Programa de la asignatura:

Balance de masa y energía y operaciones unitarias

U3

Operaciones unitarias de transferencia de masa y calor

Índice

Presentación de la unidad 3
Competencia específica 4
Propósitos 4
3.1. Evaporación 5
3.1.1. Evaporador de simple efecto 11
3.1.2. Evaporador de múltiple efecto 12
3.2. Condensación 16
3.2.1. Condensador de superficie 17
3.2.2. Condensador de contacto 22
3.3. Secado 27
3.3.1. Tipos de secadores 29
3.3.2. Tiempo de secado 36
Cierre de la unidad 42
Fuentes de consulta 43

Presentación de la unidad

Balance. Retomada de: https://www.flickr.com

Bienvenido(a) a la Unidad 3. “Operaciones unitarias de transferencia simultánea de masa y calor”. En esta unidad aprenderás las herramientas fundamentales necesarias para diseñar equipos de transferencia simultánea de masa y calor, comúnmente utilizados en las aplicaciones de energías renovables.

Para el diseño de los equipos de transferencia simultánea de masa y calor deberás usar las herramientas aprendidas en las unidades 1 y 2. Al igual que en la unidad 2, sólo se abordarán los criterios de selección y los métodos más comunes de diseño aplicables en energías renovables.

Con los conocimientos que adquirirás en esta última unidad, serás capaz de seleccionar y especificar el equipo más apropiado para las aplicaciones comunes de transferencia simultánea de masa y calor: evaporación, condensación y secado.

Competencia específica

Unidad 3	**Analizar** operaciones unitarias de transferencia de masa y/o calor para examinar los procesos de transformación energética, analizando los principios de balance de masa y de energía.

Propósitos

1	**Utilizar** las herramientas de diseño de las operaciones unitarias de trasferencia simultánea de masa y calor.
2	**Identificar** los criterios de selección de equipos industriales de transferencia simultánea de masa y calor según las necesidades del proceso.

3.1. Evaporación

Los procesos de evaporación, condensación y secado se basan en la transferencia simultánea de masa y calor. En la evaporación se concentra una solución líquida al evaporar parte del solvente, esto implica un suministro grande de calor latente de vaporación del disolvente. La evaporación tiene muchas aplicaciones industriales, incluida el área de energías renovables; por ejemplo, en la destilación solar de agua de mar, que es en realidad un proceso de evaporación para recuperar agua potable.

Entonces, resumiendo, la evaporación consiste en separar, mediante ebullición, un disolvente de una solución. El objetivo de este proceso es concentrar la solución o recuperar el disolvente.

Básicamente, un evaporador es un intercambiador de calor capaz de hervir la solución, pero que cuenta además con un mecanismo para separar el vapor del líquido en ebullición. En la industria, los evaporadores se diseñan para operar de forma continua, con una gran superficie de transferencia de calor, para obtener una ebullición impetuosa y una formación rápida de vapor (Foust, Wenzel, Clump, Maus y Andersen 2006).

Clasificación de los evaporadores

Los evaporadores pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de construcción o con la manera de suministrarle energía (Shah y Sekulic, 2003):

1. Por el tipo de construcción:
   - Marmita abierta o carcasa
   - Tubo y coraza: de circulación natural (tubos verticales –cortos y largos–, película descendente, película ascendente) y circulación forzada (tubos verticales y horizontales)
   - Placa
   - Película agitada

2. Por la manera de suministrar energía:
   - Vapor de agua: de simple efecto, múltiple efecto (alimentación hacia adelante, alimentación en retroceso, alimentación mixta y alimentación en paralelo) e instantáneo múltiple.
   - Recompresión de vapor: compresión mecánica y compresión térmica.
   - Ambos

Para describir un evaporador particular se utilizan las características finales más concretas, omitiendo mencionar las características más generalizadas, por ejemplo: evaporador de película descendente (lo cual implica que es de tubo y coraza, con circulación natural).

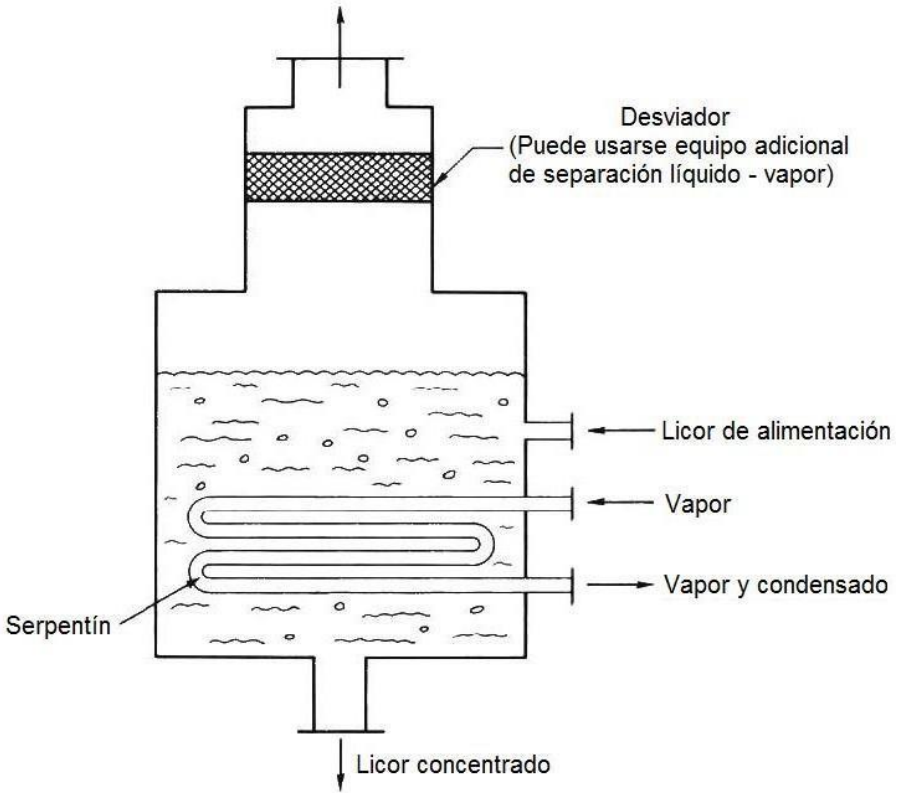
A continuación, se describen los tipos más utilizados en la industria:

1. Marmita abierta o carcasa
2. Con tubos horizontales
3. Con tubos verticales (cortos y largos)
4. Película descendente

En general, en los evaporadores se tienen problemas como la formación de espuma, la formación de incrustaciones y la corrosión de los materiales de construcción. El evitar estos problemas es uno de los principales objetivos al diseñar un evaporador, además de minimizar el área de transferencia de calor y el costo.

Evaporador de marmita

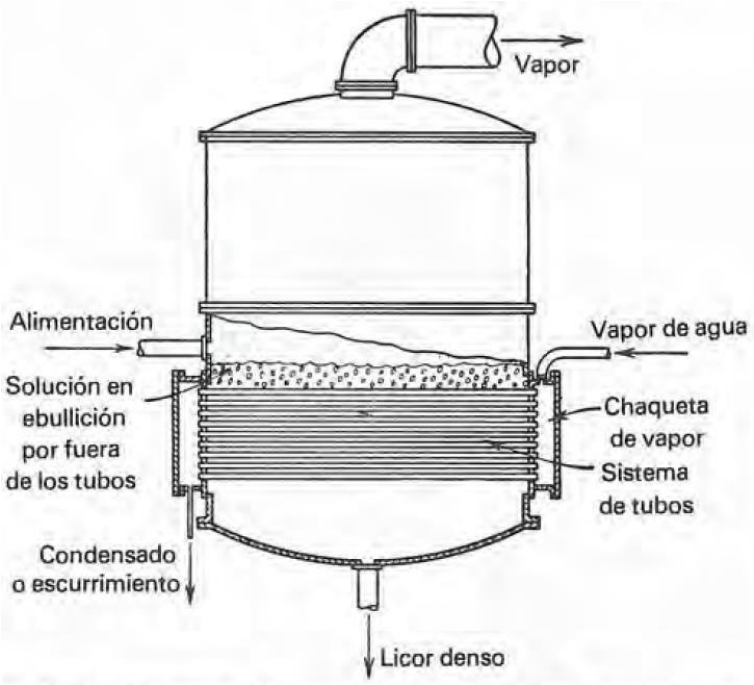
Es el tipo de evaporador más simple. El fluido a evaporar es colocado en un recipiente abierto, con una chaqueta para transferirle calor, serpentines sumergidos directamente en el líquido o a fuego directo. Son muy económicos, pero tienen un gran desperdicio de calor y se complica controlar las condiciones de salida del vapor obtenido (Geankoplis, 1998).



Evaporador típico de marmita. Tomada de Kakaç, 1991.

Evaporador de tubos horizontales

El evaporador de tubos horizontales es el que tradicionalmente se diseña y se utiliza en la industria. En él la solución que va a evaporarse bulle por fuera de los tubos horizontales, dentro de los cuales se condensa el fluido de transferencia de calor. El vapor se extrae por la parte superior del equipo, y se obtiene al hacerlo pasar por deflectores para minimizar el arrastre de gotas de líquido (Geankoplis, 1998).



Sección transversal de un evaporador de tubos horizontales. Tomada de Foust, Wenzel, Clump, Maus y Andersen, 2006.

Una de sus ventajas es que la agitación del líquido se limita debido a que los tubos horizontales entorpecen la circulación natural del líquido en ebullición, pero esto implica que el coeficiente de transferencia de calor sea menor que en otros tipos de evaporadores, del orden de 1100 a 2300 W/ (m^2 K). Otro problema es que la incrustación de sales se acumula en el exterior de los tubos, y es difícil de eliminar; para la limpieza se requiere parar toda la operación y desmontar por completo el haz de tubos (Foust, Wenzel, Clump, Maus y Andersen, 2006).

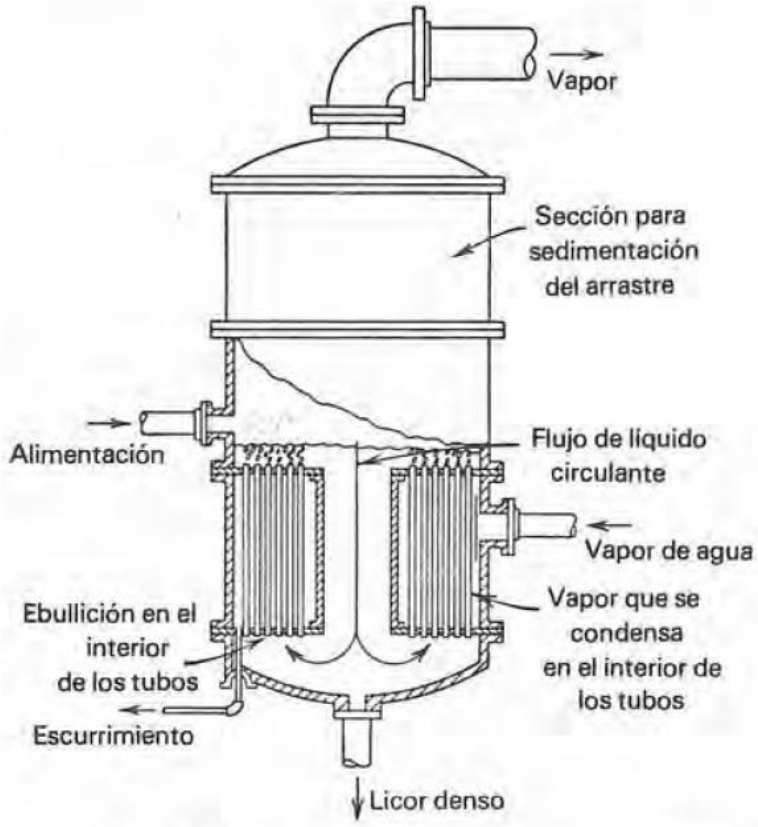
Este tipo de evaporador se utiliza principalmente en instalaciones pequeñas, para líquidos no viscosos en soluciones diluidas y que no generan espuma ni gran cantidad de incrustaciones.

Evaporador de tubos verticales

Los evaporadores de tubos verticales surgieron como una optimización con respecto al evaporador de tubos horizontales. En ellos la solución hierve dentro de los tubos verticales, mientras que en la chaqueta se mantiene el fluido de transferencia de calor, que generalmente es vapor que se condensa durante el proceso.

En el tipo más común, la chaqueta de vapor tiene forma de dona, esto es para que el líquido fluya hacia arriba a través de los tubos y hacia abajo por la abertura central. En las

instalaciones más grandes existen varios conductos para el regreso del líquido en lugar de un canal central.



Sección transversal de un evaporador de tubos verticales. Tomada de Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006.

Estos evaporadores eliminan la mayoría de las desventajas de operación de los evaporadores de tubos horizontales. Existe mayor circulación natural, los coeficientes de transferencia de calor son un poco mayores, alrededor de 1100 a 2800 W/(m^2K); sólo se llegan a formar incrustaciones en el interior de los tubos, por lo cual se pueden eliminar fácilmente de manera mecánica. Sin embargo, también forman espuma, y los líquidos viscosos circulan lentamente y con coeficientes de transferencia de calor bajos (Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006).

Una configuración común para líquidos viscosos o soluciones que no deben hervir en los tubos son los evaporadores de tubos verticales con circulación forzada, donde el líquido que se evapora se bombea a través del intercambiador, y el medio de calentamiento rodea a los tubos por los que circula la solución. Esta configuración permite que la solución hierva en los tubos, de tal manera que el vapor generado se separa instantáneamente a medida que el líquido entra al separador. Debido a la velocidad de la

mezcla, es importante agregar desviadores que fusionan las burbujas para minimizar el arrastre de líquido. Los coeficientes típicos de este tipo de evaporadores van de 2800 a 5700 W/(m^{2}K), lo cual se traduce en una reducción del tamaño del equipo, pero en un costo mayor de operación por la energía de bombeo de la solución (Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006).

Evaporador de película descendente

Si se tiene materiales sensibles al calor, se requiere evaporarlos en un solo paso, por lo cual se usa un evaporador de película descendente. En éste el fluido se alimenta por la parte superior de tubos verticales delgados, de manera que el fluido escurra por las paredes del tubo y forme una película uniforme. Con esto se obtiene una fracción grande de vapor en un periodo corto de tiempo (Geankoplis, 1998).

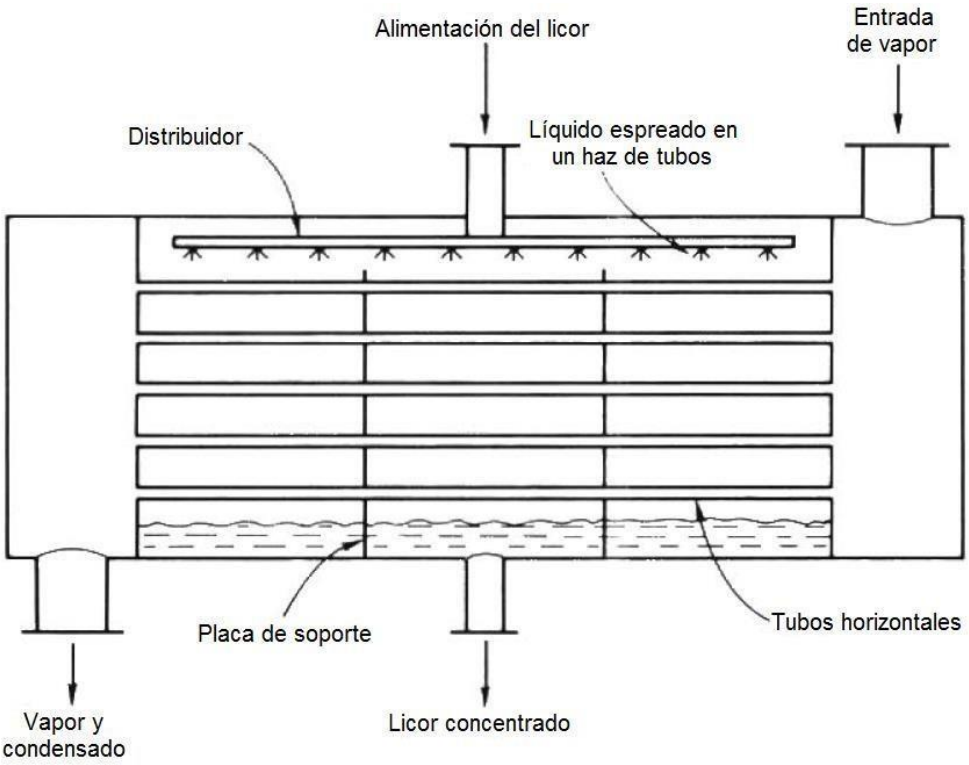


Diagrama de un evaporador horizontal de película descendente. Tomada de Kakaç, 1991.

El principal problema con este tipo de evaporadores es obtener una distribución uniforme del fluido sobre las paredes del tubo. Para lograrlo se utilizan vertederos bien nivelados o con aspersión directa sobre las paredes del tubo. Los coeficientes típicos de transferencia de calor van de 4500 a 8500 W/(m^{2}K) para agua (Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006).

En seguida se explican los dos principales métodos de operación de los evaporadores con suministro de energía con vapor de agua.

3.1.1. Evaporador de simple efecto

Como su nombre lo indica, un evaporador de simple efecto es aquél en el cual se lleva a cabo el proceso de evaporación en una sola etapa; es decir, en un solo equipo.

Los evaporadores de simple efecto generalmente se utilizan cuando la capacidad requerida de operación es relativamente pequeña, o el costo del vapor es bajo con respecto al del evaporador (Geankoplis, 1998).

En la figura se presenta un diagrama de un evaporador de simple efecto. El fluido ingresa a T_F, mientras que en la sección de intercambio de calor ingresa vapor saturado a T_S. Si se considera que la solución del evaporador está perfectamente mezclada, se tiene que el producto concentrado y la solución del evaporador tienen la misma composición y temperatura.

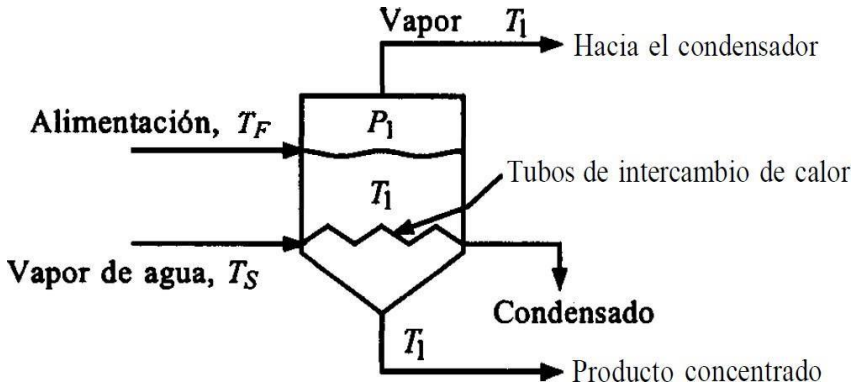


Diagrama de un evaporador de efecto simple. Tomada de Geankoplis, 1998.

Diseño

Para el análisis de la transferencia de calor en un evaporador, se emplea la ecuación básica de diseño de intercambiadores de calor:

$$Q_T = A_T U \Delta T = A_T U (T_S - T_l)$$

Donde A_T es el área exterior requerida de transferencia de calor; Q_T es la carga total de calor especificada; U es el coeficiente total de pérdidas de calor; ΔT es la diferencia de

temperatura entre las dos corrientes involucradas; T_S es la temperatura de vapor que se condensa, y T_l es el punto de ebullición del líquido.

Como ya sabes, el principal objetivo al diseñar un equipo de transferencia de calor es definir el área de transferencia, lo cual puede resolverse de forma muy simple si conoces la carga de alimentación. Sólo requieres solucionar simultáneamente la ecuación básica de diseño de intercambiadores de calor, el balance total de calor en el evaporador y los balances de masa total y de soluto. El coeficiente total de pérdidas de calor habitualmente se encuentra en tablas de libros especializados y ha sido obtenido de experiencias anteriores (Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006).

3.1.2. Evaporador de múltiple efecto

Cuando se requiere la evaporación de grandes cantidades de solvente es recomendable la utilización de evaporadores de múltiple efecto, ya que se reduce de manera significativa el consumo de vapor para el suministro de energía, y este gasto representa el principal costo del proceso.

El principio de operación de un evaporador de múltiple efecto es aprovechar el calor latente del vapor que se extrae de cada etapa, al recuperar una parte de este calor y utilizarlo para calentar la siguiente. Esto repercute en un aumento en la economía de vapor de agua, que se representa como la masa de vapor evaporado por unidad de masa del vapor de agua alimentado. Idealmente, este método podría producir casi n veces la masa de vapor por cada unidad másica de vapor consumido; en tanto que n es el número de etapas o efectos (Geankoplis, 1998). Sin embargo, en realidad la economía es cada vez menor a medida que el número de efectos aumenta, por lo cual rara vez se encuentran equipos con más de seis efectos. Este valor se puede incrementar hasta diez si se utilizan evaporadores de película descendente de múltiples etapas, que permiten una diferencia mínima de temperatura entre los líquidos que se evaporan y condensan. Para algunas aplicaciones este tipo de equipos son mejores porque no existe correlación entre la economía y el número de etapas, que puede ser muy grande (Kakaç, 1991).

Evaporador de múltiple efecto con alimentación hacia adelante

En la operación de alimentación hacia adelante que se muestra en la figura, la alimentación se hace en el primer efecto y fluye hacia el siguiente efecto en el sentido del flujo del vapor. En este modelo las temperaturas de ebullición disminuyen conforme pasan de efecto a efecto, lo cual implica que la presión también disminuye (se usan válvulas de estrangulamiento para este fin), y generalmente el último efecto estará al vacío (Kakaç, 1991).

La ventaja de este régimen de operación es que no necesita bombas para desplazar la solución de un efecto a otro, pero tiene la desventaja de que todo el calentamiento de la alimentación inicial se hace en el primer efecto, lo que resulta en una menor economía (Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006). Es por ello que usualmente se emplea cuando la alimentación está caliente o el producto final se puede dañar a altas temperaturas.

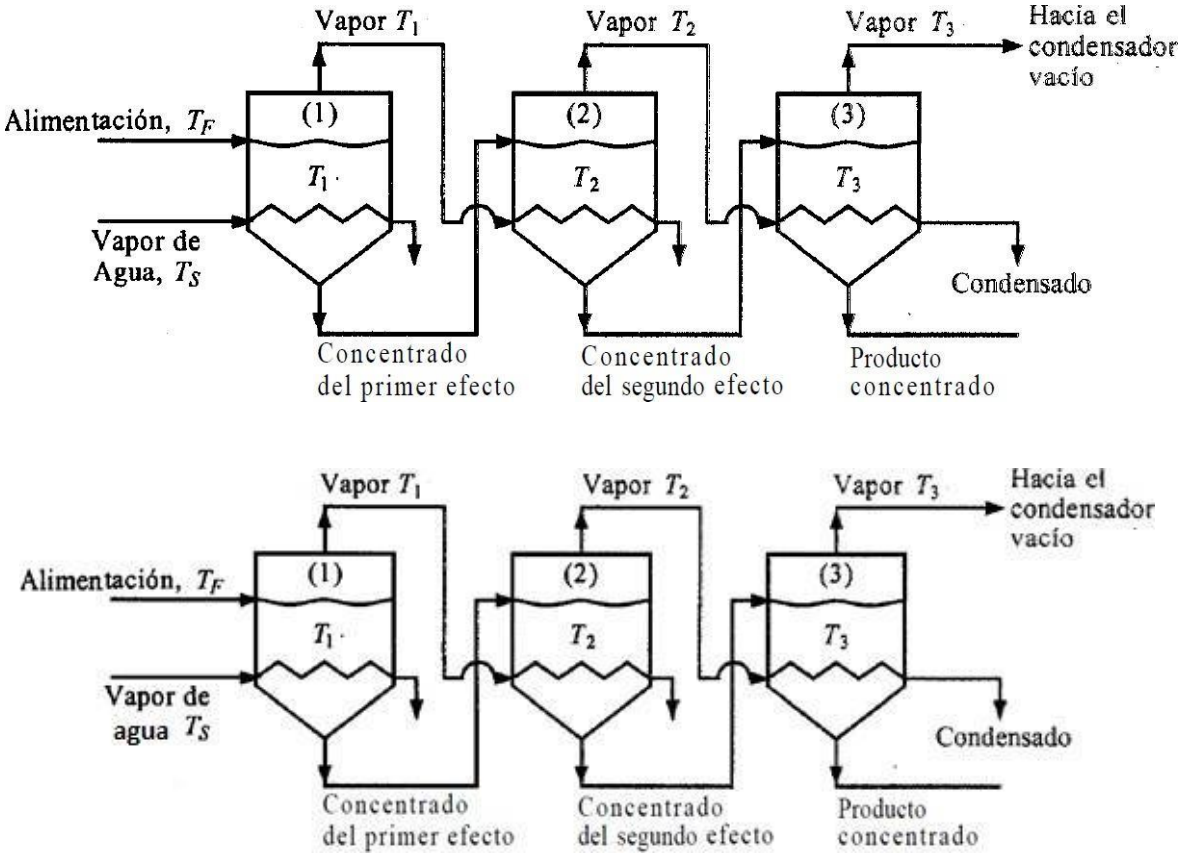


Diagrama de un evaporador de triple efecto con alimentación hacia adelante. Tomada de Geankoplis, 1998.

Evaporador de múltiple efecto con alimentación en retroceso

En el régimen de operación con alimentación en retroceso, la alimentación se hace en el último efecto, el más frío, y se continúa hacia atrás hasta el primer efecto, donde se extrae el producto concentrado. Es decir, la solución de proceso tiene un flujo contrario al del vapor de agua de suministro de energía.

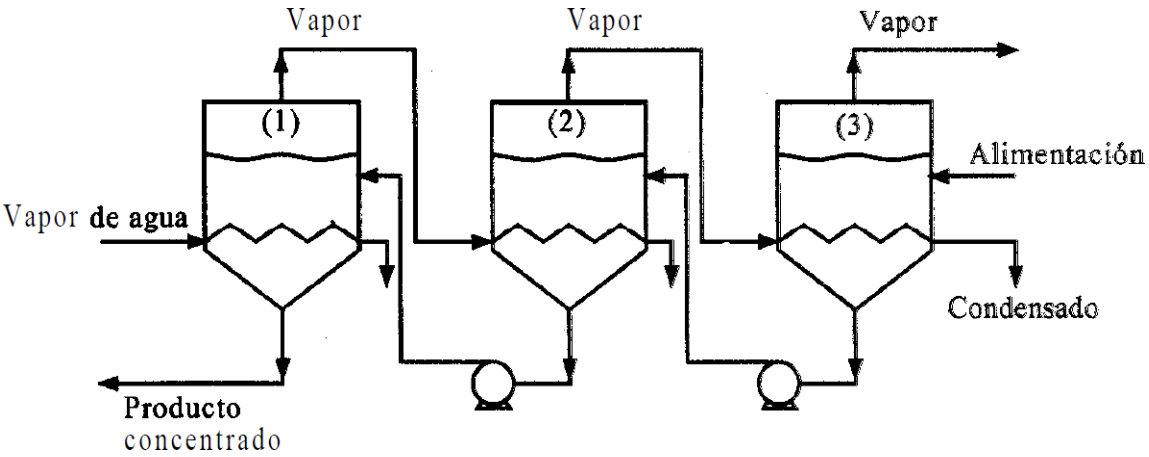


Diagrama de un evaporador de triple efecto con alimentación en retroceso. Tomada de Geankoplis, 1998.

Este método se utiliza cuando la alimentación es fría, con el resultado de una economía mayor que al usar un evaporador de alimentación hacia adelante o cuando hay una elevación significativa del punto de ebullición durante el proceso (Kakaç, 1991). Su principal desventaja es que requiere bombear la solución hacia cada efecto, ya que se va de baja a alta presión; pero es útil cuando el producto concentrado es muy viscoso (Geankoplis, 1998).

Evaporador de múltiple efecto con alimentación en paralelo

En la alimentación en paralelo cada efecto tiene una alimentación nueva o fresca y se extrae el producto concentrado en cada uno, mientras que el vapor de cada efecto se usa para calentar al siguiente. Este método se usa cuando la alimentación está casi saturada y el producto debe cristalizarse; por ejemplo, en salmueras, cuando la concentración en cada efecto debe ser igual, o si se desea concentrar diferentes soluciones en cada efecto (Kakaç, 1991).

Evaporador de múltiple efecto con alimentación mezclada

En este tipo de operación, los evaporadores se utilizan con secuencias de flujo que combinan la alimentación hacia adelante y en retroceso, lo que puede conllevar a que el número de etapas pueda ser diferente para el vapor y el licor. Esto incrementa la economía de la evaporación y varía la capacidad (Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006).

Diseño

Al diseñar se debe hacer un compromiso entre el ahorro en suministro de energía y la mayor inversión en equipo, con el fin de garantizar un ahorro en el proceso.

Éstos son algunos puntos que deben tomarse en cuenta al diseñar los evaporadores de múltiple efecto (Kakaç, 1991):

1. Se pueden presentar gases no-condensables, debido a alguna salida de solución evaporada durante el proceso o a una entrada de aire en los efectos que trabajan a presiones de vacío. La presencia de tal gas significa que no debe esperarse una relación simple entre la presión y la temperatura de saturación del líquido.
2. La temperatura de alimentación debe acercarse a la temperatura de saturación inicial tanto como sea posible. Si esto no se hace, una parte del calentamiento en el sistema de efectos múltiples se usará sólo como calor sensible para llegar a la saturación.
3. Se debe separar el vapor eficientemente del líquido. Si esto no ocurre, se podría presentar arrastre de gotas de líquido con el vapor, lo cual repercutiría en la formación de incrustaciones en la superficie de calentamiento del siguiente efecto.

Al diseñar evaporadores de múltiple efecto el objetivo es aumentar la economía de evaporación, con una variación de la capacidad, en comparación con un evaporador de efecto simple. Sin embargo, la diferencia de temperaturas entre el vapor inicial de entrada hasta el condensado final a la salida del último efecto permanece intacta, independientemente del número de efectos adicionales intermedios.

En el caso más simple de evaporadores de múltiples efectos, todos los efectos tienen áreas y coeficientes de transferencia de calor iguales, y no existen incrementos del punto de ebullición, por lo tanto:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_n$$

En donde Q_T es el calor total transferido en todos los efectos, y Q_1, Q_2, Q_n son los calores transferidos en cada efecto individual, en tanto que n es el número total de efectos.

Entonces, si se aplica la ecuación básica de diseño de intercambiadores de calor en cada efecto:

$$Q_T = A_1U_1\Delta T_1 + A_2U_2\Delta T_2 + \cdots + A_nU_n\Delta T_n$$

Pero como las áreas y los coeficientes de transferencia de calor son iguales:

$$Q_T = A_1U_1(\Delta T_1 + \Delta T_2 + \cdots + \Delta T_n) = A_1U_1\Delta T_T$$

Es decir, se obtiene la misma transferencia de calor que con un solo efecto que opera entre los mismos niveles de temperatura. Esto significa que la evaporación de múltiples efectos aumenta la economía de vapor, pero implica una complejidad adicional del equipo, con mayores pérdidas de calor y reducción de la capacidad.

Entonces, el cálculo del tamaño de los evaporadores de múltiple efecto es básicamente igual al método usado para evaporadores de simple efecto, utilizando los datos entre efecto y efecto. Se escriben los balances de masa y energía y las ecuaciones básicas de diseño de intercambiadores de calor para cada efecto, y se resuelven simultáneamente tomando en cuenta que para un evaporador de n efectos, se tendrán $3n$ ecuaciones independientes. Algunas veces no es posible obtener una solución de manera directa, y es necesario aplicar el método de aproximaciones sucesivas.

3.2. Condensación

La condensación es el proceso que experimenta un fluido cuando cambia de fase de vapor a líquido, y se presenta retirando calor del fluido en un intercambiador de calor. Para las sustancias simples el proceso es a temperatura constante debido a que generalmente se realiza a presión constante. La cantidad de calor por retirar dependerá principalmente de la entalpía de cambio de fase del fluido que ha de condensarse.

La condensación es parte de muchos procesos en la industria, en las plantas de generación eléctrica con turbinas de vapor, el vapor que ha producido trabajo en la turbina es condensado para ser bombeado a la caldera y cerrar el ciclo, reaprovechando el fluido de trabajo; si no se condensara, se tendría que suministrar continuamente una gran cantidad de agua. Otros sistemas que utilizan la condensación dentro de sus procesos son los sistemas de aire acondicionado y refrigeración. Existen sistemas de refrigeración que puede aprovechar la energía térmica para producir frío, por lo cual se puede aplicar la energía solar como fuente de calor.

Clasificación de los condensadores

Como ya se mencionó, un condensador es un intercambiador de calor donde se extrae calor de un fluido para provocar su cambio de fase de vapor a líquido. Los condensadores pueden clasificarse en dos tipos principales: en los que las corrientes de enfriamiento (refrigerante) y de condensado están separadas por una superficie sólida, y en los que el refrigerante y el vapor de condensación se ponen en contacto directo (Kakaç, 1991). Así,

existen dos tipos de condensadores: los de superficie (o contacto indirecto) y los de contacto (o contacto directo) (Shah y Sekulic, 2003).

Los de superficie se clasifican en

1. Tubos y coraza: para la industria de potencia y para la industria de proceso
2. Superficies extendidas
3. Platos (plato y espiral)

Los de contacto se clasifican en

1. Tipo piscina
2. Pulverizado y de bandeja
3. Columna empaquetada

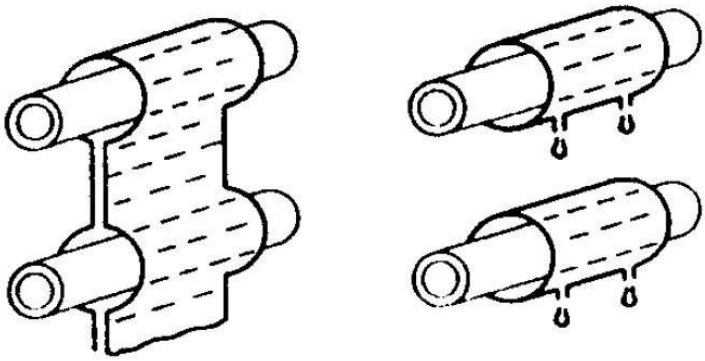
A continuación, se describen los condensadores más utilizados en la industria.

3.2.1. Condensador de superficie

En este tipo de condensadores los fluidos permanecen separados y la transferencia de calor es a través de una pared; por lo tanto, no hay contacto directo entre los fluidos, sino que sólo interactúan de manera térmica. Estos tipos de intercambiadores también son conocidos como de contacto indirecto. En esta clasificación se encuentran los intercambiadores de tubos y coraza, las superficies extendidas y los de platos.

En general, los condensadores de superficie son costosos y necesitan gran cantidad de agua de enfriamiento, así que se usan cuando no se pueden utilizar los condensadores de contacto.

En los condensadores de superficie el vapor se pone en contacto con una pared que se encuentra a una temperatura menor que la de saturación. De este modo el vapor que toca la superficie fría se adhiere y se condensa. El líquido condensado se acumula en dos formas: el líquido moja la superficie fría formando una película continua (a este modo de condensación se le conoce como condensación de película), o bien el líquido no moja la superficie formando numerosas gotas (a este tipo de condensación se le llama condensación por goteo). La condensación por goteo presenta coeficientes de transferencia de calor mucho más grandes que la condensación de película; sin embargo, tiene la desventaja de que es difícil mantener las condiciones de goteo por un tiempo prolongado (Kakaç, 1991). En la siguiente imagen se muestran las dos configuraciones de condensación en los condensadores de superficie.



Configuraciones de condensación en condensadores de superficie. Tomada de Collier y Thome, 1996.

Condensadores de tubos y coraza

La condensación puede darse dentro o fuera de los tubos, en posición horizontal o vertical. Cuando existe la posibilidad de congelamiento, es mejor condensar por el lado de la coraza porque hay menor probabilidad de que se presenten obstrucciones. Cuando se trabaja con mezclas donde los componentes más ligeros son solubles en el condensado, se debe condensar por el lado de la tubería. Las configuraciones más comunes son las siguientes:

- **Condensación dentro de los tubos, vertical con flujo descendente**. Los diámetros de los tubos son de 19 mm, 25 mm y hasta 50 mm para minimizar las caídas de presión. Los tubos permanecen mojados por el condensado, lo cual ayuda a mantener los componentes solubles y livianos del vapor. Los gases no condensables se retiran con ventilación de presión positiva. A bajas presiones de operación se requiere minimizar las caídas de presión, lo cual implica un aumento en la superficie de transferencia de calor. La desventaja con esta configuración es que es más difícil de limpiar la parte de la coraza cuando se provocan incrustaciones por el fluido de enfriamiento.

- **Condensación dentro de los tubos, vertical con flujo ascendente**. Este modo se usa principalmente para propósitos de reflujo, cuando se requiere el regreso de un condensado caliente. Los condensadores de reflujo usualmente no son más largos que 3 m, con tubos de diámetro de 24 mm o más. Una desventaja es la posibilidad de inundación en la parte baja de los tubos.

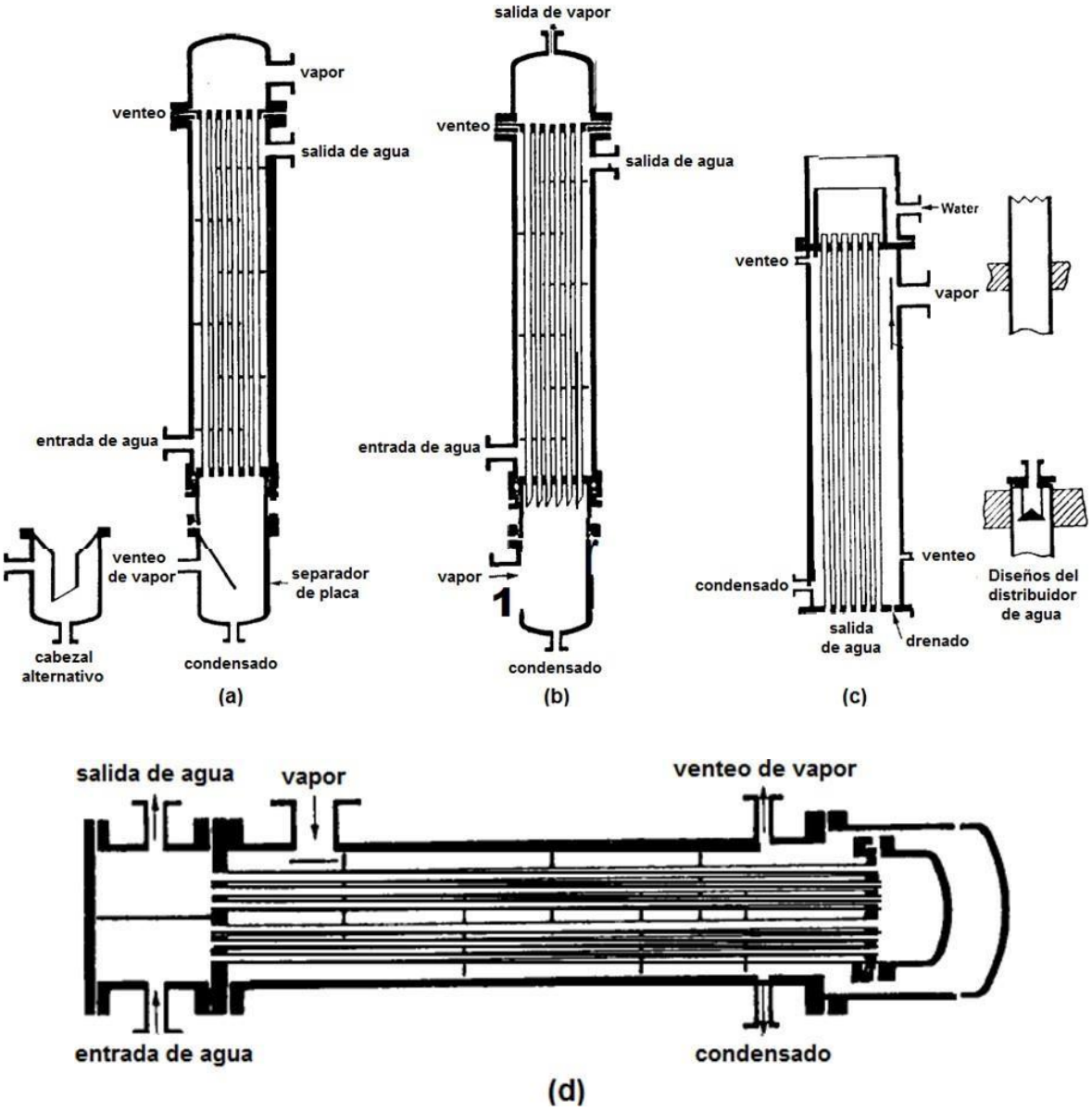
- **Condensación fuera de los tubos, vertical**. Este arreglo requiere una distribución cuidadosa del fluido de enfriamiento en cada tubo, y necesita un

colector y una bomba para llevar al fluido a la torre de enfriamiento o a su fuente. Esta configuración presenta altos coeficientes de calor y su limpieza es sencilla.

- **Condensación dentro de los tubos, horizontal**. Esta configuración es usada principalmente cuando el fluido de enfriamiento es aire. Cuando ocurre la condensación el líquido se acumula en los tubos y esto puede provocar flujo intermitente u oscilante.

- **Condensación fuera de los tubos, horizontal**. Este arreglo se usa cuando es preferible poner el fluido de enfriamiento dentro de los tubos. Sin embargo, se debe controlar que los tubos se encuentren parcialmente inundados para asegurar el subenfriamiento del condensado o para controlar la presión; esto se logra regulando la razón de condensación; es decir, la cantidad de vapor que se condensa con respecto a la que se alimenta. Generalmente, se utilizan tubos aletados, excepto cuando la tensión superficial es alta. Las desventajas son las típicas asociadas a los fluidos que pasan por la coraza, como altas presiones, altas temperaturas o problemas de corrosión. Sin embargo, es fácil limpiar la coraza si el fluido de enfriamiento es corrosivo o presenta incrustaciones. Las ventajas superan a las desventajas, y este tipo de condensador es ampliamente usado.

En la imagen de abajo se presentan estas configuraciones. Generalmente se utiliza agua como fluido de enfriamiento, así que se muestra la entrada y la salida de agua. Se puede apreciar la entrada del vapor, la salida del condensado y la salida de gases no condensables, así como un diseño de un cabezal y un distribuidor de agua a detalle.



Arreglos de condensadores de tubos y coraza: (a) condensado dentro de los tubos, vertical con flujo ascendente; (b) dentro de los tubos, vertical con flujo descendente; (c) por fuera de los tubos, vertical con flujo descendente; (d) condensado por fuera de los tubos horizontales. Tomada de Couper, Penney, Fair y Walas, 2012.

Condensadores de superficies extendidas

Como se mencionó en la unidad 2, los intercambiadores de calor de superficies extendidas son dispositivos con aletas o con extensiones de la superficie de transferencia de calor, ya sea una placa o un tubo; esto es con el objeto de mejorar la transferencia de

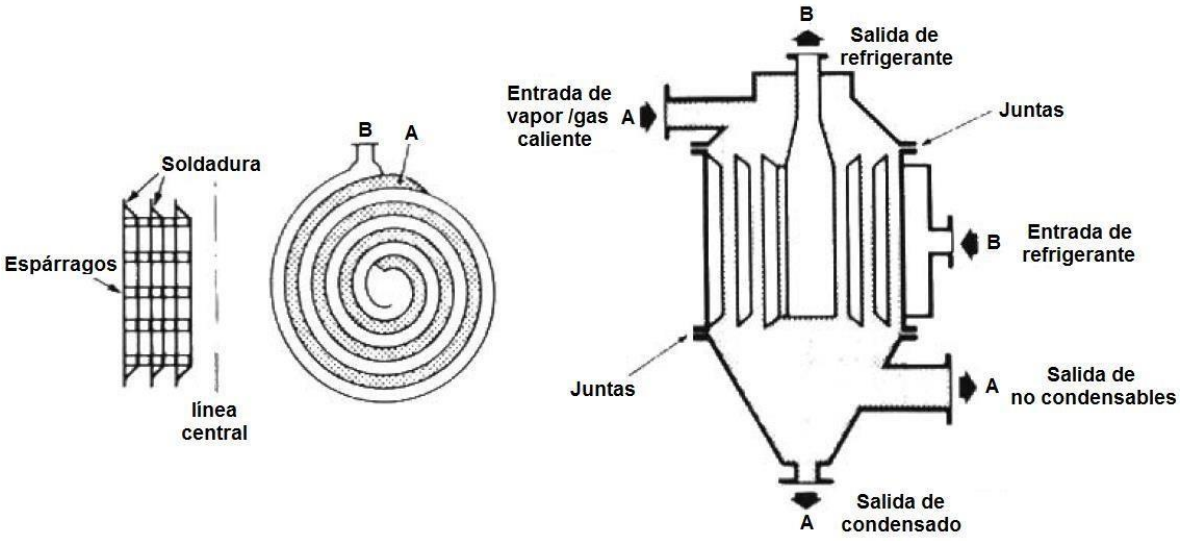
calor por el incremento del área. Los intercambiadores con superficies extendidas más comunes son los de platos aletados y tubos aletados.

Condensadores de platos

Hay tres tipos principales de intercambiadores de placa, los de placa y marco, los de plato en espiral y los de placas aletadas.

El uso de los intercambiadores de plato y marco o empaquetados se limita a flujos a presiones por debajo de 25 bares y temperaturas debajo de los 250 °C. Estos intercambiadores originalmente fueron desarrollados para flujos de una sola fase y no son muy apropiados para condensadores, debido a que el espacio entre los platos es pequeño y no se puede manejar grandes volúmenes de vapor. Sin embargo, se utilizan con vapor de un lado para calentar corrientes para procesos.

En la siguiente imagen se muestra un intercambiador en espiral como condensador. Éste puede operar a presiones de hasta 20 bar y a temperaturas de hasta 400 °C. En la vista superior se puede ver que entra en contacto el condensado y el refrigerante. La entrada del fluido de enfriamiento es por el costado y sale por la parte central superior del espiral; el vapor a condensar entra por un costado de la parte superior y sale por la inferior; la derivación que se observa es la salida de gases no condensables.



Intercambiador de espiral para aplicaciones de condensación. Tomada de Kakaç, 1991.

Los condensadores de placas aletadas son unidades muy compactas con superficies de transferencia de calor muy grandes. Se usan comúnmente en plantas de baja temperatura para criogenia. Los canales de flujo son pequeños y suelen tener irregularidades, por esto

la caída de presión es alta con velocidades de flujo alto. No pueden limpiarse mecánicamente, sino sólo con fluidos de limpieza.

Estos intercambiadores pueden tener arreglos en flujo paralelo o a contraflujo en flujo cruzado. En la unidad 2 se mostraron algunas imágenes con los arreglos y los tipos de placas utilizados.

3.2.2. Condensador de contacto

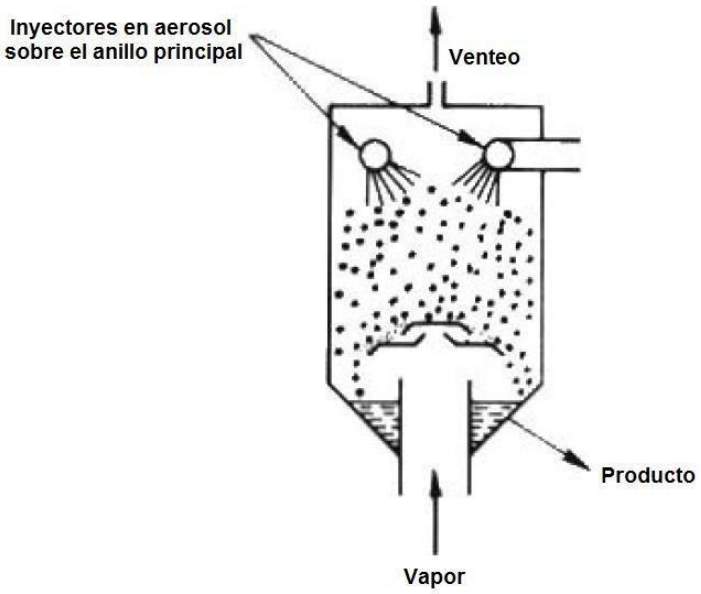
En los condensadores de contacto los dos fluidos –el de enfriamiento y el de proceso– entran en contacto directo, se transfiere calor y después se separan. Al estar en contacto directo se presentan procesos de transferencia de calor y de masa, y la máxima cantidad de condensado que se puede obtener está limitada por la capacidad calorífica del líquido a menor temperatura (Kandlikar, Shoji y Dhir, 1999).

Comparado con los condensadores de superficie, estos condensadores tienen altos coeficientes de transferencia, son menos costosos y no presentan problemas de incrustaciones ni de ensuciamiento al no existir una superficie entre los dos fluidos (Shah y Sekulic, 2003).

Estos condensadores pueden ser utilizados cuando el contacto entre los fluidos es permitido. Se debe considerar la solubilidad del fluido de enfriamiento y del fluido de proceso para evitar contaminación del producto; también se debe evaluar la pérdida del producto en el medio refrigerante.

La condensación de contacto se clasifica en dos tipos. El primero es cuando un líquido a baja temperatura es dispersado en la fase vapor; por ejemplo, cuando se dejan caer gotas de líquido a baja temperatura o un chorro de líquido a través de un espacio lleno de vapor. El otro caso es cuando el vapor a condensar forma una fase dispersa, como cuando se introducen burbujas en agua subenfriada; este efecto produce un ruido parecido al agua hirviendo. En los dos casos, los fluidos, tanto el vapor como el líquido, pueden ser la misma o diferentes sustancias; cuando se trata de dos sustancias éstas pueden ser miscibles o inmiscibles (Kandlikar, Shoji y Dhir, 1999).

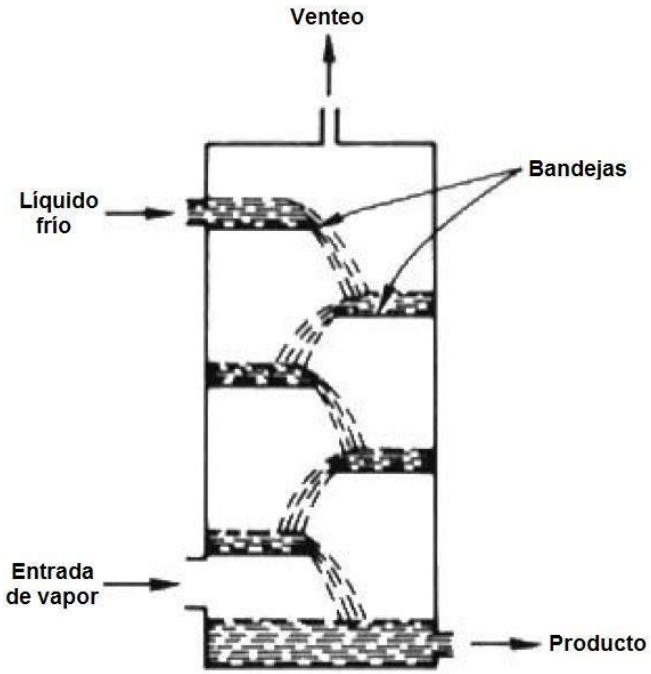
En la siguiente imagen se muestra un condensador por pulverización, donde un líquido subenfriado es atomizado sobre el vapor por la parte superior; en este caso no deben utilizarse sustancias con partículas que puedan tapar los inyectores. El equipo presenta una salida para los gases no condensables.



Condensador por pulverización. Tomada de Kakaç, 2002.

En este tipo de condensadores de contacto, se pulveriza un líquido subenfriado en un espacio con vapor. Durante este proceso de pulverización se crean gotas casi esféricas muy pequeñas, con radios entre 50 y 250 μm. A medida que estas gotas se mueven a través del condensador, crecen y se calientan debido a la condensación en su superficie. Así, el proceso de condensación está dominado por la conducción en estado transitorio sobre su superficie (Rohsenow, Hartnett y Cho, 1998).

Cuando no se pueda controlar la limpieza de las sustancias, se pueden usar condensadores tipo bandeja, como el de la imagen de abajo; allí se observa que se introduce el líquido frío que va cayendo sobre unas bandejas, y el vapor entra por la parte inferior y se pone en contacto con la cascada provocada. Las bandejas pueden inclinarse ligeramente para evitar la acumulación de partículas (Kakaç, 2002).



Condensador de bandeja. Tomada de Kakaç, 2002.

En el caso de la condensación por contacto cuando un vapor forma una fase dispersa, es decir, cuando se inyecta el vapor como pequeñas burbujas en un recipiente con líquido subenfriado, la condensación de contacto directo ocurre mientras las burbujas se elevan a través de la superficie libre. Este tipo de condensación directa puede clasificarse en tres casos, dependiendo de la combinación de líquido y vapor y su miscibilidad (Rohsenow, Hartnett y Cho, 1998):

Caso 1: el vapor y el líquido a baja temperatura son de la misma sustancia.

Caso 2: el vapor y el líquido a baja temperatura son de diferentes sustancias y son miscibles cuando el vapor se condensa.

Caso 3: el vapor y el líquido a baja temperatura son de diferentes sustancias y son inmiscibles cuando el vapor se condensa. Este caso se puede subdividir en otros dos:

Caso 3a: el líquido a baja temperatura está bien húmedo con el condensado, y el condensado envuelve por completo a las burbujas de vapor, con lo cual se forma una burbuja en dos fases líquido-vapor.

Caso 3b: el condensado no moja el líquido a baja temperatura, y una gota (o gotas) de condensado se separa de la burbuja de vapor.

Consideraciones de operación y de diseño de condensadores

Existe un número de requerimientos que se deben considerar durante la selección y el diseño de condensadores; tales son el modo de condensación, los regímenes de condensación y el estado de la corriente de entrada y de la salida (Kakaç, 2002). A continuación, se describen brevemente cada uno de ellos.

Modos de condensación. Como se mencionó anteriormente, en los condensadores de superficie existen dos configuraciones o modos de condensación: de película o por goteo. En general, los condensadores son diseñados con condiciones de película descendente, pues, aunque el goteo presenta altos coeficientes, no es posible sostener este modo de condensación por mucho tiempo en condensadores individuales.

Regímenes de condensación. Dependiendo de las características de flujo del vapor y de condensado, los diseños deben determinar el régimen de flujo aplicable a lo largo de la trayectoria del flujo de vapor. A velocidades bajas de vapor existe la llamada “gravedad controlada” o régimen de flujo Nusselt. A velocidades altas de vapor, predominará el régimen de “cortante vapor controlado”.

Recalentamiento. En ocasiones la corriente de vapor entra recalentada al condensador; si la temperatura de la pared está debajo del punto de rocío, tendrá lugar la condensación y se debe calcular el recalentamiento como un proceso de una sola fase.

Subenfriamiento. A veces es deseable subenfriar ligeramente el líquido a la salida. Esto se pude realizar aumentando el nivel del condensado de manera que éste pueda estar en contacto con los tubos fríos. Pero si se requiere mayor subenfriamiento, es recomendable colocar una unidad separada para obtener mejores eficiencias.

Consideraciones para la construcción

La condensación en el interior de tubos verticales es muy efectiva, pero está limitada por la longitud para garantizar que el condensador pueda llenarse de condensado. Así, el tamaño de los condensadores es restringido, y se necesitan diámetros grandes en la parte de la coraza (Kakaç, 2002).

Los condensadores horizontales con el condensado del lado de los tubos son menos efectivos y más difíciles de calcular debido a la estratificación del condensado. Se debe utilizar una inclinación positiva.

La condensación horizontal por la parte de la coraza es muy común porque se puede simular, permite el uso de grandes superficies y se puede obtener una caída de presión muy pequeña para su operación por debajo de la presión atmosférica, con la selección del equipo adecuado.

Si el vapor está acompañado de gases no condensables, el cálculo del coeficiente de condensación se debe realizar paso a paso. Además, la construcción del equipo debe incluir un sistema para remover estos gases.

Algunas de las posibles razones de la falla de los condensadores son las siguientes, y deben tomarse en cuenta en el proceso de diseño (Kakaç, 2002):

- Los tubos pueden presentar más incrustaciones de las esperadas.
- El condensado puede no ser drenado adecuadamente causando problemas de inundación. Esto sucede si la salida es demasiado grande o pequeña.
- La salida de los gases no condensables es inadecuada.

Diseño

Al igual que en los evaporadores, para el análisis de la transferencia de calor en un condensador se usa la ecuación básica de diseño de intercambiadores de calor, descrita anteriormente. Ya que el objetivo igualmente es definir el área de transferencia, el método de solución es el mismo, sólo que aquí el objetivo es inverso: condensar el fluido. Por lo tanto, si conoces la carga de alimentación, debes solucionar simultáneamente la ecuación de diseño de intercambiadores y los balances de masa y energía.

3.3. Secado

Antes de comenzar este subtema, se presentará un repaso sobre los conceptos que se deben conocer para entender los procesos de secado:

- *Presión de vapor de agua*. Es la presión donde coexiste en equilibrio entre la fase líquida y la fase vapor del agua.
- *Humedad*. La humedad de una mezcla de aire y vapor de agua es la masa de vapor de agua entre la masa de aire seco. La humedad depende de la presión parcial del vapor de agua en el aire y de la presión total.
- *Humedad relativa*. La proporción de saturación de una mezcla de aire y vapor de agua.
- *Aire saturado*. Es el aire en donde el vapor de agua está en equilibrio con el agua líquida en las condiciones dadas de presión y temperatura.
- *Temperatura de rocío*. Temperatura a la cual el vapor comienza a condensarse cuando se enfría la fase gaseosa a presión constante. La temperatura en que la mezcla de agua y vapor de agua está saturada.
- *Temperatura de saturación adiabática*. Es aquélla que se logra en estado estacionario cuando se pone en contacto una gran cantidad de agua con el gas de entrada.
- *Temperatura de bulbo húmedo*. Es la temperatura en estado estacionario y no de equilibrio que se alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de agua con una corriente continua de gas en condiciones adiabáticas.

Con estos conceptos podrás entender claramente la operación unitaria de secado. Ahora bien, el secado es el proceso mediante el cual se elimina un líquido de un material de proceso; este líquido generalmente es agua y en ciertos procesos puede ser otro líquido, como benceno o un disolvente orgánico.

Generalmente, la remoción de agua de los sólidos se realiza poniéndolos en contacto con aire de baja humedad y alta temperatura. En otros casos se utiliza calor radiativo o secado por congelamiento; si interviene algún gas es sólo como agente de arrastre de la humedad (Geankoplis, 1998). Así, la operación de secado es de transferencia de calor y masa por contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa.

El principio de operación del secado es el siguiente: el aire contiene vapor de agua con una presión de vapor menor a la presión atmosférica (Ley de Raoult); por lo tanto, una temperatura menor de evaporación, la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial del aire al hacerlo pasar sobre éste, ocasiona la

transferencia de humedad del sólido al aire hasta que sus presiones se igualan, lo que produce la extracción del contenido de agua. Debes tener presente que el aire tiene un límite de capacidad de contener agua y depende de la presión de vapor; por lo cual para procesos de secado se debe introducir el aire lo más seco posible, así tendrá mayor capacidad de secado.

La principal diferencia entre el secado y la evaporación es el objetivo del proceso y la cantidad de líquido removido. En el secado se eliminan pequeñas cantidades de líquido en forma de vapor en el aire con la finalidad de reducir la proporción de humedad contenida en el sólido hasta un valor deseado; en la evaporación el propósito es eliminar, en forma de vapor, grandes cantidades de un líquido contenido en una solución para aumentar su concentración (Geankoplis, 1998).

Las aplicaciones del secado son diversas: se utiliza dentro de las etapas finales de los procesos para acondicionar los productos para su empaque y como técnica de preservación de alimentos. Para la conservación de alimentos es necesario reducir la humedad a menos de 5% para preservar su sabor y valor nutritivo. El contenido de humedad inicial y final dependerá del producto: la sal seca contiene 0.5% de agua; el carbón, 4%, y algunos productos alimenticios, 5% (Geankoplis, 1998).

Existe una gran variedad de secadores, debido a que se trabaja con muchos factores, como la naturaleza, tamaño y forma de los sólidos, la escala de operación, el método de transporte del producto, el tipo de contacto con el gas y el medio de calentamiento. Es por esto que hay muchas clasificaciones de secadores basadas en los diversos factores.

Desde el punto de vista del método de operación, los secadores se pueden clasificar en trabajo por lotes o continuos; también se pueden catalogar por el método de transferencia de calor predominante: como conductivos o convectivos; dependiendo de la presión de operación pueden dividirse en atmosféricos o vacuométricos; finalmente, por la forma en que se encuentran dentro del secador: como de bandeja, agitados, con circulación, lecho fluidizado, banda, tambor y atomizado (Couper, Penney, Fair y Walas, 2012).

Otra clasificación divide a los secadores según la forma física del producto a secar (Couper, Penney, Fair y Walas, 2012); es decir, secadores que se alimentan con

- Líquido
- Suspensión
- Pasta (suave, preformada y dura)
- Gránulos o sólidos cristalinos
- Fibras sólidas
- Hojas

Si se toma en cuenta la escala de producción, los secadores pueden dividirse en tres clasificaciones (Couper, Penney, Fair y Walas, 2012):

- Pequeña escala, con producciones de 20 a 50 kg/h
- Mediana escala, con producciones de 50 a 100 kg/h
- Gran escala, con producciones de ton/h

A continuación, se explican brevemente los principales tipos de secadores clasificados por la forma en que se encuentra el producto dentro del secador. Debes tener en cuenta que dentro de estos tipos pueden utilizarse las otras clasificaciones antes mencionadas.

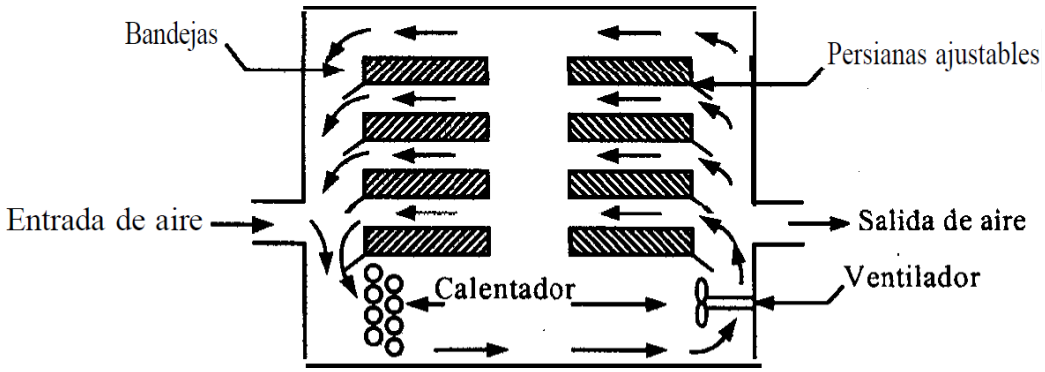
3.3.1. Tipos de secadores

Como se vio arriba, existe una gran cantidad de secadores; en este subtema se describirán los más importantes.

Secador de bandeja

En el secador de bandeja –también conocido como secador de anaqueles o de compartimentos– el material se coloca sobre bandejas de metal de 2.5 a 5 cm de profundidad. Las bandejas son posicionadas dentro de un gabinete con separaciones verticales de 7 cm entre cada bandeja.

Un ventilador recircula aire, calentado con vapor o con una resistencia, sobre la superficie de las bandejas a una velocidad de 5 m/s, y para mantener la humedad se inyecta de 5 a 50% de aire nuevo. Cuando el material es granular (como arroz), el fondo de la bandeja puede estar perforado y puede circular aire a través de las bandejas, con lo que se obtienen tiempos de secado más cortos porque aumenta el área superficial de transferencia. Este tipo de secador es para bajas capacidades y es intermitente (Couper, Penney, Fair y Walas, 2012). En la siguiente imagen se muestra un secador de bandeja.

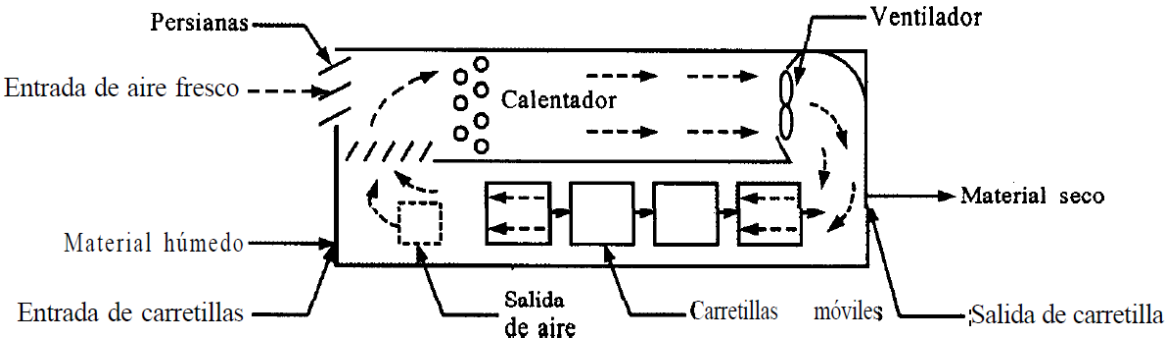


Secador de bandejas. Tomada de Geankoplis, 1998.

El secador indirecto al vacío es similar al de bandeja, pero se calienta indirectamente y es operado a presión de vacío, como su nombre lo indica. Este tipo de secador es usado para secar materiales que son sensibles a la temperatura o que se oxidan fácilmente. El gabinete está elaborado de hierro colado o de acero, para que el calor se conduzca a través de las paredes metálicas. Las bandejas se calientan por la radiación proveniente del gabinete.

Secador continuo de bandeja y de banda transportadora

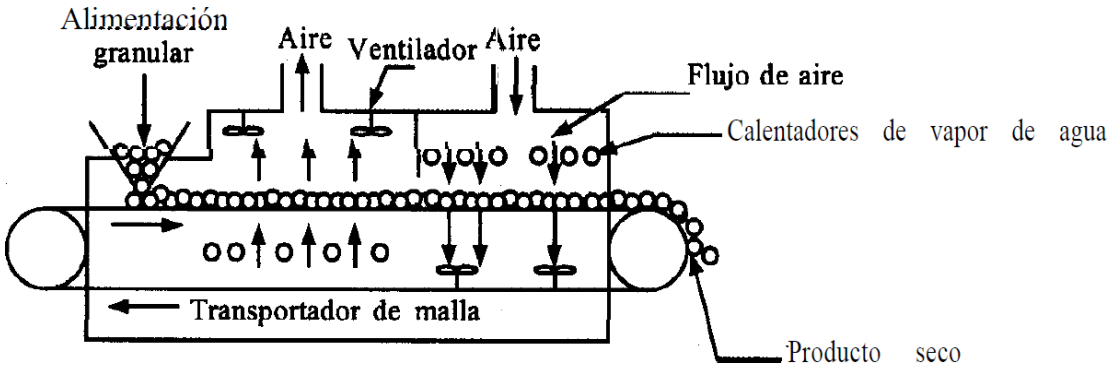
En los secadores continuos las bandejas con carga de material húmedo se ponen en carretillas que van moviéndose lentamente a través de un túnel. Cuando el material está seco la carretilla se saca al final del túnel y se introduce otra carretilla por la entrada, como se observa en la imagen de abajo. Hay entradas de aire fresco y salidas de aire húmedo a lo largo del túnel para mantener la evaporación sobre la curva de secado. La dirección del flujo de aire puede ser en paralelo, a contracorriente o cruzado. Este método de secado trabaja en periodos de 20 a 96 horas, y es utilizado para secar colorantes.



Secador de bandeja continuo. Tomada de Geankoplis, 1998.

Hay dos tipos de secadores de banda transportadora: los de banda sólida con flujos de aire a través de la superficie de la cama y los de banda perforada con flujos de aire a

través de la banda. Las bandas sólidas son usadas para secar pastas y polvos finos; las bandas perforadas son usadas para materiales granulares de más de 3 mm de ancho. El agente secante por lo general es aire calentado por vapor, aunque también se pueden usar gases de combustión. La temperatura no debe sobrepasar 320 °C para no tener problemas de lubricación en el sistema de transporte. En la imagen siguiente se presenta un secador de banda transportadora perforada.

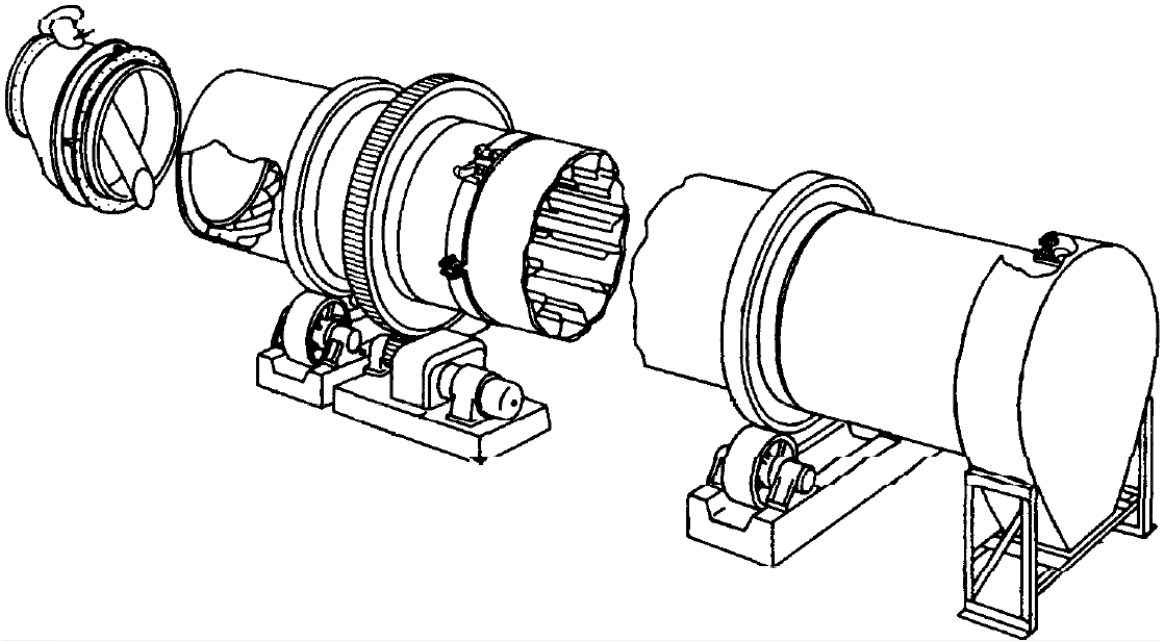


Secador de banda transportadora. Tomada de Geankoplis, 1998.

Se puede observar en el secador de banda transportadora perforada que el flujo es ascendente en la zona húmeda y descendente en las zonas frías para evitar levantamiento de polvo. La profundidad de la cama de material es de 2.5 cm a 20 cm, con velocidades de aire de 1.5 m/s.

Secador de cilíndrico rotatorio

Un secador rotatorio es un cilindro hueco que gira sobre su eje; por un extremo del cilindro entra el material a secar y por el otro extremo es la salida; tiene una ligera inclinación para facilitar la salida del producto. El secado se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes; las configuraciones de flujo pueden ser en paralelo o a contraflujo. En ciertos casos es por contacto indirecto, a través del calor transferido desde tubos o una doble coraza.

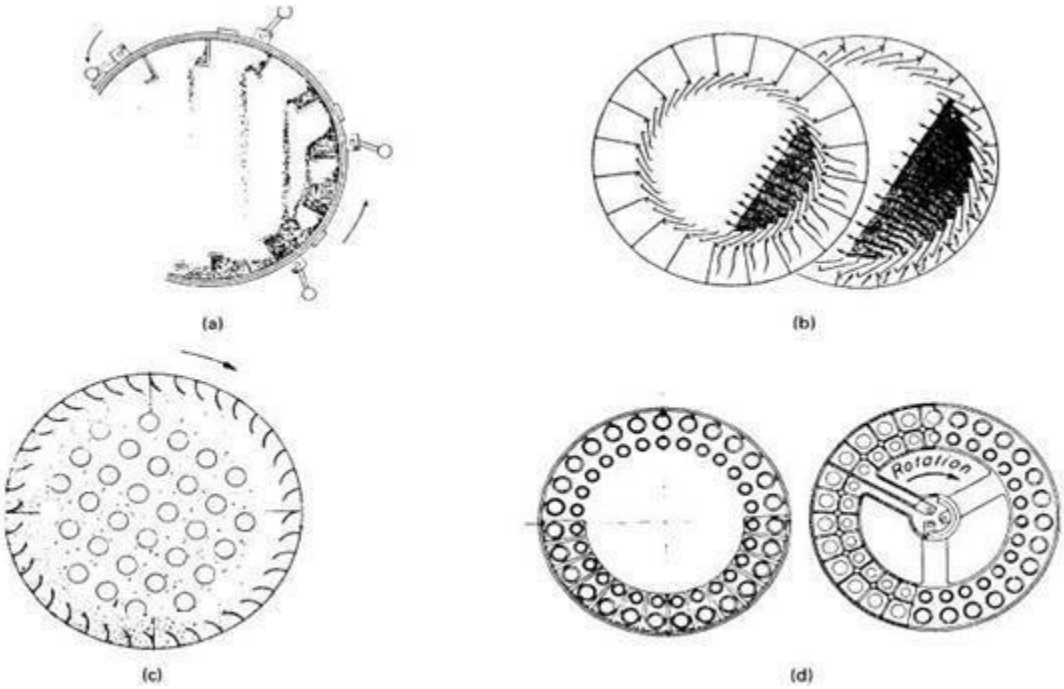


Secador de cilindro rotatorio. Tomada de Couper, Penney, Fair y Walas, 2012.

Este tipo de secador se usa para materiales granulares que se aglomeran debido a la humedad; así, con la rotación se va mezclando el producto seco con el húmedo. Los tiempos de secado en este sistema son de una hora o menos.

La velocidad de flujo para productos finos es menor o igual que 1.5 m/s, y 10.5 m/s para materiales gruesos. El diámetro puede ser de 1.2 m a 3 m con largos de 3 m a 4.5 m. En la parte interna de la coraza se ponen paletas para levantar el material; cuando éste caiga ha de formar una cortina por la cual atraviesa el flujo de gas. La forma de las paletas debe ser tal que incremente la efectividad, pero que no comprometa la facilidad de limpieza del secador. Los tiempos de residencia dependerán de la naturaleza del material y de las características del secador.

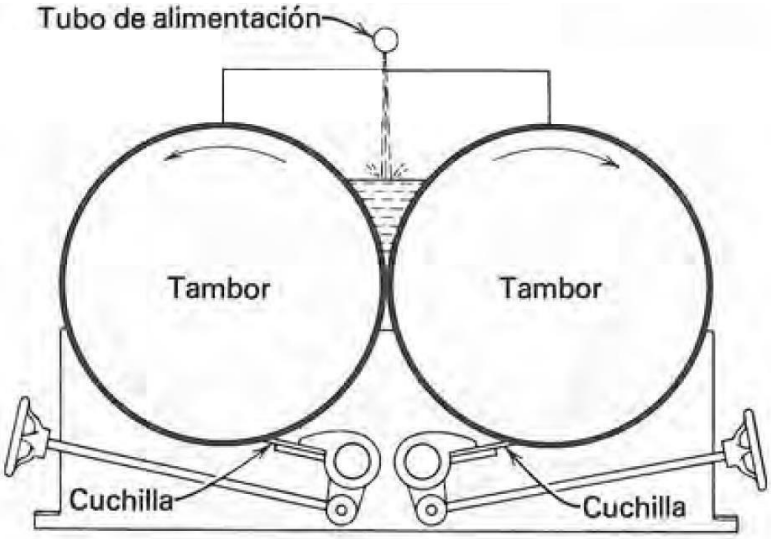
En la siguiente imagen se muestran cortes transversales de secadores rotativos. Se puede observar en la figura (a) la ubicación de las placas y su efecto en la caída del producto. En la figura (b) se observa una configuración para evitar que el material trepe la pared del secador. La figura (c) muestra un secador de contacto indirecto, donde los tubos que llevan el vapor son fijos y la coraza es rota. Por último, en la figura (d) se muestra la sección transversal y el cabezal de un secador con tubos que rotan junto con la carcasa.



Sección transversal de secadores cilíndricos rotativos. Tomada de Couper, Penney, Fair y Walas, 2012.

Secador de tambor

Cuando se requiere secar pastas, suspensiones y soluciones, se utiliza un secador de tambor. El secador consiste en un cilindro horizontal hueco, que es calentado con vapor que se pasa por el interior, mientras el cilindro gira continuamente. Sobre la superficie se alimenta el material, que va perdiendo humedad y, por ello, va dejando una capa delgada de producto seco sobre el tambor, que finalmente es removido con unas cuchillas. El producto sale en forma de escamas.



Secador de tambores gemelos con alimentación superior. Tomada de Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006.

La temperatura de la superficie del tambor, el espesor de la capa y la velocidad se ajustan de forma que el material al recorrer tres cuartas partes de una rotación tenga la humedad final deseada.

Hay varios tipos de secadores. Los de doble tambor son dos cilindros alimentados por la parte superior con un distribuidor axial; también se puede alimentar salpicando sobre el tambor la suspensión cuando se presenta ebullición. El espesor de la película dependerá de la suspensión, la superficie del tambor y la distancia de separación entre los tambores. Los secadores de tambores gemelos son parecidos a los dobles, pero en éstos los tambores giran en direcciones contrarias alejándose por la parte superior, pero si existe riesgos de bultos giran en la misma dirección para proteger al tambor.

Los diámetros de los tambores son menores a 1.5 m y de largo hasta 3.6 m por razones mecánicas. La velocidad de rotación es de 1 a 24 rpm. Los tiempos de secado son de 3 a 12 segundos. Su escala de producción es bajo o moderado.

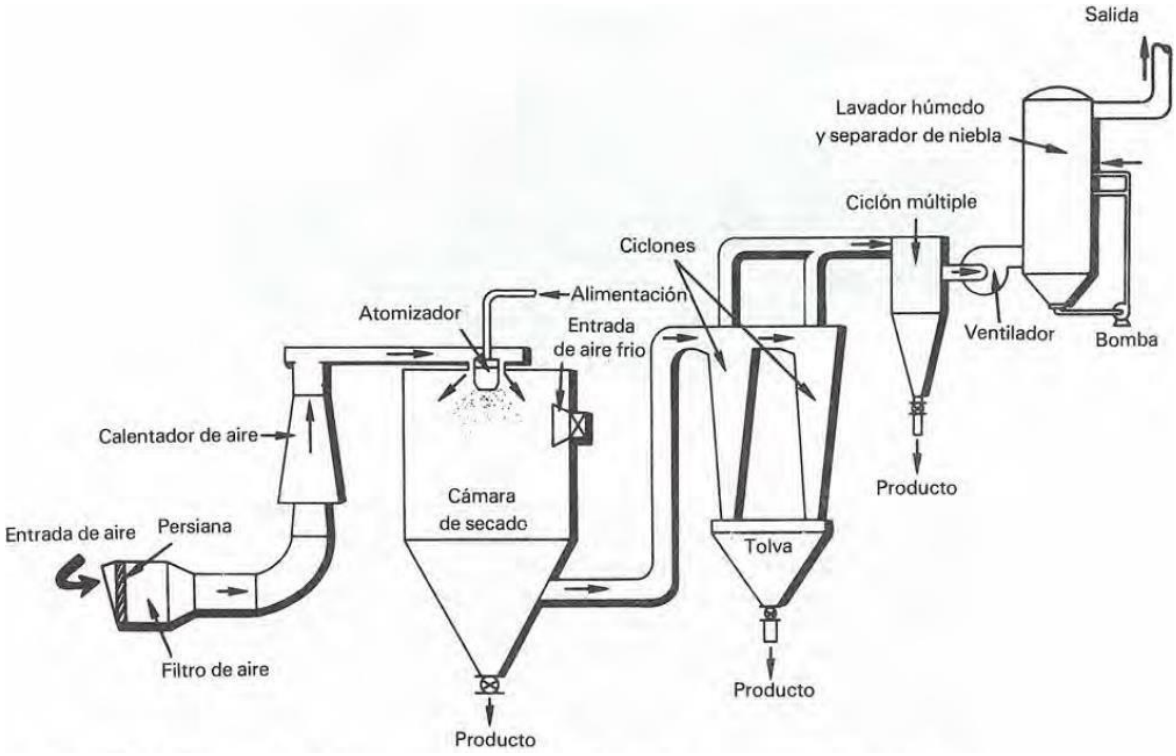
Secador por aspersión

En un secador por aspersión un líquido o suspensión se atomiza en una corriente de gas caliente y forma gotas; el agua de las gotas se evapora y se obtienen partículas secas que son separadas de la corriente de gas. El flujo de gas caliente puede ser en paralelo, contracorriente o una combinación de ambos.

El material es atomizado en una boquilla o en una rueda o disco atomizador. El atomizador de disco arroja las gotas hacia el costado, por esto se usan recipientes de grandes diámetros, cuando se usan las boquillas los contendedores son altos y delgados, porque la dirección del flujo es hacia abajo.

El tiempo de proceso en estos secadores es pequeño. El producto se entrega en partículas pequeñas y porosas, cualidades que se requieren cuando el material posteriormente será disuelto, como la leche en polvo y los detergentes; o dispersado, como las tintas y los pigmentos.

Los secadores por aspersión son unidades grandes y consumen grandes cantidades de energía, pueden ser de capacidades de hasta 25 ton/h.



Secador de por aspersión. Tomada de Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006.

En la imagen anterior se muestra la instalación de un secador por aspersión típico. El aire recorre un calentador y un filtro, entra por la parte superior fluyendo en paralelo con respecto a la dirección de las gotas. Las gotas son atomizadas en la parte superior; a medida que éstas caen, se va evaporando la humedad en el aire caliente y deja partículas de diferentes tamaños. Las partículas grandes caen al fondo, las pequeñas son arrastradas por el gas hacia los separadores de ciclón. Las partículas más pequeñas son

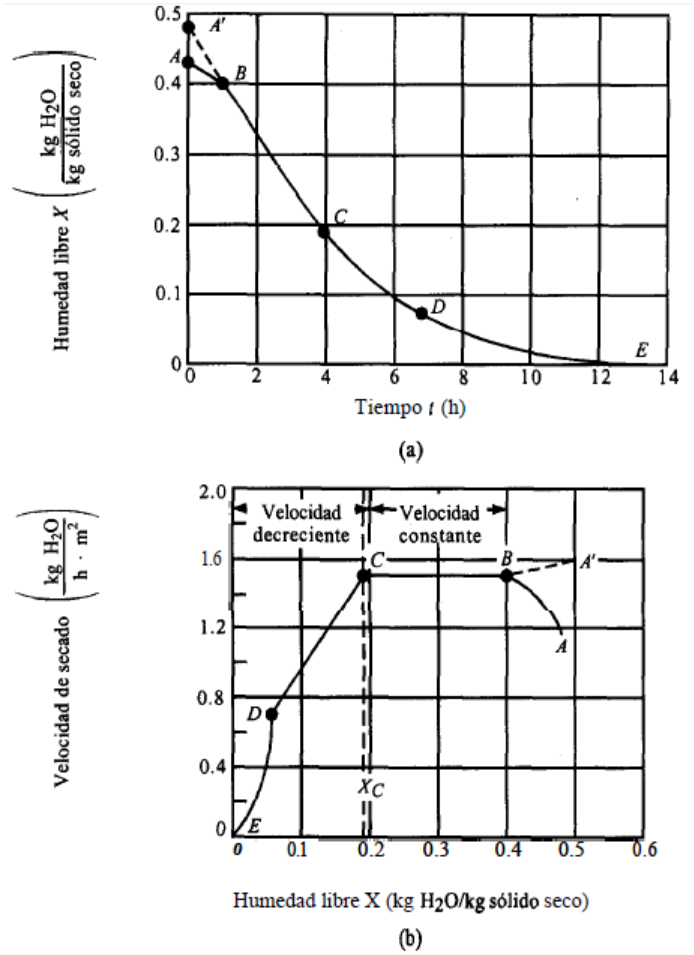
dirigidas hacia un lavador húmedo para formar una suspensión que podrían ser realimentada.

Hasta ahora se han descrito los principales tipos de secadores existentes en los procesos industriales. A continuación, se explica conceptualmente el proceso de secado, el tiempo de secado y sus implicaciones en el diseño de los secadores.

3.3.2. Tiempo de secado

Para secar exitosamente los diversos materiales de proceso, es importante estimar el tamaño del secador, las diferentes condiciones de humedad y temperatura del aire empleado, así como el tiempo requerido en el proceso. En ocasiones es difícil conocer el contenido de humedad de los materiales, así que se determina de manera experimental, y lo mismo sucede con las velocidades de secado. Para obtener las curvas de secado, es necesario reproducir el procedimiento de secado para una muestra tomando en cuenta todas las variables, como el tamaño de la muestra, la velocidad del aire, la temperatura, etcétera.

Al secar un sólido húmedo con un gas a una temperatura y humedad fijas, se tiene un patrón de comportamiento. Cuando se pone en contacto la muestra y el medio secante, la temperatura del sólido se ajusta para alcanzar un estado estable. Las variables que se ajustan son la temperatura del sólido y la velocidad de secado, éstas pueden aumentar o disminuir. Cuando se llega al estado estable, la temperatura de la superficie sólida húmeda es igual a la temperatura de bulbo húmedo del medio de secado. Toda la masa del sólido tiende a llegar a la temperatura de bulbo húmedo; cuando esto ocurre la temperatura se mantiene casi estable y la velocidad de secado permanece constante, periodo conocido como de *velocidad constante de secado* y termina cuando el sólido alcanza el contenido crítico de humedad. Después de esto la velocidad de secado decae con rapidez y la temperatura de la superficie aumenta. A este periodo se le llama de *velocidad descendente* y puede durar más tiempo que el periodo de velocidad constante. La velocidad de secado tiende a cero con cierto contenido de humedad de equilibrio, una condición por arriba de la humedad más baja que podría obtenerse con las condiciones de secado (Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006).



Curvas típicas de velocidad de secado constante: (a) gráfica de los datos de humedad libre en función del tiempo, (b) curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre. Tomada de Geankoplis, 1998.

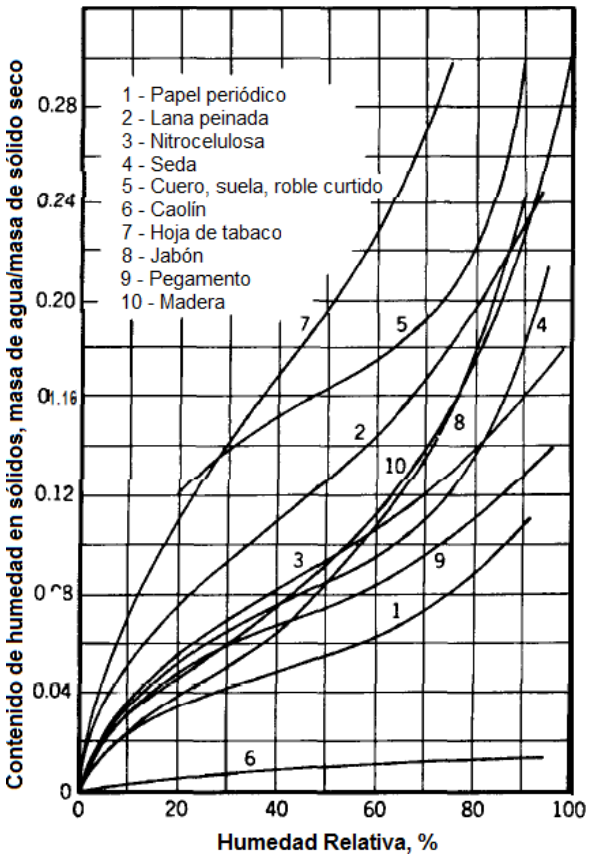
En las gráficas de arriba se muestran curvas típicas de secado. La primera gráfica indica el contenido de humedad en función del tiempo; esta gráfica se obtiene realizando un proceso de secado de una muestra reproduciendo los parámetros a utilizar en el proceso de secado. La segunda gráfica se obtiene a partir de los datos de la primera, donde se observan las etapas del proceso de secado.

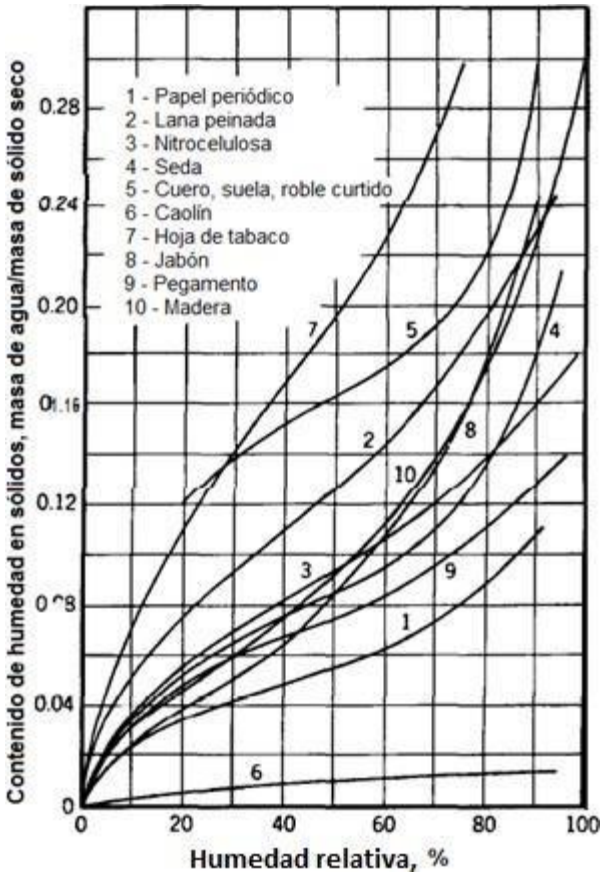
El punto de *A* a *B* corresponde al proceso de estabilización; este proceso puede presentarse a una velocidad ascendente o descendente. En el periodo de velocidad constante de *B* a *C*, la superficie expuesta está saturada de agua; en este proceso la temperatura de la superficie ha alcanzado la temperatura de bulbo húmedo. La velocidad constante de secado se mantiene mientras la masa de agua que se retira de la superficie es reemplazada por el movimiento del líquido desde el interior del material a secar a la superficie. Este movimiento es controlado por la tensión superficial y las fuerzas

gravitaciones para sólidos porosos, que tiene espacios vacíos grandes. Si los sólidos son fibrosos, compactos o amorfos, el movimiento es por difusión. Las velocidades de difusión son menores que las velocidades por flujo por gravedad.

Del punto *C* al *D* se presenta el periodo de velocidad descendente; la superficie del sólido tiene menor cantidad de líquido, ya que la velocidad de retiro es mayor que el movimiento interno del líquido hacia la superficie. En el punto *D*, la superficie saturada de líquido es tan pequeña que cambia el mecanismo de transferencia, se seca por transferencia convectiva de calor. Para humedades menores que las del punto *D*, la evaporación ocurre desde el interior del sólido hasta llegar al contenido de humedad de equilibrio donde ya no se puede extraer más agua. Cuando la presión de vapor sobre el sólido es igual a la presión parcial del vapor del gas de entrada de secado, es cuando se alcanza la humedad de equilibrio. El último periodo es conocido como *segundo periodo de velocidad descendente* (Foust, Wenzel, Clump Maus y Andersen, 2006).

Abajo se muestra una gráfica de la humedad de equilibrio para diferentes materiales como función de la humedad relativa del aire. Por ejemplo, si se seca madera con aire con una humedad relativa de 60%, la humedad que tendrá la madera al terminar el proceso de secado será de 0.14 kg de agua / kg material seco.


1 - Papel periódico
2 - Lana peinada
3 - Nitrocelulosa
4 - Seda
5 - Cuero, suela, roble curtido
6 - Caolín
7 - Hoja de tabaco
8 - Jabón
9 - Pegamento
10 - Madera
Contenido de humedad en sólidos, masa de agua/masa de sólido seco
0.28
0.24
0.20
0.16
0.12
0.08
0.04
0
0
20
40
60
80
100
Humedad Relativa, %



Humedad de equilibrio para diferentes materiales. Tomada de Couper, Penney, Fair y Walas, 2012.

Si se conoce la velocidad de secado, integrando la curva se puede calcular el tiempo del secado. Debes tomar en cuenta que la integración se realiza para cada etapa de la curva de secado.

En un proceso de secado la humedad del material y la temperatura pueden ser medidas en función del tiempo, así como la composición de entrada y salida del gas; con estos datos se puede obtener la velocidad de secado. Si se formula un proceso adiabático, la transferencia de calor será igual a la transferencia de masa, con lo que se formula la ecuación general del secado:

$$-\frac{1}{A}\frac{dW}{dt} = h(T_g - T) = k_p(P - P_g) = k_H(H - H_g)$$

Donde k_p y k_H son los coeficientes de masa; h es el coeficiente de transferencia de calor; T es la temperatura; P es la presión; H es la humedad en kg / kg de material seco; W es la

masa; t es el tiempo; A es el área superficial expuesta, y g se refiere a las fases gaseosas.

Si se conocen la velocidad de secado, la humedad inicial y la final, se puede calcular el tiempo que tardará el proceso aplicando la ecuación de secado.

Cierre de la unidad

En esta unidad se revisó la clasificación de los evaporadores, condensadores y secadores; se presentó la metodología más simple para su diseño térmico, y se analizaron los principales tipos de equipos, haciendo un análisis de sus principales ventajas y desventajas.

El objetivo primordial de la unidad fue instruirte en el tipo de operaciones unitarias que puedes encontrar durante tu desarrollo profesional, específicamente las de transferencia de masa y calor.

Fuentes de consulta

1. Collier, J. y Thome, J. (1996). *Convective Boiling and Condensation*. Oxford: Clarendon.

2. Couper, J., Penney, W., Fair, J. y Walas, S. (2012). *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Boston: Butterworth-Heinemann.

3. Foust, A., Wenzel, L., Clump, C., Maus, L. y Andersen, L. (2006). *Principios de operaciones unitarias*. México: Compañía Editorial Continental.

4. Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México: Compañía Editorial Continental.

5. Kakaç, S. (1991). *Boilers, Evaporators, and Condensers*. Nueva York: John Wiley & Sons.

6. Kakaç, S. (2002). *Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design*. Boca Raton: CRC.

7. Kandlikar, S., Shoji, M. y Dhir, V. (1999). *Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation*. Nueva York: Taylor & Francis.

8. Rohsenow, W., Hartnett, J. y Cho, Y. (1998). *Handbook of Heat Transfer*. Nueva York: McGraw-Hill.

9. Shah, R. y Sekulic, D. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Nueva York: John Wiley & Sons.