



# Eficiencia termodinámica de secuencias de destilación térmicamente acopladas

## Efecto de los reciclados en la separación de mezclas de tres y cinco componentes

C.J. Calzon McConville, E.A. Hernández Vargas, M.B. Rosales Zamora y J.G. Segovia Hernández  
Fac. de Química. Universidad de Guanajuato (México)

### 1. Introducción

La destilación continúa siendo uno de los procesos de separación de mayor uso dentro de la industria química; sin embargo, se caracteriza por requerir grandes cantidades de energía en los rehervidores. Teniendo en cuenta este aspecto, los esfuerzos de investigación en el área de diseño de procesos se han dirigido a obtener nuevos esquemas de separación que puedan presentar un ahorro sustancial en el consumo de energía. Dentro de los esquemas de destilación propuestos están las secuencias de destilación térmicamente acopladas, las cuales en el caso de la separación de mezclas ternarias (A,B,C) han mostrado ahorros de energía entre 30 y 50% en comparación con las secuencias de destilación convencionales [22, 5, 23, 4, 7, 8, 9 y 10, entre otros]. Para el caso de la separación de mezclas ternarias, las secuencias de destilación con acoplamiento térmico que han sido más estudiadas en aspectos de con-

sumo de energía son: la secuencia de destilación térmicamente acoplada a un rectificador lateral (STAD; figura 1), la secuencia de destilación térmicamente acoplada a un agotador lateral (STAI; figura 2) y la secuencia de destilación con acoplamiento térmico total, también conocida como columna Petlyuk o columna de pared divisoria. Estas tres secuencias de destilación con acoplamiento térmico compiten favorablemente en el consumo de energía en comparación con las clásicas secuencias de destilación convencionales, en la separación de mezclas ternarias con bajo o alto contenido de componente intermedio.

El ahorro energético en las secuencias de destilación con acoplamiento térmico ha sido explicado en términos del remezclado. Si se considera la secuencia de destilación convencional directa en términos del perfil de concentración del componente intermedio (B) en la primera columna de la secuencia directa, la concentración de B em-

*En este artículo se presentan los cálculos de la eficiencia termodinámica en la separación de mezclas de tres y cinco componentes (hidrocarburos) utilizando secuencias convencionales y térmicamente acopladas de destilación. En el caso de la mezcla ternaria, se observan ahorros de energía de entre 10 y 30% en comparación con sus contrapartidas convencionales. Además, todas las secuencias térmicamente acopladas analizadas muestran mayores valores para la eficiencia termodinámica. Cuando se extiende el análisis a la separación de mezclas de cinco componentes, se observa que las columnas térmicamente acopladas denotan importantes ahorros de energía en comparación con las secuencias convencionales, con más altos valores para la eficiencia termodinámica. Los resultados permiten inferir que la presencia de reciclados en las columnas acopladas ayuda a la disminución del consumo de energía y mejora la eficiencia termodinámica.*

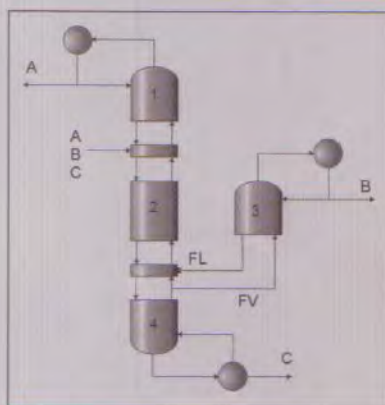


Figura 1. Secuencia térmicamente acoplada directa (STAD)

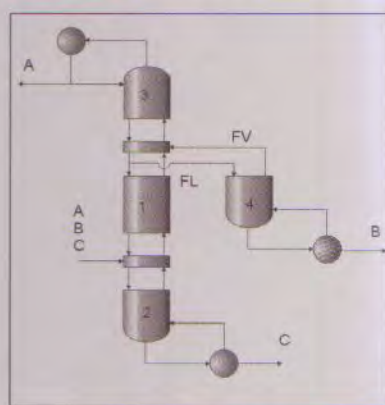


Figura 2. Secuencia térmicamente acoplada indirecta (STAI)

pieza a aumentar hasta un valor máximo en algún plato intermedio y después disminuye hasta alcanzar el fondo de la columna, lo que se conoce como remezclado y está asociado con la ineficiencia energética de la secuencia de destilación convencional directa, ya que para alcanzar nuevamente esta separación se deberá de adicionar más energía [23 y 6]. Para el caso de las secuencias de destilación con acoplamiento térmico a columnas laterales, la corriente lateral que se extrae de la primera columna y se alimenta a la segunda, se extrae de la máxima concentración en el perfil del componente B, con lo cual se elimina el efecto del remezclado sobre el consumo de energía. Para el caso de la columna Petlyuk, la corriente lateral de la segunda columna se extrae del máximo en la concentración del componente intermedio B, eliminando así el efecto del remezclado en la demanda energética de la columna principal.

A pesar de que se ha predicho un ahorro de energía del orden del 30% en las secuencias de destilación con acoplamiento térmico en comparación con las secuencias de destilación convencionales, no ha sido sino hasta los últimos años que se han comenzado a utilizar con mayor frecuencia en la industria [11]. Las razones por las que las secuencias con acoplamiento térmico no se habían utilizado ampliamente eran: no se conocía lo suficiente sobre el diseño y optimización y además se pensaba que el consumo de energía se lograba a expensas de crear un proceso más difícil de controlar [23].

Estas razones motivaron el desarrollo de metodologías de diseño y optimización de secuencias de destilación térmicamente acopladas [23, 4, 7 y 8, entre otros]. Además, se empezó a explorar, en menor grado, las propiedades de control de las secuencias de destilación con acoplamiento térmico, llegándose a la conclusión de que las secuencias de destilación térmicamente integradas en verdad no eran más difíciles de controlar que los esquemas convencionales, más aun las propiedades dinámicas de

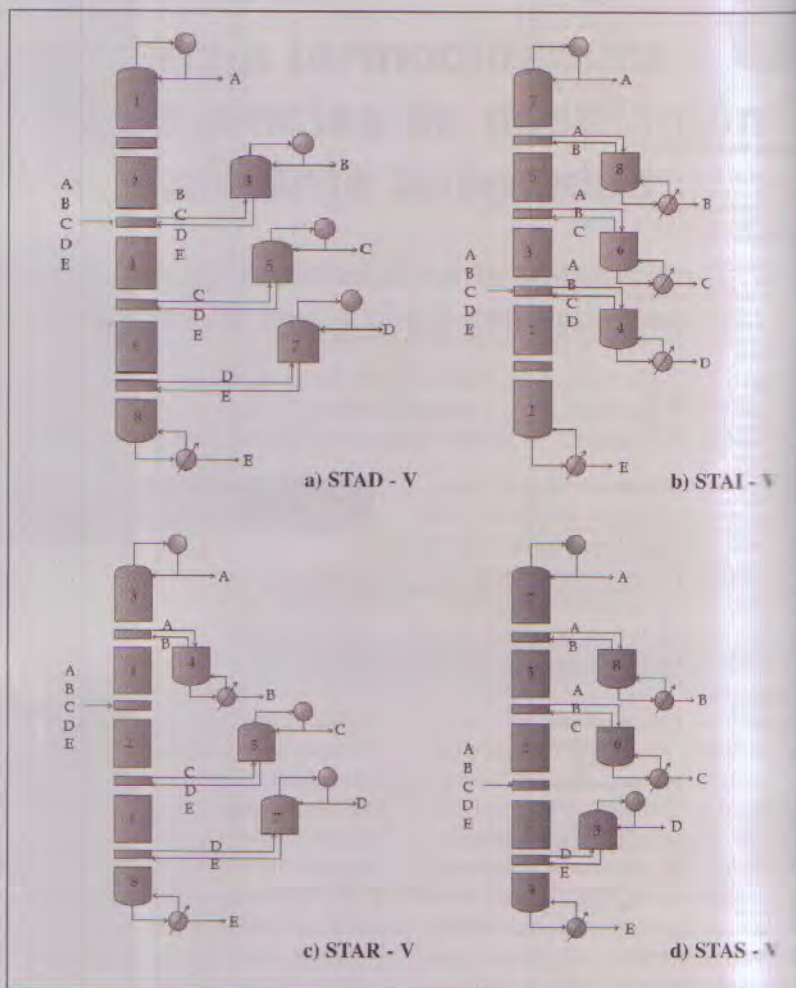


Figura 3. Secuencias de destilación térmicamente acopladas para la separación de mezclas multicomponentes.

las secuencias integradas podían ser mejores que las de los esquemas convencionales [10, 20, 1, 17 y 19, entre otros].

Las tendencias actuales en cuanto a diseño de secuencias térmicamente acopladas son desarrollar métodos de diseño y optimización cada vez más complejos, usualmente basados en técnicas formales de optimización [3 y 21, entre otros). Además, recientemente se han propuesto nuevos esquemas de destilación con acoplamiento térmico para la separación de mezclas multicomponentes [12, 13], algunos de los cuales se muestran en la figura 3, dándole especial énfasis a las mezclas de cinco componentes. En referencia al control de los esquemas integrados de destilación, se continúa en la dirección de mejorar las respuestas dinámicas bajo la acción de diferentes controladores [17, 18 y 19].

En este trabajo, se estudia el consumo de energía y la eficiencia termodinámica de secuencias térmicamente acopladas con columnas laterales para la separación de mezclas ternarias y multicomponentes de hidrocarburos y cómo afecta la presencia de los reciclados en estos resultados. Para el caso de las mezclas ternarias, se analizaron los esquemas mostrados en las figuras 1 y 2. En el caso de la separación de cinco componentes, se analizaron las cuatro secuencias mostradas en la figura 3.

## 2. Eficiencia termodinámica

Cuando sistemas con flujo continuo y estado estacionario, como los mostrados en las figuras 1 a 3, se analizan bajo las leyes de la termodinámica, la eficiencia termodinámica ( $\eta$ ) puede calcularse me-

dianter expresiones estándar como las mostradas en Seader y Henley (1998). Estas ecuaciones son:

Balance de energía:

$$\sum_{out} (ns + Q + W_s) - \sum_{in} (nh + Q + W_s) = 0 \quad (1)$$

Balance de entropía:

$$\sum_{out} (ns + Q/T_s) - \sum_{in} (ns + Q/T_s) = \Delta S_{irr} \quad (2)$$

Balance de disponibilidad:

$$\sum_{in} [nb + Q (1 - \frac{T_0}{T_s}) + W_s] - \sum_{out} [nb + Q (\frac{T_0}{T_s}) + W_s] = LW \quad (3)$$

Trabajo mínimo de separación:

$$W_{min} = \sum_{out} nb - \sum_{in} nb \quad (4)$$

Eficiencia de segunda ley:

$$\eta = \frac{W_{min}}{LW + W_{min}} \quad (5)$$

donde:  $b = h - T_0$  es la función de disponibilidad,  $LW = T_0 \Delta S_{irr}$  representa el trabajo perdido en el sistema y  $\eta$  es la eficiencia termodinámica. La eficiencia termodinámica de segunda ley puede ser calculada usando entalpías, entropías y los consumos de energía óptimos de los rehervidores.

### 3. Diseño de los esquemas acoplados

La estrategia de diseño para las secuencias convencionales para la separación de mezclas ternarias y de cinco componentes utilizadas en este trabajo (Fig. 4) son bien conocidas. La metodología de diseño para la STAD y STAI está descrita en el trabajo de Hernández y Jiménez (1996). Básicamente, el diseño preliminar de las secuencias acopladas se obtiene a partir de las secuencias convencionales. El diseño de la STAD se obtiene utilizando un acoplamiento térmico en fase vapor en la secuencia convencional directa, lo cual elimina el re-

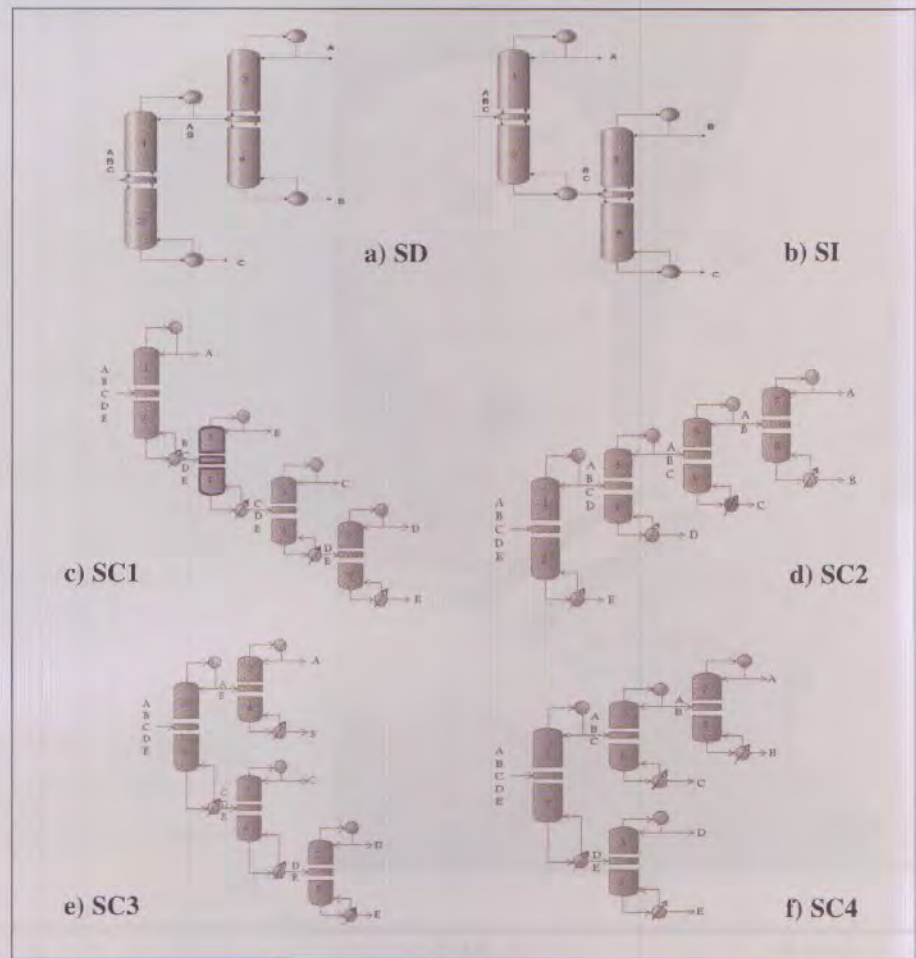


Figura 4. Secuencias convencionales a partir de las cuales se obtienen los arreglos térmicamente acoplados

hervidor en la segunda columna de la secuencia convencional y la sección de agotamiento de la segunda columna es trasladada al fondo de la primera columna (Figs. 1 y 4a). El diseño de la STAI se obtiene directamente de la secuencia convencional indirecta eliminando el condensador en la segunda columna e introduciendo un acoplamiento térmico en fase líquida. La sección de rectificación de la segunda columna se añade a la cabeza de la primera columna (Figs. 2 y 4b). Una vez obtenidos los diseños, un grado de libertad queda disponible en cada esquema. Este grado de libertad es la corriente de vapor (FV) en la STAD y la corriente de líquido en la STAI. Así pues, FV y FL son optimizados hasta obtener el mínimo consumo de energía de la secuencia. De esta manera se obtiene el diseño óptimo de los esquemas.

Para el caso de las secuencias de cinco componentes, el diseño de las

columnas se puede efectuar mediante una generalización de la metodología propuesta por Hernández y Jiménez (1996). Obviamente, la metodología se vuelve más compleja debido al incremento en el número de reciclados. La estrategia de diseño comienza efectuando un movimiento adecuado de las secciones, en las secuencias convencionales multicomponentes, y realizando correctamente los acoplamientos térmicos, en las fases convenientes, es posible generar las cuatro secuencias térmicamente acopladas para la separación de mezclas de cinco componentes: STAD-V a partir de SC1 (Figs. 3a y 4c); STAI-V a partir de SC2 (Figs. 3b y 4d); STAR-V a partir de SC3 (Figs. 3c y 4e) y STAS-V a partir de SC4 (Figs. 3d y 4f). Una vez obtenidos los diseños, las tres corrientes de interconexión (los tres grados de libertad que quedan disponibles) deben de ser optimizadas hasta obtener el menor consumo de energía de los esquemas.

#### 4. Casos de estudio

Se efectuaron los cálculos para los consumos de energía y para las eficiencias termodinámicas para la separación de las mezclas ternarias y de cinco componentes. Para comparar el comportamiento de las secuencias se analizaron tres mezclas ternarias y dos mezclas multicomponentes; esta variedad de mezclas se estudió para observar el efecto de la volatilidad en los resultados. La descripción de las mezclas está en las Tablas I y II. El flujo de alimentación es de 45.36 kmol/h. Las purezas de los componentes se fijaron para la mezcla ternaria (A, B, C) con los siguientes valores de fracción mol: 0.987, 0.98, 0.986, respectivamente; para el caso de la mezcla multicomponente (A, B, C, D, E), se fijaron como: 0.98, 0.94, 0.94, 0.94, 0.97 en fracción mol, respectivamente. La presión de diseño, para cada una de las secuencias, se seleccionó para garantizar el uso de agua de enfriamiento en los condensadores. Es bien sabido que el ahorro de energía en las columnas acopladas está fuertemente asociado a la cantidad de los componentes intermedios en relación a los componentes extremos. Por esta razón se analizaron dos composiciones diferentes para cada mezcla (Tablas III y IV) con baja y alta cantidad de componentes intermedios.

#### 5. Resultados

El diseño y optimización de las mezclas ternarias ha sido ampliamente informado en el trabajo de Hernández y Jiménez (2003); para el caso de las mezclas multicomponentes, las técnicas de diseño y optimización han sido analizadas en detalle en los trabajos de Rosales Zamora (2004) y Calzon (2004). Por esta razón, en este trabajo sólo se presentan las tendencias observadas en los consumos de energía óptimos.

Cuando se analizaron las mezclas ternarias, las tendencias muestran un ahorro de energía que oscila entre el 10 y el 38% en comparación con sus contrapartidas con-

Tabla I. Mezclas ternarias analizadas

Mezcla	Componentes (A, B, C)
M1	n-pentano/n-hexano/n-heptano
M2	n-butano/i-pentano/n-pentano
M3	i-pentano/n-pentano/n-hexano

Tabla II. Mezclas de cinco componentes analizadas

Mezcla	Componentes (A, B, C, D, E)
M1	n-butano/n-pentano/n-hexano/n-heptano/n-octano
M2	n-butano/i-pentano/n-hexano/n-heptano/n-octano

Tabla III. Composición en la alimentación para las mezclas ternarias

Alimentación	Composición (% mol)
F1	40/20/40
F2	15/70/15

Tabla IV. Composición en la alimentación para las mezclas de cinco componentes

Alimentación	Composición (% mol)
F1	35/10/10/10/35
F2	12,5/25/25/25/12,5

vencionales (Tablas V – VIII). Estos resultados están de acuerdo con los resultados clásicos, ampliamente informados, del ahorro de energía en este tipo de esquemas. En los resultados se observan dos tendencias:

a) Para los dos tipos de composición, las columnas térmicamente acopladas muestran menores consumos de energía que las secuencias convencionales.

b) Los ahorros de energía son más altos para las mezclas donde el componente intermedio se encuentra en baja cantidad.

En el caso de las mezclas de cinco componentes analizadas, los ahorros de energía observados oscilan entre el 8% y el 40% en comparación con las disposiciones convencionales (Tablas IX – XI). En todos los casos, el ahorro de energía está presente. Sin embargo, es importante resaltar que, para la separación donde la alimentación presenta mayor cantidad de los componentes intermedios, se alcanzan los menores ahorros de energía en las secuencias acopladas. Esta tendencia es similar a la obtenida para la separación de mezclas ternarias. En ese caso también se había observado que los ahorros de energía son más altos para las mezclas donde el componente intermedio se encuentra en baja cantidad.

El análisis del cálculo de la eficiencia de segunda ley para todos

Tabla V. Mínimo consumo de energía (kW) y eficiencia termodinámica para la mezcla ternaria M1

Alimentación	Secuencia	Carga térmica total (kW)	$\eta$ (%)
F1	SD	941,5	16,8
	STAD	724,3	22,1
	SI	846,4	22,7
	STAI	624,1	27,2
F2	SD	1314,8	7,7
	STAD	1042,7	9,8
	SI	1239,3	11,9
	STAI	945,6	13

**Tabla XI. Ahorro de energía en las secuencias acopladas para la separación de mezclas multicomponentes en comparación con las secuencias convencionales**

Mezcla	Alimentación	Secuencia	% de ahorro de energía (en comparación con su secuencia convencional respectiva)
M1	F1	STAD - V	22,8
		STAI - V	32,8
		STAR - V	12,3
		STAS - V	39,4
M1	F2	STAD - V	38,7
		STAI - V	27,8
		STAR - V	7,5
		STAS - V	27,9
M2	F1	STAD - V	24,6
		STAI - V	25,2
		STAR - V	21,8
		STAS - V	30,8
M2	F2	STAD - V	34,7
		STAI - V	25,9
		STAR - V	7,9
		STAS - V	8,3

## Nomenclatura

FL = Flujo de interconexión en fase líquida.  
 FV = Flujo de interconexión en fase vapor.  
 h = entalpía molar.  
 n = flujo molar.  
 Q = calor.  
 S = entropía molar.  
 $T_0$  = temperatura de los alrededores.  
 $T_s$  = temperatura del sistema.  
 $W_{min}$  = trabajo mínimo de separación.  
 $W_s$  = trabajo de árbol (o trabajo externo).  
 $\eta$  = eficiencia de segunda ley.

## 7. Referencias

[1] Banda-Belmonte, L.D., y Hernández, S. "Diseño y Control de Secuencias de Destilación Térmicamente Acopladas". Revista Mexicana de Ingeniería Química, 3, 13 - 21 (2004).  
 [2] Calzon-McConville, C.J. "Diseño y Optimización de Secuencias de Destilación Térmicamente Acopladas para la Separación de Mezclas de Cinco Componentes". Tesis para obtener el grado de Ingeniero Químico, Universidad de Guanajuato, México (2004).

[3] Dünnebier, G. y Pantelides, C. "Optimal Design of Thermally Coupled Distillation Columns". Ind. Eng. Chem. Res., 38, 162-176 (1999).

[4] Finn, A.J. "Consider Thermally Coupled Distillation". Chem. Eng. Progress, October 41-45 (1993).

[5] Glinos, K., y Malone, F. "Optimality Regions for Complex Column Alternatives in Distillation Systems". Chem. Eng. Res. Des., 66, 229-240 (1988).

[6] Hernández, S., Pereira-Pech, S., Jiménez, A. y Rico-Ramírez, V. "Energy Efficiency of an Indirect Thermally Coupled Distillation Sequence". The Can. J. Chem. Eng., 81, 1087 - 1091 (2003).

[7] Hernández, S. y Jiménez, A. "Design of Optimal Thermally-Coupled Distillation Systems Using a Dynamic Model". Trans Inst. Chem. Eng., 74, 357-362 (1996).

[8] Hernández, S. y Jiménez, A. "Design of Energy-Efficient Petlyuk Systems". Comput. Chem. Eng., 23, 1005-1010 (1999a).

[9] Hernández, S. y Jiménez, A. "Controllability Analysis of Thermally Coupled Distillation Systems". Ind. Eng. Chem. Res., 38, 3957-3963 (1999b).

[10] Jiménez, A., Hernández, S., Montoy, F. A. y Zavala García, M. "Analysis of Control Properties of Conventional and Nonconventional Distillation Sequences". Ind. Eng. Chem. Res., 40, 3757-3761 (2001).

[11] Kaibel, G. y Schoenmaker, H. "Process Synthesis and Design in Industrial Practice". In the Proceedings of European Symposium on Computer Aided Process Engineering -12 (ES-

CAPE) Edited by J. Grievink y J.V. Schijndel, Elsevier, Holland, 9-22 (2002).

[12] Rong, B.G., Kraslawski, A. y Nyström, L. "The Synthesis of Thermally Coupled Distillation Flowsheets for Separations of Five - Component Mixtures". Comput. Chem. Eng., 24, 247 (2000).

[13] Rong, B.G., y Kraslawski, A. "Optimal Design of Distillation Flowsheets with a Lower Number of Thermal Couplings for Multicomponent Separations". Ind. Eng. Chem. Res., 41, 5716-5726 (2002).

[14] Rosales Zamora, M.B. "Estudio de las Secuencias de Destilación Térmicamente Acopladas Directa e Indirecta para la Separación de Mezclas de Cinco Componente". Tesis para obtener el grado de Ingeniero Químico, Universidad de Guanajuato, México (2004).

[15] Seader, J.D., and Henley, E. "Separation Process Principles". John Wiley and Sons, New York (1998).

[16] Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S. y Jiménez, A. "Control Behaviour of Thermally Coupled Distillation Sequences". Trans. Inst. Chem. Eng., 80, 783-789 (2002).

[17] Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Femat, R., y Jiménez, A. "Dynamic Control of a Petlyuk column via Proportional-Integral action with dynamic estimation of uncertainties". In the Proceedings of European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 13 (ES-CAPE), Edited by Andrzej Kraslawski e Ilkka Turunen, Elsevier, Finlandia, 515 - 520 (2003).

[18] Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Rico-Ramírez V., y Jiménez, A. "A Comparison of the Feedback Control Behavior between Thermally Coupled and Conventional Distillation Schemes". Comput. Chem. Eng., 28, 811 - 819 (2004).

[19] Segovia - Hernández, J.G., Pérez-Salas, O.Y., y Hernández, S. "Control PID de Secuencias de Destilación Térmicamente Acopladas" INGENIERÍA QUÍMICA (España), 415, 98 - 110 (2004).

[20] Serra, M., España, A., y Puigjaner, L. "Controllability of Different Multicomponent Distillation Arrangements". Ind. Eng. Chem. Res., 42, 1773-1782 (2003).

[21] Yeomans, H., & Grossmann, I.E. Optimal Design of Complex Distillation Columns Using Rigorous Tray-by-Tray Disjunctive Programming Models. Ind. Eng. Chem. Res., 39, 4326 (2000).

[22] Tedder, D.W., y Rudd, D.F. "Parametric Studies in Industrial Distillation: Part I. Design Comparisons". AIChE J., 24, 303-315 (1978).

[23] Triantafyllou, C., y Smith, R. "The Design and Optimization of Fully Thermally Coupled Distillation Columns". Trans. Inst. Chem. Eng., 70, 118-132 (1992).

**Tabla IX. Mínimo consumo de energía (kW) y eficiencia termodinámica para la mezcla multicomponente M1**

Alimentación	Secuencia	Carga térmica total (kW)	$\eta$ (%)
F1	SC1	1.090,2	15,65
	STAD - V	841,1	26,67
	SC2	1.181,5	20,60
	STAI - V	793,7	29,67
	SC3	1.062,8	17,8
	STAR - V	931,6	24,9
	SC4	1.168,0	18,0
	STAS - V	708,0	33,5
F2	SC1	2032,8	5,47
	STAD - V	1246,7	14,40
	SC2	2039,5	11,62
	STAI - V	1471,8	12,61
	SC3	1213,5	15,4
	STAR - V	1123,0	16,9
	SC4	1332,5	16,8
	STAS - V	960,5	19,4

**Tabla X. Mínimo consumo de energía (kW) y eficiencia termodinámica para la mezcla multicomponente M2**

Alimentación	Secuencia	Carga térmica total (kW)	$\eta$ (%)
F1	SC1	1363,5	26,84
	STAD - V	1027,3	23,70
	SC2	2921,2	6,62
	STAI - V	2185,8	9,29
	SC3	1070,8	16,7
	STAR - V	837,1	23,8
	SC4	1196,6	17,4
	STAS - V	827,41	27,7
F2	SC1	2390,3	9,76
	STAD - V	1560,7	13,02
	SC2	3998,6	4,14
	STAI - V	2964,1	5,71
	SC3	1551,6	13,1
	STAR - V	1428,7	11,5
	SC4	1652,1	14,9
	STAS - V	1514,7	13,3

la cual utiliza la energía al más alto nivel en la columna principal, ya que sus perfiles de temperatura son más elevados, es mayor que en su respectiva secuencia convencional en donde los niveles de temperatura son inferiores. Esta situación es compensada por el aumento en el ahorro de energía obtenido mediante el acoplamiento térmico. Este problema no se presenta en ninguno de los otros tres casos analizados para esta separación.

## 6. Conclusiones

En el presente trabajo se han analizado los consumos de energía y las eficiencias de segunda ley para la separación de mezclas ternarias y de cinco componentes utilizando secuencias de destilación convencionales y columnas térmicamente acopladas. Cuando se analizan las mezclas ternarias, se observa que las secuencias acopladas muestran ahorros de energía que pueden alcanzar valores hasta del 38% en comparación con las secuencias convencionales. En el análisis de la eficiencia termodinámica, la tendencia es que los esquemas con reciclados, en todos los casos, muestran mejores valores que las disposiciones convencionales. Esta mejora en la eficiencia termodinámica es causada por la presencia de reciclados en las columnas térmicamente acopladas. Resultados similares fueron observados en el estudio de las mezclas multicomponentes. Se encontraron, en todos los casos analizados, ahorros de energía que oscilan alrededor del 30%, y para la mayoría de los esquemas con reciclados se obtuvieron mejores eficiencias de segunda ley.

Los resultados obtenidos permiten inferir que la presencia de los acoplamientos térmicos en las columnas de destilación térmicamente acopladas, cuando están bien optimizados, no sólo disminuyen el consumo de energía para efectuar la separación, sino también mejoran la eficiencia termodinámica cuando se hace un análisis comparativo con columnas de destilación convencionales.

**Tabla VI. Mínimo consumo de energía (kW) y eficiencia termodinámica para la mezcla ternaria M2**

Alimentación	Secuencia	Carga térmica total (kW)	$\eta$ (%)
F1	SD	2.130,8	7,5
	STAD	1.590,1	8,6
	SI	2.493,0	9,9
	STAI	1.540,3	10,6
F2	SD	2.834,8	5,5
	STAD	1.939,5	9,0
	SI	2.274,1	8
	STAI	1.959,5	9,0

**Tabla VII. Mínimo consumo de energía (kW) y eficiencia termodinámica para la mezcla ternaria M3**

Alimentación	Secuencia	Carga térmica total (kW)	$\eta$ (%)
F1	SD	1.020,3	17,4
	STAI	862,3	17,6
	SI	1.060,3	25,0
	STAI	918,4	27,8
F2	SD	1.090,1	17,9
	STAD	982,7	14,6
	SI	1.215,4	21,9
	STAI	1.027,7	25,8

**Tabla VIII. Ahorro de energía en las secuencias acopladas para la separación de mezclas ternarias en comparación con las secuencias convencionales**

Mezcla	Alimentación	Secuencia	% de ahorro de energía (en comparación con su secuencia convencional respectiva)
M1	F1	STAD	23,0
		STAI	26,3
M1	F2	STAD	20,7
		STAI	23,7
M2	F1	STAD	25,4
		STAI	38,2
M2	F2	STAD	31,6
		STAI	13,8
M3	F1	STAD	15,5
		STAI	13,4
M3	F2	STAD	9,8
		STAI	15,4

los esquemas ternarios muestra que la introducción de reciclados (acoplamiento térmico) incrementa la eficiencia termodinámica (Tablas V – VII). El incremento en los valores de las eficiencias termodinámicas no es superior al 8%, en relación con los valores obtenidos en las secuencias convencionales, ya que las secuencias convencionales y sus respectivas columnas acopladas tienen los mismos niveles de temperatura en las corrientes de salida: la diferencia clave entre unas y otras son los acoplamiento térmico. La optimización de estos reciclados no sólo disminuye el consumo de energía en las columnas térmicamente acopladas, sino también mejora su eficiencia termodinámica. Es importante comentar que la eficiencia termodinámica calculada para la STAD, la cual utiliza la energía al más alto nivel (columna principal) debido a que presenta perfiles de temperatura más elevados, es mayor que en la secuencia convencional (donde los niveles de temperatura son menores). Esta situación se compensa por la disminución en el consumo de energía obtenida mediante el acoplamiento térmico. Este problema no se presenta en la STAI, la cual utiliza la energía a los mismos niveles de temperatura.

Los resultados obtenidos, para la eficiencia termodinámica en las mezclas de cinco componentes, muestran que en la mayoría de los casos los esquemas acoplados presentan mejores eficiencias termodinámicas que sus contrapartidas convencionales (Tablas IX -X). En algunos casos, el aumento en los valores de la eficiencia no es muy grande, comparado con los resultados obtenidos para las mezclas ternarias, o para algunas situaciones es ligeramente mejor la eficiencia de las secuencias convencionales. Sin embargo, en general, para este análisis, se hace patente el hecho de que la presencia de los reciclados optimizados en los esquemas térmicamente acoplados no sólo aumenta el ahorro de energía en las secuencias acopladas, sino también mejora la eficiencia de segunda ley. Al igual que para el caso ternario, la eficiencia termodinámica calculada para la STAD - V,