

ESTUDIO DE LA OPERACIÓN DE CONDENSACIÓN Y SU APLICACIÓN EN EL CAMPO DE LA SIMULACIÓN

María Paula Figueroa
Facultad de Ingeniería Química UNL

Área: Ingeniería
Sub-área: Química
Grupo: X

Palabras claves: Condensación, diseño, simulación

INTRODUCCIÓN

En la enseñanza de las operaciones unitarias de transferencia de energía es importante el diseño, simulación y obtención de datos experimentales en equipos relacionados. Adquiere importancia la operación unitaria de condensación, debido a la complejidad de situaciones que abarca, ya que se procesan diferentes alimentaciones (vapores puros, mezcla de los mismos e incondensables). El presente trabajo plantea profundizar el estudio de dicha problemática, comparar las teorías existentes, y a partir de las mismas diseñar equipos y predecir su comportamiento, utilizando la mecánica tradicional de cálculo y la obtenida a partir del uso de simuladores. Se comparan los valores obtenidos, y a partir de la concordancia entre los mismos, se incorporará el uso de los dispositivos mencionados a la enseñanza de grado de dicha temática.

METODOLOGÍA

CONDENSACIÓN DE UN SOLO COMPONENTE

El condensador a utilizar para los cálculos se describe en la **Tabla 1**. Las propiedades fueron evaluadas a T_{pared} y T_{cond} , según corresponda.

Condensador horizontal

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de energía en la carcasa se usó la **Ecuación 1**:

$$COLBURN: h_c = 1.51 * \left(\frac{4 * W_c}{\mu * L * N_{Tt}^{2/3}} \right)^{-1/3} * \left(\frac{\mu^2}{k^3 * \rho^2 * g} \right)^{-1/3} = 634 \frac{Kcal}{hm^2^\circ C} \quad (1)$$

Condensador vertical

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de energía en la carcasa se usó la **Ecuación 2**:

$$COLBURN: h_c = 1.47 * \left(\frac{4 * W_c}{\mu * N_{Tt} * \pi * D_o} \right)^{-1/3} * \left(\frac{\mu^2}{k^3 * \rho^2 * g} \right)^{-1/3} = 402 \frac{Kcal}{hm^2^\circ C} \quad (2)$$

Tabla 1: Características del condensador

Vapor condensante: n-hexano	$W_c = 50000 \text{ kg/h}$	$N_B = 13$
	$P_t = 0.03175 \text{ m}$	1X2
Agua de enfriamiento	$w_a = 335333 \text{ Kg/h}$	$N_{T1} = 691$
	$t_1 = 25^\circ\text{C}, t_2 = 37^\circ\text{C}$	$L = 4\text{m}$
$D_e = 0.018 \text{ m}$ (diámetro equivalente)	$A_{real} = 220.55 \text{ m}^2$	$T_c = 69.01^\circ\text{C}$
$D_o = 0.0254 \text{ m}$ (diámetro externo tubo)	$S_{f/t} = 3.53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	TUBO BWG 14
$D_i = 0.0212 \text{ m}$ (diámetro interno tubo)	$B = 0.3 \text{ m}$ (distancia entre bafles)	$S_{f/p} = 0.084 \text{ m}^2$

Cao, Eduardo (primera edición) propone un método analítico y gráfico para calcular el coeficiente de transferencia de energía teniendo en cuenta la velocidad de vapor. El valor arrojado es $h_c = 7544.29 \text{ Kcal}/(\text{hm}^2\text{C})$.

Cálculo del producto UA

Asumiendo que: R_s (Resistencia de ensuciamiento) = $3.074 \cdot 10^{-4} \text{ (hm}^2\text{C)/Kcal}$; R_m (Resistencia metálica) = $6.13 \cdot 10^{-5} \text{ (hm}^2\text{C)/Kcal}$ y h_i (coeficiente de transferencia de calor en el interior de los tubos) = $2590.57 \text{ Kcal}/(\text{h}^2\text{Cm}^2)$, el coeficiente global de transferencia de energía se calcula según la **Ecuación 3**.

$$U_o = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_c} + R_s + R_m \right)^{-1} \quad (3)$$

Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2: Valores obtenidos del cálculo UA

	Horizontal	Vertical
UA (KJ/h°C)	$3.96 \cdot 10^5$	$2.53 \cdot 10^5$

CONDENSACION MULTICOMPONENTE

Se utilizó un condensador total horizontal de casco y tubo por donde circula una mezcla de alcohol etílico-agua por la carcasa y el agua por el interior de los tubos. Los datos del equipo se muestran en la **Tabla 4**.

Se construyó la curva de condensación dividiendo el equipo en varios segmentos, siguiendo la siguiente metodología (se tomarán $\Delta T = 2^\circ\text{C}$):

Tabla 4: Equipo para condensación multicomponente

$L = 6\text{m}$	$D_i = 21 \frac{1}{4} \text{ pulg}$	$P_t = 1 \frac{1}{4} \text{ pulg}$
$d_o = 0.0254 \text{ m}$	$W_{alcohol} = 10000 \text{ Kg/h}$	$Q = 3.8 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h}$
$S_{f/p} = 0.095 \text{ m}^2$	$X_{agua} = 50\% \text{ peso}$	$w_{agua} = 3.8 \cdot 10^5 \text{ Kg/h}$
$S_{i/T} = 0.06783 \text{ m}^2$	$T_{rocio} = 93^\circ\text{C}, H_v = 450 \text{ Kcal/Kg}$	1 x 1
$N_{T1} = 199$	$T_{burbuja} = 80.8^\circ\text{C}, H_i = 70 \text{ Kcal/Kg}$	TUBO BWG

Intervalo 1-a:

$$T_a = T_{\text{rocío}} - 2^\circ\text{C} = 19^\circ\text{C}$$

$$y_a = 0.56, H_a)_v = 420 \text{ Kcal/Kg}$$

$$x_a = 0.1, H_a)_l = 80 \text{ Kcal/Kg}$$

Con un balance de masa global (**Ecuación 4**), un balance de masa por especie (**Ecuación 5**) y un balance de energía (**Ecuación 6**), calculo el valor de Q_{1-a} .

$$W = W_a^v + W_a^l = 10000 \text{ Kg/h} \quad (4)$$

$$W * y = W_a^v * y_a + W_a^l * x_a \quad (5)$$

$$W * H_v = W_a^v * H_a^v + W_a^l * H_a^l + Q_{1-a} \quad (6)$$

$$Q_{1-a} = 7430596 \text{ Kcal/h}$$

Con la **Ecuación 7** calculo t_a .

$$Q_{1-a} = w * c_{p_{\text{agua}}} * (t_2 - t_a) \quad (7)$$

$$t_a = 33.04^\circ\text{C}$$

Intervalo 1-b:

$$T_b = 89^\circ\text{C}$$

$$y_b = 0.61, H_b)_v = 410 \text{ Kcal/Kg}$$

$$x_b = 0.125, H_b)_l = 90 \text{ Kcal/Kg}$$

Aplicando las mismas ecuaciones del intervalo 1-a se llegó a que:

$$Q_{1-b} = 1125776.9 \text{ Kcal/h}$$

$$t_b = 32^\circ\text{C}$$

Con la **Ecuación 8** se determina el calor en el primer intervalo:

$$Q_{a-b} = Q_{1-b} - Q_{1-a} \quad (8)$$

$$Q_{a-b} = 382717.9 \text{ Kcal/h}$$

Los resultados para todo el intervalo de condensación se encuentran en la **Tabla 5**.

Tabla 5: Curva de condensación de multicomponentes

	T (°C)	y _i	H _i ^v	W _i ^v	x _i	H _i ^l	W _i ^l	Q _{1→i}	Q _{i-1→i}	t	(T-t) _p	I
1	93	0.50	450	-	-	-	-	-	-	35.00	-	-
a	91	0.56	420	8695.65	0.10	80	1304.35	743059.000	743059.000	33.00	58.00	12811.36
b	89	0.61	410	7731.95	0.12	90	2268.04	1125776.90	382717.900	32.00	57.50	6655.960
c	87	0.64	395	6956.52	0.18	75	3043.48	1523913.60	398136.700	30.98	56.51	7045.420
d	85	0.66	375	6279.07	0.23	77	3720.93	1858837.14	334923.540	30.10	55.46	6039.010
e	83	0.71	365	4266.66	0.34	73	5733.33	2524136.01	665298.870	28.36	54.77	12147.14
2	81	0.76	340	0000.00	0.50	70	10000.0	3800000.00	1275863.99	25.00	55.22	23105.10
												67803.99

$$\sum I = A_o * U_o = 67803.99 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}^\circ\text{C}} = 2.84 * 10^5 \frac{\text{KJ}}{\text{h}^\circ\text{C}} = (UA)_{\text{multicomponente}} \quad (9)$$

Con la **Ecuación 9** finalmente calculo el UA del equipo de condensación para multicomponentes.

SIMULACION DE CONDENSADORES

Para simular condensadores se usó el modelo Exchanger Design (Weighted) que resulta excelente en problemas donde la curva de calentamiento es no lineal, por ejemplo, donde se producen cambios de fase (como es nuestro caso). El método divide el equipo en varios segmentos, donde se puede admitir constancias en las condiciones, y calcula para cada una de ellas el producto UA y el ΔT_{mi} , para finalmente determinar el coeficiente global de transferencia.

El modelo termodinámico utilizado para condensación de un sólo vapor fue Peng Robinson, que goza de una amplia aceptación en aplicaciones de la industria del gas y petróleo. Para condensación multicomponente se aplicó Peng-Robinson Stryjek-Vera (PRSV), que es una extensión de Peng Robinson para sistemas no ideales, usada para modelar sistemas binarios como alcohol-agua. Para su aplicación se buscaron ejemplos resueltos donde se observó la aplicación de dichos paquetes (condensador como servicio auxiliar de una torre de destilación). Los resultados obtenidos corresponden a la **Tabla 6**.

Tabla 6: Comparación entre los valores de UA calculados teóricamente y los calculados en Unisim

CONDENSADOR	UA) _{TEORICO} (KJ/h°C)	UA) _{UNISIM} (KJ/h°C)
Horizontal	$4.5 * 10^5$	$4.46 * 10^5$
Vertical	$4.45 * 10^5$	
Multicomponente	$2.84 * 10^5$	$2.259 * 10^5$

CONCLUSIÓN

En los tres tipos de condensadores estudiados, el UA_{teórico} es semejante al UA_{Unisim}. Esto nos da una pauta de que los métodos aplicados para su cálculo son de alto grado de confiabilidad. En el caso particular de condensadores verticales, se debe aclarar que, sin considerar la velocidad de vapor, se obtienen buenos resultados. A su vez, dado la aceptación de los mismos, se concluye que los modelos termodinámicos seleccionados ajustan a bien a los sistemas estudiados, pudiéndose incorporar como herramienta de enseñanza el manejo de simuladores para el diseño y simulación de equipos de transferencia de energía en la operación unitaria de condensación.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Cao, E., 2008. *Transferencia de calor en Ingeniería de Procesos*. 3ª edición. 476.
Kern, D., 1999. *Procesos de transferencia de calor*. 31ª edición. 986.
Paniagua, C.; Iglesias, O., 2013. *Conceptos básicos de simulación de procesos en simuladores modulares*. Editorial de la Universidad de la Plata. 234.
<http://people.clarkson.edu/~wwilcox/Design/HYSYSpropSelect.pdf>
<https://es.scribd.com/doc/311697952/group-1-heat-exchanger-pdf>
<http://es.slideshare.net/jorgetrouchon/37381649-manualdehysys>