



Programa de la asignatura:

Operaciones unitarias I

U2 | Operaciones unitarias de transferencia de calor



DCSBA



BIOTECNOLOGÍA



Índice

Presentación de la unidad.....	2
Propósito de la unidad.....	3
Competencia específica.....	4
2.1. Fundamentos de transferencia de calor en evaporadores.....	4
2.1.1. Entalpia de líquidos y vapores.....	15
2.1.2. Evaluación de la temperatura de ebullición de la solución.....	20
2.1.3. Coeficiente de transmisión de calor.....	24
2.2. Clasificación de evaporadores.....	27
2.2.1. Evaporador de simple efecto.....	31
2.2.2. Evaporadores de circulación natural.....	33
2.2.3. Evaporadores de circulación forzada.....	35
2.2.4. Evaporadores de tubos largos.....	36
2.2.5. Evaporadores de placas.....	38
2.3. Evaporadores de múltiple efecto.....	41
2.3.1. Aprovechamiento del calor.....	42
2.3.2. Sistemas de circulación de las corrientes.....	44
2.3.3. Modelo matemático y su resolución.....	46
2.3.4. Procedimiento de cálculo.....	47
2.3.5. Problemas resueltos.....	49
Actividades.....	51
Autorreflexiones.....	52
Cierre de la unidad.....	52
Para saber más.....	53
Fuentes de consulta.....	54



Presentación de la Unidad

¿Qué es la evaporación? ¿Existe en la naturaleza algún fenómeno que se relacione con la evaporación? ¿Qué factores influyen en ésta?

Cada año gran parte del agua que se encuentra en la tierra en forma líquida vuelve a la atmósfera como vapor, esto se debe a la absorción de energía térmica por las moléculas de las masas de agua, lo cual origina la transformación del estado líquido a gas. A este fenómeno se le ha llamado evaporación.

Es importante señalar que los procesos de transmisión de calor acompañados por un cambio de fase son más complejos que el simple intercambio de calor entre fluidos.

“Un cambio de fase implica la adición o substracción de cantidades considerables de energía calorífica a temperatura constante, se ha tratado de una forma general la transmisión de calor a un líquido en ebullición. Un caso especial ocurre con tanta frecuencia que se considera como una operación individual, que se denomina evaporación” (Mc Cabe, Smith & Harriott, 2003).

La evaporación es una operación unitaria que tiene como objeto primordial concentrar una disolución compuesta por un soluto no volátil y un disolvente volátil. En la gran mayoría de los evaporadores el disolvente es el agua. Por ejemplo, en la evaporación de salmuera para la producción de sal, es común la separación entre evaporación y cristalización; este proceso dista mucho de ser limpio. En la evaporación, el producto valioso, es el líquido concentrado, mientras que el vapor se condensa y algunas veces es desechado. A lo largo de esta unidad conoceremos más aplicaciones sobre los evaporadores.

En el desarrollo de esta unidad podrás encontrar estos factores del proceso de evaporación, así como los balances de materia y energía que nos permitirán describir esta operación unitaria y su funcionamiento.

En esta unidad nos daremos cuenta que el objetivo de la evaporación es concentrar una solución entre un soluto no volátil y un disolvente volátil; conocerás ecuaciones que te permitirán determinar la transferencia de calor a través de la superficie sólida del evaporador, así como la masa y el calor que se transfiere. Podrás distinguir las diferentes clases y tipos de evaporadores, sus principales características y aplicaciones con la finalidad de que te familiarices con ellas, enfatizando que permanentemente debes actualizarte en este campo.

Al final de la unidad se presentan los procedimientos y cálculos de algunos ejemplos prácticos relacionados con evaporadores.



Propósitos de la unidad



Al término de la unidad dos podrás:

- Distinguir la importancia de la evaporación en los procesos industriales de alimentación y generación de productos químicos;
- Conocer los tipos de evaporadores; así como, identificarás las clases y características de la evaporación;
- Reconocer los equipos de evaporación más utilizados en la industria, y
- Aplicar en las actividades las ecuaciones referentes a los balances de energía en la evaporación.

Asimismo, esta unidad te permitirá conocer la relación de los conocimientos previos adquiridos en la termodinámica y en los balances de materia y energía para entender los procesos de intercambio de calor que ocurren en un evaporador o en el proceso de cristalización.



Competencia específica



Resuelve ecuaciones de los fenómenos y procesos involucrados en la transferencia de energía a través del análisis de los métodos de transmisión de calor, sus parámetros y variables para determinar resultados aplicables a situaciones reales de operaciones unitarias.

2.1. Fundamentos de transferencia de calor en evaporadores

Todos hemos escuchado hablar de calor y sabemos que el calor es energía en tránsito. El flujo de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura; esto sucede cuando un cuerpo, sólido o un fluido, está a una temperatura diferente de la de su entorno, lo cual genera la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor.

Este fenómeno físico se utiliza con frecuencia en equipos industriales; lo podemos identificar en los intercambiadores de calor, en donde el calor transmitido puede ser calor latente, el cual va acompañado de un cambio de fase, tal como la vaporización o la condensación. Recuerda: cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos cercanos uno del otro, la transferencia de calor no puede ser detenida, sólo puede hacerse más lenta.

Podemos observar esto en algunos fenómenos industriales, por ejemplo, cuando una barra de acero se calienta a fuego lento a una temperatura de 200°C, la barra tiende a perder su dureza y a concentrar calor. Durante este fenómeno, podemos hacernos las siguientes preguntas:

- ¿Qué es la transferencia de calor?



- ¿Existe alguna relación entre los conocimientos adquiridos entre la termodinámica y los balances de materia y energía?
- ¿Existen algunas ecuaciones que describan la transferencia de calor en evaporación?
- ¿En qué procesos industriales se presenta?

La transferencia de calor se lleva a cabo en muchas actividades cotidianas desde la preparación de un café, cuando se transmite el calor del agua a la cerámica, hasta su identificación en equipos muy sofisticados para la producción de alimentos. Asimismo, se presenta en procesos industriales para la elaboración de sustancias químicas.

En la **figura 1** observa cómo se realiza la transferencia de calor en un **condensador**, el cual contiene agua; en ella se lleva a cabo un movimiento de partículas debido al calor que es transmitido.

Recuerda que cuando se produce una transferencia de calor, se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura.

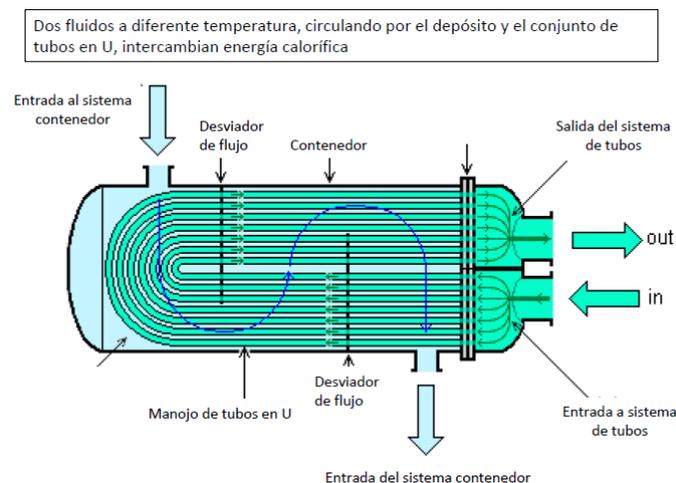


Figura 1. Intercambiador de calor. *En Laboratorios de Colombia S.A.S.* (2011). Recuperado de http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=3132

Ahora comencemos a platicar sobre el Coeficiente total de transferencia de calor.

En operaciones unitarias, la transferencia de energía térmica o calor entre dos cuerpos diferentes por conducción requiere del contacto con las moléculas de ambas materias. Ahí, las partículas del cuerpo caliente o fluido se mueven más rápidamente por tener más energía; chocan con las partículas del segundo cuerpo que se encuentra en la zona de



contacto, aumentando su movimiento y, por lo tanto, su energía. El movimiento de estas partículas se transmite rápidamente a las restantes de cuerpo, aumentando la energía contenida en el segundo cuerpo.

Recuerda que el segundo principio de la termodinámica determina que el calor sólo puede fluir de un cuerpo más caliente a uno más frío; este fenómeno es explicado por la Ley de *Fourier* la cual relaciona el flujo entre las variaciones de la temperatura.

Observa la **figura 2** donde puedes percibir que cuando tenemos un fluido caliente, sus partículas se mueven más rápido; se separan más unos de otros y el fluido se hace menos denso y sube cuando enfriamos, se hace más denso y baja; de esta forma se crean unas corrientes verticales, las cuales son denominadas corrientes de convección. Estas corrientes tienden a distribuir, el calor por toda la masa del fluido.

En un fluido la mayor parte del calor es transportado de una parte a otra del cuerpo por el mismo fluido y se produce también desplazamiento de la masa de líquido o de gas, arrastrado por la corriente.

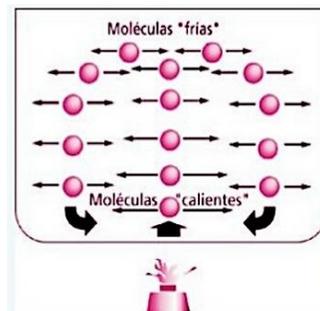


Figura 2. Transferencia de calor en un cuerpo caliente a uno frío (Pastor, M.A. 2009).

Por ejemplo, en un intercambiador de calor, en donde se transmite el calor en un cuerpo sólido, se calienta dicho cuerpo y las moléculas que reciben directamente el calor aumentan su vibración y chocan con las moléculas que las rodean; éstas a su vez harán lo mismo hasta que las moléculas del cuerpo se agiten.

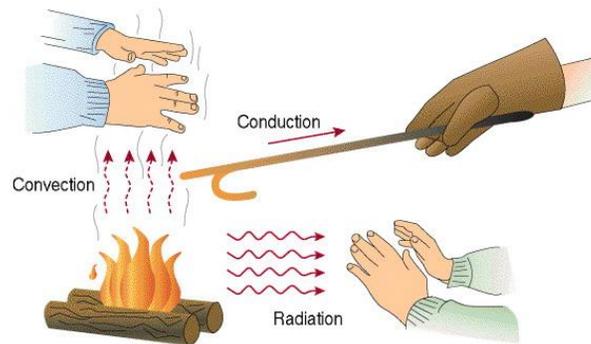


Figura 3. Transferencia de calor en una Barra metálica (Guzmán A, A. 2012). Recuperado de <http://adbeelaramguzmangurrola.blogspot.mx/2012/04/metodos-de-transferencia-de-calor>

Observa la **figura 3**, en ella el extremo de una barra metálica se calentó en una flama, transcurrió cierto tiempo hasta que el calor llegó al otro lado. Recordemos que el calor no se transmite con la misma facilidad por todos los cuerpos; hay materiales que son buenos conductores de calor.

El calor se propaga a través de un material que los conduce; distintos materiales conducen calor a diferentes velocidades. Cuando se calienta un cuerpo, las moléculas que reciben directamente el calor aumentan su vibración y chocan con las que las rodean; éstas, a su vez, hacen lo mismo con sus vecinas hasta que todas las moléculas del cuerpo se agitan.

La conductividad térmica de los evaporadores está determinada por la Ley de Fourier que determina la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada; es proporcional al área normal de la dirección del flujo de calor y el cambio de temperatura.

La Ley de Fourier es la piedra angular de la transferencia de calor por conducción, se define como la propiedad material importante, la conductividad térmica. Esta ley es una expresión vectorial que indica el flujo de calor normal a una isoterma y en la dirección de la temperatura decreciente. Finalmente, observa que la Ley de Fourier se aplica para toda la materia sin importar el estado de agregación de la materia (Incropera F.P; De Witt D.P, 1991).

El uso de la Ley de *Fourier* hace obligatorio el conocimiento de la conductividad térmica. Esta propiedad, a la que se hace referencia como propiedad de transporte, proporciona una indicación de la velocidad a la que se transfiere energía mediante el proceso de difusión, y depende de la estructura física de la materia, atómica y molecular, que se relaciona con el estado de agregación de la materia.



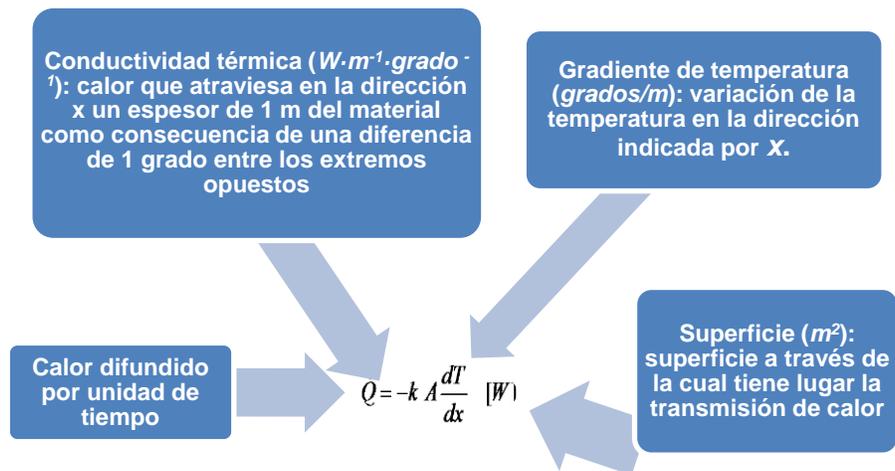
Para profundizar en el tema, te recomiendo que revises el capítulo 3 sobre *Procesos y variables de proceso* del Libro “Fundamentos de transferencia de calor” de Incropera, et al (1991).

Se sigue que, para un gradiente de temperatura establecido, el flujo de calor por conducción aumenta con el incremento de la conductividad térmica. Recuerda que la conductividad térmica de un sólido es mayor que la de un líquido, que, a su vez, es mayor que la de un gas.

La ecuación por conducción del calor se conoce como Ley de Fourier de Conducción de Calor (**figura 4**). El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente, y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando la temperatura disminuye con x creciente.

Ley de Fourier

Figura 4



Donde:

A = Área de la superficie isotérmica.

x = Distancia medida en dirección normal a la superficie

q = Velocidad de flujo de calor a través de la superficie en dirección normal de la misma

T = Temperatura



$k = \text{Constante de proporcionalidad}$

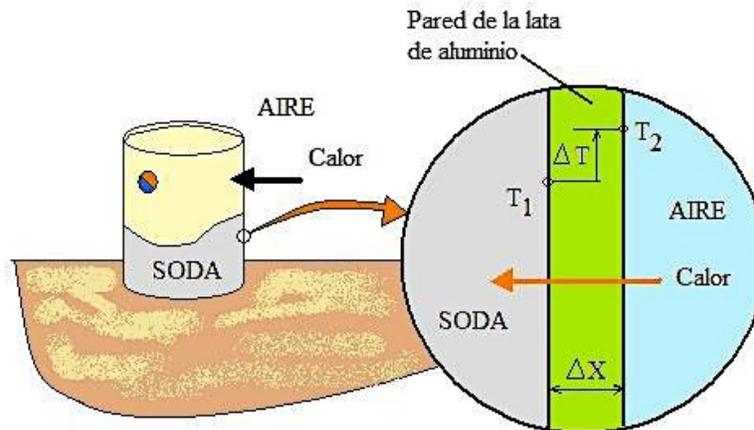


Figura 5. Riquelme, C.Y. (2011).

En la **figura 5** se muestra a la conducción. Es el modo de transferencia térmica en el que el calor se mueve o viaja desde una capa de temperatura elevada, a otra capa de inferior temperatura, debido al contacto directo de las moléculas del material. La relación que existe entre la velocidad de transferencia térmica por la conducción y la distribución de temperatura en el sistema depende de las características geométricas y las propiedades de los materiales que lo constituyen obedeciendo a la Ley de Fourier.

Cuando una placa metálica se encuentra en equilibrio termodinámico resulta que el flujo de calor U , es la temperatura en cada punto de este permanece constante y el proceso se denomina transmisión en régimen estacionario y el flujo de calor es función de la propiedad de los materiales denominados conductividad.

Los evaporadores son equipos donde la única operación que implica la transferencia de materia está regida por la transmisión de calor que simultáneamente produce; esto debido a que la pared de calefacción supone la mayor parte de los costos de construcción, de ahí la relevancia de conocer la Ley de Fourier para determinar su conductividad térmica.

Es importante mencionar que su principal función es eliminar el vapor formado por ebullición de una solución líquida de la que se obtiene una solución más concentrada. Generalmente consiste en la eliminación de agua de una solución acuosa. En la industria puedes observar el uso de evaporadores, para la concentración de soluciones acuosas como el azúcar, el cloruro de sodio, la glicerina, la leche y el jugo de naranja o para la obtención de agua potable por evaporación de agua de mar.



A diferencia de la olla en un evaporador se debe de tomar en cuenta los factores que influyen para su calentamiento. Entre los que destacan: la naturaleza del líquido que se va a evaporar, la cantidad de líquido, la cantidad de calor suministrado y aprovechado, así como los factores externos, tales como revisar en el lugar donde se instalará el evaporador, la humedad, la temperatura ambiental, la presión y la concentración inicial.

¿Existen coeficientes totales de transferencia de calor en los evaporadores? ¿Cómo puedes determinar la cantidad de calor que se transfiere en un evaporador? ¿Qué condiciones o variables están involucradas en la transferencia de calor?

La transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío, como resultado de la segunda ley de la termodinámica. Es importante recordar que el coeficiente global se obtiene a partir de los coeficientes individuales y de la resistencia de la pared del tubo.

El coeficiente total es influenciado grandemente por la presencia en el sistema, puesto que el volumen de vapor de las burbujas es menor a alta presión que a presión baja. De manera que puedan espesarse mayores coeficientes de la primera condición. En la industria el valor base del coeficiente total se varía debido a problemas especiales sugeridos por el análisis químico del agua y al cambio de la línea de competencia entre los manufactureros, tal y como lo señala Mc Cabe, et al (2003).



Para profundizar en el tema, te invito a que revises las páginas 446-447 sobre Entalpía de evaporadores del Libro "Operaciones básicas de ingeniería química" de Mc Cabe et al. (2003).

Comenzaremos con la tasa de transferencia de calor en evaporación

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T + \text{Pérdida}$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura entre el vapor de agua que condensa y el líquido a ebullición.

El Coeficiente de transferencia de calor es un término que relaciona las propiedades termodinámicas de un fluido con las resistencias que existen al flujo de calor en un intercambiador. En la **figura 6** del intercambiador de calor puedes observar que el



Coeficiente global de transferencia de calor se encuentra influenciado por el diseño y la forma de operación del evaporador.

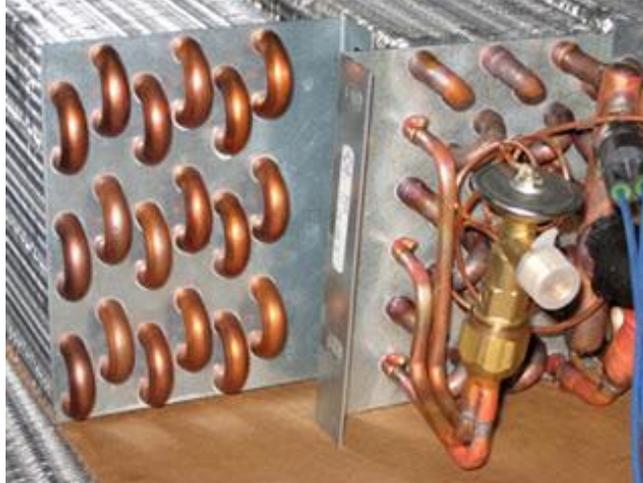


Figura 6. Intercambiador de calor (Benítez, S.P 2011) Recuperado de http://spanish.air-cooled-heatexchangers.com/china-oem_aluminium_fin_type_water_cooled_copper_tube_heat_exchanger_for_air_conditioning_unit-642063.html

De tal forma que, la resistencia global a la transferencia de calor entre el vapor de agua y el líquido en ebullición son la suma de cinco resistencias individuales: la resistencia de la película de vapor, las dos resistencias de las costras, interior y exterior de los tubos, la resistencia de la pared del tubo, y la resistencia del líquido en ebullición.

El coeficiente global se obtiene a partir de los coeficientes individuales y de la resistencia de la pared. Para el caso particular de conducción unidimensional observa la figura siguiente de la pared plana donde podrás observar que, en régimen estacionario, a través de una pared plana, de conductividad térmica constante y uniforme en la que se mantiene una temperatura constante cada una de las caras de la pared. La ecuación de velocidad de transmisión de calor a través de la pared de un tubo se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$\frac{dq}{dA_L} = \frac{K_m (T_{Wh} - T_{Wc})}{x_m}$$

Donde

$T_w - T_{wc}$ = Diferencia de temperatura a través de la pared del tubo

K_m = conductividad térmica de la pared

dq/dA_L = Densidad de flujo local de calor



Siendo e_p es el espesor de la pared y $T_1 - T_2$ es la diferencia de Temperaturas entre la cara de la pared más caliente y la cara más fría, de forma que $t_1 > t_2$

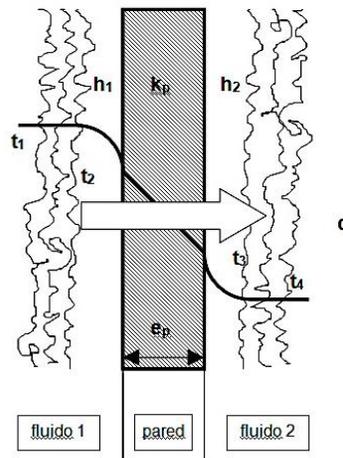


Figura 7. Coeficiente de global de transferencia de calor (abril, 2012).

Observa la **figura 7** en ella identifica la pared plana entre dos fluidos a distintas temperaturas; la cual se encuentra en régimen estacionario de transferencia de calor.

Para cada uno de los mecanismos de transmisión de calor analizados, por analogía eléctrica con la Ley de *Ohm*, podemos definir una resistencia térmica:

$R_1 = 1/h_1$ $R_2 = 1/(k_p/e_p)$ $R_3 = 1/h_2$	<p>La resistencia total del sistema a la transferencia de calor será la suma de las resistencias individuales</p> $R_t = R_1 + R_2 + R_3$ $R_t = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{k_p/e_p} + \frac{1}{h_2}$
---	---

Si se despejan h_1 , k_p/e_p y h_2 , de las ecuaciones de superficie plana y se introducen en la ecuación de la resistencia, ten R_t tendremos:

Se define el coeficiente total de transferencia del sistema a la inversa de la resistencia total, donde podemos despejar la diferencia de temperaturas, así como la ecuación de coeficiente individual para el lado interno y obtenemos:



$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x_w}{K_m} \left(\frac{D_1}{D_L} \right) + \frac{1}{h_o} \frac{D_1}{D_o}}$$

El coeficiente global es el inverso de la resistencia total, donde se calcula la superficie de un evaporador.



Para profundizar en el tema, te invito a que revises las pagina 447 sobre Entalpia de evaporadores del Libro *Operaciones básicas de ingeniería química* de Mc Cabe, et al. (2003).

Se requiere de 10,000 lb/h de agua destilada a partir de agua no tratada, se dispone de vapor a 300 °F y el condensador tendrá escape a la atmosfera ¿qué superficie se requiere?

Suponga una caída de presión a través del condensador y líneas de aproximadamente. 5 lb/plg². La temperatura de saturación en la coraza del evaporador será de 19.7 lb/plg², a 226 °F.

$$Q = 10,00 \times 961 = 9610000 \text{ Btu/h}$$

$$Q = 10,550 \times 910 = 9610\ 000 \text{ Btu/h}$$

Carga térmica:

$$\Delta t = 300 - 226 = 74 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Coeficiente total:

Observando la gráfica 14.7 a una carga térmica de 74 °F y una temperatura de valor de 226°F, el coeficiente es de 86.5 % de la base. Usando un a base de 700 Btu/(h)(pie²)(°F)

$$Q = 700 \times 0.865 = 605$$

$$A = \frac{Q}{U\Delta t} = \frac{9610\ 000}{605 \times 74} = 2150 \text{ pies}^2$$



Para profundizar en el tema, te recomiendo que revises el siguiente ejemplo de Transferencia de calor aplicado a la biotecnología donde se realiza una transferencia de calor y materia durante la fritura de trozos de Ñame (*Dioscórea Alata*), de Alvis, Cortés y Páez, (2009).

Cuando un alimento se sumerge en un medio caliente como el aceite su temperatura aumenta rápidamente y el agua que contiene se elimina en forma de vapor, por lo que su superficie empieza a deshidratarse, se forma una corteza y el frente de evaporación va trasladándose hacia el interior del producto (Fellows, 1994; Moreira et al 1999). La temperatura en la superficie del alimento alcanza la del fluido caliente y la interna aumenta lentamente hasta alcanzarlos 100 °C. Las velocidades de transferencia de calor al alimento dependen de la diferencia de temperatura entre este y el fluido y del coeficiente de conductancia térmica. Las características de la fritura están íntimamente relacionadas con las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los constituyentes de los alimentos, así como las variables de operación que se aplican en las diferentes etapas del proceso.

Las interacciones de los fenómenos de transferencia de calor y masa hacen que la fritura sea unas de las operaciones unitarias más difíciles de entender en la cual el coeficiente de transferencia de calor por convección juega un papel preponderante (Whitaker 1977).

Observa en la **figura 8** la función general de un intercambiador de calor, la cual es transferir calor de un fluido a otro. Los componentes básicos de los intercambiadores se pueden identificar como un tubo por donde un flujo de fluido está pasando, mientras que otro fluido circula alrededor de dicho tubo.

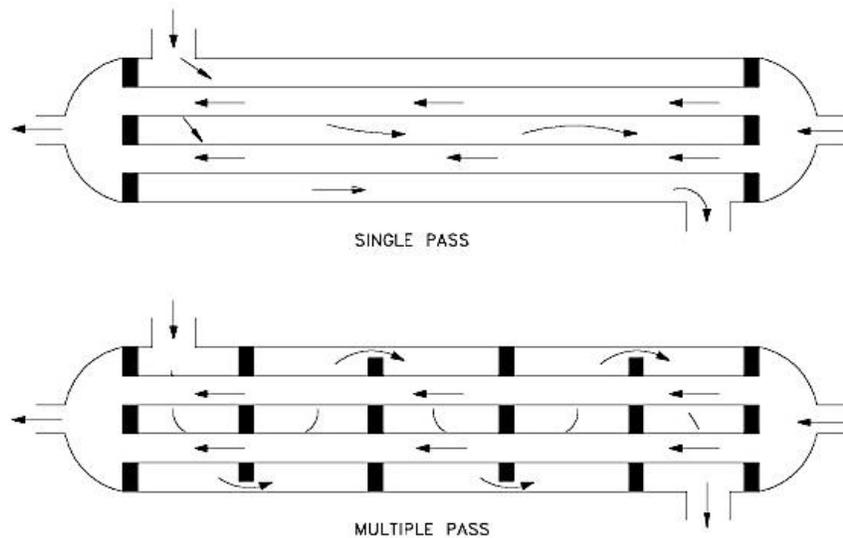


Figura 8. Jaramillo, O. A. (2007) *Intercambiadores de calor*. Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado https://scholar.google.co.za/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=U0bS410AAAAJ&citation_for_view=U0bS410AAAAJ:LkGwnXOMwfcC

Como hemos mencionado, un intercambiador de calor es un dispositivo que permite la transferencia de calor de un fluido caliente a otro fluido frío, cuya función primordial es llevar al punto de ebullición a un fluido para condensarlo ¿Cómo se le denomina a esa energía que posee el agua? ¿Cómo se denomina a la cantidad de energía calorífica de la sustancia que se encuentra dentro del evaporador? ¿En qué otros procesos son usadas estas variables? ¿Es importante su estudio para las operaciones unitarias? ¿Por qué?

2.1.1 Entalpía de líquidos y vapores

Si observas el siguiente diagrama de la **figura 9** podrás recordar que: si en la entalpía se libera calor decimos que es una reacción exotérmica, es decir, negativa, debido al aumento de la temperatura o a la sustancia que se está evaporando. O bien, si en la entalpía se absorbe calor del medio se dice que es una reacción endotérmica o positiva, porque se absorbe energía debido a la baja de la temperatura del sistema. El cambio de entalpía se denomina ΔH .

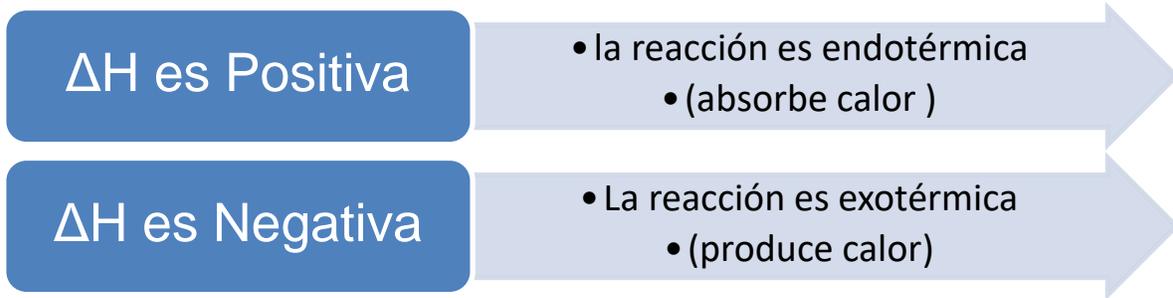


Figura 9

En un evaporador, es necesario determinar la energía requerida por una cantidad de sustancia para el cambio de fase, en este caso, de líquido a vapor conocido como calor latente de condensación que es transmitido a través de una superficie de calefacción para vaporizar el agua de una disolución a su punto de ebullición.

Recordemos que, en un evaporador, un balance de energía es necesario para identificar el calor cedido por la concentración del calor, este debe ser proporcional al calor sensible por el líquido de la alimentación influenciado por el calor latente del vapor producido, siempre y cuando no contabilices las pérdidas de calor del sistema.

Observa el diagrama de flujo anterior y puedes observar que para realizar un balance de calor es necesario utilizar calores específicos, debido a la dificultad de establecer datos de entalpia, concentración para un balance ideal.

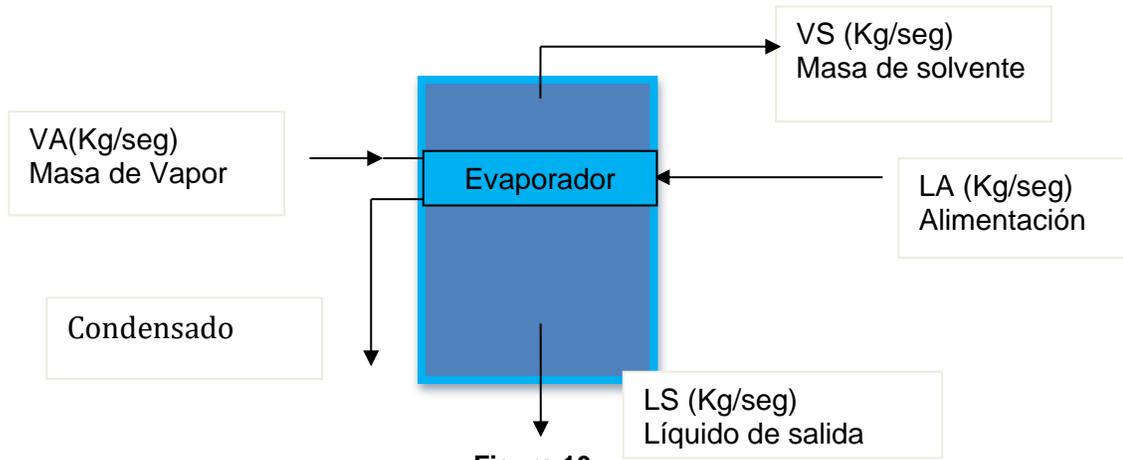


Figura 10.

En la **figura 10** se esquematiza las consideraciones anteriores:

LA= Líquido de alimentación kg/seg

VA= Masa de vapor kg/seg

LS= Líquido de salida Kg/ seg

VS= Masa de solventes vaporizado

Como es necesaria la utilización de los calores específicos de este evaporador se toman en cuenta las siguientes variables:

λ_e = Calor latente de condensación

λ_v = Calor latente de vaporización

CP= Calor específico del líquido de alimentación

X_{sa}= Fracción de sólidos en la línea de alimentación

X_{ss}= Fracción de sólidos en la línea del producto

El balance global de la materia se realizará de la siguiente manera:



El balance de materia en el líquido



Después de establecer las ecuaciones fundamentales para comenzar los cálculos, durante el proceso de evaporación, es importante mencionar algunos factores relevantes, entre los que hay que destacan:

- La carga calorífica necesaria durante el proceso, pues de ella depende fundamentalmente la selección, el diseño y la operación de los equipos.
- El coeficiente global de transferencia de calor U a partir de la identificación de la resistencia térmica del material de la pared del evaporador.
- El coeficiente de los factores que inciden en la formación de las capas de adherencia sobre las paredes externa e interna de las superficies de transferencia calorífica.
- El coeficiente de transferencia de calor de la película condensada sobre la superficie del intercambio que conecta al vapor producido.

Como nota importante hay que mencionar que, los coeficientes señalados son menores en los sistemas de circulación normal que en los de circulación forzada.

En la **figura 11**, se observa que en un evaporador el calor latente de condensación del vapor de agua es transmitido a través de una superficie de calefacción para vaporizar agua en una disolución a ebullición, por lo que es necesario aplicar dos balances de entalpía: uno para el vapor de agua y otro para el lado de la disolución del vapor (Mc Cabe, et al. 2003).

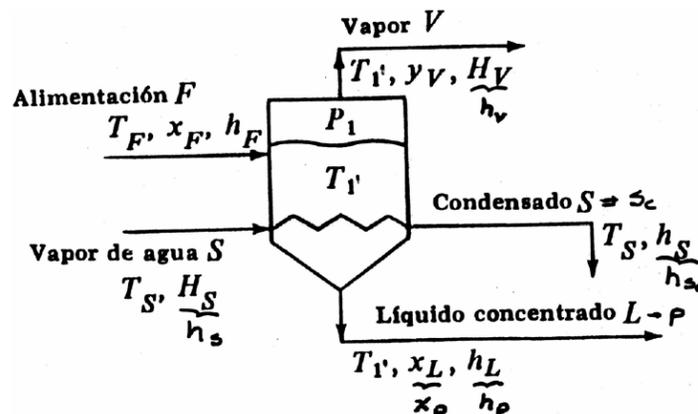


Figura 11. Balance de calor y de masa para un evaporador de efecto simple (Morales, 2010)



Para conocer la cantidad de calor que pasa de una cámara a otra en la superficie de calefacción, es necesario plantear un balance calorífico en el que intervienen temperaturas específicas en la alimentación y en el producto, es decir, el vapor latente de vaporización de agua y los calores latentes de dilución.

El calor más sustancial es el de vaporización del agua, donde se toma la temperatura de ebullición del agua a la misma presión. La suma del calor sensible y el calor de dilución se pueden determinar exactamente por diferencias de la suma de calor sensible y el calor de dilución. Se puede determinar exactamente por diferencias de entalpías cuando se cuenta con datos de entalpía de concentración

En el evaporador se supone que no hay fugas o arrastre, y que no es preciso tener en cuenta las pérdidas de calor. La corriente de vapor de agua que entra a la cámara de condensación puede estar sobrecalentada, y el condensado generalmente abandona la cámara de condensación enfriado por debajo de su temperatura de ebullición.

Sin embargo, tanto el vapor, sobrecalentamiento del agua, como el subenfriamiento del condensado son pequeños y resulta aceptable eliminarlos al aplicar un balance de entalpía.

Para determinar la entalpía se usa la siguiente ecuación:

Balance para el lado del vapor:

$$q_s = m_s(H_s - H_c) = m_s \gamma_s$$

Dónde:

q_s = Velocidad de transferencia de calor a través de la superficie

H_s = Entalpía específica del vapor de agua

H_c = Entalpía específica del condensado

γ_s = Calor latente de condensación del vapor de agua

m_s = Velocidad de flujo del vapor de agua.

El balance de la entalpía para el lado de la disolución (o líquido) es:

$$q = (m_f - m)H_v - m_f H_f + mH$$

Dónde:

q = Velocidad de transmisión de calor desde la superficie hacia el líquido

H_v = Entalpía específica del vapor

H_f = Entalpía específica de la disolución concentrada



En ausencias de pérdidas de calor, el calor transmitido desde el vapor de agua hacia los tubos es igual al transmitido desde los tubos hacia la disolución por tanto $q_s = q$ igualando la ecuación de vapor y la de la disolución quedaría de la siguiente manera:

$$q = m_s \gamma = (m_f - m) H_V - m_f H_f + m H$$

“Es importante señalar que las entalpías de lado de disolución H H y H depende de las características de la disolución que se concentra. La mayor parte de las disoluciones cuando se concentran o se diluyen a temperatura constante no producen un gran efecto térmico. Esto se cumple para disoluciones orgánicas, así como para disoluciones moderadamente concentradas de la mayor parte de las sustancias inorgánicas; así como el azúcar la sal y las disoluciones de fábricas de papel no posee calores de dilución o de mezcla” (Zamora, 1998).

Por otro lado, el ácido sulfúrico, el hidróxido sódico y el cloruro cálcico, especialmente en disoluciones concentradas, desarrollan una cantidad de calor considerable cuando se diluyen y, por tanto, posee importantes calores de dilución. Además del calor latente de vaporización, cuando las disoluciones de estas sustancias se concentran, hasta densidades elevadas, se requiere una cantidad equivalente de calor.



Para profundizar en el tema sobre Entalpia de Evaporadores, te recomiendo que revises las paginas 511-519 del Libro *Operaciones básicas de ingeniería química* de Mc Cabe et al. (2003).

La entalpia representa una magnitud termodinámica simbolizada por la letra H , cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema, es decir, la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar en su entorno.

2.1.2. Evaluación de la temperatura de ebullición de la solución

En un evaporador la entalpia representa la cantidad de energía necesaria para que la unidad de masa de una sustancia que se encuentra en equilibrio con su propio vapor a una presión de atmosfera pase completamente del estado líquido al estado gaseoso representado por ΔH_{Vap} por ser entalpia. Generalmente se determina en el punto de



ebullición de la sustancia y se corrige para tubular el valor en condiciones normales (Mc Cabe, et al. 2003).

Si colocas en un recipiente 300 ml de alcohol, podrás observar cómo se va evaporando este etanol, ¿a qué propiedad química se debe que este líquido se evapore? ¿Este líquido tiene alguna temperatura de ebullición? ¿Es importante conocer esa temperatura? ¿Por qué? ¿La temperatura de ebullición es diferente para cada solución? Para responder a estas preguntas comenzaremos con:

El coeficiente global de transmisión de calor es igual al producto de tres factores: El área de superficie de transmisión de calor A , el coeficiente global de transmisión de calor U y la caída global de temperatura.

En un evaporador si la alimentación que entra al equipo está a la temperatura de ebullición correspondiente a la presión absoluta del espacio de evaporación, todo el calor transmitido a través de la superficie de calentamiento es utilizado en la evaporación y la capacidad es proporcional a q .

Si la alimentación entra fría el calor que se necesita para calentarla hasta temperatura de ebullición puede ser bastante grande y la capacidad, para un determinado valor q , se reduce considerablemente puesto que el calor utilizado en calentar la alimentación no produce evaporación.

La caída real de temperatura a través de la superficie de calentamiento depende de la solución que se evapora, de la diferencia de presiones entre la caja del vapor vivo y el espacio de vapor situado sobre el líquido hirviente y de la altura de líquido situado sobre la superficie de calentamiento. En algunos evaporadores también influye en la caída de temperatura la velocidad del líquido en los tubos debido a que la pérdida por fricción en los tubos aumenta la presión efectiva del líquido cuando la solución posee las características del agua pura, su temperatura líquida. Cuando la solución posee las características del agua pura, su temperatura de ebullición se puede obtener a partir de las tablas de vapor de agua si se conoce la presión, puesto que corresponde a la temperatura de condensación. Sin embargo, en los evaporadores reales, la temperatura de ebullición de una solución esta además afectada por otros dos factores que son el punto de ebullición y la carga de líquido (Mc Cabe, et al 2003).

La presión de vapor de la mayor parte de las soluciones acuosas es menor que la del agua pura a la misma temperatura y por consiguiente a una determinada presión. La temperatura de ebullición de la solución es mayor que la del agua. El incremento del punto de ebullición con respecto al del agua se conoce con el nombre de elevación del punto de ebullición de la solución (Mc Cabe, et al 2003).



Para profundizar en el tema sobre Elevación del Punto de Ebullición, te recomiendo que revises las páginas 511-519 del libro *Operaciones básicas de ingeniería química* de Mc Cabe, et al (2003).

Para la elevación del punto de ebullición hay que restarla de la caída de temperatura que se predice a partir de las tablas de vapor de agua. Pasa las disoluciones concentradas, la elevación del punto de ebullición se obtiene mejor a partir de una regla empírica conocida con el nombre de Duhring.

Es importante señalar y recordar la importancia de propiedades coligativas de las disoluciones diluidas de un soluto no volátil, la presión de vapor de la disolución es menor que la del disolvente puro a la misma temperatura y, por tanto, hay un aumento en el punto de ebullición respecto al que tendría el agua pura. Por ende, para una presión de trabajo dada, una solución acuosa, no solo sería preciso saber la temperatura de ebullición, (saturación), del agua a esa presión, si no que habría que calcular la elevación del punto de ebullición de la disolución, para introducirlo en la siguiente ecuación:

$$\Delta T = K_{eb} \cdot m$$

(Aumento del punto de ebullición = constante de ebullición x molaridad)

Recuerda que para soluciones fuertes de solutos que no se comportan de manera ideal, no siempre es posible determinar el punto de ebullición; se puede realizar mediante una ley empírica conocida con el nombre de regla de *Duhring*, según la cual, el punto de ebullición de un líquido o de una disolución se comporta de manera lineal al punto de ebullición de una sustancia de referencia, normalmente el agua, referidos ambos a la misma presión.

El aumento en el punto de ebullición, aunque dado por las leyes de la fisicoquímica, se determina ordinariamente mediante la regla de *Duhring*, la temperatura de ebullición de una disolución acuosa, a distintas presiones, es función lineal de la temperatura de ebullición del agua a la misma presión. Basándonos en esta regla, si conocemos la temperatura de ebullición a dos diferentes presiones, podemos construir un diagrama que nos permite obtener el punto de ebullición a cualquier presión.



La elevación en el punto de ebullición varía poco con la presión, y es prácticamente constante dentro del intervalo que puede interesarnos. Una vez conocido el valor de la elevación, podemos sumarlo a la temperatura deducida de las condiciones del manómetro y de las tablas de vapor, y así hallar la verdadera temperatura de ebullición. Para las disoluciones concentradas, este término de corrección puede ser del mismo orden de magnitud que la diferencia real de temperaturas.

Por consiguiente, si se representa la temperatura de ebullición de la disolución frente a la del agua a la misma presión, se obtiene una línea recta. Para distintas concentraciones se obtienen distintas líneas rectas, no necesariamente paralelas. El trazo de estas rectas se realiza fácilmente si se conoce dos temperaturas de ebullición de la disolución a dos presiones distintas. Observa la **figura 12** la entalpía-concentración para disoluciones NaOH de distintas concentraciones.

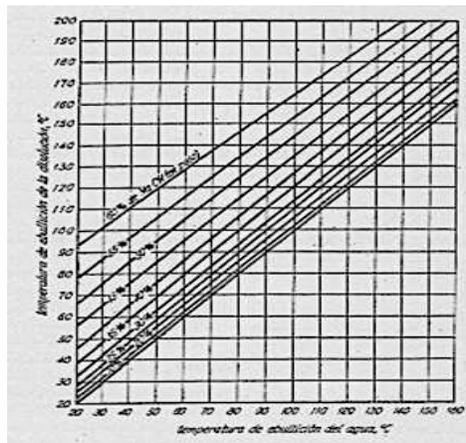


Figura 12. Diagrama entalpía-concentración para NaOH Mc Cabe et al (2003).

En el diagrama anterior se encuentra una representación gráfica de la regla de *Duhring* para soluciones acuosas de sacarosa. En ella están representados los valores de los puntos de ebullición de la solución en diversas concentraciones de sacarosa contra el punto de ebullición del solvente de agua pura a la misma presión. Para la industria de alimentos es bastante difícil conseguir gráficas de *Duhring* específicas. Esta regla sólo es válida para intervalos de presiones no muy amplios. Por otra parte, los mejores resultados se obtienen cuando las características físicas y químicas de los dos líquidos son similares.

La olla que analizamos previamente posee un líquido que es calentado por el fuego que al transcurrir el tiempo comienza a hervir y eso nos ayuda a identificar su punto de ebullición. Bien, pues ahora nos enfocaremos a conocer qué sucede con el fuego y la olla. ¿Existe algún método para determinar cuánto calor está recibiendo la olla? ¿Conoces qué es el coeficiente de transmisión calor y qué factores lo afectan?



Para profundizar en el tema sobre Coeficiente de transmisión de calor, te invito a que revises las páginas 472-474 del libro *Operaciones básicas de ingeniería química* de Mc Cabe, et al (2003)

2.1.3. Coeficiente de transmisión de calor

Existe una ecuación que te permitirá determinar la cantidad de calor que es transmitida en un evaporador:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

La densidad de flujo de calor y la capacidad del evaporador se modificaba cuando varían la caída de temperatura y el coeficiente global de transferencia de calor. La caída de temperatura está fijada por las propiedades del vapor condensado y el líquido hirviendo, y excepto por lo que respecta a la carga hidrostática, no depende de las características constructivas del evaporador. Sin embargo, el coeficiente global depende en gran medida del diseño y del método de operación del evaporador (Mc Cabe, et al. 2003).

Es importante no perder de vista que la resistencia global a la transmisión de calor entre el vapor condensante y el líquido en ebullición es la suma de cinco resistencias Individuales:

- la resistencia de película del vapor condensante
- la resistencia de las dos costras interior o exterior
- la resistencia de la pared del tubo
- La resistencia del líquido hirviendo
- El coeficiente global es el inverso de la resistencia global.

Coeficiente de película del vapor condensante. Este coeficiente se caracteriza por tener un valor elevado, aun para la condensación en película es de película. A veces se añaden promotores al vapor con el fin de conseguir la condensación en gotas entonces el coeficiente es todavía mayor.

Coeficiente del lado del líquido: este coeficiente depende en gran parte de la velocidad de los líquidos sobre la superficie calentada. En la mayor parte de la velocidad del líquido



sobre la superficie calentada. En la mayor parte de los evaporadores y especialmente en los que operan con mariales viscosos, la resistencia del lado del líquido controla la velocidad global de transmisión de calor al líquido que hierve (Mc Cabe, et al 2003).

Es importante que identifiques los parámetros factores que afectan al valor del Coeficiente total de transferencia de calor, así como los factores que afectan el valor de la temperatura. Estos valores te ayudarán mucho para la selección de un evaporador, así como para su diseño.

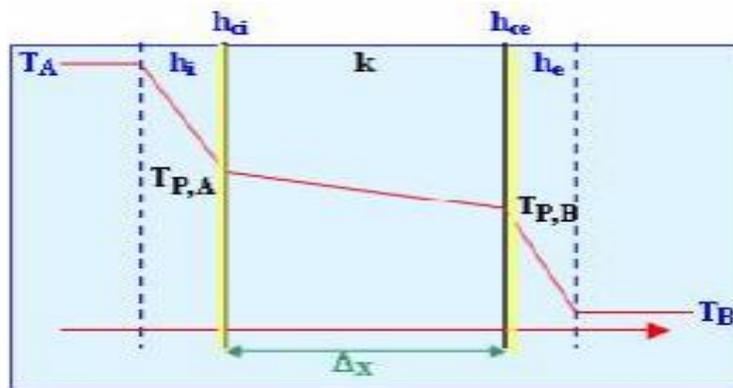


Figura 13. Resistencias individuales del coeficiente global de transferencia (Franco, 2008).

Observa la **figura 13** donde puedes observar la resistencia global considerando el inverso del coeficiente global, que se encuentra compuesta de cinco resistencias en serie que son resistencia de película de vapor condensado, resistencia de la costra formada sobre la superficie del elemento de calefacción en contacto con el vapor, resistencia de la pared de elemento de calefacción en contacto con el líquido hirviente y resistencia de película de líquido hirviente

Relacionado con el coeficiente de transferencia de calor

$$Q = UA\Delta T$$

Po lo tanto el coeficiente global de transmisión de calo en el área interior del elemento de calefacción se representa de forma matemática:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{c,i}} + \frac{\Delta_x A_i}{k \cdot A_{m,l}} \frac{A_i}{h_{c,e} \cdot A_e}$$

Donde

A₁ = Area interior

A_e = Area exterior

h_{c,i}, h_{c,e} = coeficientes de las costras interiores y exterior



k = Coeficiente de trasmision de calor por conveccion
 h_i, h_e = los coeficientes de transmision de calor por conveccion
(coeficiente de pelicula interior y estrerior)

El coeficiente de película del vapor condensado (h_e) este coeficiente tiene un valor elevado aun en el caso de condensación en película. y el coeficiente de las costras (h_{ci} , h_{ce}) tiene coeficientes altos y difíciles de cuantificar, por ello la resistencia debida a los mismo no se tiene en cuenta a la hora de hacerlos caculos, en cuanto al valor de (k) la pared metálica, tiene generalmente un coeficiente de trasmisión de calor por conducción elevado y por lo tanto la resistencia térmica de la pared salvo el caso de espesores muy grandes es despreciable.

En cuanto a la película del líquido hirviente (h_i) este coeficiente es el de mayor influencia y depende de la velocidad de los líquidos sobre la superficie de calefacción y la viscosidad del líquido hirviente y la impureza de la superficie de calefacción. La velocidad de circulación depende de que la convección sea natural o forzada (Franco, 2008).

Para determinar los coeficientes individuales existen muchas dificultades, los datos experimentales están referidos a los coeficientes globales cuyos valores dependen fundamentalmente del valor del coeficiente de película del líquido hirviente. En bibliografía existen tablas y representaciones gráficas para los valores de U en los distintos tipos de evaporadores en condiciones normales de funcionamiento.



Ahora te invito a que realices la lectura de la página 10 del libro de Coeficientes de transmisión de calor del Franco, (2008), en el que se presenta las características de las resistencias individuales de un evaporador. Es importante que revises esta información.

Recuerda que las propiedades físicas y químicas de la solución que está concentrado y del vapor que se separa tiene un efecto considerable sobre el tipo de evaporadora que se debe usar y sobre la temperatura y la presión del proceso estos son algunos factores que afectan el proceso del cálculo de coeficiente de transferencia de calor

Para concluir este tema es necesario que recuerdes y tengas muy presente qué son las operaciones unitarias e identifiques algunos ejemplos que se utilizan en la industria. Uno de ellos es la concentración de jugos en la industria alimentaria; esta operación unitaria ayuda a la fabricación de productos de uso común para nuestra sociedad.



La transferencia de calor es un fenómeno que está presente en nuestra vida cotidiana, desde la cocción de nuestros alimentos, hasta su uso en la industria donde diariamente se desarrollan procesos basados en la transferencia de calor, la energía calorífica, el punto de ebullición. Es importante para conocer el manejo y el diseño de evaporadores industriales para la producción de alimentos, fármacos y combustibles.

Debes tener presente las diferencias entre cada evaporador y saber por qué se generan estas. Esta información te permitirá desarrollar un uso adecuado de cada materia prima que se desee transformar. Recuerda: siempre es importante conocer las propiedades físicas y químicas de cada materia prima para seleccionar el equipo de evaporación que cumpla con las características necesarias para la elaboración de nuestro producto, lo cual nos permitirá aprovechar mejor la energía para fabricar un bien y tener un proceso económicamente viable.

2.2. Clasificación de evaporadores

Los evaporadores están presentes en todos los sistemas de refrigeración, equipos de aire acondicionado y cámaras frigoríficas; su tamaño, diseño y capacidad depende de la aplicación y carga térmica, así como al uso que se la dará. Los evaporadores se fabrican en una gran variedad de tipos, tamaños, diseños y se pueden clasificar de diferentes maneras. ¿Cuáles son los tipos de evaporadores?

¿Recuerdas la analogía de la olla con agua que era calentada con fuego? En un evaporador ocurre un fenómeno parecido, pero en esta operación unitaria influyen más factores para poder llevar a cabo la concentración de un producto. De ahí la importancia de que exista en el mercado una clasificación de evaporadores, para cubrir las necesidades de cada sector productivo.

En un evaporador se debe de tomar en cuenta la presión hidrostática durante el proceso. Recuerda que en el fondo de un evaporador cualquier líquido se somete a dos clases de presiones: una es la que se ejerce sobre la superficie y la otra es hidrostática, ejercida desde el nivel de superficie libre al nivel en el cual se halla el líquido. Estos factores influyen directamente con el punto de ebullición del líquido y la profundidad del evaporador. Es importante señalar que a medida que aumenta la profundidad, aumenta también la temperatura de ebullición.

La evaporación es un método de eliminación de agua por ebullición, el cual permite obtener productos finales de mayor concentración manteniendo el estado del líquido.



Para profundizar sobre el concepto de evaporación, te invito a que revises las páginas 459-460 de Mc Cabe, et al (2003) del libro de Operaciones Básicas de ingeniería Química”, en donde encontrarás ejercicios enfocados a este tema.

Te pido observes la **figura 14** en ella se presenta un ejemplo de evaporador utilizado en la industria de alimentos, cuenta con una bomba, de acero inoxidable y su funcionamiento es automático.

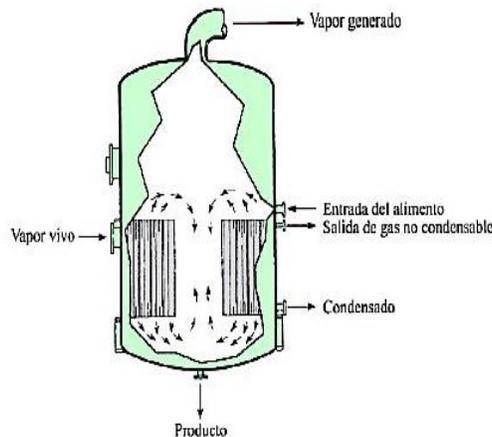


Figura 14. Evaporador. Fernández, (2012).

El crecimiento de las industrias alimentaria y farmacéutica han generado el rápido y continuo desarrollo de nuevos productos, tales como: la preparación de jarabes, salmueras, jugos, salsas y otras suspensiones coloidales por vaporización del solvente (agua), con el propósito de alcanzar el contenido de sólidos requeridos en los diferentes procesos tecnológicos de alimentos.

“Para el diseño y construcción de un evaporador se deben considerar las diversas características del líquido: el calor específico, el calor de concentración y la temperatura de ebullición. O bien, si se generan gases durante la ebullición, toxicidad, peligro de que pueda explotar” (Fernández 2012).

Asimismo, para su producción se debe considerar la cantidad de líquido que se va a utilizar y, sobre todo, en qué industria se va a manejar. Es por estas características que se



requiere que exista una clasificación. Cada evaporador posee características distintas y su uso varía de acuerdo al tipo de líquido a concentrar o al tipo de procesos a realizar.

Es importante mencionar algunas características de las propiedades más importantes de los líquidos que se someten a evaporación tales como .

- concentración aunque el líquido que entra como alimentación a un evaporador puede ser suficientemente diluido y poseer muchas de las propiedades físicas del agua, a medida que aumenta la concentración, la solución adquiere cada vez un carácter más particular.
- formación de espuma algunos materiales especialmente sustancias orgánicas forman espuma durante la vaporización, con el vapor sale del evaporador una espuma estable que origina arrastre.
- Sensibilidad a la temperatura. Muchos productos químicos, medicamentos y alimentos se estropean cuando se calienta a temperatura moderada durante espacios de tiempo relativamente cortos.
- Materiales de construcción. Siempre que es posible, los evaporadores se construyen en hierro colado o acero. Sin embargo muchas soluciones atacan a los metales ferrosos o son contaminadas por ello entonces preciso utilizar materiales especiales tales como cobre o níquel, acero inoxidable

El diseño de un evaporador tiene que considerar muchas otras características del líquido, tales como calor específico de concentración, temperatura de congelación, liberación de gases durante la ebullición, toxicidad, peligro de explosión, radioactividad y necesidad de que la operación se efectúe en condiciones estériles. Debido a la gran variedad de propiedades de los líquidos (Mc Cabe, et al 2003).



Te invito a que revises las páginas 460 y 461 en el libro de Mc Cabe, et al (2003) *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*, para estudiar la clasificación de los evaporadores.

Hablemos un poco más sobre estos temas. La evaporación consiste en la adición de calor a una solución. Para evaporar la solución —que por lo general es agua— el calor es suministrado por condensadores de vapor (como el vapor de agua) en contacto con una superficie metálica, estando el líquido del otro lado de dicha superficie.

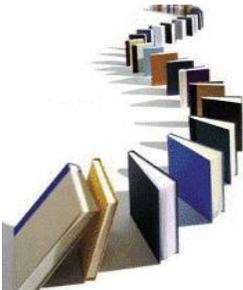
El tipo de evaporador usado depende tanto de la configuración de la superficie para la transferencia de calor, como de los medios utilizados para lograr la agitación o circulación



del líquido; debido a ello se cuenta hoy en día con una clasificación general de estos equipos.

Los principales tipos de evaporadores tubulares según Mc Cabe, et al (2003) calentados con vapor que se utilizan en la actualidad son:

- Evaporadores de tubos cortos
- Evaporadores de tubos largos verticales
 - (a) Circulación forzada
 - (b) Flujo ascendente (película ascendente)
 - (c) Flujo descendente (película descendente)
- Evaporadores de película agitada.



Para profundizar más sobre el tema Clasificación de Evaporadores puedes revisar las páginas 461-468 sobre Clasificación de evaporadores del libro *Operaciones Básicas de Ingeniería Química* de Mc Cabe, et al (2003).

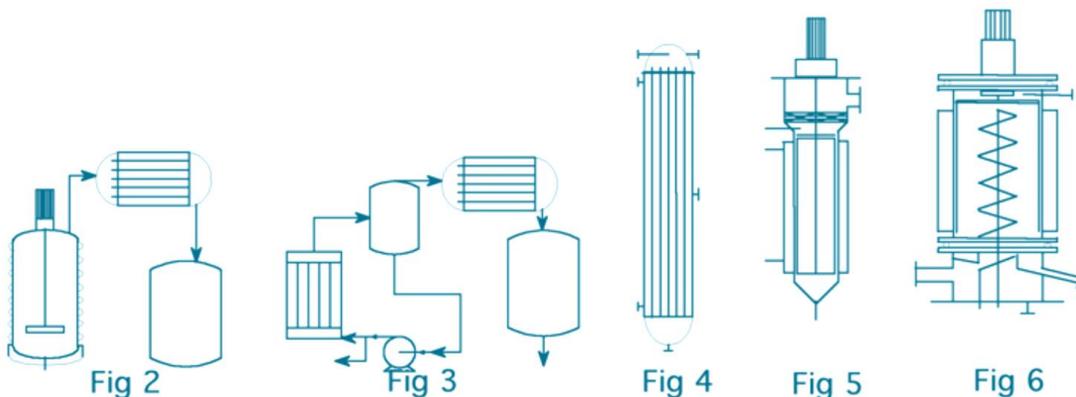


Figura 15. Tipos de Evaporadores. Peña (2012)

En la **figura 15** se observan los diferentes tipos de evaporadores, los cuales se diferencian por sus formas y tamaños, así como por las condiciones para su utilización de acuerdo a las necesidades de la industria. Para conocer más sobre las distintas categorías diseñados a partir de las necesidades de la industria.



Para profundizar en el tema, te invito a leer las páginas 460- 468 del artículo De la Peña y De la Peña (2012) sobre la *Selección y diseño de evaporadores*, en él encontrarás información detallada sobre su diseño y las condiciones necesarias para su elaboración.

Ahora comenzaremos a describir un evaporador de simple efecto. Te preguntarán ¿Qué es un evaporador de simple efecto? ¿Cuáles son sus condiciones de operación? ¿Qué partes lo integran?

Los evaporadores pueden operar como unidades de un solo paso o como unidades de circulación. En la operación de un solo paso o de simple efecto el líquido de alimentación pasa solo una vez a través de los tubos, desprende el vapor y sale de la unidad como líquido concentrado. Toda la evaporación se produce en un paso único. En una unidad como esta, la relación de la evaporación a la alimentación está limitada y por esta razón estos evaporadores se adaptan muy bien a la evaporación en múltiple efecto.

2.2.1. Evaporador de simple efecto

Los evaporadores de un solo paso son especialmente útiles para el tratamiento de materiales sensibles al calor, dado que se puede mantener el líquido de proceso a baja temperatura, Con solo pasar el líquido rápido a través de los tubos reaccionara rápidamente, el líquido concentrado permanece durante un corto periodo de tiempo a la dentro del evaporador a temperatura de evaporación y se puede enfriar bruscamente a medida que abandona el evaporador.

Un evaporador de simple efecto posee características fundamentales que debemos mencionar, entre las que se encuentran:

- El líquido de alimentación pasa una sola vez a través de los tubos, desprende el vapor y sale de la unidad como líquido concentrado.
- Son especialmente útiles para el tratamiento de materiales sensibles al calor, y operando con un vacío elevado se puede mantener el líquido a baja temperatura.
- Con un solo paso rápido a través de los tubos el líquido concentrado está durante un corto período de tiempo a la temperatura de evaporación y se puede enfriar bruscamente a medida que abandona el evaporador.



Para profundizar en el tema, te invito a leas las páginas 461- 468 sobre Evaporador de simple efecto, en esta lectura encontrarás información detallada sobre su diseño de libro de Mc Cabe, et al (2003) *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*.

En la **figura 16** puedes observar las características fundamentales de un evaporador de efecto simple.

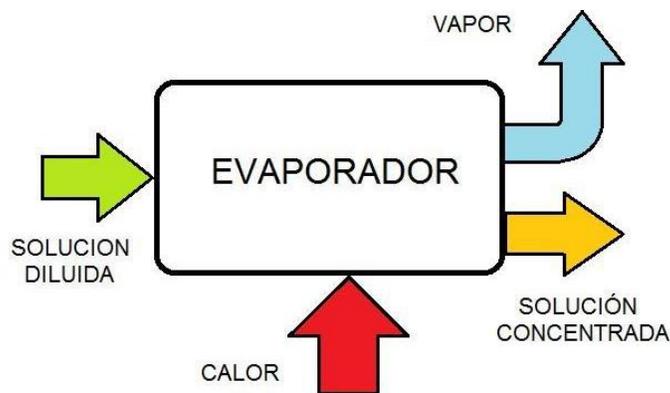


Figura 16. Evaporador de Simple Efecto. Salazar, F. (2010) Recuperado de http://www.fsalazar.bizland.com/pdf/EQUILIBRIO_4.pdf

Este tipo de evaporadores se usan cuando la capacidad de operaciones requeridas es pequeña y el costo de vapor de agua es relativamente bajo. Son utilizados para la solución de NaCl y de sacarosa.



Para que refuerces los conceptos de Mc Cabe, et al (2003) te invito a revisar el documento de Elton, F. Morales (2010) titulado *Métodos de cálculo para evaporador de efecto simple*, de la Universidad Austral, Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de Chile.



2.2.2. Evaporadores de circulación natural

En la industria existen evaporadores que se usan para líquidos o soluciones viscosas, corrosivas y en las que se forman sales o productos cristalinos que estudiaremos a continuación.

¿Conoces qué es un evaporador de circulación natural y para qué son utilizados en la industria? Asimismo, ¿sabes cuáles son sus características principales? Este tipo de evaporador se distingue por tener una serie de tubos cortos denominados calandria de tubos. Están dentro de una carcasa por donde se lleva a cabo el flujo del vapor. Lo que distingue a este tipo de equipo es que cuando se calienta el producto, el evaporador hace que vaya subiendo por el interior de los tubos, mientras que la parte exterior se condensa el vapor calefactor.

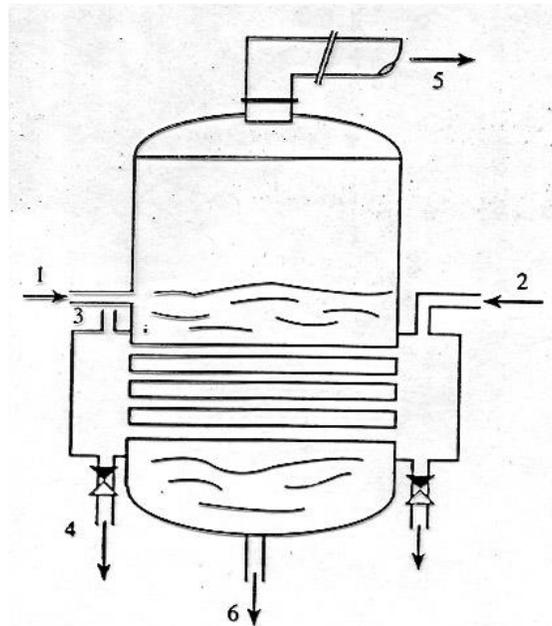
Los evaporadores de circulación natural operan con una carga de líquidos dentro del aparato. La alimentación pasa posteriormente a través de los tubos. El líquido no evaporado que sale de los tubos se une con la carga de líquido contenida en el aparato de forma que en cada paso solamente se produce una parte de la evaporación total.

Los evaporadores de circulación no son adecuados para concentrar líquidos sensibles al calor. Utilizando un vacío suficientemente bajo la temperatura global del líquido puede no llegar a alcanzar niveles destructivos, pero en cambio el líquido se pone repetidamente en contacto con los tubos calientes y por consiguiente una parte de este se calienta a temperatura excesivamente alta.

Aunque el tiempo medio de permanencia del líquido en la zona de calentamiento puede ser pequeño, una parte del líquido permanece en el evaporador durante un tiempo considerable y el calentamiento prolongado de una pequeña parte de un material sensible al calor, tal como un alimento, puede estropear todo el producto (Mc Cabe, et al 2003).



Para reforzar esta información, te recomiendo que vuelvas a revisar las páginas 461 y 462 del libro de Mc Cabe, et al (2003) *Operaciones Básicas de Ingeniería Química* sobre el Equipo de evaporación.



- 1.- Entrada regulada del líquido a concentrar.
- 2.- Entrada de vapor de agua a los tubos de intercambio calórico
- 3.- Purgador de aire.
- 4.- Purgador automático de vapor condensado.
- 5.- Salida de vapor.
- 6.- Salida de líquido concentrado.

Figura 17. Evaporadores de circulación natural (Mc Cabe, et al 2003).

En la **figura 17** el evaporador de circulación natural posee una construcción simple y permite el acceso fácil al haz de tubos. Este equipo mantiene en recirculación grandes volúmenes de líquido; los evaporadores de este tipo que operan a presiones reducidas son usados para la concentración de productos alimenticios sensibles al calor como la leche, los extractos carnicol y los jugos de frutas.

Su funcionamiento es fácil ya que cuenta con una entrada del líquido que pasa a través del evaporador para ser procesado y sale ya concentrado, si es necesario una mayor concentración se ingresa de nuevo al evaporador.



Para profundizar en el tema sobre los Evaporadores de circulación natural, te invito a que leas el artículo de Quiroz Pérez, (2008) *Obtención experimental de los parámetros y variables de diseño de un evaporador de película descendente de doble efecto* de la Universidad de Ciencias Químicas de Zacatecas.



2.2.3. Evaporadores de circulación forzada

Existen otros evaporadores competitivos y confiables; son diseñados en la industria para hacer puré de tomate o para líquidos viscosos, corrosivos y en los que se forman sales o productos cristalinos. ¿Cómo se llaman estos tipos de evaporadores? ¿En qué otros procesos industriales son utilizados? ¿Cuáles son sus características fundamentales?

¿Qué más podemos hablar de este tipo de evaporadores?

Los evaporadores de circulación forzada no son económicos, pero son utilizados cuando los productos involucrados en la evaporación tienen propiedades incrustantes, altas viscosidades, precipitaciones, cristalizaciones o ciertas características térmicas que imposibilitan una circulación natural.

En este tipo de evaporadores el producto es calentado a través de un intercambiador de calor (pueden ser horizontales o verticales), luego se envía el material a un separador, donde la evaporación se lleva a cabo gracias a la presión reinante dentro del mismo, produciéndose de una manera muy rápida. En este tipo de evaporador el producto entra, se concentra, se evapora y sale.



Para profundizar en el tema, sobre este tipo de evaporadores te recomiendo revisar el libro de Mc Cabe, et al (2003) *Operaciones básicas de ingeniería química*, páginas 463- 464.

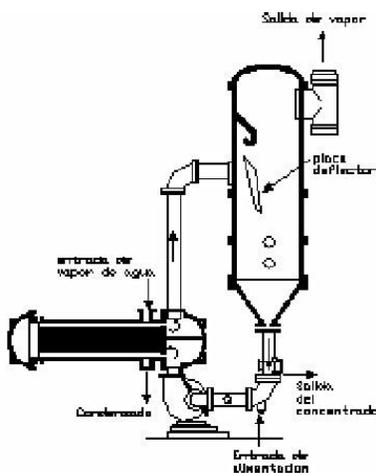


Figura 18. Evaporador de circulación forzada (Mc Cabe, et al 2003).



En la **figura 18** se presenta un evaporador de circulación forzada. Este tipo de evaporadores frecuentemente se utilizan para la recirculación de producto, en donde una cantidad del concentrado es reintroducido a la entrada de la alimentación para producir una suficiente carga de líquido dentro de los tubos de calentamiento. Este tipo de evaporadores es ampliamente usado en la industria azucarera.

Un evaporador de circulación forzada es un equipo competitivo y confiable, uno de sus usos industriales es para el puré de tomate, son ampliamente utilizados en concentraciones de líquidos viscosos, una característica es que produce eficientemente productos con valores de concentración altos y características organolépticas ideales.

2.2.4. Evaporadores de tubos largos

¿Cómo se llaman estos tipos de evaporadores? ¿Cuál es la diferencia con los demás evaporadores? ¿Cómo funcionan?



Te invito a que realices la lectura, para complementar la información acerca de la evaporación de circulación forzada revisa las páginas 4 a 12 del trabajo de tesis Zamora Pano, E. (1998) *Simulación dinámica "Tren de Evaporadores"*. México. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

Ahora te invito a conocer más sobre un evaporador de tubos largos, qué características tiene y en qué procesos industriales es utilizado. En este tipo de evaporadores el líquido que se va a evaporar se bombea a través de un intercambiador de calor, en donde el medio de calefacción rodea los tubos que transportan la solución.

Una característica de este tipo de evaporador es que el área de calentamiento de estos equipos es tubular como muestra se presenta la siguiente figura.

Estos tubos están colocados de forma vertical; esta característica les permite lograr velocidades altas al contar con una caída donde el líquido fluye, lo que genera un coeficiente de transferencia de calor elevado. Al existir una fricción con la pared del tubo, dentro de los tubos verticales se lleva a cabo un flujo laminar y turbulento y es aquí donde



podemos relacionar temas vistos en la unidad 1, tales como flujo de fluidos, fricción, transferencia de movimiento.

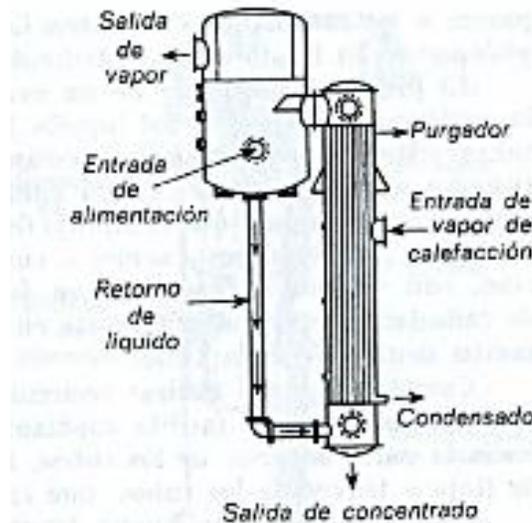


Figura 19. Evaporadores de tubos largos
Mc Cabe, et al (2003)

En la **figura 19** puedes observar un evaporador de tubos largos también llamado de película ascendente. Una característica de este equipo es que la alimentación entra en el fondo de los tubos de calentamiento y al calentarse el vapor comienza a formarse; ese vapor por la fuerza ascendente produce, durante la ebullición, que el líquido y el vapor asciendan en flujo paralelo.



Para profundizar un poco más, te invito a que revises el libro Coulson, J.M; J, F, Richardson; J.F & J.H Huiker (2003) *Ingeniería Química. Operaciones Unitarias Básicas*, volumen 2 en sus páginas 860 a 862 para conocer más sobre este tema.

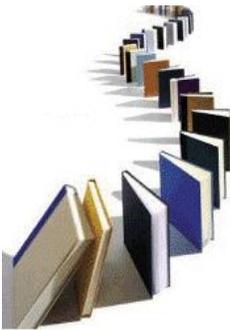
Una de las características de este tipo de evaporadores es que su expansión debida a la vaporización hace se formen burbujas de vapor que asciende a la alta velocidad por los tubos arrastrando liquido hacia la parte superior. A medida que el líquido asciende se va concentrado y en condiciones óptimas el vapor arrastra hacia arriba la parte de los tubos una fina película de líquido que se concentra rápidamente. La mezcla de vapor líquido que emerge por la parte superior de los tubos pasa seguidamente a un separador en el que se



elimina el vapor. El líquido concentrado para ser recirculado o se puede pasar un segundo evaporador para proseguir su concentración.

Este tipo de evaporadores el tiempo de residencia en la zona de calentamiento es corto y los valores U son elevados, razón por la cual los evaporadores de película ascendente son útiles para concentrar productos sensibles al calor.

Al mismo tiempo la producción de vapor se incrementa y el producto es presionado como una película delgada hacia las paredes de los tubos, y el líquido sube hacia arriba. Este movimiento con corriente hacia arriba, en contra de la gravedad, tiene el efecto benéfico de crear un alto grado de turbulencia en el líquido. Esto es ventajoso durante la evaporación de productos altamente viscosos y productos que tienen una tendencia a ensuciar las superficies de calentamiento.



Para ejemplificar la información acerca de la evaporación de tubos largos y sus principales características, te invito a que leas de las páginas 7 a la 12 del siguiente material de Zamora Pano, E. (1998) *Simulación Dinámica de Tres de Evaporadores*. México Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa

2.2.5. Evaporadores de placas

Ahora vamos a conocer más sobre lo qué son los evaporadores de placas, así como en qué procesos químicos se utilizan y las diferencias que tienen con relación a otros tipos de evaporadores.

Los evaporadores de placas también son conocidos como de superficie plana. Son de varios tipos, algunos son contruidos de placas planas de metal, su uso más común es en los refrigeradores y congeladores caseros debido a que su limpieza es muy fácil, su fabricación es muy económica y pueden fácilmente construirse en cualquier forma requerida, ya sea acanalada y asimétrica.

Al construir este tipo de evaporadores cada placa es soldada herméticamente, una contra la otra, con el fin de que el gas refrigerante pueda fluir entre ellas. Como ejemplo, podemos mencionar uno en forma de serpentín, en el cual sus placas suelen ir recubiertas con pintura epóxica, tienen excelente respuesta en aplicaciones para mantención de productos congelados.

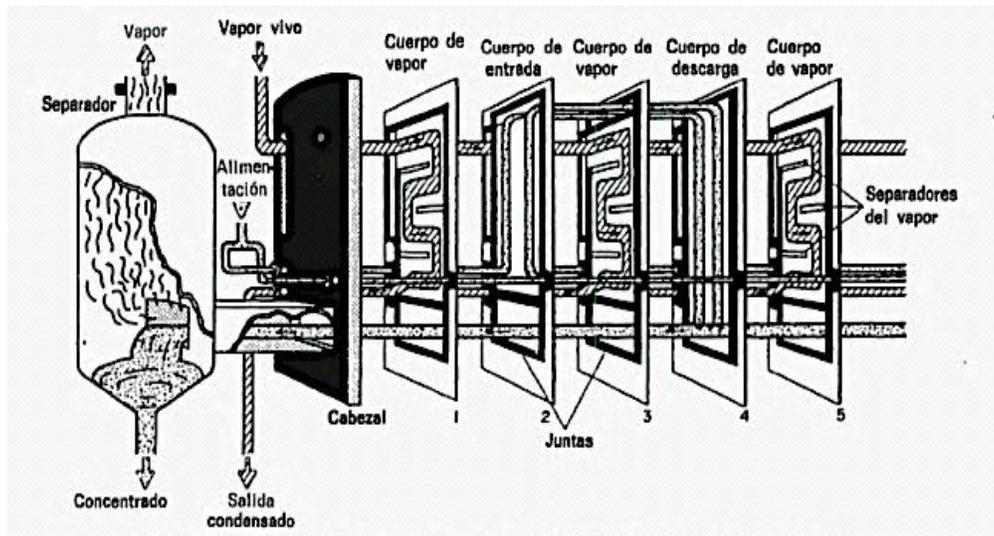


Figura 20. Evaporador de placas Coulson, et al (2003).

En la **figura 20** se puede observar que la tubería doblada está instalada entre dos placas metálicas las cuales están soldadas por sus orillas, con el objeto de tener un buen contacto térmico entre las placas soldadas y la tubería que conduce refrigerante; el espacio entre placas es llenado con una solución eutéctica o se hace el vacío de las placas.

Una unidad de este tipo consta de una serie de placas provistas de juntas montadas en una estructura o marco que requiere un espacio mínimo. El evaporador funciona con un solo paso, según el principio de la película ascendente, con las placas dispuestas de forma que constituyen una serie de unidades de procesos. En la figura de los evaporadores de placas se muestra el flujo y la disposición de las placas para un paso completo. Cada unidad consta de una película ascendente, una película descendente, y dos secciones adyacentes de vapor, Coulson, et al (2003).



Para profundizar en el tema, te recomiendo que revises el libro de Coulson, et al (2003) *Ingeniería Química. Operaciones Unitarias Básicas* volumen 2 páginas 864 a 865.

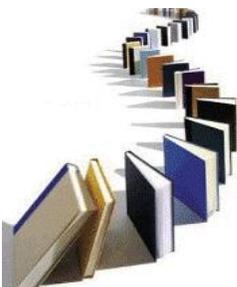
Como el líquido introducido pasa simultáneamente por las secciones de película ascendente y película descendente en cada unidad de proceso, se vaporiza por el



contacto con las placas adyacentes provistas de calefacción, descargándose junto con su vapor a un separador del tipo de ciclón instalado horizontal o vertical. Aquí se extrae el producto, pasando el vapor a un condensador o al siguiente efecto de evaporador.

Observa que un evaporador de placas alimentado desde un depósito de compensación y bombeada al cambiador de calor donde hierve al entrar en contacto con las placas calefactoras en la operación normal, toda la ebullición tiene lugar en el interior del cambiador de calor, el producto concentrado y el vapor son descargados a un separador de donde el vapor es llevado a un condensador extrayendo el producto mediante una bomba de desplazamiento positivo. Existe también la posibilidad, para cumplir los requisitos de un determinado producto o de unas condiciones de proceso concretas, de disponer el conjunto como una planta de evaporación súbita. Coulson, et al (2003).

Los evaporadores de superficie de placa han dado excelentes resultados como anaqueles en cuartos congelados dado que permiten mejorar la calidad del producto mediante sus altas concentraciones; son fáciles de limpiar y su capacidad de instalación es muy práctica. También son muy usados como divisiones en congeladores, en unidades congeladoras de exhibición de alimentos, en gabinetes de helado, en fuentes de soda, etc.



Para complementar la información acerca de la evaporación de placas, te recomiendo que revises las páginas 7 a la 12 del trabajo de tesis Zamora Pano, E. (1998) *Simulación Dinámica de Tres de Evaporadores*. México Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa.

Por último, recordemos que el crecimiento de la industria farmacéutica y de alimentos junto con el acelerado desarrollo de nuevos productos ha proporcionado una amplia gama de tipos de evaporadores. Para su diseño y fabricación se deben de tomar en cuenta las propiedades físicas y químicas de la materia prima que se desee concentrar. Esto ha sido un estímulo para el continuo perfeccionamiento de los equipos de evaporación y para la introducción de nuevas técnicas.

Es importante que recuerdes el tipo de equipo utilizado depende en gran manera del método según el cual se aplica calor al vapor y del método de agitación. Algunos usos de la evaporación que se menciona son utilizados para la obtención de agua desmineralizada para calderas u otros procesos, en las industrias de alimentos y farmacología



2.3. Evaporadores de múltiple efecto

Continuaremos nuestro estudio sobre los evaporadores. Ahora conocerás los evaporadores de múltiple efecto y sabrás por qué se les llama así. Conocerás cuáles son las ventajas que tiene un evaporador de este tipo, cuáles son sus principales características y qué usos industriales tienen.

Este tipo de evaporador se da cuando existe un conjunto de evaporadores en serie. Al primer evaporador se le denomina evaporador de primer efecto y al segundo, de segundo efecto y así sucesivamente (ver figura 21).

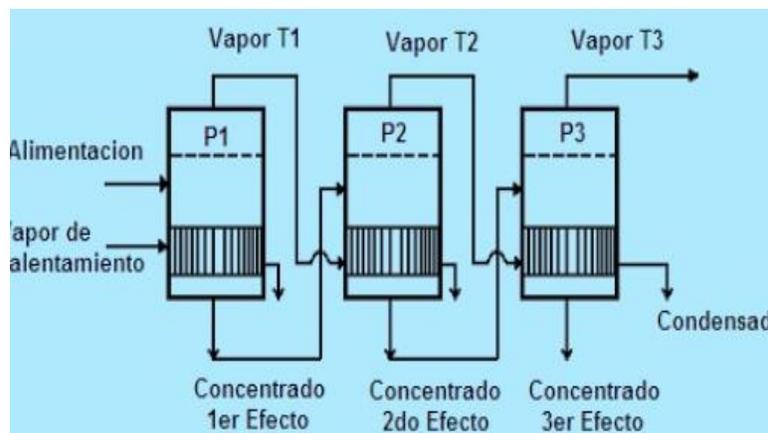


Figura 21. Evaporadores de múltiple efecto
Coulson et al (2003)

Cabe mencionar que una característica principal de este tipo de operación es que el vapor procedente del líquido en ebullición del primer efecto se emplea como vapor de calefacción del segundo.

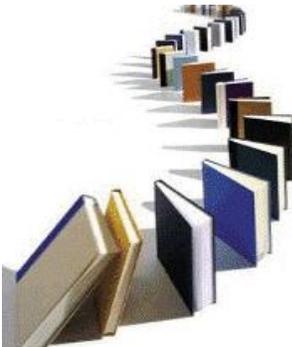


Para profundizar en el tema te invito que leas el libro de Coulson, et al (2003) *Ingeniería Química. Operaciones Unitarias Básicas* volumen 2, páginas 827 a 829. En este libro podrás encontrar los balances de evaporadores de simple efecto y múltiple efecto donde conocerás las características del evaporador.



2.3.1. Aprovechamiento del calor

Por lo tanto, en un evaporador de efecto múltiple tiene la misma capacidad que uno de simple efecto que posee el mismo coeficiente global, la misma superficie de calefacción que una de las unidades del efecto múltiple y que opera con una diferencia de temperatura igual la diferencia total de la temperatura con la que opera el sistema de múltiple efecto.



Para profundizar en el tema, te invito a que revises el siguiente artículo Carrizales Martínez, (2010). *Cálculo de evaporadores de múltiple efecto un método simplificado*. San Luis Potosí. Facultad de Ciencias Químicas. En este artículo observarás un método para el diseño de evaporadores de múltiple efecto, enfocado al caso del diseño de evaporadores en los que el licor concentrado presenta una elevación el punto de ebullición.

¿Por qué crees que es importante el aprovechamiento del calor en los evaporadores?
¿Consideras que, si realizamos un buen aprovechamiento del vapor, este impacta o influye en el costo total de los procesos industriales? ¿Conoces algunos métodos que son usados para el aprovechamiento de esta energía?



Para conocer más sobre la evaporación y los balances de calor, te invito a que leas el artículo de Estrada Pinto, et al (2000) *Algoritmo para el diseño conceptual de evaporadores de múltiple*. En este documento podrás encontrar un diseño novedoso para evaporadores de múltiple efecto para calcular el coeficiente de transferencia de calor.

En cualquier operación unitaria el costo más importante del proceso es el vapor de agua contenido. Por lo tanto, son muy importantes los métodos que procuran reducir este consumo para tener un óptimo desarrollo, generando con ello, un incremento económico para la empresa.

Un método muy utilizado en la industria es el empleo del vapor generado en el primer evaporador. ¿Pero qué sucede con el vapor generado en el segundo efecto?



La energía de vapor que se desprende de una solución en ebullición se puede utilizar para vaporizar más agua con tal de que exista una caída de temperatura en la dirección deseada para la transmisión de calor. En un evaporador de múltiple efecto esta caída de temperatura se crea disminuyendo progresivamente la temperatura de ebullición de la solución en una serie de evaporadores, mediante la utilización de presiones absolutas cada vez más pequeñas. La fuerza impulsora necesaria se puede obtener también aumentando la presión del vapor que se forma, mediante una re-compresión mecánica o térmica.

El vapor comprimido se condensa posteriormente en la calandria del evaporador de la cual proceden.

- Re-compresión mecánica representa el fundamento de la re-compresión mecánica del vapor, la alimentación diluida se calienta hasta una temperatura próxima a la de ebullición mediante intercambio de calor con la solución concentrada caliente y pasa a través de un calentador, tal como en un evaporador convencional de circulación forzada.
- Re-compresión térmica en un sistema de reimpresión térmica al vapor se comprime mediante un eyector accionado por vapor de agua de alta presión como se utiliza más vapor de agua del necesario para la ebullición de la solución el exceso de vapor se deja escapar o se condensa (Mc Cabe, et al 2003).



Para tener una mayor información te recomiendo que revises el libro Mc Cabe, et al (2003) *Operaciones Básicas de ingeniería química*, páginas 494 a 495, así como vuelve a revisar las páginas 864 y 865 de Coulson, J.M et al (2003) *Ingeniería Química de Operaciones Unitarias Básicas* volumen 2 para conocer las perspectivas sobre ambos autores.

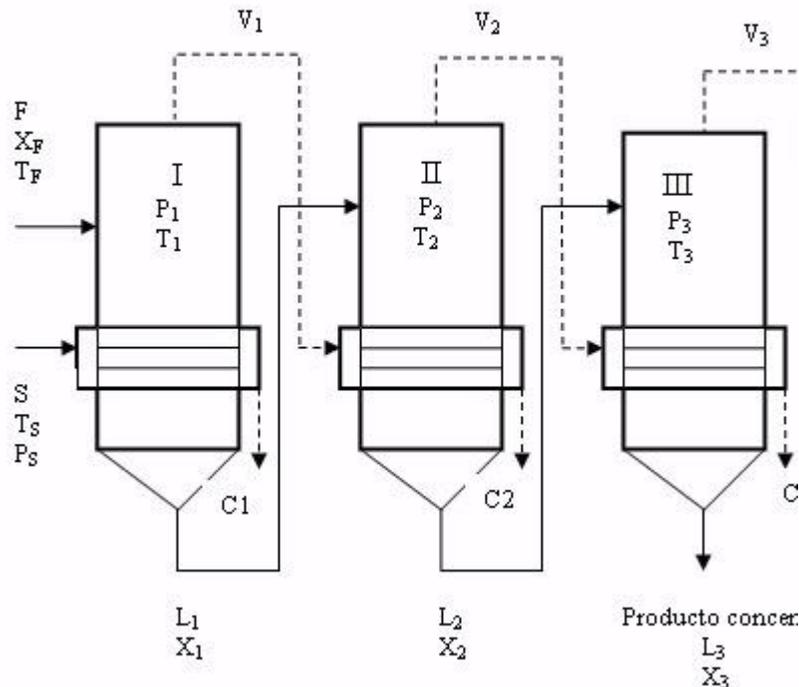


Figura 22. Evaporador de triple efecto
(Miranda, 2012).

En la **figura 22** se presenta un evaporador de triple efecto, al utilizarlo se consigue un gran ahorro de energía debido a que el vapor que se desprende del evaporador de primer efecto; se puede ocupar como energía para el siguiente evaporador, y así sucesivamente. Esto genera un proceso muy económico, dado que la variación de la entalpía de vaporización al pasar de un efecto a otro es muy pequeña, cuando se condensa.

2.3.2. Sistemas de circulación de las corrientes



Te invito a leer el artículo de Prevez Pascual, et al (2011). Utilización del condensado vegetal como agua de alimentación de la caldera en el procesamiento industrial de cítricos en el podrás observar un ejemplo donde aprovechan la energía para un equipo de evaporación y encontrarás como calculan la transferencia de calor visto en el tema.

¿Qué son y para qué sirven son los sistemas de circulación de corrientes? ¿Cuáles son las variables distinguen a este tipo de sistemas de circulación?



Recuerdas la unidad uno en donde hablamos de flujos de fluidos, como has observado al transcurrir el desarrollo de la unidad dos en los evaporadores existe un flujo de vapor que tiene una determinada dirección, es por ello que para el estudio de los evaporadores es necesario conocer el tipo de alimentación o sistema de circulación que posee un proceso de evaporación.

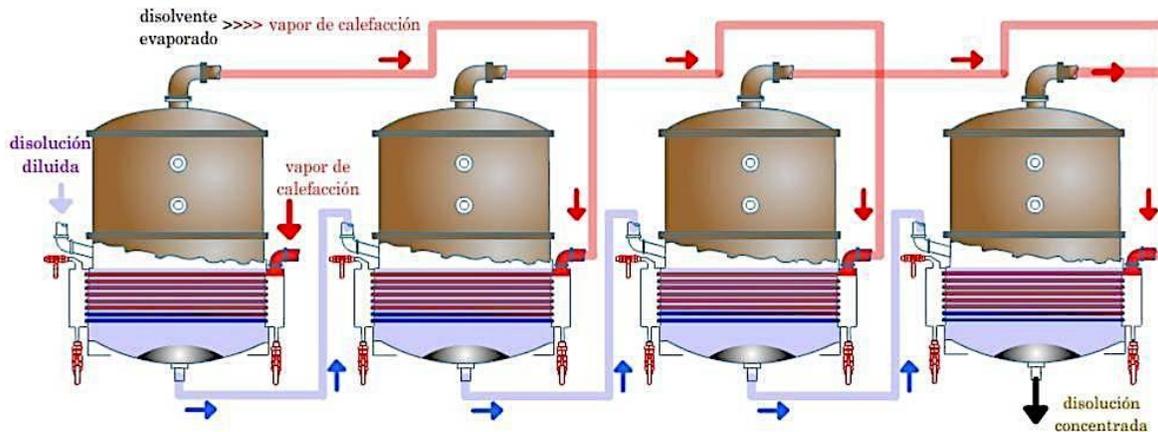


Figura 23. Sistema de circulación de evaporadores de múltiple efecto
(Bonsfills A.P. et al 2007)

En la **figura 23** puedes observar que hay un flujo de vapor a través de los tubos indicados por las flechas rojas, a eso se le denomina sistema de circulación. Como podrás ver es un sistema de evaporadores de triple efecto.



Para profundizar un poco más sobre este tema, te invito a que revises el texto de Bonsfills, et al (2007) *Evaporador de múltiple efecto*. Universidad Politécnica de Catalunya. En este documento podrás encontrar los sistemas de alimentación de los evaporadores de efecto múltiple, así como los distintos sistemas de circulación de corrientes.

¿Qué modelo matemático nos ayuda a conocer la transferencia de calor total en todos los efectos de un evaporador? Para contestar esta pregunta comencemos por explicar que este modelo matemático describe teóricamente de qué manera fluye el calor en un evaporador, así como las variables que influyen en esta operación unitaria.

En un evaporador de efecto simple, la entalpía del vapor producido no es aprovechada, ya que este vapor no es utilizado como elemento o agente de calefacción. Sin embargo, sí puede usarse en un segundo evaporador si la disolución contenida en este último tiene un punto de ebullición suficientemente bajo para que la diferencia de temperatura entre el



vapor de calefacción y la disolución hirviendo proporcione un flujo de calor adecuado. Esta es la idea básica de los evaporadores de múltiple efecto, introducidos por Rillieux, en 1830.

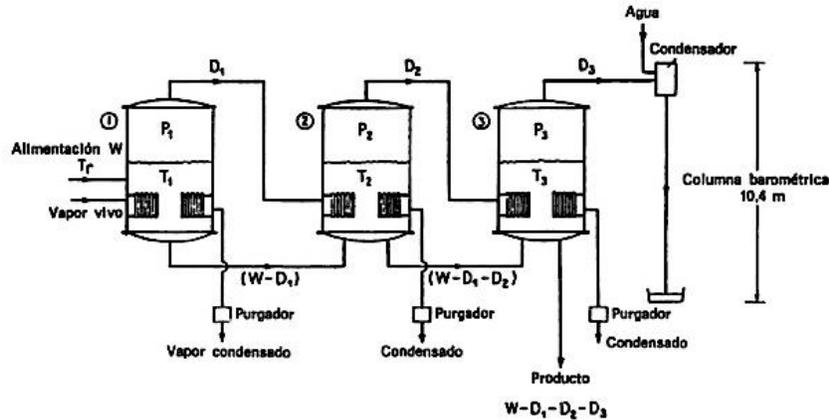


Figura 24. Evaporadores de triple efecto
Coulson, (2003)

En la **figura 24** se representa esquemáticamente un sistema de evaporación de triple efecto. Para tener un conocimiento más preciso sobre este tema, por favor, revisa nuevamente las páginas 474 a la 481. el libro de Mc Cabe, et al (2003), *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*.

2.3.3. Modelo matemático y su resolución

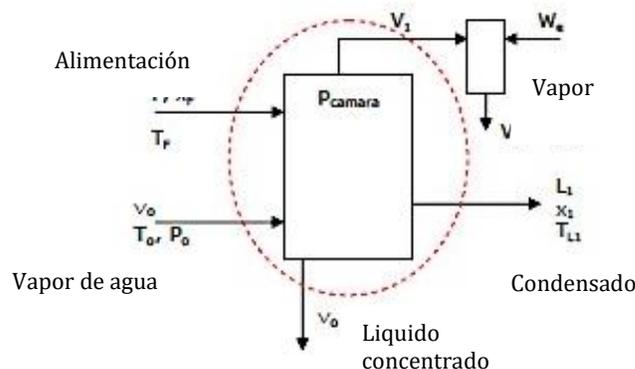


Figura 25. Evaporador simple efecto. Franco C.A (2008). Tomado de http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina_10.htm



En la **figura 25** puedes observar la entrada de alimentación (F), la entrada de vapor (V) y produce una salida de vapor, así como un condensado y un líquido concentrado.

Primeramente, realiza un balance:

Las ecuaciones de balance de materia permiten calcular V, conocidos F, x_F y x_L . (Flujos másicos o molares)

$$\text{Balance total: } F = L + V \dots \dots \dots (10.4)$$

$$\text{Balance parcial: } F \cdot x_F = L \cdot x_L + V \cdot y = L \cdot x_L \dots \dots \dots (10.5)$$

$$\text{De ellas se obtiene: } V = F (x_L - x_F) / x_L \dots \dots \dots (10.6)$$

Para el balance de energía se admite que no hay fugas ni arrastres, que el flujo de no condensables es despreciable y que no hay pérdidas de calor al exterior.

Con esto, queda la ecuación:

$$F \cdot h_F + V_c \cdot h_{Vc} = L \cdot h_L + V \cdot h_V + L_c \cdot h_{Lc} \dots \dots \dots (10.7)$$

Para evaluar estas entalpías, se toma la temperatura de 273,16 K como referencia, con lo cual pueden usarse con las entalpías obtenidas de las tablas del vapor de agua.

No hay problema en la determinación de h_{Vc} , (vapor sobrecalentado, generalmente), h_{Lc} , (agua líquida saturada o sub enfriada), y h_V (entalpía de un vapor de agua, generalmente, que puede ser saturado o sobrecalentado, si hay un aumento en el punto de ebullición). En cuanto a la determinación de h_F y h_L , (entalpías específicas de las disoluciones diluidas y concentrada), depende del comportamiento próximo o lejano de la idealidad de ambas.

2.3.4. Procedimiento de cálculo

Los procedimientos de cálculo que han sido desarrollados se fundamentan en 7 pasos muy importantes para el cálculo en evaporadores de triple efecto.

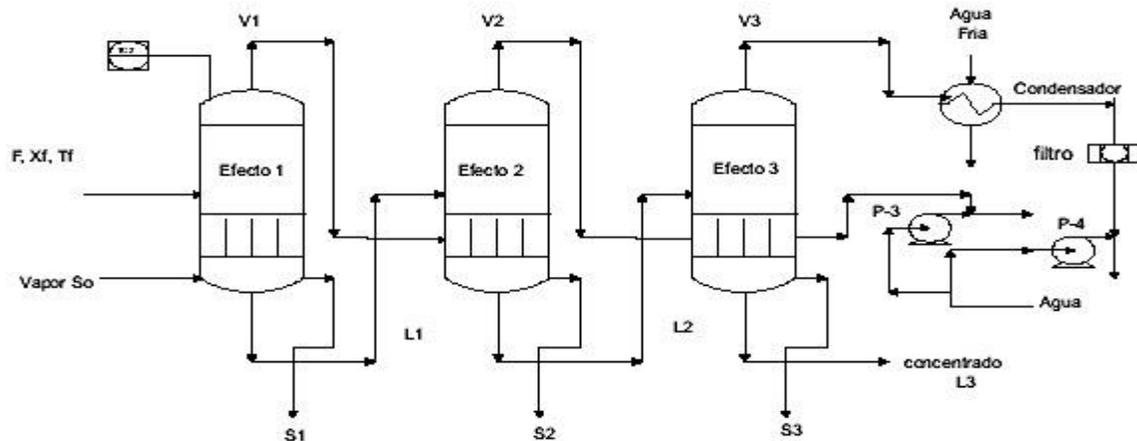


Figura 26. Diagrama esquemático del evaporador de tres efectos.
Belkis, et al (2008).

Si observas el diagrama de la **figura 26**, podrás ver cómo se encuentran en serie conectados estos evaporadores. Identifica el primer evaporador donde en él puedes observar la entrada de alimentación y entrada de vapor; además tenemos una presión y una temperatura dentro del mismo, por lo que cada efecto tiene su propia presión y temperatura indicada de la siguiente manera:

$$P1 > P2 > P3$$

Es importante señalar que al paso de cada evaporador disminuye la presión y la temperatura, por lo que en el primer evaporador son mayores estas que en el último.

El estudio de un sistema de evaporación de efecto múltiple se puede realizar tomando como base las siguientes suposiciones:

1. Se puede suponer que el primer evaporador opera en condiciones de flujo y estado estacionario, por lo tanto, tienen presiones y temperaturas constantes.
2. El punto de ebullición no presenta elevación, por lo que se desprecian las cargas hidrostáticas.
3. Se considera el calor para llevar la alimentación desde la temperatura inicial hasta la temperatura de ebullición, y el calor proporcionado por el vapor de calefacción es considerado el calor latente en el vapor que sale del mismo.
4. Las entalpías del líquido del evaporador no se toman en consideración.
5. También se desprecia el calor que lleva el líquido, como consecuencia de estar a una temperatura por encima de la ebullición cuando pasa al siguiente efecto.
6. El calor transmitido en cada efecto en la unidad de tiempo se representa de la siguiente forma:



$$Q_i = U_i A_i$$

ΔT_i por lo tanto Se representa con la siguiente formula

$$\Delta T_1 = T_{vc} - T_1, \Delta T_2 = T_1 - T_2, \Delta T_3 = T_2 - T_3$$

7. Recuerdas el diagrama de evaporador de múltiple efecto, en él puedes observar que la cantidad de calor cedida en un evaporador por el vapor de calefacción procedente del evaporador anterior es igual a la cantidad de calor del evaporador anterior, por lo que el área de cada evaporador se puede representar por la siguiente formula.

$$U_1 \cdot \Delta T_1 = U_2 \cdot \Delta T_2 = U_3 \cdot \Delta T_3$$

Recuerda que se debe de tomar en cuenta la diferencia de temperaturas, de manera aproximada e inversamente proporcional al valor del coeficiente global de transmisión de calor en el mismo.

$$\Delta T_1 = \Delta T \frac{1/U_1}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} \qquad \Delta T_2 = \Delta T \frac{1/U_2}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}}$$

A continuación, te presento un ejemplo de un evaporador de simple efecto donde podrás poner en práctica los temas vistos anteriormente.

2.3.5. Problemas resueltos

Ejemplo 1

Se necesita concentrar 20400 kg/hr de una solución de hidróxido de sodio del 15 al 57% en peso. El vapor de agua empleado para esta operación se encuentra a 2.1 gk/cm² de presión y la presión en el equipo es de 100 ml de hg. El coeficiente global de transferencia de calor es de 1200 watts sobre m²/°c. ¿Determine la cantidad de vapor consumido, la economía y la superficie de calefacción necesaria cuando las temperaturas de la solución a concentrar son:

A) 25 °C

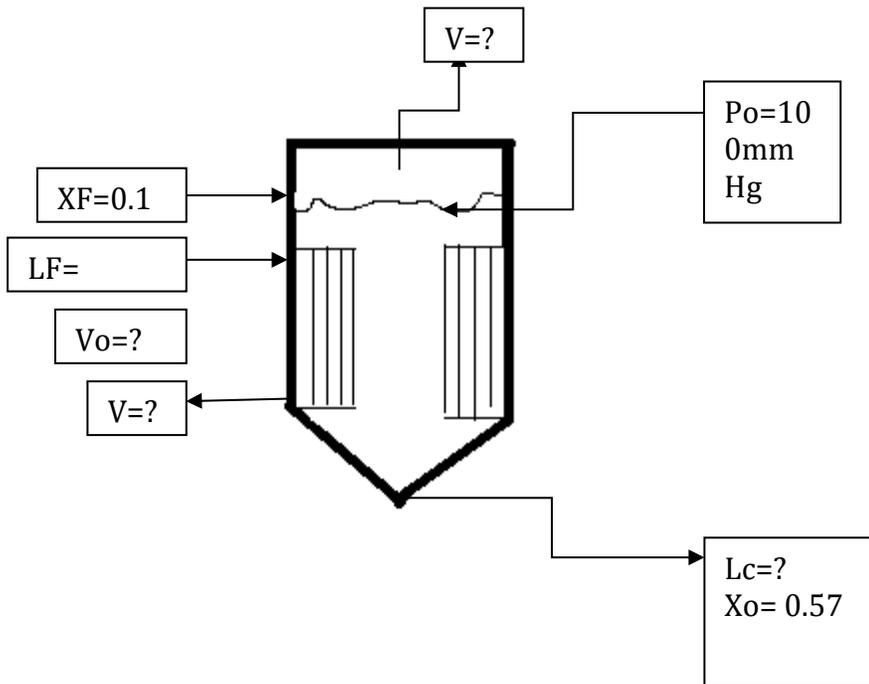


B) 68 °C

c) 63°C

Describe:

- 1) El diagrama de flujo de este problema
- 2) Poner los datos que se dispone para resolverlo
- 3) Balance de materia y energía
- 4) Se está usando vapor como medio de calentamiento.



Balance de Materia.

$$L_F = V + L_C \dots \dots \dots (1)$$

$$L_F X_F = L_C X_C \dots \dots \dots (2)$$

$$V_O = L_O \dots \dots \dots (3)$$

SUBSTITUYENDO EN LA ECUACION 2

$$20,400 \frac{kg}{hr} * (0.15) = L_C(0.57)$$



$$L_c = 536848 \text{ kg/hr}$$

Sustituyendo en la ecuación 1

$$L_F = V + L_C$$

$$20,400 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} - L_C = V$$

$$V = 15031.57$$

BALANCE DE ENERGIA

$$L_F X_F + Q = V H_V + L_O H_O + L_C H_C$$

$$L_F H_F + V_O H_V = V H_O + L_O H_O + L_C H_C$$

Sustituimos en la ecuación 3

$$V_O (h_V - h_L) = V H_V + L_C H_C - L_C H_C - L_F H_F$$

$$V_O X_O = V H_V + L_C H_C - L_F H_F$$

Determinar las propiedades termodinámicas

A) temperatura de operación

se revisa las tablas de vapor a la presión de 100 mm/Hg. Se obtiene una temperatura de operación $T_{op} = 52 \text{ }^\circ\text{C}$

Se realiza la conversión de mm Hg a Lb/m²

$$P = \frac{100 \text{ mm Hg} \times 14.7 \text{ lb/m}^2}{760 \text{ mm hg}}$$

$$P = 1.9342 \text{ lb/m}^2$$

- Del diagrama de entalpía (VS) con concentración para soluciones Hidróxido de sodio NaOH a una temperatura de 25 °C y una fracción XF de 0.15 nos da una HF de 23 kcal/kg.
- A una temperatura de TF =68°C y una fracción XF de 0.15 nos da HF de 58 Kcal/ kg
- A una temperatura de d TF=63°C

Actividades

La elaboración de las actividades estará guiada por tu docente en línea, mismo que te indicará, a través de la Planificación de actividades del docente en línea, la dinámica que tú y tus compañeros (as) llevarán a cabo, así como los envíos que tendrán que realizar.



Para el envío de tus trabajos usarás la siguiente nomenclatura: BOU1_U2_A1_XXYZ, donde BOU1 corresponde a las siglas de la asignatura, U2 es la etapa de conocimiento, A1 es el número de actividad, el cual debes sustituir considerando la actividad que se realices, XX son las primeras letras de tu nombre, Y la primera letra de tu apellido paterno y Z la primera letra de tu apellido materno.

Autorreflexiones

Para la parte de **autorreflexiones** debes responder las *Preguntas de Autorreflexión* indicadas por tu docente en línea y enviar tu archivo. Cabe recordar que esta actividad tiene una ponderación del 10% de tu evaluación.

Para el envío de tu autorreflexión utiliza la siguiente nomenclatura: BOU1_U2_ATR_XXYZ, donde BOU1 corresponde a las siglas de la asignatura, U2 es la unidad de conocimiento, XX son las primeras letras de tu nombre, y la primera letra de tu apellido paterno y Z la primera letra de tu apellido materno.

Cierre de la unidad

Durante el transcurso de la unidad uno se trataron términos como evaporación, puntos de ebullición, entalpías desde los conocimientos previos de balance de materia y energía con la transferencia de calor. Posteriormente se describieron las características que presentan las operaciones unitarias, así como la influencia que tienen en la industria. Es necesario reconocer que los principios fundamentales de estas operaciones unitarias inician con variables de temperatura, entalpía, alimentación de materias primas, condensación del producto, que se fueron relacionando en el transcurso del desarrollo de esta unidad.

Estos principios son la base para el desarrollo de procesos limpios que ayuden a conservar nuestro planeta. Recordemos que hoy en día son de gran utilidad para la producción de alimentos, fármacos, petroquímica; dado que en esos procesos industriales observamos el uso de evaporadores estos principios básicos ayudan a desarrollar y diseñar procesos que nos permiten satisfacer nuestras necesidades.

Lo anterior nos ayudará a saber relacionar los flujos de fluidos en los equipos industriales, en este caso con evaporadores, así como identificar las variables que se involucran en las operaciones unitarias que verás en la siguiente unidad.



Para saber más



Para conocer más sobre el tipo de evaporadores características y diferencias te pido revises el siguiente enlace <http://www.forofrio.sevillabt.com/files/evaporadores.pdf>

Para conocer más sobre el tipo de evaporadores características y diferencias te pido revises el siguiente enlace <http://www.forofrio.sevillabt.com/files/evaporadores.pdf>

Para conocer una aplicación más de los principios de los evaporadores
<http://www.ingenieriaquimica.es/files/pdf/iq/392/07articuloAG.pdf>

Para saber más sobre la transferencia de calor y el coeficiente de calor lo podrás reafirmar con el siguiente link <http://es.scribd.com/doc/16721787/10/evaporadores-de-circulacion-forzada>.



Fuentes de consulta



Básica

- Alvis, A., Cortés, L. y Páez M. (2009). *Transferencia de calor y materia durante la Fritura de Trozos de Ñame (Dioscórea Alata)*. Biblioteca Científica - SciELO Chile.
- Bonsfills, A.P. et al (2007) *Evaporadores de Múltiple Efecto*. Universidad Politécnica de Catalunya
- Coulson, J.M; J, F, Richardson; J.F & J.H Huiker (2003) *Ingeniería Química “Operaciones Unitarias Básicas*. Barcelona. Reverte.
- Carrizales Martínez, R. (2010). *Cálculo de evaporadores de múltiple efecto un método simplificado*. Tlatemoani. Revista Académica de Investigación. San Luis Potosí. Facultad de Ciencias Químicas.
- Estrada Pinto, C.A. et al (2000) *Algoritmo para el diseño conceptual de evaporadores de múltiple*. Revista Tecnología, Ciencia y Educación. Distrito Federal. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos.
- Franco, C. A. (2008) *Coeficientes de trasmisión de calor. Escuela universitaria politécnica. Universidad de Sevilla*
- Elton, F. Morales (2010) *Métodos de cálculo para evaporador de efecto simple*, de la Universidad Austral, Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de Chile.
- Jaramillo, O. A. (2007) *Intercambiadores de calor. Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México*. Recuperado https://scholar.google.co.za/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=U0bS410AAAAJ&citation_for_view=U0bS410AAAAJ:LkGwnXOMwfcC
- Incropera F.P; De Witt D.P. (1991). *Fundamentos de transferencia de calor*. México. Pearson Prentice Hall.
- Mc Cabe, Smith & Harriott, (2003) *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. España. Ed Reverte.



- Prevez Pascual, L., et al (2011). *Utilización del condensado vegetal como agua de alimentación de la caldera en el procesamiento industrial de cítricos*. Revista CENIC. Ciencias Químicas, vol. 42, núm. 1, Cuba. Centro Nacional de Investigaciones Científicas.
- De la Peña, E. y De la Peña, M.C. (2012). *Selección y diseño de evaporadores*. Dept. Técnico. Zean consultores, S.L.
- Quiroz Pérez, E. et al (2008) *Obtención experimental de los parámetros y variables de diseño de un evaporador de película descendente de doble efecto*. Revista de Investigación Científica. Zacatecas. Universidad de Ciencias Químicas de Zacatecas.

Complementaria:

- https://web.archive.org/web/20200225235151/http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina_10.htm