

PROGRAMA PARA CÁLCULOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

Maria Auxiliadora González Toro

Miniproyecto de Ingeniería Química
dirigido por

Claudio Olivera Fuentes

Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia

RESUMEN

Se desarrolló un módulo en Excel utilizando como herramienta los macros de Visual Basic, para la resolución de los cálculos básicos que requiere una Torre de Enfriamiento, utilizando todos los conceptos básicos relacionados con este tema. El programa incluye el cálculo del número de unidades de transferencia (NTU) por el concepto simplificado de Merkel, con varias alternativas para la integración numérica; se presenta un módulo de cálculos psicrométricos con las combinaciones de propiedades de aire más comunes; se incluye el cálculo del perfil de temperaturas del aire por el método de Mickley y la programación del cálculo de curvas características con una alternativa adicional para el cálculo del NTU.

INTRODUCCIÓN

La enseñanza de las operaciones unitarias siempre causa inquietud ya que la mayoría de los estudiantes consideran esta asignatura como muy compleja, por lo cual hay una constante búsqueda de nuevos métodos que faciliten su enseñanza, de forma tal de dar una herramienta al estudiante para que pueda centrarse más en el análisis de los resultados obtenidos que en los cálculos que esto conlleva. Sobre la base de esta premisa surge esta investigación donde el objetivo principal consiste en construir, diseñar y evaluar un módulo (macro) en Visual Basic para Excel con cálculos básicos de torres de enfriamiento, para ser utilizado en el área de Ingeniería Química.

MARCO TEORICO

Una torre de enfriamiento provee una de las formas más económica de enfriar el agua haciendo circular un flujo de aire en contracorriente o flujo cruzado con el agua a través de una torre empacada.

Conceptos Básicos. (Olivera-Fuentes, 1997)

Humedad absoluta. Expresa el contenido de vapor en el aire y se define mediante la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa de aire seco}} \quad (1)$$

La humedad absoluta se relaciona con la fracción molar según la siguiente relación:

$$y_V = \frac{Y}{1 + \frac{M_V}{M_A}} \quad (2)$$

Temperatura de bulbo seco. Es la temperatura de una mezcla de vapor y gas, determinada de forma ordinaria con el uso de un termómetro.

Volumen húmedo. Es el volumen ocupado por una mezcla de aire y vapor que contiene una unidad de masa de aire seco y su correspondiente vapor acompañante a la temperatura y presión dominantes. Suponiendo aplicable la ley de gases ideales, se puede escribir la siguiente relación.

$$V_H = \left(\frac{Y}{M_V} + \frac{1}{M_A} \right) \cdot \frac{R \cdot T}{P_{op}} \quad (3)$$

En unidades del Sistema Internacional (SI), $R = 0.08314$ para P_{op} [bar], T [K], y V_H en $[m^3/KgA]$.

De esta forma, al multiplicar el volumen húmedo por la masa de aire seco se obtiene el volumen de la mezcla vapor y gas.

Entalpía. Es una expresión de la energía del aire húmedo. El valor de esta propiedad depende de los *estados de referencia* que se tomen, los cuales son arbitrarios. Elecciones habituales son $T_{AO} = 0$ [K] y $T_{VO} = 0$ [°C] con $\lambda_{VO} = 2502.3$ [kJ/Kg] en unidades del Sistema Internacional. Suponiendo válida la ley de gases ideales, la entalpía del aire húmedo no depende de la presión, y se expresa como la suma de las del aire seco y del vapor de agua. La entalpía húmeda (por unidad de aire seco) viene dada por:

$$H_H = C_{PA} \cdot (T - T_{AO}) + Y \cdot [\lambda_{VO} + C_{PV} \cdot (T - T_{VO})] \quad (4)$$

En esta expresión el primer término representa la entalpía del aire, que corresponde al calor necesario para llevarlo hasta la

temperatura T, el segundo término representa la entalpía latente propia de la humedad que contiene el aire y corresponde al calor necesario para vaporizar esa cantidad de agua y llevarla hasta la temperatura T.

La entalpía del agua líquida se puede calcular como:

$$H_L = C_{PL} \cdot (T - T_{VO}) \quad (5)$$

En las ecuaciones (4) y (5) se suponen capacidades calóricas constantes. Los valores aceptados de esta propiedad se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1
Capacidades caloríficas del aire y el agua

		kJ/(Kg.K)
Aire seco	C_{PA}	1.005
Vapor de agua	C_{PV}	1.884
Agua líquida	C_{PL}	4.186

Calor húmedo. Es el calor que se requiere para aumentar la temperatura de una masa unitaria de gas y su vapor correspondiente en una unidad de temperatura. Corresponde a la derivada de la entalpía con respecto a la temperatura.

$$C_H = C_{PA} + Y \cdot C_{PV} \quad (6)$$

Equilibrio entre aire húmedo y agua. El equilibrio termodinámico debe incluir tanto el equilibrio térmico como el difusivo. El primero consiste en la igualdad de temperaturas, y el segundo en la igualdad entre la tendencia del agua líquida a evaporarse (medida por su presión de saturación) y la tendencia del vapor de agua a condensarse (medida por su presión parcial en el aire húmedo). Esto quiere decir que los procesos de transferencia ocurren en caso de desequilibrio, de forma tal que el flujo de calor se produce de la temperatura más alta a la más baja y el flujo de masa de la presión de agua más alta a la más baja, de forma totalmente independiente uno de otro.

Temperatura de Rocío. (Foust, 1979) Es la temperatura de equilibrio a la cual el vapor comienza a condensar cuando la fase gaseosa es enfriada a presión constante.

Humedad de saturación. Es la máxima humedad que puede contener el aire a temperatura y presión dadas. El aire sólo puede aumentar su humedad hasta que alcance una presión parcial de vapor que iguale a la presión de saturación.

$$Y_{sat} = \frac{M_V}{M_A} \cdot \frac{P_{sat}(TBS)}{P_{op} - P_{sat}(TBS)} \quad (7)$$

Humedad relativa. Es la relación entre la presión parcial de vapor en el aire y la máxima presión de vapor posible, es decir, la de saturación. Este valor carece de significado si no se indican la presión y la temperatura a la cual corresponde.

$$\phi = 100 \cdot \frac{y_V \cdot P_{op}}{P_{sat}(TBS)} \quad (8)$$

Temperatura de saturación adiabática. Es aquella temperatura que podría ser alcanzada en un proceso adiabático si el gas estuviera saturado.

Esta temperatura depende sólo de las condiciones del aire, para la cual el proceso de humidificación y enfriamiento del aire se produce sin cambio en la temperatura del agua finalizando en un estado de equilibrio en el cual el aire alcanza la saturación.

Si inicialmente la temperatura de líquido T_L es diferente que la temperatura de saturación adiabática T_{SA} el proceso irá en la dirección de igualarlas y alcanzar el equilibrio.

Si suponemos un equipo de contacto adiabático gas-líquido, empleando los balances de masa y energía, expresando la entalpías del aire y agua como en las ecuaciones (4) y (5), y suponiendo el calor húmedo y despreciando la dependencia de entalpía de vaporización con la temperatura, se obtiene la ecuación de la línea de saturación adiabática de la carta psicrométrica:

$$\frac{Y_{SA} - Y}{T_{SA} - T} = - \frac{C_H}{\lambda_{vap}(T_{SA})} \quad (9)$$

La ecuación anterior muestra una recta de pendiente negativa que coincide con las isentálpicas de la carta psicrométrica, ya que presentan la misma pendiente.

Terminología Básica de una Torre de Enfriamiento. En esta sección se muestran ciertos términos que son básicos en el proceso de diseño de una torre de enfriamiento.

Temperatura de Bulbo Húmedo. (T_{BH}) La temperatura de bulbo húmedo no es un valor de equilibrio sino uno de estado estacionario definido como la temperatura que alcanza una pequeña masa de agua que se evapora al contacto de una corriente de aire no saturado.

Haciendo un balance de calor y de masa, y sabiendo que en el estado estacionario todo el calor es usado en la evaporación de la humedad, se puede llegar a la siguiente expresión:

$$\frac{Y_{BH} - Y}{T_{BH} - T} = - \frac{h_G}{K_Y \cdot \lambda_{vap}(T_{BH})} \quad (10)$$

Con el fin de utilizar la ecuación (10) para el cálculo de la humedad es necesario conocer la relación psicrométrica h_G/K_Y apropiada. Los datos experimentales de bulbo húmedo obtenidos para diferentes sistemas gas-líquido se pueden correlacionar mediante la ecuación empírica (11).

$$\frac{h_G}{K_Y \cdot C_H} = Le^{0.567} \quad (11)$$

Donde Le es el número de Lewis, una relación entre propiedades físicas. Estudios para sistemas aire-agua indican que ésta puede ser aproximada al calor húmedo (C_H), debido a que la relación de Lewis es aproximadamente uno.

Comparando las ecuaciones (10) y (9), y despreciando la dependencia de la entalpía de vaporización con la temperatura se tiene que para el sistema aire-agua la temperatura de bulbo húmedo es idéntica a la de saturación adiabática, razón por la cual existe tanta confusión entre ambas definiciones; por lo cual ciertas afirmaciones sobre T_{BH} en realidad se refiere a T_{SA} .

Acercamiento. Es la diferencia de temperatura entre el agua que sale de la torre y la de bulbo húmedo del aire exterior. A medida que esta diferencia es más pequeña mucho mas difícil será el proceso de enfriamiento y mayor sea la altura de contacto requerida. Se define como:

$$\text{Acercamiento} = T_{L1} - T_{BH1} \quad (12)$$

Rango. Es la diferencia entre la temperatura del agua caliente que entra a la torre y el agua fría que sale.

$$\text{Rango} = T_{L2} - T_{L1} \quad (13)$$

Dimensionamiento de torres. En esta sección se exponen las suposiciones para el diseño de la torre.

Método de Merkel: Propuesto por F. Merkel en 1925, es un concepto simplificado de unidades de transferencia. Las suposiciones fundamentales son:

- El aire y el agua alcanzan el equilibrio termodinámico en la interfase.
- La evaporación es pequeña y puede despreciarse, por lo cual se asume que los flujos de líquido son constantes, a lo largo de la torre, quedando inutilizado el balance de masa, siendo imposible el cálculo de la humedad por este método. La línea de operación, que relaciona las entalpías del aire con las temperaturas del agua viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{H_{H2} - H_{H1}}{T_{L2} - T_{L1}} \approx \frac{m_L \cdot C_{PL}}{m_A} \quad (14)$$

- Los términos de calor sensible pueden despreciarse frente a los del calor latente, por lo cual esta suposición sumada a las anteriores simplifican los balances de entalpías tanto para el gas como para el líquido como sigue a continuación:

$$\begin{aligned} m_L \cdot C_{PL} \cdot \frac{dT_L}{dZ} &\approx -h_L \cdot a_v \cdot (T^* - T_L) \\ m_A \cdot \frac{dH_H}{dZ} &\approx -h_G \cdot a_v \cdot (T_{BS} - T^*) - K_Y \cdot a_v \cdot (Y - Y^*) \quad (15) \\ &+ \lambda \text{vap}(T_{VO}) \end{aligned}$$

Haciendo válida la relación de Lewis para el sistema aire-agua, se llega fácilmente a la ecuación de diseño, presentada en la ecuación (16).

$$C_{PL} \cdot \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_H^* - H_H} = \frac{K_Y \cdot a_v \cdot Z_T}{m_L} \quad (16)$$

En la ecuación (16) el término de la izquierda es el *número de unidades de transferencia* (NTU), lo cual es una medida de la dificultad de la tarea que exige la torre. La *fuerza impulsora* del proceso es definida como la diferencia de entalpía del aire con respecto a la saturación; si esta es pequeña el valor de NTU será elevado y la altura requerida será mayor. El término de la derecha es la *característica de la torre*, la cual representa una medida de la capacidad del relleno para llevar a cabo el servicio requerido.

Para evaluar el NTU es necesario relacionar los puntos de operación con los de interfase, lo cual se hace a través de una recta de pendiente negativa $(-h_L/K_Y)$.

$$\frac{H_H^* - H_H}{T^* - T_L} = -\frac{h_L}{K_Y} \quad (17)$$

Como no es frecuente conseguir información acerca de los coeficientes de transferencia de calor y de masa, la suposición de trabajo más usada es que la resistencia a la transferencia de calor en la fase líquida es despreciable, por lo cual se dice que la pendiente de la recta es “infinita”. Esto equivale a que $T^* = T_L$, es decir, que la temperatura del líquido es uniforme.

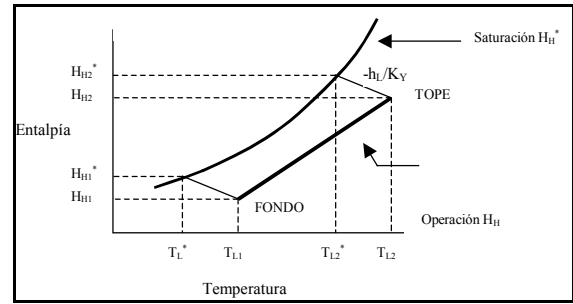


Figura 1. Representación gráfica del método de Merkel.

Para el cálculo del número de unidades de transferencia (NTU) se requiere la resolución de la integral de la ecuación (16), para lo cual se proponen tres métodos. Uno de ellos es el de los trapecios para el cual se requerirá el número de particiones; el segundo es el *diagrama de Stevens* mostrado en la Fig. 2, cuyas ecuaciones son las siguientes:

$$\begin{aligned} A_1 &= (H_H^* - H_H)_{T_{L1}} \\ A_2 &= (H_H^* - H_H)_{T_{L2}} \\ A_M &= (H_H^* - H_H)_{T_{LM}} \\ \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_H^* - H_H} &\approx \frac{T_{L2} - T_{L1}}{f \cdot A_m} \end{aligned}$$

El diagrama permite obtener f en términos de A_1, A_2, A_m , pero equivale a una integración de un polinomio cuadrático al cual puede aproximarse la fuerza impulsora del denominador en la integral del grupo de ecuaciones (18). Para evaluar este factor, se utilizó el grupo de ecuaciones (19), (Ledanois, 2001).

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{A_1}{A_m} \\ \beta &= 4 - 3 \cdot \frac{A_1}{A_m} - \frac{A_2}{A_m} \\ \gamma &= 2 \cdot \frac{A_1}{A_m} + 2 \cdot \frac{A_2}{A_m} - 4 \\ \Delta &= 4 \cdot \alpha \cdot \gamma - \beta^2 \end{aligned} \quad (19)$$

En el grupo de ecuaciones (20) se presentan las distintas ecuaciones que permiten calcular f dependiendo del valor del discriminante Δ .

a.- $\Delta = 0$

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{2 \cdot \gamma + \beta}$$

b.- $\Delta < 0$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\sqrt{-\Delta}} \ln \left(\frac{\frac{2 \cdot \gamma}{\beta - \sqrt{-\Delta}} + 1}{\frac{2 \cdot \gamma}{\beta + \sqrt{-\Delta}} + 1} \right) \quad (20)$$

c.- $\Delta > 0$

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{\sqrt{\Delta}} \cdot \left[\tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \gamma + \beta}{\sqrt{\Delta}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\beta}{\sqrt{\Delta}} \right) \right]$$

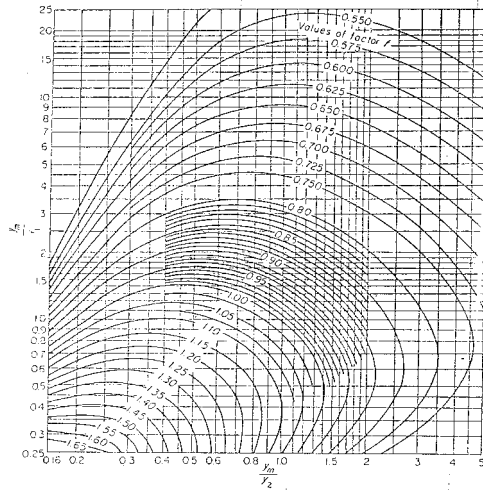


Figura 2. Diagrama de Stevens.

El tercer método es la integración de *Chebyshev* de cuatro puntos, las entalpías se leen para cuatro temperaturas y se calcula la integral usando el conjunto de ecuaciones (21):

$$\begin{aligned} T_a &= T_{L1} + 0.1 \cdot (T_{L2} - T_{L1}), & \Delta a &= (H_H^* - H_H)_{Ta} \\ T_b &= T_{L1} + 0.4 \cdot (T_{L2} - T_{L1}), & \Delta b &= (H_H^* - H_H)_{Tb} \\ T_c &= T_{L2} - 0.4 \cdot (T_{L2} - T_{L1}), & \Delta c &= (H_H^* - H_H)_{Tc} \\ T_d &= T_{L2} - 0.1 \cdot (T_{L2} - T_{L1}), & \Delta d &= (H_H^* - H_H)_{Td} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{dT_L}{H_H^* - H_H} \approx \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{1}{\Delta a} + \frac{1}{\Delta b} + \frac{1}{\Delta c} + \frac{1}{\Delta d} \right]$$

Cálculo de la altura de la torre. La correlación de Kelly-Swenson (1956) para rellenos de entramados de madera es la utilizada en este programa y viene dada por la ecuación (22).

$$\frac{K_Y \cdot a_v \cdot Z_T}{m_L} = 0.07 + A \cdot N \cdot \left(\frac{m_L}{m_A} \right)^{-n} = NTU \quad (22)$$

donde A, n son parámetros que dependen del empaque y

utilizar, los cuales se muestran en la tabla 2.

N es el número de pisos que deben instalarse entre un empaque y otro para alcanzar el enfriamiento requerido.

La altura de la torre es calculada por la ecuación (23), en donde S es un parámetro que depende del empaque y que corresponde a la distancia vertical entre pisos sucesivos.

$$Z_T = N \cdot S \quad (23)$$

Tabla 2
Parámetros para el uso de la correlación

Tipo	A	n	S in
A	0.06	0.62	9
B	0.07	0.62	12
C	0.092	0.6	115
D	0.119	0.58	24
E	0.11	0.46	24
F	0.1	0.51	24
G	0.104	0.57	24
H	0.127	0.47	24
I	0.135	0.57	24
J	0.103	0.54	24

Cálculo del perfil de temperaturas del aire. Este cálculo se realiza con las suposiciones del *Método de Mickley*.

En secciones anteriores se resaltó el hecho que para una *fuerza impulsora* del proceso igual a cero (lo cual se alcanza en el punto de tangencia de la recta de operación, dada por la ecuación (14) con el equilibrio) se necesitaría una torre de gran altura, según se puede observar en la ecuación (16), lo cual corresponde al límite de operación de la torre. De igual forma otra limitante operacional de la torre sería la formación de “niebla”, la cual ocurre en el momento en que el aire se sobresatura. Si esto ocurre, la separación de las pequeñas gotas de líquido de la corriente gaseosa sería extremadamente costoso, por lo cual se considera un inconveniente su formación.

Es de suma importancia entonces la creación de un diagrama H_H vs T_{BS} , que permita visualizar la posible formación de niebla, en una torre que, sin dicho diagrama pudiera considerarse operable ya que la formación de “niebla” pasa inadvertida.

El método de Mickley usado para el cálculo de la temperatura del gas aproxima el gradiente de temperatura con respecto de la entalpía según la ecuación (24), donde Δ se refiere a una diferencia muy pequeña.

$$\frac{\Delta T}{\Delta H} = \frac{T^* - T_{BS}}{H^* - H_H} \quad (24)$$

El método consiste en definir un valor de ΔH de forma tal que el perfil de la temperatura de bulbo seco será una suma de contribuciones, tal y como se expresa en la ecuación (25), hasta obtenerse la T_{BS2} la cual corresponde a la H_{H2} , es decir, a la entalpía del aire a la salida.

$$T_{BS_j} = T_{BS_{j-1}} + \Delta H \frac{T_{j-1}^* - T_{BS_{j-1}}}{H_{j-1}^* - H_{H_{j-1}}} \quad (25)$$

donde j representa cada partición con la cual se calculó el ΔH .

Cálculo de las Curvas Características. Para graficar estas curvas es necesario definir un rango, la temperatura de bulo húmedo y el acercamiento. A partir de estos datos especificados es posible obtener según las ecuaciones (12) y (13) las temperaturas del agua en la entrada y salida de la torre.

Este gráfico presenta en las abscisas valores de m_L/m_A y en las ordenadas los respectivos NTU, de forma tal que estos valores son calculados por el método de Chebyshev antes descrito en el grupo de ecuaciones (21).

Es posible el cálculo del NTU a partir de las curvas características, tomando dos puntos m_L/m_A y se cacula su respectivo NTU a partir de la correlación (22), con lo cual queda definida una recta, cuya intersección con la curva proporcionará el NTU y la relación m_L/m_A necesaria para la operación de enfriamiento requerida.

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa fue realizado en macros de Excel y consta de 8 hojas de calculo más un grafico, distribuidos de la siguiente forma:

- Hoja de cálculos psicrométricos.
- Hoja de datos.
- Hoja de datos de equilibrio aire-agua.
- Hoja de cálculo del NTU.
- Hoja de cálculo de la altura de la torre.
- Hoja de cálculo de la temperatura del aire.
- Gráfico de la curva de equilibrio y operación.
- Hoja de curvas características.
- Hoja de reporte final.

Hoja de cálculos psicrométricos. En este módulo se requieren sólo dos propiedades del aire húmedo para obtener las restantes a presión constante y estados de referencia específicos.

Este es un módulo auxiliar el cual no va diectamente relacionado con el diseño de la torre. En la Tabla 3, se muestran las posibles especificaciones y los resultados correspondientes.

Tabla 3
Cálculos psicrométricos

DATOS	RESULTADOS
T_{BH}, Y	$T_{BS}, H_{H1}, \phi, V_H$
T_{BS}, Y	$T_{BH}, H_{H1}, \phi, V_H$
T_{BS}, T_{BH}	Y, H_{H1}, ϕ, V_H
T_{BH}, ϕ	T_{BS}, Y, H_{H1}, V_H
T_{BS}, ϕ	T_{BH}, Y, H_{H1}, V_H

Además se cuenta con botones de opciones para escoger las unidades de trabajo (SI y UK), y un botón comando para ejecutar el cálculo. Las celdas de color gris indican que esas casillas presentarán los resultados obtenidos y por lo tanto no pueden ser modificadas. En la Fig. 3 se muestra la interfase de los cálculos psicrométricos.

Figura 3. Interfase de la hoja de cálculos psicrométricos.

Hoja de Datos. En esta hoja de cálculo se introducen las especificaciones para el diseño de la torre de enfriamiento y se escoge el sistema de unidades mediante botones de opciones. Si se utiliza el sistema inglés, se deben convertir todos los datos a unidades SI utilizando el botón comando "Convertir". Además de las especificaciones, se cuenta con la opción de "Instrucciones para el uso del Macro", la cual permite el acceso al manual del usuario. Los datos requeridos son: Temperaturas del liquido del fondo y del tope (T_{L1} y T_{L2} respectivamente), temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del gas del fondo (T_{BS1} y T_{BH1} respectivamente), las temperaturas de referencia del aire y del agua (T_{AO} y T_{VO} respectivamente), la presión de operación (P_{op}) y m_A/m_{Amin} .

La "recta de operación máxima" equivale a la recta de pendiente m/m_{Amin} la cual es tangente al equilibrio, de forma tal que calculando la recta que cumple con los requisitos anteriores es posible calcular el valor del flujo de aire mínimo (m_{Amin}) con el cual puede operar la torre.

Figura 4. Interfase de la hoja de datos.

Hoja de datos de equilibrio aire-agua: En esta hoja se encuentran especificadas las entalpías de equilibrio para el aire húmedo en función de la temperatura, en unidades SI. Esta hoja es sólo a manera de información.

Datos de Equilibrio			TL1	302.15
Datos de Equilibrio Aire-Agua			TL2	310.15
TL	HT		DeltaT	0.8
299.95	79.75			
299.75	83.28			
300.55	86.94			
301.35	90.73			
302.15	94.66			
302.95	98.73			
303.75	102.95			
304.55	107.32			
305.35	111.86			
306.15	116.56			
306.95	121.44			
307.75	126.51			
308.55	131.77			
309.35	137.23			
310.15	142.90			
310.95	148.79			
311.75	154.91			
312.55	161.27			
313.35	167.87			
314.15	174.75			
314.95	181.89			
315.75	189.32			
316.55	197.05			
317.35	205.10			
318.15	213.47			
318.95	222.19			
319.75	231.27			
320.55	240.74			
321.35	250.60			

Figura 5. Hoja de datos de equilibrio aire-agua

Hoja de cálculo del NTU: En esta hoja se calcula el número de unidades de transferencia (NTU). Solamente se debe especificar lo siguiente:

- La suposición de trabajo para la relación de los puntos de operación con los de la interfase, es decir, la pendiente de la recta operación-interfase, $-h_i/K_y$. Si esta pendiente es “infinita”, no es necesario introducir algún valor.
- El método para la integración numérica; entre las opciones se encuentran:
 - Chebyshev
 - Trapezios
 - Carey-Williamson

El número de particiones se debe introducir en la caja de texto sólo en el caso de que se escoja el método de trapezios para la integración.

Recta Operación-Interfase		Método de Cálculo	
Valor de la pendiente h_i/K_y :		Trapezios	
$-h_i/K_y$	kJ/kg.K	Chebyshev	
☐ infinito		Trapezios	
		Carey-Williamson	
		Número de Particiones	
		1000	
Resultados			
Temperaturas (K)		Entalpías (kJ/kg)	
T_{L1}	302.59	H_{H1}	71.32
T_{L2}	310.98	H_{H2}	107.84
T_{BS1}	308.15	H_{H1}^*	96.88
T_{BH1}	297.04	H_{H2}^*	149.02
		$(m_L/m_A)_{max}$ 2.21	
		$(m_L/m_A)_{eq}$ 1.04	
		NTU 1.130	

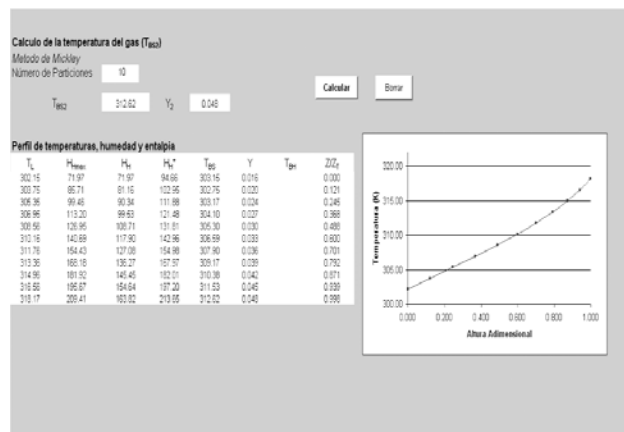
Figura 6. Hoja de cálculo del NTU

Hoja de cálculo de la altura de la torre (Z_T): Se presenta en este caso el cálculo de la altura de la torre mediante la correlación de Kelly-Swenson para rellenos de entramados de madera.

Se debe introducir el tipo de empaque a utilizar y con éste se calcula el número de secciones de relleno (N) que deben instalarse entre un empaque y otro para alcanzar el enfriamiento

especificado en la hoja de datos y la altura (Z_T).

CÁLCULO DE LA ALTURA DE LA TORRE																																							
Correlación de Kelly Swenson para rellenos de entramados de madera:																																							
Tipo de empaque:	C	Z_T 40	R 32																																				
		N 31.84																																					
Calcular																																							
Donde	La correlación es la siguiente:																																						
A, n	$\frac{K_y}{m_L} \cdot \frac{Z_T}{m_L} = 0.07 + A \cdot N \cdot \left(\frac{m_L}{m_A}\right)^n = NTU$																																						
La altura total de la sección empacada viene dada por:																																							
$Z_T = N \cdot S$																																							
S Distancia vertical entre pisos sucesivos para cada tipo de empaque																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Parámetros para el uso de la correlación</th> </tr> <tr> <th>Tipo</th> <th>A</th> <th>n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>0.06</td><td>0.62</td></tr> <tr><td>B</td><td>0.07</td><td>0.62</td></tr> <tr><td>C</td><td>0.062</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>D</td><td>0.119</td><td>0.58</td></tr> <tr><td>E</td><td>0.11</td><td>0.46</td></tr> <tr><td>F</td><td>0.1</td><td>0.51</td></tr> <tr><td>G</td><td>0.104</td><td>0.57</td></tr> <tr><td>H</td><td>0.127</td><td>0.47</td></tr> <tr><td>I</td><td>0.135</td><td>0.57</td></tr> <tr><td>J</td><td>0.103</td><td>0.54</td></tr> </tbody> </table>				Parámetros para el uso de la correlación			Tipo	A	n	A	0.06	0.62	B	0.07	0.62	C	0.062	0.6	D	0.119	0.58	E	0.11	0.46	F	0.1	0.51	G	0.104	0.57	H	0.127	0.47	I	0.135	0.57	J	0.103	0.54
Parámetros para el uso de la correlación																																							
Tipo	A	n																																					
A	0.06	0.62																																					
B	0.07	0.62																																					
C	0.062	0.6																																					
D	0.119	0.58																																					
E	0.11	0.46																																					
F	0.1	0.51																																					
G	0.104	0.57																																					
H	0.127	0.47																																					
I	0.135	0.57																																					
J	0.103	0.54																																					



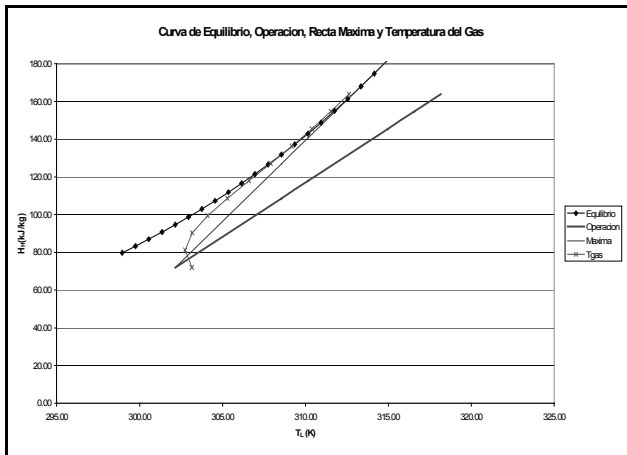


Figura 9. Gráfico de la curva de equilibrio, recta de operación, recta Máxima y temperatura del aire.

Hoja de cálculo de las curvas características: Estas curvas están diseñadas para un rango o salto térmico y una temperatura de bulbo húmedo específicas, las cuales deben introducirse como un dato.

Una vez especificados el rango y T_{BH} , se puede variar el acercamiento y de esta forma el programa grafica la curva característica correspondiente.

También se incluye una alternativa de calculo para el NTU: Se especifican dos puntos (m_L/m_A , NTU), y además el tipo de empaque, con los cuales se determina una recta cuya intersección con la curva característica proporciona la relación agua-aire necesaria y el NTU correspondiente. El programa determina el valor de la intersección.

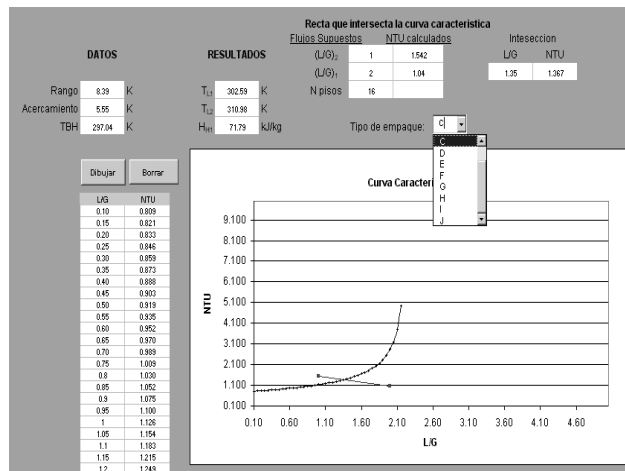
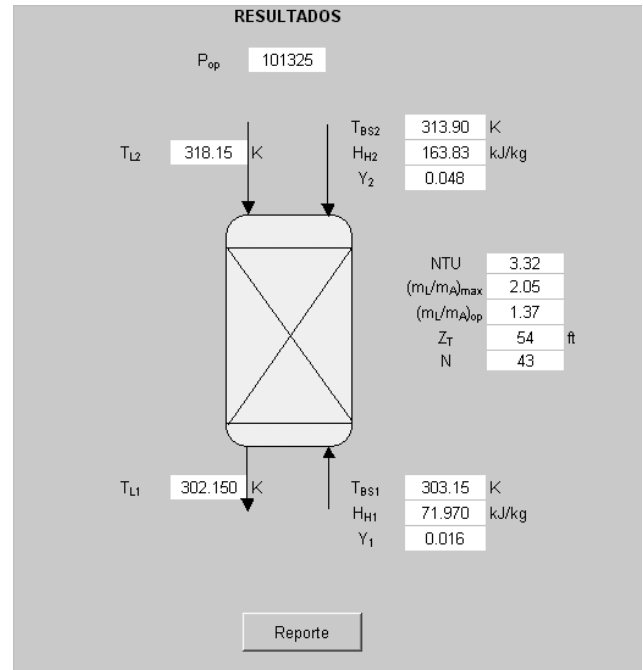
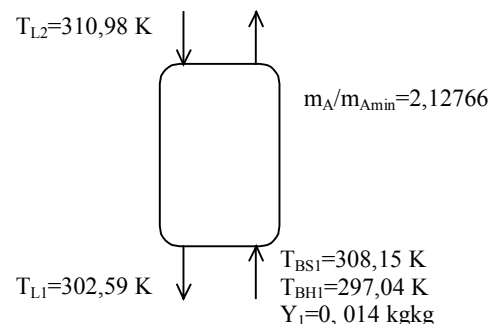


Figura 10. Interfase de la hoja de curvas características.

Hoja de reporte final: En ésta se presentan todos los resultados finales, tanto de la entrada como de la salida del sistema en forma esquemática. Para cada problema, se debe presionar el botón comando “Reporte”, para obtener los valores correspondientes a las especificaciones requeridas. En la Fig. 11, se muestra un esquema de una torre de enfriamiento con sus respectivos resultados



En la tabla 4 se muestran los valores de NTU, calculados con los tres métodos ya descritos, utilizando 1000 particiones para el método de trapecios, y para ambas suposiciones de trabajo. Cuando la pendiente de la recta operación-interfase es infinita se determina NTU_1 y cuando tiene un valor de 20,689 kJ/(kg.K) se halla NTU_2 .

Tabla 4
Cálculo del NTU para el ejemplo 1

Método	NTU_1	NTU_2
Trapecios	1,130	1,455
Chebyshev	1,130	1,455
Carey-Williamson	1,130	1,455

Se puede observar que para los diferentes métodos de integración se obtuvieron valores iguales de NTU en ambos casos, lo cual implica una buena precisión en los resultados. Si se comparan los resultados para la primera suposición con los obtenidos por Olivera-Fuentes ($NTU=1,125$), notamos que el resultado del programa difiere de éste en menos de 1% lo cual es bastante aceptable. Los valores de NTU_1 son menores que los de NTU_2 , debido a que cuando la pendiente tiende a infinito la fuerza impulsora del proceso es mayor, por lo tanto el NTU es menor.

En la tabla 5 se encuentran los valores de la altura de la torre (Z_T) y el número de pisos requeridos (N), para ambas suposiciones calculados con un empaque tipo "C". Para la suposición 1 la altura y el número de pisos son menores que para la suposición 2, debido a los valores de NTU obtenidos en ambos casos.

Tabla 5
Cálculo de la altura de la torre.

Suposición	Z_T (ft)	N
1	15	12
2	20	16

En la tabla 6 se observan los resultados correspondientes a las propiedades del aire a la salida. Para ambas suposiciones se obtuvieron valores similares, sin embargo T_{BS2} para el caso 1 es menor que en el caso 2 debido a la influencia de la fuerza impulsora antes descrita. Existe un punto de intersección entre la curva de temperatura del aire y la recta de operación; para puntos en los cuales la temperatura del gas se hace menor que la temperatura del líquido, comenzará a sumarse la contribución de ΔT (ecuación 25), de modo que si la fuerza impulsora es menor en el caso de pendiente finita la suma de esa contribución será mayor y por lo tanto el alcance de la temperatura de bulbo seco es mayor para la suposición 2. Por otra parte el aire de salida tiene una humedad mayor que el de entrada, por lo cual la temperatura de bulbo húmedo aumentó.

Tabla 6
Cálculo de las propiedades del aire húmedo a la salida

Suposición	T_{BS2} (K)	Y_2	T_{BH2} (K)
1	307,23	0,029	304,71
2	307,37	0,029	304,71

En la tabla 7 se muestra el cálculo del NTU a partir de las curvas características donde se supone que la entalpía del aire húmedo es la de saturación a la temperatura T_{BH} . Este valor difiere de los calculados anteriormente sin embargo se encuentra dentro del mismo rango.

Tabla 7
Cálculo del NTU a partir de las curvas características

NTU	m_l/m_A
1,367	1,35

En la Fig. 13 se muestran las curvas de operación y equilibrio, la recta máxima y el perfil de temperatura del gas. Con este gráfico se verifica que la torre tiene un buen funcionamiento.

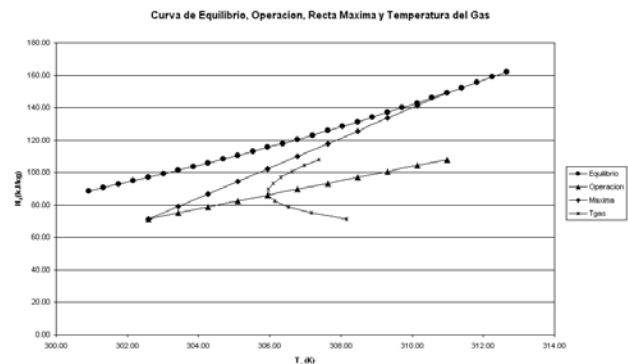


Figura 13. Curvas de equilibrio, operación, recta máxima y temperatura del gas del ejemplo 1.

Ejemplo 2. Se requiere el cálculo de las variables de proceso de una torre que opera bajo las condiciones que se presentan en la Fig. 14.

En este ejemplo a diferencia del anterior, los datos no proceden de ninguna referencia, lo que se trata es de ejemplificar uno de los problemas operacionales de una torre de enfriamiento como lo es la formación de niebla.

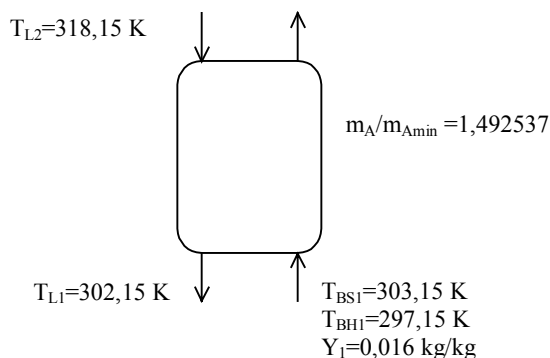


Figura 14. Datos de entrada del ejemplo 2.

En este ejemplo se calcula el NTU por el método de los trapecios, con las mismas suposiciones de trabajo del ejemplo 1. La altura se calculó para un relleno tipo “C”, la temperatura del gas se determinó usando el *método de Mickley* con 10 particiones. Todos estos valores se encuentran en la tabla 8.

Tabla 8
Especificaciones de la torre

Suposición	NTU	Z_T (ft)	T_{BS2} (K)	Y_2
1	2,49	40	312,62	0,048
2	3,32	54	313,90	0,048

En la tabla anterior se observa que los valores obtenidos para la suposición 2 (cuando la pendiente es finita) son mayores que los de la suposición 1.

En la Fig. 15 se muestra las curvas de equilibrio, operación, recta máxima y perfil de temperatura del gas para la suposición de trabajo 1.

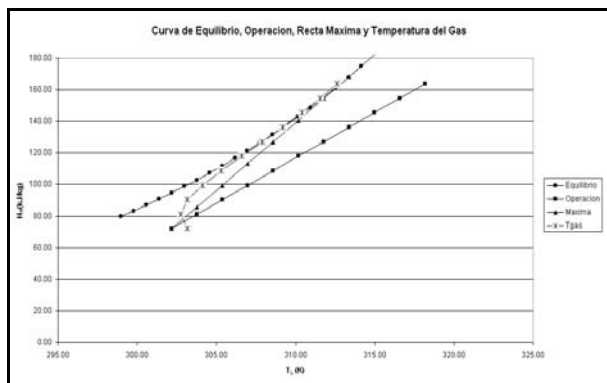


Figura 15. Curvas representativas para la suposición 1.

En este caso la torre no puede operar con las especificaciones dadas, debido a que en este caso se forma lo que se conoce como “Niebla”, es decir, que el gas ya absorbió la cantidad máxima de humedad y por lo tanto comienzan a presentarse gotas de líquido en el gas, por ésta razón se dice que se ha llegado al punto de saturación máxima. Esto se ve reflejado en la Fig. 15 por la intersección de la curva de temperatura del gas con el equilibrio (saturación). Además el valor de humedad (Y) que se encuentra en la tabla 8 es aproximadamente igual al valor máximo de humedad en la carta

psicométrica.

En la Fig. 16 se muestra las curvas representativas para la suposición 2. En este caso la curva de temperatura del aire no corta la curva de equilibrio, sin embargo la humedad absoluta (Y) sigue siendo elevada como se muestra en la tabla 8; además el NTU es mayor lo cual requiere que la torre trabaje con una capacidad cercana o igual a la máxima, por lo tanto no es recomendable operar bajo esas condiciones.

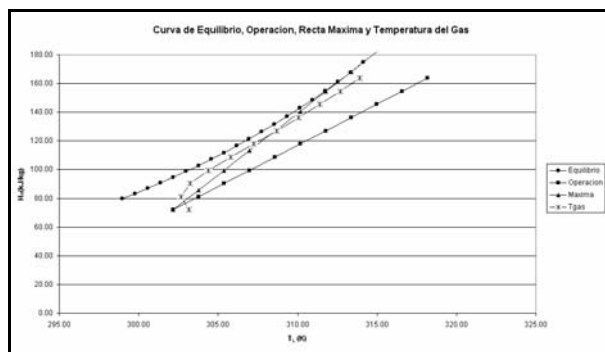


Figura 16. Curvas representativas para la suposición 2

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se logró el diseño y evaluación de un módulo VB/Excel para realizar cálculos básicos de torres de enfriamiento.
- Con la realización de este tipo de programas es posible afianzar los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Química.
- Estas herramientas de programación permiten que el ingeniero químico logre resolver problemas cada vez más rápido en su área de trabajo, por eso se recomienda la aplicabilidad de las mismas.
- Este proyecto es la base para la creación de un programa interactivo utilizando objetos nativos de Visual Basic, el cual incluirá cálculos más rigurosos que los presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

- Foust, A.S., Wenzel L.A., Clump C.W., Maus L. y Andersen L.B., 1979, "Principles of units operations", 2a Ed., Wiley, New York.
- Ledanois, J.M., 2001, Comunicación personal., Universidad Simón Bolívar., Caracas.
- Ludwig, E.E., 1964, "Applied process design for chemical and petrochemical plants", Vol II, Gulf Publishing Co., Houston, Texas
- Olivera-Fuentes, C., 1997, "Torres de enfriamiento", Versión 2.1, Universidad Simón Bolívar, Caracas.

NOMENCLATURA

- a_v área específica o volumétrica de contacto [ft² de interfase/ft³ de volumen de torre].
- C_p Capacidad calorífica [kJ/Kg.K].
- C_H Calor húmedo [kJ/Kg.K].

h_G/K_Y	Relación entre el coeficiente de transferencia de calor y el coeficiente de transferencia de masa en el aire húmedo [kJ/Kg.K].
H_H	Entalpía húmeda del aire [kJ/Kg].
$H_H - H_H^*$	Fuerza impulsora del proceso [kJ/g].
h_L/K_Y	Relación entre el coeficiente de transferencia de calor y el coeficiente de transferencia de masa en el aire húmedo [kJ/Kg.K].
H_L	Entalpía del líquido [kJ/Kg].
Le	Relación de Lewis. [adimensional].
m	Flujo de operación [kg/s].
M	Peso molecular [kg/mol].
N	Número de pisos.
NTU	Número de unidades de transferencia.
P_{op}	Presión de operación [Pa].
P_{SAT}	Presión de saturación [Pa].
R	Constante universal de los gases [kJ/mol.K]
T_{AO}	Temperatura de referencia para el aire [K].
T_{BH}	Temperatura de bulbo húmedo [K].
T_{BS}	Temperatura de bulbo seco del aire [K]
T_L	Temperatura del agua [K].
T_{SA}	Temperatura de saturación adiabática [K].
T_{VO}	Temperatura de referencia para el vapor de agua [K].
T^*	Temperatura de interfase [K].
V_H	Volumen húmedo [m ³ /KgA].
Y	Humedad absoluta del aire [kg/kg].
Y_{BH}	Humedad del aire a la temperatura de bulbo húmedo [kg/kg].
Y_{SA}	Humedad de saturación adiabática [kg/kg].
Y_{SAT}	Humedad de saturación [kg/kg].
y_V	Fracción molar [mol/mol].

Subíndices:

1	Fondo de la torre
2	Tope de la torre
A	Aire
V	Vapor de agua
L	Agua líquida
λ_{VAP}	Entalpía de vaporización [kJ/Kg]
λ_{VO}	Entalpía de vaporización del vapor a T_{VO} [kJ/Kg]
ϕ	Humedad relativa del aire [%]
*	Saturación
ϕ	Humedad relativa del aire [%]

A_1, A_2, A_3 Parámetros para el cálculo del factor f

