

AGUSTÍN BENÍTEZ HERNÁNDEZ
YAMILÉ MARTÍNEZ OCHOA
FÉLIX JUAN DOMÍNGUEZ ALONSO

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
UNIVERSIDAD DE MATANZAS "CAMILO CIENFUEGOS"

Tecnología *Pinch*:
Una Introducción a la Integración
Energética

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido.....	1
Introducción	2
Desarrollo de la Tecnología <i>Pinch</i>	3
Desintegración energética del proceso.....	3
Identificación de las corrientes.....	4
Extracción de los datos de las corrientes.....	4
Selección del $\Delta T_{\text{mínimo}}$ inicial	6
Construcción del diagrama de intervalos de temperaturas.....	7
Construcción del diagrama de cascada.....	8
Construcción de las curvas compuestas	9
Determinación del número óptimo de intercambiadores de calor.....	13
Propuesta de intercambio encima y debajo del <i>pinch</i>	14
Diseño preliminar de la red de intercambiadores.....	15
Diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente.....	18
Análisis económico	20
Optimización del $\Delta T_{\text{mínimo}}$	23
Bibliografía	26

INTRODUCCIÓN

Dos problemas se presentan en la industria moderna con mas fuerza que nunca: el costo de los combustibles y el deterioro ambiental. El constante incremento en los precios de los combustibles y la aparición de nuevas leyes ambientales convierte a algunos procesos industriales en ineficientes. En muchos casos la solución es eliminar estas tecnologías y diseñar nuevas plantas mas eficientes. Sin embargo, es posible que con solo un *revamp* o un *retrofit* se pueda mejorar la integración energética y hacer nuevamente eficiente el proceso.

En la presente monografía se desarrolla, a través del estudio de un caso, la **tecnología pinch** para la integración energética en industrias y plantas químicas.

Caso de estudio

El costo anual (solo por concepto de calentamiento/enfriamiento) del proceso industrial que se muestra en la figura 1.1 asciende a 2,1 millones de pesos. Minimice estos costos energéticos haciendo solo reajustes en las corrientes, pero sin alterar el flujo de producción, ni las operaciones y procesos fundamentales (reactores y flash).

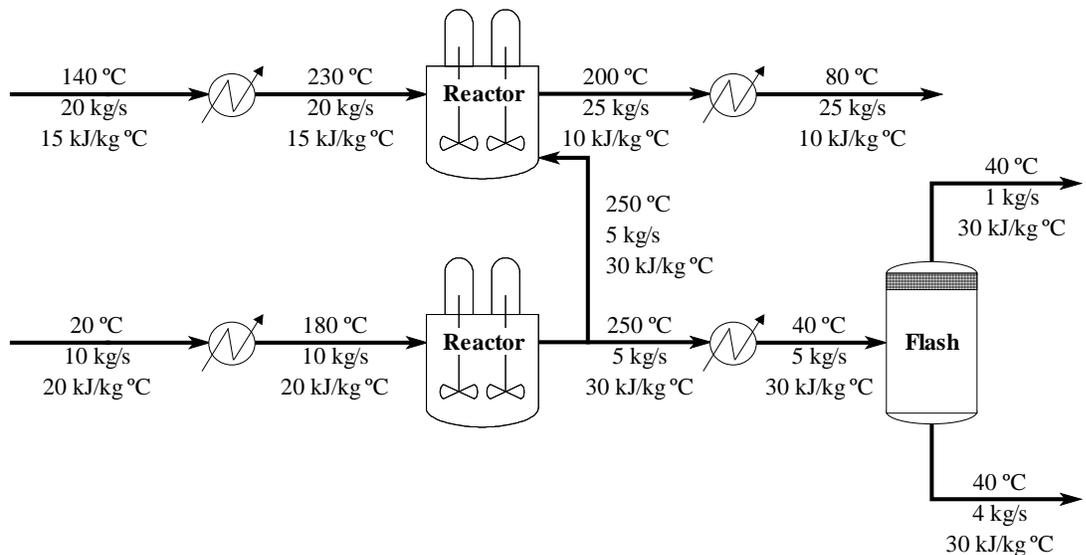


Figura 1.1 Diagrama de flujo del ejemplo propuesto

Todos los datos de las corrientes se muestran en el propio diagrama. Considere que el proceso es económicamente rentable solo si el costo anual es inferior a un millón de pesos.

DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA *PINCH*

La **tecnología *pinch*** para la integración energética consiste, en primer término, en proponer una red de transferencia de calor óptima entre las diferentes corrientes del proceso. El objetivo de esta red es aprovechar al máximo todas las posibilidades de calentamiento y enfriamiento entre las propias corrientes, disminuyendo así la necesidad de utilizar fuentes externas.

Para proponer la red de intercambiadores integrada, la tecnología *pinch* se divide en doce etapas con tareas de trabajo específicas que se pueden agrupar como:

- Definición del problema (etapas preliminar, uno, dos y tres),
- Determinación del punto de pinch (etapas cuatro, cinco y seis),
- Diseño de la red de intercambiadores (etapas siete, ocho, nueve y diez) y
- Optimización de la red diseñada (etapas once y doce).

Etapla preliminar

Desintegración energética del proceso

La desintegración energética consiste en eliminar todos los intercambiadores de calor del diagrama de flujo del proceso y en su lugar indicar el calentamiento o enfriamiento de las corrientes mediante su temperatura inicial y final (figura 2.1).

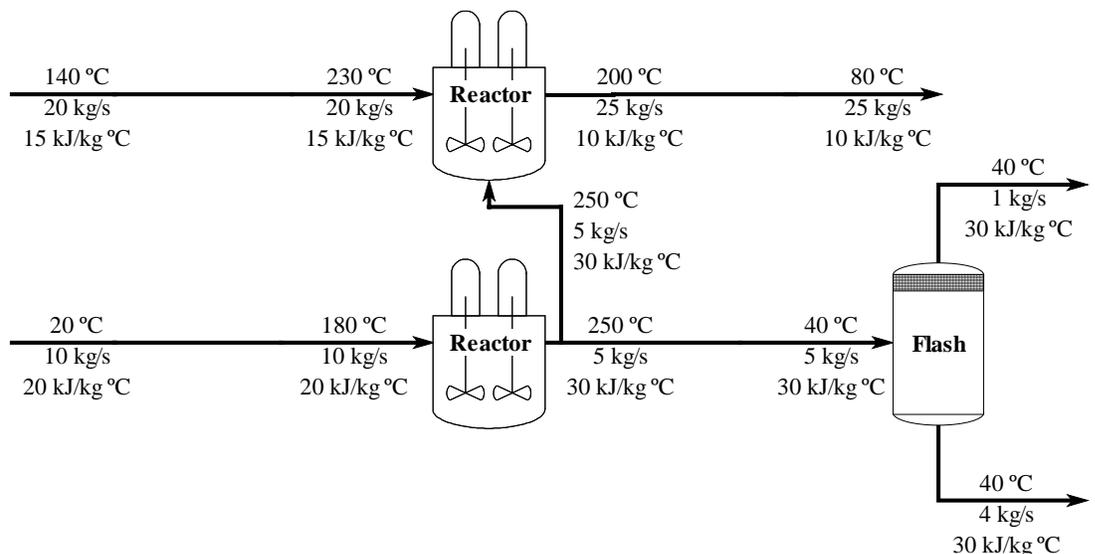


Figura 2.1 Diagrama de flujo desintegrado energéticamente para el ejemplo propuesto

Este paso solo se realiza en plantas que existan físicamente, donde estén presentes intercambiadores de calor que integren energéticamente el proceso. Durante la síntesis y diseño de plantas químicas no es necesaria esta etapa ya que todavía no existe ninguna integración previa de corrientes.

Etapa 1

Identificación de las corrientes

En integración energética se define como **corriente** aquella que, conservando su masa y composición, cambia su valor energético (temperatura o estado de agregación) desde la salida de una operación hasta la entrada de otra.

Si una corriente másica no pasa a través de un equipo de transferencia de calor (intercambiador, condensador, evaporador, enchaquetado, serpentín, turbina, caldera u otro similar) donde cambie su valor energético, no puede considerarse una corriente energética.

Las corrientes energéticas se clasifican en:

- **Corrientes frías:** Las que aumentan su energía (la temperatura de salida es mayor que la temperatura de entrada o existe evaporación).
- **Corrientes calientes:** Las que disminuyen su energía (la temperatura de salida es menor que la temperatura de entrada o existe condensación).
- **Utilidades:** Son todos los fluidos adicionales que se utilizan como medio de enfriamiento (**utilidades frías**) o de calentamiento (**utilidades calientes**). Ejemplo vapor de agua, gases de combustión, agua fría, salmuera, amoníaco, etc.

En la tabla 2.1 se muestran las cuatro corrientes que conforman el ejemplo

Tabla 2.1 Identificación de las corrientes del ejemplo

Corriente	Temperatura Entrada	Temperatura Salida	Tipo de Corriente
1	20 °C	180 °C	Fría
2	250 °C	40 °C	Caliente
3	140 °C	230 °C	Fría
4	200 °C	80 °C	Caliente

Etapa 2

Extracción de los datos de las corrientes

En integración energética, el dato más importante de una corriente es su valor energético (entalpía, calor específico, calor latente, etc.). Estos se pueden obtener de la literatura especializada, por ejemplo:

- Tablas de calores específicos y calores latentes de sustancias en general: PERRY, RH. y GREEN, D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 6ta. Ed. New York : Mc Graw-Hill, 1984. Sección 3, páginas: 3-119 a 3-146.¹

¹ En la edición 7 (disponible en formato electrónico), las propiedades físicas se trasladaron a la sección 2. PERRY, RH.; GREEN, D. y MALONEY, JO. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7ma. Ed. New York : Mc Graw-Hill, 1997. Sección 2, páginas: 2-151 a 2-204 y páginas: 2-347 y 2-351.

- Estimación de calores específicos de mezclas de compuestos en general:
PERRY, RH. y GREEN, D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 6ta. Ed. New York : Mc Graw-Hill, 1984. Sección 3, páginas: 3-275 y 3-278.¹
- Tablas de entalpía del agua líquida y del vapor de agua:
KEENAN, JH. et al. *Steam Tables*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- Entalpía de hidrocarburos:
GPSA, *Engineering Data Book*. 11 Ed. Tulsa, Oklahoma : Gas Processors Suppliers Association, 1998. Sección 24.

Otros datos imprescindibles para realizar la integración energética son el caudal y la temperatura de entrada y de salida de cada corriente. También pueden ser necesarias las composiciones de las corrientes para estimar los calores específicos de las mezclas. Todos los datos anteriores pueden ser estimados mediante los balances de masa y energía correspondientes.

El valor energético (calor) de cada corriente se determina como:

$$Q = m \cdot Cp \cdot (T_{ent} - T_{sal})$$

si se trata de calor sensible, o como:

$$Q = m \cdot \lambda$$

si se trata de calor latente. En las corrientes frías $Q < 0$ significa que se le debe suministrar esa energía para lograr la temperatura de salida (calor absorbido). Por el contrario en las corrientes calientes $Q > 0$ significa que debe eliminarse ese calor para alcanzar la temperatura de salida (calor cedido).

El calor neto del sistema es la suma del calor de todas las corrientes:

$$Q_{neto} = \sum_{i=1}^{Corr} Q_i$$

y representa la cantidad de energía adicional que debe suministrarse o eliminarse del sistema mediante utilidades para lograr un balance energético. Si $Q_{neto} < 0$ significa que al sistema se le debe suministrar esa energía mediante utilidades calientes; por el contrario si $Q_{neto} > 0$ significa que ese calor debe ser eliminado mediante utilidades frías.

Es recomendable, al extraer los datos de las corrientes, resumirlos en una tabla, como la 2.2. En el ejemplo no es necesario calcular el calor específico ni el caudal de las corrientes ya que se brindan como datos en el diagrama de flujos.

Tabla 2.2 Datos de las corrientes del ejemplo

Cor r	Tipo	Caudal <i>m</i> (kg/s)	<i>C_p</i> (kJ/kg °C)	<i>m</i> · <i>C_p</i> (MW/°C)	<i>T_{ent}</i> (°C)	<i>T_{sal}</i> (°C)	Calor <i>Q</i> (MW)
1	Fría	10	20	0,20	20	180	-32,0
2	Calient	5	30	0,15	250	40	31,5
	e						
3	Fría	20	15	0,30	140	230	-27,0
4	Calient	25	10	0,25	200	80	30,0

Note que en el ejemplo se deben extraer 2,5 MW ($Q_{neto} > 0$), para lograr el balance energético.

La extracción de los datos también se puede hacer mediante la simulación digital del proceso. Para ello se requiere un simulador que garantice una estimación termodinámica confiable, por ejemplo *HYSYS*, *Apen Plus*, *ChemCAD* u otro similar. **La simulación es la vía más simple y confiable para obtener el valor energético, el caudal y las temperaturas de cada corriente.**

Etapa 3

Selección del $\Delta T_{\text{mínimo}}$ inicial

El $\Delta T_{\text{mínimo}}$ o **temperatura de aproximación mínima** representa la menor diferencia de temperaturas que puede existir entre una corriente fría y una caliente a lo largo de un intercambiador de calor, para que la transferencia sea efectiva (figura 2.2).

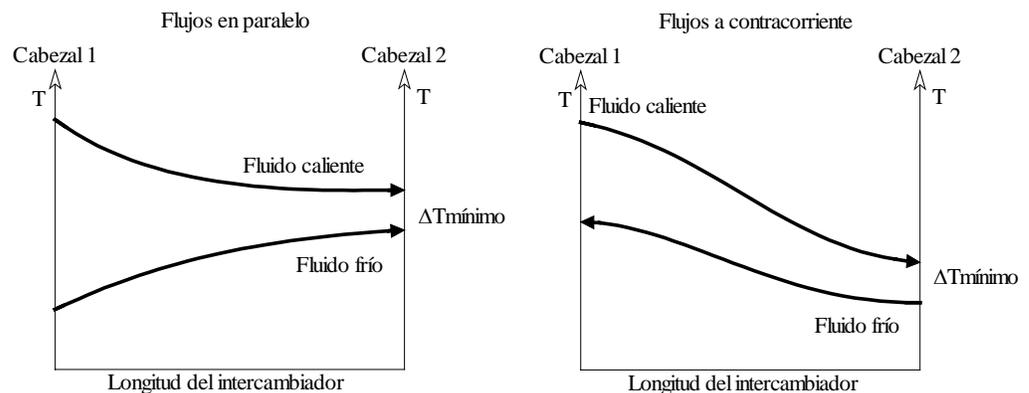


Figura 2.2 Perfil de temperatura a lo largo de intercambiadores de calor

En otras palabras, en un intercambiador de calor con flujos en paralelo la diferencia de temperaturas entre las salidas de los fluidos caliente y frío debe ser igual o superior al $\Delta T_{\text{mínimo}}$ seleccionado y en un intercambiador de flujos a contracorriente tanto la diferencia de temperaturas entre la entrada del fluido caliente y la salida del fluido frío como entre la salida del fluido caliente y la entrada del fluido frío deben ser iguales o superiores al $\Delta T_{\text{mínimo}}$ seleccionado.

Mientras menor es el $\Delta T_{\text{mínimo}}$ que se seleccione, mayor será el área de transferencia necesaria en los intercambiadores (aumentando los costos de instalación y mantenimiento) pero menores serán los requerimientos de utilidades (disminuyendo los costos de operación). **La selección del $\Delta T_{\text{mínimo}}$ más adecuado constituye un problema de optimización.** Generalmente la integración energética se realiza para diferentes valores de $\Delta T_{\text{mínimo}}$, se calculan

los costos de cada variante y se buscan las condiciones que minimicen el costo total (ver etapa 12).

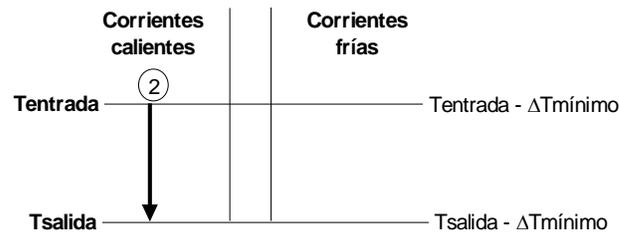
El $\Delta T_{\text{mínimo}}$ inicial se fija, por lo común, en 10 °C. Esto no significa que valores inferiores o superiores permitan redes de intercambiadores eficientes, de ahí la necesidad de optimizar este parámetro.

Etapla 4

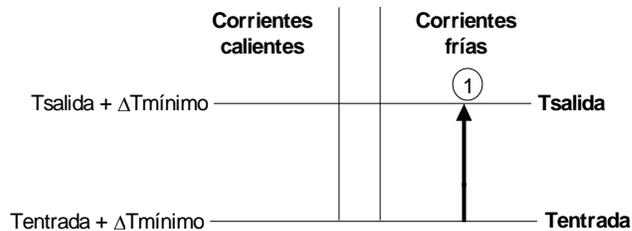
Construcción del diagrama de intervalos de temperaturas

El diagrama de **intervalos de temperaturas** es un gráfico–tabla donde se indican todos los niveles de temperatura del proceso. Cada corriente se representan con una flecha vertical que parte desde la temperatura de entrada hasta la temperatura de salida. Las saetas de las corrientes calientes se dibujan de arriba hacia abajo y las de las frías se dibujan de abajo hacia arriba.

El diagrama se separa con una franja central, colocándose las corrientes calientes a la izquierda y las frías a la derecha. Cada línea de temperatura tiene una diferencia de $\Delta T_{\text{mínimo}}$ entre el lado caliente y el frío. Es decir, las corrientes calientes se representan:



y las corrientes frías:



Los intervalos de temperatura se identifican con una letra consecutiva que se escribe en la franja central que separa el lado caliente del frío. El diagrama se completa con el balance energético para cada intervalo de temperaturas. El calor de cada intervalo se calcula como la diferencia de calor entre las corrientes calientes y frías en el intervalo:

$$Q_{\text{intervalo}} = \left[(T_{\text{Cal}_{\text{max}}} - T_{\text{Cal}_{\text{min}}}) \sum_{i=1}^{\text{CorrCal}} (m_i \cdot Cp_i) \right] - \left[(T_{\text{Fría}_{\text{max}}} - T_{\text{Fría}_{\text{min}}}) \sum_{i=1}^{\text{CorrFría}} (m_i \cdot Cp_i) \right]$$

donde $T_{Cal_{max}}$ y $T_{Cal_{min}}$ son las temperaturas máxima y mínima del intervalo para el lado caliente y $T_{Fría_{max}}$ y $T_{Fría_{min}}$ son las mismas temperaturas para el lado frío del intervalo.

El diagrama de intervalos de temperaturas obtenido para el ejemplo se muestra en la figura 2.3.

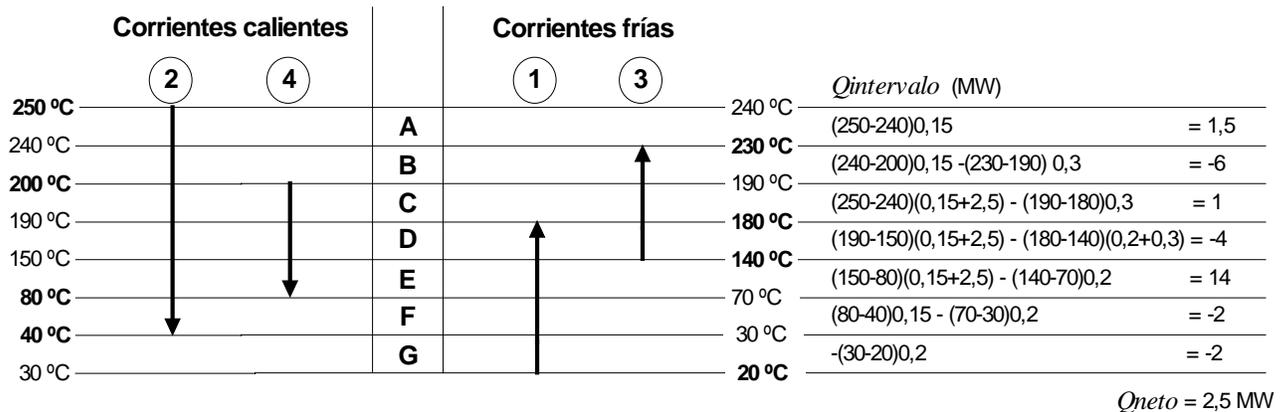


Figura 2.3 Diagrama de intervalos de temperaturas correspondientes al ejemplo propuesto

El calor neto del sistema es igual a la suma del calor de todos los intervalos:

$$Q_{neto} = \sum_{i=1}^{Intervalos} Q_{intervalo_i}$$

En el ejemplo $Q_{neto} = 2,5 \text{ MW}$, cómo se determinó previamente durante la extracción de los datos de las corrientes, con lo que se comprueban los cálculos del balance en los intervalos.

Etapas

Construcción del diagrama de cascada

A partir del **diagrama de cascada** es posible determinar la cantidad óptima de energía que se debe suministrar y/o extraer del procesos mediante utilidades. Este diagrama también posibilita conocer la temperatura a la que se produce el *pinch* o pliegue energético.

Existen dos formas de construir el diagrama. En cualesquiera de ellas se colocan todos los intervalos de temperatura en rectángulos individuales. Dentro de cada rectángulo se escribe la letra que identifica al intervalo y el valor energético del mismo ($Q_{intervalo}$).

Una forma de diseñar el diagrama de cascada es colocar a la izquierda de los intervalos una fuente de energía (utilidades calientes) y a la derecha un sumidero de energía (utilidades frías). En cada rectángulo se balancea la energía que entra con la que existe para determinar la energía de salida de dicho intervalo. La

energía que sale de cada rectángulo debe ser mayor o igual que cero. Cada vez que se requiera energía adicional para completar el balance de la etapa, se extrae de la utilidad caliente. Al final toda la energía remanente del proceso se pasa a la utilidad fría. La otra forma de diseñar el diagrama es pasar toda la utilidad caliente al intervalo inicial y luego proceder de manera similar a la anterior.

En la figura 2.4 se muestran ambas formas aplicadas a la solución del ejemplo, aunque en la práctica solo se debe utilizar una de ellas (figura 2.4).

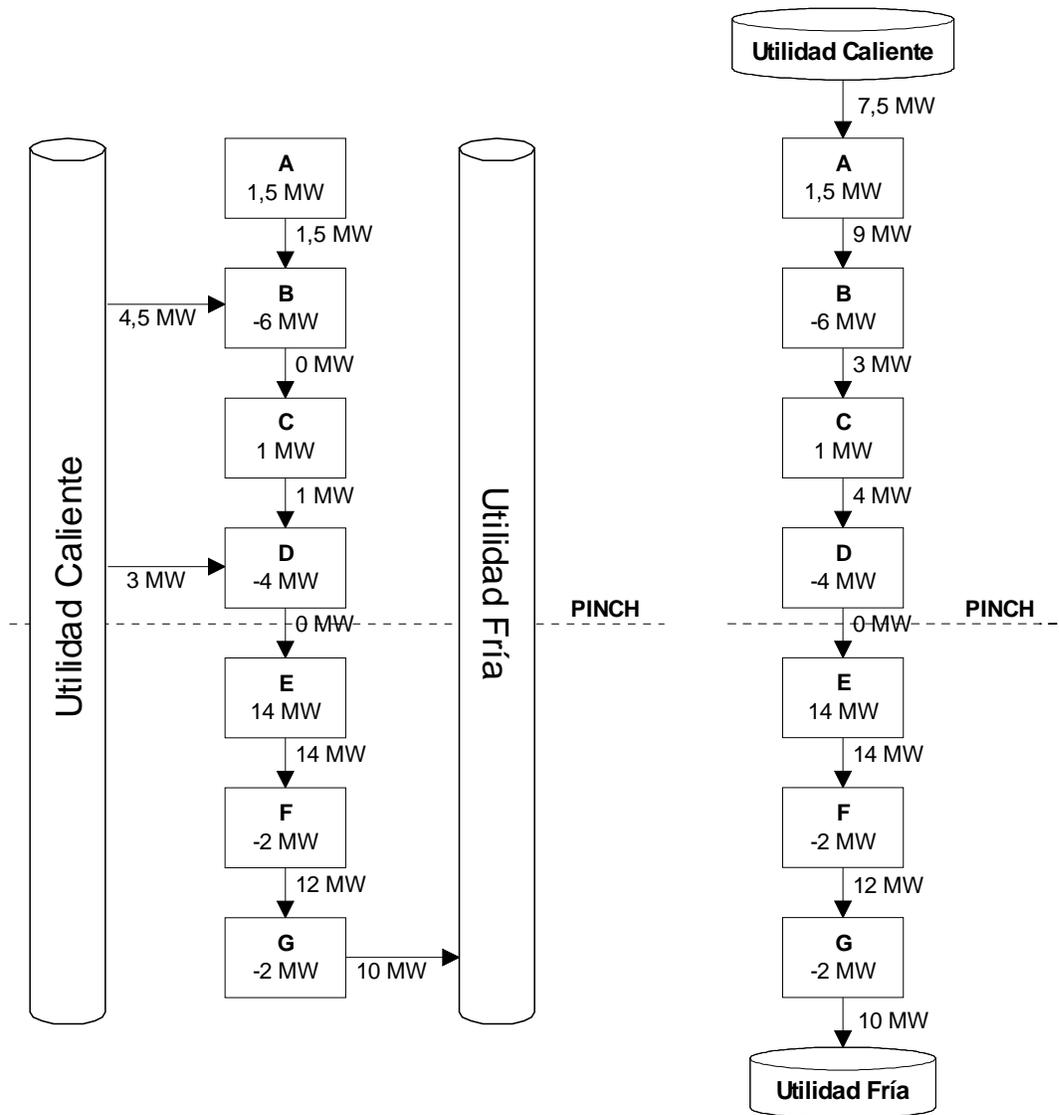


Figura 2.4 Diagramas de cascada correspondientes al ejemplo propuesto

El calor neto del sistema es la diferencia de calor entre las utilidades frías y calientes:

$$Q_{neto} = \sum Q_{utilidades_frías} - \sum Q_{utilidades_calientes}$$

Para el ejemplo $Q_{neto} = 10 - 7,5 = 2,5$ MW cómo se ha determinado previamente, con lo que quedan comprobados los cálculos del balance del diagrama de cascada.

En la figura 2.4 se ha indicado también, mediante una línea discontinua, el punto de *pinch*. Se llama ***pinch*** o pliegue energético al punto donde la diferencia de

Como el intervalo adicional al último no tiene corrientes ni temperatura inferior, la primera entalpía es siempre cero. El calor o entalpía acumulada se calcula como la suma de todas las entalpías desde el primer intervalo (el adicional) hasta el intervalo actual.

En el ejemplo, las temperaturas y entalpías para las corrientes calientes se muestran en la tabla 2.3 y para las corrientes frías en la tabla 2.4.

Tabla 2.3 Tabla de temperaturas y entalpías para las **corrientes calientes** del ejemplo

Intervalo de temperaturas	Temperatura superior del intervalo (°C)	Entalpía del intervalo de temperaturas (MW)	Entalpía acumulada (MW)
-	30	0	0
G	40	(40-30)(0) = 0	0
F	80	(80-40)(0,15) = 6	6
E	150	(150-80)(0,15+0,25) = 28	34
D	190	(190-150)(0,15+0,25) = 16	50
C	200	(200-190)(0,15+0,25) = 4	54
B	240	(240-200)(0,15) = 6	60
A	250	(250-240)(0,15) = 1,5	61,5

Tabla 2.4 Tabla de temperaturas y entalpías para las **corrientes frías** del ejemplo

Intervalo de temperaturas	Temperatura superior del intervalo (°C)	Entalpía del intervalo de temperaturas (MW)	Entalpía acumulada (MW)
-	20	0	0
G	30	(30-20)(0,2) = 2	2
F	70	(70-30)(0,2) = 8	10
E	140	(140-70)(0,2) = 14	24
D	180	(180-140)(0,2+0,3) = 20	44
C	190	(190-180)(0,3) = 3	47
B	230	(230-190)(0,3) = 12	59
A	240	(240-230)(0) = 0	59

El calor neto del sistema es igual a la diferencia de las entalpías totales entre las corrientes calientes y las frías:

$$Q_{neto} = \sum_{i=1}^{Intervalos} (H_{Cal}_i) - \sum_{i=1}^{Intervalos} (H_{Fría}_i)$$

Para el ejemplo $Q_{neto} = 61,5 - 59 = 2,5$ MW; comprobándose los cálculos realizados.

A partir de estas tablas se construyen las curvas compuestas. Para ello se grafican los puntos de temperatura superior de cada intervalo en función de la entalpía acumulada hasta el intervalo. Los puntos se unen con rectas. Sobre la misma carta se deben representar las tablas de corrientes calientes y de corrientes frías, obteniéndose dos líneas (figura 2.6).

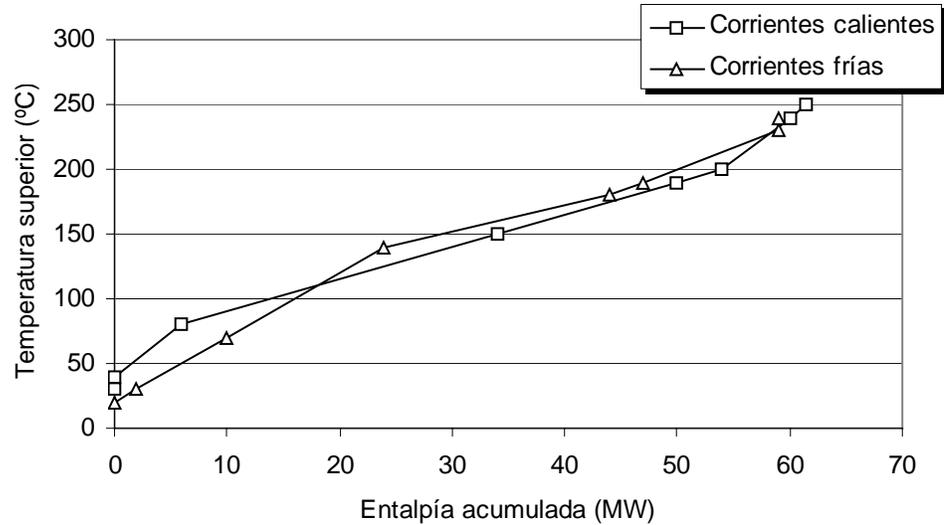


Figura 2.6 Gráfico de temperatura superior en función de entalpía acumulada

Sin embargo, este primer gráfico no reproduce cabalmente la realidad. Una vez representadas ambas tablas de temperatura y entalpía acumulada, la curva compuesta se debe ajustar para el $\Delta T_{\text{mínimo}}$ seleccionado. Para ello se debe mover la línea de la corriente fría hacia la derecha hasta que ambas líneas queden separadas, en el punto donde más se aproximan por el eje vertical, con una diferencia de $\Delta T_{\text{mínimo}}$. Este es el punto de *pinch*, es decir, el pliegue donde más se acercan las partes fría y caliente del sistema.

Una vez ajustada la curva compuesta al $\Delta T_{\text{mínimo}}$, la diferencia de entalpía entre ambas líneas, en el extremo izquierdo del gráfico, es igual al calor que se debe extraer mediante utilidades frías y la diferencia de entalpía, en el lado derecho, es el calor que se debe suministrar mediante utilidades calientes. En el punto de *pinch*, las temperaturas de las líneas de corrientes calientes y frías corresponden con la temperatura de *pinch*.

El ajuste de la curva compuesta al $\Delta T_{\text{mínimo}} = 10$ °C, en el ejemplo propuesto, se realiza moviendo la línea de las corrientes frías 10 MW a la izquierda, como se muestra en la figura 2.7. La curva compuesta para los datos del ejemplo, ajustada a $\Delta T_{\text{mínimo}} = 10$ °C, queda finalmente como se muestra en la figura 2.8.

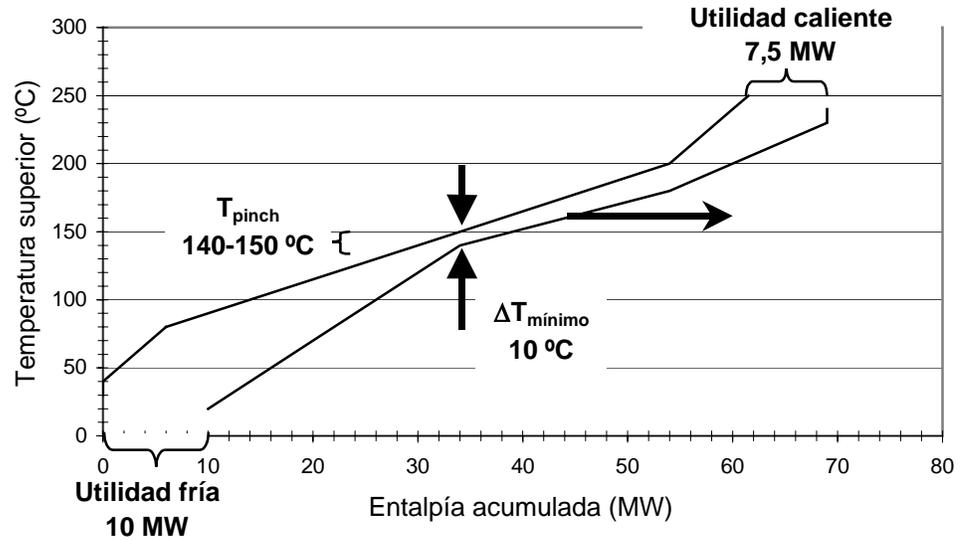


Figura 2.7 Ajuste del gráfico de temperatura superior vs. entalpía acumulada a un $\Delta T_{mínimo} = 10^{\circ}\text{C}$

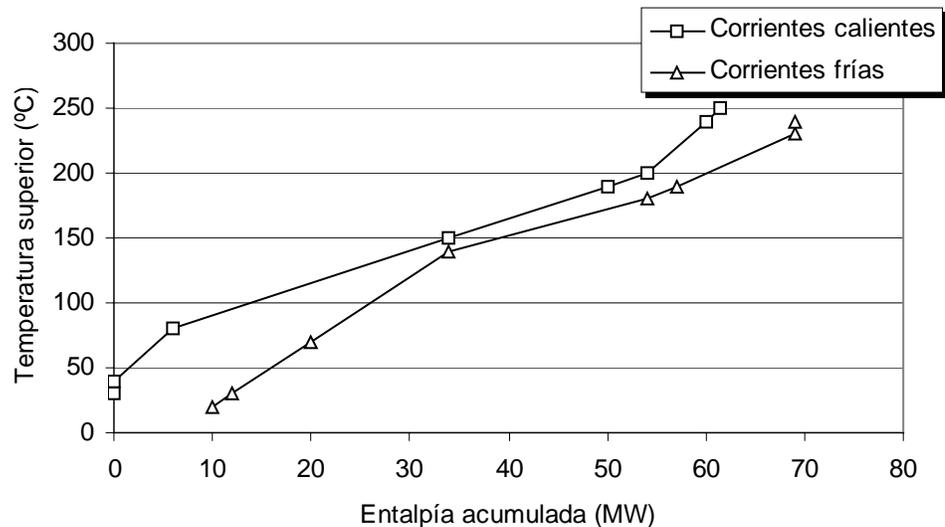


Figura 2.8 Curva compuesta correspondientes al ejemplo propuesto

Etapas 7

Determinación del número óptimo de intercambiadores de calor

Una vez determinado el punto de *pinch*, es necesario calcular el número mínimo de intercambiadores de calor que garanticen una transferencia eficiente para las condiciones mínimas de utilidades. En esta etapa existe un principio que nunca debe ser violado: **una corriente nunca debe transferir calor a través de la temperatura de *pinch***. Es por ello que el proceso se divide en "encima del *pinch*" y "debajo del *pinch*" para calcular la cantidad de intercambiadores y diseñar la red de intercambio.

El número de intercambiadores encima del *pinch* se calcula como:

$$\begin{array}{l} \text{Numero de} \\ \text{intercambiadores} \\ \text{sobre el pinch} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Número de} \\ \text{corrientes calientes} \\ \text{sobre el pinch} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Número de} \\ \text{corrientes frías} \\ \text{sobre el pinch} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Número de} \\ \text{utilidades} \\ \text{calientes} \end{array} - 1$$

y por debajo como:

$$\begin{array}{l} \text{Numero de} \\ \text{intercambiadores} \\ \text{bajo el pinch} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Número de} \\ \text{corrientes calientes} \\ \text{bajo el pinch} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Número de} \\ \text{corrientes frías} \\ \text{bajo el pinch} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Número de} \\ \text{utilidades} \\ \text{frías} \end{array} - 1$$

El número total de intercambiadores de calor a instalar es la suma de intercambiadores sobre y bajo el *pinch*.

A partir del diagrama de intervalos de temperaturas (figura 2.5) resulta fácil identificar la cantidad de corrientes encima y debajo del *pinch*. Para el ejemplo se tienen 2 corrientes calientes y 2 frías sobre el *pinch* y 2 corrientes calientes y 1 fría bajo el *pinch*.

A partir del diagrama de cascada (figura 2.4) es posible conocer la cantidad de corrientes de utilidades. En el ejemplo, si se utiliza el diagrama de cascada de la izquierda se tienen dos utilidades calientes (4,5 y 3 MW) y una fría (10 MW); pero si se utiliza el de la derecha hay solo una utilidad caliente de 7,5 MW y una fría de 10 MW.

En la tabla 2.5 se calcula el número óptimo de intercambiadores de calor del ejemplo para el diagrama de cascada con una utilidad caliente (diagrama de la derecha).

Tabla 2.5 Número óptimo de intercambiadores de calor para la red del ejemplo

	Corrientes calientes	Corrientes frías	Utilidades	Intercambiadores de calor
Sobre el pinch	2	2	1	4
Bajo el pinch	2	1	1	3
			Total	7

Etapas 8

Propuesta de intercambio encima y debajo del *pinch*

Después de determinar el número de intercambiadores de calor, encima y debajo del *pinch*, se debe proponer una red preliminar de intercambio de calor entre las corrientes. Para ello se deben analizar separadamente las redes de intercambio sobre y bajo el *pinch*. El objetivo de esta etapa consiste en determinar, para cada

intercambiador de calor, las corrientes involucradas y la cantidad de energía que intercambian entre sí.

Para proponer una red de intercambiadores, las corrientes se colocan en rectángulos, las calientes encima (incluidas las utilidades calientes) y las frías debajo (incluidas las utilidades frías). Dentro de los rectángulos se debe escribir también la cantidad de energía que absorberá o liberará cada corriente. Los intercambiadores de calor se representan con círculos numerados consecutivamente. Se debe pasar toda la energía de las corrientes calientes a las frías utilizando solo el número de intercambiadores calculados en la etapa 7.

Una propuesta de intercambio de calor encima del *pinch* se muestra en la figura 2.9 y debajo del *pinch* en la figura 2.10.

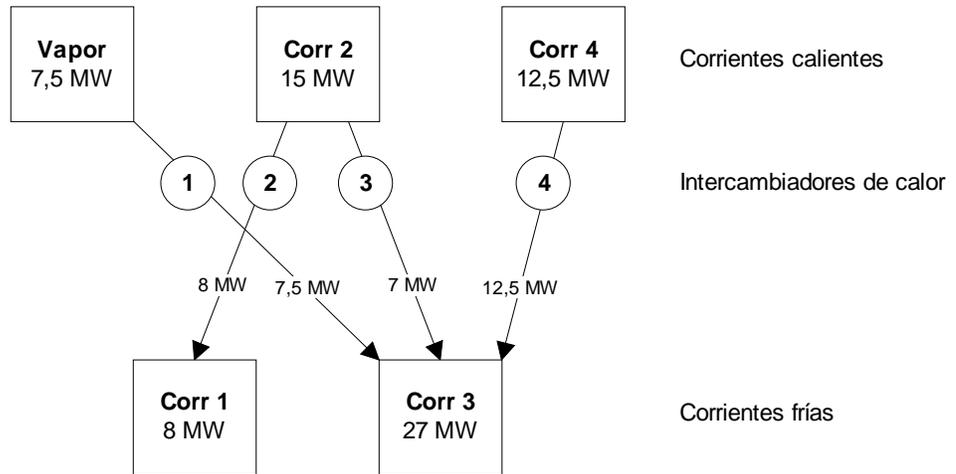


Figura 2.9 Propuesta de intercambio sobre el *pinch* para el ejemplo propuesto

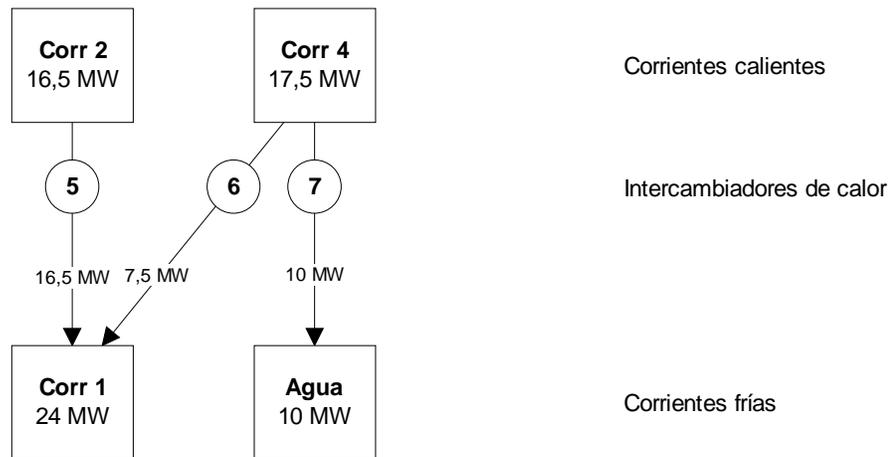


Figura 2.10 Propuesta de intercambio bajo el *pinch* para el ejemplo propuesto

A partir de la propuesta de intercambio de energía de la etapa 8 quedan definidas las corrientes y la cantidad de calor que intercambian estas entre si. Solo falta ubicar el orden de los intercambiadores de calor en el diagrama de flujo. Para ello se colocan todas las corrientes como líneas horizontales, con flechas que van de derecha a izquierda para las corrientes frías y de izquierda a derecha para las calientes. Sobre cada línea se representan las temperaturas de entrada, de salida y de *pinch* de cada corriente. Una vez representadas todas las corrientes se van colocando los intercambiadores de calor entre estas, según la propuesta de la etapa 8. Sobre cada intercambiador se indica el calor que debe intercambiar y se calculan las temperaturas de entrada y de salida de cada corriente a cada uno de ellos:

$$T_{salida}_{corr_caliente} = T_{entrada}_{corr_caliente} - \frac{Q}{m \cdot Cp}$$

$$T_{entrada}_{corr_caliente} = T_{salida}_{corr_caliente} + \frac{Q}{m \cdot Cp}$$

$$T_{salida}_{corr_fría} = T_{entrada}_{corr_fría} + \frac{Q}{m \cdot Cp}$$

$$T_{entrada}_{corr_fría} = T_{salida}_{corr_fría} - \frac{Q}{m \cdot Cp}$$

En la figura 2.11 se muestra una posible red de intercambiadores que se ajusta a las condiciones del problema propuesto.

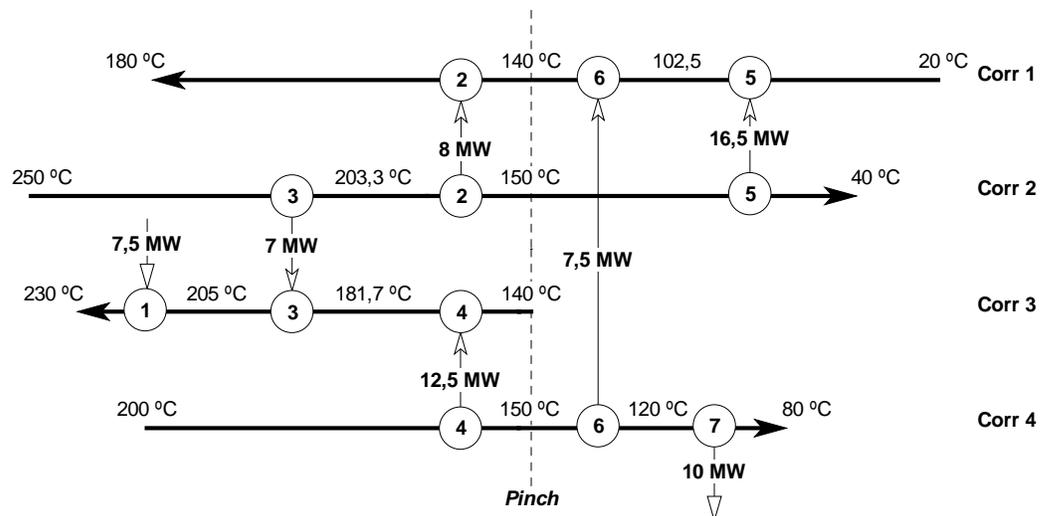


Figura 2.11 Red de intercambiadores de calor para el ejemplo propuesto

Es importante analizar, en cada intercambiador de calor, que la diferencia entre las temperaturas de las corrientes calientes y frías sea mayor o igual al $\Delta T_{\text{mínimo}}$ seleccionado:

$$\Delta T_{\text{Frío}} = T_{\text{salida}}_{\text{corr_caliente}} - T_{\text{entrada}}_{\text{corr_fría}}$$

$$\Delta T_{\text{Caliente}} = T_{\text{entrada}}_{\text{corr_caliente}} - T_{\text{salida}}_{\text{corr_fría}}$$

En el caso que existan intercambiadores de calor con cruce de temperaturas o que no garanticen el $\Delta T_{\text{mínimo}}$ se debe realizar otra distribución, cambiando el orden de los equipos propuesto en esta etapa o, incluso, cambiando la distribución preliminar propuesta desde la etapa 8.

En la tabla 2.6 se resumen las diferencias de temperaturas entre las corrientes frías y calientes para cada intercambiador de calor. Observe que los intercambiadores 1, 2, 4 y 6 operan para un ΔT igual al $\Delta T_{\text{mínimo}}$, pero ninguno trabaja a una temperatura inferior:

Tabla 2.6 Diferencias de temperaturas entre corrientes frías y calientes

Interc.	Corriente fría		Corriente caliente		$\Delta T_{\text{Frío}}$	$\Delta T_{\text{Caliente}}$
	Tentrada	Tsalida	Tentrada	Tsalida		
1	205,0 °C	230,0 °C	240,0 °C	240,0 °C	35,0 °C	10,0 °C
2	140,0 °C	180,0 °C	203,3 °C	150,0 °C	10,0 °C	23,3 °C
3	181,7 °C	205,0 °C	250,0 °C	203,3 °C	21,6 °C	45,0 °C
4	140,0 °C	181,7 °C	200,0 °C	150,0 °C	10,0 °C	18,3 °C
5	20,0 °C	102,5 °C	150,0 °C	40,0 °C	20,0 °C	47,5 °C
6	102,5 °C	140,0 °C	150,0 °C	120,0 °C	17,5 °C	10,0 °C
7	30,0 °C	100,0 °C	120,0 °C	80,0 °C	50,0 °C	20,0 °C

Nota: Las temperaturas destacadas en la tabla corresponden a las utilidades, como se describe más adelante en esta propia etapa de la metodología.

Se propone, como utilidad caliente en el intercambiador 1, vapor saturado. La temperatura de este, para garantizar el $\Delta T_{\text{mínimo}}$ de 10 °C, debe ser de 240 °C (o superior). Según la tabla de vapor saturado² a esta temperatura le corresponde una presión de 3,34 MPa y una entalpía de vaporización (h_{fg}) de 1766,5 kJ/kg.

El caudal de vapor saturado se calcula por:

$$m = \frac{Q}{h_{fg}}$$

y se necesitan 4,25 kg/s (15,3 t/h) para garantizar 7,5 MW (7500 kJ/s).

Para la utilidad fría, en el intercambiador 7 del ejemplo, se propone agua. La temperatura de salida no debe ser superior a 110 °C para garantizar el $\Delta T_{\text{mínimo}}$; sin embargo, si se mantiene a presión atmosférica se puede utilizar una caldera de recuperación y producir vapor saturado a 100 °C. La temperatura de entrada del agua puede ser la ambiental (aproximadamente 30 °C). La variación de entalpía (Δh_f) para calentar el agua líquida desde 30 °C hasta 100 °C es de 293,25 kJ/kg y la entalpía de vaporización (h_{fg}) de 2257,0 kJ/kg.

El caudal de agua de enfriamiento se calcula como:

² KEENAN, JH. *et al.* 1969. *Steam Tables*. New York : John Wiley & Sons, Inc. Tabla 1.

$$m = \frac{Q}{\Delta h_f + h_{fg}}$$

y son necesarios 3,92 kg/s (14,1 t/h) para eliminar 10 MW (10000 kJ/s).

Etapa 10

Diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente

Reconstruir el diagrama de flujo del proceso integrado y realizar el diseño de los intercambiadores constituye la etapa final de la integración energética propiamente dicha; aunque aún se deben incluir un análisis económico y una optimización del costo total en función del $\Delta T_{\text{mínimo}}$.

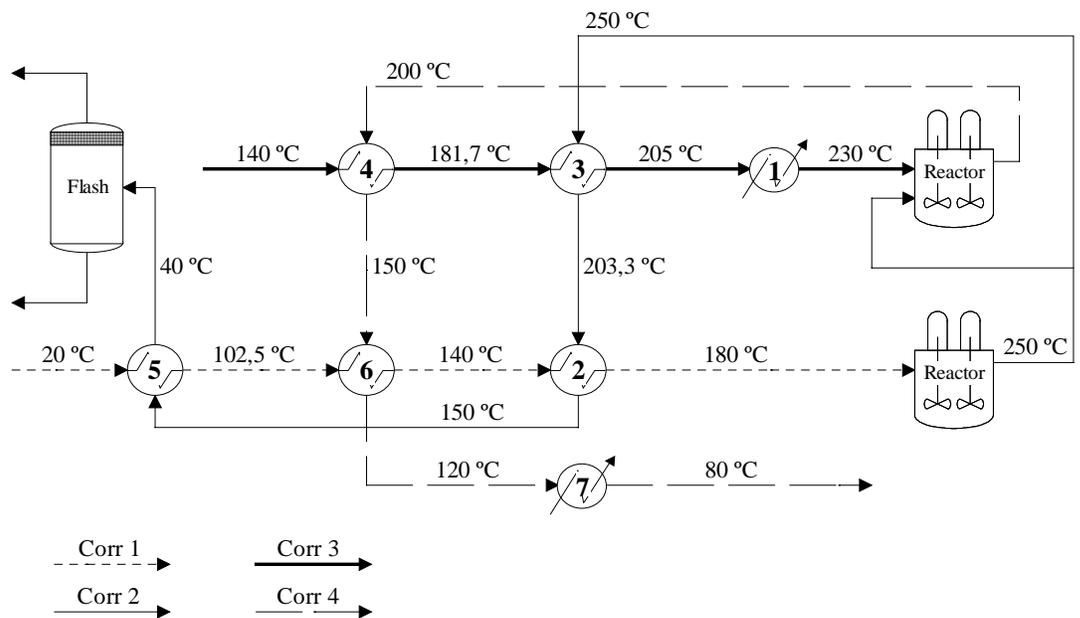


Figura 2.12 Diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente

En esta etapa también se debe calcular el área de transferencia de calor para cada equipo:

$$A = \frac{Q}{Ud \cdot LMTD}$$

donde Q es el calor que se transfiere en el intercambiador, $LMTD$ es la diferencia media logarítmica de temperaturas:

$$LMTD = \frac{(T_{salida_{corr_caliente}} - T_{entrada_{corr_fría}}) - (T_{entrada_{corr_caliente}} - T_{salida_{corr_fría}})}{\ln \frac{T_{salida_{corr_caliente}} - T_{entrada_{corr_fría}}}{T_{entrada_{corr_caliente}} - T_{salida_{corr_fría}}}}$$

y Ud el coeficiente global de transferencia de calor en condiciones de suciedad, que puede ser estimado mediante tablas³ o calculado como:

$$Ud = \frac{1}{Rd + \frac{1}{Uc}}$$

siendo Rd el coeficiente de obstrucción ($Rd \approx 0.003 \text{ h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F}/\text{BTU}$ para cálculos aproximados, o estimado de tablas para cálculos mas exactos) y Uc el coeficiente global de transferencia de calor limpio:

$$Uc = \frac{\frac{D_{Int}}{D_{Ext}} h_i \cdot h_o}{\frac{D_{Int}}{D_{Ext}} h_i + h_o}$$

D_{Int} y D_{Ext} los diámetros interior y exterior de los tubos y h_i y h_o los coeficientes de transferencia de calor por el interior y el exterior de los tubos, estos últimos se pueden estimar, en régimen turbulento, mediante el número de Nusselt a partir de la relación empírica:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

donde: $Nu = \frac{h D}{k}$, $Re = \frac{D G}{\mu}$ y $Pr = \frac{Cp \mu}{k}$

o mediante la expresión simplificada:

$$h_i \text{ ó } h_o = 0,023 \frac{G^{0,8} \cdot k^{2/3} \cdot Cp^{1/3}}{D^{0,2} \cdot \mu^{0,47}}$$

El cálculo del área de transferencia de cada uno de los intercambiadores que conforman la red se resume en la siguiente tabla:

Int.	Q kJ/s	Corriente fría		Corriente caliente		$LMTD$ °C	Ud^4 kJ/°C m ² s	A m ²
		$T_{entrada}$ °C	T_{salida} °C	$T_{entrada}$ °C	T_{salida} °C			
1	7500	205,0	230,0	240,0	240,0	19,95	1,845	203,65

³ - PERRY, RH. y GREEN, D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 6ta. Ed. New York : Mc Graw-Hill, 1984. Sección 10, tablas 10-10 a 10-15 y tabla 10-9.

- KERN, D. *Procesos de transferencia de calor*. Compañía Editorial Continental : Tlhuaca (México), 1999. Tablas 8 y 12.

⁴Datos de Ud tomados de PERRY, RH. y GREEN, D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 6ta. Ed. New York : Mc Graw-Hill, 1984. Sección 10, tabla 10-10, página 10-44.

2	8000	140,0	180,0	203,3	150,0	15,72	1,278	398,24
3	7000	181,7	205,0	250,0	203,3	31,88	1,278	171,85
4	12500	140,0	181,7	200,0	150,0	13,73	1,278	712,35
5	16500	20,0	102,5	150,0	40,0	31,79	1,278	406,22
6	7500	102,5	140,0	150,0	120,0	13,40	1,278	438,02
7	10000	30,0	100,0	120,0	80,0	32,74	1,703	179,30

Todos los coeficientes de transferencia de calor de la tabla anterior se estimaron para fluidos con densidad, viscosidad y conductividad térmica similar a la del agua, en intercambiadores de coraza de acero y tubos de cobre o latón.

Etapas 11

Análisis económico

El análisis económico de la integración energética incluye el costo por consumo de utilidades y el costo por amortización de la inversión de los intercambiadores.

El costo de las utilidades puede ser estimado, aproximadamente, mediante las expresiones y tablas reportadas en la literatura especializada⁵:

Utilidad	Costo unitario
Vapor a alta presión (3,5 MPa)	1,30 - 2,65 \$/t
Vapor a media presión (0,7 MPa)	1,10 - 2,20 \$/t
Vapor a presión atmosférica (0,1 MPa)	0,55 - 0,90 \$/t
Agua de enfriamiento de pozo	0,01 - 0,04 \$/m ³
Agua de enfriamiento de río o mar	0,01 - 0,02 \$/m ³
Agua de enfriamiento de torre	0,01 - 0,03 \$/m ³
Refrigeración con amoníaco (1 °C)	7,10 \$/MW

y el costo de inversión para cada intercambiador de calor puede ser estimado mediante los índices de costo reportados en la literatura⁶, por medio de softwares⁶ o mediante catálogos de fabricantes. También pueden ser utilizadas correlaciones empíricas en la estimación del costo de construcción, instalación y montaje de intercambiadores:

$$\text{Costo} = a + (b \cdot A^c \cdot d \cdot e)$$

⁵ - PETERS, MS. y TIMMERHAUS, KD. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 2da. Ed. New York : Mc Graw-Hill, 1968. Capítulo 4 y apéndice D, tabla 5.

- PERRY, RH. y GREEN, D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 6ta. Ed. New York : Mc Graw-Hill, 1984. Sección 25, ecuaciones 25-250 a 25-254.

⁶ - **CAPCOST** : Software gratuito que acompaña al libro TURTON, R. *et al. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Upper Saddle River, NJ : Prentice-Hall, 1997.

- **EquipCost** : Software *online* y gratuito, disponible en <http://www.matche.com/>

- **HINT** : Software gratuito para integración energética. Incluye estimación de costos de intercambiadores. Disponible en <http://www.heatintegration.com/>

donde A es el área de transferencia de calor en ft^2 ; a , b y c son coeficientes que definen el tipo de intercambiador, d es el coeficiente que define al material de construcción y e es el coeficiente que define la presión de operación del equipo. Estos coeficientes pueden ser tomados a partir de las siguientes tablas:

Tipo de intercambiador	Rango de A (ft²)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Air Cooled, Bare Tube Area	35 - 150000	0	2121	0,396
Condenser, Vertical Tube, Small	10 - 200	0	1516	0,497
Double Pipe, Large	100 - 2000	0	3919	0,237
Double Pipe, Small	2,5 - 120	0	440,7	0,23
Evaporator, Agitated Film	20 - 200	0	4296	0,766
Evaporator, Falling Film, Large	150 - 4000	21971	1391	0,493
Evaporator, Falling Film, Small	3,8 - 160	17830	1752	0,832
Evaporator, Forced Circulation	150 - 8000	184673	423,1	0,951
Evaporator, Horizontal Tube	100 - 8000	0	3317	0,53
Evaporator, Vertical Tube	100 - 8000	0	4600	0,552
Kettle Reboiler	100 - 1000	0	878,3	0,55
Reboiler	200 - 30000	9870	20,95	0,944
Shell/Tube, Fixed/U, Large	1500 - 6000	0	4296	0,337
Shell/Tube, Fixed/U, Medium	300 - 1500	0	102,96	0,848
Shell/Tube, Fixed/U, Small	50 - 300	0	5,558	1,36
Shell/Tube, Floating Head, Large	100 - 10000	0	287,3	0,68
Shell/Tube, Floating Head, Medium	100 - 1000	0	731	0,55
Shell/Tube, Floating Head, Small	5 - 100	0	1914	0,34
Tank Heater	200 - 6000	5848	12,41	0,944
Water Heater, Large	20 - 125	0	583,8	0,378
Water Heater, Small	5 - 20	0	179,4	0,645

Material	<i>do</i>
Admiralty	1,91
Aluminum	1,74
Alloy 20	5,21
Copper/Brass	1,36
Carbon Steel (CS)	1,00
CS Shell, Admiralty Tube	1,91
CS Shell, Aluminum Tube	1,21
CS Shell, Brass/Copper Tube	1,34
CS Shell, 9% Chrome Tube	3,42
CS Shell, Glass Lined Tube	2,29
CS Shell, Hastelloy Tube	21,63
CS Shell, Incoloy 825 Tube	5,89
CS Shell, Inconel 625 Tube	16,5
CS Shell, Moly Tube	3,15
CS Shell, Monel Tube	4,27
CS Shell, 9% Nickel Tube	2,81
CS Shell, SS 304 Tube	2,90
CS Shell, SS 316 Tube	3,98
CS Shell, SS 321 Tube	4,77
CS Shell, SS 347 Tube	6,23
CS Shell, SS 410 Tube	3,92
CS Shell, Titanium Tube	17,04
CS Shell, Zirconium Tube	22,85
Moly Steel	3,69
Monel	7,33
Nickel	4,31
Stainless Steel, 304	4,41
Stainless Steel, 316	5,88
Stainless Steel, 321	4,93
Stainless Steel, 347	8,50
Stainless Steel, 410	4,88
Titanium	38,14
Zirconium	30,73

$d = 1$ Si $do = 1$ (Carbon Steel)

$d = 0,445 \cdot A^{0,13} \cdot do^{0,57}$ Si $do \neq 1$

Presión Interna	<i>e</i>
Vacío absoluto (≈ 0 MPa)	1,05
≈ 150 psi (≈ 1 MPa)	1,00
≈ 300 psi (≈ 2 MPa)	1,15
≈ 450 psi (≈ 3 MPa)	1,25
≈ 600 psi (≈ 4 MPa)	1,45
≈ 900 psi (≈ 6 MPa)	1,75

Un estimado del costo anual de la integración energética se muestra en las tablas siguientes. Todos los intercambiadores son de coraza de acero y tubos de cobre o de latón.

Costo por consumo de utilidades

	Caudal (kg/s)	CU (\$/kg)	Costo (\$/s)
Vapor	4,25	0,001975	0,008385
Agua	3,92	0,000020	0,000078
Costo utilidades (\$/s)			0,008464
Costo anual (\$/año)			266909,63

Costo por amortización de la inversión de intercambiadores

	A (ft²)	Tipo de intercambiador	a	b	c	d	e	Costo (\$)
1	2192,09	Condensador acero/latón	0	1516	0,497	1,429	1,25	123918,70
2	4286,57	Intercamb. acero/cobre	0	287,3	0,68	1,559	1	132176,50
3	1849,82	Intercamb. acero/cobre	0	287,3	0,68	1,398	1	66914,42
4	7667,69	Intercamb. acero/cobre	0	287,3	0,68	1,681	1	211701,50
5	4372,55	Intercamb. acero/cobre	0	287,3	0,68	1,563	1	134320,00
6	4714,75	Intercamb. acero/cobre	0	287,3	0,68	1,578	1	142773,30
7	1929,93	Caldera acero/latón	9870	20,95	0,944	1,405	1	47080,54
Inversión (\$)								858885,00
Tiempo de amortización								3 años
Costo anual (\$/año)								286294,99

Costo anual total de la integración energética (\$/año) 553204,62

A manera de comparación se calcula el costo anual de la misma planta sin integración energética, asumiendo que toda la energía necesaria se suministra como vapor saturado a 3,34 MPa en dos condensadores y todo el enfriamiento con agua a 30 °C hasta vapor saturado a 100 °C en dos calderas de recuperación.

Costo anual total (\$/año)	2272490,28
Ahorro anual (\$/año)	1719285,67

Después de integrar energéticamente el proceso se consigue un ahorro anual de 1,7 millones de dólares.

Etapas 12

Optimización del $\Delta T_{\text{mínimo}}$

La última etapa de la integración energética consiste en determinar un valor de $\Delta T_{\text{mínimo}}$ óptimo, para el cual los costos totales se hagan mínimos. La optimización consiste en repetir toda la integración energética, desde la etapa 3

hasta la 11, seleccionando diferentes valores de $\Delta T_{\text{mínimo}}$ en cada repetición y representando gráficamente el costo para cada uno. A partir de la gráfica es posible estimar el punto de $\Delta T_{\text{mínimo}}$ donde se hace mínimo el costo. También se puede ajustar un modelo y optimizarlo matemáticamente. Finalmente se debe realizar una última integración que compruebe el costo mínimo estimado.

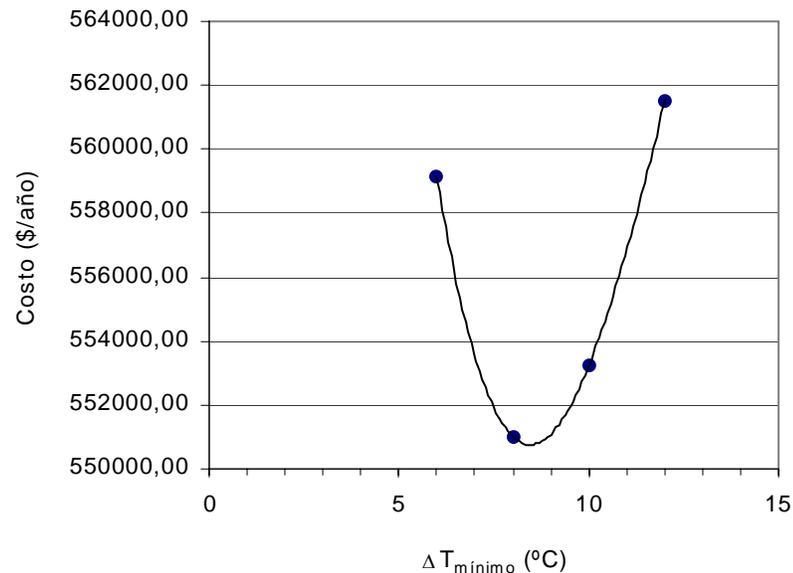
A partir de los datos del ejemplo se seleccionó como primer valor de $\Delta T_{\text{mínimo}}$, 12°C. El costo para este es \$561482,12/año.

Al aumentar el $\Delta T_{\text{mínimo}}$ de 10°C a 12°C el costo anual se incrementa en \$8277 (de \$553204,62/año a \$561482,12/año). Esto significa que la búsqueda se debe realizar en dirección contraria, es decir disminuyendo el valor de $\Delta T_{\text{mínimo}}$.

A continuación se resume la búsqueda. Observe que para un $\Delta T_{\text{mínimo}} = 6^\circ\text{C}$ el costo comienza a aumentar nuevamente:

$\Delta T_{\text{mínimo}}$ (°C)	Costo (\$/año)
12	561482,12
10	553204,62
8	551007,23
6	559167,93

que puede ser representada como:



y modelada matemáticamente mediante un análisis de regresión con $R^2 = 1$:

$$\text{Costo} = -88,755(\Delta T_{\text{mínimo}})^3 + 3423(\Delta T_{\text{mínimo}})^2 - 38862(\Delta T_{\text{mínimo}}) + 688281$$

A partir del análisis del gráfico o de la optimización matemática del modelo se pueden estimar las condiciones de $\Delta T_{\text{mínimo}}$ que minimizan los costos:

$\Delta T_{\text{mínimo}}^*$	8,5 °C
Costo*	550757,29 \$/año

Para comprobar las condiciones óptimas se determina el costo para $\Delta T_{\text{mínimo}}$ igual a 8,5 °C:

Temperatura de <i>pinch</i>	148,5 a 140,0 °C
------------------------------------	------------------

Costo por consumo de utilidades

	Q kJ/s	H kJ/kg	Caudal kg/s	CU \$/kg	Costo \$/s
Vapor	6900	1766,5	3,9060289	0,00197	0,0077144
Agua	9400	2550,25	3,6859131	0,00002	0,0000737
Costo utilidades \$/s					0,0077881
Costo anual \$/año					245606,32

Costo por amortización de la inversión de los intercambiadores

	Q kJ/s	Corrientes frías		Corrientes calientes		A m ²	Costo \$/año
		Tentrada °C	Tsalida °C	Tentrada °C	Tsalida °C		
1	6900	207,0	230,0	240,0	240,0	194,09	120236,75
2	8000	140,0	180,0	201,8	148,5	443,03	144096,96
3	7225	182,9	207,0	250,0	201,8	192,82	73453,89
4	12875	140,0	182,9	200,0	148,5	819,55	237156,74
5	16275	20,0	101,4	148,5	40,0	402,50	133322,17
6	7725	101,4	140,0	148,5	117,6	506,00	160475,82
7	9400	30,0	100,0	117,6	80,0	177,83	46752,83
Inversión \$							915495,15
Tiempo de amortización							3 años
Costo anual \$/año							305165,05

Costo anual total	550771,37 \$/año
--------------------------	------------------

BIBLIOGRAFÍA

- GPSA, *Engineering Data Book*. 11 Ed. Tulsa, Oklahoma : Gas Processors Suppliers Association, 1998.
- KEENAN, JH. et al. *Steam Tables*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- KERN, D. *Procesos de transferencia de calor*. Compañía Editorial Continental : Tlhuaca (México), 1999. ISBN 968-26-1040-0.
- MATCHE Inc. Mathematics and chemistry (matches) process cost. Disponible en <http://www.matche.com/>
- PERRY, RH. y GREEN, D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 6ta. Ed. New York : Mc Graw-Hill, 1984.
- PETERS, MS. y TIMMERHAUS, KD. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 2da. Ed. New York : Mc Graw-Hill, 1968.