

ÍNDICE GENERAL

APARTADOS PRELIMINARES

GLOSARIO.....	III
OBJETIVOS	V
INTRODUCCIÓN	VI

APARTADOS CENTRALES

EVAPORADOR DE CALANDRIA	1
1. ¿Qué es?.....	1
2. ¿Cómo Funciona?	8
3. Propiedades Fisicoquímicas.....	17
4. Alternativas Tecnológicas.....	30

APARTADOS FINALES

CONCLUSIONES.....	50
RECOMENDACIONES	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXOS	54
Diagrama de Equipo	54

GLOSARIO

Calandria	Consiste en un haz de tubos vertical, corto, usualmente de no más de 6" de altura, colocado entre dos espejos que se remachan en las bridas del cuerpo del evaporador.
Convección natural	Es el mecanismo transferencia de calor a través de un fluido con movimiento masivo de éste.
Deflectores	Se utilizan para inducir turbulencia fuera de los tubos, es costumbre emplear deflectores que hacen que el líquido fluya a través de la coraza a ángulos rectos con el eje de los tubos.
Diagrama Dühring	de Este diagrama indica que la temperatura de ebullición de un líquido o disolución es una función lineal de la temperatura de ebullición de una sustancia de referencia, normalmente es el agua pura
Evaporación	La evaporación consiste en la adición de calor a una solución para evaporar el disolvente que, por lo general, es agua.
Evaporador	Un evaporador es un intercambiador de calor capaz de hervir la solución y un dispositivo para separar la fase vapor del líquido en ebullición.

Intercambiador de calor	Dispositivo diseñado para transferir calor de un fluido a otro los cuales se encuentran a diferentes temperaturas circulando en él, sea que estos estén separados o que se encuentren en contacto.
Lucetas	Dispositivo utilizado para medir el nivel de líquido o concentrado en el Evaporador.
Trampa de Vapor	Actúan por una diferencia de temperatura, entre el vapor y el condensado. Estas trampas poseen un elemento térmico (termostato) que se dilata con el calor del vapor y se contrae en presencia de condensado.

OBJETIVOS

General

Conocer qué es un evaporador, su funcionamiento e importancia comercial.

Específicos

1. Especificar que es un evaporador de calandria y sus componentes
2. Analizar el funcionamiento de un evaporador de calandria
3. Interpretar los fundamentos fisicoquímicos en el funcionamiento de un evaporador de calandria.
4. Proponer alternativas tecnológicas por medio de las cuales se pueda reemplazar el uso de un evaporador de calandria o hacer más eficiente su funcionamiento.

INTRODUCCIÓN

La evaporación es uno de los procesos más utilizados, consiste en separar, mediante ebullición, un disolvente volátil de uno o varios solutos que no son volátiles, en los cuales se encuentra como una mezcla. En la mayoría de casos la evaporación se lleva a cabo separando agua que es el disolvente.

Entre las áreas más importantes de la Ingeniería Química se encuentran el diseño, desarrollo y administración de equipo industrial. En los últimos años esta carrera ha quedado a puestos meramente administrativos o ejecución, pero ha quedado de lado el Diseño. Por lo tanto, en el presente trabajo se busca analizar el Diseño de un Evaporador de Calandria, tomando en cuenta las propiedades que afectan u optimizan el funcionamiento del equipo.

En este caso se tiene como un problema la evaporación, que es, la selección del tipo de evaporador hay, así como la eficiencia que este tenga, y como tomar en cuenta lo que se necesita concentra, o se requiere de un proyecto.

Hay varios tipos de propiedades que se deben tomar en cuenta en lo que es la concentración de la disolución, formación de espumas, sensibilidad a la temperatura, formación de incrustaciones, la eliminación.

EVAPORADOR DE CALANDRIA

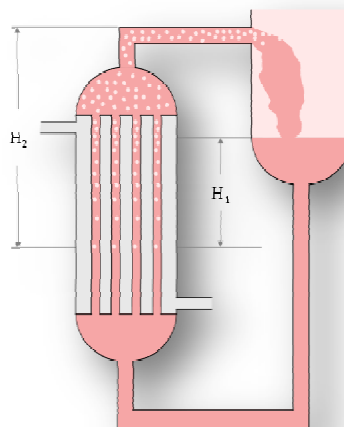
1. ¿QUÉ ES EL EVAPORADOR DE CALANDRIA?

1.1. EVAPORACIÓN

La evaporación consiste en la adición de calor a una solución para evaporar el disolvente que, por lo general, es agua. Usualmente, el calor es suministrado por condensación de un vapor (como vapor de agua) en contacto con una superficie metálica, con el líquido del otro lado de dicha superficie. El objetivo de la evaporación es concentrar una disolución consistente en un soluto no volátil y un disolvente volátil, se realiza vaporizando una parte del disolvente para producir una disolución concentrada.

En la evaporación el producto valioso es el líquido concentrado mientras que el vapor se condensa y se desecha. El agua salubre se evapora con frecuencia para obtener un producto exento de sólido para la alimentación de calderas, para procesos con requerimientos especiales o para el consumo humano. Esta técnica se conoce con frecuencia con el nombre de destilación de agua, pero se trata en realidad de evaporación.

Figura No. 1. Evaporación



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Natural_convection_reboiler.svg

1.2. ¿QUÉ ES UN EVAPORADOR?

Un evaporador es un intercambiador de calor capaz de hervir la solución y un dispositivo para separar la fase vapor del líquido en ebullición.

Un evaporador de calandria consiste en un haz de tubos vertical, corto, usualmente de no más de 6 pies de altura, colocado entre dos espejos que se repican en las bridas del cuerpo del evaporador. El vapor fluye por fuera de los tubos en la calandria, permitiendo un gran paso circular de derrame en el centro del haz de tubos donde el líquido más frío recircula hacia la parte inferior de los tubos.

Los tubos son grandes con mediciones de 3 pulgadas de diámetro exterior, con el fin de reducir la caída de presión y permitir una rápida recirculación, y una instalación de espejos encasquillados.

Figura No. 2 Arreglo de tubos, en el interior del evaporador de calandria



Fuente: Interior de evaporador Ingenio Madre
Tierra

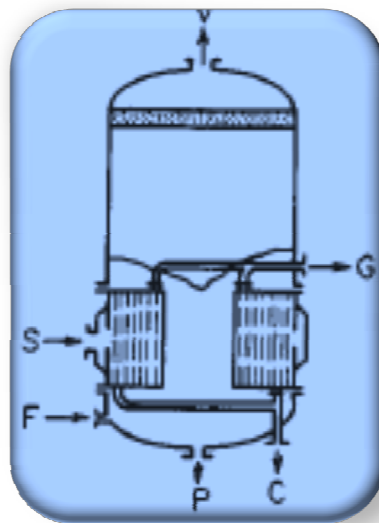
La circulación más allá de la superficie de calentamiento se induce mediante ebullición en los tubos, que tienen por lo común 50.8 a 76.2 mm (2 a 3 pulgadas) de diámetro y de 1.2 a 1.8 m (4 a 6 pies) de longitud. El cuerpo está constituido por un cilindro vertical, casi siempre de hierro colado, y los tubos se expanden dispuestos en paneles horizontales a lo largo de todo el diámetro del cuerpo de la unidad.

La velocidad de circulación a través de los tubos es varias veces superior a la velocidad de alimentación; por tanto, debe existir un paso de retorno desde la zona superior del panel de tubos hasta la zona inferior del mismo. Lo que se utiliza con mayor frecuencia es una admisión descendente o un tiro central como se muestra en la Figura 3.

Para que las pérdidas de fricción de la admisión descendente no impidan de manera apreciable la circulación hacia arriba a través de los tubos, el área de admisión descendente debe ser casi la mitad del diámetro del panel de tubos.

Figura No. 3 Evaporador de calandria

- C: Condensado
- F: Alimentación
- G: Venteo
- P: Producto
- S: Vapor de agua
- V: Vapor



Fuente: Robert Perry. "Manual del Ingeniero Químico" (7a Edición, México, Editorial McGraw Hill, 2002) Vol. 2, pp.

11-137

La circulación y transmisión de calor, en este tipo de evaporador, se ven afectadas fuertemente por el nivel de líquido. Se consiguen coeficientes de transmisión de calor más elevados cuando el nivel, como se indica mediante un medidor externo de vidrio es de aproximadamente la mitad de la altura de los tubos (ver figura 4). La circulación en el evaporador depende totalmente de la

ebullición, y cuando esta última cesa, los sólidos presentes se depositan, precipitándose de la suspensión, razón por la cual no se utiliza como evaporador de cristalización.

Figura No. 4. Medidores de vidrio (lucetas)



(a) Vista interna



(b) Vista externa

Fuente: Evaporador de Ingenio Madre Tierra

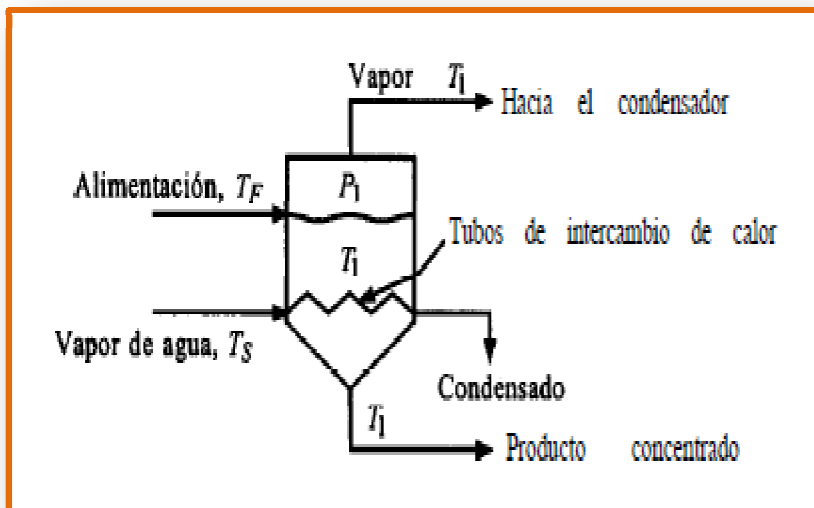
1.3. Transmisión de calor

Es el factor simple más importante en el diseño de evaporadores, ya que la superficie de calentamiento representa la mayor parte del costo del evaporador. Cuando los demás factores son idénticos, el tipo de evaporador que se selecciona es el que tiene el coeficiente más alto de transmisión de calor en términos de $J/s \cdot K$ ($Btu/h \cdot ^\circ F$). Se necesita calor para:

- Elevar la temperatura del material alimentado desde su temperatura inicial hasta la de ebullición.
- Para proporcionar la energía termodinámica mínima para separar el disolvente líquido del material alimentado.

- Para vaporizar el disolvente.

Figura No. 5 Diagrama de evaporador



Fuente:Geankoplis. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias Pág. 550

1.4. Separación vapor – líquido

Es un problema en el diseño de evaporadores, de este depende evitar el arrastre, debido al valor de los productos perdidos, la contaminación del vapor condensado, el ensuciamiento o corrosión de las superficies en que se condensa el vapor. La aspersion forma depósitos sobre las paredes.



Fuente: Interior de evaporador
Ingenio Madre Tierra

1.5. Materiales de construcción

Los evaporadores se construyen con algún tipo de acero. Sin embargo, muchas disoluciones atacan a los metales féreos y se produce contaminación. Por ello se utilizan materiales especiales como hierro negro, cobre, níquel, acero inoxidable, grafito y plomo. Puesto que son caros, resulta deseable obtener elevadas velocidades de transmisión de calor con el fin de minimizar el coste del equipo.

Figura No. 7 Acero inoxidable

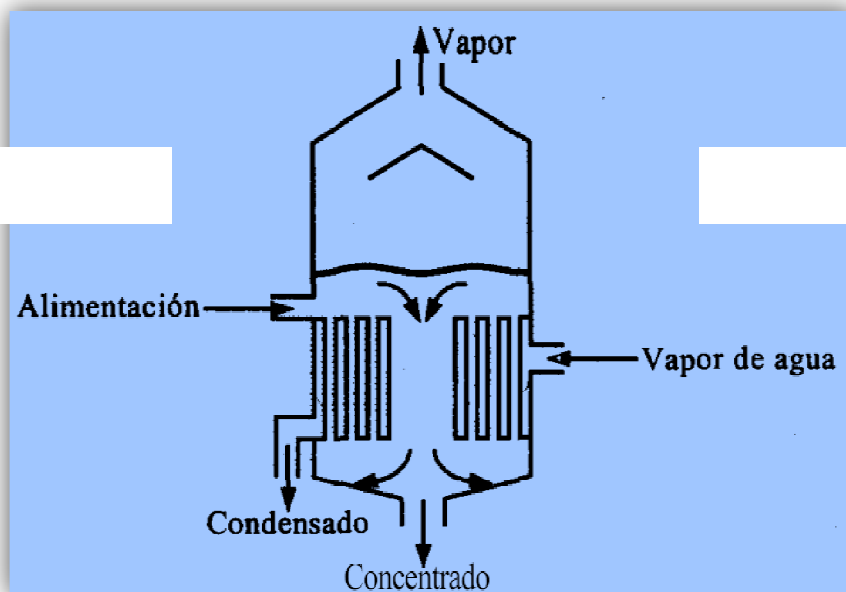


Fuente:<http://www.acerostama.com.mx/imagenes/destilacion>

1.6. Evaporador vertical con circulación natural.

En este tipo de evaporador se usan tubos verticales en lugar de horizontales y el líquido está dentro de los tubos, por lo que el vapor se condensa en el exterior. Debido a la ebullición y a la disminución de densidad, el líquido se eleva en los tubos por circulación natural, y fluye hacia abajo a través de un espacio central abierto grande, o bajada. Esta circulación natural incrementa el coeficiente de transferencia de calor. No es útil con líquidos viscosos.

Figura No. 8. Evaporador vertical con circulación natural

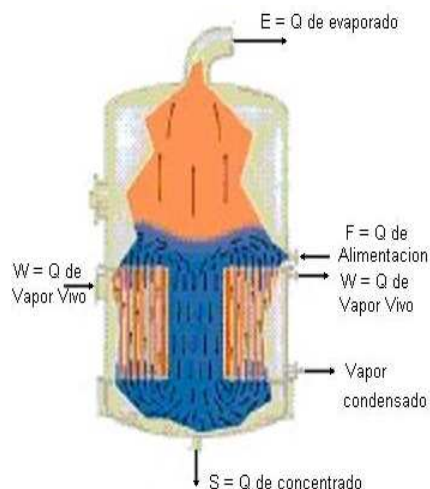


Fuente: Geankoplis. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias Pág. 548

2. ¿CÓMO FUNCIONA EL EVAPORADOR DE CALANDRIA?

Como se ha mencionada con anterioridad en el presente trabajo, un evaporador es un intercambiador de calor entre fluidos, de modo que mientras uno de ellos se enfría, disminuyendo su temperatura, el otro se calienta aumentando su temperatura, pasando de su estado líquido original a estado vapor (cabiendo la posibilidad de un calentamiento ulterior, con lo que se dice que alcanza el estado de vapor sobrecalentado).

Figura No. 9. Esquema de un Evaporador



Fuente: www.h2o-gmbh.com

Los evaporadores se fabrican en muy diversos tamaños y con distintas disposiciones, siendo profusamente empleados en gran cantidad de procesos térmicos, los cuales se llevan a cabo de forma rutinaria en las industrias. El análisis que aquí se presenta hace énfasis en un evaporador, con las características de ser de circulación natural y de tubos cortos verticales, que comúnmente es conocido como *Evaporador de Calandria*.

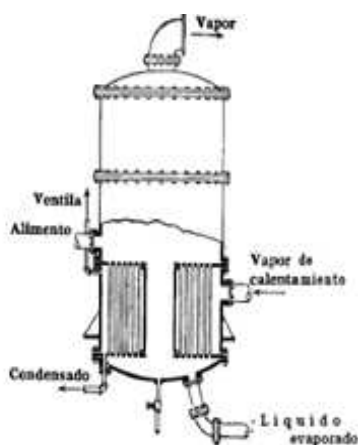
¿Qué es y cómo funciona un Evaporador de Circulación Natural?

En un evaporador de circulación natural se distribuyen una serie de tubos cortos verticales (calandria de tubos) dentro de una carcasa por donde circula el vapor. Cuando se calienta el producto, la propia evaporación de este hace que vaya subiendo por el interior de los tubos (evaporación súbita que arrastra el líquido), mientras que por el exterior de los mismos condensa el vapor

calefactor.

El producto concentrado junto con el vapor generado pasa a una cámara de vacío, donde el vapor se destina al condensador (si tiene valor añadido) o se libera, y el producto concentrado puede volver a introducirse como alimentación si se requiere mayor concentración, o extraerlo del equipo como producto final.

Figura No. 10. Evaporador de Calandria



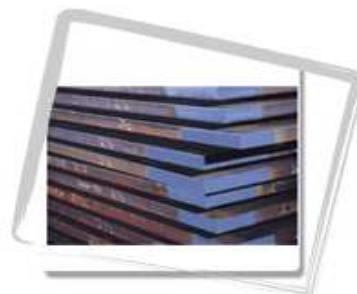
Fuente: Kern Donald. Procesos de transferencia de Calor. Pág. 467

En general, en un Evaporador de Tubos Verticales Cortos, o Evaporador de Calandria, esta es la idea de su funcionamiento, pero sería interesante adentrar al lector no solo en el macroanálisis del sistema, sino también en el microanálisis del mismo, y detallar a profundidad todo el equipo.

Materiales de construcción de un Evaporador de Calandria

Un Evaporador de Calandria se encuentra formado por una serie de materiales, como lo son el hierro negro el cual forma un gran porcentaje del material total del evaporador ya que es la base de su estructura y cuerpo, esto debido a su economía y propiedades físicas y químicas.

Figura No. 11. Hierro Negro



Fuente: <http://jpmsteel.net/tongmei-productos.shtml>

Figura No. 12. Cobre



Fuente: <http://jpmsteel.net/tongmei-productos.shtml>

El cobre es empleado en las tuberías de la calandria debido a su alta conductividad térmica, además posee otras propiedades como alta resistencia a la corrosión y es bactericida.

El acero inoxidable es uno de los materiales más importantes del evaporador, este se define como una aleación de acero con un mínimo de 10% de cromo contenido en masa.

El acero inoxidable es resistente a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales que contiene, posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro, por lo que se utiliza en la capa interior del evaporador.

Figura No. 13. Acero

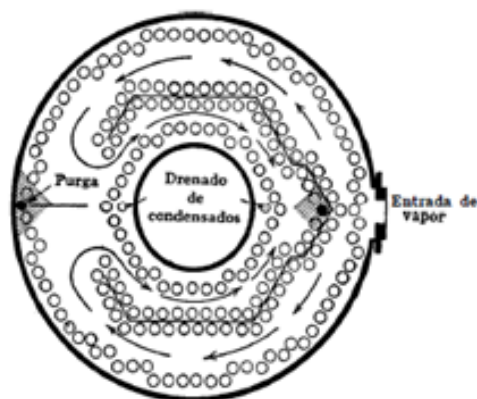


Fuente: <http://www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://www.aceroferrebaztan.com.mx/wp-content/lamina-de-acero-galvanizado.jpg>

¿Cuál es el Diseño del Evaporador de Calandria?

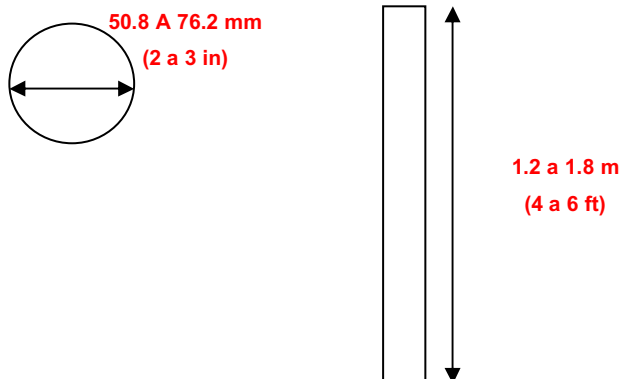
El Evaporador de Calandria, consiste en un haz de tubos vertical, corto, usualmente de no más de 6" de altura, colocado entre dos espejos que se remachan en las bridas del cuerpo del evaporador. El vapor fluye por fuera de los tubos en la calandria, y hay un gran paso circular de derrame en el centro del haz de los tubos. El área de este derrame varía desde la mitad del área de los tubos hasta un área igual a ella.

Figura No. 14. Calandria



Fuente: Kern Donald. Procesos de transferencia de Calor. Pág. 467

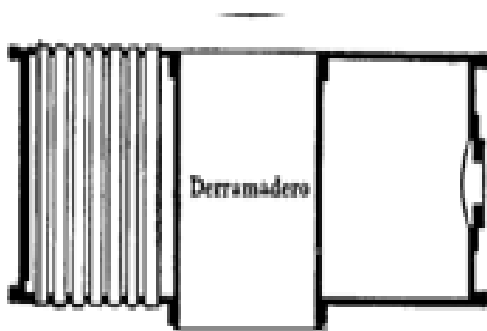
La circulación más allá de la superficie de calentamiento se induce mediante la ebullición en los tubos, que tienen por lo común de 50.8 a 76.2 mm (2 a 3 in) de diámetro y de 1.2 a 1.8 m (4 a 6 ft) de longitud.



El cuerpo es un cilindro vertical, casi siempre de hierro colado y los tubos se dilatan en espejos horizontales que cubre el diámetro del cuerpo. La velocidad de circulación por los tubos es muchas veces la velocidad de

alimentación; por tanto, debe haber un pasaje de regreso por encima del espejo superior y por debajo del espejo inferior. Lo que se utiliza con mayor frecuencia es una admisión descendente o un tiro central.

Figura No. 15. Derramadero



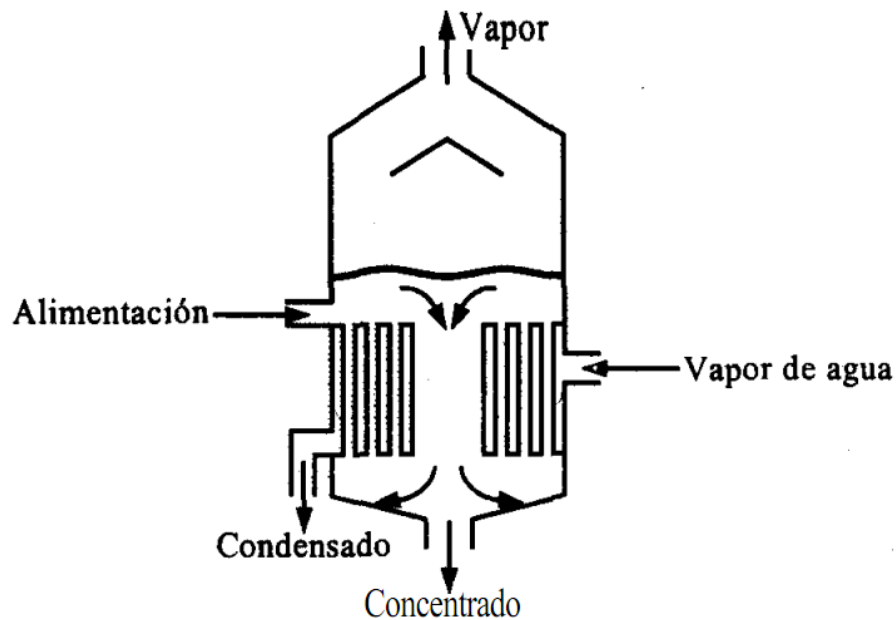
Fuente: Kern Donald. Procesos de transferencia de Calor. Pág. 467

Para que las pérdidas por fricción de la admisión descendente no impidan de manera apreciable la circulación hacia arriba a través de los tubos, el área de la admisión descendente debe ser del mismo orden de magnitud que el área combinada de sección transversal de los tubos. Esto da como resultado una admisión descendente de casi la mitad del diámetro del espejo.

¿Cómo es el funcionamiento del Evaporador de Calandria?

En este tipo de evaporador el líquido está dentro de los tubos, por lo que el vapor se condensa en el exterior. Debido a la ebullición y a la disminución de densidad, el líquido se eleva en los tubos por circulación natural, tal como se muestra en la Figura No. 16, y fluye hacia abajo a través de un espacio central abierto grande, o bajada. Esta circulación natural incrementa el coeficiente de transferencia de calor. No es útil con líquidos viscosos.

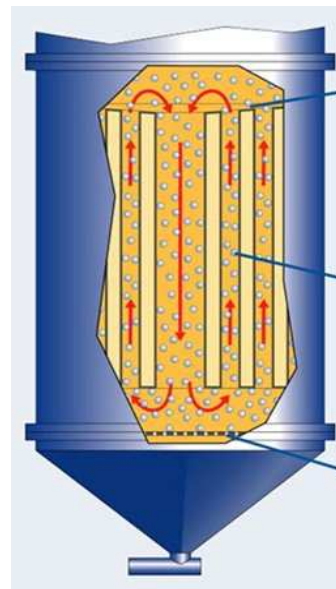
Figura No. 16. Evaporador de Calandria 1



Fuente: Geankoplis. Procesos de Transporte y OU. Pág. 548

El vapor condensa en el exterior de los tubos. El haz de tubos contiene un gran conducto central descendente. La mayor parte de la ebullición se produce en los tubos pequeños de forma que el líquido asciende a través de ellos y retorna por el conducto descendente. Las gotas de líquido sedimentan a través del vapor contenido en la cámara alta, situada encima de los tubos. La fuerza impulsora para el flujo del líquido a través de los tubos es la diferencia de densidad entre el líquido,

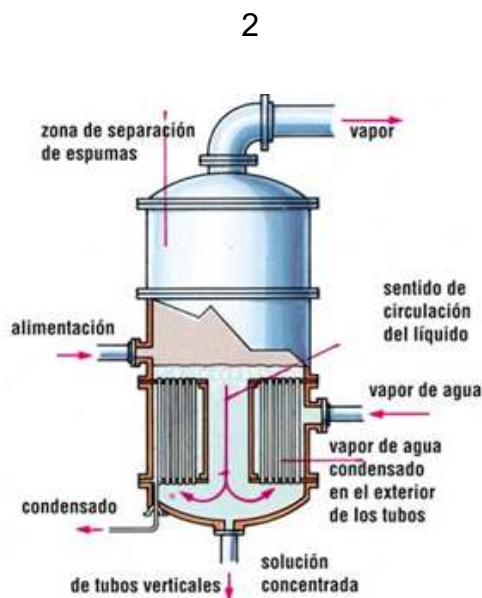
Figura No. 17. Proceso Interno del Evaporador



Fuente: www.h2o-gmbh.com

contenido en el conducto descendente y la mezcla de vapor y líquido que se origina en los tubos.

Figura No. 18. Evaporador de Calandria



La circulación se produce por convección natural pero es mucho menos rápida que en los evaporadores de convección natural de tubos largos.

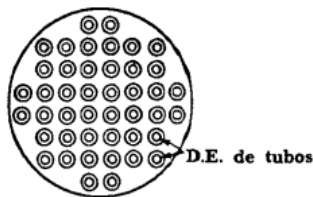
La mayor desventaja de este evaporador es el arrastre de espuma o gotas del líquido con el vapor, que sólo se atenúa mediante la introducción de corta espumas y tabiques deflectores.

Fuente: www.h2o-gmbh.com

Algunos problemas de Diseño y Funcionamiento del Evaporador de Calandria

Uno de los problemas es colocar deflectores en el espacio de vapor, de manera que haya una distribución relativamente completa del vapor en los tubos. Otro problema es el proveer de puntos de purga adecuados para que no se formen bolsas de gases no

Figura No. 19. Proceso Interno del Evaporador



Fuente: Kern Donald. Procesos de transferencia de Calor. Pág. 164

condensables. El condensado se remueve en cualquier punto conveniente.

El espacio sobre el nivel del líquido en la calandria, sirve primariamente para liberar el líquido que es arrastrado por el vapor. Un accesorio común a todos los evaporadores es una trampa que está instalada en la línea de vapor con el propósito de remover el líquido arrastrado.

Figura No. 20. Trampa de Vapor



Fuente: http://www.quiminet.com/ar7/ar_vcdarmAAsshgsA-las-trampas-o-purgadores-de-vapor.htm

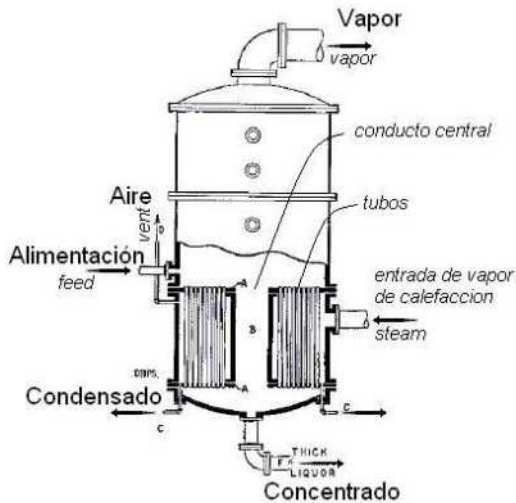
Y de volverlo al cuerpo del líquido, las cuales usan como principio de operación la eliminación centrífuga de las gotitas de líquido.

La circulación y la transferencia de calor en este tipo de evaporador se ven afectadas fuertemente por el “nivel” del líquido. Se logran los coeficientes de transferencia de calor más altos cuando el nivel, como se indica mediante un medidor externo de vidrio, es de sólo aproximadamente la mitad de la altura de los tubos. Las reducciones ligeras del nivel por debajo del óptimo dan como resultado el mojado incompleto de las paredes de los tubos con una tendencia mayor al ensuciamiento y una reducción rápida de la capacidad.

Cuando se emplea este tipo de evaporador con un líquido que puede depositar sales o escamas, es habitual funcionar con el nivel de líquido apreciablemente por encima del óptimo y casi siempre muy por encima del espejo superior.

Figura No. 21. Evaporador de Calandria

3



Los evaporadores de calandria son tan comunes que a menudo se les llama evaporadores estándar. Puesto que la incrustación ocurre dentro de los tubos, es posible usar el evaporador estándar para servicios más rigurosos que el evaporador de tubos horizontales, y además, puede instalarse un agitador en el fondo cónico o abombado para aumentar la circulación.

Fuente: Kern Donald. Procesos de transferencia de Calor. Pág. 465

3. PRINCIPIOS FISICOQUÍMICOS

3.1. Disminución de la presión de vapor

La presión de vapor de todas las disoluciones de solutos no volátiles y no ionizados (que no sean electrólitos) es menor que la del disolvente puro. Lo cual queda expresado por la ley de Raoult: La disminución de la presión de vapor que se observa (cuando el soluto no es volátil ni fónico) en toda disolución con respecto a la del disolvente puro, es directamente proporcional al número de moléculas (fracción molar) del soluto por unidad del volumen del disolución.

Este hecho se debe a que las moléculas del soluto dificultan la evaporación de las moléculas del disolvente que están en la superficie de la disolución al disminuir la presión de vapor tiene que elevarse al punto de ebullición de la disolución y disminuir su punto de congelación con respecto al del disolvente puro. Es decir, que si llamamos P_1 a la presión del vapor de la disolución, P_o a la presión de vapor del disolvente puro y n_1 y n_2 al número de moléculas por unidad de volumen de disolvente y de soluto, expresaremos matemáticamente la Ley de Raoult así:

$$P_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} * P_o \quad P_1 = P_o n_1 \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde n_1 es la fracción molar del disolvente $n_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2}$

La disminución de la presión es la diferencia entre la presión de vapor del disolvente (P_o) la de la disolución (P_1)

$$P = P_o - P_1$$

Por lo que según la ecuación 1

$$P = P_o - P_o n_1 = P_o(1 - n_1)$$

Como n_2 es la fracción molar del soluto

$$1 - n_1 = \frac{n_2}{n_1 + n_2}$$

Entonces: $P = P_o n_2$

3.2. Elevación del punto de ebullición

La elevación del punto de ebullición (EPE) es el incremento en la temperatura de ebullición, respecto al que tiene el agua pura a la misma presión. La presión de vapor de la mayor parte de las disoluciones acuosas es menor que la del agua a la misma temperatura. Por tanto, para una presión dada, la temperatura de ebullición de las disoluciones es mayor que la del agua pura. Es pequeño para disoluciones diluidas y para disoluciones de coloides orgánicos pero puede alcanzar un valor de hasta 150 °F para disoluciones concentradas de sales inorgánicas.

En la mayoría de los casos de evaporación las soluciones no son tan diluidas, por tanto, las propiedades térmicas de las soluciones que se evaporan pueden ser muy diferentes a las del agua. Las concentraciones de las soluciones son bastante altas por lo cual los valores de capacidad calorífica y punto de ebullición son muy distintos de los del agua.

La elevación en el punto de ebullición con el cambio de concentración puede determinarse de dos formas:

- Mediante la estimación matemática basada en la molalidad de las soluciones.

- Mediante el Diagrama de Dühring

De acuerdo con las 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 tanto, para una presión de trabajo dada, y una solución acuosa, no sólo sería preciso saber la temperatura de ebullición (saturación) del agua a esa presión, sino que habría que calcular la elevación del punto de ebullición de la disolución, para introducirlo en el ΔT de la ecuación de transmisión del calor.

En diluciones diluidas, el aumento en el punto de ebullición ($T_e - T_e^\circ$) es directamente proporcional al número de moléculas de soluto (o moles) M_s es un determinado peso de disolvente, ese cálculo se hace mediante la ecuación:

$$\Delta T = T_e - T_e^\circ = K_e M_s$$

(Aumento del punto de ebullición = constante ebulloscópica . molalidad)

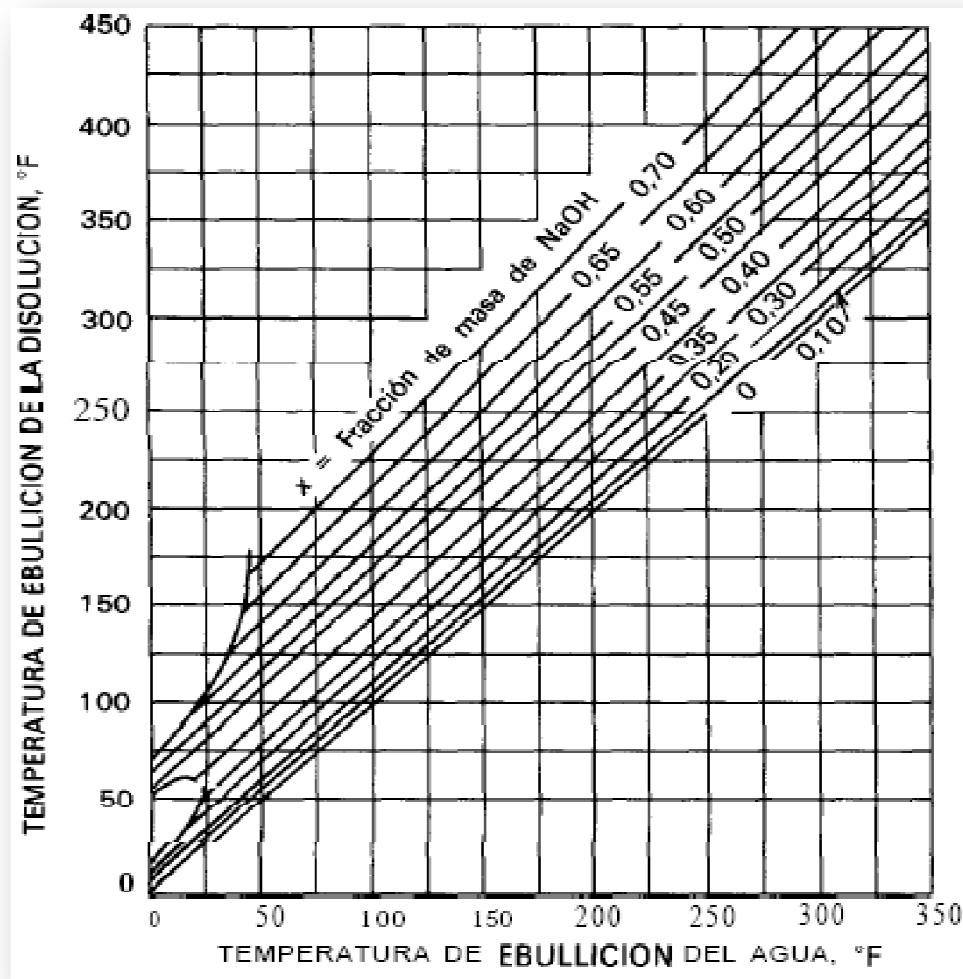
K_e es la constante molal de la elevación del punto de ebullición (constante molal ebulloscópica) y es una propiedad del disolvente.

En soluciones concentradas de solutos disueltos que no se comportan idealmente no es posible predecir la elevación del punto de ebullición debido a la presencia del soluto. Sin embargo, se puede usar una ley empírica muy útil conocida como **Regla de Dühring**, según la cual la temperatura de ebullición de un líquido o disolución es una función lineal de la temperatura de ebullición de una sustancia de referencia, normalmente es el agua pura; referida ambos a la misma presión. Por tanto, 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 diferentes concentraciones resultan diferentes rectas. Para todo el

intervalo de presiones la regla no es exacta, pero para un intervalo moderado las líneas son aproximadamente rectas aunque no necesariamente paralelas.

El trazado de estas rectas se puede realizar fácilmente si se dispone de dos temperaturas de ebullición de la disolución a dos presiones distintas. La figura No. 22 muestra una gráfica de las líneas de Dühring para soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) en agua de distintas concentraciones

Figura No. 22. Líneas de Dühring para el sistema hidróxido sódico-agua.



Fuente: McCabe. Operaciones unitarias en ingeniería química. Pág. 492

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.

3.3. Viscosidad

Es de todas las propiedades físicas y parámetros de transporte una de las que más incide sobre el valor de coeficiente de transferencia de calor. La viscosidad de la solución puede ser afectada por los cambios en la temperatura y en la composición de la misma. En general, una disminución de la viscosidad genera un aumento del coeficiente de transferencia de calor y por ende una disminución en el área requerida.

3.4. Balance de Masa

Para el balance de materia, y puesto que se trata de estado estacionario, la velocidad de entrada de masa es igual a la velocidad de salida de masa.

Entonces, para un balance global de masa:

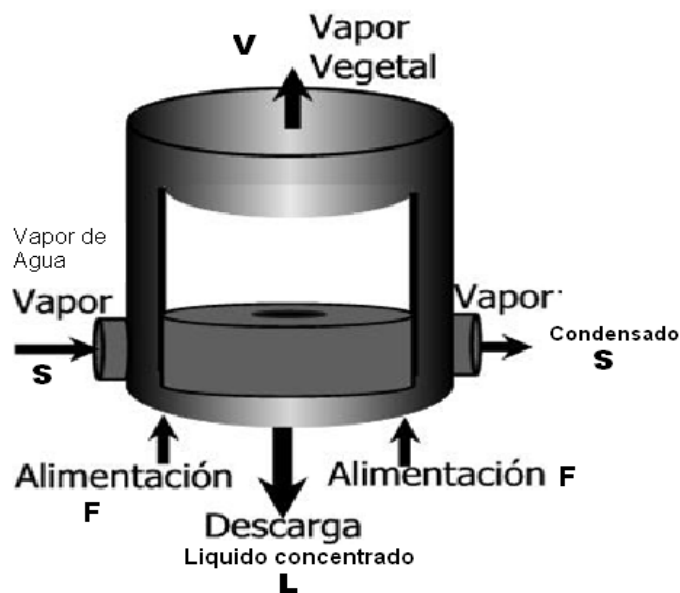
$$F = L + V$$

Donde la alimentación del evaporador esta representada por F en kg/h (lb_m/h) con contenido de sólidos x_F , La salida del líquido concentrado L kg/h (lb_m/h) con contenido de salidos x_L y el vapor esta representado por V kg/h (lb_m/h) con contenido de sólidos $y_v = 0$ ya que se desprende como disolvente puro.

Para un balance con respecto al soluto (sólidos) solamente,

$$Fx_F = Lx_L$$

Figura No. 23. Balance de masa para un evaporador de simple efecto.



Fuente: Referencia No. 4, Pág. 6

3.5. Balance de energía

En un evaporador de simple efecto el calor latente de condensación del vapor de agua es transmitido a través de una superficie de calefacción para vaporizar agua de una disolución a ebullición. Se necesitan dos balances de entalpía, uno para el vapor de agua y otro para el lado de la disolución o vapor.

La expresión básica para determinar la capacidad de un evaporador de efecto simple es la ecuación que puede escribirse como:

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

Donde ΔT K ($^{\circ}\text{F}$) es la diferencia de temperatura entre el vapor de agua que se condensa y el líquido a ebullición en el evaporador. Para resolver la ecuación anterior es necesario determinar el valor de q en W (btu/h) llevando a

cabo un balance de calor y materia en el evaporador de la figura de arriba. La alimentación al evaporador es F kg/h (lb/h) con contenido de sólidos de fracción de masa x_F , temperatura T_F y entalpía h_F J/Kg (btu/lb.). La salida es de un líquido concentrado L kg/h (lb./h) con un contenido de sólidos x_L , una temperatura T_L y una entalpía h_L . El vapor V kg/h (lb./h) se desprende como disolvente puro con un contenido de sólidos $y_v = 0$, temperatura T_1 y una entalpía H_v . La entrada de vapor de agua saturado S kg/h (lb/h) tiene temperatura de T_s y entalpía H_s . Se supone que el vapor de agua condensado S kg/h (lb/h) sale a T_s , esto es, a la temperatura de saturación, y con entalpía de h_s . Esto significa que el vapor de agua solo transfiere su calor latente, λ , es

$$\lambda = H_s - h_s$$

Puesto que el vapor V esta en equilibrio con el líquido L , las temperaturas de ambos son iguales. Además, la presión P_1 es la de vapor de saturación del líquido de composición x_L a su punto de ebullición T_1 , (Esto supone que no hay elevación del punto de ebullición.)

Para el balance de calor, y puesto que calor total que entra = calor total que sale:

Calor en la alimentación + calor en el vapor de agua = calor en el líquido concentrado + calor en el vapor + calor en el vapor de agua condensado.

Se supone que no hay pérdidas de calor por radiación o convección. Se obtiene

$$Fh_f + SH_s = Lh_L + VH_V + Sh_s$$

Haciendo las sustitución del calor latente se obtiene:

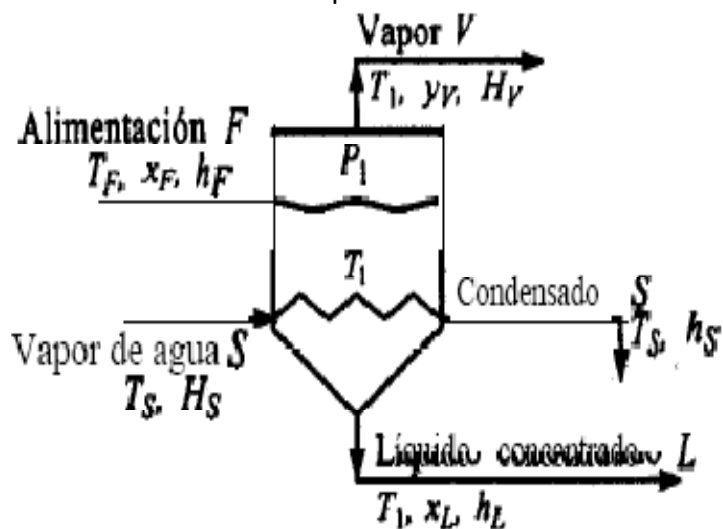
$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + VH_V$$

Entonces, el calor q transferido en el evaporador es

$$q = S(H_S - h_S) = S\lambda$$

En las ecuaciones anteriores el calor latente λ del vapor de agua a la temperatura de saturación T_s se obtiene de las tablas de vapor de agua.

Figura No. 24: Balance de masa para un evaporador de simple efecto.



Sin embargo, generalmente no se dispone de las entalpías de la alimentación y de los productos. Los datos de entalpía y concentración solo se tienen para algunas sustancias en disolución.

Fuente: Geankoplis. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Pág. 553

Por tanto, se establecen algunas aproximaciones para determinar el balance de calor, como sigue:

1. Se puede demostrar en forma aproximada que el calor latente de evaporación de 1 kg masa de agua de una solución acuosa se calcula con las tablas de vapor mediante la temperatura de la solución a ebullición T_1 , (temperatura de la superficie expuesta) en lugar de temperatura de equilibrio del agua pura a P_1 .

2. Si se conoce la capacidad calorífica cp_F de la alimentación líquida y cp_L del producto, estos son útiles para calcular las entalpías. (Se desprecian los calores de dilución, que en la mayoría de los casos se desconocen.)

3.5.1. Balance de entalpía con calor de dilución apreciable; diagrama entalpía-concentración.

Si el calor de dilución de la disolución que se concentra es demasiado grande para ser despreciado, la entalpía no es una función lineal de la concentración a temperatura constante. Este fenómeno del calor de dilución se explica como sigue: Cuando se disuelven lentejas de NaOH en cierta cantidad de agua, se observa que presenta una elevación considerable de la temperatura, esto es, se desprende calor, al cual se le llama *calor de disolución*. La cantidad de calor desprendida depende del tipo de sustancia y de la cantidad de agua usada.

La fuente más satisfactoria para obtener valores de entalpía específica de la solución diluida (H_f) y entalpía específica de la disolución concentrada (H) para su utilización es un diagrama entalpía-concentración en el que la entalpía, en Btu/lb o J/g de disolución, se representa frente a la concentración, en fracción de masa o porcentaje en peso de disolución. Las isotermas del diagrama muestran la entalpía como una función de la concentración a temperatura constante.

Sin embargo, son pocos los diagramas disponibles, entre los que se encuentran los de los sistemas ácido clorhídrico-agua, ácido sulfúrico-agua, cloruro cálcico-agua, etanol-agua, hidróxido sódico-agua.

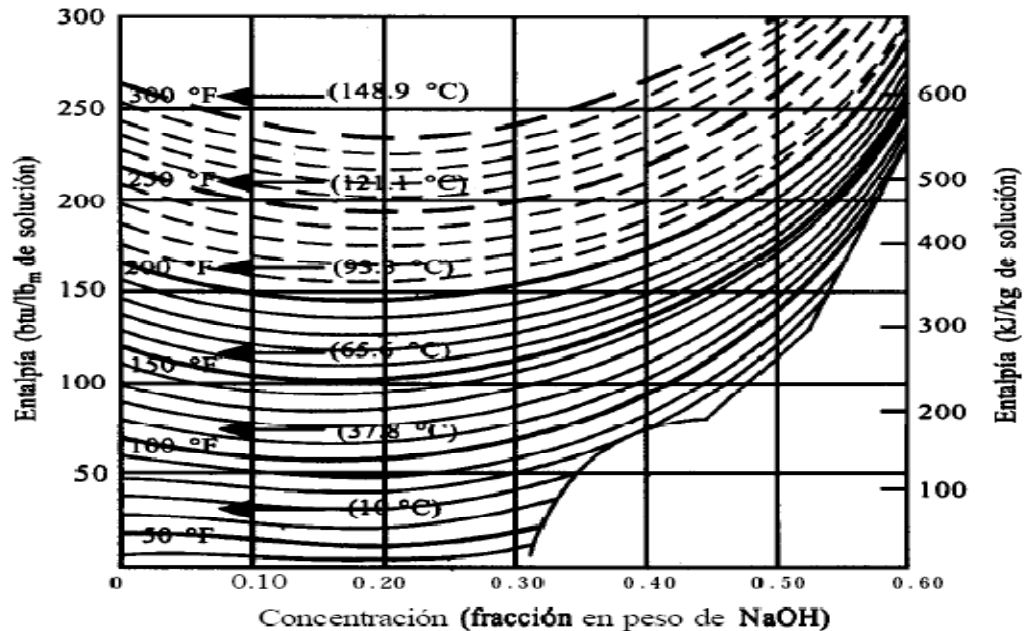
La figura a continuación es un diagrama de entalpía-concentración para disoluciones de hidróxido sódico en agua. Las concentraciones están en

fracción en masa de hidróxido sódico, las temperaturas en grados Fahrenheit y las entalpías en Btu por libra de disolución. La entalpía del agua está para la misma temperatura de referencia que en el caso de las tablas del vapor de agua, es decir, agua líquida a 32 °F (0 °C), de forma que las entalpías de la figura se pueden utilizar con las de las tablas del vapor de agua cuando en los cálculos intervienen agua líquida o vapor de agua.

Se toman los valores de H_f y H del diagrama, y la entalpía H , del vapor que sale del evaporador se obtiene a partir de las tablas del valor de agua. Las líneas curvas límite sobre las que terminan las isotermas de la figura a continuación representan condiciones de temperatura y concentración para las que se forman fases sólidas, que son distintos hidratos sólidos de hidróxido sódico. Las entalpías de todas las disoluciones de una sola fase están situadas por encima de esta línea límite. El diagrama entalpía-concentración puede ampliarse también para incluir fases sólidas.

Las isotermas de un diagrama entalpía-concentración para un sistema sin calor de dilución son líneas rectas. La curvatura de las líneas proporcionan una medida cualitativa del efecto del calor de dilución sobre la entalpía de disoluciones de hidróxido sódico y agua. Los diagramas entalpía-concentración pueden construirse, por supuesto, para disoluciones con calores de dilución despreciables, pero resultan innecesarios a la vista de la sencillez de los métodos del calor específico a que se ha hecho referencia anteriormente.

Figura No. 25. Diagrama de entalpía-Concentración



Fuente: Geankoplis. Procesos de transporte y operaciones unitareas. Pág. 558

3.6. Concentración

La concentración, de la solución es un factor fisicoquímico muy importante en el proceso de evaporación, porque es la que determina otros dos elementos fundamentales de la transferencia de calor, como lo son la capacidad calorífica de la solución, la otra, que no es tan obvia, es la elevación del punto de ebullición de la solución.

3.7. Solubilidad

Todo sólido, posee una solubilidad máxima en agua, para esto, se debe tener en cuenta que existe una región, denominada la región de saturación, para la solución que se está evaporando. Si se pasa de esta zona, se llega a la región de sobresaturación, donde la precipitación o cristalización es casi

inevitable, por lo que se debe considerar, en el proceso si es factible alcanzar una determinada concentración, de lo contrario, se tendría la cristalización dentro del evaporador, y dependiendo del tipo, esto, podría interrumpir su operación.

3.8. Sensibilidad térmica

Según se expresó anteriormente, es indispensable, tomar en cuenta la sensibilidad térmica del fluido a evaporar, pues esta determinará la temperatura máxima a operar, y de acuerdo con la regla de fases, por ejemplo si se tuviesen dos grados de libertad, de modo que al fijar la temperatura y la concentración, se ha definido ya la presión de operación, por lo tanto, la sensibilidad térmica, juega un papel indispensable en los procesos de evaporación.

3.9. Formación de espumas

En algunos de los casos, como lo son las soluciones caústicas, la leche de vaca y algunas soluciones de ácidos grasos, se da la formación de espumas durante la ebullición. Esta, por su baja densidad, es arrastrada por el vapor que se está produciendo y se escapa por la parte superior del evaporador, en el caso en que sea el último efecto o que sea un sistema de simple efecto, pero en un sistema múltiple efecto, esto puede ser muy perjudicial para el equipo, específicamente, para el siguiente evaporador en la línea, pues al darse la condensación, se dará la deposición de sólidos en la parte del vapor. Además del caso expuesto anteriormente, se tiene el problema, de que se pierde material, que se escapa en forma de espuma.

Las espumas se forman cuando hay una capa de líquido con distinta tensión superficial que el resto de la masa, ocasionada a veces por la presencia de pequeñísimas partículas sólidas o incluso coloidales,

habiéndose dedicado un esfuerzo considerable al estudio de las técnicas antiespumantes.

A veces se utilizan métodos químicos, adicionando pequeñas cantidades de reactivos, (aceites sulfonados), para disminuir o reducir la formación de espumas. Si se quiere evitar la adición de sustancias extrañas, se pueden eliminar las espumas modificando el diseño del evaporador, con una superficie caliente que rompa la espuma, (muchas se destruyen a alta temperatura), o haciendo pasar el vapor formado a través de unas placas deflectoras, contra las que choca, evitando así el arrastre.

4. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

4.1. FACTORES INFLUYENTES EN LA SELECCIÓN DEL EQUIPO

4.1.1. INVERSIÓN INICIAL

Este es el factor junto a los costos de operación y mantenimiento son de los más importantes, ya que los mismos me indican si determinado equipo, es económicamente viable y si posible de mantenerlo en funcionamiento, sin que ello implique una pérdida.

Existen diferentes definiciones de inversión, entre ellas podemos citar la siguiente definición de Peumans: “La inversión es todo desembolso de recursos financieros para adquirir bienes concretos durables o instrumentos de producción, denominados bienes de equipo, y que la empresa utilizará durante varios años para cumplir su objetivo.”

Toda inversión se refiere al empleo de capital en algún tipo de actividad o negocio con el objetivo de incrementarlo. Desde una consideración amplia, la inversión es toda materialización de medios financieros en bienes que van a ser utilizados en un proceso productivo de una empresa o unidad económica, comprendería la adquisición tanto de bienes de equipo, materias primas, servicios etc. Desde un punto de vista más estricto la inversión comprendería solo los desembolsos de recursos financieros destinados a la adquisición de instrumentos de producción, que la empresa va a utilizar durante varios periodos económicos.

4.1.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos de operación se definen como la valorización de todos los

recursos empleados o gastos necesarios para la operación en términos normales de una actividad económica o negocio. El costo de operación expresada habitualmente en flujos, es decir, recursos empleados en función de una unidad de tiempo y que se contemplan en los presupuestos normales anuales de operación de los establecimientos.

4.1.3. COSTOS DE MANTENIMIENTO

Los costos de mantenimiento se refieren a todos aquellos gastos necesarios en la prevención de fallos del equipo, así como asegurar la calidad del producto, disminuir costos de operación, mantenimiento de buenas condiciones del equipo, maximizar la vida útil del equipo, seguridad en el área de trabajo.

Los costos de mantenimiento son muy difíciles de estimar con anticipación. La evidencia de los sistemas existentes muestra que los costos de mantenimiento son lo más cuantioso del desarrollo y uso del sistema.

4.1.4. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La resistencia global a la transmisión de calor entre el vapor de agua y el líquido en ebullición es 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 es el inverso de la resistencia total. En la mayoría de los evaporadores el factor de ensuciamiento del vapor de agua condensante y la resistencia de la pared del tubo son muy pequeños, y generalmente pueden despreciarse en el cálculo de evaporadores. En un evaporador de película agitada la pared del tubo es bastante gruesa, de forma que su resistencia puede ser una parte importante de la resistencia total.

El tipo de evaporador seleccionado será aquel con el coeficiente de transferencia de calor más alto a las condiciones de diseño deseadas en términos de $J/s-K$ por unidad monetaria de costo de instalación. Cuando se requiere de potencia para inducir la circulación a través de la superficie de calentamiento el coeficiente de transferencia debe de ser aún más alto para compensar el costo de la energía empleada en la circulación.

4.1.5. INTERVALO DE CONCENTRACIÓN FINAL

Aunque la disolución que entra como alimentación de un evaporador puede ser suficientemente diluida teniendo muchas de las propiedades físicas del agua, a medida que aumenta la concentración de la disolución adquiere cada vez un carácter individualista. La densidad y la viscosidad aumenta con el contenido de sólido hasta que la disolución o bien se transforma en saturada o resulta inadecuada para una transmisión de calor adecuada. La ebullición continuada de una disolución saturada da lugar a la formación de cristales, que es preciso separa pues de lo contrario obstruyen los tubos. La temperatura de ebullición de la disolución puede también aumentar considerablemente al aumentar el contenido de sólido, de forma que al temperatura de ebullición de una disolución concentrada puede ser mucho mayor que la del agua a la misma presión.

4.1.6. FORMACIÓN DE ESPUMAS

Algunas sustancias orgánicas forman espuma durante la vaporización. Una espuma estable acompaña al vapor que sale del evaporador dando lugar a un importante arrastre. En casos extremos toda la masa de líquido puede salir con el vapor y perderse.

4.1.7. FORMACIÓN DE COSTRAS

Algunas disoluciones depositan costras sobre las superficies de calefacción. En estos casos el coeficiente global disminuye progresivamente hasta que llega un momento en que es preciso interrumpir la operación y limpiar los tubos. Cuando las costras son duras e insolubles, la limpieza resulta difícil y costosa.

4.1.8. SENSIBILIDAD A LA TEMPERATURA

Muchos productos alimenticios se dañan cuando se calienta a temperaturas moderadas durante tiempos relativamente cortos. En la concentración de estos productos se necesita técnicas especiales para reducir tanto la temperatura del líquido como el tiempo de calentamiento.

4.1.9. CORROSIÓN

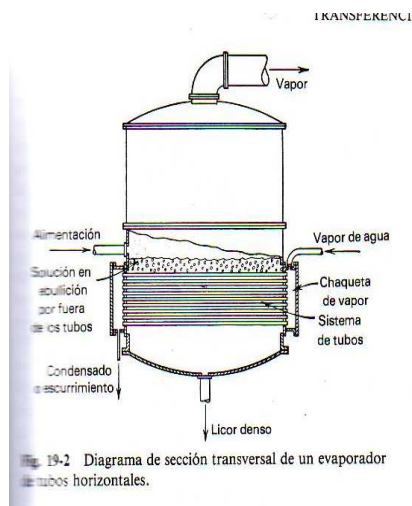
La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos.

4.2. EQUIPOS

4.2.1. EVAPORADOR DE TUBOS HORIZONTALES

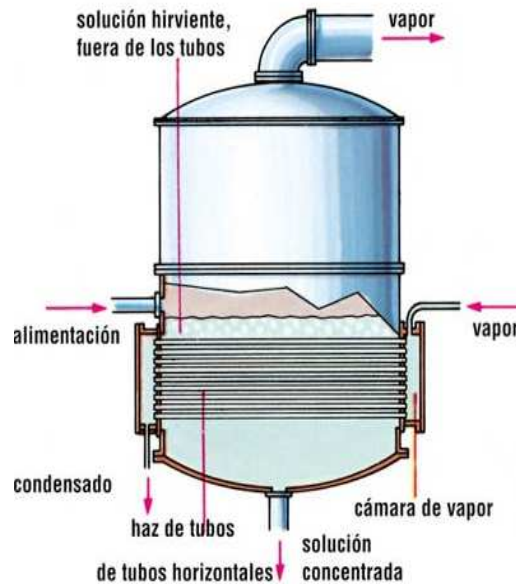
Es uno de los tipos de construcción clásica, habiendo sido ampliamente utilizado durante muchos años. La solución que se va a evaporar hierve afuera de los tubos horizontales dentro de los cuales se condensa el vapor. Los tubos horizontales intervienen con la circulación natural del líquido hirviendo por lo que se disminuye a un mínimo la agitación del mismo. Como resultado, el coeficiente global para la transferencia de calor es inferior al que se presenta en otras formas de evaporadores, en especial si se tratan de soluciones viscosas. No se hace nada para evitar la espuma que se presenta debido a la ebullición. El depósito procedente de la evaporación de la solución aumenta sobre la superficie externa de los tubos, de donde no puede quitarse fácilmente. Tradicionalmente, los tubos horizontales han estado insertados en cajas de vapor mediante soldadura, por estas razones, se usan actualmente en instalaciones pequeñas en donde la solución que se va a tratar es diluida y no presenta espuma ni sólidos depositados sobre los tubos.

Figura No. 26. Evaporador de Tubos Horizontales 1



Fuente: Foust, Alan. Principios de Operaciones Unitarias, Pág. 450.

Figura No. 27. Evaporador de Tubos Horizontales 2



Fuente: Ref. 7. Evaporador. En línea.

Los tubos tienen entre 20 y 40 mm de diámetro y de 1.20 4.50 m. de largo.

VENTAJAS

- Son baratos
- Requieren poca altura
- Son de fácil instalación

DESVENTAJAS

- No presenta muy buena circulación natural.
- Mala transferencia de calor en líquidos viscosos
- Difícil eliminación de incrustaciones
- No operan bien con líquidos concentrados

- No operan bien con soluciones que formen espuma.

4.2.2. EVAPORADOR TUBOS VERTICALES TIPO CESTA O CANASTA

El evaporador tipo cesta, es similar al de calandria, salvo en algunas especificaciones. La solución hierve en la parte interior de los tubos verticales con el medio caliente, que generalmente es vapor condensándose, retenido en la caja a través de la cual pasan los tubos. La caja del evaporador forma una canasta colgada en el centro del evaporador, el calentamiento o el hervido del líquido dentro de los tubos ocasiona un flujo hacia arriba a través de los mismos, en tanto que el líquido no evaporado fluye hacia abajo a través del anillo alrededor de la canasta. Se promueve la circulación natural. Cuando el depósito sólido se forma en la parte interna de los tubos de donde puede quitarse mediante limpieza mecánica.

Los antiespumantes son ineficaces aunque bien pueden utilizarse deflectores y separadores para reducir la formación de espuma. Pueden utilizarse para líquidos viscosos, aunque la circulación es lenta, y disminuyen los coeficientes de transferencia de calor. Así que los evaporadores de tubos verticales son muy satisfactorios para la mayor parte de los usos, siendo poco prácticos solamente en donde el líquido que se va a evaporar sea muy viscoso o forme mucha espuma.

Este evaporador a diferencia del tipo Robert o de calandria, presenta la característica que la unidad calefactora es fácilmente removible para su limpieza.

Figura No. 28. Evaporador de Tubos Verticales tipo Canasta

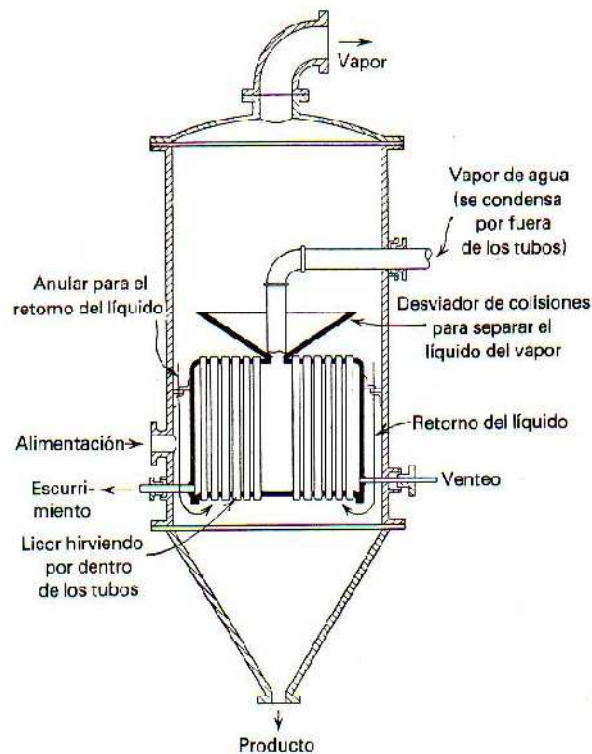


Fig. 19-3 Diagrama de sección transversal de un evaporador de canasta.

Fuente: Foust, Alan. Principios de Operaciones Unitarias, Pág. 452

VENTAJAS

- Coeficientes de transferencia de calor medios
- Espacio superior bajo
- Fácil limpieza
- Relativamente poco costoso.

DESVENTAJAS

- Mala transferencia de calor con líquidos viscosos
- Operación con líquidos no corrosivos
- Para líquidos que no formen muchas costras o incrustaciones.

- Alta retención.

4.2.3. EVAPORADORES DE TUBOS LARGOS

Estos evaporadores constan de una cámara vertical provistas de cambiadores de calor tubulares. Como medio de calentamiento suele utilizarse vapor que se condensa en el interior de la cámara.

4.2.3.1. EVAPORADORES DE PELÍCULA ASCENDENTE

Los evaporadores típicos de este tipo poseen tubos de 3 – 12m de longitud y 25 – 50 mm de diámetro. El líquido penetra por la parte inferior de los tubos, precalentando casi a ebullición, y comienza a hervir al ascender una corta distancia. La expansión debida a la vaporización hace que se formen burbujas de vapor que ascienden a alta velocidad por los tubos arrastrando líquido hacia la parte superior. A medida que el líquido asciende se va concentrando y, en condiciones óptimas, el vapor arrastra hacia arriba la pared 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.

Figura No. 29. Evaporador de Película Ascendente 1

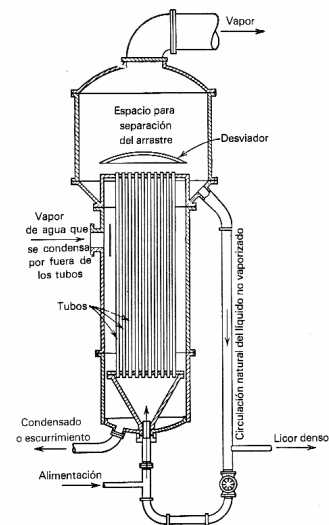
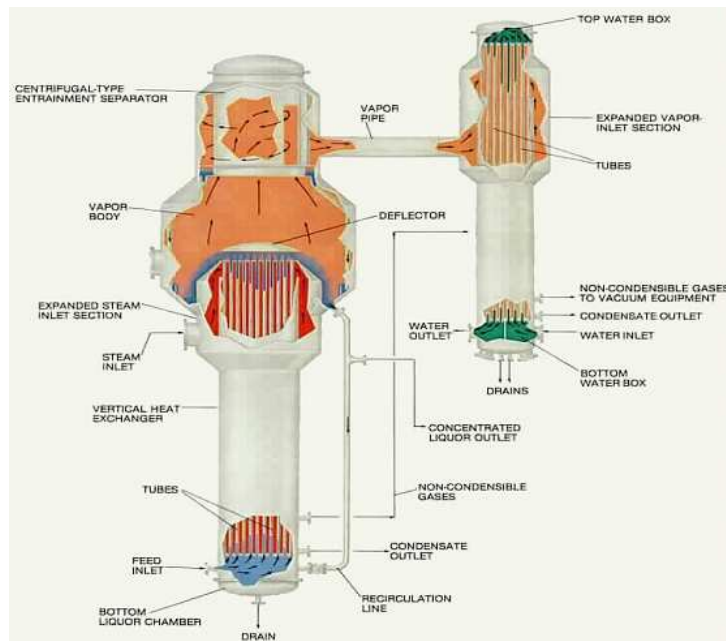


Fig. 19-7 Diagrama de sección transversal de un evaporador vertical de tubos largos.

Fuente: Foust, Alan. Principios de Operaciones Unitarias, Pág. 454

Figura No. 30. Evaporador de Película Ascendente 2



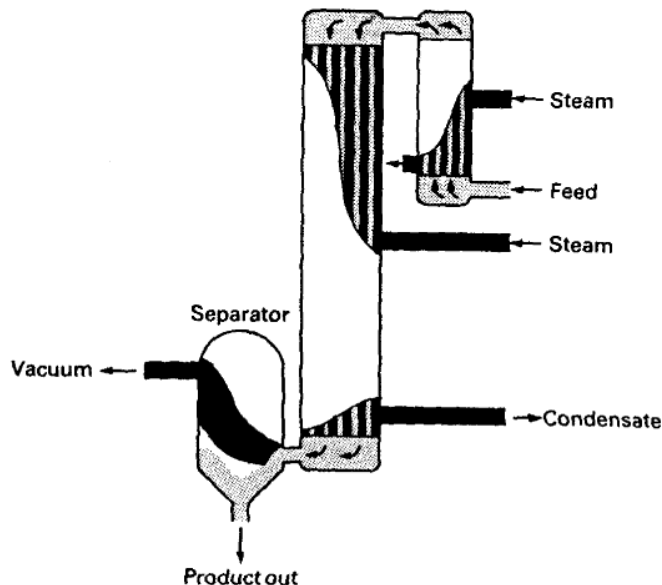
Fuente: Ref. 9. Evaporación. En línea.

4.2.3.2. EVAPORADOR DE PELÍCULA DESCENDENTE

Es similar al anterior pero el líquido de alimentación precalentado entra por la parte superior del haz de tubo. a medida que tiene lugar la evaporación, el vapor que se forma descende por la parte central de los tubos formando un chorro de alta velocidad que arrastra el líquido. Puesto que en los tubos no existe cabeza hidrostática de líquido, es posible mantener una baja temperatura de ebullición uniforme. Los tiempos de residencia son cortos y por tanto la unidad es excelente para la concentración de productos sensibles al calor. Se usa con profusión para concentrar jugos cítricos con los que se obtienen altas velocidades de evaporación a temperaturas tan bajas como 10 -16 °C operando a vacío.

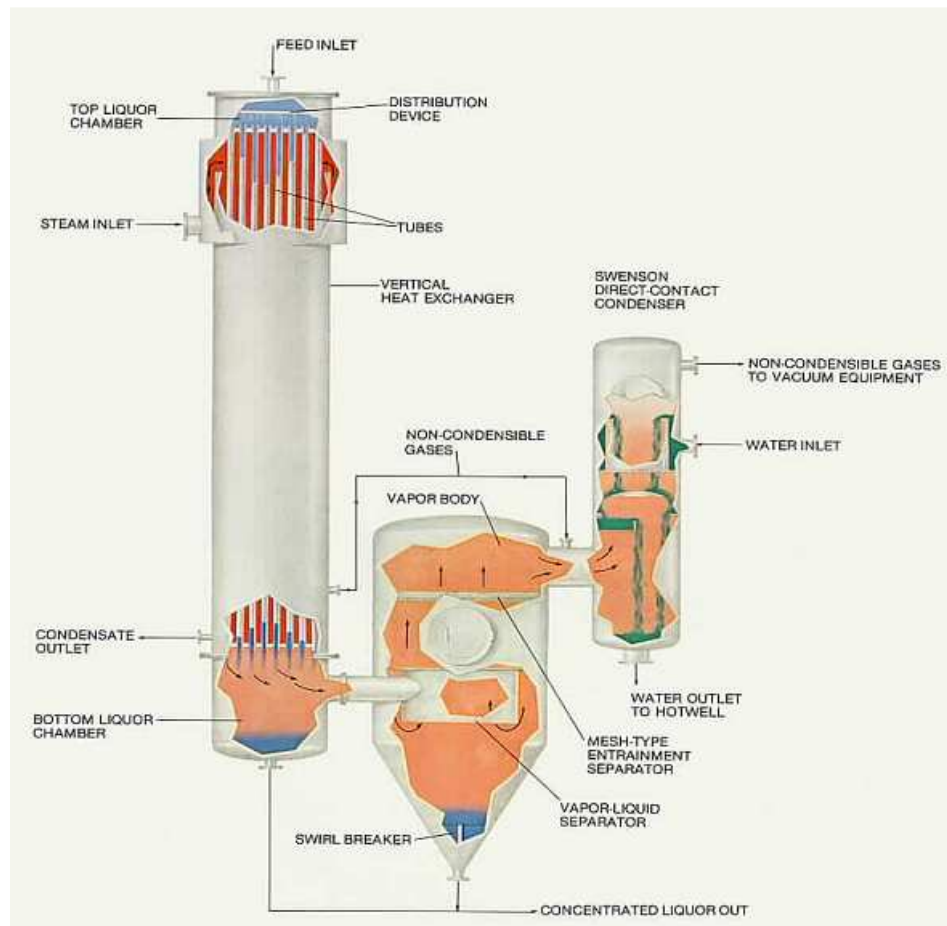
Los evaporadores de película descendente están adquiriendo importancia creciente en la industria de los alimentos, especialmente en el sector lácteo.

Figura No. 31. Evaporador de Película Descendente 1



Fuente: Ref. 9. Evaporación. En línea.

Figura No. 32. Evaporador de Película Descendente 2



Fuente: Ref. 9. Evaporación. En línea.

4.2.3.3. EVAPORADOR DE PELÍCULA ASCENDENTE-DESCENDENTE O CON PELÍCULA TURBULENTA

Frecuentemente se utiliza una combinación de la evaporación en película ascendente y en película descendente. En este tipo de evaporador el líquido de alimentación diluido se concentra parcialmente en la sección de película ascendente y a continuación el producto más viscoso pasa a la región de película descendente. Con estas combinaciones se consiguen altas velocidades

de evaporación.

Figura No. 33. Evaporador con Película Turbulenta

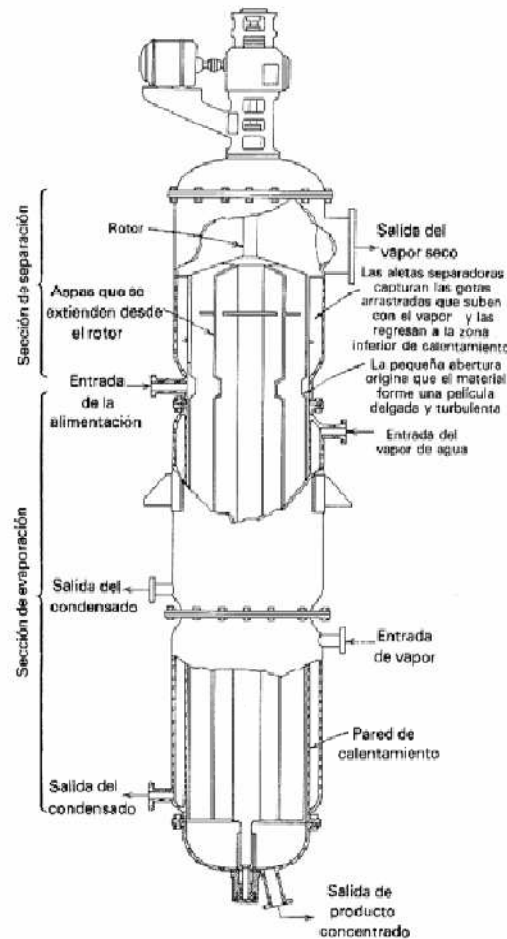


Fig. 19-8 Sección transversal de un evaporador de película turbulenta.

Fuente: Foust, Alan. Principios de Operaciones Unitarias, Pág. 454

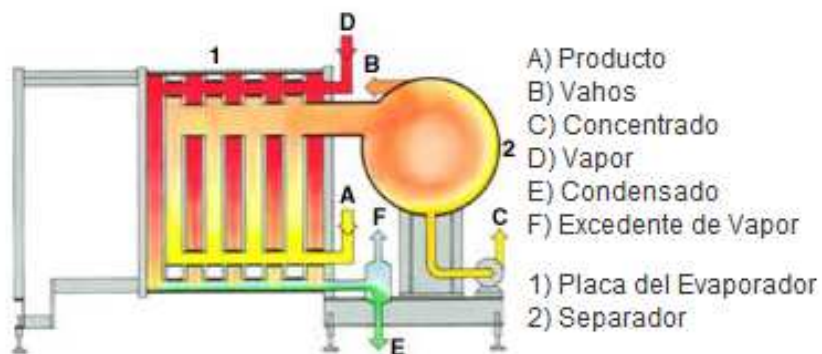
4.2.3.4. EVAPORADOR DE PLACAS

Aunque el moderno evaporador de placas, tan popular en los procesos industriales, se introdujo comercialmente en la década de 1950, el primer evaporador basado en el mismo principio se instaló ya en 1928 para la concentración de mermelada ligera.

El evaporador de placas utiliza el principio de la película ascendente – descendente dentro de un cambiador de calor de placas. Normalmente las placas están dispuestas en unidades de cuatro. El vapor se condensa en los espacios formados por las placas 4-1 y 2 -3 y el líquido precalentado hierve sobre la superficies de las placas, ascendiendo en forma de película por el espacio entre las placas 3 – 4. El número de unidades de 4 puede variarse para adaptar la capacidad de la planta alas necesidades. La mezcla vapor líquido que sale del conjunto de placas pasa a un separador centrifugo. Este evaporador es útil para concentrar productos sensibles al calor ya que las altas velocidades del líquido que se consiguen permiten una buena transferencia térmica y cortos tiempos de residencia. Esto unido a la rapidez y facilidad con que se desmonta la unidad y a la poca superficie de suelo que ocupa, ha hecho que el evaporador sea muy popular.

En un nuevo tipo de evaporador de placas introducido recientemente por APV Co. Ltd. Se han suprimido las secciones de película ascendente. El líquido fluye exclusivamente en forma de película descendente sobre las placas mayores que las del evaporador de lacas convencionales. En esta nueva unidad, usada en la concentración de jugos cítricos, se evita la recirculación interna y se consiguen tiempos de residencia muy cortos.

Figura No. 34. Evaporador de Placas



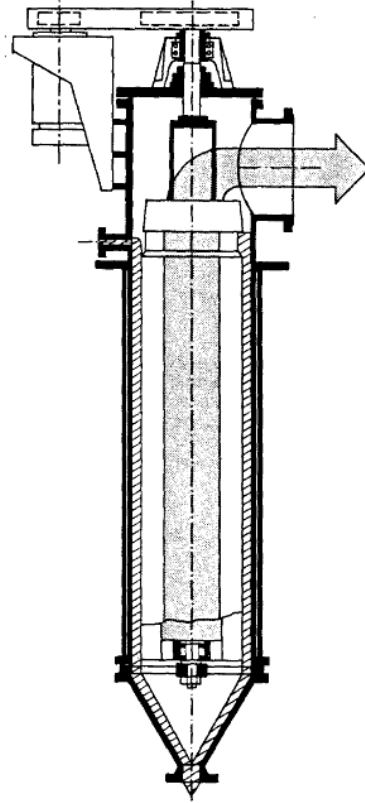
Fuente: Ref. 8. Evaporador de Placas. En línea.

4.2.3.5. EVAPORADORES DE PELÍCULA DELGADA

Estos evaporadores normalmente constan de una cámara recubierta de camisa de calentamiento, en cuyo interior se aloja un rotor con múltiples láminas que puede estar montado vertical u horizontalmente. El área de la sección transversal de las cámaras dispuestas horizontalmente suele decrecer en la dirección del flujo, lo que permite mojar las paredes aunque la velocidad de flujo sea baja y reducir el “chamuscado” del producto.

Las unidades de película delgada tienen una separación entre los bordes de las láminas del rotor y la superficie de transferencia de calor del orden de 0.5 – 1.25 mm. Los evaporadores de película barrida tienen menor separación y producen espesores de película tan pequeños como 0.25 mm. Estos tipos de evaporadores se están empleando cada vez más en la concentración de productos sensibles al calor como pastas de tomate, café, leche, suero, malta y productos azucarados. La principal ventaja de los evaporadores de película delgada mecánica es su capacidad para manipular líquidos altamente viscosos (50 -100 kg/ms) con altas velocidades de transferencia de calor. Los principales inconvenientes son el relativamente elevado coste y la limitada capacidad de la mayor parte de las unidades existentes. Por esta razón dichos evaporadores suelen utilizarse como “aparatos de acabado” en, los que se opera con menores capacidades y mayores viscosidades.

Figura No. 35. Evaporador de Película Delgada



VENTAJAS

- Baja retención
- Superficie amplia de calentamiento
- Necesidades de poco espacio

DESVENTAJAS

- Espacio superior elevado
- No adecuados para líquidos que producen acumulaciones de sales.
- Existen líquidos que requieren recirculación
- La carga no puede ser muy elevada

- Alto costo respecto a la capacidad de carga.

4.2.4. EVAPORADORES DE CIRCULACIÓN FORZADA

Los evaporadores con calandrias externas con frecuencia operan como unidades de circulación forzada. Tales unidades son capaces de concentrar líquidos viscosos con lo que se consigue mantener velocidades de circulación adecuadas mediante centrifugas y cuando son más viscosos se usan bombas centrifugas y cuando son más viscosos se usan bombas de desplazamiento positivo.

En algunos evaporadores de cristalización se monta una hélice impulsora en el tubo central de retorno al objeto de aumentar la circulación del líquido.

Figura No. 36. Evaporador de Circulación Forzada

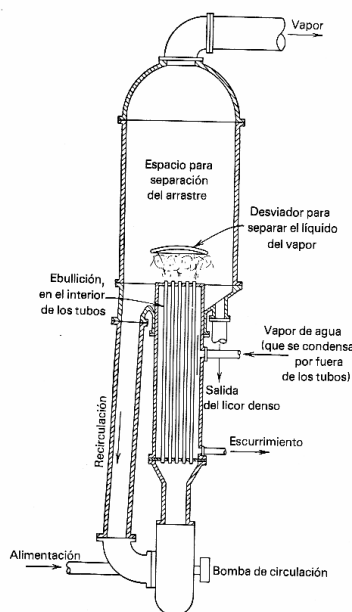


Fig. 19-5 Diagrama de sección transversal de un evaporador de tubos verticales con circulación forzada.

Fuente: Foust, Alan. Principios de Operaciones Unitarias, Pág. 453

VENTAJAS

- Coeficientes de transferencia de calor elevados
- Circulación positiva
- Menor formación de sales y escamas
- Trabajan bien con soluciones concentradas y viscosas.

DESVENTAJAS

- Mayor costo de operación
- Tiempo de residencia alto.

4.2.5. MEMBRANAS

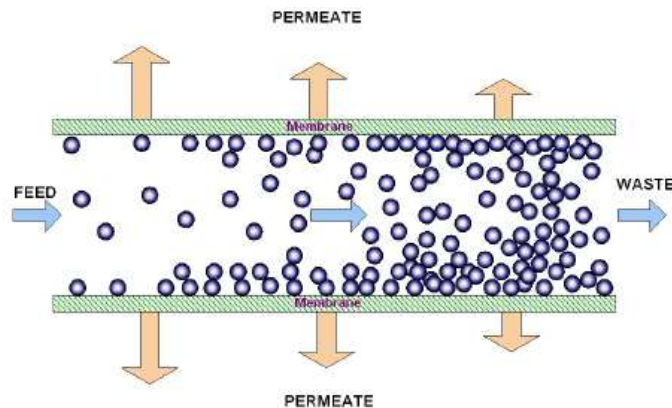
La tecnología de membrana se ha convertido en una parte importante de la tecnología de la separación en los últimos decenios. La fuerza principal de la tecnología de membrana es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos, con un uso relativamente bajo de la energía y conducciones de proceso fáciles y bien dispuestas. La tecnología de la membrana es un término genérico para una serie de procesos de separación diferentes y muy característicos. Estos procesos son del mismo tipo porque en todos ellos se utiliza una membrana. Las membranas se utilizan cada vez mas a menudo para la creación de agua tratada procedente de aguas subterráneas, superficiales o residuales. Actualmente las membranas son competitivas para las técnicas convencionales. El proceso de la separación por membrana se basa en la utilización de membranas semi- permeables.

El principio es bastante simple: la membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua, mientras que retiene los sólidos suspendidos y otras sustancias. Hay varios métodos para permitir que las

sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico.

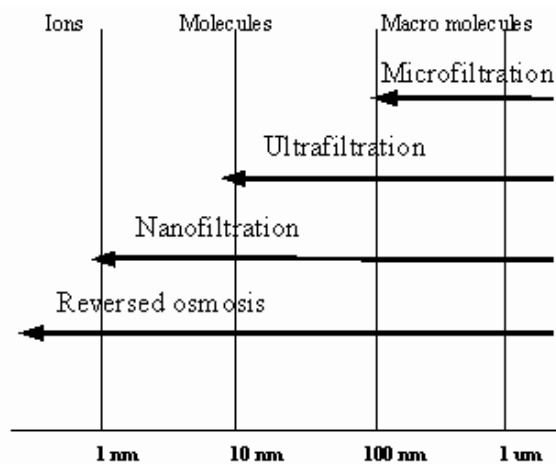
Las membranas se vienen usando en la industria láctea, elaboración de zumos y jugos, industria farmacéutica y bioquímica, procesos enzimáticos, entre otros.

Figura No. 37. Membrana



Fuente: Ref. 5. Tecnología de Membrana. En línea.

Figura No. 38. Tecnología de la Membrana



Fuente: Ref. 5. Tecnología de Membrana. En línea.

VENTAJAS

- No existen pérdidas al ambiente por convección o radiación
- Costo inicial menor
- Mayor tipo de materiales de membranas que se adecuan a las distintas operaciones.
- Ocupa poco espacio.
- No requiere energía térmica.

DESVENTAJAS

- Tiempo de vida útil menor
- No trabajan bien con soluciones muy viscosas
- Gran caída de presión

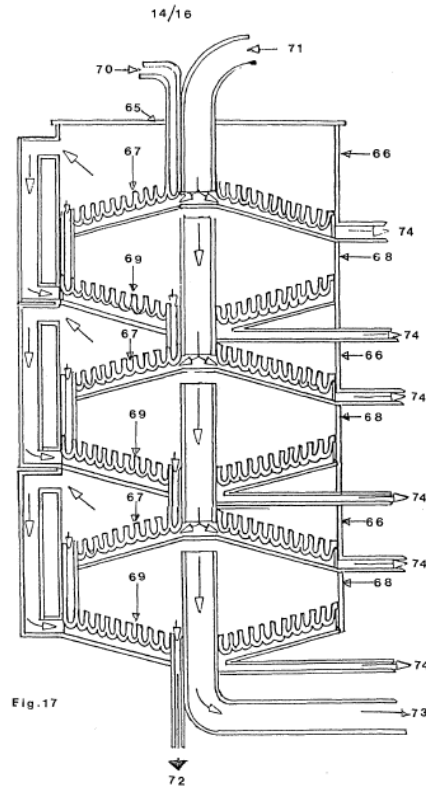
4.2.6. EVAPORADOR CON SUPERFICIE CALÓRICA FORMADA POR UN CANAL DESCENDIENTE EN FORMA DE ESPIRAL CONCÉNTRICO.

Las principales características de este evaporador modular de uso general son: Que está constituido por dos módulos o evaporadores básicos que se acoplan alternativamente en un número que depende de la capacidad de trabajo del equipo; que cada uno de estos módulos o evaporadores básicos está constituido por únicamente dos partes que son: la calandria y el cuerpo del evaporador básico correspondiente; que la calandria de cada uno de estos evaporadores básicos tiene la forma de espiral concéntrica circular o rectangular; que en cada uno de los módulos el canal se desarrolla de la periferia de la superficie calórica hacia la parte central y en el otro de los módulos el canal se desarrolla de la parte central de la superficie calórica hacia la periferia, esto permite el calentamiento y la evaporación del líquido o solución

en proceso se lleve al cabo en forma simultánea, debido a que por el fondo y los lados del canal, el líquido o solución es calentado convenientemente y por la interfase líquido-vapor, o sea por toda la superficie del líquido, se realiza la evaporación; que la inclinación o gradiente hidráulico del canal abierto produce que el líquido fluya siguiendo la forma de la espiral descendente y que el vapor producido en un modulo es utilizado para el calentamiento del módulo siguiente trabajando este equipo en un sistema de vaporación de múltiple efecto al vacío, con lo cual se obtienen las siguientes ventajas:

- Ahorro de energía
- Incremento del área del líquido en contacto con la fase gaseosa
- Evaporación en forma continua
- Se reduce destrucción de sustancias termolábiles
- Se minimizan arrastres de líquidos
- Evita la elevación de la temperatura de ebullición del líquido por efecto de la presión hidrostática
- Trabajo en sistema múltiple efecto.
- Puede ser usado como destilador
- Puede ser usado como condensador adiabático
- Puede ser usado como tacho continuo
- Ahorra agua

Figura No. 38. Evaporador con superficie calórica formada por un canal descendente en forma de espiral concéntrica



CONCLUSIONES

1. El evaporador de calandria es un intercambiador de calor conformado por una serie de tubos verticales cortos colocados entre dos espejos que se replican.
2. El evaporador de calandria rige su operación en base de las leyes de termodinámica que a la vez se ven gobernadas por la transferencia de momento, calor y masa.
3. En un evaporador de calandria los fenómenos fisicoquímicos tales como las propiedades coligativas rigen el comportamiento de los fluidos, los cuales afectan directamente a la eficiencia del mismo.
4. Existen gran variedad de alternativas del evaporador de calandria, pero cada una de ellas ofrece diferentes aplicaciones en la industria pudiendo sustituir al evaporador de calandria.

RECOMENDACIONES

1. Es de vital importancia recalcar, que hay diversidad de equipo, y por lo tanto, es el equipo quien se debe ajustar a nuestras necesidades y no viceversa.
2. La primera delimitación de trabajo al momento de seleccionar un equipo de evaporación, son las variables de los fluidos tales como viscosidad, concentración, solubilidad pH, etc.
3. La segunda delimitación al momento de seleccionar un equipo de evaporación para trabajar, debe ser, los costos de operación y mantenimiento, así como la inversión inicial.
4. Al momento de seleccionar un equipo existe la necesidad de realizar un balance energético y seleccionar el equipo de mayor eficiencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KERN, DONALD Q.; **“Procesos de Transferencia de Calor”**. (1^{ra} Edición; México: Editorial CECSA, 1989) pp. 465 – 470.
2. FOUST, ALAN; **“Principios de Operaciones Unitarias”**. (5ta. Edición; México; Editorial Continental, 1975) pp. 449-456.
3. GEANKOPLIS, C. J.; **“Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias”**. (3^{ra} Edición; México: Editorial CECSA, 1998) pp. 545 – 550.
4. PERRY, R. H.; **“Manual del Ingeniero Químico”**. (6^{ta} Edición; México: Editorial McGraw – Hill, 1992) Tomo III, Sección 11. pp. 30 – 40.
5. FRANCO FERNANDEZ, JOSE ALBERTO; **“Diseño de un simulador por computadora de proceso de evaporación en una línea de evaporadores de múltiple efecto”**. Marzo 2006. P.p. 6
6. **“Tecnología de Membrana”**. En línea. 30 de agosto de 2010.
<http://www.lenntech.es/tecnologia-de-membrana.htm>
7. **“Evaporador”**. En línea. 30 de agosto de 2010.
<http://www.ebrisa.com/portalc/ShowArticle.do%3Bjsessionid=69C779195BCFF2E7481688528EB57FB7?articleId=81774>

8. **“Evaporador de Placas”**. En línea. 30 de agosto de 2010.

[http://www.gea-niro.com.mx/lo-](http://www.gea-niro.com.mx/lo-quesuministros/evaporadores_de_placas.asp)

[quesuministros/evaporadores_de_placas.asp](http://www.gea-niro.com.mx/lo-quesuministros/evaporadores_de_placas.asp)

9. **“Evaporación”**. En línea. 30 de agosto de 2010.

<http://www.scribd.com/doc/29577400/Evaporacion>

ANEXOS

DIAGRAMA DEL EQUIPO

