



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Diseño de un evaporador de simple efecto

Apellidos, nombre	Ortolá Ortolá María Dolores ^{1,2} (mdortola@tal.upv.es) Fito Suñer Pedro ^{1,2} (pedfisu@tal.upv.es) Castro Giráldez Marta ^{1,2} (marcasgi@upv.es) Tomas Egea, Juan Ángel ² (juatomeg@upv.es)
Departamento	¹ Departamento de Tecnología de los Alimentos ² Instituto de Ingeniería de los Alimentos para el Desarrollo
Centro	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a establecer las relaciones entre las variables que intervienen en un proceso de evaporación, planteando, para ello, balances de materia, energía y la ecuación de transporte de calor a través de la pared.

Estas relaciones permiten, a partir de unas variables preestablecidas, diseñar un evaporador y conocer las variables de salida.

2 Introducción

La evaporación es una operación unitaria presente en diversos procesos alimentarios, cuyo objetivo es la eliminación parcial del disolvente contenido en una disolución.

Habitualmente, el disolvente es agua, con lo que, al eliminar parte del agua contenida en el alimento, se obtiene un producto más concentrado. Ejemplos de industrias alimentarias que utilizan la evaporación en su proceso pueden ser: obtención de zumos concentrados de frutas, concentrados de tomate, leche evaporada o concentrada, etc.

Un buen diseño del evaporador permite correlacionar todas las variables que intervienen en el proceso para conocer y determinar qué y cuánto producto se va a obtener con unas determinadas características (por ejemplo, concentración en sólidos).

3 Objetivos

En este artículo docente se plantea el diseño de un evaporador de efecto simple, estableciendo las relaciones entre las distintas variables que intervienen en el proceso.

4 Desarrollo

4.1 Variables en el proceso

Recordemos que un evaporador es un intercambiador de calor donde el fluido caliente, generalmente vapor de agua a alta presión cede calor latente de condensación al fluido frío, la disolución diluida (el alimento a concentrar). La ganancia de calor por parte de la disolución permite la evaporación de parte del agua, saliendo el alimento más concentrado.

Por tanto, un evaporador consta, esencialmente, de dos cámaras, la cámara de condensación y la cámara de evaporación. En la de condensación, un vapor de agua condensa, cediendo calor latente de condensación a la cámara de evaporación a través de la pared que las separa. El agua contenida en el alimento se evapora a la temperatura de ebullición, al mismo tiempo que se obtiene una corriente de solución concentrada.

La figura 1 muestra un esquema de un evaporador con las variables implicadas en el proceso.

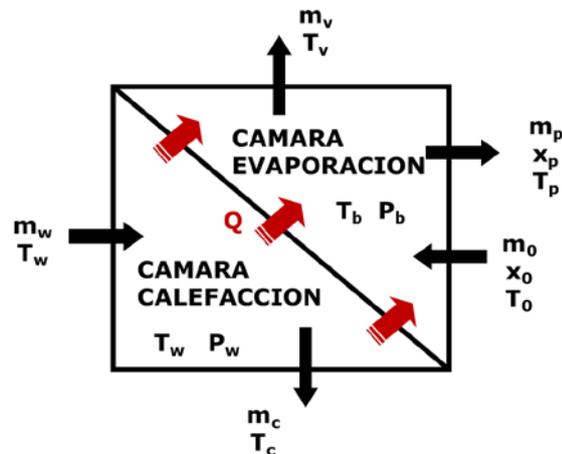


Figura 1. Esquema de las variables de proceso en un evaporador

Donde hemos identificado cada una de las corrientes de entrada o salida con un subíndice:

- w: entrada de vapor de calefacción
- c: salida de condensado
- 0: disolución de entrada (alimento diluido)
- p: disolución de salida (alimento concentrado)
- v: salida de disolvente evaporado

De esta forma, cada una de las corrientes tiene sus propias variables:

- T: temperatura
- m: caudal másico
- x: fracción másica (de agua o de solutos)

Además, las cámaras de calefacción y evaporación estarán a una presión (P_w y P_b) que definirán su correspondiente temperatura de condensación (T_w) y ebullición (T_b).

Por último, a través de la pared del intercambiador se establece un flujo de calor (Q).

Ya tenemos identificadas todas las variables del proceso, pero

¿cómo podemos relacionarlas entre sí?

Los balances de materia y energía en el sistema y la ecuación de transporte de calor a través de la pared, nos van a permitir establecer relaciones entre las variables y, por tanto, fijando algunas de ellas establecer qué valores tomarán el resto. O, dicho de otra forma, estas relaciones nos permitirán el diseño de la operación de evaporación.

4.2 Balances de materia

Antes de empezar a plantear los balances de materia, hay que fijar los **límites del sistema**. De esta forma podríamos plantear balances en el sistema completo (todo el evaporador) o en cada una de las cámaras (calefacción o evaporación).

4.2.1 Balance de materia en todo el evaporador

En la ecuación (1) se plantea el balance de materia total en el evaporador:

$$m_w + m_0 = m_p + m_v + m_c \quad (1)$$

En cada una de las corrientes, habíamos definido una de las variables como x , fracción másica de sólidos (kg sólidos/kg total), por lo que también podemos plantear balance de materia de algún componente, por ejemplo, sólidos (ecuación 2) o agua (ecuación 3).

$$m_0 x_0 = m_p x_p \quad (2)$$

$$m_w + m_0(1 - x_0) = m_p(1 - x_p) + m_v + m_c \quad (3)$$

Fijate que las ecuaciones (2) y (3) son linealmente dependientes, y, por tanto, podemos plantear una u otra para resolver el sistema.

4.2.2 Balance de materia en la cámara de calefacción

Si definimos los límites del sistema sólo teniendo en cuenta la cámara de calefacción, el balance de materia total queda como en la ecuación (4):

$$m_w = m_c \quad (4)$$

Combinando la ecuación (1) y la (4), el balance de materia total queda (ecuación 5):

$$m_0 = m_p + m_v \quad (5)$$

4.3 Balance de energía

Para plantear los balances de energía hay que considerar que cada una de las corrientes de entrada y salida lleva asociada una energía, definida a través de su entalpía. Vamos a nombrar la entalpía de cada corriente como H (si la corriente es un disolvente puro en estado de saturación) y h (cuando la corriente no es un disolvente puro o no está en condiciones de saturación). En el sistema internacional, la entalpía tendrá unidades de energía (J o kJ) por unidad de masa (g o kg).

Al igual que hemos hecho en el planteamiento de balances de materia, vamos a plantear balances de energía, teniendo en cuenta dos sistemas, en todo el evaporador y en la cámara de calefacción.

4.3.1 Balance de energía en todo el evaporador

Teniendo en cuenta las corrientes de entrada y salida en el evaporador y considerando que:

- la corriente de vapor de calefacción, la corriente de condensado y la corriente de vapor de disolvente son corrientes de disolventes puros (agua) a la temperatura de saturación.
- la corriente de disolución diluida y la corriente de disolución concentrada no son corrientes de disolvente puro

el balance de energía viene expresado por la ecuación (6):

$$H_w m_w + h_0 m_0 = h_p m_p + H_v m_v + H_c m_c \quad (6)$$

En este balance necesitamos conocer el valor de las entalpías, por lo que:

¿Cómo determinar el valor de las entalpías de cada una de las corrientes?

Si la corriente es un disolvente puro en condiciones de saturación, la bibliografía nos ofrece tablas de propiedades de disolventes puros, entre las que podemos encontrar el valor de su entalpía. Ya hemos comentado anteriormente, que en la mayoría de las industrias agroalimentarias se utiliza vapor de agua a alta presión como elemento calefactor y el disolvente evaporado del alimento es, en la mayoría de casos agua, por lo que podemos consultar el valor de la entalpía de agua teniendo en cuenta las distintas condiciones en las que se encuentra en cada una de las corrientes:

- Vapor de calefacción (H_w): agua en estado de vapor a la temperatura de saturación (T_w)
- Corriente de condensado (H_c): agua en estado líquido a la temperatura de saturación ($T_w = T_c$)
- Disolvente evaporado (H_v): agua en estado de vapor a la temperatura de ebullición (T_v) correspondiente a la presión en la cámara de evaporación.

Puedes consultar estas propiedades en:

<http://personales.unican.es/rene/doc/Trasp%20WEB/Trasp%20Termo%200y%20MF/00%20GRADOS/Tablas%20Termo.pdf>.

Si la corriente no es un disolvente puro en condiciones de saturación (corrientes de disolución diluida ($i=0$) o concentrada ($i=p$)), la entalpía puede calcularse a partir de su calor específico (c_p) y temperatura (T), según la ecuación (7).

$$h_i = c_{pi}(T_i - T_{ref}) \quad (7)$$

siendo T_{ref} : 0°C ó 273°K.

En los alimentos, el calor específico es una propiedad difícil de cuantificar, pues depende fundamentalmente del contenido en agua del alimento. En la práctica, se suelen utilizar ecuaciones empíricas para la predicción del calor específico en función de la concentración de soluto en la solución.

4.3.2 Balance de energía en la cámara de calefacción

Si establecemos los límites del sistema sólo en la cámara de calefacción, el balance de energía es (ecuación 8):

$$H_w m_w = H_c m_c + Q \quad (8)$$

Reordenando la ecuación y teniendo en cuenta la ecuación (4), tenemos (ecuación 9):

$$Q = m_w (H_w - H_c) \quad (9)$$

Ecuación que nos indica que el flujo de calor que atraviesa la pared del intercambiador equivale al calor latente de condensación del vapor de calefacción, es decir, la diferencia entre H_w y H_c .

4.4 Casos especiales

En algunos casos, se producen variaciones en las condiciones de las corrientes y que hay que tener en cuenta cuando se plantean los balances de materia y energía. Estas variaciones pueden ser:

- el vapor de calefacción entra sobrecalentado
- el condensado sale del evaporador subenfriado
- el disolvente contenido en la disolución sufre un aumento ebulloscópico como consecuencia de su composición

Vamos a ver cómo afectan estos cambios en los balances.

4.4.1 Vapor de calefacción sobrecalentado

El vapor de calefacción sobrecalentado está a una temperatura superior a la de saturación ($T_w > T_{ws}$), por lo que, al entrar en el evaporador, primero perderá calor sensible, hasta alcanzar la temperatura de condensación, y luego perderá calor latente de condensación.

En este caso, la entalpía de la corriente de entrada (h_w) puede calcularse como (ecuación 10):

$$h_w = H_{ws} + c_{pw}(T_w - T_{ws}) \quad (10)$$

Donde:

- H_{ws} : entalpía del vapor saturado a la temperatura de saturación (T_{ws})
- c_{pw} : calor específico del vapor de agua (1,92 kJ/kg°C)

4.4.2 Condensado subenfriado

Cuando todo el vapor de calefacción se condensa, y por tanto ha cedido el calor latente de condensación, y continúa circulando por el evaporador, pierde calor sensible, por lo que al salir su temperatura es inferior a la de saturación ($T_c < T_{ws}$). En este caso, también su entalpía será menor (h_c), calculándose según la ecuación (11):

$$h_c = H_{cs} - c_{pc}(T_{ws} - T_c) \quad (11)$$

donde:

- H_{cs} : entalpía del agua líquida a la temperatura de saturación (T_{ws})
- c_{pc} : calor específico del agua líquida (4,18 kJ/kg°C)

4.4.3 Aumento ebulloscópico

Hasta ahora hemos considerado que la temperatura de ebullición del disolvente correspondía a la temperatura de saturación del agua relacionada con la presión existente en la cámara de evaporación.

Sin embargo, en soluciones acuosas, la temperatura de ebullición no sólo depende de la presión, sino también de la cantidad de soluto que contienen. De esta forma, a medida que aumenta la concentración de solutos, aumenta la temperatura de ebullición del disolvente (aumento ebulloscópico).

En el diseño de evaporadores, sobre todo cuando se trabaja con disoluciones relativamente concentradas, la determinación del aumento ebulloscópico es importante para determinar las temperaturas de salida del disolvente (T_v) y la de salida de la disolución concentrada (T_p).

4.5 Ecuación de velocidad de transmisión de calor

Por otra parte, podemos establecer el flujo de calor a través de la pared del intercambiador como (ecuación 12):

$$Q = UA\Delta T = UA(T_w - T_b) \quad (12)$$

Siendo:

- U: coeficiente global de transmisión de calor, relacionado con la inversa de las resistencias que se oponen al paso del calor
- A: área de transmisión de calor
- ΔT : diferencia de temperaturas a ambos lados de la pared, es decir, la fuerza impulsora para la transmisión de calor.

5 Ejercicio práctico

Para comprobar que realmente has aprendido intenta resolver este problema:

En un evaporador de película ascendente de circulación forzada (un solo efecto y una sola etapa) se concentran 2000 l/h de café recién extraído con agua caliente a 60 °C.

Se pretende alcanzar una humedad final en peso en la disolución del 50%. Para realizar la evaporación se utilizará vapor saturado a 115°C.

Tras la etapa de evaporación:

¿Qué cantidad de café concentrado se obtendrá?

¿Qué cantidad de agua en kg/s, se eliminará en esta operación?

¿Qué superficie de transmisión hará falta en el evaporador?

Datos: $\rho_{\text{café}} = 1053 \text{ kg/m}^3$; $x_{s \text{ inicial}} = 0.1 \text{ kg}_s/\text{kg}_{\text{mt}}$; $c_{p\text{café}} = 3.99 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

Temperatura de evaporación del café 90°C. $U = 2700 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$

6 Resumen

A lo largo de este artículo docente hemos visto:

- qué corrientes intervienen en un proceso de evaporación y en qué condiciones se encuentran (variables de proceso)
- cómo podemos, planteando balances de materia y energía en el sistema, correlacionar dichas variables
- cómo podemos llegar a determinar el tamaño del intercambiador (área de intercambio) necesario planteando, además, la ecuación de transmisión de calor a través de la pared.

7 Bibliografía

7.1 Libros:

[1] Brennan, J. G., Butters, J. G., Cowell, N. D., Lilley, A. E. V. (1998). Las operaciones de la ingeniería de los alimentos, 3ª. Edición. Editorial Acribia, Zaragoza.

[2] Brennan, J. G. (2006). Manual del procesado de los alimentos. Ed. Acribia, Zaragoza

[3] Casp, A., Abril Requena, J. (2003). Procesos De Conservación De Alimentos. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.

[4] Renedo Estébanez C.J. Tablas Propiedades del agua saturada. Disponible en: <http://personales.unican.es/reneDOC/Trasp@rencias%20WEB/Trasp%20Termo%20y%20MF/00%20GRADOS/Tablas%20Termo.pdf>. Fecha consulta: junio 2018

[5] Singh, R., Heldman, D. R. (1997). Introducción a la ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia, Zaragoza.