

# LA EVAPORACIÓN EN EQUIPOS DE MÚLTIPLES EFECTOS: UNA OPERACIÓN NECESARIA EN INDUSTRIAS PROCESADORAS DE FRUTAS Y VEGETALES

Ing. Javier Díaz Pineda <sup>1</sup>, Dr.C. Jesús D. Luis Orozco <sup>2</sup>

*1,2. Departamento de Química, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de  
Matanzas, Autopista Varadero Km.3 y 1/2, Matanzas, Cuba.*

[javier.pineda@umcc.cu](mailto:javier.pineda@umcc.cu)

## Resumen

La producción industrial de jugos concentrados de frutas y hortalizas, ha experimentado a nivel mundial un crecimiento sostenido en los últimos años; debido a los considerables beneficios económicos que reporta su comercialización. La evaporación es una operación que proporciona una estabilidad microbiológica en estos productos y permite reducir los costos de almacenamiento y transporte, además de prolongar su tiempo de vida útil. En este trabajo se realiza un estudio sobre los beneficios y desventajas de la utilización de evaporadores de múltiples efectos en industrias procesadoras de frutas y vegetales. Se exponen los principales factores que afectan el proceso de evaporación. Se establecen los principios de funcionamiento, los métodos de operación, los sistemas de alimentación y equipos auxiliares presentes en estos equipos. Su utilización implica un mejor uso de la energía disponible; puesto que se reduce notablemente el consumo de vapor y se incrementa la eficiencia y economía de evaporación.

**Palabras claves:** *Evaporadores; Múltiples efectos; Concentrados de frutas y vegetales.*

---

## Introducción

La producción industrial de jugos de frutas y hortalizas, ha experimentado a nivel mundial un crecimiento sostenido en los últimos años; debido a los considerables beneficios económicos que reporta su comercialización. Prácticamente se pueden elaborar jugos, pulpas y concentrados de cualquier fruta; sin embargo, los de mayor demanda son los de frutas cítricas como la naranja y la toronja. También los jugos de frutas tropicales y vegetales, como los de tomate, guayaba, piña, papaya, mango, entre otros.

Según Herrera y Angüisaca (2015), las pulpas de frutas y hortalizas han alcanzado una gran importancia económica en la industria alimentaria actual, y muestran un gran futuro comercial. Pues son la base para la elaboración de una amplia gama de productos finales como los jugos, néctares, zumos de frutas con pulpa, concentrados, pastas y mermeladas. Para ello se emplean vegetales y frutas tropicales como: mango, piña, tomate, guayaba, naranja, limón, manzana, papaya, entre otras.

La pulpa es la parte carnosa o comestible de la fruta u hortaliza, la cual resulta de la eliminación de la cáscara y semillas por procesos manuales o mecánicos, obteniendo un producto pastoso o semilíquido, que luego es procesado y almacenado por diferentes métodos. Su empleo presenta una serie de ventajas bien definidas, frente al método tradicional de utilizar de forma directa la fruta como materia prima, puesto que permite ampliar el tiempo de conservación y reducir los costos de almacenamiento y transporte, por reducción del volumen. Además, actúan como reguladoras de los suministros de frutas y vegetales, porque se procesan en las épocas de cosecha, para utilizarlas en períodos de poca disponibilidad (Heldman y Lund, 2008; Jongen, 2012).

La composición química de las pulpas, depende sobre todo del tipo de fruta u hortaliza y de su grado de maduración. Su consumo es beneficioso para la salud, puesto que son alimentos libres de colesterol, presentan antioxidantes y poseen entre un 70 - 90 % de agua. Pero su mayor importancia radica, en el aporte a la dieta de vitaminas, minerales, enzimas, carbohidratos, ácidos orgánicos y fibras. Sin embargo, los responsables del valor sensorial y nutricional de estos productos, son termosensibles, y el uso de tratamientos inapropiados para su concentración, puede provocar pérdidas considerables de vitaminas, el deterioro del color, del aroma y del sabor (Ibarz y Falguera, 2014).

La evaporación es una operación que se emplea frecuentemente para remover el agua contenida en los jugos, con la finalidad de obtenerlos más concentrados, hasta alcanzar el nivel de sólidos solubles deseado. La eliminación del agua proporciona una estabilidad microbiológica del producto y permite reducir los costos de almacenamiento y transporte,

además de prolongar su tiempo de vida útil. Presenta varias limitaciones asociadas con el deterioro de las características sensoriales como son el color, olor, sabor y las de valor nutricional, como las vitaminas y otros fitoquímicos por efecto del calor. Existen evidencias de que en los primeros minutos de la evaporación, una gran parte de los componentes aromáticos de la fruta se pierden irreversiblemente (Sinha, 2012; Richardson, 2014).

Hui y Evranuz (2015), plantean que los jugos de frutas y vegetales, al igual que otros alimentos, son sensibles al calor y sus viscosidades aumentan notablemente al concentrarlos. Frecuentemente, la materia sólida en suspensión presente en los jugos, tiende a adherirse a la superficie de calentamiento. Esto causa sobrecalentamientos que conducen a carbonizaciones y deterioro del material. Varzakas y Tzia (2014), proponen que para reducir esta tendencia a la adhesión y disminuir el tiempo de residencia del producto en el evaporador, se precisan altas velocidades de circulación del fluido sobre la superficie de transferencia de calor. Así como también se requieren temperaturas bajas de operación y el empleo del vacío para la reducción de la temperatura de ebullición de la disolución.

En el diseño de los sistemas de evaporación, es importante tener presente las características específicas del alimento líquido que se va a procesar. Cabe precisar, que en la actualidad existen diversas tecnologías industriales para la concentración de los jugos de frutas y hortalizas. Son varios los tipos de concentradores existentes, pero los más efectivos y económicos son los de múltiple efecto con evaporación al vacío (Hahn, 2014).

Sin embargo, son las propiedades del fluido de alimentación las que determinan la elección del tipo de evaporador; porque a medida que el jugo se concentra, sus características físico-químicas se modifican. Si bien su finalidad es retirar parte del agua y promover la esterilidad comercial, las temperaturas y los tiempos de procesamiento pueden degradar a las sustancias nutritivas de los jugos y afectar sus propiedades organolépticas (Singh y Heldman, 2013).

### **1.1. Objetivos de la evaporación**

Autores como Cabrera y Gandón (1983), plantean que la evaporación es un fenómeno físico, que consiste en separar parcialmente el disolvente volátil del soluto no volátil presente en una disolución. Esta separación se produce mediante la vaporización de una parte del disolvente, con el propósito de obtener una disolución concentrada. En la gran mayoría de los casos, el disolvente a evaporar en la disolución es el agua.

Sin embargo, Núñez *et al.* (2011) exponen que la evaporación es una operación unitaria de la ingeniería química, que tiene como finalidad la concentración de una disolución. La

misma se basa en separar por ebullición parte del líquido contenido en una disolución o suspensión. Para lograr esta separación, se le suministra una fuente de calor externo a la disolución hasta que alcance la temperatura de ebullición, de modo que el disolvente se volatilice, los solutos permanezcan en la disolución y aumenten su concentración. Como fuente calórica se emplea generalmente el vapor de agua; el cual se pone en contacto con el producto a través de una superficie calefactora.

### **1.1.1. Evaporación al vacío de alimentos**

Autores como Miranda y Stoforos (2016), plantean que la evaporación al vacío es una operación muy utilizada en la industria alimentaria, especialmente para productos que requieren ser almacenados y preservados por períodos prolongados sin sufrir deterioro o descomposición. Este proceso consiste en reducir la presión de la cámara de evaporación del evaporador, por debajo de la presión atmosférica. Esto permite disminuir la temperatura de ebullición del líquido a evaporar y que se alcancen temperaturas inferiores a la temperatura de ebullición normal. Lo que hace que disminuya el tiempo de residencia, evita las altas temperaturas de exposición del producto e impide la descomposición de las sustancias sensibles al calor.

Una de las ventajas que posee este proceso, es que aumenta la diferencia útil de temperatura entre el agente de calentamiento y la disolución, lo que permite disminuir la superficie de calefacción del equipo. La operación a vacío se emplea con mayor frecuencia en evaporadores de múltiple efecto, compuestos por varios equipos en serie. Es utilizado de forma industrial, para preparar productos como la leche evaporada, pastas de tomate, jugos concentrados de frutas, en la deshidratación de huevos, entre otras aplicaciones (Smith, 2011).

## **1.2. Tipos de evaporadores empleados en la industria alimentaria**

Los evaporadores, son equipos muy utilizados en muchos de los procesos productivos de la industria alimentaria. Usualmente, se emplean para extraer gran parte del agua contenida en jugos y pulpas de frutas tropicales y vegetales; con la finalidad de obtener un producto concentrado. También son usados en el procesamiento de pulpas de café, en la concentración de leche, en la cristalización de azúcar, en la elaboración de pastas de tomate, entre otros (Toledo, 2008).

Rodríguez (2013), refiere que los evaporadores, en su forma más simple, están constituidos por una cobertura o cuerpo, dentro del cual se encuentran instalados un conjunto de tubos y por encima de ellos existe una zona llamada cámara de evaporación. Generalmente, se usa vapor de agua como agente de calentamiento. Este puede circular por dentro o por fuera de

los tubos, de acuerdo con el tipo de equipo. La selección adecuada del tipo de evaporador, depende tanto de las características del fluido, la configuración de la superficie para la transferencia de calor, así como de los medios utilizados para lograr la circulación o agitación del líquido. A continuación se analizan los tipos de evaporadores más empleados en la industria de alimentos.

Núñez *et al.* (2011), plantea que los evaporadores se clasifican de acuerdo al modo de operación en dos grupos fundamentales:

- Evaporadores de circulación natural.
- Evaporadores de circulación forzada.

### **Evaporadores de circulación natural**

Según Núñez *et al.* (2011), los evaporadores de circulación natural se pueden agrupar en cuatro tipos principales:

- Evaporadores de tubos horizontales.
- Evaporadores de calandria con tubos verticales.
- Evaporadores de tubos verticales con canasta.
- Evaporadores de tubos verticales largos.

### **Evaporadores de tubos horizontales.**

Los evaporadores de tubos horizontales, son los evaporadores químicos más antiguos. Están conformados por un cuerpo cilíndrico y un haz de tubos usualmente de sección cuadrada. El banco horizontal de tubos de calentamiento, es similar a la sección de tubos de un intercambiador de calor. El vapor de agua entra por los tubos y el condensado sale por el otro extremo de ellos. Debido a que la evaporación ocurre por fuera de los tubos, se utilizan diámetros menores que en cualquier otro tipo de evaporador, siendo de  $\frac{3}{4}$  a  $1\frac{1}{4}$  pulgadas. Su principal ventaja es el reducido espacio requerido para su instalación en la dimensión vertical. El costo de adquisición de este equipo es relativamente económico y puede utilizarse para líquidos no viscosos con altos coeficientes de transferencia de calor. No son adecuados para líquidos que dejan deposiciones de sales y forman escamas (Brown, 1985; Kern, 1999).

### **Evaporadores de calandria con tubos verticales**

Los evaporadores de calandria están compuestos por un cuerpo cilíndrico y un haz de tubos verticales cortos, de 1 a 2,5 m de largo y de 0,05 a 0,1 m de diámetro. El vapor fluye por fuera de los tubos en la calandria. En el centro del haz de tubos, hay un gran paso circular cuya área de sección transversal es del 25 al 40% de la sección ocupada por los tubos. A

través de este tubo central, al derramarse el líquido más frío, este se recircula hacia la parte inferior de los tubos. La mayor parte de la ebullición se produce en los tubos, de forma que el líquido asciende a través de ellos y retoma su paso por el conducto central. El líquido concentrado se extrae por el fondo. Uno de los inconvenientes de este tipo de evaporadores, es que la eficiencia en la transferencia de calor, depende de la altura a la cual se encuentra el líquido. Si este se encuentra por debajo de la mitad de la altura de los tubos, el intercambio de calor es relativamente pobre, lo cual resulta, en energía de vapor desperdiciada. Su limpieza es relativamente rápida y las incrustaciones se producen dentro de los tubos. No se recomienda para soluciones muy viscosas. Se utiliza con frecuencia en las industrias del azúcar, la sal y la sosa cáustica (Minton, 1986; McCabe *et al.*, 2007).

### **Evaporadores de tubos verticales con canasta**

Estos equipos son similares a los evaporadores de calandria, excepto a que tienen el haz de tubos desmontables, lo que permite una rápida limpieza. Se diseñan con fondo cónico y se les puede instalar un agitador para aumentar la circulación dentro de ellos. La zona de calefacción está contenida en una cesta suspendida en la parte más baja del evaporador, y la recirculación tiene lugar a través del espacio anular que rodea a la cesta. Como resultado de estas ventajas mecánicas, se recomienda para soluciones muy viscosas e incrustantes (Brown, 1985; Kern, 1999).

### **Evaporadores de tubos verticales largos**

Geankoplis (2006), plantea que puesto a que el coeficiente de transferencia de calor por el lado del vapor, es muy alto en comparación con el del lado del líquido que se evapora, es conveniente contar con velocidades altas para el líquido. Los evaporadores de tubos verticales largos están constituidos por un elemento calefactor tubular dispuesto en forma vertical. Este contiene deflectores con la finalidad de lograr un movimiento libre del vapor y el condensado hacia abajo. El líquido circula por el interior del haz de tubos verticales. Los tubos tienen longitudes de 3 a 10 m y la formación de burbujas en su interior produce una acción de bombeo que ayuda a obtener velocidades de líquido muy altas. Por lo general, el líquido pasa una sola vez a través de ellos y no se recircula. Los tiempos de contacto suelen ser bastante bajos en estos equipos. Son especialmente eficaces para concentrar líquidos espumosos o formadores de natas. No son recomendados para soluciones incrustantes o que depositan sales.

Algunas de las variantes, en las que se pueden encontrar los evaporadores de tubos verticales largos, son los evaporadores de película descendente y los de película agitada. A continuación se analizan algunas de sus características y aplicaciones fundamentales.

## **Evaporadores de película descendente**

En los evaporadores de película descendente, el líquido se alimenta por la parte superior, desciende como una película delgada por el interior de los tubos calentados con vapor de agua y sale a mayor concentración por la parte inferior. El vapor extraído a la disolución es arrastrado hacia abajo junto con el líquido concentrado, para ser posteriormente separado. Estos equipos parecen largos intercambiadores tubulares verticales con un separador de líquido y vapor en el fondo y un distribuidor de líquido en la parte superior. Tienen como principal desventaja, que la pared de cada tubo debe permanecer mojada todo el tiempo y no se deben inundar los tubos. Pues, si no se moja toda la pared, hay una buena cantidad de energía perdida en el evaporador. Pero si se inundan los tubos, el vapor no puede subir, de modo que se detiene la evaporación y el fluido saldría con las mismas características que a su entrada. Estos equipos se utilizan para concentrar una gran variedad de productos, incluyendo los materiales sensibles al calor y moderadamente viscosos como el jugo de naranja y otros zumos de frutas y vegetales. Permiten trabajar con tiempos de residencia cortos (5 a 10 s), elevados coeficientes de transferencia de calor y una gran eficiencia energética (Valdivieso, 2010; Muñoz, 2016).

## **Evaporadores de película agitada**

Estos evaporadores tienen como objetivo principal, reducir la resistencia a la transferencia de calor por parte del líquido, con el aumento de su turbulencia de manera mecánica. Este efecto se logra colocando un tubo enchaquetado que contiene un agitador interno. La alimentación entra por la parte superior de la sección encamisada y se dispersa en forma de una película altamente turbulenta por acción de las espas verticales del agitador. La disolución concentrada sale por el fondo, el vapor pasa por un separador y es eliminado por la parte superior. Su principal ventaja es su capacidad de conseguir elevadas velocidades de transmisión de calor con líquidos muy viscosos. Sus desventajas son el elevado costo de adquisición, sus partes internas móviles requieren un importante mantenimiento; así como la baja capacidad de cada unidad, que es muy inferior a la de los evaporadores multitubulares. Son particularmente eficaces con materiales viscosos sensibles al calor, tales como gelatina, látex de caucho, antibióticos, jugos de frutas y vegetales (McCabe *et al.*, 2007; Muñoz, 2016).

## **Evaporadores de circulación forzada**

Los evaporadores de circulación forzada constan de un intercambiador de calor con calefacción indirecta, donde el líquido circula a elevadas velocidades. La carga hidrostática existente en la parte superior de los tubos, elimina cualquier posibilidad de ebullición del líquido. Dentro del separador, se mantiene una presión absoluta ligeramente inferior a la

existente en el haz de tubos, de tal manera que el líquido que entra al separador se evapora instantáneamente. A diferencia de los de circulación natural, se utilizan bombas de flujo axial, para mantener las elevadas velocidades de circulación del líquido. Solo con altas velocidades del fluido, se puede prever la formación de incrustaciones y disminuir el tiempo de residencia. No son tan económicos como los de circulación natural; sin embargo, son utilizados para concentrar líquidos viscosos y sustancias formadoras de sales con tendencia a incrustarse (Kern, 1999; Lanza, 2013).

### 1.3. Transferencia de calor en los evaporadores

Cardoso y Constanza (2010), plantean que la transferencia de calor en los evaporadores constituye el factor más importante en el diseño de estos equipos. Debido a que la superficie de calentamiento representa la mayor parte del costo de un evaporador, generalmente su costo total está relacionado en función de los m<sup>2</sup> de área de calentamiento, los materiales de construcción y el tipo de evaporador. Consideran también, que la velocidad de transmisión de calor (q), a través de la superficie de calefacción de un evaporador, de acuerdo con la definición del coeficiente global de transferencia de calor, está dada por el producto de tres factores: el área de la superficie de transmisión de calor (A), el coeficiente global de transferencia de calor (U), y el gradiente o diferencia útil de temperaturas ( $\Delta T$ ), o sea:

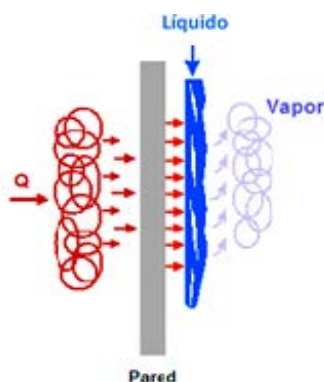
$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Según Perry y Green (2008), la diferencia de temperaturas ( $\Delta T$ ) entre el vapor condensante y el líquido hirviente depende de varios factores, como son las condiciones del vapor de calefacción, la presión de la cámara de evaporación y la concentración de la disolución. La diferencia de temperaturas que se utiliza para calcular el coeficiente de transferencia de calor en los evaporadores suele ser una cifra arbitraria. Puesto que es muy difícil determinar la temperatura del líquido en todas las partes de la superficie de calentamiento de la mayor parte de los tipos de evaporadores.

La temperatura de condensación del vapor, se puede determinar de forma simple y precisa mediante una medición de la presión por el lado del vapor del elemento calefactor y seguidamente utilizar las tablas de vapor. De modo similar, una medición de la presión en el espacio del vapor por encima del líquido en ebullición dará la temperatura del vapor saturado que, suponiendo que la elevación del punto de ebullición sea despreciable, será sustancialmente igual que la temperatura del líquido en ebullición (Perry y Green, 2008).



La forma más usual de aportar calor a los procesos de evaporación, es a través de la condensación del vapor de agua. Como muestra la figura 1.1, al poner en contacto el vapor con una superficie de menor temperatura, este condensa sobre ella. De modo que el calor latente o de condensación, al ser mayor que el calor sensible, se transfiere por conducción a través de la pared y posteriormente por convección al líquido. De esta manera se logra elevar su temperatura, lo cual permite que parte del agua de la disolución a evaporar pase al estado gaseoso y posteriormente sea separada (Cenzano *et al.*, 2013).



**Figura 1.1.** Proceso de transferencia de calor en los evaporadores.

**Fuente:** Valdivieso, 2010.

### 1.3.1. Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ) en un evaporador, se determina en función de los coeficientes peliculares de ebullición  $h_{eb}$  y condensación  $h_{cond}$  respectivamente. La experiencia ha demostrado que  $U$  depende de las propiedades de la disolución, del medio de calentamiento, de la geometría de la superficie y del tipo de evaporador. Estos coeficientes pueden encontrarse en la literatura especializada según el tipo de fluido. (McCabe *et al.*, 2007). En la tabla 1.1 se muestran algunos coeficientes globales de algunos tipos de evaporadores

$$U_D = \frac{h_{cond} \cdot h_{eb}}{h_{cond} + h_{eb}} + R_D \quad (1.2)$$

**Tabla 1.1:** Coeficientes globales típicos de evaporadores.

Tipo de evaporador	Coefficiente global U (W/m <sup>2</sup> °C)
Tubo vertical corto, circulación natural	1100 - 2800
Tubo horizontal, circulación natural	1100 - 2800
Tubo vertical largo, circulación natural	1100 - 400
Tubo vertical largo, circulación forzada	2300 - 11000
Película con agitación	680 - 2300

**Fuente:** Geankoplis, 2006.

La resistencia global a la transmisión de calor entre el vapor condensado y el líquido en ebullición en el equipo de evaporación es la suma de cinco resistencias individuales: la resistencia de la película del vapor condensado; la resistencia de las incrustaciones: una en el interior y otra en el exterior de los tubos; la resistencia de la pared del tubo; y la resistencia del líquido hirviente. En la mayor parte de los evaporadores, el factor de ensuciamiento del vapor condensado y la resistencia de la pared del tubo son muy pequeños, y generalmente se desprecian en los cálculos (Panana, 2013).

#### 1.4. La eficiencia en la operación de evaporadores

Estrada y Flores (2010), refieren que para que un evaporador opere eficientemente, el equipo seleccionado debe cumplir con varios requerimientos necesarios como poder transferir gran cantidad de calor a la disolución con un mínimo de área superficial. Este requerimiento más que ningún otro determina el tipo, el tamaño y el costo del evaporador. También, alcanzar una determinada separación de líquido y vapor con la configuración más simple. Aspecto importante debido a que tiene gran influencia sobre la calidad del producto y la contaminación, obstrucción y corrosión de los equipos posteriores en el proceso. Una separación inadecuada puede provocar problemas de bombeo o recirculaciones indeseadas.

Al mismo tiempo este equipo debe hacer un uso eficiente de la energía disponible y el funcionamiento del mismo se evalúa en base a la economía del evaporador. Un gran incremento en la economía de estos equipos se alcanza al reutilizar el disolvente vaporizado como medio de calentamiento. Esto se puede lograr de diferentes maneras, pero la vía más empleada es la evaporación en múltiple efecto; que consiste en un sistema con varios evaporadores o efectos interconectados entre sí (Estrada y Flores, 2010).

Núñez *et al.* (2011), expresa que para lograr el buen funcionamiento de un múltiple efecto con alta eficiencia, además de la distribución de presiones y temperatura que debe cumplirse, es importante la distribución de áreas de evaporación y los coeficientes globales de transferencia de calor.

### 1.5. Factores que afectan el proceso de evaporación

Cano y Romero (2010), consideran que existen varios factores que afectan el proceso de evaporación. Principalmente aquellos que están relacionados con las propiedades físico-químicas de la disolución a concentrar y las condiciones operacionales del proceso. Dentro de los más importantes, pueden mencionarse:

- **Formación de espuma.** Algunos materiales pueden formar espuma durante el proceso de evaporación, especialmente las sustancias orgánicas. La formación estable de espuma puede causar la disminución de la velocidad de transferencia de calor. Además, puede acompañar al vapor que sale del evaporador, dando lugar a un importante arrastre de líquido. Usualmente, se elimina a partir de métodos mecánicos o mediante la disminución del flujo de entrada de líquido, así como se pueden utilizar agentes antiespumantes.
- **Sensibilidad térmica de los materiales.** La mayoría de los alimentos, en especial los jugos y pulpas de frutas y vegetales, se deterioran cuando se someten a altas temperaturas durante tiempos relativamente cortos. Para concentrar estos materiales, se necesita reducir tanto la temperatura del líquido, como el tiempo de calentamiento. Es indispensable, conocer el comportamiento de estas sustancias frente a la temperatura, pues a partir de ello, se fija la temperatura máxima de operación del evaporador.
- **Solubilidad.** Todas las sustancias sólidas, poseen una solubilidad máxima en agua. Pues se debe tener en cuenta, para la disolución que se evapora, la existencia de una región de saturación. Si se pasa de esta zona, se llega a la región de sobresaturación, donde la precipitación o cristalización es casi inevitable. Por lo que se debe considerar la factibilidad de alcanzar una determinada concentración, de lo contrario, ocurriría la cristalización dentro del evaporador; afectándose su funcionamiento y las características organolépticas del producto. La formación de cristales, provoca obstrucciones e incrustaciones sobre la superficie de transferencia de calor.
- **Concentración de la disolución.** Cuando la disolución se concentra, las propiedades de esta cambian drásticamente. La densidad y la viscosidad pueden incrementarse con el aumento del contenido de sólidos disueltos, lo que impide una adecuada transferencia de calor entre el agente de calentamiento y la disolución.

- **Materiales de construcción.** Seleccionar los materiales adecuados para la construcción de un evaporador, es un aspecto importante; pues permite prevenir problemas como la corrosión y contaminación del producto. El costo de la mayoría de materiales, como el cobre, níquel y acero inoxidable es elevado, por ello resulta deseable obtener altas velocidades de transferencia de calor, con el fin de minimizar los costos del equipo.

### 1.5.1. Elevación del punto de ebullición

La presión de vapor de la mayoría de las disoluciones acuosas, es menor que la del agua a la misma temperatura. Por tanto, para una presión dada, la temperatura de ebullición de las disoluciones es mayor que la del agua pura. Cuando se trabaja con disoluciones diluidas el punto de ebullición de estas es cercano al del agua pura, y se puede obtener su valor en función de la presión en las tablas de vapor. Pero si se trata de disoluciones concentradas el punto de ebullición aumenta. El incremento del punto de ebullición con respecto al del agua, se conoce con el nombre de elevación del punto de ebullición de la disolución (EPE) (Geankoplis, 2006; Berk, 2013).

Vicente (2016), plantea que a medida que progresa la evaporación, el líquido que va quedando en el evaporador se hace más concentrado y por tanto su temperatura de ebullición aumenta por encima de la correspondiente temperatura de vapor saturado a igual presión. Con el incremento de la concentración, la diferencia de temperatura entre el vapor y el producto disminuye conforme aumenta el punto de ebullición del producto, y a la vez se reduce la velocidad de transmisión de calor entre ambos fluidos. La magnitud de la EPE depende también de la naturaleza de la sustancia que se está evaporando. En los evaporadores de efecto múltiple, el punto de ebullición y la viscosidad del líquido se elevan de un efecto al siguiente, a medida que se incrementa la concentración.

Muñoz (2016), refiere que para disoluciones concentradas, la EPE se obtiene a partir de una regla empírica conocida como *regla de Dühring*. Según esta regla, la temperatura de ebullición de una determinada disolución es una función lineal de la temperatura de ebullición del agua pura a la misma presión.

### 1.5.2. Efecto de la presión hidrostática

Panana (2013), aborda que debido a la altura de la columna de líquido existente sobre un punto cualquiera del líquido contenido en uno de los tubos del evaporador, hace que la presión que actúa sobre dicho punto sea mayor que la existente en la cámara de evaporación. Como resultado de lo anterior, al líquido le corresponde una temperatura de ebullición mayor que la correspondiente a la presión existente en la cámara de evaporación.

La presión hidrostática será máxima en la parte inferior de los tubos del evaporador, debido a que la temperatura en la superficie del líquido va a ser menor que la temperatura del líquido que se encuentra en el fondo del tubo. Esta presión depende fundamentalmente de la densidad y de la altura del líquido en cuestión. Mientras mayor sea la longitud del tubo, mayor será el efecto de la carga hidrostática. Este factor es marcadamente importante en los evaporadores de tubos largos.

### **1.5.3. Formación de incrustaciones**

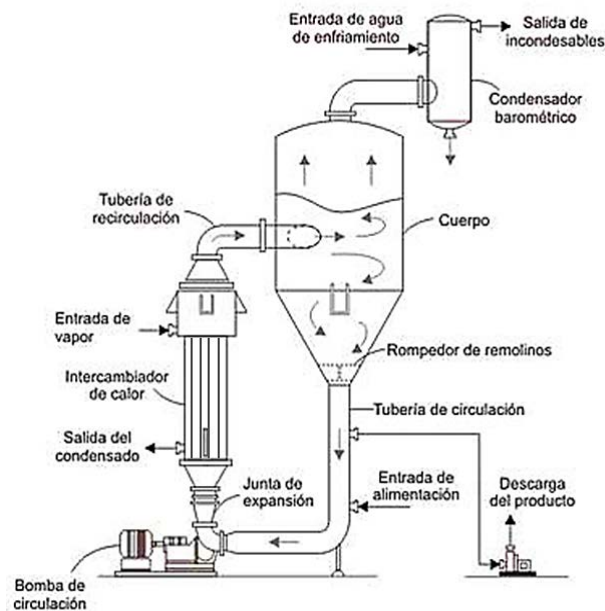
Las pulpas y jugos concentrados de frutas y vegetales, debido a su alta viscosidad, son propensos a incrustarse sobre la superficie de calentamiento de los evaporadores. Esto provoca que el área de transferencia de calor y la capacidad de evaporación de estos equipos, disminuyan apreciablemente. En estos casos, el coeficiente global de transferencia de calor se reduce progresivamente, hasta que llega un momento en que es preciso interrumpir la operación, para realizar la limpieza y mantenimiento de los tubos. Al aumentar la velocidad de circulación del líquido, la formación de incrustaciones se reduce notablemente. Cuando las costras son duras e insolubles, la limpieza resulta difícil y costosa; por lo que frecuentemente son eliminadas por una combinación de tratamientos químicos y mecánicos (Singh y Heldman, 2013).

### **1.6. La evaporación en equipos de múltiples efectos**

La operación de evaporación en múltiple efecto con circulación forzada, se emplea con gran frecuencia en la industria alimentaria para la vaporización de productos con alto contenido de materia sólida y alta viscosidad. Así como, en procesos donde sea necesario eliminar parte del agua contenida en la materia prima y conservar sus propiedades organolépticas. Generalmente son usados en industrias productoras de jugos, pastas y purés concentrados de tomate y frutas tropicales (Varzakas y Tzia, 2014).

Los evaporadores de múltiple efecto con circulación forzada son utilizados en procesos donde se desea evitar la evaporación del producto sobre la superficie de calentamiento, debido a las características incrustantes del fluido o para evitar la cristalización. Una de sus mayores ventajas, es la alta velocidad de circulación del líquido en los tubos, que reduce notablemente la formación de incrustaciones. En estos equipos, el producto se recircula mediante bombas de gran caudal, lo que asegura un contacto efectivo con la superficie de calentamiento y una velocidad controlada del producto a concentrar. Además, se alcanzan altos coeficientes de transferencia de calor con productos muy viscosos, se reduce el ensuciamiento y se prolonga el período de limpieza del equipo (Lanza, 2013; Muñoz, 2016).

El fluido se calienta cuando circula a través del intercambiador de calor y entonces es parcialmente evaporado cuando la presión es reducida en el cuerpo o cámara de evaporación instantánea, como se muestra en la figura 1.2. El intercambiador de calor puede ser colocado horizontal o verticalmente, puesto que el líquido circula de un efecto al otro, por acción de las bombas y no por gravedad. El líquido producido es calentado solo unos grados por cada pasada a través del intercambiador de calor. Para mantener una buena transferencia de calor dentro del intercambiador es necesario asegurar un alto flujo de recirculación (Singh y Heldman, 2013).



**Figura 1.2.** Evaporador de circulación forzada. **Fuente:** Valdivieso, 2010.

Perry y Green (2008), reconocen que aunque los evaporadores de circulación forzada, pueden no ser los más económicos, son apropiados para una gran variedad de aplicaciones. Poseen como ventajas fundamentales: la presencia de bajas pérdidas de carga, el alcance de elevados coeficientes de intercambio térmico y caudales de circulación. Consideran que sus principales desventajas, radican en su elevado costo de adquisición, en los relativamente altos tiempos de residencia o retención del fluido y en el consumo de energía eléctrica de la bomba de recirculación. Así como, refieren que los problemas que se manifiestan con mayor frecuencia en ellos son: los atascamientos en las entradas de los tubos por deposiciones de sales desprendidas de las paredes del equipo, la mala circulación debido a pérdidas de carga más altas que las esperadas, la formación de deposiciones de sales debido a la ebullición en los tubos y la corrosión y erosión de las superficies de intercambio de calor. Por lo que no son muy apropiados para las disoluciones salinas.

Según lo argumentado hasta el momento, es importante conocer el funcionamiento y los diferentes tipos de arreglos, en los que se puede encontrar a los evaporadores de múltiple efecto con circulación forzada en la industria alimentaria. Esto permite deducir los factores que más inciden en la pérdida de la capacidad de evaporación, a partir de una disminución del área de transferencia de calor de estos equipos.

### 1.6.1. Principios de funcionamiento

Según Rein (2012), los principios de operación de los evaporadores con múltiples efectos, fueron formulados por el norteamericano Norbert Rellieux en 1840, a quien se le atribuye el descubrimiento y la invención de estos equipos. Sobre la base de sus investigaciones, Rellieux desarrolló reglas generales o principios para el diseño y funcionamiento de estos equipos, como se muestran a continuación:

- **Primer principio.** En una estación evaporadora de múltiple efecto, por cada kilogramo de vapor calentador que se utilice, se obtendrán tantos kilogramos de evaporación como efectos tenga la estación.

De forma general se conoce, según este principio, que el flujo de vapor calentador al primer efecto, es inversamente proporcional al número de efectos de la estación. De aquí se infiere que a medida que hay más efectos, menor cantidad de vapor primario hay que suministrar. Esto se justifica económicamente hasta seis efectos y en la práctica solo se ha implementado hasta cinco efectos.

- **Segundo principio.** Si se extrae vapor en cualquier unidad o vaso de una estación de múltiple efecto, para sustituir vapores en un proceso concurrente, el ahorro de vapor logrado equivaldría a la cantidad de vapor así extraída, dividida por el número de unidades que contenga la estación y multiplicada por el número que ocupa en la estación la unidad donde se realice la extracción de vapor.

$$\eta = \frac{F}{n \cdot i} \quad (1.3)$$

Donde:

$\eta$ : Ahorro de vapor (%).

F: Flujo de vapor extraído (kg/h)

n: Número de evaporadores o efectos.

i: Posición del efecto donde se realizó la extracción.

- **Tercer principio.** En todo aparato donde se condense vapor o se realicen evaporaciones, es necesario extraer continuamente la acumulación de gases incondensables que en el compartimiento que contiene la superficie calórica.

En un entorno de crecientes exigencias económicas y medioambientales orientadas al uso racional de la energía, Sukanchan (2011) plantea que la introducción de múltiples efectos en evaporadores optimiza el uso de vapor, ahorra energía y agua suave, que en la mayoría de los casos justifica la inversión inicial. En los evaporadores de múltiple efecto, los vapores generados a partir del agua evaporada en un efecto alimentan al efecto siguiente, y así sucesivamente según la cantidad de efectos que tenga este equipo.

El vacío generado por el condensador, permite aprovechar la energía residual de estos vapores a menor presión que en el efecto anterior. A medida que el número de efectos incrementa la diferencia de temperatura disponible, entre el vapor directo y las condiciones del último efecto, debe ser compartida a lo largo de un mayor número de cuerpos evaporadores. Por lo que el área de intercambio de calor se debe incrementar correspondientemente (Sukanchan, 2011).

### **1.6.2. Capacidad y economía de evaporación**

La capacidad de un evaporador, se define como el número de kilogramos de agua evaporados por unidad de tiempo. La economía, por lo contrario, es el número de kilogramos de agua evaporada en todos los efectos por kilogramos de vapor primario utilizado. En un evaporador de efectos múltiples, la capacidad es la misma que en uno de efecto simple que tenga el mismo coeficiente global de transferencia de calor, la misma superficie de calefacción y que opere con una diferencia de temperatura igual a la diferencia total de temperatura con la que opera el sistema de múltiple efecto. Por tanto, la capacidad por metro cuadrado de superficie en un evaporador de N efectos es aproximadamente igual a  $1/N$  veces la capacidad del evaporador de efecto simple. Como la entalpía de vaporización es prácticamente constante en el rango de presiones utilizado, existe una proporcionalidad entre la cantidad de líquido evaporado y la cantidad de calor transmitido (Duran, 2010; Muñoz, 2016).

En los sistemas de múltiple efecto se consigue una gran economía, dado que la variación de la entalpía de vaporización al pasar de un efecto a otro es muy pequeña, cuando se condensa un kilogramo de vapor de calefacción, se evapora en la disolución hirviente aproximadamente un kilogramo de agua, y así, aumenta la economía N veces. La capacidad de estos sistemas, también se ve reducida por la elevación del punto de ebullición de la disolución, pero no así la economía, ya que ésta depende del balance de energía en cada efecto y no de la velocidad de transmisión del calor (Saravacos y Kostaropoulos, 2016).



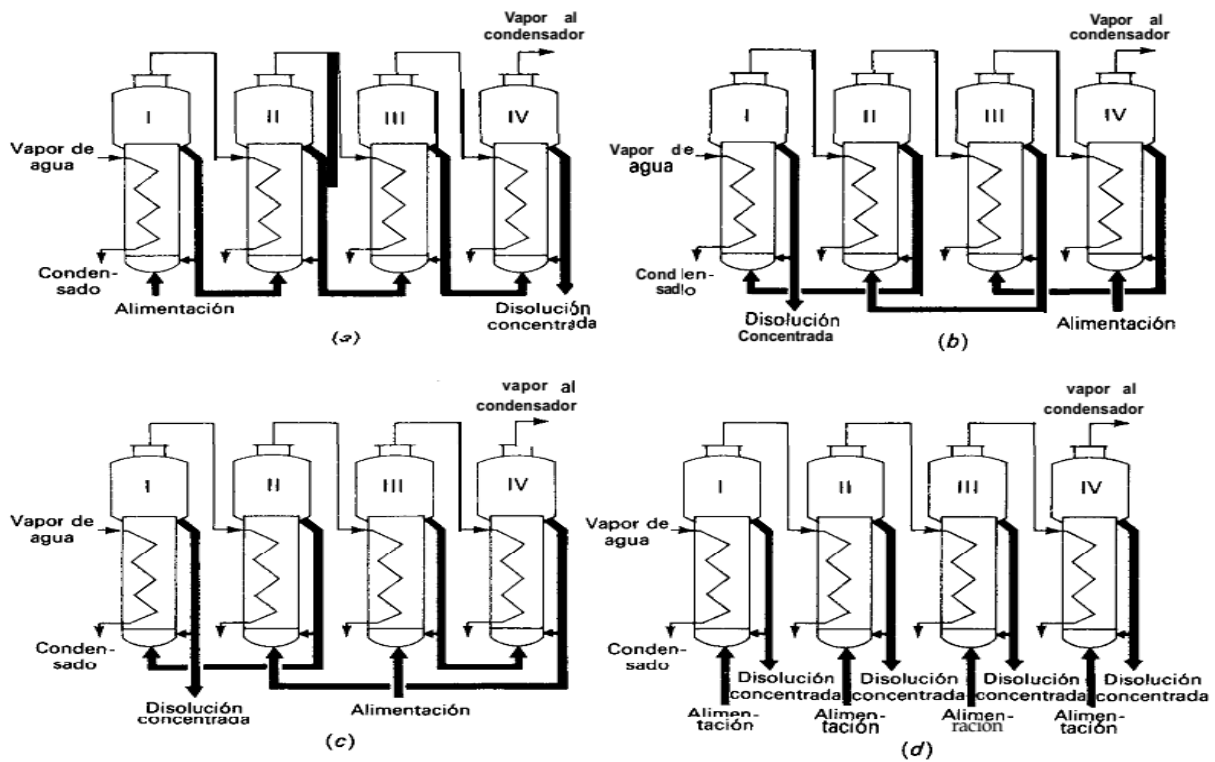
La economía de un evaporador depende de la temperatura de la alimentación y de las entalpías de vaporización en cada efecto. Mediante un diseño adecuado, la entalpía del vapor vivo que entra al primer efecto se puede utilizar una o más veces, dependiendo del número de efectos que conste el evaporador. Si la temperatura de alimentación, es inferior a la de ebullición en el primer efecto, una parte de la entalpía de vaporización del vapor vivo se utiliza para calentar la alimentación y solamente queda la fracción restante para la vaporización. Si la alimentación está a una temperatura superior a la de ebullición, la vaporización súbita que se produce contribuye a generar una evaporación adicional sobre la producida por la entalpía de vaporización del vapor vivo (Saravacos y Kostaropoulos, 2016).

### 1.6.3. Métodos de operación y sistemas de alimentación

Existen diferentes sistemas de alimentación a los evaporadores de múltiple efecto, pero el más sencillo y comúnmente empleado, consiste en introducir mediante una bomba, la disolución diluida en el primer efecto y hacerla circular posteriormente a través de los demás efectos, en el mismo sentido del vapor de agua, tal como se muestra en la figura 1.3 (a). Este método recibe el nombre de alimentación en paralelo o directa. La concentración de la disolución aumenta desde el primer efecto hasta el último. El paso del fluido de un efecto a otro, se realiza sin bombas, puesto que el flujo es en el sentido de presiones decrecientes. Este método de operación, se emplea cuando el producto concentrado final puede dañarse a temperaturas elevadas (Kern, 1999; McCabe *et al.*, 2007).

Otro método común, es el de alimentación en contracorriente o inversa, en la que la disolución diluida se introduce en el último efecto y se bombea posteriormente a través de los sucesivos efectos hasta el primero, en sentido contrario al flujo de vapor de agua, tal como muestra la figura 1.3 (b). Sin embargo, es necesario usar bombas en cada efecto, pues el flujo tiene lugar en el sentido de presiones crecientes. Su empleo resulta muy ventajoso, cuando los productos son viscosos y la exposición a temperaturas más altas aumenta la transferencia de calor, debido a la reducción de la viscosidad en el líquido (Kern, 1999; McCabe *et al.*, 2007).

En ocasiones, se utilizan otros modelos como el de alimentación mixta, donde la disolución diluida entra en un efecto intermedio, circula con alimentación directa hasta el extremo de la serie, y después se bombea hacia atrás a los primeros efectos para conseguir la concentración final, tal como muestra la figura 1.3 (c). Esta forma de operar elimina algunas de las bombas que se requieren en la alimentación inversa y permite realizar la evaporación final a una temperatura más elevada (Valdivieso, 2010; Muñoz, 2016).



**Figura 1.3.** Tipos de arreglos y sistemas de alimentación en evaporadores de múltiple efecto: (a) alimentación directa, (b) alimentación inversa, (c) alimentación mixta, (d) alimentación paralela. **Fuente:** McCabe *et al.*, 2007.

En los evaporadores con cristalización, donde se retira una suspensión de cristales y aguas madres, la alimentación se introduce directamente en cada efecto y se extrae el producto concentrado en cada uno de ellos, para dar lugar a lo que se llama alimentación paralela, tal como se muestra en la figura 1.3 (d). El vapor de cada efecto se usa para calentar el siguiente. Este método de operación se utiliza principalmente, cuando la alimentación está casi saturada y el producto son cristales sólidos, tal como sucede en la evaporación de salmueras para la producción de sal (Geankoplis, 2006; Andrade, 2015).

Se puede concluir, que cuando la alimentación del líquido fluye en la misma dirección que el vapor, se llama alimentación en paralelo o directa, y cuando la alimentación se hace en dirección contraria se llama alimentación en contracorriente o inversa. Desde el punto de vista del uso efectivo de los potenciales de temperatura, la alimentación en paralelo es más factible. Si los líquidos son muy viscosos, resulta más ventajoso el uso de la alimentación en contracorriente, ya que la temperatura del primer efecto es siempre la mayor y la correspondiente viscosidad será menor.

#### 1.6.4. Equipos auxiliares del evaporador

Los evaporadores en múltiple efecto con circulación forzada, se encuentran acompañados por varios equipos auxiliares, encargados de garantizar su buen funcionamiento y operación. A continuación, se describen algunos de ellos, como es el caso de los condensadores, los separadores de arrastre y las bombas de vacío.

#### Condensadores

De forma general, los vapores del último efecto de los evaporadores de efecto múltiple salen a presiones de vacío. Estos vapores se condensan usando agua de enfriamiento y se descargan como líquido a presión atmosférica. Los condensadores pueden ser de superficie, donde el vapor a condensar y el líquido de enfriamiento están separados por una pared metálica, o de contacto directo, donde el vapor y el líquido de enfriamiento se mezclan entre sí (Geankoplis, 2006; Panana, 2013).

Perry y Green (2008), consideran que el tipo de condensador más común de contacto directo, es el condensador barométrico a contracorriente. En este equipo, se condensa el vapor al ponerse en contacto directo con una llovizna de gotas de agua de enfriamiento. Se sitúan suficientemente altos como se muestra en la figura 1.2 del epígrafe 1.6, para que el agua se pueda descargar por gravedad a partir del vacío del condensador. Los gases no condensables, pueden eliminarse del condensador con una bomba de vacío mecánica o un eyector de chorro de vapor de agua. El vapor de agua a alta presión que se alimenta al eyector entra a gran velocidad por una tobera y arrastra los gases no condensables del espacio sometido al vacío. Son poco costosos y resultan económicos en lo que se refiere a consumo de agua. Pueden mantener un vacío correspondiente a la temperatura del vapor saturado, con una diferencia de más o menos 2,8 K (5 °F) con respecto a la temperatura del agua que sale del condensador.

Los condensadores de superficie, se emplean cuando no se desea que se mezclen el condensado y el agua de enfriamiento. En general, son condensadores de tubos y coraza, con vapor en la coraza y agua de enfriamiento en los tubos con flujo de pasos múltiples. La corriente de vapor casi siempre contiene gases no condensables. Si el vapor que se condensa, está por debajo de la presión atmosférica, el líquido condensado que sale, se extrae bombeándolo y los gases no condensables con una bomba de vacío. Los condensadores de superficie utilizan más agua de enfriamiento y son mucho más costosos que los de contacto directo (Geankoplis, 2006; Andrade, 2015).

## **Separadores de arrastre**

Cuando las velocidades de evaporación son elevadas, el vapor de agua puede arrastrar gotas del líquido en ebullición. El riesgo de arrastre aumenta considerablemente, cuando la dimensión de las gotas disminuye; puesto que se forma una especie de niebla difícil de detener. Debido al vacío, los arrastres más importantes se producen en el último cuerpo del evaporador de múltiple efecto. Para reducir esta pérdida de líquido concentrado, que es arrastrado por el vapor e impedir que lleguen al condensador; se utilizan separadores de arrastre. Estos se basan en el principio de la eliminación de las partículas líquidas en los gases, mediante cambios bruscos de velocidad o de dirección, fuerza centrífuga, impactos sobre una pared o un obstáculo. Son colocados generalmente en la parte superior del evaporador. Los separadores de arrastre pueden consistir en una simple lámina de choque o en una persiana de láminas inclinadas que se colocan en la proximidad de la salida de vapor. También se emplean esponjas metálicas entretejidas de acero inoxidable u otro material resistente a la corrosión (Panana, 2013).

## **Bombas de vacío**

Las bombas de vacío, son aquellos dispositivos que se encargan de extraer las moléculas gaseosas contenidas en un volumen sellado, formando un vacío parcial. Son equipos generalmente de tipo recíproco, que suelen emplearse en la generación del vacío en los cuerpos de los evaporadores de múltiple efecto. Así como para extraer los gases incondensables del condensador. Se caracterizan por su alta velocidad de bombeo y la cantidad de gas evacuado por unidad de tiempo (Walas *et al.*, 2012).

Una de las bombas de vacío más comúnmente empleadas, son las bombas de vacío de anillo líquido. Este tipo de equipo se compone de un rotor con aspas, el cual gira en una cubierta circular u ovalada, dentro de la cual hay agua u otro líquido sellador. La fuerza centrífuga hace que el líquido forme un anillo en la periferia de la carcasa durante el funcionamiento. El aire o gas avanza hacia el centro del rotor y de forma gradual se reduce su volumen y aumenta su presión hasta que pasa por los orificios de descarga y sale de la carcasa. El líquido contenido en el aire o gas descargado se separa, se enfría y se recircula, o se desecha. Existen diversas formas constructivas de bombas de anillo líquido dependiendo de la forma en la que se produce la aspiración y salida de aire o la entrada y el drenaje del agua de formación del anillo pero la estructura de la bomba y el principio de funcionamiento es el mismo (Rein, 2012; Panana, 2013).

## Conclusiones

La evaporación constituye una operación de vital importancia en el procesamiento industrial de jugos de frutas y vegetales, con el propósito de obtenerlos concentrados y alcanzar los parámetros de calidad requeridos. Los evaporadores de múltiples efectos, se emplean con gran frecuencia en la industria alimentaria, para la concentración de fluidos viscosos, como son las pulpas de frutas tropicales y vegetales. La utilización de estos equipos implica un mejor uso de la energía disponible; puesto que se reduce notablemente el consumo de vapor y se incrementa la eficiencia y economía de estos equipos. Entre los factores que ocasionan las mayores afectaciones al proceso de evaporación, se encuentran: la formación de incrustaciones, el efecto de la presión hidrostática y la elevación del punto de ebullición de la disolución concentrada.

## Referencias bibliográficas

ANDRADE, F. *Repotenciación del evaporador de doble efecto del laboratorio de operaciones unitarias*. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad Técnica de Manabí, Manabí (Ecuador). 2015.

BERK, Z. *Food Process Engineering and Technology*. 2da ed. Berlin: Editorial Academic Press, 2013.

BROWN, G. *Operaciones Básicas de la Ingeniería Química*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1985.

CABRERA, E. y GANDÓN, J. *Fundamento de las Operaciones Unitarias*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983.

CANO, E. y ROMERO, L. *Dimensionamiento de los cuerpos de un sistema de evaporación de múltiple efecto para la producción de mieles a partir de jugos de caña*. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (Colombia). 2010.

CARDOSO, O. y CONSTANZA, G. *Establecimiento del coeficiente global de transferencia de calor de un evaporador de múltiple efecto para concentración de jugos de caña panelera*. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Colombia. 2010.

CENZANO, J.; VICENTE, A. y ESTEIRE, E. *Ciencia y tecnología de los alimentos*. Madrid: Editorial AMV Ediciones, 2013.

DURAN, E. *Determinación de la eficiencia energética de un sistema de evaporación de múltiple efecto empleado en la concentración de jugos de caña panelera*. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Colombia. 2010.

ESTRADA, C. y FLORES, L. *Algoritmo para el diseño conceptual de evaporadores de múltiple efecto*. Revista Tecnología, Ciencia y Educación. [en línea] Vol.15, 2010, pp.12–22. [consulta: 22 de octubre 2018]. Disponible en: <http://www.tecnologia-ciencia-educacion.com>.

GEANKOPLIS, CH. J. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3ra ed. México: Editorial CECSA, 2006.

HAHN, G. *Evaporator design*. In: *Concentration and drying of foods*. London: Editorial Elsevier, 2014.

HELDMAN, D. y LUND, D. *Handbook of Food Engineering. Food Science and Technology*. 2da ed. New York: Editorial Taylor and Francis Group and CRC Press, 2008.

HERRERA, W. y ANGÜISACA, J. *Formulación del diseño del proyecto de una planta productora de pulpa de fruta derivada de mora y tomate de árbol en la ciudad de Cuenca*. Tesis en opción al título de Ingeniero Industrial. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. 2015.

HUI, Y. y EVRANUZ, E. *Handbook of Vegetable Preservation and Processing*. 2da ed. New York: Editorial Taylor and Francis Group and CRC Press, 2015.

IBARZ, A y FALGUERA, V. *Juice Processing: Quality, Safety and Value – Added Opportunities*. New York: Editorial Taylor and Francis Group and CRC Press, 2014.

JONGEN, W. *Fruit and Vegetable Processing. Improving Quality*. Washington, DC: Editorial Woodhead Publishing Ltd and CRC Press, 2012.

KERN, D. Q. *Procesos de Transferencia de Calor*. México: Editorial McGraw-Hill, 1999.

LANZA, G. *Control multivariable para un evaporador de circulación forzada mediante realimentación del vector de estado*. Trabajo en opción a la categoría de Profesor Asistente. Universidad de Carabobo, Venezuela. 2013.

MCCABE, W.; SMITH, J. y HARRIOTT, P. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 7ma ed. México D.F.: Editorial McGraw-Hill, 2007.

MINTON, P. E. *Handbook of Evaporation Technology*. New Jersey: Editorial Noyes Publications, 1986.

MIRANDA, W. y STOFOROS, N. *Procesamiento térmico de alimentos. Teoría, práctica y cálculos*. Madrid: Editorial AMV Ediciones, 2016.

MUÑOZ, A. *Aplicación informática para el diseño y operación de evaporadores de múltiple efecto en la industria*. Tesis en opción al título de Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Energética. Sevilla (España). 2016.

NÚÑEZ, S.; RODRÍGUEZ, E. y MENDOZA, J. *Algunas Operaciones Básicas de la Industria Química para el Ingeniero Industrial*. La Habana: Editorial Félix Varela, 2011.

PANANA, A. E. *Diseño de evaporadores de múltiple efecto conectados en serie*. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad Nacional del Callao, Perú. 2013.

PERRY, R.H. y GREEN, D. W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8va ed. New York: Editorial McGraw-Hill, 2008.

REIN, P. *Ingeniería de la caña de azúcar*. 2da ed. Berlin: Editorial Bartens, 2012.

RICHARDSON, P. *Thermal Technologies in Food Processing*. Cambridge: Editorial Woodhead Publishing Limited, 2014.

RODRÍGUEZ, S. *Advances in Fruit Processing Technologies*. New York: Editorial Taylor and Francis Group and CRC Press, 2013.

SARAVACOS, G. y KOSTAROPOULOS, A. *Handbook of Food Processing Equipment*. 2da ed. New York: Editorial Springer, 2016.

SINGH, R. y HELDMAN D. *Introduction to Food Engineering*. 5ta ed. San Diego: Editorial Elsevier, 2013.

SINHA, N. *Handbook of Fruits and Fruit Processing*. 2da ed. New Jersey: Editorial John Wiley & Sons, 2012.

SMITH, P. G. *Introduction to Food Process Engineering*. New York: Editorial Springer, 2011.

SUKANCHAN, P. *Design of multiple effect evaporator: in a sugar factory with backward feed*. New York: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011.

TOLEDO, R. *Fundamentals of Food Process Engineering*. 3era ed. New York: Editorial Springer, 2008.

VALDIVIESO, C. *Instalación y puesta en marcha del evaporador de película descendente UOP20-X-PHW y su aplicación en la obtención de concentrados de sulfato de cobre, jugo*

*de naranja y glucosa*. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad San Francisco de Quito, Ecuador. 2010.

VARZAKAS, T. y TZIA, C. *Food Engineering Handbook: Food Engineering Fundamentals*. New York: Editorial Taylor and Francis Group and CRC Press, 2014.

VICENTE, A. *Ingeniería y producción de alimentos*. Madrid: Editorial AMV Ediciones, 2016.

WALAS, S.; COUPER, J.; PENNEY, W. y FAIR, J. *Chemical Process Equipment. Selection and Design*. 3era ed. New York: Editorial Elsevier, 2012.