

9

SÍNTESIS DE REDES DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

- 9.1 Formulación del problema
- 9.2 El concepto de ΔT mínima
- 9.3 Uso de diagramas de contenido de calor
- 9.4 El método del punto de pliegue

Los altos costos de energía observados durante la década de los setenta motivaron el desarrollo de procesos con un uso eficiente de energía. El ahorro de servicios ofrece un potencial interesante para mejorar la economía de un proceso. Se ha demostrado en el capítulo anterior, por ejemplo, que el costo de servicios en columnas de destilación representa el componente principal en el costo total anual de esos procesos de separación.

En un proceso químico, se tienen generalmente varias corrientes que requieren de calentamiento y otras que necesitan de enfriamiento. Una práctica común es satisfacer estos requisitos mediante el uso de servicios (vapor y agua de enfriamiento). Avances recientes han desembocado en técnicas para la síntesis de sistemas que aprovechan las características de las corrientes involucradas en el proceso, de tal manera que corrientes calientes y corrientes frías intercambian calor para ahorrar el consumo de servicios. Esto puede requerir un número adicional de intercambiadores de calor; sin embargo, el ahorro en el costo de requerimientos energéticos en la mayoría de los casos compensa en exceso el costo adicional del equipo.

9.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema de la síntesis de redes de intercambiadores de calor se puede formular de la siguiente manera. Dadas n corrientes calientes que deben enfriarse y m corrientes frías que requieren calentamiento, el objetivo es encontrar una red de intercambiadores de calor que satisfaga los requerimientos de temperaturas finales a un costo mínimo.

Existe un problema combinatorial que aumenta drásticamente a medida que se considera un mayor número de corrientes. Esto complica la búsqueda de una estructura óptima. Para sintetizar redes de intercambiadores de calor se pueden usar enfoques heurísticos y algorítmicos.

9.2 EL CONCEPTO DE ΔT MÍNIMA

El incentivo para el diseño de una red de intercambiadores de calor se basa en el compromiso que se observa entre la inclusión de un intercambiador interno (entre corrientes de proceso) y el ahorro de servicios que se genera. Una variable importante en este diseño es la cantidad de calor que se intercambia en cada unidad.

Considérese, por ejemplo, la siguiente situación. Una corriente caliente debe enfriarse de 180 a 120°F, mientras que una corriente fría debe calentarse de 100 a 180°F. Estos requerimientos de energía pueden satisfacerse mediante un enfriador con agua de enfriamiento y un calentador con vapor, respectivamente. Si se desea un sistema que reduzca el consumo de servicios se puede comenzar por diseñar un intercambiador entre las dos corrientes. Consideremos por un momento la opción de que ambas corrientes se procesaran en forma completa; en el extremo frío del intercambiador se tendría una diferencia de temperaturas entre las corrientes de 20°F, mientras que en el otro extremo se tendría el límite de calentar la corriente fría hasta 180°F con otra que se encuentra a la misma temperatura. El costo de servicios desaparece, pero el diseño de

ese intercambiador implica un área infinita. La solución que deseamos se encuentra entre estos dos extremos.

Lo anterior establece que debe existir una diferencia de temperaturas en el extremo crítico del intercambiador que proporciona el mejor compromiso entre el costo de servicios y el costo del equipo. Este concepto, el de establecer una diferencia mínima de temperaturas entre corrientes que intercambian calor (ΔT_{\min}), es esencial para el diseño de cualquier red de intercambiadores de calor. Es muy común tomar, en forma heurística, un valor de ΔT_{\min} de 10 a 20°F.

9.3 USO DE DIAGRAMAS DE CONTENIDO DE CALOR

Rudd et al. propusieron el uso de diagramas de contenido de calor como ayuda en la asignación de los intercambios que generan una red de recuperación de energía. Aunque el enfoque es heurístico y no garantiza por lo tanto una solución óptima, proporciona una manera bastante clara de entender la lógica para una buena solución del problema.

El método consiste en graficar el contenido de calor de cada corriente en ejes de WC_p contra ΔT ; el área de cada bloque representa la cantidad de energía que esa corriente tiene disponible (para corrientes calientes) o que necesita (para corrientes frías). Se sugiere proponer intercambios de calor de acuerdo a la siguiente regla heurística:

Preservando un valor adecuado de ΔT_{\min} , proponer el primer intercambio entre la corriente más caliente a enfriarse y la parte más caliente de cualquier corriente fría a calentarse. Preservar ese orden en los siguientes intercambios hasta donde sea posible.

El método se ilustra con el problema mostrado en la Tabla 9.1. Se tienen dos corrientes calientes y dos corrientes frías. Si se usan solamente servicios para satisfacer las necesidades térmicas de las corrientes, el costo de operación del sistema se calcula como 98,116 \$/año, del cual el 98 por ciento (96,025 \$/año) es debido a servicios (el lector puede fácilmente corroborar estos cálculos). El incentivo existe para sintetizar una red de intercambiadores de calor que reduzca el costo de servicios, y por lo tanto el costo anual del proceso del cual esas corrientes forman parte.

La Figura 9.1 muestra el diagrama de contenido de calor de las corrientes. Lo primero que debe corroborarse son los límites de temperatura que termodinámicamente se pueden lograr mediante integración de energía. Suponiendo una ΔT mínima de 20°F y teniendo la corriente más caliente a 480°F, lo más que se puede calentar cualquier corriente fría es a 460°F. La corriente c_2 necesita entonces un servicio externo de calentamiento para llegar a su temperatura final de 500°F. Por otro lado, teniendo la corriente más fría a 140°F no existe restricción termodinámica para enfriar la corriente h_1 hasta 200°F. Usando la segunda regla heurística, se propone un intercambio entre h_2 y c_2 ; la corriente c_2 puede pasar de 240 hasta 460°F, mientras que la temperatura a la que h_2 sale del intercambiador es de 353°F.

La corriente c_1 intercambia calor con la fuente más caliente disponible para lograr su temperatura final de 320°F. Usando h_2 para este fin, se tiene que c_1 debe entrar al intercambiador a 219°F, lo cual satisface la necesidad de enfriamiento de h_2 . Finalmente, se hace el intercambio entre c_1 y h_1 , con el cual c_1 se calienta de 140 a 219°F, y h_1 sale del intercambiador a 252°F. El resto de

Tabla 9.1			
Datos de las corrientes y de diseño			
Corriente	WC_p , Btu/hr °F	Temperatura de entrada, °F	Temperatura de salida, °F
c ₁	1.445×10^4	140	320
c ₂	1.153×10^4	240	500
h ₁	1.667×10^4	320	200
h ₂	2.000×10^4	480	280

Diseño

Presión de vapor (saturado)	962.5 lb/in ²
Temperatura del agua de enfriamiento	100°F
Temperatura máxima de salida del agua	180°F
Diferencia mínima de temperatura	
Intercambiadores de calor	20°F
Calentadores	25°F
Enfriadores	20°F
Coefficientes globales de transferencia de calor	
Intercambiadores de calor	150 Btu/hr ft ² °F
Calentadores	200 Btu/hr ft ² °F
Enfriadores	150 Btu/hr ft ² °F
Paro de equipo	380 hr/año
Parámetros de costo de intercambiadores de calor	Costo = $a A^b$; $a = 350$; $b = 0.6$ A en ft ²
Factor de depreciación	0.1
Costo de agua de enfriamiento	5×10^{-5} \$/lb
Costo de vapor	1×10^{-3} \$/lb

energía disponible en h_1 debe procesarse con agua de enfriamiento. La asignación de intercambios se muestra en la Figura 9.2. Nótese que ΔT mínima debe comprobarse cuidadosamente en cada intercambio.

La red de intercambiadores de calor obtenida se presenta en la Figura 9.3. La evaluación económica de esta red se resume en la Tabla 9.2. El costo de operación de la red es de 16,304 \$/año, lo cual representa una reducción superior al 80 por ciento.

9.4 EL MÉTODO DEL PUNTO DE PLIEGUE

Describiremos ahora un método para la síntesis de redes de intercambiadores de calor que ha sido objeto de especial interés en esta área. El método se basa en detectar, bajo principios termodinámicos, un punto muy crítico para el diseño

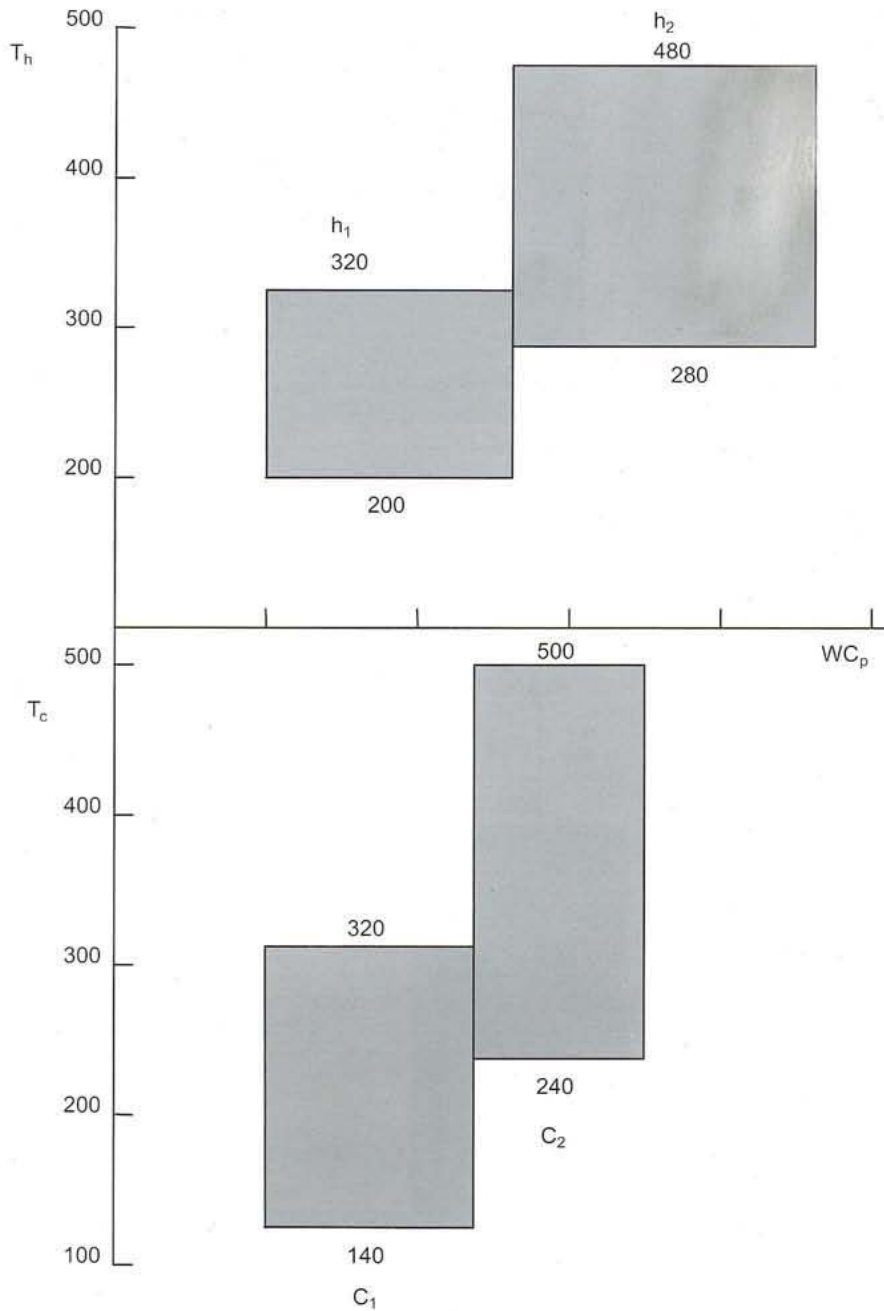


FIGURA 9.1
Diagrama de contenido de calor.

de la red llamado el punto de pliegue (o punto de pinzamiento). Para ilustrar el método, se usan los datos del problema mostrado en la Tabla 9.3, el cual consiste de dos corrientes calientes y dos corrientes frías.

Comenzamos por ajustar las temperaturas de las corrientes calientes restando a cada una de ellas el valor del ΔT mínimo especificado. Suponiendo un ΔT mínimo de 20°F , se obtienen los ajustes que se muestran en la Tabla 9.4. Nótese que las temperaturas de las corrientes frías permanecen inalteradas. Con referencia a las temperaturas ajustadas, se establece el orden decreciente que se muestra en la tabla (los valores duplicados no se toman en cuenta). A partir de las cinco temperaturas modificadas que se han obtenido, se definen cuatro inter-

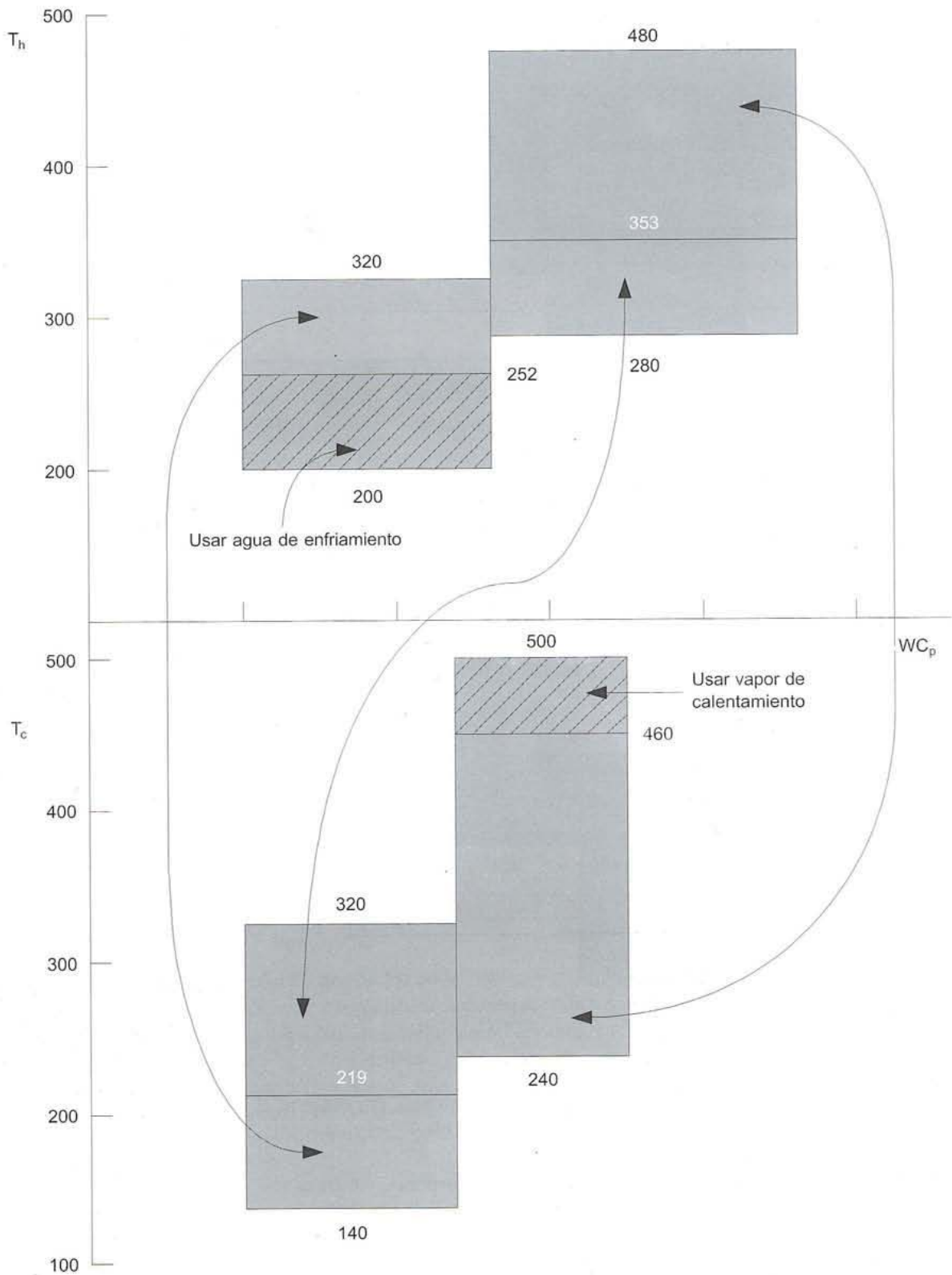


FIGURA 9.2
Asignación de intercambio de calor entre las corrientes.

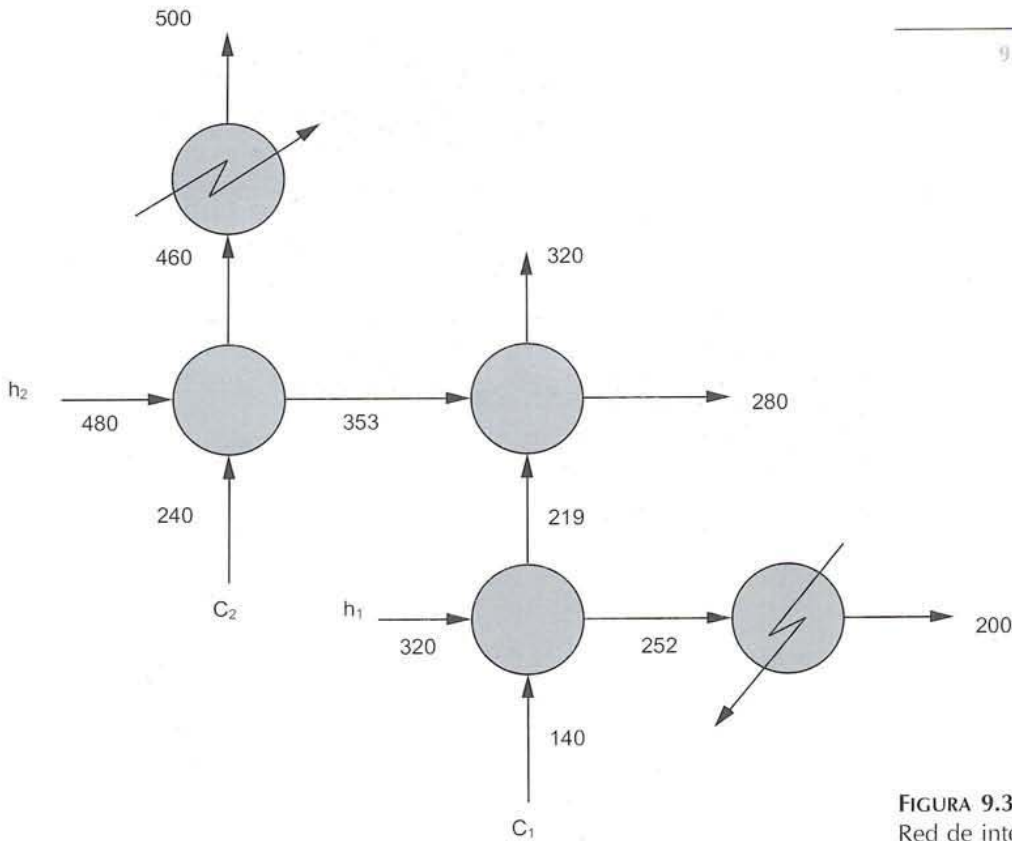


FIGURA 9.3
Red de intercambiadores de calor.

Costo de operación = 16,304 \$/año

Tabla 9.2
Análisis económico de la red de intercambiadores de calor

Intercambiador	Area, ft ²	Costo	Vapor, lb/año	Agua, lb/año	Costo de servicios, \$/año
1	315	11,042	--	--	--
2	214	8,756	--	--	--
3	29	2,619	--	--	--
Enfriador	92	5,276	--	1.467x10 ⁸	7,333
Calentador	40	3,200	5.88x10 ⁶	--	5,880
		C _E =30,913			C _S =13,213

Costo de operación = C_F + C_S/10 = 16,304 \$/año

Tabla 9.3 Datos del problema			
Corriente	T entrada, °F	T salida, °F	WC _p , Btu/hr °F
1	250	100	0.95 × 10 ⁴
2	180	100	0.84 × 10 ⁴
3	110	200	1.00 × 10 ⁴
4	110	230	0.90 × 10 ⁴

Tabla 9.4 Temperaturas modificadas			
Corriente	T original	T ajustada	Orden
1	250	230	T ₁
	100	80	T ₅
2	180	160	T ₃
	100	80	Duplicada
3	110	110	T ₄
	200	200	T ₂
4	110	110	Duplicada
	230	230	Duplicada

valos de temperatura, y para cada uno de ellos se efectúa un balance de entalpía. Para cualquier intervalo i el balance de entalpía está dado por:

$$\Delta H_i = (\sum WC_{p, cal} - \sum WC_{p, frios}) (T_i - T_{i+1})$$

Los balances para cada intervalo se muestran en la Tabla 9.5. La idea ahora es formar una cascada de calor que vaya desde T₁ hasta T₅; si suponemos inicialmente que no hay una fuente de calor externa (Q_h = Q₁ = 0), podemos evaluar la cantidad de calor que fluye desde un nivel de temperatura T_i hasta un nivel T_{i+1} mediante el siguiente balance:

$$Q_{i+1} = Q_i + \Delta H_i$$

La cascada de calor resultante se muestra en la Figura 9.4. Observamos que se obtienen valores negativos para algunos niveles (Q₂ y Q₃); esto implica que la cascada de calor viola la segunda ley de la termodinámica ya que signifi-

Tabla 9.5 Balances de entalpía	
$\Delta H_i = (\sum WC_{p, cal} - \sum WC_{p, frios}) (T_i - T_{i+1})$	
$\Delta H_1 = (230 - 200) (0.95 - 0.9)$	$= 1.5 \times 10^4$
$\Delta H_2 = (200 - 160) (0.95 - 1.0 - 0.9)$	$= -38 \times 10^4$
$\Delta H_3 = (160 - 110) (0.95 + 0.84 - 1.0 - 0.9)$	$= -5.5 \times 10^4$
$\Delta H_4 = (110 - 80) (0.95 + 0.84)$	$= 53.7 \times 10^4$

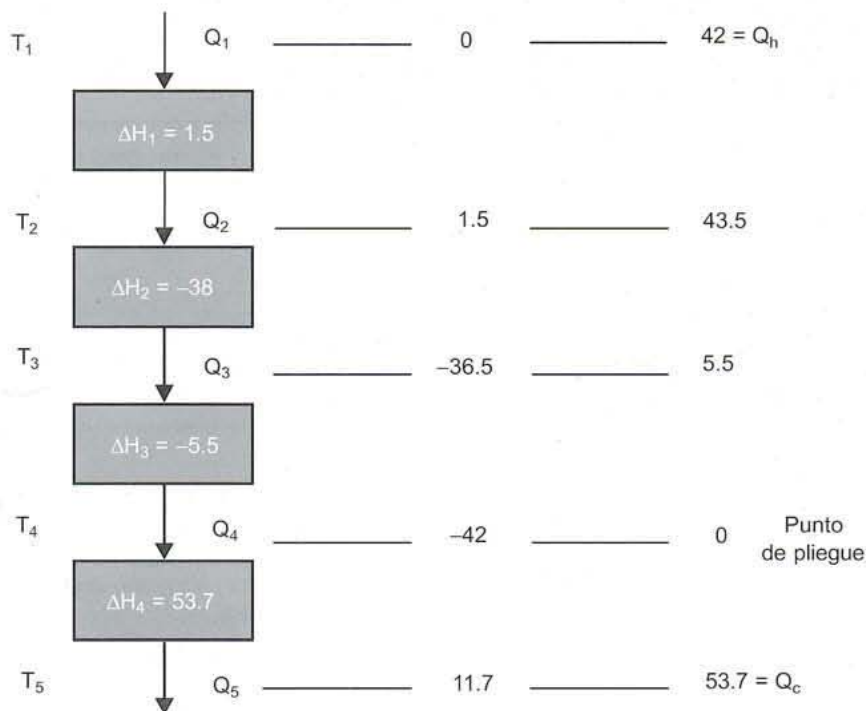


FIGURA 9.4
Cascada de calor.

caría que se estaría transfiriendo calor de una región de baja temperatura a otra de alta temperatura. Para corregir este efecto, necesitamos agregar calor de alguna fuente externa; se elige entonces el valor negativo más alto y se agrega esa cantidad como Q_h . El esquema resultante debe cumplir ahora con el flujo natural de calor, es decir Q_i debe ser mayor o igual a cero para toda i . De los balances de energía para cada intervalo, obtenemos los valores mostrados en la Figura 9.4. De este análisis se desprenden tres puntos importantes para el diseño de redes de intercambiadores de calor:

- Q_h representa la cantidad mínima de calentamiento que se necesita por parte de servicios externos.
- Q_c representa la cantidad mínima de enfriamiento.
- Notamos que el flujo de calor Q_4 es igual a cero. Esto proporciona un punto crítico para el diseño de la red que llamaremos el *punto de pliegue*.

Para el problema en cuestión,

- Cantidad mínima de calentamiento: 42×10^4 Btu/hr
- Cantidad mínima de enfriamiento: 53.7×10^4 Btu/hr
- Punto de pliegue: 110°F (temperaturas modificadas)

Por lo tanto, con respecto a las temperaturas originales, el punto de pliegue para las corrientes calientes es de 130°F , y para las corrientes frías es de 110°F .

El objetivo ahora es el de diseñar una red de intercambiadores de calor que cumpla con los requerimientos mínimos de servicios que se han estimado.

El punto de pliegue divide a la red en dos zonas, y los siguientes criterios son esenciales para obtener la red que se busca:

- a) *No transferir calor a través del punto de pliegue*
 Cualquier cantidad de calor que se transfiera debe satisfacer un balance global de energía, lo cual implica que el consumo de servicios va a exceder a los requerimientos mínimos, tanto de calentamiento como de enfriamiento, en una cantidad equivalente a la que se transfiere a través del punto de pliegue.
- b) *No usar calentamiento abajo del punto de pliegue*
 Cualquier cantidad que se use en este nivel debe rechazarse eventualmente a una fuente de enfriamiento externa, alterando así el consumo de servicios con respecto a los requerimientos mínimos.
- c) *No usar enfriamiento arriba del punto de pliegue*
 Cualquier cantidad de enfriamiento que se use arriba del punto de pliegue debe compensarse con una cantidad equivalente de calentamiento.

Para aplicar el método conviene usar la representación de rejilla que se muestra en la Figura 9.5 para indicar un intercambio de calor entre dos corrientes. El número mínimo de unidades que se requieren para cada lado de la red puede estimarse mediante:

$$U_{\min} = N_c + N_s - 1$$

donde U_{\min} es el número mínimo de intercambiadores, N_c es el número de corrientes involucradas y N_s es el número de servicios. Esta ecuación supone que en cada intercambio una de las corrientes se agota completamente, y la otra queda disponible para algún intercambio posterior.

La representación inicial para el problema numérico se da en la Figura 9.6. Se ha dividido el problema en dos regiones con respecto al punto de pliegue con el fin de preservar la transferencia de calor a través de él. De acuerdo a los criterios establecidos para el diseño de la red, la región de arriba del punto de

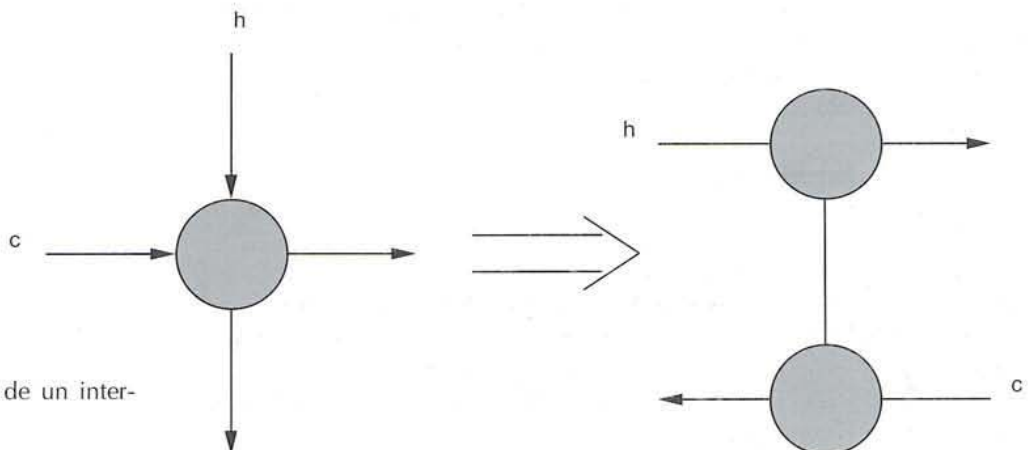


FIGURA 9.5 Representación de rejilla de un intercambiador de calor.

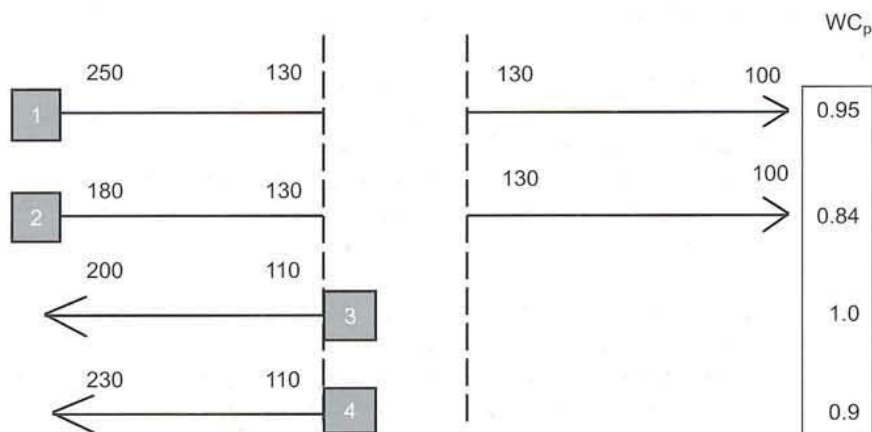


FIGURA 9.6
Corrientes del problema de diseño ubicadas con respecto al punto de pliegue.

pliegue consistirá de intercambiadores y calentadores, mientras que la de abajo incluirá intercambiadores y enfriadores. Para la zona de arriba del punto de pliegue, o zona de calentamiento, el número mínimo de unidades es cuatro (4 corrientes + 1 servicio - 1). Nótese que no se incluye el servicio de enfriamiento en esta zona. En la zona de abajo del punto de pliegue o de enfriamiento, el número mínimo de unidades es de 2. A continuación procederemos con el diseño de la red.

Por debajo del punto de pliegue

Tenemos dos corrientes calientes únicamente, por lo tanto usamos servicios de enfriamiento. La carga térmica de cada enfriador es de 28.5×10^4 y de 25.2×10^4 Btu/hr respectivamente, lo cual cumple con el consumo mínimo de enfriamiento de 53.7×10^4 Btu/hr.

Por encima del punto de pliegue

Aquí tenemos dos corrientes calientes y dos corrientes frías. El diseño de la red debe comenzar en el punto de pliegue, debido a que este es el punto más restringido de la red. En este nivel, tenemos que la ΔT mínima se cumple para uno de los extremos del intercambiador; para la región que estamos analizando, se cumple para el lado frío de un intercambiador a contracorriente. Tenemos dos posibilidades para comenzar el diseño de la red, combinar 1 con 4 y 2 con 3, o combinar 1 con 3 y 2 con 4. Para elegir el intercambio adecuado se debe cumplir el siguiente criterio:

$$WC_{p \text{ fría}} \geq WC_{p \text{ caliente}}$$

lo cual se desprende de un balance de energía para un intercambiador a contracorriente para el cual se tiene una diferencia igual a ΔT mínima en su lado frío. De otra manera, el intercambio propuesto no sería viable ya que violaría la ΔT mínima especificada en el otro extremo del intercambiador. Notar que esta regla se invierte para identificar los intercambios factibles inmediatamente por debajo del punto de pliegue.

Resulta claro entonces que los intercambios iniciales deben ser entre 1 y 3 y entre 2 y 4. Haciendo estos intercambios, se satisfacen los requerimientos energéticos de la corriente 2 y de la corriente 3. Intercambiando ahora la corriente 1 con la corriente 4 (este intercambio es ahora factible debido a que la diferencia de temperaturas del lado frío del intercambiador es mayor que ΔT_{\min}), se obtiene que la corriente 1 satisface sus requerimientos energéticos, mientras que la corriente 4 se calienta hasta 184°F (su temperatura final debe ser de 230°F). Como ya no existen corrientes calientes disponibles, ajustamos la temperatura de la corriente 4 hasta su nivel final mediante el uso de servicios de calentamiento. La cantidad de calentamiento requerida es de 42×10^4 Btu/hr, lo cual coincide con la cantidad mínima que se había estimado al hacer los balances de energía entre los intervalos de temperatura modificados. La red resultante se muestra en la Figura 9.7. El número de unidades que se requieren en la red es de 6, lo cual satisface también el número mínimo requerido.

El método del punto de pliegue no garantiza un óptimo global al problema original, es decir, la red resultante no necesariamente es la más económica. Sin embargo, dado que el costo anual de servicios es significativamente más alto que el costo amortizado del equipo, la red resultante representa por lo general una excelente alternativa desde el punto de vista económico.

En contraste al problema que acabamos de mostrar, donde dos corrientes calientes intercambiaron calor con dos corrientes frías por encima del punto de

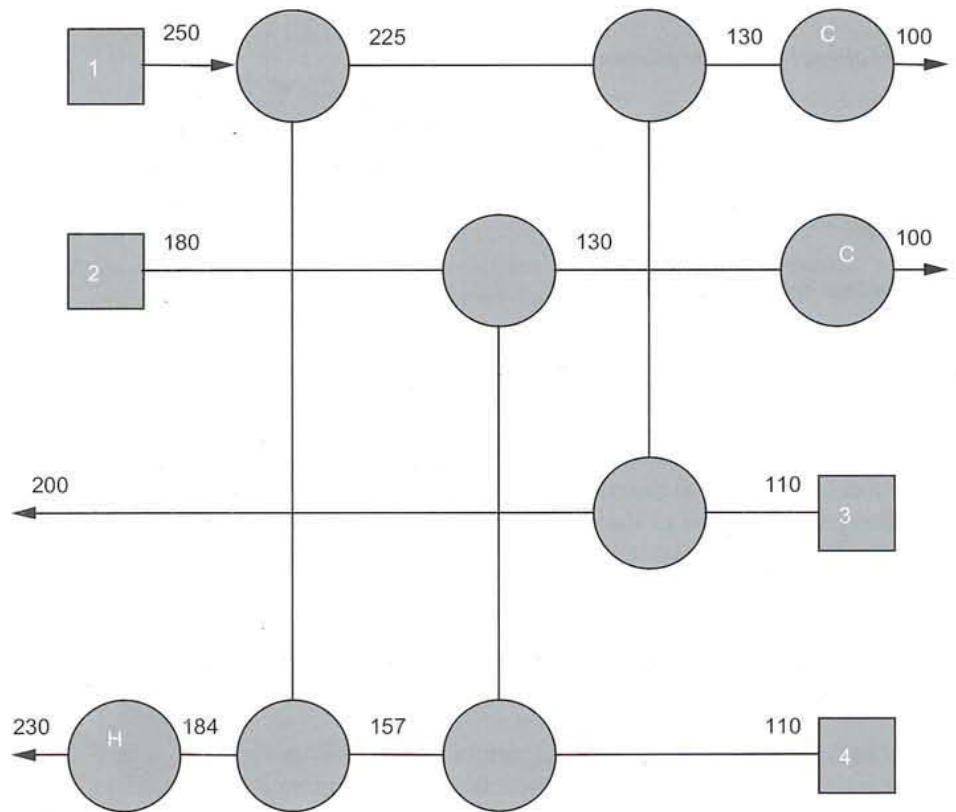


FIGURA 9.7
Corrientes del problema de diseño ubicadas con respecto al punto de pliegue.

Número de Unidades = $U_{\min} = 6$

pliegue, existen casos en los cuales los intercambios de calor entre las corrientes originales del proceso parecen no garantizar el objetivo de generar una red con el consumo mínimo de servicio. El siguiente ejemplo ilustra esta situación.

Ejemplo 9.1

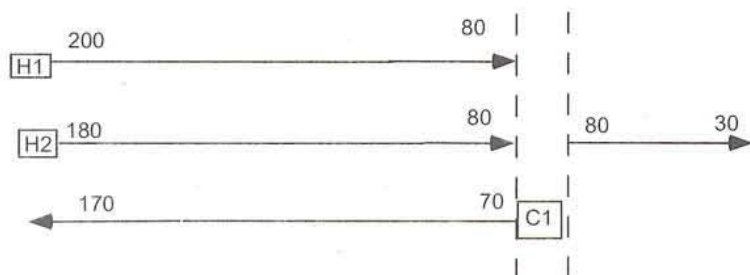
Se quieren usar dos corrientes calientes y una corriente fría para diseñar una red de intercambiadores de calor. La siguiente tabla proporciona los datos del problema.

Corriente	T ent, °C	T sal, °C	W Cp, kcal/h °C
H1	200	80	2
H2	180	30	7
C1	70	170	10

Considerando un valor de ΔT_{\min} de 10°C, use el método del punto de pliegue para integrar la máxima cantidad de calor entre las corrientes.

Solución

Desarrollando una cascada de calor al valor proporcionado de ΔT_{\min} , se obtiene que la carga mínima de calentamiento es de 60 kcal/h, la carga mínima de enfriamiento es de 350 kcal/h, y que el punto de pliegue es de 80°C para las corrientes calientes y 70°C para las corrientes frías. El siguiente diagrama proporciona la estructura de las corrientes con respecto al punto de pliegue.



El diseño de la red se descompone en las dos secciones del punto de pliegue.

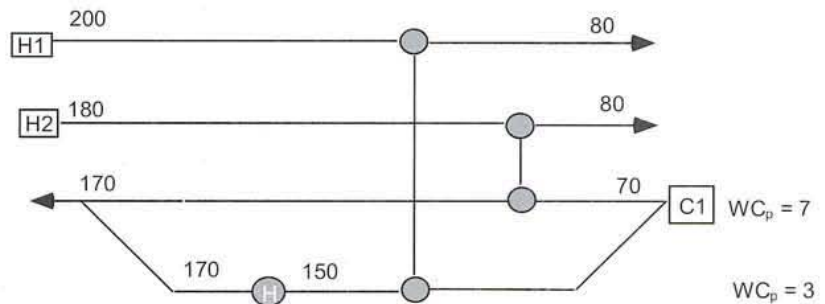
Abajo del punto de pliegue

Existe sólo una corriente caliente, por lo que la única opción es el uso de agua de enfriamiento. La carga térmica del enfriador es de 350 kcal/h, lo cual coincide con el resultado de la cascada de calor.

Arriba del punto de pliegue

Se tienen dos corrientes calientes y una corriente fría. Dada la relación de los WCps, cualquier intercambio es factible. Sin embargo, consideremos el efecto de efectuar cualquier intercambio directamente. Supongamos por ejemplo que se usa la corriente H1 para intercambiar calor con C1. Cualquier cantidad de calor que se intercambie ocasionará que la corriente C1 tenga una temperatura de salida mayor que 70°C. Bajo estas condiciones, ya no será posible llevar la otra corriente caliente H2 hasta su valor terminal de 80°C. ¡En general, cualquier cantidad de calor que se use para integrar directamente C1 con H1 es energía que se pierde para la integración de la corriente H2! Recordemos que arriba del punto de pliegue toda la energía de las corrientes calientes es integrable. Esto implica que termodinámicamente H1 y H2 son integrables en esta sección de la red de manera completa.

La solución a este conflicto consiste en implementar una división de corriente para C1. Cada rama de la división debe preservar el criterio respectivo de los WCps para que cada intercambio sea factible. Existen varias opciones válidas. Una de ellas se muestra en la siguiente figura, y consiste de una rama de C1 con WCp igual al de H2, y el resto se usa para intercambiar calor con H1. Este último intercambio ocasiona una temperatura de salida de C1 de 150°C, y es necesario un calentador para llevarla a su temperatura final de 170°C. La carga térmica del calentador es de 60 kcal/h, como se predijo con la cascada de calor.



Una consecuencia de los principios fundamentales del método es que la división de corrientes en casos como el anterior siempre existe, lo cual asegura que se pueden estipular intercambios factibles. En otras palabras y en términos generales, siempre existe alguna red factible que puede reflejar los consumos mínimos de energía predichos por la cascada de calor.

Para generalizar el efecto observado en el problema anterior, se pueden establecer los siguientes principios como estrategias necesarias para generar redes de intercambiadores de calor con un consumo mínimo de servicios.

Si inmediatamente arriba del punto de pliegue, el número de corrientes calientes es mayor que el número de corrientes frías, se requiere división de corrientes por parte de las corrientes frías.

Notar que si el número de corrientes frías es mayor que el número de corrientes calientes, no necesariamente se necesita dividir corrientes porque la

energía de las corrientes calientes es integrable en forma completa arriba del punto de pliegue.

Similarmente, puede establecerse que:

Si el número de corrientes frías es mayor que el número de corrientes calientes inmediatamente abajo del punto de pliegue, entonces se requiere división de corrientes por parte de las corrientes calientes.

REFERENCIAS

El uso de diagramas de contenido de calor se presenta en

Rudd, D.F., G.J. Powers y J.J. Sirola, *Process Synthesis*, Prentice Hall (1973).

Los primeros trabajos sobre el método del punto de pliegue fueron los siguientes:

Linnhoff, B. y J.A. Turner, "Heat Recovery Networks: New Insights Yield Big Savings", *Chemical Engineering*, 56 (Nov. 2, 1981).

Umeda, T., J. Itoh y K. Shiroko, "Heat Exchange System Synthesis", *Chemical Engineering Progress*, 74, 7, 70 (1978).

Hohmann, E.C., "Optimum Networks for Heat Exchange", Tesis Doctoral, University of Southern California, L.A. (1971).

Linnhoff, B. y Hindmarsh, "The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks", *Chemical Engineering Science*, 38, 5, 745 (1983).

PROBLEMAS

9.1 Lee, Masso y Rudd (*Ind. and Eng. Chem. Fund.*, 9, 48, 1970) usaron el método de Branch y Bound para generar redes óptimas de intercambiadores de calor.

Resuelva los problemas 5SP1 y 6SP1 mostrados abajo usando el método del diagrama de contenido de calor. Compare sus resultados con los óptimos reportados por Lee et al. de 38,278 \$/año (para el problema 5SP1) y 35,108 \$/año (para el problema 6SP1).

Problema 5SP1

Corriente	Flujo, lb/hr	T _{ent} , °F	T _{sal} , °F	C _p , Btu/lb°F
1	27,000	100	400	0.80
2	42,000	480	250	0.75
3	35,000	150	360	0.70
4	36,000	400	150	0.70
5	38,000	200	400	0.65

Problema 6SPI

Corriente	Flujo, lb/hr	T_{ent} , °F	T_{sal} , °F	C_p , Btu/lb°F
1	20,000	100	430	0.80
2	40,000	440	150	0.70
3	36,000	180	350	0.91
4	35,000	520	300	0.68
5	31,000	200	400	0.85
6	42,000	390	150	0.80

Datos de diseño

Presión de vapor	450 psia
Temperatura de agua de enfriamiento	100°F
Temperatura máxima de salida del agua de enfriamiento	180°F

Diferencias mínimas de temperatura

Intercambiadores de calor	20°F
Calentadores	25°F
Enfriadores	20°F

Coeficientes globales de transferencia de calor

Intercambiadores de calor	150 Btu/hr ft ² °F
Calentadores	200 Btu/hr ft ² °F
Enfriadores	150 Btu/hr ft ² °F

Tiempo de reparación del equipo 380 hr/año

Costo de intercambiadores	350 A ^{0.6} (A en ft ²)
Costo de agua de enfriamiento	5 × 10 ⁻⁵ \$/lb

9.2 Considere las siguientes corrientes:

Corriente	T_{ent} , °F	T_{sal} , °F	WC_p , Btu/hr°F
1	600	500	80
(condensa a 500°F; $W\lambda = 114\,000$ Btu/hr)			
2	450	590	110
3	300	400	50

$$\Delta T \text{ mínima} = 10^\circ\text{F}$$

Use el método heurístico basado en el diagrama de contenido de calor para encontrar una red de intercambiadores de calor que maximice la recuperación de energía.

9.3 Considérese la siguiente tabla de datos:

Corriente	WC_p , Btu/hr°F	T_{ent} , °F	T_{sal} , °F
C ₁	1.445 × 10 ⁴	140	320
C ₂	1.153 × 10 ⁴	240	420
C ₃	1.600 × 10 ⁴	100	430
C ₄	3.276 × 10 ⁴	180	350
h ₁	1.667 × 10 ⁴	320	200
h ₂	2.000 × 10 ⁴	480	280
h ₃	2.800 × 10 ⁴	440	150

Vapor disponible (saturado): 450 lb/in²

- Obtenga una red de intercambiadores de calor usando diagramas de contenido de calor. Compare los costos con el caso de usar sólo servicios.
- Obtenga una red usando el método del punto de pliegue.
- Comente los resultados obtenidos por ambos métodos.

9.4 Dos corrientes necesitan enfriarse y dos calentarse de acuerdo con la siguiente tabla:

Corriente	Temperatura, °F		Flujo, lb/hr	Capacidad Calorífica, Btu/lb°F
	T _{ent}	T _{sal}		
1	250	100	9,500	1.0
2	180	100	12,000	0.7
3	110	200	10,000	1.0
4	110	230	10,000	0.9

$$\Delta T_{\min} = 20^{\circ}\text{F}$$

Use el método del punto de pliegue y obtenga:

- Los requerimientos mínimos de servicios.
- El punto de pliegue para las corrientes calientes y frías.
- El número mínimo de unidades para este problema.
- La red de intercambiadores de calor que consume el mínimo requerimiento de servicios. Especifique claramente temperaturas de los intercambiadores y cargas térmicas de calentadores y enfriadores.

9.5 Considere el siguiente problema:

Corriente	T _{ent} , °C	T _{sal} , °C	WC _p , kcal/hr°C
1	90	50	6
2	50	20	9
3	20	200	12
4	20	90	10

$$\Delta T \text{ mínima} = 10^{\circ}\text{C}$$

Usando el método del punto de pliegue, obtenga:

- El punto de pliegue para cada tipo de corrientes.
- Los requerimientos mínimos de servicios.
- Una red de intercambiadores de calor que consuma la cantidad mínima de servicios.

9.6 Considere las siguientes corrientes de proceso:

Corriente	T _{ent} , °C	T _{sal} , °C	WC _p , kcal/hr°C
h ₁	100	60	4
h ₂	140	25	6
c ₁	20	180	8

Suponiendo una $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$, use el método del punto de pliegue para diseñar una red de intercambiadores de calor. Reporte los siguientes puntos:

- Los requerimientos mínimos de servicios.
- El punto de pliegue para corrientes calientes y frías.
- El número mínimo de unidades para la red.
- La red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios.

9.7 Considere los siguientes datos:

Corriente	$T_{\text{ent}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{sal}}, ^{\circ}\text{C}$	$WC_P, \text{kcal/hr}^{\circ}\text{C}$
h_1	170	100	5
h_2	80	20	10
c_1	30	220	6
c_2	20	70	3

Suponiendo un valor de $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$, use el método del punto de pliegue y reporte lo siguiente:

- El consumo mínimo de servicios.
- El punto de pliegue para las corrientes calientes y para las corrientes frías.
- El diseño de una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios.

9.8 Considere las siguientes corrientes

Corriente	$WC_P \times 10^{-4}, \text{Btu/hr } ^{\circ}\text{F}$	$T_{\text{ent}}, ^{\circ}\text{F}$	$T_{\text{sal}}, ^{\circ}\text{F}$
h_1	10	150	70
h_2	4	220	150
c_1	5	80	270
c_2	3	50	120

Tomando ΔT_{\min} igual a 20°F , identifique el punto de pliegue y los requerimientos mínimos de servicios. Diseñe una red de intercambiadores que cumpla con esos requerimientos mínimos.

9.9 Se tienen dos corrientes calientes y dos corrientes frías que necesitan procesamiento, de acuerdo a la información proporcionada en la siguiente tabla.

Corriente	$T_{\text{ent}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{sal}}, ^{\circ}\text{C}$	$WC_P, \text{kcal/h}^{\circ}\text{C}$
h_1	175	50	10
h_2	120	65	40
c_1	20	165	20
c_2	40	120	15

Usando un valor de ΔT_{\min} de 10°C :

- Estime los requerimientos mínimos de servicios.
- Reporte el punto de pliegue para cada tipo de corriente.
- Diseñe una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios.

9.10 Para las corrientes que se especifican en seguida, se ha detectado que para un valor de ΔT_{\min} de 10°F , el punto de pliegue para las corrientes calientes es de 140°F .

Corriente	T ent, °F	T sal, °F	$WC_p \times 10^{-3}$, Btu/hr°F
1	250	120	2
2	200	100	8
3	130	190	12

- Diseñe una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios. Indique cuáles son esas cantidades mínimas de calentamiento y de enfriamiento.
- Justifique por qué la red diseñada consume la mínima cantidad de servicios.

9.11 Considere los siguientes datos para tres corrientes que desean usarse para integrar energía entre ellas.

Corriente	T entrada, °F	T salida, °F	WC_p Btu/hr °F
1	200	100	de 200 a 150 °F: 1×10^4 de 150 a 100 °F: 2×10^4
2	180	100	0.5×10^4
3	50	150	4.0×10^4

- Identifique el punto de pliegue suponiendo una ΔT_{\min} de 10°F . Reporte el valor para cada tipo de corriente.
- Indique cuál es la cantidad mínima de servicios que requiere cualquier red de intercambiadores de calor.
- Diseñe una red de intercambiadores, que consuma la mínima cantidad de servicios.

9.12 Considere las siguientes corrientes de proceso:

Corriente	T ent, °F	T sal, °F	WC_p , 10^4 Btu/hr °F
1	250	100	1.0
2	200	100	0.9
3	110	180	0.8
4	80	200	0.7
5	80	160	0.6

- Suponiendo una ΔT_{\min} de 20°F encuentre los requerimientos mínimos de servicios para una red de intercambiadores de calor, así como el punto de pliegue para las corrientes calientes y para las corrientes frías.
- ¿Cuál es el número mínimo de unidades para la red?
- Diseñe una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios y, de ser posible, que utilice el mínimo número de unidades.

9.13 Se tienen las siguientes corrientes en un proceso, las cuales requieren de cambios energéticos de acuerdo a la información proporcionada en la tabla.

Corriente	$T_{\text{ent}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{sal}}, ^\circ\text{C}$	$WC_p, \text{kcal/hr } ^\circ\text{C}$
h_1	130	40	8
h_2	120	30	4
h_3	130	50	6
c_1	30	120	10
c_2	30	200	7

Si se usa una ΔT_{\min} de 10°C, utilice el método del punto de pliegue para diseñar una red de intercambiadores de calor. Reporte lo siguiente:

- Los requerimientos mínimos de servicios y el punto de pliegue para las corrientes calientes y para las corrientes frías.
- Una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios. Use la representación de rejilla para presentar su red y reporte claramente las temperaturas de cada intercambiador y las cargas térmicas de calentadores y enfriadores.

9.14 Considere tres corrientes que quieren usarse para diseñar una red de intercambiadores de calor.

Corriente	Flujo, lb/h	$T_{\text{ent}}, ^\circ\text{F}$	$T_{\text{sal}}, ^\circ\text{F}$	$C_p, \text{Btu/lb } ^\circ\text{F}$
h_1	1,200	250	200	0.3
		cambia de fase a 200°F, con un calor latente de 1,000 Btu/lb		
		200	150	1.0
c_1	10,000	130	220	0.9
c_2	20,000	130	220	0.8

Usando una ΔT_{\min} de 20°F, se ha encontrado que el punto de pliegue es de 180°F para las corrientes frías.

- Diseñe una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios.
- Justifique el hecho de que la red obtenida consume exactamente la mínima cantidad de servicios.

9.15 Considere tres corrientes que quieren usarse para diseñar una red de intercambiadores de calor.

Corriente	Flujo, lb/hr	T _{ent} , °F	T _{sal} , °F	C _p Btu/lb °F
h ₁	1,200	250	220	0.3
c ₁	1,000	220	170	1.0
		150	200	0.9
c ₂	5,000	200	240	0.3
		150	240	0.8

cambia de fase a 220°F, con un calor latente de 1,000 Btu/lb

cambia de fase a 200°C, con un calor latente de 900 Btu/lb

Usando una ΔT_{\min} de 20°F, se ha encontrado que el punto de pliegue es de 200°F para las corrientes frías.

- Diseñe una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios.
- Justifique por qué la red obtenida consume exactamente la mínima cantidad de servicios.

9.16 Se tienen cinco corrientes de proceso entre las cuales se desea diseñar una red de intercambiadores de calor. Las especificaciones de las corrientes son las siguientes:

Corriente	T _{ent} , °C	T _{sal} , °C	WC _p , kcal/hr °C
h ₁	90	20	8
h ₂	70	20	10
c ₁	10	60	5
c ₂	10	80	8
c ₃	10	100	4

Suponiendo una ΔT_{\min} de 10°C, aplique el método del punto de pliegue y reporte:

- Los requerimientos mínimos de servicios.
- El punto de pliegue para las corrientes calientes y frías.
- El número mínimo de unidades que se requieren.
- Una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios, usando el menor número de equipos posible.
- ¿Es compatible el número de equipos que se predijo en (c) con el que se usó en (d)? Explique la concordancia o la discrepancia entre ambos resultados.

9.17 Las siguientes corrientes son parte de un proceso petroquímico.

Corriente	T _{ent} , °C	T _{sal} , °C	WC _p , kW/°C
h ₁	750	350	45
h ₂	550	250	40
c ₁	300	900	43
c ₂	200	550	20

Se desea diseñar una red de intercambiadores de calor usando una ΔT_{\min} de 10°C . Use el método del punto de pliegue para diseñar una red con el mínimo consumo de servicios.

- 9.18** Dadas las cuatro corrientes que se muestran en la tabla, diseñe una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios y que use el número mínimo de unidades. Si por aspectos operacionales se prohíbe el intercambio entre las corrientes h_1 y c_1 , revise la solución que ha encontrado y de ser posible proponga una red alterna. ¿Se conserva el consumo mínimo de servicios cuando se incorpora esta restricción?

Corriente	T ent, $^{\circ}\text{C}$	T sal, $^{\circ}\text{C}$	WCp, kW/ $^{\circ}\text{C}$
h_1	250	50	2.0
h_2	210	50	3.0
c_1	70	250	2.5
c_2	40	175	2.3

- 9.19** Suponiendo un valor de ΔT_{\min} de 10°C , diseñe una red de intercambiadores de calor con mínimos requerimientos energéticos para las siguientes corrientes.

Corriente	T ent, $^{\circ}\text{C}$	T sal, $^{\circ}\text{C}$	WCp, kW/ $^{\circ}\text{C}$
h_1	150	40	7
h_2	190	60	5
c_1	40	120	10

- 9.20** Se desea utilizar las corrientes que se muestran en la tabla para diseñar una red de intercambiadores de calor.

Corriente	T ent, $^{\circ}\text{C}$	T sal, $^{\circ}\text{C}$	WCp, kW/ $^{\circ}\text{C}$
h_1	400	150	5
h_2	300	50	10
h_3	200	50	15
h_4	150	50	20
c_1	250	300	100
c_2	100	150	12

Usando una ΔT_{\min} de 10°C , diseñe una red que consuma la mínima cantidad de servicios.

- 9.21** Dos corrientes calientes se desean integrar energéticamente con dos corrientes frías, de acuerdo a los siguientes datos.

Corriente	T ent, $^{\circ}\text{C}$	T sal, $^{\circ}\text{C}$	WCp, kW/ $^{\circ}\text{C}$
h_1	400	100	1
h_2	300	150	2
c_1	50	350	0.7
c_2	70	280	3

Usando un valor de ΔT_{\min} de 15°C , diseñe una red de intercambiadores de calor que consuma la mínima cantidad de servicios.

- 9.22 El siguiente problema de cuatro corrientes fue propuesto por Trivedi, O'Neill, Roach y Wood (*Computers Chem. Engng.*, 14, 6, 601-611, 1990).

Corriente	T ent, $^{\circ}\text{C}$	T sal, $^{\circ}\text{C}$	WCp, kW/ $^{\circ}\text{K}$
H ₁	250	70	3.5
H ₂	170	70	6
C ₁	60	160	5
C ₂	110	260	4

Usando un valor de ΔT_{\min} de 10°C , diseñe una red de intercambiadores de calor con el mínimo consumo de energía.

- 9.23 El siguiente problema muestra características interesantes, y fue tomado del trabajo de Nishimura (*J. Optimization Theory Applic.*, 30, 423, 1980).

Corriente	T ent, $^{\circ}\text{K}$	T sal, $^{\circ}\text{K}$	WCp, kW/ $^{\circ}\text{K}$
H ₁	443	293	0.5
H ₂	416	393	2.0
H ₃	438	408	0.5
H ₄	448	423	1.0
C ₁	273	434	1.0
Vapor	500	500	
Agua	277	280	

Diseñe una red de intercambiadores con mínimo consumo de energía. Suponga un valor de ΔT_{\min} de 10°K .

- 9.24 Cuatro corrientes quieren aprovecharse para integrar energía. La siguiente tabla proporciona los datos del problema (Ciric y Floudas, *Computers Chem. Engng.*, 14, 3, 241-250, 1990).

Corriente	T ent, $^{\circ}\text{K}$	T sal, $^{\circ}\text{K}$	WCp, kW/ $^{\circ}\text{K}$
H ₁	95	75	5
H ₂	80	75	50
C ₁	30	90	10
C ₂	60	70	12.5

Suponga una ΔT_{\min} de 30°K y diseñe una red de intercambiadores de calor con el mínimo consumo de servicios.