

Aplicación del método de transbordo en la enseñanza de la estructuración de Redes de Intercambio Térmico

Ing. Carmen Noemí Paniagua ¹ – Ing. Omar Alfredo Iglesias ²
Departamento de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata
Av.1 esq. 47 – 1900 La Plata
1 cnpaniag@ing.unlp.edu.ar - 2 oaiglesi@ing.unlp.edu.ar

Resumen

El trabajo reseña una experiencia educativa en la enseñanza de la estructuración de redes de intercambio térmico (RIT) mediante el método de Transbordo. La aplicación de la técnica en la que se basa el método, Programación Lineal o Lineal Entera Mixta, obligó al desarrollo de un complemento para planilla Excel, Transbordo.xla, cuyas características se resumen. Se muestra un caso donde, a través del uso del complemento, se analiza la vigencia de la heurística básica del otro método utilizado para la estructuración de RIT, el método Pinch.

Palabras Claves: Enseñanza – Programación Lineal Entera Mixta – Redes de Intercambio Térmico

Introducción

La amplitud del uso de las computadoras personales en el ejercicio profesional de la Ingeniería debe verse reflejado, inevitablemente, en la orientación, los contenidos y las estrategias pedagógicas utilizadas en la formación de los futuros ingenieros.

El enfoque tradicional, entendiéndose por tal el que prevalecía antes de la explosión informática, ponía un fuerte énfasis en las metodologías de resolución de los problemas y los algoritmos de cálculo asociados.

Esto se hacía con cierta mengua de otros aspectos como el análisis de alternativas, no porque se subestimase su importancia, sino porque resultaba materialmente imposible plantear ese tipo de estudio en base al cálculo manual.

Los grados de libertad, que normalmente existen en el diseño de un sistema de Ingeniería, se consumían mediante el uso de criterios y valores aconsejados por la práctica.

Esto último no ha perdido vigencia, pero actualmente constituye un punto de partida [1] cuando antes era poco menos que el estadio final.

En los tiempos que corren, la enseñanza de la Ingeniería debe privilegiar los aspectos conceptuales y plantear las cuestiones de un modo abierto, de modo que se generen, naturalmente, las alternativas propias de todo problema real.

En el caso de Ingeniería Química un tema muy adecuado para materializar este enfoque es la estructuración (síntesis) de esquemas de proceso, en particular, de redes de intercambio térmico. Una planta de la industria química es un conjunto de transformaciones e intercambios de materia y energía para producir determinados productos a partir de ciertas materias primas. En estas transformaciones e intercambios pueden ponerse en juego recursos auxiliares al proceso en sí o utilizar capacidades propias, mediante un mecanismo de compensación interna.

En un determinado momento del diseño debe considerarse la existencia de una serie de corrientes de proceso, algunas de las cuales requieren ser enfriadas entre el punto de origen y el de destino y en otras, por el contrario, debe elevarse la temperatura antes de ser procesadas en el equipo correspondiente.

Obviamente, estos requerimientos pueden ser atendidos con servicios auxiliares, agua y vapor, por ejemplo, o bien utilizar el calor disponible en las corrientes a enfriar para calentar las restantes. En

esto, deberán tenerse en cuenta no sólo las restricciones que imponen las leyes de la Termodinámica sino también aquellas que hacen a la operación y distribución de los equipos en el terreno. Existen, básicamente, dos efectos económicos contrapuestos: por un lado, si todos los requerimientos se atienden con servicios auxiliares, las diferencias de temperaturas en los intercambios serán grandes y, por ende, los equipos relativamente pequeños; en el otro extremo, cuando se trata de maximizar el aprovechamiento de los calores disponibles, las fuerzas impulsoras se reducen y las dimensiones de los equipos aumentan. En el primer caso, los gastos en servicios son máximos y la inversión fija es mínima, en el segundo ocurre exactamente lo contrario. La solución más adecuada dependerá de la relación entre el costo de los servicios y la amortización de los equipos.

Este es, en síntesis, el problema de estructuración de redes de intercambio térmico (RIT), también conocido como Integración de Procesos.

Para el tratamiento de este tema existen, actualmente, dos metodologías básicas: el método Pinch [2][3] y la programación matemática [4][5]

El primero de ellos resulta muy adecuado para la consideración de alternativas de diseño. Los autores han desarrollado un software en planilla de cálculo Excel© [6] con el cual los estudiantes pueden realizar sus trabajos de estructuración de RIT, reservándose sólo la selección de corrientes a intercambiar, mientras que la planilla realiza, en forma automática, el balance de calor y la estimación de costos.

Sin embargo, algunas cuestiones no pueden ser abordadas desde la óptica exclusiva del método Pinch, debido a las limitaciones que tiene para poder abordar cierto tipo de problemas.

En este sentido, el enfoque de la síntesis utilizando el Modelo de Transbordo y su resolución por la técnica de Programación Lineal Entera Mixta amplía sustancialmente el conjunto de casos a los que se puede dar solución.

Así, por ejemplo, el método Pinch no resulta adecuado para atacar la estructuración de RIT donde existen “intercambios no permitidos” entre ciertas corrientes de proceso, debido a razones técnicas o de ubicación en el terreno.

Otro caso al que el método Pinch no da una respuesta adecuada es la determinación del mínimo número de equipos necesarios para una determinada RIT.

Pero el Modelo de Transbordo tiene el inconveniente de toda técnica matemática de alta complejidad: los resultados se alcanzan “fuera del control” del usuario, quien se limita al planteo del problema y deja a cargo de un programa de computadora el obtener la solución.

Más aún, la formulación del modelo, en alguno de sus aspectos, resulta un tanto intrincada, hasta arbitraria, con una justificación de índole matemática más que conceptual.

Desde este punto de vista, el Modelo de Transbordo no resulta totalmente adecuado para una primera aproximación a la estructuración de RIT.

Se ha de ver, sin embargo, que la posibilidad de resolver problemas que la metodología Pinch no puede abordar, permite analizar cuestiones básicas que subyacen en esta última técnica.

Un somero análisis de las metodologías

El principio cardinal del método Pinch parte de dividir el rango de temperaturas donde se encuentran los servicios y corrientes de proceso en zonas donde, como máximo, está presente un solo servicio auxiliar, estableciéndose la inconveniencia de efectuar transferencias de calor entre corrientes o servicios ubicados en distintas zonas (*Transferencia a través del Pinch*).

En este principio subyace una consideración de tipo heurística, que considera el gasto debido al consumo de servicios auxiliares superior a la amortización del costo de los equipos.

De aquí deviene un orden de prioridades en la estructuración de las RIT: debe asegurarse, primero, el mínimo gasto en servicios y, luego, minimizar la inversión fija; esto último planteado, generalmente, como la búsqueda del menor número de equipos para la RIT.

Sin embargo, sería conceptualmente interesante para el alumno poder poner en tela de juicio la validez de la heurística básica.

Como ya se ha dicho, el método Pinch sólo permite estructurar RIT con un costo mínimo en el consumo de servicios auxiliares, sin ninguna variante metodológica explícita que permita la determinación del mínimo número de equipos de intercambio para esas redes.

Las potencialidades del método de Transbordo, en cambio, resultan significativamente superiores.

Aquí sí resulta posible encontrar, para un determinado problema de estructuración de una RIT, el número mínimo de intercambiadores de calor que satisfacen los requerimientos establecidos.

En tal caso, se podría resolver el mismo problema, con idénticos parámetros técnicos y económicos, una vez respetando la heurística básica del método Pinch y otra ignorándola.

Ambos métodos operan, de un modo u otro, sobre lo que se conoce como Cascada de Calor, donde el problema de estructuración bajo análisis se presenta como una sucesión ordenada, en forma decreciente, de intervalos de temperatura, de modo tal que:

- la totalidad de las corrientes de proceso, frías y calientes y los servicios auxiliares queden incluidos en el rango de temperaturas cubierto por la Cascada;
- cada corriente o servicio se ubica en los intervalos que corresponda de acuerdo a sus temperaturas de entrada y salida;
- las corrientes y servicios presentes en un determinado intervalo puedan intercambiar calor sin que se viole ninguna restricción termodinámica.

Para lograr lo anterior las temperaturas de las corrientes y servicios se expresan en una escala arbitraria, normalmente:

$$T'_c = T_c - \delta / 2 \text{ para corrientes que suministran calor}$$

$$T'_f = T_f + \delta / 2 \text{ para corrientes que reciben calor}$$

siendo δ la aproximación mínima que, por diseño, se permite entre las temperaturas de una corriente caliente y una fría que intercambian calor.

El método de Transbordo considera cada intervalo como almacenamientos de calor intermedios entre las fuentes, corrientes o servicios auxiliares calientes, y los sumideros, corrientes o servicios auxiliares fríos.

En la figura 1 se indican los posibles flujos de calor en un intervalo de temperatura k de una cascada de calor. En dicha figura, puede verse que al “depósito” k llegan los aportes de calor $Q_{i,k}$ de las corrientes de proceso calientes $\{CC_k\}$, de los servicios auxiliares calientes $\{FC_k\}$ y el aporte del calor residual del intervalo anterior R_{k-1} . De ese depósito toman una cantidad de calor $Q_{j,k}$ las corrientes de proceso frías $\{CF_k\}$ y los servicios auxiliares fríos $\{FF_k\}$. Habrá, además, un cierto excedente de calor R_k que pasará al intervalo siguiente.

Debe entenderse que los conjuntos

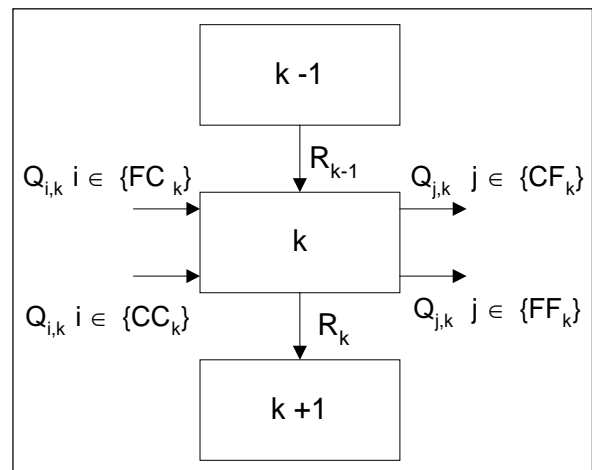
$\{CC_k\}$, $\{FC_k\}$, $\{CF_k\}$ y $\{FF_k\}$ de la figura 1 se

Figura 1

refieren a corrientes y servicios presentes en el intervalo k .

En el planteo del modelo se puede o no discriminar el origen del calor disponible, pero aún en el caso más simple, con una reducida cantidad de intervalos, corrientes y fuentes auxiliares, las relaciones que se deben establecer implican el manejo de un número importante de variables, vinculadas a través de una matriz poco densa.

La formulación genérica para una Cascada de Calor, sin discriminación de fuentes aportantes, con P intervalos de temperatura se puede poner



$$R_{k-1} + \sum_{i \in \{FC_k\}} Q_{i,k} + \sum_{i \in \{CC_k\}} Q_{i,k} = R_k + \sum_{j \in \{FF_k\}} Q_{j,k} + \sum_{j \in \{CF_k\}} Q_{j,k} \quad \forall k = 1, \dots, P$$

$$R_0 = R_P = 0 \quad S-1$$

$$R_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, P-1$$

En rigor, la capacidad del método de Transbordo para abordar problemas que el método Pinch no puede resolver, requiere discriminar el origen de cada aporte de calor. En tal caso se tendrá:

a) balances de las corrientes calientes

$$R_{i,k} - R_{i,k-1} + \sum_{j \in \{CF_k\}, \{FF_k\}} Q_{i,j,k} = Q_{i,k} \quad i \in \{CC_k\}, \quad \forall k = 1, \dots, P \quad S-2.a$$

b) balances de los servicios auxiliares calientes

$$R_{i,k} - R_{i,k-1} + \sum_{j \in \{CF_k\}} Q_{i,j,k} - Q_{i,k} = 0 \quad i \in \{FC_k\}, \quad \forall k = 1, \dots, P \quad S-2.b$$

c) balances de las corrientes frías

$$\sum_{i \in \{CC_k\}, \{FC_k\}} Q_{i,j,k} = Q_{j,k} \quad j \in \{CF_k\}, \quad \forall k = 1, \dots, P \quad S-2.c$$

d) balances de los servicios auxiliares fríos

$$\sum_{i \in \{CC_k\}} Q_{i,j,k} - Q_{j,k} = 0 \quad j \in \{FF_k\}, \quad \forall k = 1, \dots, P \quad S-2.d$$

e) con las condiciones

$$R_{i,0} = R_{i,P} = 0 \quad ; \quad R_{i,k} \geq 0 \quad i \in \{CC_k\}, \{FC_k\}; \quad \forall k = 1, \dots, P-1$$

$$Q_{i,j,k} \geq 0 \quad i \in \{CC_k\}, \{FC_k\}; \quad j \in \{CF_k\}; \quad \forall k = 1, \dots, P \quad S-2.e$$

$$Q_{i,j,k} \geq 0 \quad i \in \{CC_k\}; \quad j \in \{FF_k\}; \quad \forall k = 1, \dots, P$$

Si se pretende determinar el número mínimo de equipos para la red deberá agregarse, al conjunto S-2, las relaciones

$$\begin{aligned} \sum Q_{i,j,k} - U_{i,j} y_{i,j} &\leq 0 \quad i \in \{CC\}, \{FC\}; \quad j \in \{CF\} \\ \sum_{k \in TI} Q_{i,j,k} - U_{i,j} y_{i,j} &\leq 0 \quad i \in \{CC\}; \quad j \in \{FF\} \end{aligned} \quad S-3$$

donde las variables binarias y_{ij} indican si la corriente o fuente caliente i intercambia con la corriente o fuente fría j ($y_{ij} = 1$), en tanto que las constantes U_{ij} son los valores límites de tales intercambios. Cuando el modelo de Transbordo se utiliza para minimizar el costo en servicios auxiliares la función objetivo es

$$\min \sum_{k=1}^P \left[\sum_{i \in \{FC_k\}} c_i Q_{i,k} + \sum_{j \in \{FF_k\}} c_j Q_{j,k} \right]$$

en tanto que la que se plantea en la determinación de la red con el mínimo número de equipos es

$$\min \left[\sum_{i \in \{CC\}, \{FC\}} \sum_{j \in \{CF\}, \{FF\}} y_{i,j} \right]$$

Se puede ver que las relaciones y las funciones objetivo del problema son lineales, en tanto que las variables involucradas son de naturaleza continua - calores intercambiados -, con el posible agregado de otras binarias - y_{ij} -, por lo que el problema es de Programación Lineal o, en un extremo, Lineal Entera Mixta, técnicas numéricamente complejas, por lo que se requiere el auxilio de una computadora con el software adecuado para resolver el problema.

La construcción de las relaciones planteadas es un proceso con bastantes posibilidades de incurrir en errores de asignación, lo que torna difícil su realización en forma manual.

La utilización, entonces, del modelo de Transbordo en el proceso de aprendizaje de la estructuración de RIT requiere remover todos estos obstáculos para poder focalizarse, eficazmente, en el análisis de las cuestiones conceptuales vinculadas con el tema.

El complemento Transbordo.xla

Para simplificar la tarea de construir y resolver el modelo de Transbordo para un problema particular, los autores desarrollaron un complemento para la planilla Excel®, Transbordo.xla

El complemento permite la construcción automática del sistema de ecuaciones que se requieren para utilizar el modelo de Transbordo, así como la obtención de la solución para los distintos casos contemplados

- Mínimo Costo de Servicios (con o sin intercambios no permitidos)
- Mínimo Número de Equipos

En el proceso de optimización, Transbordo.xla utiliza el complemento Solver de Excel®, de forma totalmente transparente al usuario.

Transbordo.xla comienza por solicitar el número de corrientes de proceso y de servicios calientes y fríos, tras lo cual genera una hoja especial para el ingreso, por parte del usuario, de las especificaciones técnicas y los datos económicos, como se muestra en la figura 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Modelo de Transbordo								
2									
3	Aprox.Mínir	10							
4									
5	Servicios Auxiliares								
6									
7	Calientes					Frios			
8	Cod.ID	Temp.Ent.	Temp.Sal.	Cost.Unit.Año	Cod.ID	Temp.Ent.	Temp.Sal.	Cost.Unit.Año	
9	Sc1	250	250	10	Sf1	30	40	1	
10									
11	Corrientes de Proceso								
12									
13	Calientes					Frios			
14	Cod.ID	W = F * Cp	Temp.Ent.	Temp.Sal.	Cod.ID	W = F * Cp	Temp.Ent.	Temp.Sal.	
15	Cc1	2	180	40	Cf1	3	60	180	
16	Cc2	4	150	40	Cf2	2.6	30	130	
17									

Figura 2

A continuación se debe proceder a definir, si existen, los intercambios no permitidos. Una vez hecho esto, queda habilitada la posibilidad de “Resolver el Modelo”, en la búsqueda de alguno de las dos minimizaciones que tiene previstas el complemento.

Transbordo.xla define, en forma automática, los parámetros necesarios para que el complemento Solver pueda realizar el proceso de optimización que corresponda, según la elección realizada. Para ello construye la Cascada de Calor del problema planteado, define las variables que requiere el método según el criterio elegido y completa la matriz de coeficientes de las ecuaciones. Los resultados de la optimización se muestran en una hoja especial en la planilla que el complemento Transbordo construye al efecto. En la figura 3 se muestra parte de la hoja *minNroEquipos*, donde se han volcado los resultados correspondientes a una solución con mínimo número de equipos para el problema de la figura 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AB
1	Variables																	Nº de Equipos									
2	Calores intercambiados																	4									
3	QSc1	QSF1	Qs1,1,1	Qs1,1,2	Q1,1,2	Qs1,1,3	Qs1,2,3	Q1,1,3	Q1,2,3	Q2,1,3	Q2,2,3	Qs1,2,4	Q1,2,4	Q1,1,4	Q2,2,4	Q2,1,4											
4	340	440	30	70	20	240	0	0	182	0	0	0	78	0	0	440											
5	Remanentes																										
6	RS1,1	RS1,2	R1,2	RS1,3	R1,3	RS2,3																					
7	310	240	40	0	0	18	320																				
8	Intercambios																										
9	YS1,1	YS1,2	Y1,1	Y1,2	Y1,3	Y2,1	Y2,2	Y2,S1																			
10	1	0	1	1	0	0	0	1																			
11	Ecuaciones																										
12	Matriz de coeficientes (Balance de Calor)																										
14	QSc1	QSF1	Qs1,1,1	Qs1,1,2	Q1,1,2	Qs1,1,3	Qs1,2,3	Q1,1,3	Q1,2,3	Q2,1,3	Q2,2,3	Qs1,2,4	Q1,2,4	Q1,1,4	Q2,2,4	Q2,1,4											
15	Int.1	-1	1																								
29																											
30																											
31	Matriz de coeficientes (intercambios)																										
32																											
33																											
34																											
35																											
36																											
37																											
38																											
39																											
40																											
41																											

Figura 3

El sector al que el alumno debe prestar atención se encuentra en la parte superior de la figura 3, resaltada en color azul. Allí puede verse, analizando los valores óptimos de los $Y_{i,j}$, que la red tiene cuatro equipos, a saber:

- existe un intercambio entre el servicio auxiliar caliente 1 con la corriente fría 1 ($YS1,1 = 1$)
- otro intercambio se produce entre la corriente caliente 1 con la fría 1 ($Y1,1 = 1$)
- existe un tercero entre la corriente caliente 1 y la fría 2 ($Y1,2 = 1$)
- el último intercambio es entre la corriente caliente 2 y el servicio auxiliar frío 1 ($Y2,S1 = 1$)

A partir de la información contenida en la hoja el alumno debe realizar una serie de tareas con el objeto de poder evaluar el costo total anual asociado a la red de intercambio estructurada.

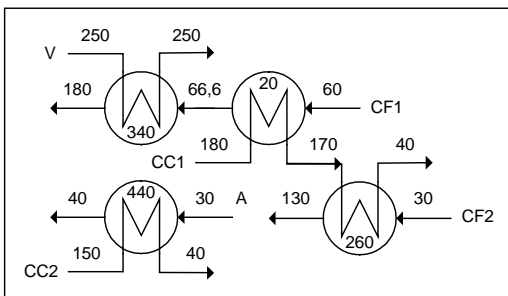


Figura 4

Lo primero que debe realizarse es “traducir” los resultados de la optimización en un esquema de proceso donde se hayan determinado, en cada equipo, el calor intercambiado y las temperaturas de entrada y salida de cada corriente.

En la figura 4 se puede apreciar el resultado de ese trabajo, tomando como base los contenidos de la hoja *minNroEquipos* de la figura 3.

Acto seguido, se debe realizar el dimensionado de los equipos y los correspondientes cálculos económicos que permiten evaluar el costo total anual asociado a la red de intercambio estructurada.

En la figura 5 puede verse la parte sustancial de la hoja de la planilla donde se realizan los cálculos correspondientes a la red mostrada en la figura 4.

Para realizar los cálculos mostrados allí se utilizan valores típicos del coeficiente global de transferencia U así como ecuaciones de costo para los equipos (en función del área de transferencia) y servicios auxiliares [7].

En la figura aparecen, en columna, los valores claves para cada uno de los equipos, en particular el área de intercambio y la inversión requerida.

Por último, en el sector inferior derecho, se puede ver un resumen de los costos totales anuales, discriminados en operativos, relacionados con los consumos de servicios auxiliares, y la amortización de los equipos de intercambio.

I-01: SC1-CF1	I-02: CC2-SF1	I-03: CC1-CF2	I-04: CC1-CF1	Costos
Q	340	440	260	Vapor 3400
U	1.14	0.85	0.28	Agua 460
te c	250	150	170	
ts c	250	40	40	
te f	66.67	30	30	
ts f	180	40	130	
DeltaTml	117.71	41.70	21.64	
Area	2.53	12.41	42.91	
Factor Cp	2164.25	4009.47	7324.99	C. Operativo 3860
Inversión	7142.03	13231.25	24172.48	Amortización 9682
				Total 13542

Figura 5

En el análisis de la heurística básica del método Pinch, este mismo trabajo se realiza sobre cada uno de las zonas que se determinan por la aplicación del método Pinch.

Para el problema de la figura 2 quedan definidos dos bloques, uno donde sólo se utiliza vapor (bloque "caliente") y otro (bloque "frío") donde el agua es el único servicio auxiliar utilizado.

En la figura 6 se muestran los esquemas a los que se arriba por la aplicación del método de Transbordo para conseguir el mínimo número de equipos en ambos bloques

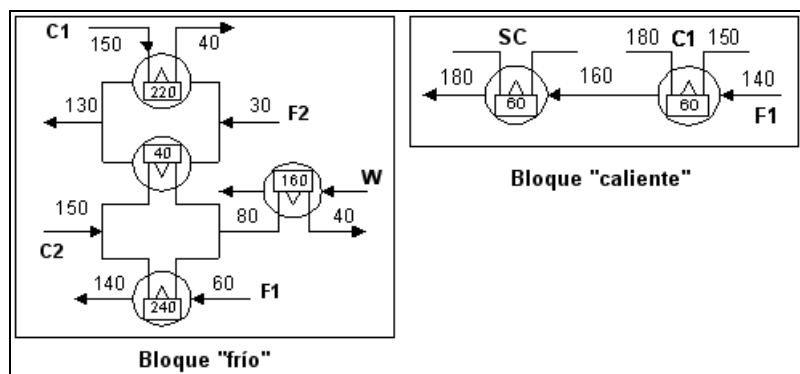


Figura 6

Al realizar el estudio de costos para esta nueva estructura, con iguales parámetros económicos que en el caso anterior, se ve que el costo total anual es superior en aproximadamente 45% al obtenido anteriormente (19858 frente a 13542), como se ve en la figura 7.

I-01: SC-F1	I-02: C1-F1	I-03: C1-F2	I-04: C2-F2	I-05: C2-F1	I-06: C2-Agua		Costos
Q	60	60	220	40	240	160	Vapor 600
U	1.14	0.28	0.28	0.28	0.28	0.85	Agua 160
te c	250	180	150	150	150	80	
ts c	250	150	40	80	80	40	
te f	160	140	30	30	60	30	
ts f	180	160	130	130	140	40	
DeltaTml	79.58	14.43	14.43	32.74	14.43	21.64	
Area	0.66	14.85	54.46	4.36	59.41	8.70	
Factor Cp	1472.65	4346.12	8325.42	2620.42	8732.19	3440.16	C. Operativo 760
Inversión	4859.75	14342.21	27473.89	8647.39	28816.22	11352.54	Amortización 19098
							Total 19858

Figura 7

El ejercicio se completa con una explicación de las causas de estas diferencias. Es fácil ver que las fuerzas impulsoras (DeltaTml) son netamente superiores en el primer caso, con lo cual no sólo se tiene un menor número de equipos sino que éstos son de dimensiones más reducidas y, consecuentemente, de menor costo.

Obviamente, en el primer caso los consumos –y gastos- de servicios auxiliares son mayores cuando se viola la regla del Pinch, pero estos gastos no resultan significativos frente a las amortizaciones de los intercambiadores. Obviamente, se podría, omitiendo las eventuales limitaciones legales, ampliar el plazo de esas amortizaciones para disminuir la incidencia de los costos fijos.

Se puede ver que sería necesario un horizonte de 16 años para que la red de la figura 6 fuese preferible a la de la 4. Este plazo excede, con mucho, un lapso razonable para la vida útil de este tipo de equipos, con lo cual, en este caso, conviene omitir la aplicación de la prohibición de la transferencia de calor a través del Pinch.

En forma enteramente análoga, el complemento Transbordo.xls se puede utilizar para explicitar la incidencia de ciertas limitaciones que existen en la estructuración de una RIT, como es el caso de los intercambios no permitidos.

Allí basta con estructurar la red con y sin los intercambios, respetando o no la regla del Pinch y evaluar, en cada caso, el costo total anual, para ver, entonces, cual es el costo de la limitación impuesta.

Conclusiones

Si bien el método de Transbordo, por su complejidad matemática, no resulta totalmente adecuado para introducir el concepto de estructuración de una RIT, su capacidad para llevar a cabo operaciones en que la metodología Pinch no resulta eficaz, permite poner de manifiesto, ante los estudiantes, los riesgos inherentes a todo enfoque heurístico.

Su utilización requiere, sin embargo, el acceso a un sistema de resolución de problemas de Programación Lineal Entera Mixta así como un cierto proceso automatizado para la construcción del modelo propio de la metodología.

Los autores han resuelto estos problemas trabajando sobre una planilla Excel que utiliza un complemento especialmente desarrollado a estos fines, Transbordo.xls.

El alcance de este complemento es exclusivamente docente, con lo cual no se ha estudiado la capacidad del mismo para abordar la solución de problemas de estructuración de RIT de la magnitud que puede tener, por ejemplo, los de una planta de procesos petroleros o petroquímicos.

Bibliografía citada

[1] Douglas J.M. “Conceptual Design of Chemical Processes”, McGraw Hill Chemical Engineering Series, New York, 1988.

- [2] Linnhoff B. and Hindmarsh E. "The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks", Chem. Eng. Sci., vol. 38, no. 5, pp. 745-763, 1983.
- [3] "Introduction to Pinch Technology", Linnhoff March, 1998. Sitio Web:
www.linnhoffmarch.com
- [4] Papoulias S.A. and Grossmann I.E. "A Structural Optimization Approach in Process Synthesis - II. Heat Recovery Networks", Comput. chem. Engng., vol. 7, pp. 707-721, 1983.
- [5] Floudas C.A., Ciric A.R. and Grossmann I.E. "Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations", AIChE JI., vol. 32, pp. 276-290, 1986.
- [6] Iglesias O., Paniagua C., "Uso de Planillas de Cálculo en la Enseñanza de Síntesis de Procesos", Actas del 3^{er} CAEDI, Vol.2, pp. 459-465, 2000.
- [7] Turton R., Bailie R.C., Whiting W.B., Shaeiwitz J.A., "Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes", Prentice Hall, 1998.