

INTRODUCCIÓN A LAS OPERACIONES UNITARIAS EN PROCESOS ALIMENTARIOS

MAIRA FERNANDA RAMÍREZ LASSO

INTRODUCCIÓN

Los ingenieros en alimentos, agroindustriales o afines se fundamentan en la aplicación de diversas operaciones unitarias para transformar materias primas agrícolas en productos finales de alto valor. Las operaciones unitarias, siendo fundamentales para cualquier proceso, se definen como pasos individuales o acciones específicas que contribuyen a la transformación de la materia prima en el contexto de un sistema agroindustrial.

En este capítulo se abordan las operaciones unitarias claves esenciales en estas ingenierías, definiéndolas para su mayor aplicación en la práctica y que sean de ayuda para garantizar la calidad de los productos finales.

2.1. Importancia de las operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos o afines

Las operaciones unitarias desempeñan un papel crucial en la eficiencia y rentabilidad de los procesos en la indus-

tria agroalimentaria. Desde la recolección de materias primas hasta la obtención de productos finales, estas operaciones garantizan la optimización de recursos y la obtención de productos de calidad. Comprender la aplicación y los principios de las operaciones unitarias es esencial para diseñar y gestionar eficazmente los procesos alimentarios.

Principales operaciones unitarias

En este capítulo se abordarán las operaciones unitarias más empleadas en el ámbito de la ingeniería de alimentos o afines. Desde la limpieza y clasificación de materias primas hasta la separación y conservación de productos finales, cada operación desempeña un papel único y esencial en el proceso integral del producto final.

Enseguida se definirán algunos conceptos para entender el contexto de las operaciones unitarias.

Proceso. Es el conjunto de actividades u operaciones industriales que modifican las propiedades de las materias primas para obtener productos que sirvan para cubrir las necesidades de la sociedad. Estas modificaciones a las materias primas naturales pretenden obtener productos más aceptados en el mercado, o que presenten mayores posibilidades de almacenamiento o transporte.

Limpieza. Es el proceso o la operación de eliminación de residuos de alimentos u otras materias extrañas o indeseables (Social, 2013).

Desinfección - Descontaminación. Es el tratamiento fisicoquímico o biológico aplicado a las superficies limpias en contacto con el alimento, con el fin de destruir las células vegetativas de los microorganismos que pueden ocasionar riesgos para la salud pública y reducir sustancialmente el número de otros microorganismos indeseables, sin que dicho tratamiento afecte adversamente la calidad e inocuidad del alimento (Social, 2013).

Almacenamiento. El adecuado almacenamiento y manejo inicial de los insumos constituye un proceso importante para producir y transformar de manera exitosa y sostenible cualquier producto. Este proceso se inicia cuando los insumos se reciben o entregan en el centro de acopio y continúa su almacenamiento, asegurando condiciones óptimas que conserven su calidad y eficacia. Es fundamental mantener controles de temperatura y humedad para evitar la degradación prematura de las materias primas y minimizar las pérdidas.

Este manejo adecuado no solo garantiza la trazabilidad y calidad de los productos, sino que también contribuye a la seguridad alimentaria y a la salud, desde la producción primaria hasta el consumidor final. La implementación de buenas prácticas de fabricación es importante para prevenir riesgos ambientales.

Operación unitaria. Es cada una de las etapas individuales y fundamentales involucradas en un proceso de ingeniería. Estas operaciones son las unidades básicas que conforman un sistema de procesamiento y, por lo general, implican cambios físicos o químicos en los materiales. Cada operación unitaria se realiza de manera independiente y contribuye a la transformación de materias primas en productos deseados (Bartholomai, 1991).

Las etapas en donde se producen cambios netamente físicos se denominan operaciones unitarias y las etapas donde se produce una reacción química se llaman procesos unitarios.

Las operaciones unitarias se dividen en dos grandes ramas: operaciones unitarias difusionales y operaciones unitarias no difusionales.

Las operaciones unitarias difusionales son todas aquellas en donde se establece un equilibrio dinámico entre fases, ya sea líquido-vapor, líquido-líquido o líquido-sólido.

Las operaciones unitarias no difusionales son aquellas en donde no se establece un equilibrio entre fases (Integración, 2018).

Aséptico. Describe una situación de ausencia de microorganismos, incluyendo esporas viables.

Sistema aséptico. Hace referencia a todo el sistema necesario para producir un alimento estéril comercialmente, en el interior de un recipiente herméticamente cerrado. Este término incluye el sistema de tratamiento del alimento y el sistema de llenado y envasado.

Sistema de tratamiento aséptico. Hace referencia solamente al sistema para tratar el producto y llevarlo al sistema de llenado y envasado (Rees et al., 1991).

2.2. Principios físicos y químicos

Las operaciones unitarias son aplicables a muchos procesos, tanto físicos como químicos; por ejemplo, el proceso empleado para la manufactura de la sal común, que consiste en la siguiente secuencia de operaciones unitarias: transporte de sólidos y líquidos, transferencia de calor, evaporación, cristalización, secado y tamizado.

Las operaciones unitarias se basan en principios físicos o químicos específicos; por ejemplo, la destilación, que se basa en las diferencias de puntos de ebullición, mientras que la trituración implica la reducción mecánica del tamaño de partícula (McCabe *et al.*, 1993).

Aplicaciones diversas. Se utilizan en una amplia gama de industrias, desde la producción de alimentos y bebidas hasta la fabricación de productos químicos y farmacéuticos, entre otros. Las operaciones unitarias más comunes en la industria de alimentos son: secado, trituración, filtración, destilación, extracción, evaporación, mezclado, intercambio iónico, centrifugación, adsorción y absorción.

Definiciones de las operaciones unitarias de transformación

Secado. El proceso de secado se presenta como una operación unitaria relevante en la ingeniería de alimentos o afines. La eliminación del agua de productos agrícolas es crucial para prolongar su vida útil, prevenir la proliferación de microorganismos y mantener la calidad organoléptica. Desde granos hasta frutas y hortalizas, el secado se convierte en una fase necesaria para conservar los productos en su forma óptima.

Los procesos de secado pueden cambiar según la procedencia de la materia prima, ya sea sólida, líquida o gaseosa; el secado de materias sólidas se realiza generalmente por un proceso térmico con ayuda de diferentes instrumentos y equipos que comprende no solo la eliminación total del agua (a_w), sino también en algunas ocasiones la eliminación de restos de disolventes. El secado de los gases es un proceso importante y frecuente en la industria química, el gas que hay que secar se reduce a través de un líquido apropiado que retiene la humedad contenida en el mismo o se hace pasar sobre gel de sílice que absorbe la humedad, también por enfriamiento del gas se puede eliminar el agua que contiene. Dependiendo de cómo se encuentre el líquido en el material que se va a secar, el proceso de secado puede realizarse fácilmente o presentar algunas dificultades. Antes de que una materia sólida pueda secarse por medios térmicos, es preciso conseguir un secado mecánico suficien-

te, esto se consigue por diferentes medios como prensado, filtrado o centrifugado, esta previa deshidratación facilita un secado completo.

Las condiciones de secado son muy diversas porque cada sustancia tiene propiedades específicas. La forma y textura del material, eventualmente también la velocidad de corriente del aire seco y su temperatura, son factores que influyen en la velocidad de secado (Vollrath, 2005).

Clasificación de secadores. Se han construido muchos diseños de secadores para crear un eficiente sistema de secado. Para encontrar una clasificación adecuada de los secadores, es necesario definir cómo son suministrados los requisitos térmicos y los secadores con los que se cuenta actualmente. En primer lugar, el calor se debe transferir al material húmedo, para promover la operación de secado.

El calor puede ser aplicado por uno o más de los siguientes métodos:

Convección, donde el calor es transmitido indirectamente por contacto del material mojado y una superficie caliente.

Conducción, donde el calor es transmitido indirectamente por contacto del material mojado y una superficie caliente.

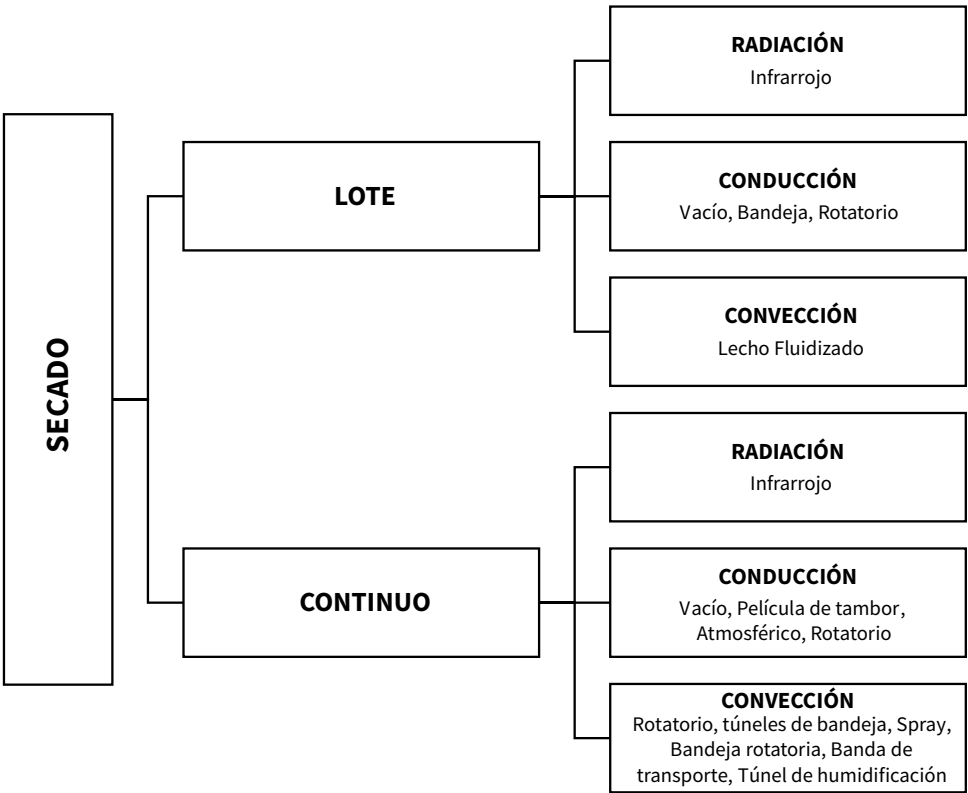
Radiación, donde el calor se transmite directamente y solo de un cuerpo caliente al material mojado, por radiación de calor. Los secadores industriales están en dos categorías principales: secadores de convección y secadores de conducción.

Estos secadores tomarán forma de secadores tipo lote o secadores continuos. En la figura 2.1 se muestran los secadores de la industria según su clasificación (Mazarriegos, 2006).

Las condiciones de secado son muy diversas porque cada sustancia tiene propiedades específicas. La forma y textura del material, eventualmente también la velocidad de corriente del aire seco y su temperatura, son factores que influyen en la velocidad de secado (Vollrath, 2005).



Figura 2.1. Diagrama de clasificación de secadores



Fuente: elaboración propia.

Reducción de tamaño. Se aplica a todas las formas en las que las partículas de sólidos se pueden cortar o romper en piezas más pequeñas. En los procesos industriales, la reducción de tamaño de sólidos se lleva a cabo por distintos métodos y con fines diferentes. Las grandes piedras de un mineral crudo se desintegran hasta un tamaño manejable; los productos químicos sintéticos se muelen hasta convertirse en polvo y las láminas de plástico se cortan en cubos o rombos. Los productos comerciales con frecuencia deben cumplir rigurosas especificaciones con respecto al tamaño y, a veces, con respecto a la forma de las partículas.

Los sólidos pueden romperse con diferentes métodos, pero solo cuatro se usan en los equipos de reducción de tamaño: 1. compresión, 2. impacto, 3. frotación o rozamiento, y 4. corte. Un cascanueces, un martillo, una lima y unas tijeras constituyen ejemplos de los cuatro tipos de acción (McCabe, 1993). La reducción de tamaño es fundamental para convertir materias primas en formas más manejables, es por

ello que operaciones como trituración y molienda permiten obtener partículas de tamaño específico, facilitando procesos subsiguientes como la extracción y la fermentación en la producción de alimentos y bebidas agroindustriales (McCabe et al., 1993).

Filtración. Emerge como una operación unitaria esencial para garantizar la clarificación y purificación de líquidos en los procesos agroindustriales, desde la eliminación de impurezas hasta la separación de sólidos no deseados, la filtración se convierte en un componente vital para garantizar la calidad y pureza de los productos líquidos en cada etapa del proceso.

Envasado en atmósfera modificada (EAM). Es uno de los métodos más usados en la industria alimentaria, que implica eliminar el aire del interior del envase y sustituirlo por un gas o mezcla de gases; la mezcla de gases que se debe emplear depende del producto que se desee trabajar.

La atmósfera gaseosa cambia continuamente durante todo el periodo de almacenamiento, por la influencia de diferentes factores, como respiración del producto envasado, cambios bioquímicos, y la lenta difusión de los gases a través del envase.

Ventajas y desventajas del envasado en atmósfera modificada:

Ventajas:

- Incremento de la vida útil
- Reducción de residuos
- Mejor presentación del producto final
- Mejora el almacenamiento en estanterías (apilado higiénico de los envases)
- Fácil separación de los productos
- Disminuye la necesidad de usar conservantes químicos
- Reducción de los costes de producción y almacenamiento

Desventajas:

- Inversión de maquinaria de envasado con gas
- Coste de los gases
- Inversiones en instrumentos analíticos para garantizar el empleo de las mezclas de gases adecuadas

- Gastos en los sistemas para asegurar la calidad, para evitar la distribución de envases con perforaciones, etcétera.
- Los beneficios del envasado en atmósfera modificada se pierden cuando se abre o se perfora el envase (Parry, 1995).

Envasado en atmósfera controlada. Este método se usa como sinónimo del envasado en atmósfera modificada; pero su empleo es incorrecto, pues no se puede controlar la atmósfera del envase tras cerrarlo.

Envasado en gas. Este es un método alternativo empleado con frecuencia para descubrir el envasado en atmósfera modificada; es un nombre inapropiado, puesto que la modificación de la atmósfera puede conseguirse por un simple vacío o evacuación del aire. También se piensa que puede presentar connotaciones de tipo emocional adversas para el consumidor y, por lo tanto, es un término que evitan muchos industriales y distribuidores.

Envasado al vacío. Este es el método más simple y uno de los más relevantes en la industria alimentaria para la trazabilidad de productos y/o muestras, se basa en modificar la atmósfera interna de un envase. El producto se coloca en un envase formado con *film* de baja permeabilidad al oxígeno, se elimina el aire y se cierra el envase, el envase sin aire se pliega (colapsa) alrededor del producto, puesto que la presión interna es muy inferior a la atmosférica.

Mezcla de gases. Este término es empleado, en ocasiones, para referirse a la mezcla de gases utilizada para modificar la atmósfera dentro del envase (Parry, 1995).

Liofilización. La liofilización es una técnica implementada para conservar productos mediante sublimación, para reducir las pérdidas de compuestos de valor, como los volátiles o termosensibles, por lo que este proceso no altera la estructura fisicoquímica del material, permitiendo conservarlo sin necesidad de implementar cadenas de frío. Este método se define como un proceso de estabilización en donde la materia prima se somete a un proceso de congelación para concentrar el solvente que posteriormente se reducirá mediante sublimación y desorción. Este método se implementa para la deshidratación de frutos como banano, manzana y fresas, entre otros, con el fin de aumentar el tiempo de vida útil del material y al mismo tiempo conservar sus propiedades organolépticas (Ramírez-Navas, 2006).

Evaporación. Un líquido se transforma en vapor añadiendo calor. Este proceso ocurre cuando las moléculas en la superficie del líquido ganan suficiente energía térmica para cambiar a la fase gaseosa.

Cristalización. La cristalización es un proceso mediante el cual ocurre un cambio de fase de un sistema a otro, llevándolo a un estado de desequilibrio; en este proceso, el sistema incrementa el orden pasando de un sistema relativamente desordenado (disolución) a un sistema más organizado (cristal). La cristalización es una operación unitaria que consiste en la formación de una sustancia cristalina a partir de soluciones o de masas fundidas. La operación es muy importante en la industria por la gran cantidad de productos que se venden en el mercado en forma de cristales como el azúcar, también desarrolla un papel importante en ramas como la química, la farmacéutica, la biotecnología y la bioquímica, entre otras (Grases Freixedas et al., 2000).

Mezclado. Es una operación importante, incluso fundamental, en casi todos los procesos químicos. El mezclado de sólidos secos y de pastas viscosas se parece al mezclado de líquidos de baja viscosidad, ambos procesos implican la interposición de dos o más componentes separados para formar un producto más o menos uniforme. Algunos equipos que se usan para mezclar líquidos pueden usarse a veces para mezclar sólidos y pastas, y viceversa (McCabe et al., 1993).

Centrifugación. Es una operación unitaria eficiente para la separación de fases en mezclas líquidas y sólidas. En la ingeniería de alimentos y agroindustrial, se utiliza para la separación de sólidos suspendidos en líquidos, como la extracción de jugos de frutas, mejorando la eficiencia y la calidad de los productos finales.

Esterilización. El tratamiento térmico de los alimentos suele denominarse erróneamente *esterilización*. Es importante reconocer que un producto que ha sido sometido a “esterilización” térmica puede no ser estéril. Si se asume que la destrucción microbiana por el calor sigue un curso logarítmico, la esterilidad absoluta es inalcanzable. El tratamiento térmico consiste en reducir el riesgo de supervivencia; en términos prácticos, sin embargo, es posible reducir la probabilidad de supervivencia hasta en un grado en el que el producto pueda ser considerado como “estéril”.

Esterilidad comercial. Un alimento “estéril comercialmente” puede definirse como un producto que ha sido sometido a un tratamiento térmico tal que no se altere en condiciones normales de almacenamiento ni se considere un peligro para

la salud del consumidor. Por ejemplo, un producto ácido como una fruta puede haber sido sometido a un proceso de pasteurización suficiente para destruir hongos, bacterias y levaduras no esporuladas. Los ingenieros que se encuentran en la transformación de materia prima deben tener cuidado cuando utilizan alimentos ácidos “comercialmente estériles” ($\text{pH} < 4,5$), como frutas para elaborar nuevos productos, por ejemplo, a base de carne, ya que el pH alto puede permitir la proliferación de esporas de microorganismos causantes de intoxicaciones alimentarias que han sobrevivido al proceso de pasteurización aplicado a la fruta. También es importante controlar la alteración en productos ácidos ($\text{pH} < 4,5$), ya que los propios gérmenes de la alteración pueden elevar el pH, permitiendo así que se multipliquen otros patógenos, como *Clostridium botulinum*.

El tratamiento térmico consiste en el calentamiento de los alimentos durante un tiempo y temperatura predeterminados, para conseguir su esterilidad comercial; eliminar microorganismos capaces de provocar intoxicación alimentaria y reducir el contenido de gérmenes alterantes hasta un nivel aceptable. Para un alimento de baja acidez, con un ($\text{pH} < 4,5$), este proceso exige el calentamiento del producto hasta temperaturas superiores a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, generalmente dentro del margen de 115 hasta $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante un tiempo suficiente para conseguir una reducción de 12 ciclos logarítmicos en el número de esporas de *Clostridium botulinum*, según se define en el Departamento del *Health Code Practice* N.º 10.

Los tratamientos térmicos pueden aplicarse después de introducir el producto en los recipientes y cerrarlos herméticamente, por ejemplo, mediante enlatado, o en sistemas de flujo continuo antes del llenado aséptico. Un ejemplo claro es el tratamiento UHT (Rees et al., 1991).

Pasteurización. La pasteurización es una operación crucial para la conservación de productos alimenticios mediante el control térmico; en la ingeniería de alimentos o agroindustrial, se aplica comúnmente a productos líquidos como jugos y leche, eliminando patógenos y microorganismos no deseados para prolongar la vida útil sin comprometer la calidad nutricional.

Se presenta un ejemplo de alimento con los temas expuestos anteriormente como el proceso de enlatado de espárragos, que se realiza siguiendo varios pasos. En primer lugar, se hace limpieza y desinfección exhaustiva de la materia prima; luego, se procede a adecuar y clasificar la materia prima óptima para su procesamiento. A continuación, se cortan los espárragos de manera cuidadosa; para preservar la calidad de los espárragos se hace un escaldado que no afecte sus atributos, poste-

riormente, se introducen los espárragos en latas o en otros recipientes que puedan sellarse herméticamente. Es fundamental que los recipientes estén cerrados para garantizar la seguridad alimentaria.

Durante el proceso de enlatado, se asegura un llenado preciso y uniforme de los espárragos, tanto sólidos como líquidos, se procede a llenar los recipientes con salmuera diluida y se sellan herméticamente. A continuación, se someten los recipientes a calor en una autoclave para su esterilización, una vez enfriados, los recipientes se mantienen a temperatura ambiente; luego de secarlos, se etiquetan de acuerdo con la normatividad legal vigente y se almacenan en cajas de cartón (Maluenda, 1991). Es importante destacar que este proceso garantiza la calidad y la seguridad de los espárragos enlatados.

Refrigeración. El enfriamiento se entiende por la reducción de la temperatura de un producto hasta alcanzar entre 0 y 5 °C para conservar los alimentos durante un tiempo corto. El proceso de refrigeración permite la reducción del crecimiento de microorganismos mesófilos y termófilos encargados de la degradación de la materia prima, causando afecciones de tipo organoléptico y su posterior putrefacción (Gigante, 2018). Algunos beneficios del uso de la refrigeración son: prevenir el crecimiento de microorganismos que puedan afectar la salud del consumidor, garantizar las propiedades organolépticas de los productos, minimizar la oxidación de grasas y facilitar el transporte de alimentos perecederos a largas distancias.

Hidrólisis. La hidrólisis es el proceso mediante el cual se lleva a cabo la descomposición de compuestos orgánicos complejos por medio de la reacción química del agua, la cual genera un rompimiento de enlaces con el objetivo de obtener compuestos más sencillos.

Fermentación. La fermentación es un proceso metabólico generador de energía en el cual se transforman los sustratos (compuestos orgánicos), principalmente azúcares, en otras sustancias orgánicas más simples. En el proceso de fermentación, el sustrato da lugar a una mezcla de metabolitos como productos finales del proceso, entre los productos finales se obtienen compuestos como etanol, ácido láctico, ácido acético y ácido butírico, entre otros, los cuales son compuestos de alto valor en la agroindustria para el desarrollo y creación de productos alimentarios y no alimentarios (Carbonero Zalduegui, 1975). En la agroindustria existen diferentes tipos de fermentación, como por ejemplo la fermentación alcohólica, la cual se desarrolla en un ambiente anaeróbico con la ayuda de microorganismos que procesan los hidratos de carbono para la obtención de alcohol en forma de etanol, que pos-

teriormente se emplea en la elaboración de bebidas alcohólicas tales como vino, cerveza y sidra, entre otros.

Ósmosis inversa. La ósmosis inversa es una técnica de separación y purificación mediante la implementación de una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas y partículas. El proceso de ósmosis inversa posee unos de los mayores gradientes de presión dentro de los procesos de filtración por membranas donde esta actúa como barrera para la retención de las partículas y moléculas orgánicas disueltas, permitiendo el paso de las moléculas de agua libres a través de esta, creando un flujo de producto purificado. En el proceso de ósmosis, una de las aplicaciones más reconocidas es la desalinización de agua marina y tratamiento de aguas residuales, donde la eficiencia de este proceso se puede hallar en rangos entre los 95 % y los 99 %, dependiendo de factores como el tipo de membrana, la temperatura y el diseño del sistema, entre otros (Fausto, 2023).

2.3. Operaciones unitarias de transferencia de materia

Las operaciones unitarias de transferencia de materia están guiadas por la difusión de un componente en una mezcla, implicando la transferencia de materia o energía. Por ejemplo, la evaporación supone la transferencia de energía para transformar el estado líquido a vapor (McCabe et al., 1993). Cada operación unitaria tiene un propósito específico dentro del proceso global, ya sea la separación de componentes, el cambio de fase, la transferencia de masa o energía, entre otros. Es por ello que estas operaciones unitarias se consideran entidades independientes, se diseñan y optimizan por separado antes de integrarse en el proceso global (McCabe *et al.*, 1993). Enseguida se describen las operaciones de este grupo.

Operaciones unitarias de transferencia de masa

Las operaciones unitarias de transferencia de masa comprenden procesos fundamentales en los que se busca separar o purificar componentes de una mezcla, mediante el movimiento de materia desde una fase homogénea hacia otra. Este fenómeno ocurre cuando existe una diferencia de concentración entre dos regiones, lo que genera una fuerza motriz que impulsa el desplazamiento de una sustancia.

A diferencia de las operaciones de separación mecánica, como la filtración o la sedimentación, que dependen de diferencias físicas como el tamaño o la densidad de las partículas, las operaciones de transferencia de masa se basan en

diferencias en propiedades termodinámicas como la presión de vapor, la solubilidad o la difusividad. Estas diferencias permiten que una o más especies químicas migren de una fase a otra, como ocurre en procesos como la destilación, la extracción líquido-líquido, la absorción de gases o el secado.

Ejemplo: secado de rodajas de manzana en un túnel de aire caliente.

En la industria de alimentos, el secado es una operación unitaria de transferencia de masa ampliamente utilizada para reducir el contenido de humedad de los productos, con el fin de prolongar su vida útil y facilitar su almacenamiento. Durante el secado de rodajas de manzana en un túnel de aire caliente, el agua contenida en los tejidos celulares migra desde el interior del alimento hacia su superficie y luego se transfiere al aire circundante. Este proceso implica dos etapas de transferencia de masa:

Transferencia interna: el agua se desplaza desde el centro del producto hacia la superficie, impulsada por un gradiente de concentración (alta humedad en el interior, menor en la superficie).

Transferencia externa: una vez en la superficie, el agua se evapora hacia el flujo de aire caliente que circula en el túnel, debido a la diferencia de presión de vapor entre la superficie húmeda del alimento y el aire más seco.

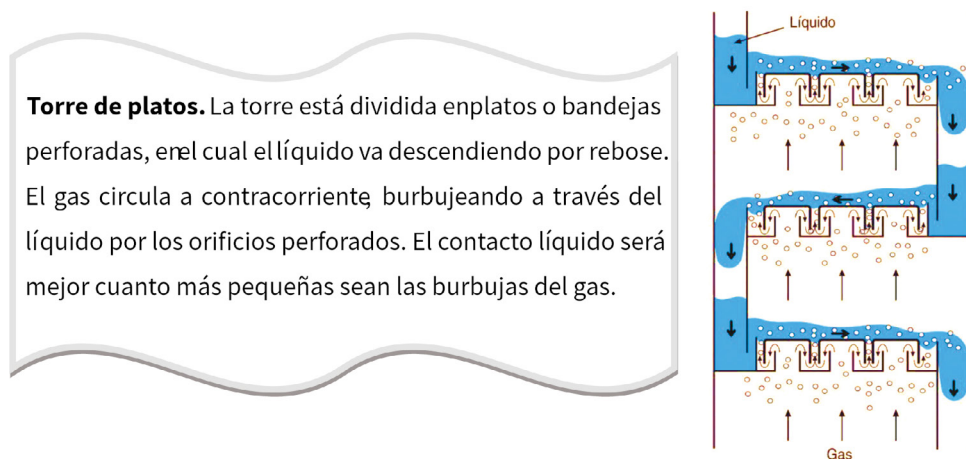
La velocidad de secado depende de varios factores, como la temperatura y velocidad del aire, la humedad relativa del ambiente y las propiedades físicas del alimento (como la porosidad y el espesor de las rodajas). El diseño adecuado del sistema de secado requiere comprender y modelar estos fenómenos de transferencia de masa para garantizar una deshidratación eficiente sin afectar la calidad nutricional o sensorial del producto.

Por ejemplo, el proceso de absorción constituye una operación de transferencia de materia en la que un gas se pone en contacto con un líquido, permitiendo la disolución selectiva de uno o más componentes presentes en dicho líquido.

Absorción de gases. Es una operación unitaria en la cual se disuelve en un líquido uno o más componentes solubles de una mezcla gaseosa. Este proceso se utiliza cuando se desea transferir un componente volátil de una mezcla líquida a un gas. Además, la absorción de gases se emplea como una técnica para la eliminación de gases, llevándose a cabo mediante la transferencia de gas con un líquido. Para

facilitar esta transferencia, se utilizan equipos llamados absorbedores, el procedimiento implica circular el gas mediante un líquido capaz de disolver el agente que se desea separar o con el que se desea reaccionar. Las figuras 2.2 y 2.3 muestran ejemplos de diferentes absorbedores utilizados en la industria.

Figura 2.2. Torre de platos



Torre de platos. La torre está dividida en platos o bandejas perforadas, en el cual el líquido va descendiendo por rebose. El gas circula a contracorriente, burbujando a través del líquido por los orificios perforados. El contacto líquido será mejor cuanto más pequeñas sean las burbujas del gas.

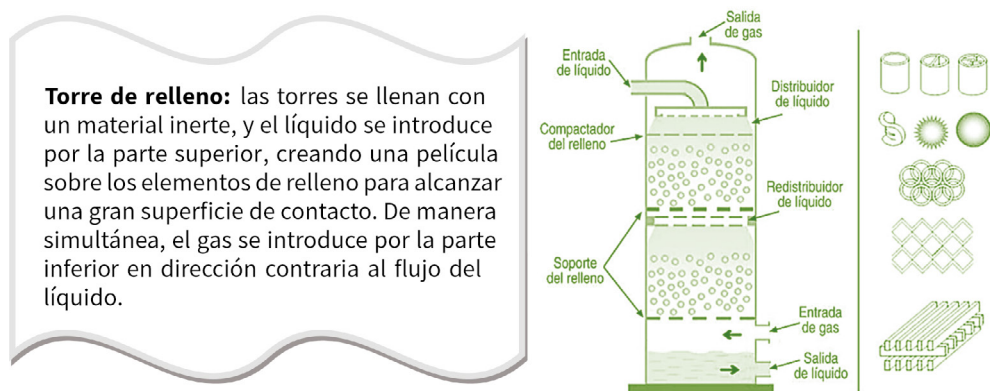
Fuente: McCabe et al. (2019).

Estas operaciones se realizan de manera continua en equipos llamados torres o columnas, son equipos cilíndricos que suelen ser de gran altura y pueden empacarse o de platos, donde los flujos de contracorriente entre el gas y el líquido se realizan en contracorriente dentro de la torre. La corriente gaseosa se introduce por la base de la columna y sale por el domo, la corriente líquida se alimenta por el domo y se descarga por la base. Para profundizar en el tema, se puede revisar el texto relacionado con las torres o columnas de absorción y sus principales características de los equipos de absorción del libro *Absorción*, de Valiente (2010).

Como se observa en la figura 2.3, el gas de esta columna, que puede ser dióxido de azufre, entra por la parte inferior y atraviesa el relleno, compuesto por un lecho de partículas de tamaño, forma y material determinado; al mismo tiempo se introduce la corriente del disolvente, que puede ser agua, por la parte superior y cae por la gravedad, cubriendo la superficie externa de la partícula de relleno. Esto provoca una amplia superficie de interfaz (mayor contacto entre el relleno, el absorbente y el disolvente, así como flujo turbulento entre ambas fases).

Esta columna de relleno tiene diversos elementos que soporten al absorbedor, como los sistemas de gas y líquido. Incluye una parrilla para sostener el relleno y un separador de nieblas diseñado para capturar las gotas que podrían arrastrar el gas hacia la salida del lecho. Es fundamental destacar que al emplear una torre de aspersión en casos donde el gas es altamente soluble, o una torre de burbujeo cuando el sistema opera en una fase líquida, se logra un control preciso de la velocidad de transferencia de masa.

Figura 2.3. Torre de relleno



Fuente: McCabe et al., 1993.

Adsorción. Es un proceso que implica la retención de sustancias procedente de la fase gaseosa o líquida en la superficie de un sólido. El sólido, que se llama absorbente, captura la sustancia denominada adsorbato, eliminándola de la corriente; algunos de los materiales adsorbentes usados son: carbón activado, gel de sílice y alúmina. Los sistemas de adsorción pueden clasificarse en dos categorías principales: lecho fijo y lecho fluidizado. El proceso de adsorción, también conocido como sorción, implica la eliminación de uno o varios componentes de un fluido (ya sea líquido o gas), al retenerlos en la superficie de un sólido.

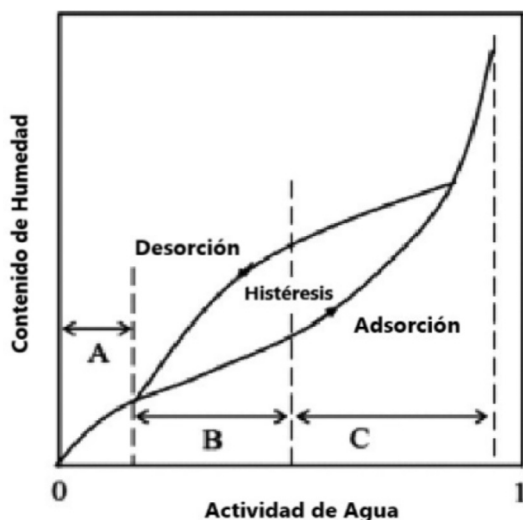
Tipos de adsorción. Según el tipo de atracción entre el soluto y el adsorbente se pueden clasificar en:

- Adsorción eléctrica
- Adsorción por intercambio iónico
- Adsorción de Van der Waals (adsorción física)
- Adsorción de naturaleza química (adsorción química - absorción)

Se citará un ejemplo de isotermas de adsorción de zanahorias deshidratadas. En función del método de obtención, las isotermas se clasifican en adsorción y desorción. En el caso de las isotermas de adsorción, la muestra seca se expone a atmósferas con una humedad relativa superior a su actividad de agua (a_w), promoviendo así la adsorción de agua.

Al contrario, en las isotermas de desorción, la muestra húmeda se coloca en atmósferas con una humedad relativa inferior a su a_w , provocando la pérdida de agua. En ambos casos, el equilibrio se alcanza cuando el peso de la muestra se mantiene constante, no obstante, las isotermas de adsorción y desorción para un mismo producto generalmente no coinciden, y esta diferencia se observa en la figura 2.4, donde la isoterma de adsorción se sitúa por debajo de la desorción, y la región comprendida entre ambas se define como histéresis.

Figura 2.4. Isotherma de sorción típica de un producto



Fuente: Marialina Anria, 2019.

Las isotermas se dividen en tres regiones. La región **A** representa la zona de baja actividad de agua (a_w), donde se encuentra el agua ligada, abarcando tanto el agua estructural como la de la monocapa. Este tipo de agua no es congelable y no está disponible para reacciones químicas. En la región **B**, el agua está unida de manera más débil que en la región anterior y suele encontrarse en pequeños capilares, a esta se le conoce como la zona de a_w intermedia. El agua de la región **C**, identi-

ficada como la zona de alta a_w , es el agua libre que está encapsulada en tejidos y membranas o contenida en macro capilares.

El comportamiento de las isotermas de adsorción es importante, ya que estas garantizan la estabilidad de los productos alimenticios durante los procesos de secado, envasado y almacenamiento.

Intercambio iónico. Es una operación de separación que se fundamenta en la transferencia de materia entre un fluido y un sólido, según lo indicado por Kanchi et al. (2017). En el proceso de intercambio iónico tiene lugar una reacción química en la que los iones móviles hidratados de un sólido son intercambiados por iones de igual carga presentes en un fluido. El intercambio iónico en alimentos es una técnica que implica la sustitución selectiva de iones presentes en la composición de un alimento, usando resinas de intercambio iónico; estas resinas son sustancias sólidas insolubles que tienen grupos funcionales con cargas eléctricas que permiten el intercambio de iones con la matriz líquida en la que están inmersas, como en alimentos o soluciones. Se mencionan varias aplicaciones específicas del intercambio iónico en alimentos, como la deionización del agua, la reducción de contaminantes, el ajuste de acidez y la mejora de la estabilidad, entre otras.

Destilación fraccionada. Es un proceso esencial en la industria alimentaria, especialmente en la producción de bebidas alcohólicas como aguardiente, whisky, tequila, ginebra o vodka. Este proceso permite separar los componentes de una mezcla líquida con base en sus diferentes puntos de ebullición. Durante la destilación fraccionada, la mezcla se calienta y se evaporan los componentes con puntos de ebullición más bajos, luego, los vapores se condensan y se recolectan (Integración, 2018). Para producir bebidas, el objetivo de la destilación fraccionada es obtener un destilado con un alto grado de pureza, eliminando los componentes no deseados, como metanol o los compuestos con olores y sabores desagradables.

Además, la destilación fraccionada también se utiliza en la industria alimentaria para la producción de aceites esenciales, como el aceite de eucalipto o de romero, entre otros, y para la purificación de ciertos compuestos químicos que se utilizan como aditivos alimentarios. La destilación fraccionada es clave en la producción de alimentos y bebidas en la industria alimentaria, ya que permite obtener soluciones líquidas con mayor pureza y calidad superior.

En el campo de la ingeniería es fundamental contar con una comprensión clara y precisa de la terminología utilizada en este capítulo, para describir las corrientes de

materias en diferentes operaciones. En la tabla 2.1 se presenta una recopilación de términos clave relacionados con las corrientes en operaciones de transferencia de materia, que abarca desde la destilación y la extracción, hasta la evaporación y la cristalización.

Tabla 2.1. Terminología para corrientes en operaciones de transferencia de materia

Operación	Fase V	Fase L
Destilación	Vapor	Líquido
Absorción de gases	Gas	Líquido
Separaciones con membrana	Gas o líquido	Gas o líquido
Adsorción	Gas o líquido	Sólido
Extracción de líquidos	Extracto	Refinado
Lixiviación	Líquido	Sólido
Cristalización	Licor madre	Cristales
Secado	Gas (generalmente aire)	Sólido húmedo

*V: vapor *L: líquido

Fuente: McCabe, Smith y Harriot, 2019.

Extracción. Es un proceso por el cual se separa una sustancia o componente específico de una mezcla, usando un agente solvente. Este agente puede ser un líquido, un sólido o un gas, se elige debido a su capacidad para disolver o absorber la sustancia de interés de manera efectiva, la extracción se aplica en diversos contex-



tos, como la ingeniería, la industria alimentaria, la industria ambiental, la industria farmacéutica, textil, cosmética, la industria de papel, entre otras.

Se basa en la disolución de una mezcla (líquida o sólida) en un disolvente selectivo. Estas técnicas comprenden dos categorías, la primera, *lixiviación o extracción sólido-líquido*, se utiliza para disolver materia soluble a partir de su mezcla con un sólido insoluble, la segunda, llamada *extracción líquido-líquido*, se utiliza para separar dos líquidos miscibles utilizando un disolvente que disuelve preferentemente a uno de ellos (McCabe et al., 1993).

La extracción, además, se aplica extensamente en la ingeniería agroindustrial para la obtención de compuestos valiosos, ya sea la extracción de aceites esenciales de plantas aromáticas o la separación de pigmentos naturales, esta operación unitaria juega un papel determinante en la obtención de ingredientes esenciales para la formulación de productos finales. Las extracciones se pueden dividir en dos: hidrodestilación y arrastre por vapor (McCabe et al., 1993).

2.4. Operaciones unitarias de transmisión de calor

Estas operaciones están controladas por los gradientes de temperatura, dependen del mecanismo con que se transfiere el calor, distinguiéndose transmisión de calor por conducción, convección y radiación (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

Convección. Los secaderos directos transfieren el calor por contacto del producto con un gas calentado, normalmente aire caliente, la mezcla de gas y vapor obtenida se puede lavar y filtrar si el producto tiene partículas sólidas perjudiciales en suspensión que puedan causar un riesgo a la salud humana y puede perjudicar el medio ambiente. Además, es a menudo ventajoso combinar la molienda con el secado directo en una sola unidad, esto hace ahorrar espacio y reduce el tamaño de las partículas alimentadas al secador, con lo que se optimizan la transferencia de calor y la evaporación.

Conducción. Los secaderos indirectos transfieren calor al producto mediante el contacto con una superficie calentada por aire, vapor o un líquido térmico. Se pueden utilizar intercambiadores para aportar el calor. El fluido, después de evaporar el agua del producto, pasa por un condensador para separar las sustancias evaporadas y se vuelve a calentar para utilizarse de nuevo, realizándose así un circuito cerrado. Las únicas emisiones a la atmósfera son las de los gases procedentes de

los focos de emisión de calor que se emplean en el intercambiador, por tanto, es un proceso de mayor eficacia medioambiental, indicado para productos con sustancias volátiles de alta toxicidad.

Radiación. Este método transfiere energía al material mediante ondas electromagnéticas, principalmente infrarrojos o microondas. Aunque su aplicación a nivel industrial en biomasa no está muy extendida, se emplea en procesos donde la calidad del producto es prioritaria. Sus ventajas incluyen un secado más rápido, calentamiento uniforme, mayor eficiencia energética y un control más preciso del proceso (Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y la Alimentación [CTNC], 2005).

Conclusión

Las operaciones unitarias fundamentales en la ingeniería de alimentos abarcan un papel esencial en la industria, como el secado hasta la extracción y la filtración, son cruciales en la creación e innovación de nuevos productos finales de alta calidad y en la optimización de los procesos productivos. En futuras investigaciones y desarrollos, la comprensión y aplicación efectiva de estas operaciones unitarias seguirán siendo pilares fundamentales para el avance y la innovación en la ingeniería. Las operaciones unitarias son los componentes esenciales de los procesos de ingeniería que permiten la transformación de materias primas en productos finales, mediante la aplicación de principios físicos o químicos específicos.