USO DE PLANILLA DE CÁLCULO EN LA ENSEÑANZA DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UNIDADES DE PROCESO

Omar Alfredo Iglesias[1], Carmen Noemí Paniagua[2]

Abstract *— Two Add-In for Excel have been developed for teaching heat integration of distillation columns and evaporators. The system is characterized by its Great Composite Curve. For distillation, the mixture to separate, the key components and the desire recoveries are known. The user should choose the top pressure and the relationship between the operative reflux and the minimum one. The data for evaporators are the flow, the initial and final concentrations. The user selects the number of effects and the external sources' temperatures. The add-in solves the units chosen model and locates the results in the given GCC. Then, if the considered integration has not been reached, the user can modify the available parameters. The application of the complements is shown in two examples.*

Index Terms — distillation columns – evaporators - process integration – spreadsheet - teaching

INTRODUCCIÓN

En los últimos 40 años, tras la irrupción creciente de las computadoras en todos los órdenes del quehacer humano, la enseñanza de las disciplinas técnicas, como la Ingeniería Química, ha sufrido un cambio cualitativo trascendental. Se han producido modificaciones tanto en el tipo de tarea que desarrolla el tecnólogo como en los elementos con los que realiza su trabajo. El incremento de la capacidad de cálculo y análisis trajo aparejado el desarrollo de nuevas técnicas y enfoques teóricos que permitieron el abordaje práctico de temas que, hasta ese momento, sólo presentaban un interés puramente académico [1], [2].

Entre los aspectos más interesantes que han surgido en el campo de la Ingeniería Química en este lapso, deben considerarse aquellos vinculados a la innovación en los esquemas de proceso. La estructuración de redes de intercambio térmico fue uno de los primeros temas que se plantearon en este sentido.

Los trabajos de Linnhoff [3], [4] marcan un punto de inflexión en el desarrollo de las metodologías para abordar el tema. El análisis Pinch, de estricta base termodinámica, aporta la primera estrategia efectiva y coherente, de aplicación eminentemente práctica, para la estructuración de redes de intercambio térmico y, por extensión, de integración energética de unidades de proceso.

Esta temática está presente en los cursos de Diseño Óptimo que los autores dictan en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Plata. Allí se ha adoptado la planilla Excel© como entorno de trabajo, con el desarrollo de complementos en VBA para la enseñanza de diferentes tópicos.

La idea motivadora de esto es remover, en la realización de los trabajos de aplicación, toda operación de cálculo engorrosa y repetitiva, reservando el accionar de los alumnos a la toma de decisión en el manejo de las alternativas de diseño.

Previo a los complementos de Excel© que se exponen en el presente trabajo, se han realizado otros dos, como apoyo a la enseñanza de la estructuración de redes de intercambiadores de calor, el primero [5], aplicando el método Pinch de Linnhoff y el otro [6], la programación matemática MILP de la técnica de Transbordo de Westerberg.

Como parte de los desarrollos aplicables a la enseñanza de Ingeniería de Procesos, los autores se propusieron ampliar los complementos disponibles para la aplicación del análisis Pinch, considerando, ahora, la integración energética de ciertas unidades de procesos como las columnas de destilación y los evaporadores, de acuerdo a los lineamientos que ya resultan clásicos en el tema [7], [8], [9].

En todos los casos, el sistema donde debe producirse la integración queda caracterizado por su Gran Curva Compuesta (GCC), sin que pueda realizarse desagregación alguna de los elementos que la componen, esto es, en la tarea sólo podrá individualizarse la unidad para la que se analiza la posibilidad de aprovechamiento de las energías disponibles.

A partir de los datos que se le entregan para la unidad particular, el alumno, utilizando los complementos, debe buscar integrarla dentro del sistema cuya GCC se ha suministrado. Para ello puede modificar el valor de una serie de parámetros que afectan el funcionamiento del o los equipos y, consecuentemente, los niveles térmicos y el valor de los requerimientos energéticos.

INTEGRACIÓN DE COLUMNAS DE DESTILACIÓN

La integración térmica de una torre de destilación busca aprovechar cantidades de calor disponibles en algún punto del proceso para abastecer de energía al reboiler (sumidero),

1 Omar Alfredo Iglesias, Profesor Titular de Diseño Óptimo, Facultad de Ingeniería, Univ. Nac. De La Plata, 1 y 47 , La Plata, Argentina, oaiglesi@ing.unlp.edu.ar
2 Carmen Noemí Paniagua, Jefe de Trabajos Prácticos de Diseño Óptimo, Facultad de Ingeniería, Univ. Nac. De La Plata, 1 y 47 , La Plata, Argentina, cnpaniag@ing.unlp.edu.ar

o de necesidades de calentamiento, para ceder el calor del condensador (fuente).

La integración energética de una columna de destilación debe hacerse enteramente dentro del bloque frío o del caliente del resto del proceso. Si esto no es posible, deberá tratarse de modificar las condiciones operativas, según las siguientes pautas:

a) Las temperaturas de tope y fondo se pueden desplazar cambiando la presión de trabajo de la torre, aunque esto tiene sus límites. El superior lo impone el reboiler, donde el producto de fondo puede degradarse a altas temperaturas. Ambos límites, superior e inferior, están relacionados con las temperaturas de las fuentes y sumideros externos disponibles con los intercambiar calor.

b) También puede modificarse la relación de reflujo. Al modificar los caudales internos, cambiarán los calores a entregar en reboiler y a extraer en el condensador.

El complemento IntegCol.xla está diseñado para ayudar a comprender este tipo de análisis. El usuario comienza por ingresar, como un conjunto de pares de datos Temperatura-Calor, la Gran Curva Compuesta que caracteriza al sistema donde se intentará integrar la columna y los datos básicos de la misma en sendas hojas que genera el complemento.

En la figura 1 se puede ver el sector de la hoja donde se debe volcar la información que requiere la columna: caudal a tratar, composición, componente clave liviano y factores de recuperación, todo lo cual constituye los datos del problema.

	A	B	C	D	E
1	**Alimentación**			Pcol (bar)	
2	Caudal (kmoles/h)	100.00		Rop/Rmin	
3	Clave Liv	n-Butane			
4	F_rec CL	0.94			
5	F_rec CP	0.94			
6				**Resultados**	
7	**Compuestos**	**Fracc. Molar**		T (ºC)	Q (kW)
8	Propane	0.0500			
9	IsoButane	0.1500			
10	n-Butane	0.2500			
11	IsoPentane	0.2000			
12	n-Pentane	0.3500			

FIGURA 1

HOJA DE INGRESO DE DATOS PARA LA COLUMNA

Existen dos celdas resaltadas donde el usuario deberá ingresar, según su criterio, la presión de tope de la columna y la relación entre los reflujos operativo y mínimo.

Conviene comenzar tratando de integrar la columna para valores razonables de la relación R/Rmin y la presión de tope PT.

Para la primera normalmente se adopta 1,3 en tanto que para PT el complemento calcula la presión de burbuja a 45ºC de una mezcla compuesta por los caudales molares de tope de los compuestos claves, según las recuperaciones establecidas, y la totalidad de los no claves más livianos que el clave liviano

Si los valores elegidos para este primer intento no permitiesen la integración de la columna con el resto del sistema, se deberá modificar el valor asignado a R/Rmin o a PT o ambos.

El usuario debe tener en cuenta que las variaciones en PT se reflejarán, preponderantemente, en el eje de las temperaturas en tanto que una modificación de R/Rmin producirá un efecto más notorio sobre el eje de los calores transferidos.

De cualquier modo, cada vez que se ingresan nuevos valores de esas variables se debe proceder a ubicar la unidad dentro de la GCC.

Para ello, el complemento realiza el cálculo de los requerimientos térmicos de la columna utilizando el método FUG (Fenske – Underwood – Gilliland/Molokanov) para determinar las composiciones, presiones y temperaturas de tope y fondo. Luego, por balances entálpicos, se establecen la cantidad de calor a ser removida en el condensador y suministrada en el rehervidor.

El esquema básico adoptado para la columna es de un solo punto de alimentación, sin salidas laterales, con condensador total y un rehervidor tipo termosifón.

Las consideraciones de cálculo son las siguientes:

1) se admiten conocidos los caudales molares de la alimentación, la presión de tope de la columna PT, la relación R / Rmin y los factores de recuperación de los compuestos clave;

2) se supone que la alimentación ingresa a la columna a una presión media entre la de tope y la de fondo y a la correspondiente temperatura de burbuja;

3) la pérdida de carga por plato se estima en 0,007 bar;

4) se admite un comportamiento ideal en el equilibrio líquido vapor de la mezcla a tratar, donde la presión de vapor de los compuestos puros viene dada por la ecuación de Antoine.

5) El cálculo de entalpías a la temperatura T de mezclas líquidas y vapores se realiza según las relaciones

$$\Delta H_L = \sum x_i \, \Delta H_{Li} \quad , \Delta H_V = \sum y_i \, \Delta H_{Vi}$$

$$\Delta H_{Vi} = \Delta H^0_{fi} + \int_{T_0}^{T} Cp_{Vi}(T)\, dT$$

$$\Delta H_{Li} = \Delta H_{Vi} - \Delta H_{vapi}$$

siendo ΔH^o_{fi} la entalpía de formación a T_0 del compuesto en estado gaseoso y ΔH_{vapi} la entalpía de vaporización a la temperatura T

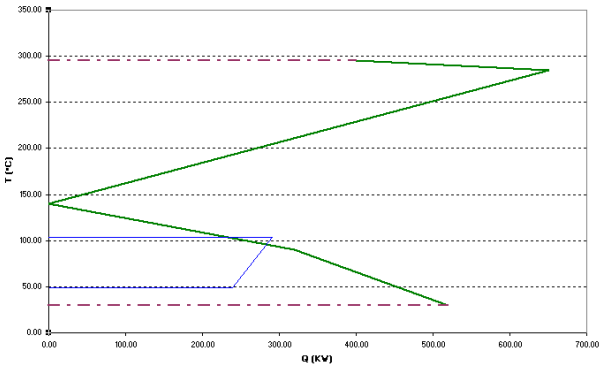

FIGURA 2

LA COLUMNA EN LA GCC DEL SISTEMA (INICIAL)

En la figura 2 se puede ver el primer intento de integración para el problema de la figura 1 (PT = 6,31 bar, R/Rmin = 1,3) donde puede apreciarse que no es posible la

integración. En la figura 3 se muestra la situación final (PT = 4,85 bar, R/Rmin = 1,3) donde se ha alcanzado la integración buscada.

En ambas figuras la columna aparece representada por un trapecio donde las bases del mismo representan las temperaturas del condensador y el reboiler

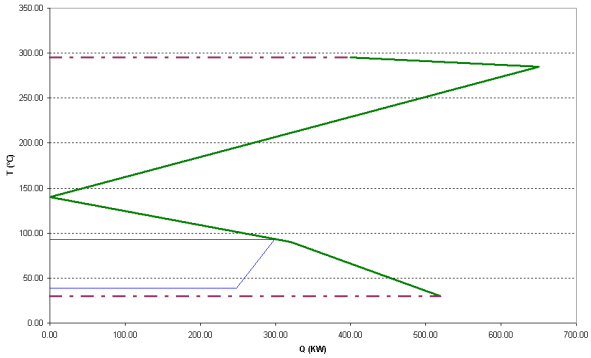

FIGURA 3
LA COLUMNA EN LA GCC DEL SISTEMA (FINAL)

INTEGRACIÓN DE EVAPORADORES

La evaporación es uno de los procesos intensivos en consumo de energía. En principio, el aumento en la eficiencia del uso de la energía en la evaporación se logra mediante el uso de "múltiples efectos", donde la concentración de la solución se consigue en varios equipos (efectos) que operan a diferente presión. Estos generan vapor de distintas temperaturas, que se utilizan como medio calefaccionante en otro equipo del conjunto.

Bajo los supuestos que utiliza el complemento, es suficiente con definir la temperatura de la fuente externa y la presión de trabajo en el último efecto. Adicionalmente, se considera, en todos los efectos el máximo aprovechamiento térmico posible.

En la integración energética de un conjunto de evaporadores la transferencia no puede realizarse a través del Pinch, pero, los distintos efectos no tienen, necesariamente, que estar conectados térmicamente entre sí. El vapor generado en un equipo puede ceder el calor disponible a otra unidad distinta de las que forman parte del proceso de evaporación así como un efecto cualquiera puede recibir la energía requerida de otra fuente que no sea de otro de los evaporadores del conjunto.

Para poder analizar si es posible o no la integración de evaporadores a un proceso, debe considerarse que si se produce un descenso en la temperatura de la fuente externa habrá una reducción de los niveles de temperatura en todos los equipos. En cambio, si se incrementa el número de efectos, se producirá una expansión del intervalo de temperaturas de trabajo así como una reducción de la cantidad de calor puesta en juego en cada equipo. Esto último es, en definitiva, la esencia de la utilización del múltiple efecto: aumentar la eficiencia en el uso de la energía a través del agregado de más unidades.

Al igual que en IntegCol.xla, el complemento IntegEvap.xla está diseñado para ayudar en el análisis de la integración energética de evaporadores. Aquí el usuario podrá modificar el valor de la temperatura de la o las fuentes externas disponibles y el número de efectos del sistema de evaporación

El complemento está preparado para trabajar con un máximo de dos fuentes de calefacción externa, una ubicada en el último efecto y la otra, si existe, en un efecto intermedio, como se muestra en la figura 4 (a) y (b).

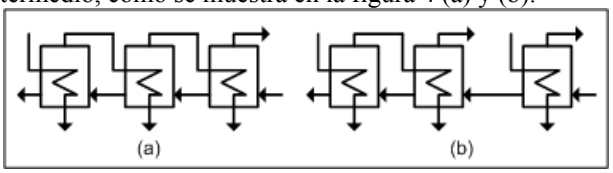

FIGURA 4
ESQUEMAS BÁSICOS DE EVAPORADORES

Además de los datos correspondientes a la GCC del sistema total, los datos del problema referidos específicamente a la evaporación son el caudal de solución a tratar, la concentración inicial disponible y la final deseada.

El usuario debe completar la información requerida definiendo el número de efectos totales, la temperatura de la fuente externa disponible en el bloque caliente, el número de efectos ubicados en el bloque frío y la temperatura de la fuente externa disponible en ese bloque.

En la figura 5 se puede ver el sector de ingreso de datos del problema en la hoja que genera el complemento.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	**Datos del Problema**				**Variables definidas por el usuario**				
2									
3	Caudal inic.	100	kg/h		***Conjunto superior***			***Conjunto inferior***	
4	F.Mas.Inicial	0.05			Efectos tot		(max. 9)	Ef. Bloq.Frío	
5	F.Mas.Final	0.5			T_ext.disp		°C	T_ext.disp	°C

FIGURA 5
HOJA DE INGRESO DE DATOS PARA EVAPORADORES

Inicialmente, a fin de encuadrar el análisis, conviene definir un único evaporador calentado a la mayor temperatura del sistema. Si estas condiciones no permiten la integración se debe comenzar a probar aumentar el número de efectos o dividir el conjunto de evaporadores entre los dos bloques del sistema.

De cualquier modo, toda vez que se modifiquen cualquiera de los cuatro parámetros a disposición del usuario debe indicársele a IntegEvap que proceda a Analizar Integración, resolviendo el modelo que corresponde al conjunto de evaporadores que se ha definido.

Para el cálculo de la batería de evaporadores de N efectos se admiten conocidos N, T_{N+1}, (si corresponde, M, T'_{M+1}), $\Delta T=\delta min$, x_0, x_N y L_0 y además:

1) Se ha de trabajar sólo con soluciones acuosas. Para el agua, en estado puro, se disponen de relaciones que vinculan, entre otras variables, la temperatura o la presión en el punto de ebullición y las entalpías de vaporización.

2) En todos los efectos sólo se considerarán las transferencias de calores latentes, despreciándose la incidencia del calor sensible. Esto hace que la cantidad de calor que se intercambia en cualquier evaporador sea la misma

3) En la etapa M (N > M > 0) el sistema no recibe el vapor proveniente de la etapa M+1 sino un calentamiento a temperatura T'_{M+1} conocida. Por convención, si M = 0 no existe tal calentamiento intermedio externo.

4) Para asegurar la igualdad en las áreas de transferencia, la relación entre el calor intercambiado y la fuerza impulsora, en todos los equipos, es una constante.

5) La temperatura de ebullición T_k de la solución, cuando la fracción molar de soluto es x_k, cumple una relación de tipo Clausius-Clapeyron:

$$\ln\left(1-x_k\right)=\frac{\Delta H^0_{vap}}{R}\left[\frac{1}{T_k}-\frac{1}{T_{sat}\left(P_{Tk}\right)}\right]$$

siendo

T_{sat} (P_{Tk}): temperatura de ebullición del agua pura a la presión P_{Tk}

ΔH^o_{vap}: entalpía de vaporización del agua pura a la presión P_{Tk}

6) El calor latente del vapor que deja la etapa k es el que corresponde a la presión P_{Tk}

7) La presión más baja del sistema no debe ser inferior a 0,01 bar.

En la figura 6 se muestra el resultado de elegir, para el problema de la figura 5, un único efecto y la máxima temperatura disponible en el sistema, de acuerdo a la GCC (T_ext disp = 275 ºC). Puede verse que la integración no es posible en esas condiciones.

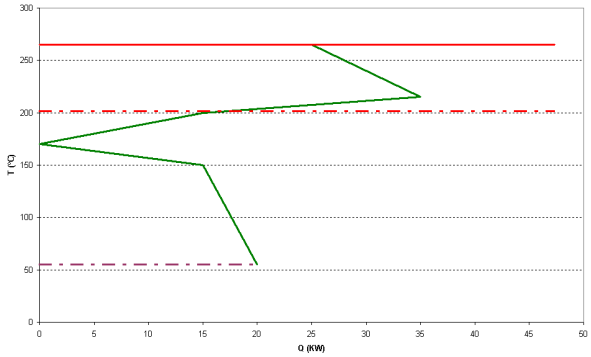

FIGURA 6
EVAPORADORES EN LA GCC DEL SISTEMA (INICIAL)

En esa figura la línea llena representa la transferencia de calor en el equipo (las temperaturas de la fuente caliente y fría están separadas por la aproximación mínima) en tanto que la discontinua indica la disponibilidad del vapor a la salida del último efecto.

Está claro que es necesario aumentar el número de efectos y, eventualmente, dividir en dos el sistema de evaporación.

La figura 7 muestra los resultados de adoptar 4 como Efectos tot, con T_ext disp igual a 275 ºC. y Ef_Bloq Frio 3 (hay 1 evaporador en el bloque caliente) y T_ext disp 160 ºC

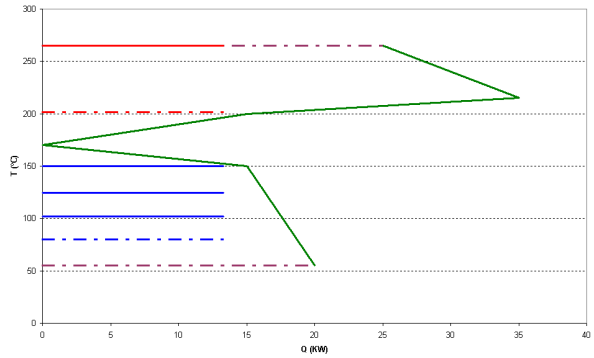

FIGURA 7
EVAPORADORES EN LA GCC DEL SISTEMA (FINAL)

CONCLUSIONES

Los dos complementos desarrollados permiten apoyar con eficacia el aprendizaje de la integración de unidades de proceso con el resto de la planta, considerada como un sistema de intercambios energéticos.

El uso de estos auxiliares libera al alumno de la tarea engorrosa y compleja de realizar los cálculos que demanda la solución del modelo adoptado para las unidades, las cuales incluyen esquemas iterativos para tratar el acoplamiento de ecuaciones existente. Asimismo, se ha visto la conveniencia de contar con estimaciones de costo para poder valorar adecuadamente las distintas alternativas que se pueden proponer, superando el actual enfoque, exclusivamente energético. Está previsto realizar este agregado en una nueva versión de los complementos.

REFERENCIAS

[1] Sargent R.W.H., "Introduction: 25 years of progress in process systems engineering", *Comput. Chem. Eng.* 28 (2004), 437

[2] Westerberg A.W., "A retrospective on design and process synthesis", *Comput. Chem. Eng.* 28 (2004), 447

[3] Linnhoff B., Flower J.R. "Synthesis of Heat Exchanger Networks", *AIChE Journal*, vol. 24, nº4, (1978), 642

[4] Linnhoff B., Hindmarsh E., "The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks", *Chem. Eng. Sci*., vol.38, nº5, (1983), 745

[5] Iglesias O.A., Paniagua C.N., "Uso de Planillas de Cálculo en la Enseñanza de Síntesis de Procesos", *III Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería*, Bahía Blanca, septiembre de 2000.

[6] Iglesias O.A., Paniagua C.N., "InteProc, un auxiliar para la enseñanza unificada de la estructuración de redes de intercambio", *VI International Conference on Engineering and Computer Education*, Buenos Aires, marzo de 2009.

[7] Linnhoff B., Dunford H., Smith R., "Heat Integration of Distillation Columns into Overall Processes", *Chem.Eng.Sci*., vol.38, nº8, (1983), 1175

[8] Westphalen D.L., Maciel M.R.W., "Pinch Analysis of Evaporation Systems", *Braz. J. Chem. Eng.* vol.17 n.4-7 São Paulo Dec. 2000, 525

[9] Smith R., *Chemical Process Design and Integration*, John Wiley & Sons Ltd, 2005