



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

Hortensia Dávalos Gutiérrez

*Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas
Instituto Politécnico Nacional
hortensiadavalos@prodigy.net.mx*

Ma. Del Rosario Dávalos Gutiérrez

*Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas
Instituto Politécnico Nacional
rosariodavalos@prodigy.net.mx*

Felipe Zúñiga Esquivel

*Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas
Instituto Politécnico Nacional
Felipezúñiga@hotmail.com*

Resumen

En la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, se encuentran instalados tres diferentes sistemas de evaporación a vacío arias, con el fin de llevar 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, tema que se emplea ampliamente en la industria de proceso, para concentrar 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 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; este 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 de evaporación 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, lo que permite identificar cual es el diseño del equipo adecuado para cada tipo de solución a concentrar de acuerdo con 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 los cuales se requiere calentar o enfriar sustancias, ya sea para preservarlas o para cambiar su estado físico. Además transfieren calor en forma indirecta, es decir, a través de una pared metálica, en la que 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 de estos equipos 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 a su vez, 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 ”, **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”.

En las resistencias que se presentan al flujo de calor en un equipo de transferencia de calor se considera que este fluye del lado del vapor hacia la solución, de modo que:

- el espesor de la película del vapor condensante es muy fina o delgada y en consecuencia no forma gran resistencia al flujo de calor. Los gases no condensables que se desprenden cuando el vapor cede su calor latente y cambia de fase, son eliminados continuamente mediante una válvula de purga instalada para tal efecto y las incrustaciones del lado del vapor prácticamente son despreciables
- con relación a la pared metálica de los tubos de transferencia de calor. el haz de tubos que dan origen al área de transferencia de calor, se construye con materiales metálicos, siendo estos buenos conductores de calor y no forman resistencia, sino más bien, conductancia
- las incrustaciones internas generadas por la solución a concentrar, se deben a la presencia de sólidos en la solución, ya que 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.

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.

Además, la variación del espesor de la 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 concentrar, de acuerdo a 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:

- **Calandria** (unidad de calefacción). Está constituida por un tubo de 15 cm de diámetro, dentro del cual se encuentran alojados cuatro 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 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.

- **Separador de tipo ciclónico con fondo cónico** (espacio-vapor).
- **Sistema de condensación**, (condensadores de superficie).
- **Sistema de vacío** (bomba con sello hidráulico). Es un sistema de evaporación a vacío, corresponde a la clasificación de tubos largos verticales. Sistemas de este tipo, se encuentran instalados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESIQIE, IPN, los cuales están contruidos con acero inoxidable 18-8; el primer equipo tiene circulación natural de película ascendente-descendente, ideal para soluciones de tipo orgánico, como jugo de frutas y de vegetales; el segundo equipo, consiste en circulación forzada con recirculación para soluciones inorgánica, como NaOH, NaCl, etc., y el tercer equipo, es evaporador de triple efecto del tipo de 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 permanezcan constantes para lograr el régimen permanente, garantizándose así, la producción de calidad hacia la 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 tipo 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 1.

Tabla 1. Dávalos Gutiérrez, H. Dávalos Gutiérrez, M. del R. Zúñiga Esquivel, Felipe (2019). <i>Tabla de datos experimentales.</i>			
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.

$$H_E = H_{v@ta} + C_{p_v}(t_x - t_a)$$

Donde:

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

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

t_x =temperatura real de ebullición (°C).

t_a =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**

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

- **Coefficiente de transferencia de calor**

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

Para calcular las velocidades en un sistema de evaporación de circulación natural tipo película, consiste en determinar la velocidad de la solución en 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).

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

Área de flujo = $(\pi/4) (di)^2$ (Nº 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.

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

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.

$$velocidadmedia = \frac{velocidaddeentrada + velocidaddesalida}{2}$$

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

$$\theta_{residencia} = \frac{longituddelostubos = distancia recorrida por la solución}{velocidadmedia}$$

- **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.

$$Velocidaddeentrada = \frac{M_R}{\ell @ temperatura de entrada de los tubos \cdot A_{flujo}}$$

$$Velocidaddesalida = \frac{M_R}{\ell @ temperatura de salida de los tubos \cdot A_{flujo}}$$

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

N° De tubos = 4

$$velocidadmedia = \frac{velocidaddeentrada + velocidaddesalida}{2}$$

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

$$\theta_{residencia} = \frac{longituddelostubos = distancia recorrida por la solución}{velocidadmedia}$$

A continuación se presentan los resultados que corresponden a un año de realizar las prácticas en los equipos de evaporación (tabla 2) con 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.

Tabla 2. Dávalos Gutiérrez, H. Dávalos Gutiérrez, M. del R. Zúñiga Esquivel, Felipe (2019). Tabla de resultados.

	ECN		ECF		EME	
	Vacío mmhg					
	350	400	350	400	350	400
M_A	174	181	149.12	175	98	138
E	83	127	57.99	75	42	29
M_p	91	53	91.12	99	56	111
M_v	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

concentrar. Estas ventajas repercuten en la velocidad de transferencia de calor y en la eficiencia térmica.

- Las variables de proceso a controlar son: 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 3. La variable que se modificó fue el vacío (350 y 400 mmhg), manteniendo la presión del vapor y la temperatura de alimentación constantes.
- Los equipos donde existe ebullición dentro de los tubos, la incrustación se presenta en mayor cantidad, como el caso de múltiple efecto:
- Al modificarse el valor del vacío. Si se tiene mayor vacío, se tiene aumento de la velocidad del evaporado y desde luego, mayor capacidad de evaporación ($CE = E/A$), 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 altas, 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.

Tabla 3. Dávalos Gutiérrez, H. Dávalos Gutiérrez, M. del R. Zúñiga Esquivel, Felipe (2019). Tabla de resultados.

	350 mmhg				400 mmhg			
	Vm		Tiempo θ		CE		η_t	
	$\left(\frac{m}{s}\right)$		S		$\left(\frac{KgE}{Hm^2}\right)$		(%)	
EC N	19	31	0.13	0.13	56	64	94	99
EC F	0.74	0.75	3.2	3.3	60	78	90	94
EM E	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					

Conclusiones.

En suma, una buena operación en los equipos se obtiene al desincrustarlos al finalizar cada semestre escolar, ya que esto permite disminuir las resistencias por incrustaciones y beneficiándose la velocidad de circulación de la solución. La variación del espesor de la 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 el diseño del equipo adecuado para cada tipo de solución a concentrar de acuerdo a sus propiedades.

Así mismo, 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.

Badger Walter, L., & Branchero Julius, T. (1991). *Introducción a la Ingeniería Química*. México: MC Graw Hill.

- Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. México: CECSA.
- Holland, C. D. (1981). *Fundamentos y Modelos de Procesos de Separación: absorción, destilación, evaporación, y extracción*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Manual de Prácticas del Laboratorio de Introducción a los Procesos de Separación*. (s.f.).
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (1998). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. México: Mc Graw Hill.
- Perry, J. H. (1973). *Chemical Engineer's Handbook* (5a ed.). New York: Mc Graw Hill Book Co.