

## UNIDAD: EVAPORACION

### FUNDAMENTOS TEORICOS

#### 1. Introducción

La transferencia de calor a un líquido en ebullición es un tipo importante de transferencia de calor bastante frecuente en las industrias de proceso que recibe el nombre general de *Evaporación*.

En la evaporación se elimina el vapor formado por la ebullición de una solución líquida obteniéndose una solución más concentrada. En la gran mayoría de los casos, la *operación unitaria de evaporación* se refiere a la eliminación de agua de una solución acuosa.

Entre los ejemplos típicos de procesos de evaporación están la concentración de soluciones acuosas de azúcar, gomas, leche, jugos de frutas y extractos y pulpas de verduras. En estos casos, la solución concentrada es el producto deseado y el agua evaporada suele desecharse. En otros casos, el agua que contiene pequeñas cantidades de minerales se evapora para obtener agua libre de sólidos utilizada en la alimentación de calderas, para procesos químicos especiales o para otros propósitos. En ciertos casos, el principal objetivo de la evaporación consiste en concentrar una solución de tal manera que, al enfriarse ésta, se formen cristales que pueden separarse. Este proceso especial se denomina *Cristalización*.

#### 2. Factores del proceso

Las propiedades físicas y químicas de la solución que se está concentrando y del vapor que se separa tienen efecto considerable sobre el tipo de evaporador que debe usarse y sobre la presión y la temperatura del proceso. Las propiedades que afectan a los métodos de procesamiento son las siguientes:

- a. *Concentración de la solución alimenticia.* Por lo general, la alimentación líquida a un evaporador es bastante diluida, por lo que su viscosidad, bastante baja, es similar a la del agua y se opera con coeficientes de transferencia de calor bastante altos. A medida que se verifica la evaporación, la solución se concentra y su viscosidad puede elevarse notablemente, causando una marcada disminución del coeficiente de transferencia de calor. Debe existir entonces una circulación y/o turbulencia adecuada para evitar que el coeficiente se reduzca demasiado.
- b. *Solubilidad.* A medida que se calienta la solución y aumenta la concentración del soluto, puede excederse el límite de solubilidad del material en solución y se forman cristales. Esto puede limitar la concentración máxima que pueda obtenerse por evaporación de la solución. En la mayoría de los casos, la solubilidad del soluto aumenta con la temperatura. Esto significa que, al enfriar una solución concentrada caliente proveniente de un evaporador a una determinada temperatura, puede presentarse una cristalización.
- c. *Sensibilidad térmica de los materiales.* Muchos productos, en especial las soluciones alimenticias y otros materiales biológicos, pueden ser sensibles a la temperatura y en consecuencia pueden degradarse cuando ésta sube o el calentamiento es muy prolongado. En estos productos están la leche, jugos de frutas y extractos vegetales. La cantidad de degradación es una función de la temperatura y del tiempo.
- d. *Formación de espumas.* En algunos casos las soluciones alimenticias como la leche desnatada y algunas soluciones de ácidos grasos forman espumas durante la ebullición. Esta espuma es arrastrada por el vapor que sale del evaporador y puede haber pérdidas del material alimenticio.
- e. *Presión y temperatura.* El punto de ebullición de la solución está relacionado con la presión del sistema. Cuanto más elevada sea la presión de operación del evaporador, mayor será la temperatura de ebullición. Además la temperatura de ebullición también se eleva a medida que aumenta la concentración de la solución alimenticia por la acción de la evaporación. Este fenómeno se denomina *elevación del punto de ebullición*. Para mantener a

nivel bajo la temperatura de los materiales termosensibles suele ser necesario operar a presiones inferiores a 1 atm., esto es, al vacío.

- f. *Formación de incrustaciones y materiales de construcción.* Algunas soluciones depositan materiales sólidos llamados incrustaciones sobre las superficies de calentamiento. Estas incrustaciones pueden formarse a causa de los productos de descomposición o por disminución de la solubilidad. El resultado es una reducción del coeficiente de transferencia de calor, lo que obliga a limpiar el evaporador. La selección de los materiales de construcción del evaporador tiene importancia en la prevención de la corrosión.

### 3. Tipos generales de Evaporadores

La evaporación consiste en la adición de calor a una solución para evaporar el disolvente, que por lo general es agua. Usualmente, el calor es suministrado por la condensación de un vapor (como el vapor de agua a altas presiones proveniente de una caldera) en contacto con una superficie metálica, estando la solución alimenticia del otro lado de dicha superficie. El tipo de equipo usado depende tanto de la configuración de la superficie para la transferencia de calor como de los medios utilizados para lograr la agitación o circulación del líquido. Los tipos generales de evaporadores se describen brevemente a continuación:

- a. *Marmita abierta o artesa.* La forma más simple de un evaporador consiste en una marmita abierta o artesa en la cual se hierve el líquido. El suministro de calor proviene de la condensación de vapor de agua en una chaqueta o en serpentines sumergidos en el líquido. En algunos casos la marmita se calienta a fuego directo. Estos evaporadores son económicos y de operación simple, pero el desperdicio de calor es excesivo. En ciertos equipos se usan paletas o raspadores para agitar el líquido.
- b. *Evaporador de tubos horizontales con circulación natural* (Fig. 1a). El banco horizontal de tubos de calentamiento es similar al banco de tubos de un intercambiador de calor. El vapor de agua entra a los tubos y se condensa. El condensado sale por el otro extremo de los tubos. La solución a ebullición está por afuera de los tubos. El vapor se desprende de la superficie de la solución; después, casi siempre se le hace pasar por dispositivos de tipo deflector para impedir el arrastre de gotas de líquido y sale por la parte superior. Este equipo, relativamente económico, puede utilizarse para líquidos no viscosos con altos coeficientes de transferencia de calor y para líquidos que no formen incrustaciones. Puesto que la circulación del líquido no es muy buena, son poco adecuados para materiales viscosos. En casi todos los casos, tanto este evaporador como los que se describirán a continuación, operan con régimen continuo, con la alimentación entrando a velocidad constante y con el concentrado saliendo también a velocidad constante.
- c. *Evaporador vertical con circulación natural.* En este tipo se usan tubos verticales en lugar de horizontales y el líquido está dentro de los tubos, por lo que el vapor se condensa en el exterior. Debido a la ebullición y a la disminución de densidad, el líquido se eleva en los tubos por circulación natural, tal como se muestra en la Fig. 1b, y fluye hacia abajo a través de un espacio central abierto grande o en bajada. Esta circulación natural incrementa el coeficiente de transferencia de calor. No es útil con líquidos viscosos. A este equipo se le llama con frecuencia *evaporador de tubos cortos*. Una variación de este modelo es el evaporador de canasta, en el que se usan tubos verticales, pero el elemento de calentamiento se "cuelga" en el cuerpo, de tal manera que existe un espacio anular que sirve de bajada. El modelo de canasta difiere del evaporador vertical de circulación natural, pues éste tiene un espacio central en vez del anular como bajada. Este tipo se usa con frecuencia en las industrias del azúcar y sal.
- d. *Evaporador vertical de tubos largos.* Puesto que el coeficiente de transferencia de calor del lado del vapor es muy alto en comparación con el lado de la solución líquida que se evapora, es conveniente contar con velocidades altas para la solución líquida. En un evaporador de tipo vertical con tubos largos como el que se muestra en la Fig. 1c., la solución líquida está en el interior de los tubos. Los tubos tienen 3 a 10 m de longitud y la formación de burbujas de vapor en su interior produce una acción de bombeo que ayuda a obtener velocidades de líquido muy altas. Por lo general, la solución líquida pasa por los tubos una sola vez y no se recircula. Los tiempos de contacto suelen ser bastante bajos en este modelo. En algunos casos, como cuando la relación de velocidad de alimentación

a velocidad de evaporación es baja, puede emplearse una recirculación natural del producto a través del evaporador, añadiendo una conexión de tubería entre la salida del concentrado y la línea de alimentación. Este es un método muy común en la producción de leche condensada.

- e. *Evaporador de caída de película.* Una variación del modelo de tubos largos es el evaporador de caída de película, en el cual el líquido se alimenta por la parte superior de los tubos y fluye por las paredes de éstos en forma de película delgada. Por lo general, la separación vapor-líquido se efectúa en el fondo. Este modelo se usa mucho para la concentración de materiales sensibles al calor como el jugo de naranja y otros zumos de frutas, debido a que el tiempo de retención es bastante bajo (entre 5 y 10 segundos) y el coeficiente de transferencia de calor es alto.
- f. *Evaporador de circulación forzada.* El coeficiente de transferencia de calor de la película líquida puede aumentarse por bombeo causando una circulación forzada del líquido en el interior de los tubos. Esto puede hacerse en el modelo de tubos verticales largos de la Fig. 1c añadiendo una tubería conectada a una bomba entre las líneas de salida del concentrado y la de alimentación. Sin embargo, los tubos de un evaporador de circulación forzada suelen ser más cortos que los del tipo de tubos largos, tal como se observa en la Fig. 1d. Además, en otros casos se usa un intercambiador de calor horizontal externo e independiente. Este modelo es muy útil para líquidos viscosos.
- g. *Evaporador de película agitada.* La principal resistencia a la transferencia de calor en un evaporador corresponde a la solución líquida. Un método para aumentar la turbulencia de la película líquida y, por tanto, el coeficiente de transferencia de calor, consiste en una agitación mecánica de dicha película. Esto se lleva a cabo en un evaporador de caída de película modificado, usando un solo tubo grande enchaquetado que contiene un agitador interno. El líquido penetra por la parte superior del tubo y a medida que fluye hacia abajo se dispersa en forma de película turbulenta por la acción de aspas de agitación verticales. La solución concentrada sale por el fondo y el vapor pasa por un separador para salir por la parte superior. Este tipo de evaporador es muy práctico para materiales muy viscosos, pues el coeficiente de transferencia de calor es mayor que en los modelos de circulación forzada. Se usa para materiales viscosos sensibles al calor tales como los jugos de frutas. Sin embargo, tiene un costo alto y la capacidad baja.

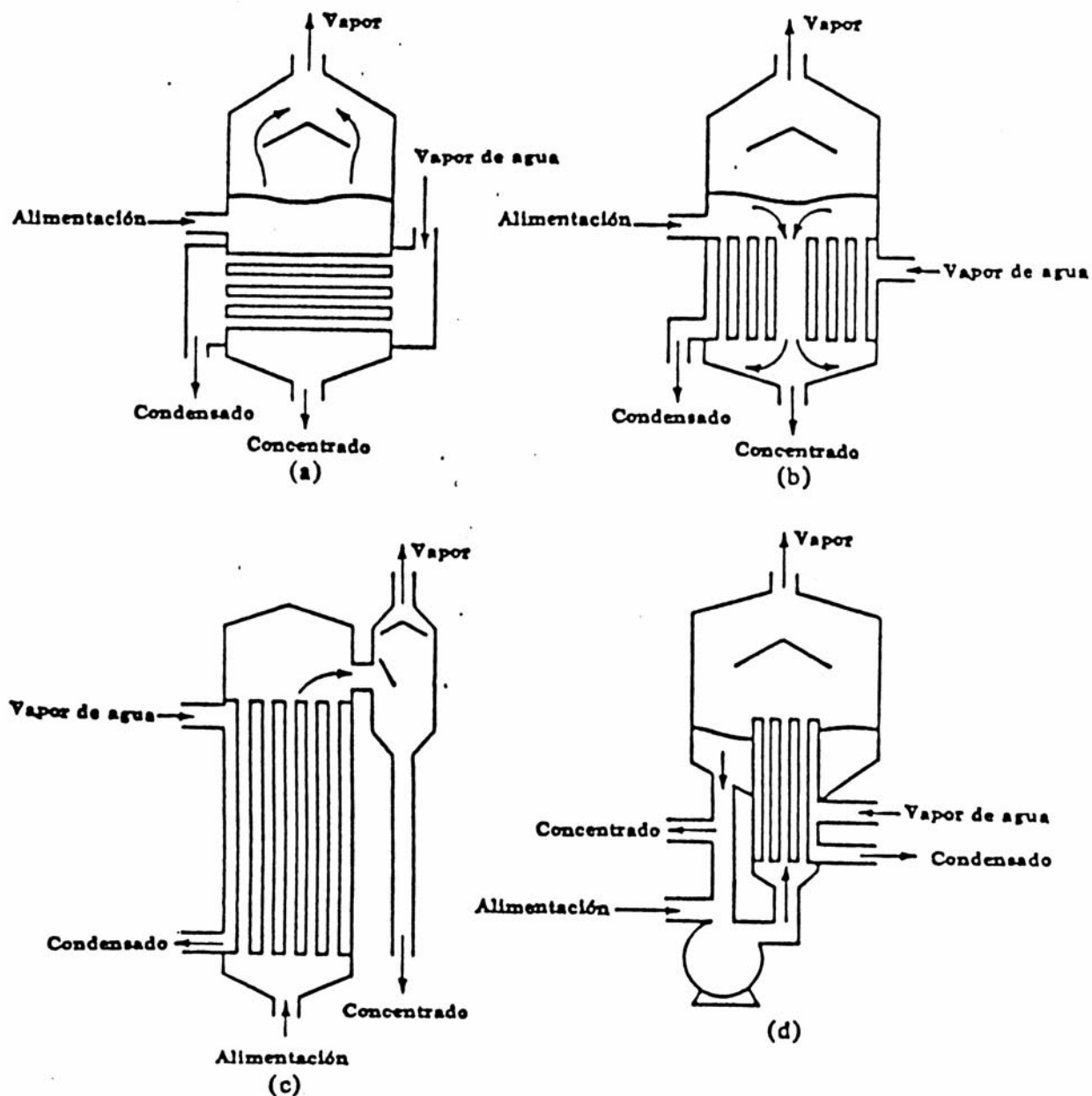


FIGURA 1 - Diferentes tipos de evaporadores: (a) de tubos horizontales, (b) de tubos verticales, (c) de tubos largos verticales, (d) de circulación forzada

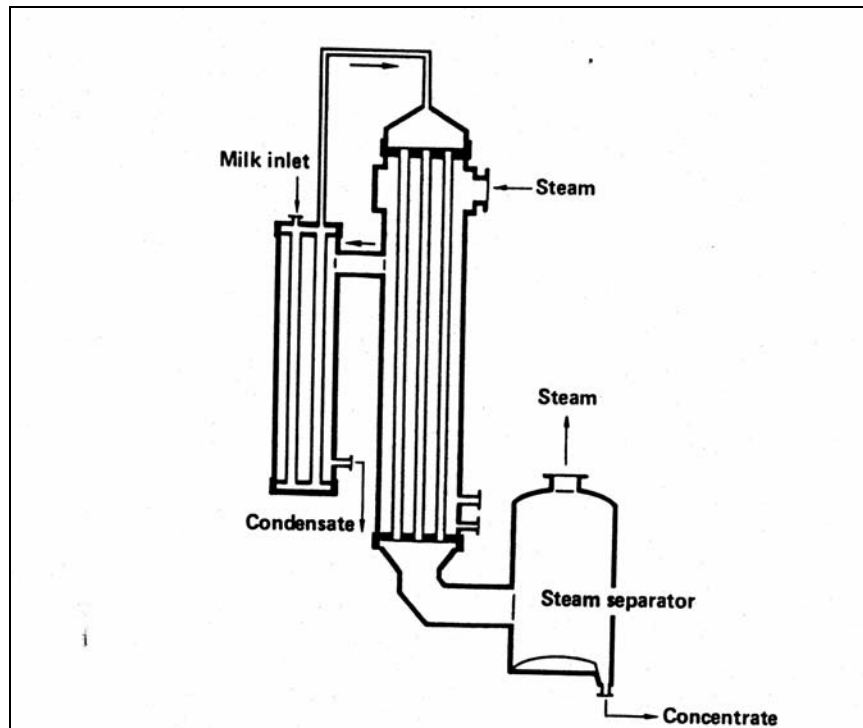


Fig. Falling-film evaporator

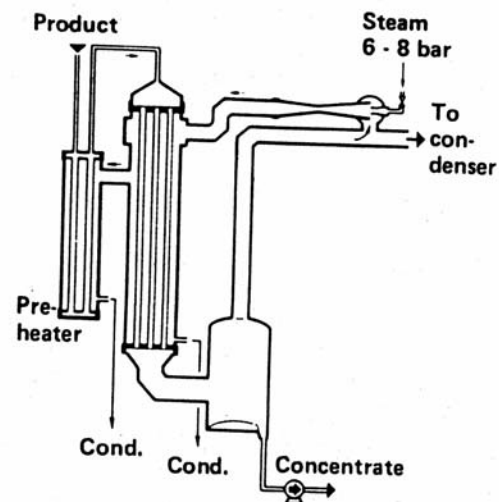
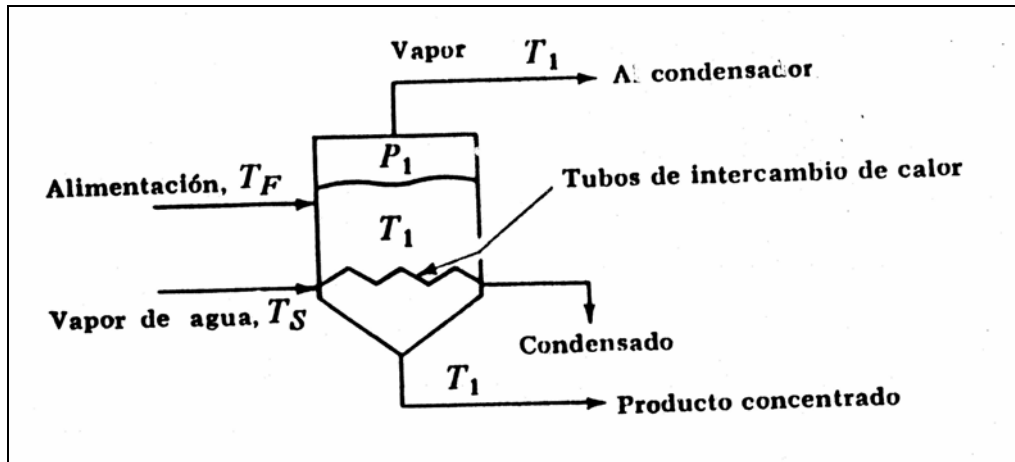


Fig. Falling-film evaporator with thermocompressor

#### 4. Métodos de operación para evaporadores

- a. *Evaporadores de efecto simple.* (Fig. 2). Los evaporadores de efecto simple se usan cuando la capacidad de operación requerida es bastante pequeña y/o el costo del vapor de agua es relativamente bajo. Sin embargo, para operaciones de gran capacidad, el uso de más de un efecto reduce de manera notable los costos de vapor de agua.



**Fig. 2 – Diagrama simplificado de un evaporador de efecto simple.**

- b. *Evaporadores de efecto múltiple con alimentación hacia adelante,* (Fig. 3). Un evaporador de efecto simple desperdicia bastante energía, pues el calor latente del vapor producido no se utiliza en ninguna forma. No obstante, una buena parte de este calor latente puede recuperarse y utilizarse al emplear evaporadores de efecto múltiple.

De manera aproximada, en un evaporador de triple efecto se evaporarán 3 Kg de agua por cada Kg de vapor de agua utilizado. Por consiguiente, el resultado es un aumento de la *economía de vapor de agua*, la cual es Kg de agua evaporada/Kg de vapor utilizado. Esto también resulta cierto en forma aproximada para más de tres efectos. Sin embargo, este aumento de la economía de vapor de agua en un evaporador de efecto múltiple se logra a expensas de un mayor costo de inversión en el equipo.

En la operación de alimentación hacia adelante que se muestra en la Fig. 3, la alimentación se introduce en el primer efecto y fluye hacia el siguiente en la misma dirección del flujo del vapor. Este es el método de operación que se emplea cuando la alimentación está caliente o cuando el producto concentrado final puede dañarse a temperaturas elevadas. Las temperaturas de ebullición van disminuyendo de efecto a efecto. Esto significa que, si el primer efecto está a  $P_1 = 1$  atm abs de presión, el último estará al vacío, a presión  $P_3$ .

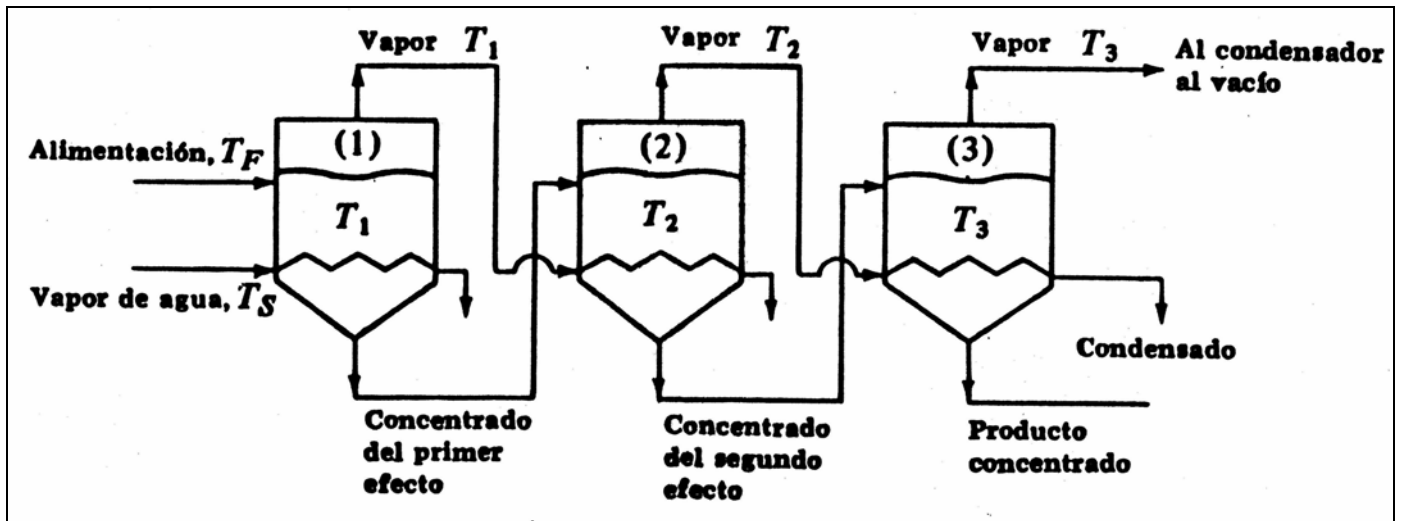


Fig. 3 – Diagrama simplificado de un evaporador de efecto simple con alimentación hacia delante.

- c. *Evaporadores de efecto múltiple con alimentación en retroceso*, (Fig. 4). En la operación de este tipo de evaporadores de efecto múltiple la alimentación entra en el último efecto, que es el que está más frío, y continúa hacia atrás hasta que el producto concentrado sale por el primer efecto. Este método de alimentación en retroceso tiene ventajas cuando la alimentación está fría, pues la cantidad de solución líquida que debe calentarse a temperaturas más altas del segundo y primer efectos es más pequeña. Sin embargo, es necesario usar bombas en cada efecto, pues el flujo va de baja a alta presión. Este método también es muy útil cuando el producto concentrado es bastante viscoso. Las altas temperaturas de los primeros efectos reducen la viscosidad y permiten coeficientes de transferencia de calor de un valor razonable.

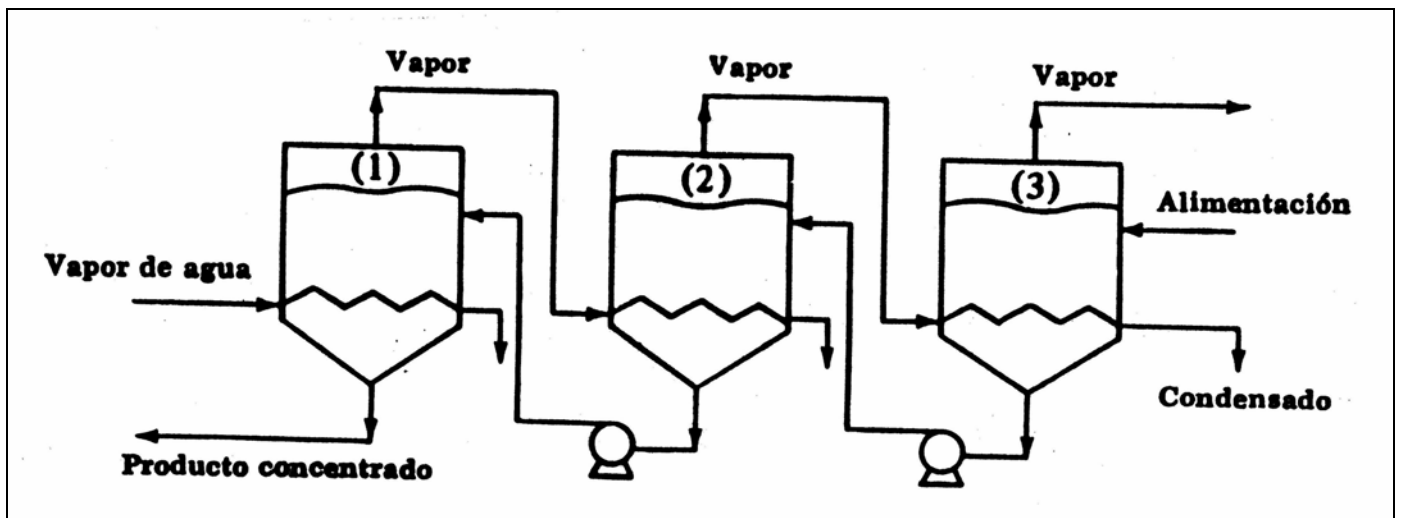


Fig. 4 – Diagrama simplificado de un evaporador de efecto triple con alimentación en retroceso.

- d. *Evaporadores de efecto múltiple con alimentación en paralelo.* La alimentación en paralelo en los evaporadores de efecto múltiple implica la adición de alimentación nueva y la extracción de producto concentrado en cada uno de los efectos. El vapor de cada efecto continúa usándose 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.

