefactora con control de potencia y agitador magnético.
- Termómetro o termopar (rango 0–110 °C).
- Balanza (± 0.01 g).
- Refractómetro (°Brix) o densímetro.
- Solución inicial de sacarosa (20–30 °Brix).
- Hielo/baño de enfriamiento; vaso Dewar o baño de agua-hielo.
- Filtros (papel o membrana), embudo Büchner (opcional), vacío suave.
- Tamices (opcional) para clasificación de tamaño.
- Cristales de sacarosa finamente molidos para semillado.
- EPP: guantes térmicos, gafas, bata, pinzas.

PROCEDIMIENTO O METODOLOGÍA

A. Preparación y verificación inicial

- Preparar 500 mL de solución de sacarosa a 20–30 °Brix. Medir y registrar: masa total m_0 , °Brix₀, T₀.
- Montar el beaker en baño maría (nivel de agua por encima del nivel de solución hasta donde sea seguro). Colocar agitador (300–500 rpm constantes).

B. Etapa de evaporación (con registro de datos)

- Ajustar la placa para mantener el baño en 90–100 °C (ebullición suave del baño, NO de la solución).
- Cada 3–5 min: detener brevemente la agitación, tomar 1–2 gotas para °Brix, registrar masa del beaker+solución $m(t)$, temperatura de la solución $T(t)$ y tiempo. Reanudar agitación.
- Continuar hasta alcanzar 60–70 °Brix (o el valor objetivo definido por el docente). Estimar potencia (opcional) por lectura de la placa o con wattímetro para calcular Q .

C. Inducción de cristalización (enfriamiento controlado)

- Transferir el beaker a un baño de enfriamiento (agua-hielo). Reducir T de la solución a 25–35 °C en 15–25 min (enfriamiento moderado).
- Alcanzado $S > 1$ (°Brix por arriba de solubilidad a la nueva T), semillar con 0.5–1.0 % p/p de cristales finos de sacarosa (tamiz 100–200 μm). Mantener agitación suave 10–20 min.
- Observar aparición de cristales y aumento de turbidez. Si no nuclea, bajar T 2–5 °C adicionales o añadir más semilla (0.2–0.5 % p/p).

D. Separación, secado y pesaje

- Filtrar por gravedad o vacío suave para recuperar cristales y licor madre.
- Secar cristales a 40–50 °C (estufa) o al aire en desecador hasta masa constante.
- Medir masa de cristales secos m_c . Medir °Brix del licor madre y su masa m_L .

RESULTADOS ESPERADOS

- Curvas °Brix–tiempo y masa–tiempo durante evaporación.
- Alcance de supersaturación tras el enfriamiento y formación visible de cristales claros, con distribución de tamaño controlada por el semillado.
- Cálculo de fracción cristalizada y rendimiento.
- Estimación de energía consumida (calor sensible + latente).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Plantillas de datos (sugerido en la libreta o hoja de cálculo): Tabla 1. Datos de evaporación (cada Δt).
- Balances de materia (lote): sacarosa, agua evaporada, rendimiento y fracción cristalizada respecto al soluto.
- Balance de energía (integral):

$$Q \approx \underbrace{\bar{m}C_p(T_{\text{fin}} - T_0)}_{\text{calor sensible}} + \underbrace{m_{\text{evap}} \lambda(T_{\text{eb}})}_{\text{calor de evaporación}}$$

Estimar C_p de la solución (3.3–4.2 kJ kg⁻¹ K⁻¹ según °Brix; elegir razonablemente y justificar).

Si se conoce la **potencia eléctrica** P y el tiempo efectivo de calentamiento τ : $Q_{\text{eléctrico}} = P \tau$.

Comparar con el Q termodinámico para discutir **pérdidas**.

Si se dispone de ΔT_{LM} entre baño y solución:

$$UA = \frac{Q}{\Delta T_{\text{LM}} t}$$

- Cinemática cualitativa de cristalización: Identificar si el proceso ocurrió en zona metaestable (crecimiento predominante) o si hubo nucleación espontánea. Comentar el efecto del semillado, la tasa de enfriamiento y la agitación en el tamaño/pureza. Si se usan tamices, estimar d50 por fraccionamiento simple (opcional).
- Gráficas requeridas: °Brix vs. t , $m(t)$ vs. t , (Opcional) S vs. t usando una curva de solubilidad tabulada para discutir el cruce de la línea de solubilidad.
- Verificar coherencia de balances $m_0 \leftrightarrow m_L + m_c + m_{\text{evap}}$
- Evaluar si el régimen de enfriamiento y el semillado produjeron cristales con el tamaño deseado.
- Discutir implicaciones de escala para seleccionar evaporador/cristalizador industrial (p. ej., múltiples efectos, vacío, enfriadores de rasquetas).

CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

- Repetir con dos perfiles de enfriamiento (rápido vs. escalonado) y comparar distribución de tamaños.
- Medir pureza por °Brix del licor madre y pérdidas de soluto en madre.
- Estimar coste energético por kg de agua evaporada y comparar con operación al vacío (supuestos razonables).

ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

- Reporte con: objetivo, esquema del montaje, tablas de datos y gráficas (°Brix–t, m–t), balances completos, estimación de Q y $U A$ (si aplica), fotos de los cristales, discusión y conclusiones.
- Anexar cálculos de conversión °Brix→%p/p.

EVALUACIÓN Y EVIDENCIAS DE APRENDIZAJE

Criterios de evaluación	Ejecución de práctica, análisis de datos, trabajo en equipo y conclusiones.	
Rúbricas o listas de cotejo para valorar desempeño	Nivel de Competencia	Descripción
	Sobresaliente (9-10)	Reporte completo con análisis profundo, y conclusiones innovadoras.
	Avanzado (7-8)	Datos precisos pero con discusión limitada.
	Básico (5-6)	Resultados presentados sin análisis crítico, errores mayores al 15%.
	No Aprobado (<5)	Datos incompletos o sin relación con la teoría.
Formatos de reporte de prácticas	Portada, introducción, metodología, resultados y conclusión	

FUENTES DE INFORMACIÓN

1. Espinoza, R. R. Cruz, S. A. y Gonzales, N. J. (2023, 08 de diciembre). Transferencia de masa en estado estacionario. Portal de Universidad Nacional de Barranca. https://repositorio.unab.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12935/18/NC_Transferencia_Rodriguez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
2. Leyes de Fick. (2023, 08 de diciembre). Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Fick
3. Treybal, R. E., y García, R. A. (1988). Operaciones de transferencia de masa. (2da ed.). McGraw-Hill. https://www.academia.edu/12159207/Operaciones_de_transferencia_de_masa_Robert_Treybal
4. Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., y Calderón, A. C. (1982). Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa. (2da ed.). LIMUSA. https://www.academia.edu/39725784/Fundamentos_de_transferencia_de_momento_calor_James_R_Welty_2da_edición_en_español
5. Yanniotis, S. (2008). Solving problems in food engineering. (1ra ed). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73514-6>
6. Aguilar, C. N., & Carvajal-Millan, E. (2019). Applied Food Science and Engineering with Industrial Applications. (1st ed.). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/978135104864>
7. Alvarado, J. D. (2014). Principios de Ingeniería Aplicados en Alimentos (2da. ed.). Universidad Técnica de Ambato - Ecuador. https://www.researchgate.net/publication/302119863_Principios_de_Ingenieria_Aplicados_en_Alimentos_2da_ed/references
8. Andrés Grau, A., Albors Sorolla, A. M., Barat Baviera, J. M., & Fito Maupoey, P. (2020). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Universitat Politècnica de València. Primera edición. Páginas 224. ISBN: 978-84-9048-896-6
9. Andrés Grau, A., Albors Sorolla, A. M., Barat Baviera, J. M., & Fito Maupoey, P. (2020). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Universitat Politècnica de València. Primera Edición. Páginas 224. ISBN: 978-84-9048-896-6
10. Barbosa-Canovas, G. V., y Ibarz, R. A. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. España. Mundi-Prensa. Recuperado de https://www.academia.edu/23017464/operaciones_unitarias_en_la_ingenieria_de_alimentos_ibarz_1
11. Harriott, P., McCabe, W. L., y Smith, J. C. (1991). Operaciones unitarias en ingeniería química. (7ma Ed.) Recuperado de <http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusqp/14698.pdf>
12. Maupoey, P. F., Andrés Grau, A. M., Barat Baviera, J. M., & Albors Sorolla, A. M. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente (1ra ed.). Editorial UNiversidad Politècnica de Valencia. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-tecnologica-de-salamanca/operaciones-unitarias/introduccion-al-secado-de-alimentos-por-aire-caliente-tecnicas-de-secado-toc-4092-02-01/63547551>
13. McCabe, W. L., Smith, J. C., y Harriott, P. (1993). Unit operations of chemical engineering. New York: McGraw-Hill, Inc. <https://evsuipeche.files.wordpress.com/2014/06/unit-operations-of-chemicalengineering-5th-ed-mcca>
14. Mujumdar, A.S. (Ed.). (1995). Handbook of Industrial Drying: Second Edition, Revised and Expanded (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429289774>
15. Cengel, Y. A. y Boles M. A. (2015). Termodinámica. (8va ed.). Editorial McGraw Hill, Inc. https://www.academia.edu/44436306/Termodinámica_8va_Edicion
16. Felder, R.M y Rousseau, R.W. (2004). Principios elementales de los procesos químicos. Editorial Limusa Wiley. <https://hdquimicaeiqttotalh.files.wordpress.com/2018/10/libro-de-balance->

[felder.pdf](#)

17. Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. (3ra ed.). Editorial Continental S.A. de C.V.
https://www.academia.edu/44622188/Procesos_de_Transporte_y_Operaciones_Unitarias_C_J_Gea
18. Geankoplis, Christie J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Editorial Continental S.A. de C.V.



ANEXOS



UES

Universidad Estatal de Sonora
La Fuerza del Saber Estimulará mi Espíritu