

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE LA SOLUCIÓN A CONCENTRAR EN UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN A VACÍO

Hortensia Dávalos Gutiérrez

Instituto Politécnico Nacional-ESIQIE

hortensiadavalos@prodigy.net.mx

Ma. Del Rosario Dávalos Gutiérrez

Instituto Politécnico Nacional-ESIQIE

rosariodavalos@prodigy.net.mx

Felipe Zúñiga Esquivel

Instituto Politécnico Nacional-ESIQIE

Felipezúñiga@hotmail.com

Resumen

En la escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional se encuentran instalados tres diferentes sistemas de evaporación a vacío, ubicados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias para llevarse a cabo el proceso de enseñanza y aprendizaje de la Unidad de Aprendizaje: Introducción a los Procesos de Separación. En esta unidad se estudia la operación unitaria Evaporación, empleada ampliamente en la Industria de Proceso; para la concentración de sólidos en soluciones de origen orgánico e inorgánico, mediante la vaporización parcial del solvente. La importancia del estudio se refleja al cuantificar el balance de materia y de energía para determina: la velocidad de circulación de la solución por el interior de los tubos que conforman el área de transferencia de calor, que permite, obtener el tiempo de residencia de la solución, cuyo efecto se ve reflejado en la velocidad de transferencia de calor, en el coeficiente de transferencia de calor, en la eficiencia térmica y en la capacidad evaporativa que representa la productividad. Un buen resultado se obtiene de la experimentación cuando, la velocidad de circulación de la solución aumenta y se logra disminuir el espesor de la misma favoreciendo así la transferencia de calor y el valor obtenido del tiempo de residencia de solución permite identificar cual es el diseño del equipo adecuado para cada tipo de solución a concentra de acuerdo a sus propiedades físico-químicas.

Palabras clave: *propiedades de la solución, evaporador, tiempo de residencia.*

Los equipos de transferencia de calor reciben diversos nombres, por lo general, en relación con la función que desempeñan como: Evaporadores, calentadores, enfriadores y condensadores, en donde se requiere calentar o enfriar sustancias ya sea para preservarlas o para cambiar su estado físico. Transfieren calor en forma indirecta, es decir, a través de una pared metálica. En ellos uno de los fluidos pasa por el interior de los tubos del equipo y se calienta o enfría, mientras que otra sustancia pasa por el exterior enfriándose o calentándose.

Un buen funcionamiento del equipo se confirma al cuantificar el balance de materia y de energía, para determinar la velocidad de circulación de la solución por el interior de los tubos que conforman el área de transferencia de calor, que permite, obtener el tiempo de residencia de la solución, cuyo efecto se ve reflejado en la velocidad de transferencia de calor $Q_A = U A \Delta T$,

Donde, el calor “ Q_A ” (kcal/h) es igual al producto del coeficiente global de transferencia de calor “ U ” (kcal/hm² °C), por el área de transferencia de calor “ A ” (m²) y por la fuerza impulsora a la transferencia de calor “ ΔT ” (°C). **“ U ” es el coeficiente global de transferencia de calor**, es la función inversa de la suma de las resistencias individuales que se presentan al flujo de calor en el área de transferencia de calor. Cualquier alteración a dichas resistencias modifica el valor de “ U ”.

Las resistencias que se presentan al flujo de calor en un equipo de transferencia de calor considerando que el calor fluye del lado del vapor hacia la solución, son:

1.- La que genera el espesor de la película del vapor condensante: esta película es muy fina o delgada y en consecuencia no forma una gran resistencia al flujo de calor. Los gases no condensables que se desprenden cuando el vapor cede su calor latente y cambia de fase estos son eliminados continuamente mediante una válvula de purga instalada para tal efecto y las incrustaciones del lado del vapor prácticamente son despreciables.

2.- La pared metálica de los tubos de transferencia de calor: El haz de tubos que dan origen al área de transferencia de calor se construyen con materiales metálicos, siendo estos buenos conductores de calor y no forman una resistencia sino más bien una conductancia.

3.- La que originan las incrustaciones internas generadas por la solución a concentrar: debido a la presencia de sólidos en la solución éstos tienden a depositarse en la pared interior de los tubos y los depósitos pueden ser pequeños o muy notables dependiendo de las propiedades de la solución. Estas incrustaciones se remueven periódicamente mediante un programa de limpieza químico-mecánico.

4.- *La que presenta el espesor de película de la solución en el interior de los tubos: éste espesor depende fundamentalmente de la velocidad de circulación de la solución. Si la velocidad de circulación de la solución aumenta se logra disminuir el espesor de ésta favoreciendo así la transferencia de calor.*

De acuerdo a lo anterior, la resistencia controlante al flujo de calor es la del espesor de película que forma la solución a concentrar ya que ésta representa entre **70 y 75%** de la suma de la inversa de las resistencias individuales a la transferencia de calor. La variación del espesor

de película se refleja en el valor del coeficiente global de transferencia de calor. Con base a la experimentación, el valor obtenido del tiempo de residencia de solución permite identificar cual es el diseño del equipo adecuado para cada tipo de solución a concentra de acuerdo con sus propiedades.

Equipos. Los tres equipos son de la marca Kestner y la envolvente está construida con placa de acero inoxidable (1.8 % cromo y 0.8 % níquel) de cuatro milímetros de espesor. Estos equipos constan de las siguientes partes principales:

a) Calandria (unidad de calefacción), está constituida por un tubo de 15 cm de diámetro, dentro del cual se encuentran alojados 4 tubos de 30 mm de diámetro interior y 2.54 m de largo, simétricamente distribuidos y sujetos en sus extremos a los espejos, la solución en estudio circula por dentro de los tubos y el medio de calentamiento (vapor de agua) por fuera de los tubos y la envolvente, el contacto entre los fluidos es indirecto.

b) Separador de tipo ciclónico con fondo cónico (espacio - vapor).

c) Sistema de condensación, (condensadores de superficie).

d) Sistema de vacío (bomba con sello hidráulico). Sistema de evaporación a vacío, corresponde a la clasificación de tubos largos verticales, que se encuentra instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESQIE (IPN), están construido con acero inoxidable 18-8: el 1er. Equipo; Circulación natural de película ascendente-descendente, ideal para soluciones de tipo orgánico; jugo de frutas y de vegetales el 2do. Equipo; Circulación forzada con recirculación, para

soluciones inorgánica; NaOH, NaCl, etc., y un 3er. Equipo; Evaporador de triple efecto del tipo circulación natural, por ejemplo: azúcar, etc., éste sistema contiene tres calandrias con sus separadores respectivamente.

DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.

Para el concentrado de soluciones es necesario establecer las condiciones de operación en el equipo, con la finalidad de que sus propiedades no sufran alteraciones, y durante el proceso permanecer constantes para lograr un régimen permanente, garantizándose así una producción de calidad a una concentración constante.

Las variables de proceso que permiten establecer el régimen permanente son: La presión de vapor de caldera, el vacío en el interior de los tubos en el evaporador y el % de rotámetro para determinar el gasto volumétrico de la solución a alimentar, así como la temperatura de la solución a alimentar, los datos se muestran en la tabla T-1.

T-1. Tabla de datos experimentales

Presión de vapor de agua	Kgf/cm ²	1.0	1.0
Vacío	mmHg	350	400
Tiempo de operación	minutos	15	15

Ecuaciones

- Masa

$$M = \frac{\pi * D^2 * \Delta h * \rho}{4 * \phi}$$

Se sabe que: $MA = MP + ME$

MA Solución diluida Kg/hr

MP Solución concentrada Kg/hr

ME Evaporado condensado Kg/hr

- *Calor transmitido*

$$Q = (ME * HE) + (Mp * Hp) - (MA * HA)$$

Las entalpías específicas (H) de cada uno de los fluidos que intervienen en las ecuaciones de transferencia de calor pueden evaluarse como se indica:

H_A = Entalpía de la solución diluida, se determina a la concentración y a la temperatura de alimentación.

H_p = Entalpía de la solución concentrada, se determina a la concentración y a la temperatura del producto.

H_E = Entalpía del solvente evaporado, se evalúa a la temperatura aparente de ebullición del agua pura, leída ésta, a la presión del separador más el grado de sobrecalentamiento.

$$H_E = H_{v@ta} + C_{pv}(tx - ta)$$

Donde:

$H_{v@ta}$ = Entalpía de un vapor leída en tablas termodinámicas de vapor a la temperatura aparente de ebullición; (Kcal/Kg).

C_{pv} = Calor específico de vapor, varía de 0.45 a 0.5 Kcal/Kg°C en el rango de que se trabaja en el laboratorio.

tx = temperatura real de ebullición (°C).

ta = temperatura aparente de ebullición (°C).

λ_v = Calor latente de vaporización leída en tablas termodinámicas de vapor a la temperatura de vapor de saturación, kcal/kg.

Para el caso de agua (fase líquida) su entalpía específica se determina mediante la siguiente ecuación:

$$H_{H_2O} = C_{p_{H_2O_{liq}}}(t_{H_2O} - t^\circ)$$

Donde:

$C_{p_{H_2O_{liq}}}$ = Calor específico del agua 1 Kcal/Kg °C.

t_{H_2O} = Temperatura del agua °C.

t° = Temperatura de referencia (0 °C ó 32 °F), según el sistema de unidades utilizado.

- *Calor suministrado*

$$Q_s = Mv * \lambda_{v@tv}$$

- *Eficiencia Térmica*

$$\eta = \frac{Q}{Q_s} * 100$$

- Coeficiente de transferencia de calor

$$U = \frac{Q_{absorbido}}{\Delta T}$$

Cálculos de las velocidades en un sistema de evaporación de circulación natural tipo película: calcular la velocidad de la solución la entrada de los tubos (en fase líquida) y la velocidad del solvente evaporado (fase vapor) a la salida de los tubos de la calandria, en (m/s) o (pie/s).

- *Velocidad de entrada de solución. Dividir los gastos de solución diluida entre el área transversal de flujo de dos tubos (m/h).*

$$\text{Velocidad de entrada } M_A = \frac{M_A}{\ell_{@t_A} \cdot A_{\text{flujo}}}$$

$$\text{Área de flujo} = (\pi/4) (di^2) (\text{N}^\circ \text{ de tubos})$$

Nº. de tubos = 2 para película ascendente descendente

Nº de tubos = 4 para película ascendente

di = diámetro interior de los tubos

- *Velocidad de salida de evaporado. Se refiere a la velocidad que tiene el evaporado exactamente a la salida de los dos tubos de circulación descendente, a fin de compararla con la velocidad de entrada de la solución. (El 99% del volumen que sale de los tubos descendentes es evaporado y menos de 1% corresponde al volumen de solución concentrada).*

$$\text{Velocidad de salida} = \frac{M_p}{\ell_{@t_p} \cdot \text{Área de flujo}} + \frac{E \text{ Volumen específico @ } t_E}{\text{Área de flujo}}$$

Puesto que se conoce el gasto de evaporado en Kg/h, con las tablas de vapor puede obtenerse el volumen específico y calcular el gasto en m³/h, que al dividirlo entre el área transversal de flujo de dos tubos, se obtendrá dicha velocidad (m/h). La velocidad de la solución es de suma importancia pues sí aumenta su valor, obtendremos mejor transmisión de calor, siempre y cuando no se exceda la velocidad crítica de circulación.

Como estimación, obténgase la velocidad promedio, como la media aritmética de ambas velocidades. La solución recorre 2.54 m en su ruta ascendente y 2.54 m en la descendente. Con la velocidad media de circulación y la distancia recorrida, se calcula el tiempo de residencia de

la solución en el área de transferencia de calor en el evaporador.

$$\text{velocidad media} = \frac{\text{velocidad de entrada} + \text{velocidad de salida}}{2}$$

- Tiempo de residencia de la solución dentro de los tubos, en (s).

$$\theta_{\text{residencia}} = \frac{\text{longitud de los tubos} = \text{distancia recorrida por la solución}}{\text{velocidad media}}$$

Cálculos de las velocidades en un sistema de evaporación a vacío de circulación forzada con recirculación: calcular la velocidad de la solución circulada a la entrada y salida de los tubos (fase líquida) en (m/s). Conocida la densidad de solución el gasto masa de solución recirculada y sabiendo que circula por el interior de los cuatro tubos de la calandria, se puede determinar la velocidad.

$$\text{Velocidad de entrada} = \frac{M_R}{\ell_{@ \text{temperatura de entrada de los tubos}} \cdot A_{\text{flujo}}}$$

$$\text{Velocidad de salida} = \frac{M_R}{\ell_{@ \text{temperatura de salida de los tubos}} \cdot A_{\text{flujo}}}$$

$$\text{Área de flujo} = (\pi/4) (di^2) (\text{N}^\circ \text{ De tubos})$$

$$\text{N}^\circ \text{ De tubos} = 4$$

$$\text{velocidad media} = \frac{\text{velocidad de entrada} + \text{velocidad de salida}}{2}$$

- Calcular el tiempo de residencia de la solución en el interior de los tubos, en (s).

$$\theta_{\text{residencia}} = \frac{\text{longitud de los tubos} = \text{distancia recorrida por la solución}}{\text{velocidad media}}$$

A continuación, se presentan los resultados que corresponden a un año de realizar las prácticas en los equipos de evaporación, tablas T-2: con un valor de vacío de 350 y 400 mmHg.

Diseño de equipo.

- ECN** Evaporador de Circulación Natural tipo película ascendente-descendente.
- ECF** Evaporador de Circulación Forzada.
- EME** Evaporador de múltiple efecto.

	ECN		ECF		EME	
	Vacío mmHg					
	350	400	350	400	350	400
MA	174	181	149.12	175	98	138
E	83	127	57.99	75	42	29
Mp	91	53	91.12	99	56	111
Mv	87	57	80.36	97	52	33.5

ANÁLISIS.

- A mayor solución diluida alimentada se obtiene mayor solución concentrada.
- Las altas velocidades de circulación son recomendables en transferencia de calor, ya que evitan el depósito de sólidos en el interior de los tubos, evitando el incremento del espesor de incrustaciones y en consecuencias prologar el período de limpieza de los tubos. Además, las altas velocidades de circulación disminuyen el espesor de la película de la solución a concentra. Estas ventajas repercuten en la velocidad de transferencia de calor, y en la eficiencia térmica.
- Las variables de proceso a controlar: la presión de vapor, la temperatura de alimentación de la solución y el vacío. Al modificarse alguna variable, ese movimiento se refleja en los resultados y desde luego en la evaluación del proceso a través del equipo.

- De acuerdo con el historial reflejado al realizar la experimentación, se exhiben los siguientes resultados que se muestran en la tabla T-3. La variable que se modificó fue el vacío (350 y 400 mmHg), manteniendo la Presión del vapor y la temperatura de alimentación constantes.

	350 mmHg				400 mmHg			
	Vm		Tiempo θ		CE		η_t	
	$\left(\frac{m}{s}\right)$		S		$\left(\frac{KgE}{Hm^2}\right)$		(%)	
ECN	19	31	0.13	0.13	56	64	94	99
ECF	0.74	0.75	3.2	3.3	60	78	90	94
EME	3.	1.86	0.0	1.3	20	36	93	95
	8	2.69	5	0.9				
	5.	8.39	0.4	0.3				
	7		4					
	13		0.1	9				

- Los equipos donde existe ebullición dentro de los tubos la incrustación se presenta en una mayor cantidad, como el caso de múltiple efecto:
- Al modificarse el valor del vacío. Si se tiene mayor vacío se tiene un aumento de la velocidad del evaporado y desde luego mayor capacidad evaporativa ($CE = E/A$) que corresponde a la productividad que se tiene en un evaporador y representa la

cantidad de evaporado que se separa por unidad de área de calentamiento, para obtener la concentración deseada de la solución.

- Al aumentar el valor de vacío se tiene mayor velocidad de la solución en el interior de los tubos y desde luego menor tiempo de residencia de la solución en el área de transferencia de calor.
- Los evaporadores no presentan recubrimiento en la calandria y sin embargo se muestra eficiencias térmicas alta; alrededor de 90% en los tres equipos, esto; es debido al aprovechamiento del calor suministrado por el diseño y el material de construcción del equipo y a la velocidad de circulación de la solución.

CONCLUSIONES.

Una buena operación en los equipos se obtiene al realizar la desincrustación en los equipos al finalizar cada semestre escolar, ya que permite disminuir las resistencias por incrustaciones y beneficiándose la velocidad de circulación se la solución. La variación del espesor de película depende fundamentalmente de la velocidad de circulación de la solución por el vacío. Sí la velocidad de circulación de la solución aumenta se logra disminuir el espesor de la misma favoreciendo así la transferencia de calor.

Con base a la experimentación, el valor obtenido del tiempo de residencia de solución

permite identificar cual es diseño del equipo adecuado para cada tipo, de la solución a concentra de acuerdo con sus propiedades.

En los evaporadores donde se obtiene la concentración de soluciones y se lleva a cabo la transferencia de calor, ésta va aumentando al aumentar el vacío, ocasionando la disminución del combustible para la producción de calentamiento por consiguiente disminuyendo el costo de la evaporación y el aumento de la concentración de soluciones.

REFERENCIAS.

- 1.- Badger and Banchero, *“Introducción a la Ingeniería Química”*, MC Graw Hill, México, 1991.
- 2.- Holland, C.D. *“Fundamentos y Modelos de Procesos de Separación”*, Prentice Hall internacional, Colombia, 1981.
- 3.- Manual de Prácticas del Laboratorio de Introducción a los Procesos de Separación.
- 4.- McCabe Warren I., *“Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”*, Mc Graw Hill, México, 1998.
- 5.- Perry J. H. *“Chemical Engineer’s Handbook”* 3^{era}, 4^{ta} o 5^{ta}. Edición, Mc Graw Hill Book Co.
- 6.- Geankoplis Chistie, J. *“Procesos de Transporte y Principios de Procesos de Separación”*, CECOSA, México, 2006.