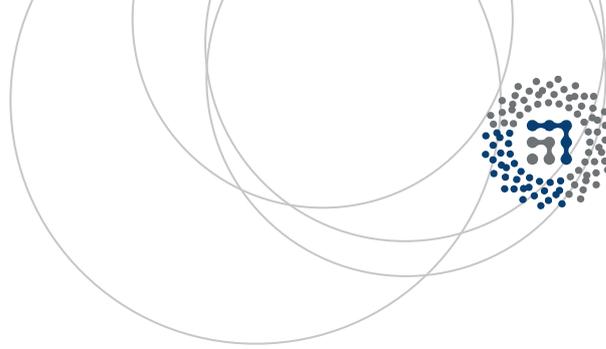


eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea



ZTF-FCT

Zientzia eta Teknologia Fakultatea  
Facultad de Ciencia y Tecnología



Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Química

# Desarrollo de una herramienta para diseñar una red de cambiadores de calor integrando corrientes de proceso

Autor:

Iñigo Pereda Sinovas

Director:

José M. Arandes Esteban

Leioa, 20 de Junio de 2016

## INDICE

1. Objetivos	1
2. Introducción	2
2.1. Integración energética de corrientes de proceso	2
2.2. Antecedentes	4
2.3. Síntesis secuencial	6
2.4. Síntesis simultánea	8
2.4.1. Planteamiento del problema	8
2.4.2. Desarrollo de la superestructura	9
3. Programa de cálculo para el diseño de una red de cambiadores siguiendo el método secuencial de síntesis	12
3.1. Mínimas necesidades de servicios	13
3.1.1. Mínimas necesidades energéticas sin restricciones	17
3.1.2. Mínimas necesidades energéticas con restricciones en los intercambios	20
3.1.3. Cálculo de las curvas compuestas y la gran curva compuesta	22
3.2. Estimación del área total de la red de cambiadores	23
3.3. Estimación del coste de la red en función del gradiente mínimo de temperatura	25
3.4. Diseño de la red de cambiadores	28
3.4.1. Diseño para minimizar el número de intercambios de calor	28
3.4.2. Método basado en reglas heurísticas	33
3.4.2.1. Diseño por encima de la temperatura pinch	33
3.4.2.2. Diseño por debajo de la temperatura pinch	36
4. Validación	41
4.1. Problema 1	41
4.2. Problema 2	43
4.3. Problema 3	45
4.4. Problema 4	47
5. Resumen y conclusiones	50
5.1. Resumen	50
5.2. Conclusiones	52
6. Bibliografía	54
APENDICE A	A1
APENDICE B	B1

## 1. OBJETIVOS

En el diseño de procesos químicos, el planteamiento de las principales etapas del proceso (reactores, sistemas de separación y recirculaciones) deja definidos los balances de materia y energía. Antes de diseñar una red de cambiadores de calor hay que establecer unos objetivos para evaluar el comportamiento del diseño del proceso sin necesidad de diseñar la red de cambiadores de recuperación para recuperar el calor de las corrientes calientes y frías. Esos objetivos permitirán evaluar los costes energéticos y del capital de la red de cambiadores de calor. Además, los objetivos permitirán a los diseñadores sugerir cambios en los sistemas de reactores, separación y recirculaciones con el objetivo de mejorar los costes energéticos y de capital de la red de intercambiadores de calor.

Usar objetivos permite discriminar rápidamente muchas opciones de diseño para el proceso global. Una vez fijados esos objetivos ya se pueden considerar los costes del capital y usarlos para sugerir mejoras de diseño en los sistemas de reacción, separación y recirculación.

El trabajo fin de grado se centra entonces en el diseño de procesos químicos. En este trabajo fin de grado se desarrolla una herramienta de cálculo en Matlab® que sea capaz de establecer y cuantificar esos objetivos de forma que el diseñador pueda calcular las necesidades energéticas en función del gradiente mínimo establecido para un intercambio de calor y a partir de esas necesidades elegir el nivel de temperatura más conveniente para los servicios de calefacción y refrigeración, estimar el coste de esos servicios, así como el del capital de la red de intercambiadores. Finalmente, también podrá diseñar la red de cambiadores que satisfagan esos objetivos.

## **2. INTRODUCCIÓN**

### **2.1. INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE CORRIENTES DE PROCESO**

En todo diseño de procesos podemos encontrarnos con la necesidad de calentar y enfriar corrientes para cumplir con los requerimientos del diseño. Para satisfacer estas necesidades podemos recurrir al uso de diversos servicios de proceso tales como vapor de agua, agua de refrigeración, refrigerante, etc. para calentar o enfriar las corrientes según sea necesario.

Cuando se disponen de corrientes que deban ser enfriadas desde temperaturas altas y de corrientes que deban ser calentadas desde temperaturas bajas, se puede utilizar el calor de las primeras para calentar las segundas siempre que se cumpla con el segundo principio de la termodinámica, reduciendo así las necesidades totales de servicios del diseño.

Cuando se opta por este planteamiento, el ahorro de servicios es doble, al reducirse la cantidad de servicios de calefacción y de refrigeración. La reducción de ambas necesidades de servicios es idéntica y equivale al calor intercambiado entre las corrientes.

La integración energética de corrientes de proceso persigue economizar recursos al disminuir la cantidad de servicios necesarios y equipos para el intercambio de energía mediante la recuperación de energía del proceso.

Se entiende por corriente fría aquella que necesita aumentar su nivel térmico y por corriente caliente la que debe enfriarse para cumplir con los requerimientos del proceso.

La integración energética implica, pues, la determinación de las diversas posibilidades para la redistribución de calor entre corrientes del proceso y servicios a fin de minimizar los costes totales, manteniendo las condiciones térmicas de las corrientes en el diseño.

Con la integración energética nace el problema de la síntesis de redes de intercambiadores de calor (HENS). La síntesis de redes de intercambiadores de calor se ha convertido en un campo importante en la ingeniería de procesos y se le han dedicado grandes esfuerzos de investigación en los últimos 50 años. Su importancia se debe a su papel en el control de los costes de la energía de un proceso. El problema de diseñar una red de cambiadores de calor fue introducido en la bibliografía por Ten Broeck en 1944 (Ten Broeck, 1944). El primer trabajo sobre HENS fue presentado por Hwa en 1965 (Hwa, 1965). Posteriormente, el problema HENS fue definido de forma rigurosa por Masso y Rudd (Masso y Rudd, 1969). El problema básico HENS consiste en:

Dados:

- Un conjunto  $C$  de corrientes de proceso calientes que deben enfriarse desde las temperaturas de entrada a las temperaturas de salida.
- Un conjunto  $F$  de corrientes de proceso frías que deben calentarse desde las temperaturas de entrada a las temperaturas de salida.
- Los caudales y capacidades caloríficas de las corrientes de proceso frías y calientes.
- Los servicios disponibles y las temperaturas o intervalos de temperatura y los costes de esos servicios, y
- Datos de costes de los intercambiadores de calor.

desarrollar una red de cambiadores de calor con una inversión anualizada mínima y mínimos costes de operación. Los principios fundamentales sobre HENS se pueden encontrar en libros de texto (Smith, 1995; Seider y cols., 1999; Biegler y cols., 1997). En la Figura 2.1a se muestra de forma gráfica el enunciado del problema HENS

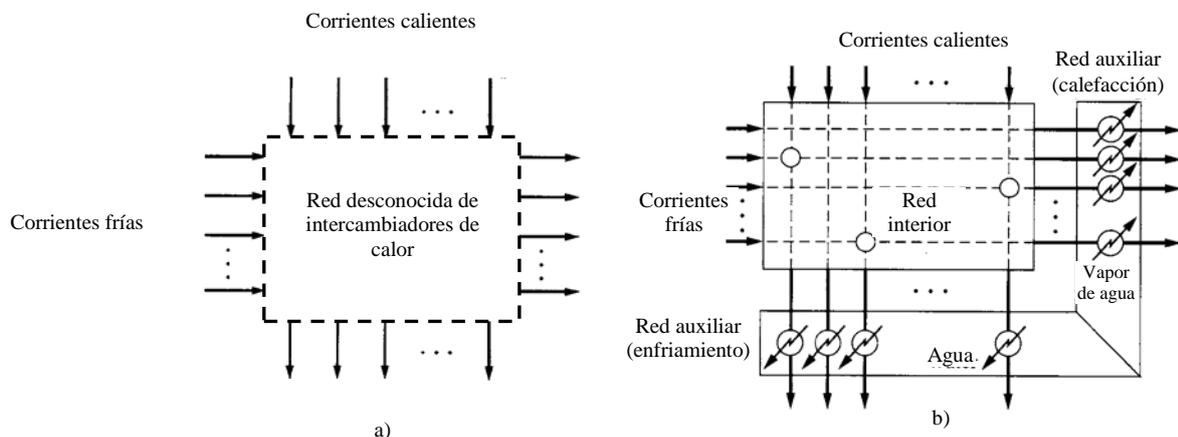


Figura 2.1.- Esquema de integración de calor.

Si, (a) la suma de las necesidades de calefacción no es igual a la suma de las necesidades de enfriamiento, ó (b) algunas temperaturas iniciales no son lo suficientemente bajas o altas para lograr las temperaturas finales intercambiando calor, ó (c) si hay alguna otra restricción, entonces siempre será necesario disponer de uno o más cambiadores auxiliares de calor para calentar o enfriar mediante esos servicios (Figura 2.1b).

Ha habido varias revisiones bibliográficas sobre el problema HENS. Quizás las tres más famosas son las de Gundersen y Naess (1988), Jezowski (1994ab) y Furman y Sahinidis (2002).

## 2.2. ANTECEDENTES

En la Figura 2.2 se muestran los hitos más importantes de este campo de forma cronológica.

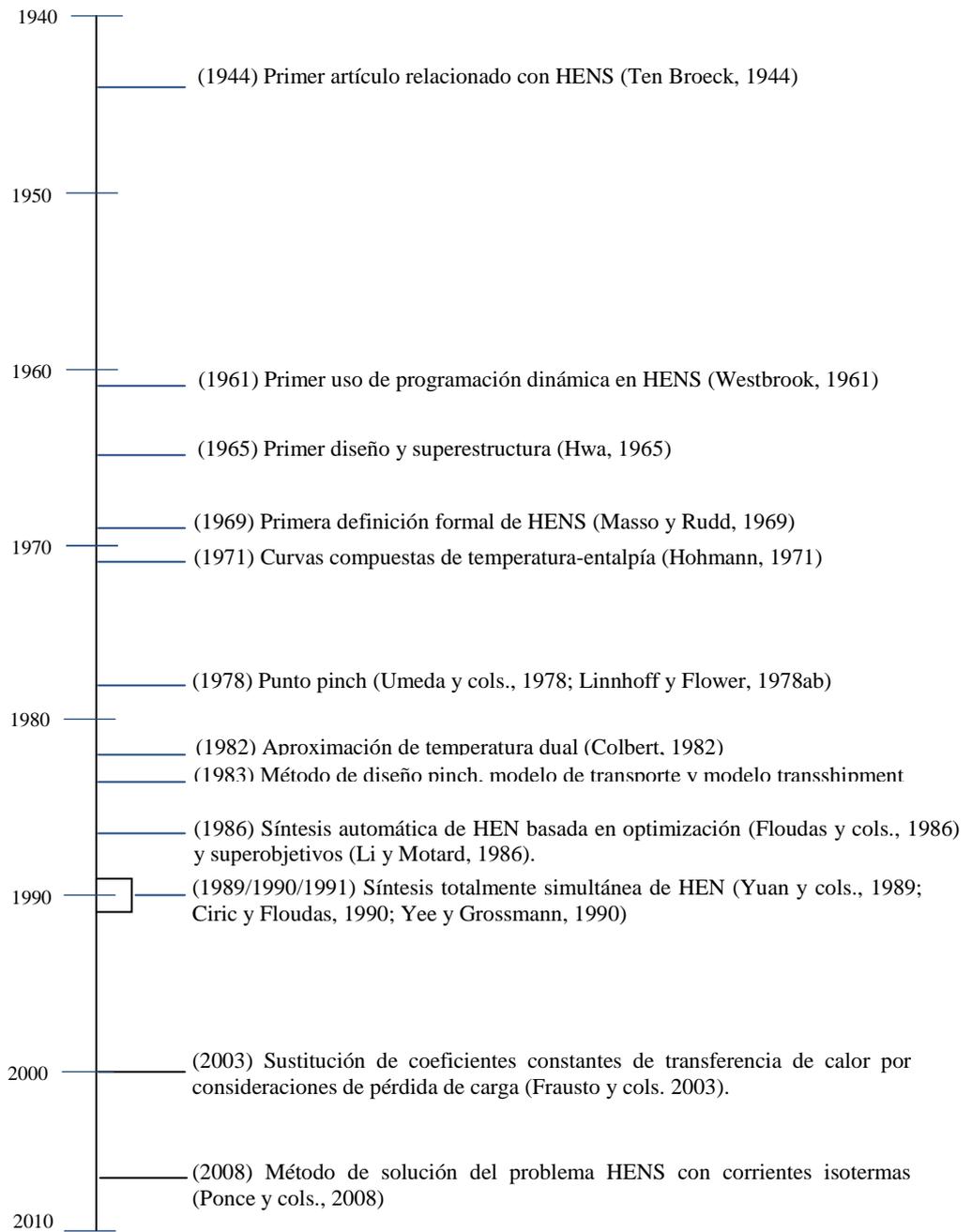


Figura 2.2.- Cronología de las innovaciones más importantes en HENS.

- Ten Broeck (1944). Primer artículo conocido sobre HENS.
- Westbrook (1961). Uso por vez primera de la programación matemática (dinámica) para resolver HENS.
- Hwa (1965). Primera síntesis de redes de cambiadores de calor. Primer uso de programación separable. Primer uso de una superestructura en HENS.

- Rudd (1968). Descomposición del problema de síntesis del proceso en subproblemas con HENS siendo uno de ellos. Primer análisis del problema HENS.
- Masso y Rudd (1969). Primera definición formal del problema HENS.
- Kesler y Parker (1969). Presentado el primer método basado en asignación.
- Hohmann (1971). Las curvas compuestas Hohmann –Lockhart permiten el cálculo de las mínimas necesidades energéticas. Se propone por primera vez la estimación N-1 para el número mínimo de unidades. La tesis establece algunas de las bases del método de diseño pinch.
- McGilliard y Westerberg (1972). Primer artículo en incorporar aspectos de sensibilidad en el problema HENS.
- Umeda y cols. (1978) y Linnhoff y Flower (1978ab). Identificación del punto pinch en la recuperación de calor.
- Colbert (1982). Se presenta el primer DATM.
- Linnhoff y Hindmarsh (1983). Se propone el método pinch de diseño (PDM).
- Cerda y cols. (1983) y Cerda y Westerberg (1983). Se formulan matemáticamente los problemas de minimizar servicios y número de intercambios usando el modelo de transporte.
- Papoulias y Grossmann (1983). Se formulan matemáticamente los problemas de minimizar servicios y número de intercambios usando el modelo de transshipment.
- Linnhoff y Vredeveld (1984). Se presenta el primer artículo relativo a una remodelación de HEN.
- Tjoe y Linnhoff (1986). Se desarrolla una metodología de remodelación de HENS basada en diseño pinch.
- Li y Motard (1986). Se desarrolla por primera vez un método de superobjetivos.
- Floudas y cols. (1986). Se propone el primer método de diseño totalmente automático de una HEN.
- Rév y Fonyó (1986a). Se identifica el punto pseudopinch.
- Jones (1987). Primer uso del modelo de transferencia de calor vertical en HENS.
- Dolan y cols. (1989). Se usa por vez primera el annealing simulado en HENS.
- Floudas y Ciric (1989). Se presenta la formulación intercambio-red HENS simultáneo.
- Yuan y cols. (1989), Yee y Grossmann (1990) y Ciric y Floudas (1991). Proponen formulaciones de HENS a la vez.
- Frausto y cols. (2003). Proponen sustituir los coeficientes de transferencia de calor constantes por consideraciones de pérdida de carga disponible en el problema HENS.
- Ponce y cols. (2008). Proponen el diseño de redes de cambiadores con corrientes de proceso isotermas.

La mayoría de las contribuciones a la investigación sobre síntesis de redes de cambiadores de calor se pueden clasificar bien como métodos de síntesis secuencial o métodos de síntesis simultánea.

### 2.3. SÍNTESIS SECUENCIAL

Los métodos de síntesis secuencia usan la estrategia de dividir el problema HENS en una serie de subproblemas para reducir los esfuerzos de cálculo a la hora de obtener el diseño de la red. Estos métodos consisten normalmente en partir el problema HENS en un número de intervalos que normalmente se realiza dividiendo el rango de temperaturas del problema en intervalos de temperatura. Estos intervalos de temperatura son importantes para modelar el intercambio de calor de forma que cumplan las leyes de la termodinámica. El problema se descompone en una serie de subproblemas objetivo que se resuelven sucesivamente en orden de importancia decreciente con respecto del coste anual de la HEN basándose en reglas heurísticas. Normalmente esto se realiza con los siguientes tres problemas:

- El coste/uso mínimo de servicios
- El número mínimo de unidades de intercambiadores de calor
- El mínimo área/coste de la red de cambiadores

Estos problemas se resuelven según la heurística de encontrar la red de coste mínimo sujeta al mínimo número de unidades, sujeta al mínimo coste de servicios (Biegler y cols., 1997). También existe el concepto de superobjetivo para encontrar el mínimo gradiente de temperatura usado cuando se particiona el problema en intervalos de temperatura ya que el coste mínimo de la red es una función de este parámetro.

El método de síntesis secuencial no garantiza el diseño de una red con el coste mínimo anual. Los métodos de síntesis secuenciales se dividen en dos subcategorías: (1) métodos de diseño evolucionario tales como el método de diseño pinch (PDM) (Linnhoff y Hindmarsh, 1983; Linnhoff y Ahmad, 1990; Ahmad y cols., 1990; Linnhoff, 1993), temperatura dual (Colbert, 1982; Trivedi y cols., 1989a), y métodos pseudo pinch (Wood y cols., 1991; Trivedi y cols., 1989b; Rév y Fonyó, 1986ab) y (2) técnicas de programación matemática basadas en solución secuencial de programas lineales continuos y enteros (Cerdeira y cols., 1983; Papoulias y Grossmann, 1983) y problemas de optimización no lineal (Floudas y cols., 1986).

Usando los métodos de diseño pinch, tras la partición del problema en intervalos de temperatura basados en una aproximación de temperatura para la recuperación de calor (HRAT), se encuentran donde están los cuellos de botella para el ahorro energético cuando se determina la cantidad mínima de servicios necesarios. Estos cuellos de botella se denominan puntos pinch de recuperación de calor. La red de cambiadores se descompone entonces en subredes basándose en esos puntos pinch. Se obtiene un diseño inicial de la red partiendo del intervalo acotado por el punto pinch y acabando en un intervalo consistente en bien otro punto pinch o el primer o último intervalo de temperatura. Posteriormente se van obteniendo mejores redes basándose en diversas guías de diseño y reglas heurísticas hasta que se obtiene una red con el número de unidades deseado.

El método de aproximación de temperatura dual (DTAM) permite el intercambio de calor a través de puntos pinch usando una aproximación mínima de temperaturas en el cambiador (EMAT) menor que la HRAT como variable de decisión. DTAM tiene la tendencia de obtener redes con menos unidades y estructura más sencilla a costa de aumentar el área de intercambio.

El método de diseño pseudopinch (PPDM) (Wood y cols., 1991), que relaja la condición pinch, y el método de diseño pinch flexible (FPDM) (Suaysompol y Wood, 1991), que tiene una aproximación de temperatura mínima variable, son modificaciones posteriores del DTAM con el objetivo de diseñar configuraciones de redes de cambiadores aún más sencillas.

La síntesis secuencial mediante programación matemática consiste en resolver secuencialmente los tres subproblemas en que se descompone el problema HENS, siendo parte de la solución del problema objetivo previo parámetros en el siguiente problema. El primer problema es el problema del coste mínimo de los servicios. Este problema de programación lineal (LP) se puede formular para incluir la posibilidad de intercambios de calor prohibidos. Entre algunos de los modelos modificados están una formulación LP extendida para usar el DTAM presentada por Jezowski y Friedler (1992) y las formulaciones de programación lineal con enteros mezclados (MILP) y de programación no lineal con enteros mezclados (MINLP) de Galli y Cerda (1998abc) que permiten restricciones estructurales adicionales.

Usando los resultados obtenidos para los mínimos servicios, se resuelve una formulación MILP (Cerda y cols., 1983; Papoulias y Grossmann, 1983) para determinar la distribución de las cargas de calor con el mínimo número de intercambios. Normalmente, este problema se divide en subproblemas en los puntos pinch para minimizar el número de intercambiadores de calor. Se ha desarrollado un modelo de transferencia de calor vertical (Gundersen y Grossmann, 1990; Gundersen y cols., 1996) para encontrar un conjunto de intercambio de calor entre corrientes basado en rankings para producir redes con menores costes de área de los cambiadores.

Finalmente, se aplica un modelo de programación no lineal (NLP) (Floudas y cols., 1986) para desarrollar una HEN basada en una superestructura resolviendo el mínimo coste de capital con respecto del área de los cambiadores sujeto a la distribución de cargas térmicas e intercambios de calor entre corrientes obtenidos en el problema resuelto anteriormente.

Zhu (1995,1997) y Zhu y cols. (1995abc) han propuesto particionar el problema HENS en bloques que básicamente son un conjunto de intervalos de entalpía. Se determina un conjunto de intercambios de calor entre corrientes y se desarrolla una red de cambiadores para cada bloque de forma individual. Esta partición en bloques se propuso para reducir la dimensionalidad del problema HENS, que es uno de los inconvenientes de los métodos de programación matemática.

## 2.4. SÍNTESIS SIMULTÁNEA

El objetivo de la síntesis de redes de cambiadores de calor simultánea es encontrar la red óptima sin descomponer el problema en subproblemas. Los métodos de síntesis simultánea son formulaciones MINLP del problema HENS sujeto a varias suposiciones simplificadoras para facilitar la solución de estos modelos complejos.

Una de las primeras formulaciones HENS simultáneas fue propuesta por Yuan y cols. (1989). La superestructura desarrollada tenía la desventaja de no permitir la división o mezcla de corrientes. Se propuso una formulación MINLP que no incluía variables enteras en el objetivo.

Floudas y Ciric (1989, 1990) desarrollaron el modelo simultáneo de hiperestructura intercambio de calor-red para optimar todos los costes de capital de una HEN de una sola vez. Esta formulación MINLP determina el coste mínimo para los intercambiadores y el área combinando el modelo de transshipment de Papoulias y Grossmann (1983) para la selección del intercambio de calor entre corrientes y el modelo de hiperestructura de topología de la red de Floudas y cols. (1986) para determinar las áreas de los cambiadores, las temperaturas y los caudales en la red. La desventaja de esta formulación es que sigue basándose en la partición del problema HENS en intervalos de temperatura y por tanto el valor de HRAT debe especificarse antes de la solución, por lo que puede ser necesario resolver el problema para varios valores de HRAT antes de encontrar la red con el menor coste. Este método se aplicó posteriormente a problemas pseudopinch (Ciric y Floudas, 1990). El modelo de la hiperestructura fue posteriormente modificado por Ciric y Floudas (1991) para incluir la optimación del coste mínimo de los servicios. Esta formulación MINLP no necesita ninguna descomposición en objetivos de diseño y optima simultáneamente el coste anual mínimo de la red de cambiadores.

Yee y Grossmann (1990) propusieron otra formulación simultánea MINLP. Este modelo se basaba en la representación de la superestructura por etapas de Yee y cols. (1990) donde un intercambio de calor potencial entre cualquier par de corrientes calientes y frías puede ocurrir en cada etapa. Las suposiciones de mezcla isoterma, de que ninguna corriente dividida pueda circular por más de un intercambiador y que no haya bypass de corrientes hacen que las restricciones sean lineales mientras que la función objetivo es no lineal y no convexa. Daichendt y Grossmann (1994abc) han desarrollado un procedimiento de cribado preliminar para encontrar límites en el objetivo de esta formulación MINLP para reducir el esfuerzo de cálculo necesario para resolverla.

### 2.4.1. Planteamiento del problema

En el caso de la solución simultánea, el problema de síntesis de la red de cambiadores de calor se puede plantear de la siguiente forma:

Se parte de un conjunto dado de corrientes de proceso calientes HP que se van a enfriar y de un conjunto dado de corrientes de proceso frías CP que se van a calentar. También se especifican los productos del caudal por el  $C_p$  para las corrientes frías y calientes así como las temperaturas iniciales y las temperaturas objetivo bien como valores fijos o como desigualdades. También se dan un conjunto de servicios calientes HU y un conjunto de servicios fríos CU y sus correspondientes temperaturas. El objetivo es

determinar la red de cambiadores de calor que tiene un coste anual mínimo. La solución define la red dando:

1. Los servicios necesarios
2. Los intercambios de calor entre las corrientes y el número de cambiadores.
3. Las cantidades de calor y las temperaturas de operación para cada cambiador.
4. La configuración de la red y los caudales para todas las ramas.
5. El área de cada intercambiador.

También se pueden especificar restricciones en intercambios de corrientes, divisiones de corrientes y número de unidades. En este método no hace falta fijar parámetros, por ej., gradiente mínimo de temperatura, número de unidades e intercambios. Tampoco es necesario dividir la red en subredes ni está predeterminado la situación del punto pinch, sino que esos parámetros se optiman simultáneamente

#### 2.4.2. Desarrollo de la superestructura

La estrategia conlleva el desarrollo de una superestructura por etapas. En cada etapa pueden tener lugar los intercambios potenciales de calor entre cualquier par de corrientes calientes y frías. El número de etapas rara vez será superior al número de corrientes calientes  $N_H$  o al de corrientes frías  $N_C$ . La superestructura se crea como sigue (Figura 2.3):

1. Se fija el número de etapas, normalmente el valor máximo de  $\{N_H, N_C\}$
2. Para cada etapa, la correspondiente corriente se divide y se dirige a un cambiador para cada intercambio potencial entre la corriente caliente y cada corriente fría. Las salidas de los cambiadores se mezclan, definiendo así la corriente para la siguiente etapa.
3. Las temperaturas de salida de cada etapa se tratan como variables.
4. Aunque cada corriente de servicio se puede tratar como una corriente de proceso de caudal desconocido, se supondrá por simplicidad que las corrientes de servicio se colocan en los extremos de la secuencia de etapas.

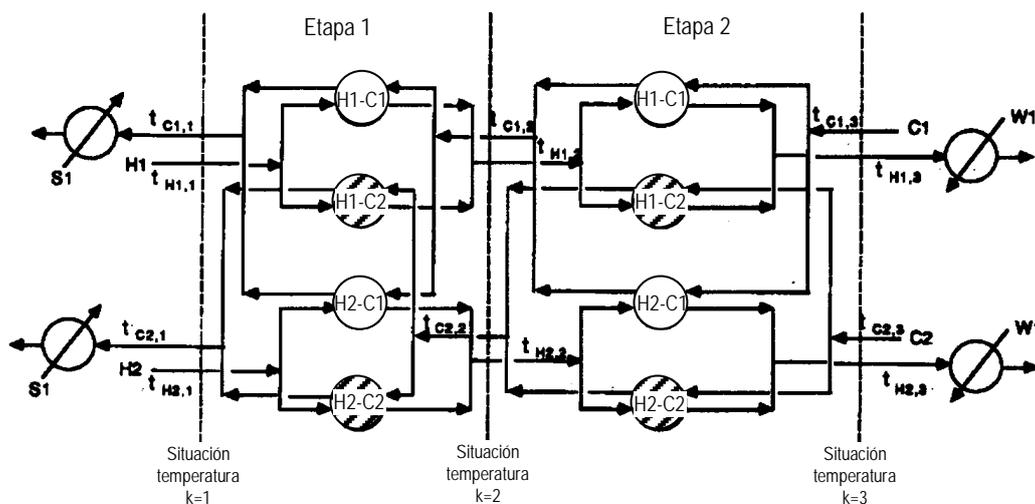


Figura 2.3.- Superestructura de la red de intercambiadores

La creación de la superestructura no necesita la identificación del punto pinch o la partición en subredes. Como puede verse en la Figura 2.3, las dos etapas se representan con 8 cambiadores, con cuatro posibles intercambios en cada etapa y temperaturas variables entre cada etapa. Las configuraciones alternativas en serie y paralelo están englobadas en esa estructura.

Suponer una mezcla isoterma de las corrientes significa una simplificación del modelo. Esto se ilustra en la Figura 2.4. La suposición específica que la temperatura de salida de una corriente dada en cada intercambiador en una etapa es la misma que la temperatura de salida de la corriente en esa etapa. Como se ve en la Figura 2.4, para la corriente H1, las temperaturas de salida de los dos intercambiadores H1-C1 y H1-C2 en cada etapa se suponen iguales. Al hacerlo así, se puede eliminar el balance de calor no lineal alrededor de cada cambiador y los balances de calor en los puntos de mezcla. Para cada corriente, solo hay que realizar un balance global de calor en cada etapa. Esta simplificación es importante sobre todo cuando los  $FC_p$  de las corrientes están fijados. En esos casos ya no se necesitan las variables de caudal en el modelo. Así se reduce la dimensionalidad del problema y el espacio factible del mismo se puede definir mediante un conjunto de restricciones lineales. Las no linealidades del modelo, que conllevan cálculos de las áreas usando las temperaturas de las etapas, quedan aisladas en la función objetivo, lo que facilita la solución.

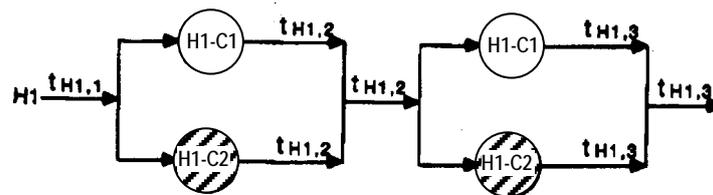


Figura 2.4.- Suposición de mezcla isoterma.

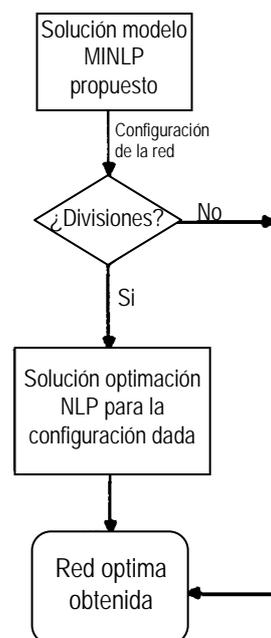
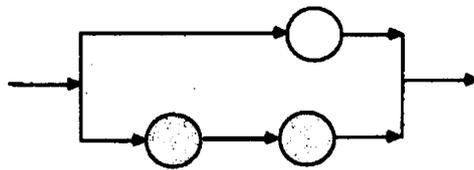


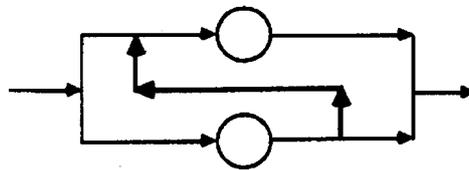
Figura 2.5.- Estrategia de síntesis propuesta.

Esa hipótesis de mezcla isoterma es rigurosa en el caso de que la red no conlleve divisiones de corrientes. Cuando sí hay divisiones de corrientes, la suposición puede llevar a una sobreestimación del área. En algunos casos, esta suposición puede no contemplar estructuras de red que son factibles con mezcla no isoterma. En ese caso se puede proponer el esquema mostrado en la Figura 2.5. La idea es usar el modelo MINLP para determinar una estructura óptima. Si la estructura conlleva división de corrientes, entonces se formula un problema de suboptimación NLP con la configuración fijada y caudales y temperaturas variables. La solución de ese subóptimo se considera como la solución final.

Específicamente, la superestructura no contempla el caso de una división de corriente que se prolonga en dos o más cambiadores en serie y el caso de bypasses. Estas estructuras se muestran en la Figura 2.6. En general, no contemplar bypasses en las corrientes no es una limitación importante ya que no suelen darse ni suelen ser favorables. En casos muy particulares, el uso de bypasses puede ayudar a disminuir el número de unidades a expensas de necesitar más área.



a) Una corriente dividida yendo a través de cambiadores en serie



b) Bypass de una corriente

Figura 2.6.- Limitaciones de la superestructura.

La configuración más importante que no tiene en cuenta la superestructura es el caso donde una corriente dividida atraviesa varios cambiadores en serie. En problemas pequeños donde no hay mucha flexibilidad a la hora de seleccionar estructuras, esta limitación puede provocar que la red necesite más área. Pero en el caso de problemas grandes, la restricción no es importante ya que la mayor flexibilidad en el intercambio de calor entre corrientes y la selección de la configuración pueden dar lugar a una red igualmente buena sin necesidad de dividir corrientes.

### 3. PROGRAMA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE UNA RED DE CAMBIADORES SIGUIENDO EL MÉTODO SECUENCIAL DE SÍNTESIS

En este apartado se mostrará cómo se ha desarrollado un software en Matlab® para el diseño de una red de cambiadores de calor siguiendo el método secuencial de síntesis. Para explicar el desarrollo del software se usará un problema de referencia para facilitar la comprensión de las soluciones tomadas.

El software consta de una pantalla donde están situadas las diferentes acciones. En la Figura 3.1 se muestra la pantalla principal.

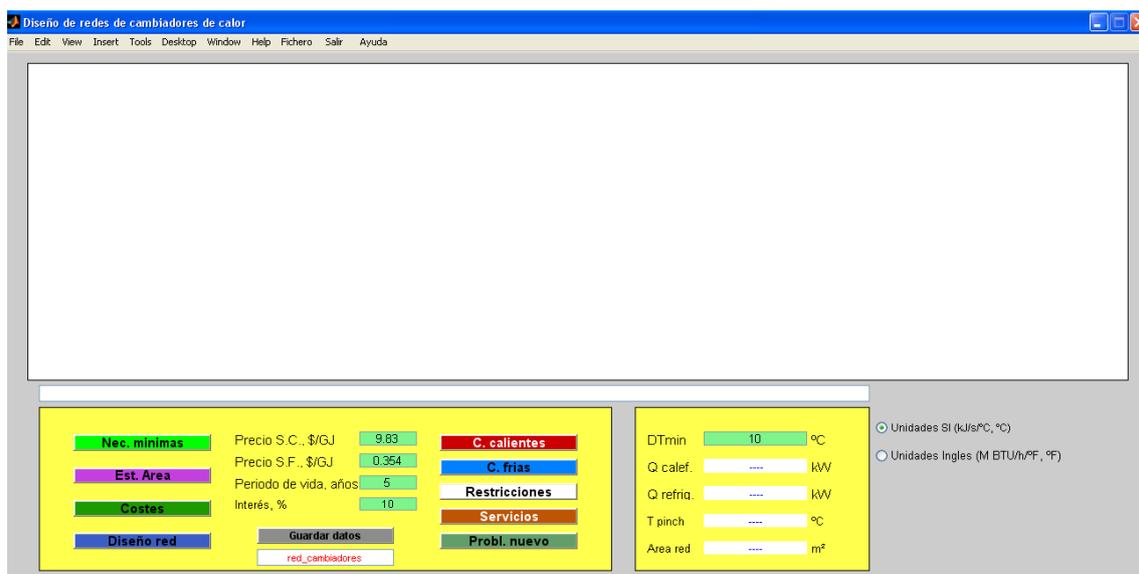


Figura 3.1.- Pantalla principal del software desarrollado.

El programa permite introducir los datos en unidades del sistema internacional o en unidades inglesas. Los datos iniciales que necesita el programa son:

1. El producto del caudal por el calor específico para cada una de las corrientes.
2. Temperatura de entrada de cada corriente.
3. Temperatura de salida de cada corriente.
4. Coeficientes individuales de transmisión de calor para cada corriente.
5. El gradiente mínimo de temperatura permitido para realizar un intercambio de calor.

Estos datos se pueden introducir al programa bien si están previamente grabados en un archivo mediante la pestaña *Fichero* en la barra del menú o bien mediante las teclas de *C. calientes* y *C. frías* mostradas en la Figura 3.1.

Los datos del problema de referencia se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1.- Datos del problema de referencia.

Corriente	FC <sub>p</sub> , kW/°C	T de entrada, °C	T de salida, °C	h, kW/m <sup>2</sup> /°C
<b>1, caliente</b>	1	250	120	0,01
<b>2, caliente</b>	4	200	100	0,1
<b>3, fría</b>	3	90	150	0,1
<b>4, fría</b>	6	130	190	0,01

En la tabla se puede apreciar que dos corrientes necesitan enfriarse. Estas, como se ha comentado previamente, se denominarán corrientes calientes. De la misma manera las corrientes que tienen que calentarse (aumentar su temperatura) serán las corrientes frías. El problema de referencia consta de dos corrientes frías y dos corrientes calientes.

### 3.1. MÍNIMAS NECESIDADES DE SERVICIOS

En cualquier proceso hay que calentar una serie de corrientes y hay que enfriar otras debido a consideraciones de proceso. El punto de partida en el análisis de integración energética es el cálculo de las mínimas necesidades de calefacción y enfriamiento para la red de cambiadores de calor. Se trata de realizar esos cálculos sin haber diseñado una red de cambiadores de calor.

Si se calculase el calor disponible en las corrientes calientes y el calor necesario para las corrientes frías, la diferencia entre esos valores sería el calor neto que se debería eliminar o suministrar al conjunto para satisfacer la primera ley de la Termodinámica. Este cálculo no considera el hecho de que sólo se puede transferir calor de una corriente caliente a otra fría si la temperatura de la corriente caliente es superior a la de la fría. Es decir, cualquier red de cambiadores de calor que se desarrolle deberá satisfacer la segunda ley de la Termodinámica al igual que la primera.

Una forma muy sencilla de tener en cuenta esta segunda ley en el análisis de integración energética es crear un diagrama de intervalos de temperatura. Si se elige un gradiente mínimo de 10 °C entre las corrientes calientes y frías, se puede establecer un diagrama con dos escalas de temperatura, una para las corrientes calientes y otra para las frías. En ese diagrama se representan los datos de las corrientes calientes y frías. A continuación se establecen una serie de intervalos de temperatura que corresponden al comienzo y final de cada corriente, es decir, las temperaturas de entrada y salida. En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de intervalos de temperatura para el problema de referencia.

En cada intervalo se puede transferir calor de las corrientes calientes a las corrientes frías, ya que hay un gradiente adecuado (el que se ha elegido previamente). Aunque también se puede transferir calor desde las corrientes calientes en los intervalos de temperatura más altos a las corrientes frías en niveles más bajos, como punto de partida se va a considerar la transferencia de calor en cada intervalo por separado. El calor transferido en cada intervalo vendrá dado por:

$$Q_i = \left[ \sum (FC_p)_{cal,i} - \sum (FC_p)_{fria,i} \right] \Delta T_i \quad (3.1)$$

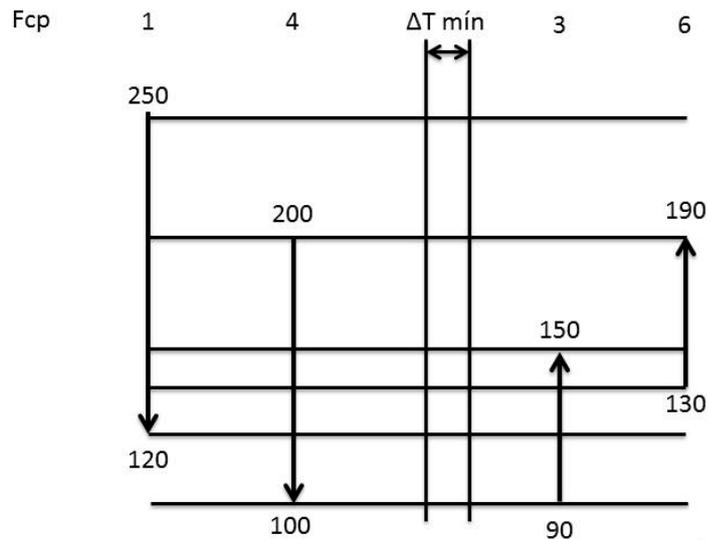


Figura 3.2.- Diagrama de intervalos de temperatura para el problema de referencia.

Una forma en que se puede satisfacer las necesidades de calefacción y de enfriamiento en cada intervalo de temperatura es sencillamente transferir el exceso de calor a un servicio frío y suministrar cualquier necesidad de calor desde un servicio caliente. Pero eso correspondería a una mala solución ingenieril, ya que se está transfiriendo calor desde el intervalo de mayor temperatura a un servicio frío en vez de usar este calor disponible para aportar energía a los intervalos de menor temperatura que la necesitan. En vez de usar esa disposición, se tomará todo el calor disponible en el intervalo de mayor temperatura y se llevará al siguiente intervalo inferior. Como la transferencia se está realizando a intervalos de menor temperatura, se está cumpliendo siempre la segunda ley de la Termodinámica.

Haciendo esos cálculos, puede ocurrir que no haya transferencia de calor entre dos de esos intervalos de temperatura. A la temperatura media entre las dos escalas se le llama la temperatura “pinch”. Esa temperatura “pinch” descompone el problema de diseño en dos partes. Por encima de la temperatura “pinch” sólo se suministra calor, mientras que por debajo sólo se retira calor a un servicio frío.

Cualquier cantidad adicional de calor,  $X$ , suministrada desde el servicio caliente irá en cascada por todo el proceso, cruzará la temperatura “pinch” y originará una retirada de calor extra de valor  $X$ . Si se añade calor por debajo de la temperatura “pinch” también se traduce en una retirada de calor en el servicio frío del mismo valor. Igualmente si se retira calor al servicio frío por encima de la temperatura “pinch”, eso se traduce en la necesidad de calor adicional obtenida del servicio caliente. En todos los casos, se necesita más energía para calefacción y enfriamiento que la correspondiente a las necesidades mínimas establecidas.

Estas observaciones permiten establecer varias reglas que, si se siguen, dan como resultado un sistema de intercambio de calor que sólo consume las mínimas necesidades energéticas. Estas reglas son:

- No transferir calor a través de la temperatura “pinch”.
- No usar un servicio caliente por debajo de la temperatura “pinch”.
- No usar un servicio frío por encima de la temperatura “pinch”.

Otro aspecto a tener en cuenta es el valor óptimo del gradiente mínimo de temperatura. Las necesidades de calefacción y enfriamiento se han calculado partiendo de un valor dado para el gradiente mínimo de temperatura. Si ese gradiente aumentase, las necesidades energéticas serían mayores, pero el área de los cambiadores sería menor. Luego habrá un valor óptimo del gradiente mínimo de temperatura, que además cambiará seguramente los caudales de las corrientes de proceso.

En la Figura 3.3 se muestra el cálculo de las mínimas necesidades de los servicios así como de la temperatura pinch para el problema de referencia.

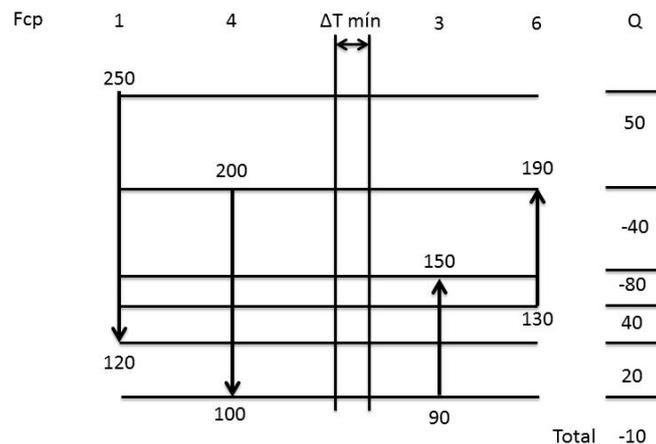


Figura 3.3.- Necesidades de calor en cada intervalo del diagrama.

El calor intercambiado en cada intervalo se calcula de manera sencilla con la ecuación (3.1). El software diseñado aplica dicha ecuación para cada intervalo, calculando así el calor disponible. Se comienza a transferir calor desde los intervalos superiores a los inferiores (satisfaciendo la segunda ley de la Termodinámica debido al gradiente mínimo de temperatura fijado), como se muestra en la Figura 3.4.

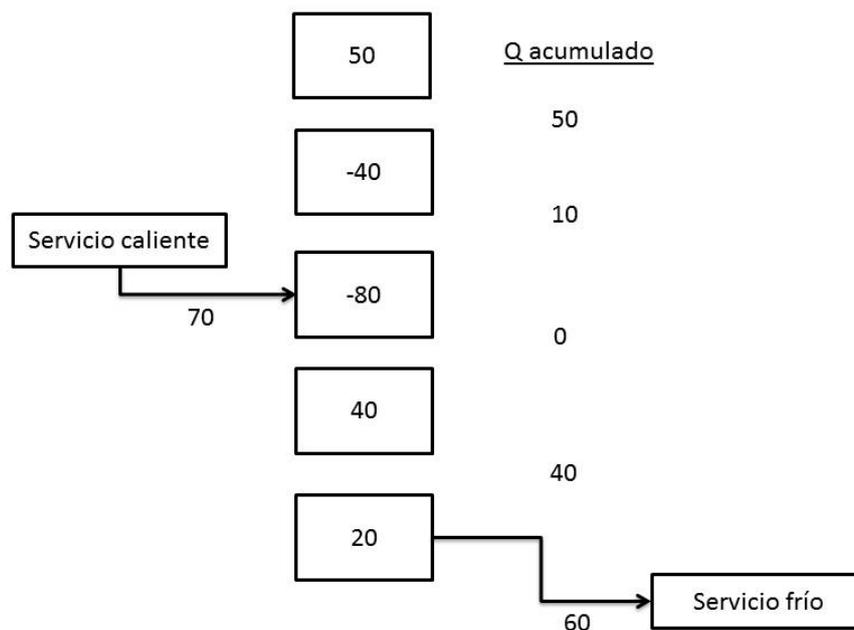


Figura 3.4.- Transferencia de calor entre intervalos de temperatura.

El cálculo de las necesidades mínimas de calefacción y enfriamiento así como la temperatura pinch se realiza mediante la tecla *Nec. mínimas* de la pantalla principal. Inicialmente, el programa calcula un vector con las temperaturas correspondientes a los diferentes niveles de temperatura, como se muestra en la Figura 3.2, así como las cantidades de calor netas correspondientes a cada nivel de temperatura,  $Q_i$ . Posteriormente se calculan las mínimas necesidades de calefacción y de refrigeración.

Este problema se puede formular como un problema similar al clásico problema de transporte de reparto de mercancías suponiendo que no hay restricciones entre los intercambios entre cualquier par de corrientes. El modelo de transporte busca determinar la red óptima para transportar un producto desde las fábricas donde se produce hasta los mercados donde se consume.

Se puede hacer una analogía con el problema de recuperación de calor. El calor puede suponerse que es el producto que se envía desde las corrientes calientes a las corrientes frías a través de intervalos de temperatura que tienen en cuenta las restricciones termodinámicas a la transferencia de calor.

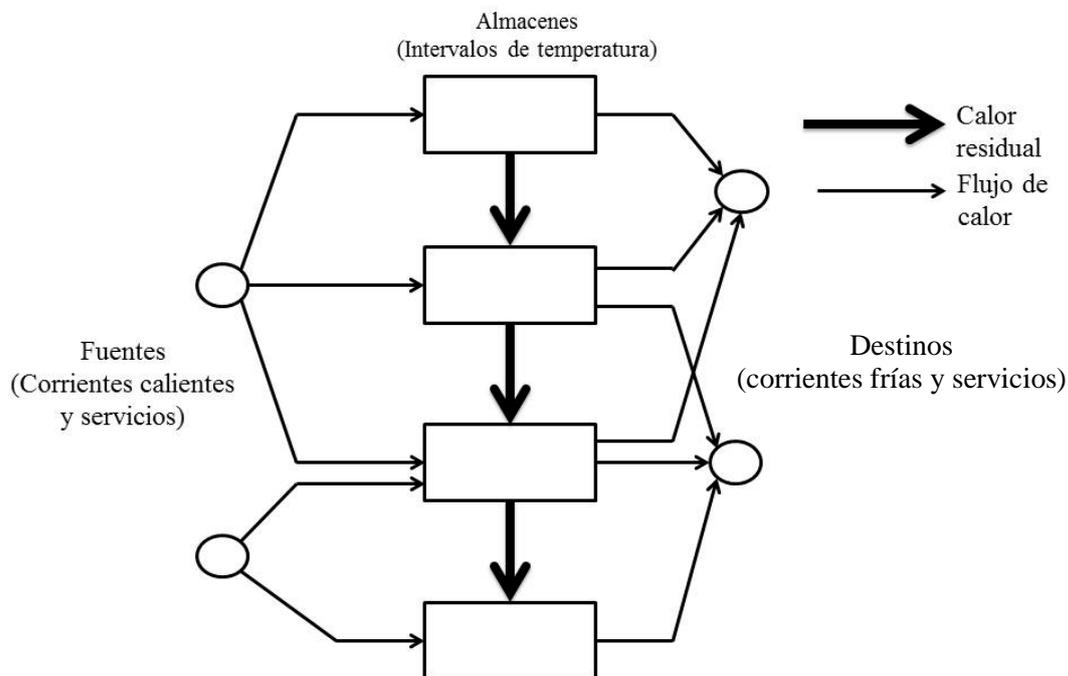


Figura 3.5.- Analogía entre la red de cambiadores de calor y el modelo de transporte.

Como se muestra en la Figura 3.5, se puede considerar que el calor fluye de las corrientes calientes a los correspondientes intervalos de temperatura y luego a las corrientes frías en el mismo intervalo yendo el calor restante al siguiente intervalo inferior de temperatura. El patrón del flujo de calor en cada intervalo se muestra en la Figura 3.6 y es como sigue:

- El calor fluye a un intervalo particular desde todas las corrientes calientes y servicios calientes cuyo rango de temperatura incluye ese intervalo de temperatura.
- El calor sale de un intervalo particular a las corrientes frías y a los servicios fríos cuyo rango de temperatura incluya al intervalo de temperatura.

- c) El calor sale de un intervalo particular al siguiente intervalo de temperatura inferior. Este calor es el residuo (exceso) que no se puede utilizar en el presente intervalo y que por tanto tiene que ir a un intervalo de menor temperatura.
- d) El calor fluye a un intervalo particular de temperatura desde el intervalo previo que está a más temperatura. Este calor es el residual (exceso) que no se puede utilizar en el intervalo de mayor temperatura.

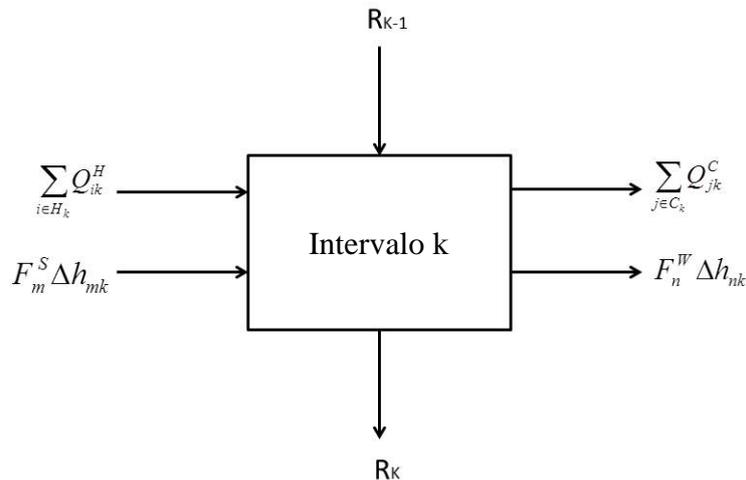


Figura 3.6.- Flujo de calor para cada intervalo  $k$  de temperatura.

En este problema todos los flujos de calor de las corrientes calientes a los intervalos de temperatura y de los intervalos de temperatura a las corrientes frías normalmente están fijos. En ese caso las únicas variables en la red son los caudales de calor residual de un intervalo de temperatura al siguiente y los caudales de los servicios fríos y calientes.

### 3.1.1.- MÍNIMAS NECESIDADES ENERGÉTICAS SIN RESTRICCIONES

Este problema se puede formular suponiendo que no hay ningún intercambio prohibido entre pares de corrientes. El primer paso es realizar una partición del rango total de temperaturas de todas las corrientes en  $K$  intervalos de temperatura. Se puede usar cualquier método de partición. Los intervalos se etiquetan del nivel más alto ( $k = 1$ ) hasta el nivel más bajo ( $k = K$ ) de temperatura, con cada intervalo  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) teniendo un cambio de temperatura  $\Delta T_k$ . Se definen los siguientes conjuntos para identificar la situación de todas las corrientes y servicios respecto de los intervalos de temperatura:

$$H_k = \{i \mid \text{la corriente caliente } i \text{ está presente en el intervalo } k\}$$

$$C_k = \{j \mid \text{la corriente fría } j \text{ está presente en el intervalo } k\}$$

$$S_k = \{m \mid \text{el servicio caliente } m \text{ está presente en el intervalo } k\}$$

$$W_k = \{n \mid \text{el servicio frío } n \text{ está presente en el intervalo } k\}$$

Sea  $Q_{ik}^H$  el calor de la corriente caliente  $i$  en el intervalo de temperatura  $k$ . Esa cantidad de calor vendrá dada por:

$$Q_{ik}^H = FCp_{ik} \Delta T_k^i \quad (3.2)$$

donde  $\Delta T_k^i$  es el cambio de temperatura de la corriente  $i$  en el intervalo  $k$ . Igualmente, la cantidad de calor  $Q_{jk}^C$  que va a la corriente fría  $j$  en el intervalo de temperatura  $k$  se calcula como:

$$Q_{jk}^C = FCp_{jk} \Delta T_k^j \quad (3.3)$$

Todos los servicios se colocan en los intervalos apropiados dependiendo de sus temperaturas de entrada y salida. Si  $\Delta h_{mk}$  es el cambio de entalpía del servicio caliente  $m$  en el intervalo de temperatura  $k$ , entonces la cantidad de calor  $Q_{mk}^S$  que entra al intervalo  $k$  es:

$$Q_{mk}^S = F_m^S \Delta h_{mk} \quad (3.4)$$

Igualmente, la cantidad de calor  $Q_{nk}^W$  del servicio frío en el intervalo de temperatura  $k$  es:

$$Q_{nk}^W = F_n^W \Delta h_{nk} \quad (3.5)$$

Llamando  $R_k$  al calor residual que sale del intervalo  $k$  y realizando un balance global de calor en cada intervalo  $k$ , el modelo para consumo mínimo de los servicios viene dado por:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{m \in S} F_m^S + \sum_{n \in W} F_n^W \quad (3.6)$$

*Sujeto a:*

$$R_k - R_{k-1} - \sum_{m \in S_k} F_m^S \Delta h_{mk} + \sum_{n \in W_k} F_n^W \Delta h_{nk} = \sum_{i \in H_k} Q_{ik}^H - \sum_{j \in C_k} Q_{jk}^C; \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$F_m^S \geq 0 \quad m \in S, \quad F_n^W \geq 0 \quad n \in W$$

$$R_0 = R_K = 0, \quad R_k \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, K-1$$

Los valores óptimos de los caudales de los servicios calientes y fríos ( $F_m^S, m = 1, NS$ , y  $F_n^W, n = 1, NW$ ) y las cantidades de calor residual  $R_k$  de cada intervalo  $k$  se pueden determinar fácilmente resolviendo el problema de programación lineal dado por las ecs.(3.6).

La ocurrencia de los puntos pinch tiene lugar entre intervalos de temperatura sin flujo de calor residual, o lo que es lo mismo, en cualquier punto donde  $R_k$  es igual a cero.

Este problema tiene un número de variables =  $NS+NW+K-1$  con  $K$  filas. Se trata de un problema de programación lineal de tipo pequeño. Por ejemplo, para 20 corrientes de proceso, 3 servicios calientes y 1 servicio frío, el número máximo de intervalos de temperatura es 23, con lo que el modelo tendría 26 variables y 23 filas.

En el programa se ha supuesto un problema menos general, con un único servicio caliente y un único servicio frío. El cálculo se hace resolviendo el problema de programación lineal mediante la función de Matlab®

$$[x, fval, exitflag] = \text{linprog}(fo, A, b, Aeq, beq, lb)$$

donde  $fo$  es la función objetivo, sujeta a las restricciones de desigualdad  $A*x \leq b$  y a las restricciones de igualdad  $Aeq*x = beq$ , y  $lb$  es un vector con los límites inferiores de las variables de optimización  $x$ . En este caso  $A = [ ]$  y  $b = [ ]$ , ya que solo hay restricciones de igualdad.

El problema de programación lineal corresponde a:

$$\text{Minimizar } R_1 \quad (3.7)$$

Sujeto a:

$$R_i - R_{i+1} = -Q_i ; \quad i = 1, \dots, n$$

$$R_i \geq 0 ; \quad i = 1, \dots, n+1$$

donde  $R_i$  son los flujos de calor que van de un intervalo de temperatura al intervalo inferior, siendo  $R_1$  las necesidades de calefacción y  $R_{n+1}$  las de refrigeración, y  $Q_i$  son las cantidades netas de calor transferidas de las corrientes calientes a las frías en cada intervalo de temperatura según la ec.(3.1).

Solo se necesita  $R_1$  en la función objetivo porque si se minimizan las necesidades de calefacción también quedan minimizadas las necesidades de refrigeración. De esta forma, las restricciones de igualdad quedarán como:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \cdot \\ R_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Q_1 \\ -Q_2 \\ \cdot \\ -Q_n \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

En la Figura 3.7 se muestran los resultados para el problema de referencia.

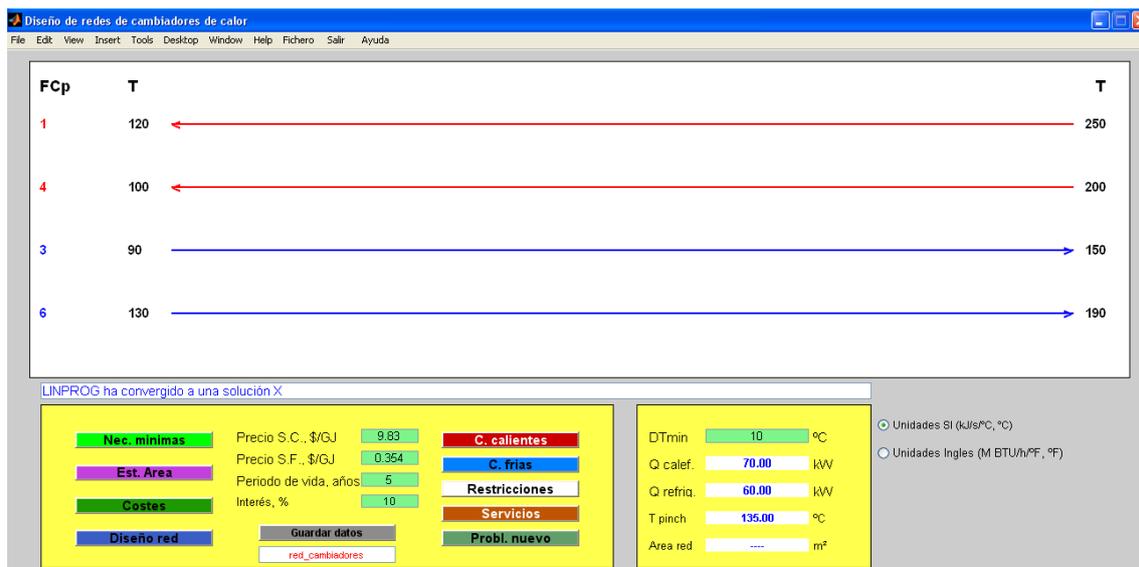


Figura 3.7.- Necesidades mínimas de calefacción y refrigeración y temperatura pinch para el problema de referencia.

### 3.1.2.- MÍNIMAS NECESIDADES ENERGÉTICAS CON RESTRICCIONES EN LOS INTERCAMBIOS

Hasta ahora se ha supuesto que cualquier corriente caliente puede intercambiar calor con cualquiera de las corrientes frías siempre que haya un gradiente mínimo de temperatura. A veces hay situaciones prácticas que lo impiden. Por ejemplo, podría darse la situación donde no se desee intercambiar calor entre dos corrientes por motivos de seguridad. Pueden darse muchas razones que desaconsejen intercambiar calor entre corrientes dando lugar a restricciones. Como resultado de esas restricciones, normalmente, las mínimas necesidades de calefacción y refrigeración suelen aumentar.

El programa también tiene en cuenta esta problemática, y antes de proceder al cálculo de las mínimas necesidades energéticas se pueden establecer las restricciones. En la pantalla principal eso se lleva a cabo con la tecla *Restricciones*. Al apretar la tecla el programa solicita el número de restricciones que se van a introducir y posteriormente las parejas de restricciones. Una vez introducida la información ya se puede proceder al cálculo de las mínimas necesidades energéticas. Se ha seguido el modelo planteado por Papoulias y Grossmann (1983), que es similar al anterior. Para plantear el modelo, se supone que el conjunto de intercambios prohibidos se especifica para algunas corrientes de proceso y viene dado por:

$$P = \{(i,j)|i \in H, j \in C, \text{ el intercambio entre } i \text{ y } j \text{ está prohibido}\} \quad (3.9)$$

Las corrientes calientes y frías que pertenecen al conjunto  $P$  se pueden identificar por los subconjuntos:

$$HP = \{i | i \in P\}, CP = \{j | j \in P\} \quad (3.10)$$

El resto de las corrientes de proceso y servicios se puede considerar que están agrupadas en la corriente caliente  $h$  y en la corriente fría  $c$ . Si la partición de temperaturas se realiza en todas las corrientes originales de proceso y servicios como en el problema anterior, el contenido de calor de las corrientes agrupadas calientes y frías en cada intervalo  $k$  vendrá dado por:

$$Q_{hk}^H = \sum_{\substack{i \in H \\ i \notin HP}} Q_{ik}^H + \sum_{m \in S_k} F_m^S \Delta h_{mk}, \quad Q_{ck}^C = \sum_{\substack{j \in C \\ j \notin CP}} Q_{jk}^C + \sum_{n \in W_k} F_n^W \Delta h_{nk} \quad (3.11)$$

Como el conjunto reducido de corrientes a analizar está dado por:

$$H' = \{i | i=h, i \in HP\}, \quad C' = \{j | j=c, j \in CP\} \quad (3.12)$$

a cada corriente caliente  $i \in H'$  se le asignará un calor residual  $R_{ik}$ . Igualmente, al calor intercambiado entre la corriente caliente  $i \in H'$  y la corriente fría  $j \in C'$  en el intervalo de temperatura  $k$  se le denominará  $Q_{ijk}$ . Luego, para los intercambios prohibidos,  $Q_{ijk}=0$ ,  $(i,j) \in P$ ,  $k=1,2,\dots,K$ .

Hay que darse cuenta de que existe la posibilidad de que una corriente caliente  $i \in H'$  intercambie calor con una corriente fría  $j \in C'$ ,  $(i,j) \notin P$  en un intervalo  $k$  donde la corriente  $i$  no esté realmente presente. Esto puede suceder si la corriente caliente  $i$  está presente en un intervalo de mayor temperatura  $\bar{k} < k$  de forma que el intercambio de calor tiene lugar mediante el calor residual  $R_{ik}$ . Por eso, es conveniente definir los

subconjuntos de corrientes para un potencial intercambio de calor en cada intervalo  $k$ , que vienen dados por:

$$\begin{aligned} H_k' &= \{i | i \in H', \text{ la corriente } i \text{ está presente en el intervalo } \bar{k} \leq k \}, \\ C_k' &= \{j | j \in C', \text{ la corriente } j \text{ está presente en el intervalo } k \} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Realizando balances individuales de calor para el conjunto reducido de las corrientes calientes y frías en cada intervalo, el problema de minimizar las necesidades energéticas cuando hay intercambios restringidos vendrá dado por el siguiente modelo:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{m \in S} F_m^S + \sum_{n \in W} F_n^W \quad (3.14)$$

sujeto a:

$$R_{i,k} - R_{i,k-1} + \sum_{j \in C_k'} Q_{ijk} = Q_{ik}^H \quad i \in H_k'; \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$\sum_{i \in H_k'} Q_{ijk} = Q_{jk}^C \quad j \in C_k'; \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{hk}^H &= \sum_{\substack{i \in H \\ i \notin HP}} Q_{ik}^H + \sum_{m \in S_k} F_m^S \Delta h_{mk} \\ Q_{ck}^C &= \sum_{\substack{j \in C \\ j \notin CP}} Q_{jk}^C + \sum_{n \in W_k} F_n^W \Delta h_{nk} \end{aligned} \right\} k = 1, 2, \dots, K$$

$$Q_{ijk} = 0 \quad (i, j) \in P, \quad Q_{ijk} \geq 0 \quad i \in H_k', \quad j \in C_k', \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$F_m^S \geq 0 \quad m \in S, \quad F_n^W \geq 0 \quad n \in W$$

$$R_{i,0} = R_{i,K} = 0, \quad R_{i,k} \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, K-1, \quad i \in H'$$

Hay que tener en cuenta que en la implementación de este modelo, las variables  $Q_{hk}^H, Q_{ck}^C$  pueden eliminarse con la tercera y cuarta restricción de igualdad en (3.14).

Por eso, las variables del modelo son  $F_m^S, F_n^W, Q_{ijk}$ , y  $R_{ik}$ . Aunque el tamaño del modelo depende de los datos particulares del problema, es posible calcular los siguientes límites superiores sobre el número de variables (columnas) y filas:

$$\text{N}^\circ \text{ máximo de variables} = NS + NW + (NHP + 1)[(NCP + 2)K - 1]$$

$$\text{N}^\circ \text{ máximo de filas} = (NHP + 1)(NCP + 1)K$$

Donde NHP es el número de corrientes calientes restringidas y NCP es el número de corrientes frías restringidas.

En el problema de referencia, a modo de ejemplo, se puede restringir el intercambio entre la corriente caliente de  $FC_p = 1 \text{ kW/}^\circ\text{C}$  (corriente 1) con la corriente fría de  $FC_p = 6 \text{ kW/}^\circ\text{C}$  (corriente 4). En la Tabla A.1 del Apéndice A se muestran los coeficientes de las restricciones de igualdad correspondientes a la ec. (3.14) del problema de programación lineal resultante. En este caso las necesidades de calefacción son 120 kW y las de refrigeración 110 kW frente a 70 kW y 60 kW respectivamente cuando no había restricciones a la hora de intercambiar calor entre las corrientes frías y calientes.

### 3.1.3.- CÁLCULO DE LAS CURVAS COMPUESTAS Y LA GRAN CURVA COMPUESTA

Una vez calculadas las necesidades mínimas de calefacción y refrigeración, el programa calcula las curvas de temperatura vs. entalpía acumulada para el conjunto de corrientes calientes y el conjunto de corrientes frías. En esas dos curvas se ven gráficamente las necesidades mínimas de calefacción y refrigeración así como la temperatura pinch.

Para construir la curva de temperatura vs. entalpía acumulada del conjunto de corrientes calientes se toma como referencia la temperatura más baja de todas las corrientes calientes y se le asigna una entalpía cero. Posteriormente se va ascendiendo en los intervalos de temperatura calculando la entalpía de cada intervalo:

$$H_i = \sum_j FC_{p_{cal,i}} \cdot (\Delta T_i) \quad (3.15)$$

donde  $H_i$  es la entalpía acumulada en cada intervalo, siendo  $\sum_j FC_{p_{cal,i}}$  el sumatorio del producto del caudal de las corrientes por su  $C_p$  presentes en el intervalo y  $\Delta T_i$  la diferencia de temperaturas para cada intervalo. Finalmente, se representa la temperatura vs. la suma de las entalpías. El procedimiento es igual para las corrientes frías salvo que en ese caso la entalpía correspondiente a la temperatura inicial (la menor temperatura de todas las corrientes frías) es el valor de las mínimas necesidades de refrigeración.

En la Figura 3.8a se muestran las curvas de temperatura vs. entalpía acumulada para el problema de referencia.

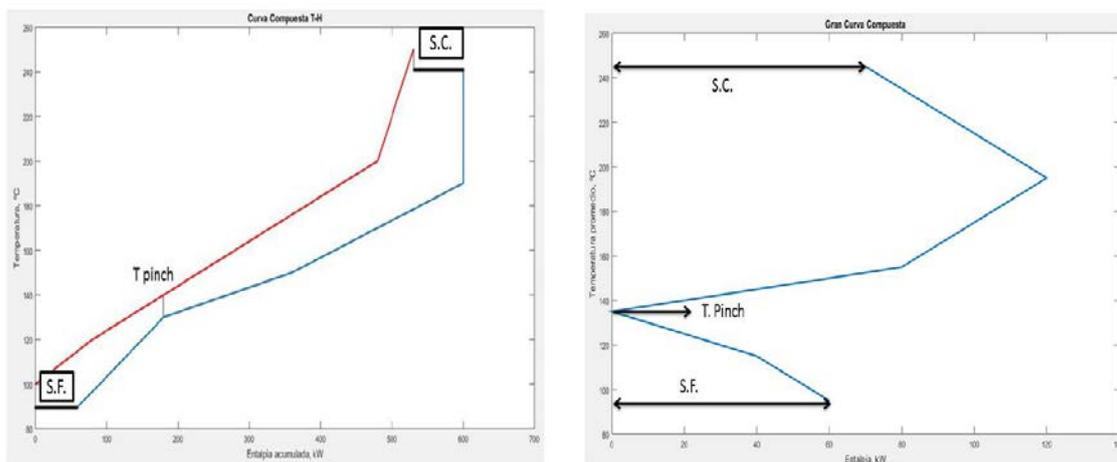


Figura 3.8.- Curva compuesta temperatura-entalpía y gran curva compuesta para el problema de referencia.

Otra curva utilizada para el análisis de estos problemas es la gran curva compuesta. Es una representación de las temperaturas de los diferentes intervalos frente a los flujos de calor que pasan de un intervalo de temperatura superior a un intervalo de temperatura inferior. La información que se extrae de esta curva es la misma que la que ofrece la curva compuesta, aunque de forma más directa. En la Figura 3.8b se muestra la gran curva compuesta del problema de referencia.

### 3.2. ESTIMACIÓN DEL ÁREA TOTAL DE LA RED DE CAMBIADORES

Un parámetro muy importante a considerar en una red de cambiadores de calor es el área total de intercambio de calor. Este parámetro dota al diseñador de información para realizar una estimación del coste de la red de cambiadores antes de diseñarla.

Para calcular el área de la red, hay que incluir las corrientes de los servicios calientes y fríos (si los hay) para crear las curvas de temperatura-entalpía (curvas compuestas). Esas curvas se dividen en intervalos de entalpía verticales. Suponiendo que la transferencia de calor es en contracorriente, el área necesaria para el intervalo  $k$  de entalpía para una transmisión de calor vertical viene dada por (Townsend y Linnhoff, 1984):

$$A_K = \frac{1}{\Delta T_{ML_k}} \cdot \sum_{ij} \frac{Q_{ij,k}}{U_{ij,k}} \quad (3.16)$$

donde  $\Delta T_{ML_k}$  es la media logarítmica de temperatura para el intervalo de entalpía  $k$ ,  $Q_{ij,k}$  es el intercambio de calor entre la corriente caliente  $i$  y la fría  $j$  en el intervalo de entalpía  $k$ ,  $U_{ij,k}$  es el coeficiente global de transmisión de calor entre la corriente caliente  $i$  y la fría  $j$  en el intervalo de entalpía  $k$ .

como:

$$\sum_{ij} \frac{Q_{ij,k}}{U_{ij,k}} = \sum_{ij} Q_{ij,k} \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_j} \right) = \sum_{ij} \frac{Q_{ij,k}}{h_i} + \sum_{ij} \frac{Q_{ij,k}}{h_j} \quad (3.17)$$

Sustituyendo la ec. (3.17) en la ec. (3.16)

$$A_K = \frac{1}{\Delta T_{ML_k}} \cdot \left[ \sum_{ij} \frac{Q_{ij,k}}{h_i} + \sum_{ij} \frac{Q_{ij,k}}{h_j} \right] \quad (3.18)$$

Como el intervalo de entalpía  $k$  está equilibrado, la suma de los intercambios de calor de las corrientes frías con la corriente caliente  $i$  da el calor intercambiado por la corriente caliente  $i$ :

$$\sum_j Q_{ij,k} = q_{i,k} \quad (3.19)$$

donde  $q_{i,k}$  es el calor de la corriente caliente  $i$  en el intervalo de entalpía  $k$  y  $J$  es el número total de corrientes frías en el intervalo de entalpía  $k$ . De igual manera:

$$\sum_i Q_{ij,k} = q_{j,k} \quad (3.20)$$

donde  $q_{j,k}$  es el calor de la corriente fría  $j$  en el intervalo de entalpía  $k$  e  $I$  es el número total de corrientes calientes en el intervalo de entalpía  $k$ . Según eso:

$$\sum_{ij} \frac{Q_{ij,k}}{h_i} = \sum_i \frac{q_{i,k}}{h_i} \quad (3.21)$$

$$\sum_{ij} \frac{Q_{ij,k}}{h_j} = \sum_j \frac{q_{j,k}}{h_j} \quad (3.22)$$

Sustituyendo esas ecuaciones en la ec.(3.18):

$$A_K = \frac{1}{\Delta T_{ML_k}} \cdot \left( \sum_i \frac{q_{i,k}}{h_i} + \sum_j \frac{q_{j,k}}{h_j} \right) \quad (3.23)$$

Extendiendo la ecuación a todos los intervalos de entalpía de la curva compuesta se tiene:

$$A_{TOTAL} = \sum_k \frac{1}{\Delta T_{ML_k}} \cdot \left( \sum_i \frac{q_{i,k}}{h_i} + \sum_j \frac{q_{j,k}}{h_j} \right) \quad (3.24)$$

En la Figura 3.9 se muestra el diagrama de temperatura-entalpía para el problema de referencia, donde se han trazado los diferentes intervalos de entalpía. Para ello, en el problema de referencia se ha supuesto que hay un servicio caliente que cede calor latente a 200 °C y un servicio frío que entra a 80 °C y se calienta hasta 90 °C. Los servicios quedan reflejados por el color verde.

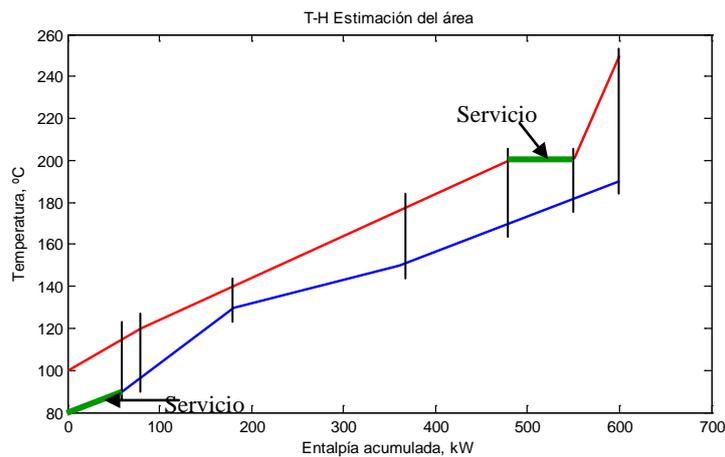


Figura 3.9.- Curva temperatura-entalpía para el cálculo del área.

Para el cálculo se necesita conocer el valor del coeficiente individual de transmisión de calor para cada corriente,  $h_{ij}$ , y para los servicios caliente y frío. Esos datos se introducen inicialmente junto con el resto de datos de partida para las corrientes calientes y frías. Los valores del coeficiente individual de transmisión de calor para los servicios caliente y frío en el problema de referencia han sido  $0,1 \text{ kW/m}^2/\text{°C}$ .

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados dados por el programa, para el problema de referencia, para cada intervalo de entalpía, donde  $C_1$  y  $C_2$  son las dos corrientes calientes, SF es el servicio frío,  $F_1$  y  $F_2$  son las dos corrientes frías y SC el servicio caliente.

Tabla 3.2.- Estimación del área de la red para cada intervalo de entalpía.

k	$\Delta T_{m}, ^\circ\text{C}$	$C_1, \text{kW}$	$C_2, \text{kW}$	SF, kW	$F_1, \text{kW}$	$F_2, \text{kW}$	SC, kW	Área, $\text{m}^2$
1	22,4	---	60,0	---	---	---	60,0	53,6
2	24,2	---	20,0	---	20,0	---	---	16,6
3	15,7	20,0	80,0	---	100,0	---	---	241,5
4	16,7	36,0	144,0	---	60,0	120,0	---	1053,5
5	28,0	24,0	96,0	---	---	120,0	---	549,5
6	24,2	1,0	---	70,0	---	71,0	---	326,7
7	35,8	49,0	---	---	---	49,0	---	273,9

Área total = 2515,1  $\text{m}^2$

El número de cambiadores de calor también puede predecirse. Hohmann (1971) fue el primero que estableció la regla de N-1 donde N es el número total de corrientes calientes y frías incluyendo los servicios. Más tarde, Boland y Linnhoff (1979) extendieron esta regla a (N-S+L) para tener en cuenta el número de subsistemas (S) y el número de lazos (L). Linnhoff y cols. (1979) demostraron que una red con (N-1) cambiadores se podía obtener para cualquier sistema de corrientes. Linnhoff y Turner (1981) introdujeron el número de unidades mínimo para las mínimas necesidades energéticas, estableciéndole en (N-1) unidades por encima de la temperatura pinch (en ese caso N es el número total de corrientes incluyendo servicios por encima de la temperatura pinch) y en (N-1) unidades por debajo de la temperatura pinch (en ese caso N es el número total de corrientes incluyendo servicios por debajo de la temperatura pinch). Colbert (1982) discutió que en el caso de redes de cambiadores de carcasa y tubos, el objetivo del mínimo número de cambiadores no era correcto y que debiera de ser el mínimo número de carcasas debido a que dependiendo de las temperaturas de entrada y salida la suposición de flujo en contracorriente no era correcta.

### 3.3. ESTIMACIÓN DEL COSTE DE LA RED EN FUNCIÓN DEL GRADIENTE MÍNIMO DE TEMPERATURA

Se ha comentado en apartados previos la influencia directa del gradiente mínimo de temperatura con el diseño de la red. Este parámetro afecta a los servicios caliente y frío, a la temperatura pinch y al área total de la red. La elección de uno u otro gradiente por tanto influirá directamente en el coste de la red de cambiadores de calor.

Al disminuir el valor del gradiente mínimo de temperatura, disminuyen las necesidades energéticas de calefacción y/o refrigeración, por lo que los costes de operación de estos servicios disminuyen. Sin embargo, cuanto menor es el gradiente mínimo, mayor es el área de intercambio de calor para una misma cantidad de calor intercambiada, lo que se traduce en una mayor inversión de inmovilizado. Lo contrario sucede si se aumenta el gradiente mínimo de temperatura. Luego se trata de calcular cual es el gradiente mínimo de temperatura óptimo.

Para ello se plantea una función objetivo donde intervienen el coste del inmovilizado (los cambiadores de calor) y el coste de los servicios de calefacción y/o refrigeración.

La función objetivo planteada ha sido la minimización del coste de operación anual equivalente:

$$\text{Coste de operación anual equivalente} = P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + \text{COA} \quad (3.25)$$

donde COA son los costes de operación anuales, en este caso los costes anuales de calefacción y/o de refrigeración,  $P$  es el coste de la red de cambiadores de calor,  $i$  es la tasa de rentabilidad exigida y  $n$  el número de años para anualizar la inversión de la red de cambiadores. En la pantalla principal del programa se pueden editar tanto el número de años, la rentabilidad exigida así como los costes unitarios de calefacción y/o refrigeración.

El coste de la red de cambiadores de calor es función del área de la red según la expresión (Turton y cols., 2003):

$$P = N_{\text{camb}} * 10^{[3.426 + 0.5731 * \log_{10}(\text{area red} / N_{\text{camb}})]} \quad (3.26)$$

Donde  $N_{\text{camb}}$  es el número de cambiadores de calor de la red. El resultado depende fuertemente del coste unitario asignado a los servicios calientes y fríos y del coste unitario asignado al área de los cambiadores de calor.

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama de flujo para el cálculo del coste de operación anual equivalente en función del gradiente mínimo de temperatura.

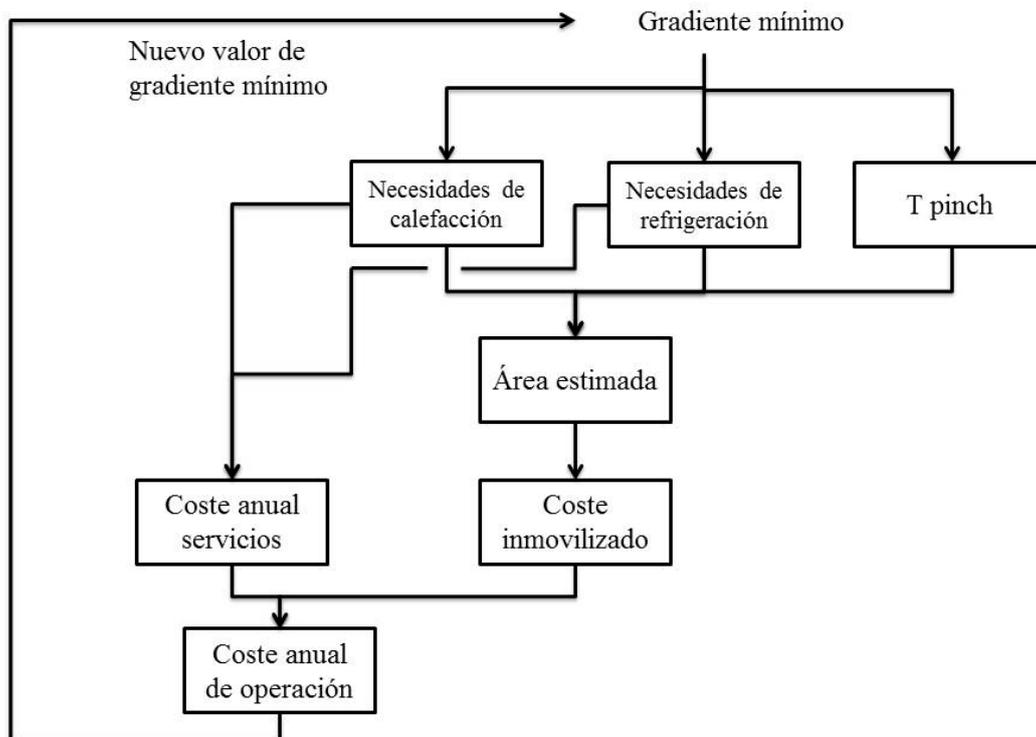


Figura 3.10.- Diagrama para el cálculo del coste de operación anual equivalente en función del gradiente mínimo.

El software realiza los cálculos para un intervalo de gradientes de temperatura entre 5 °C y 55 °C en incrementos de 2,5 °C. Los resultados (necesidades de calefacción, necesidades de refrigeración, T pinch, área total estimada y coste de operación anual equivalente) se muestran en forma de tabla. En la Figura 3.11 se muestran los resultados para el problema de referencia.

DT <sub>min</sub> , °C	Calefacción, kJ/s	Enfriamiento, kJ/s	T pinch, °C	Area red, m <sup>2</sup>	COAE, 1000\$
5.0	45.0	35.0	132.5	3389.0	88
7.5	57.5	47.5	133.8	2892.4	85
10.0	70.0	60.0	135.0	2544.7	84
12.5	82.5	72.5	136.3	2279.4	84
15.0	95.0	85.0	137.5	2068.9	85
17.5	107.5	97.5	138.8	1895.9	86
20.0	120.0	110.0	140.0	1750.3	88
22.5	132.5	122.5	141.3	1625.5	89
25.0	145.0	135.0	142.5	1516.9	91
27.5	157.5	147.5	143.8	1421.3	93
30.0	170.0	160.0	145.0	1336.3	96
32.5	182.5	172.5	146.3	1260.1	98
35.0	195.0	185.0	147.5	1191.4	101
37.5	207.5	197.5	148.8	1129.9	103
40.0	220.0	210.0	150.0	1074.5	106
42.5	232.5	222.5	151.3	1023.7	109
45.0	245.0	235.0	152.5	976.8	112
47.5	257.5	247.5	153.8	933.3	115
50.0	270.0	260.0	155.0	892.7	118
52.5	282.5	272.5	156.3	854.8	121
55.0	295.0	285.0	157.5	819.3	124

Figura 3.11.- Coste de operación anual equivalente en función del gradiente mínimo de temperatura.

El software muestra además dos figuras que facilitan la comprensión del efecto que tiene el gradiente mínimo de temperatura sobre el coste de la red de cambiadores. Una figura representa la evolución del área estimada y de las necesidades de calefacción y/o refrigeración en función del gradiente mínimo de temperatura, y en la otra representa el coste de operación anual equivalente en función del gradiente mínimo de temperatura.

La Figura 3.12 muestra la evolución del área estimada y de las necesidades de calefacción y refrigeración vs. gradiente mínimo de temperatura para el problema de referencia.

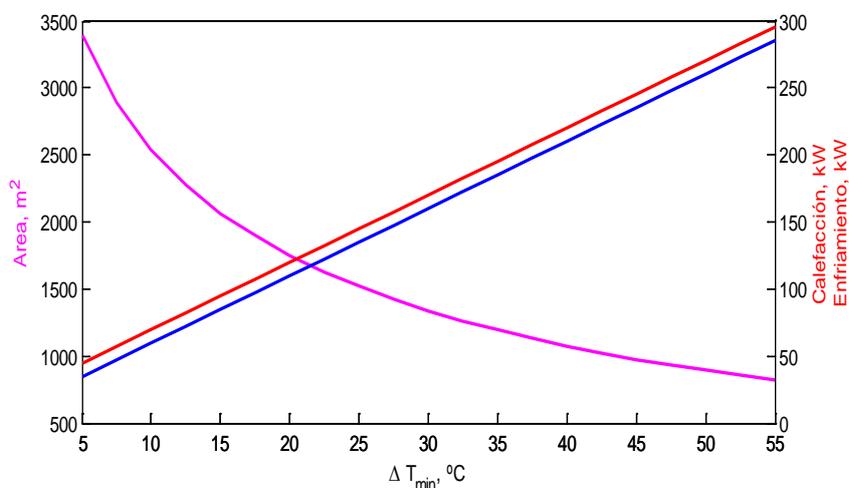


Figura 3.12.- Área estimada y necesidades de calefacción y refrigeración en función del gradiente mínimo de temperatura para el problema de referencia.

En la Figura 3.13 se muestra el coste de operación anual equivalente en función del gradiente mínimo de temperatura para el problema de referencia. Puede apreciarse como el coste mínimo correspondería a un gradiente mínimo de entre 10 y 12 °C.

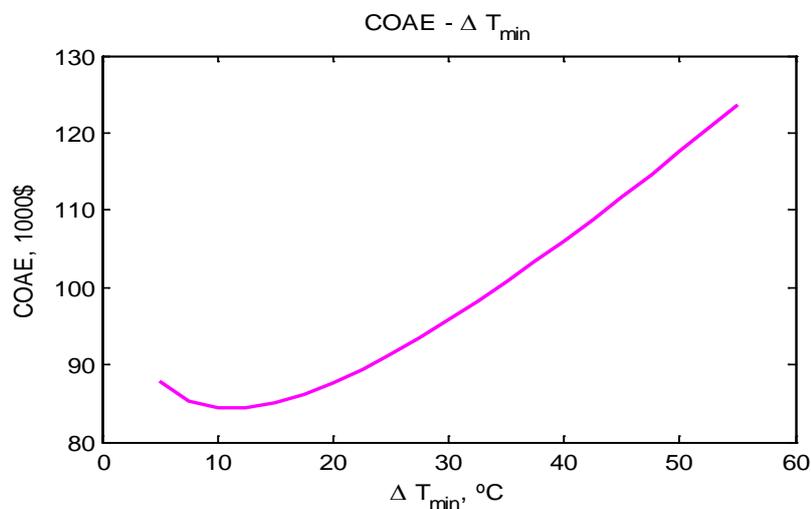


Figura 3.13.- Coste de operación anual equivalente en función del gradiente mínimo de temperatura para el problema de referencia.

### 3.4. DISEÑO DE LA RED DE CAMBIADORES

En este trabajo se va a desarrollar un software capaz de diseñar la red de cambiadores de calor de dos formas diferentes. Por un lado se usará la formulación de Papoulias y Grossmann (1983) para plantear un problema de programación lineal que calcule cómo realizar los intercambios de calor entre las diferentes corrientes calientes y frías respetando el gradiente mínimo y las mínimas necesidades energéticas calculadas anteriormente de forma que el número de intercambios de calor sea mínimo. Por otro, se desarrollará un algoritmo que realice los intercambios de calor siguiendo unas reglas heurísticas similares a las que se siguen en el diseño manual de una red de cambiadores de calor.

#### 3.4.1.- DISEÑO PARA MINIMIZAR EL NÚMERO DE INTERCAMBIOS DE CALOR

En apartados anteriores, se ha usado la programación lineal para determinar las necesidades mínimas de servicios (también su coste) y ver cuáles eran los puntos pinch en la red de cambiadores de calor. Puede ocurrir que varias redes diferentes satisfagan las mínimas necesidades de servicios, por lo que un objetivo deseable es obtener aquella red que tenga el número mínimo de intercambiadores de calor ya que esto suele corresponderse con una solución cercana al óptimo.

Una vez que se han determinado las mínimas necesidades de servicios, se conocerán los caudales de los servicios calientes y fríos y sus correspondientes cantidades de calor por lo que esas corrientes se podrán añadir al conjunto de corrientes de proceso para definir los conjuntos aumentados  $\hat{H} = \{H, S\}$  y  $\hat{C} = \{C, W\}$  de corrientes calientes y frías respectivamente incluyendo los servicios calientes y fríos.

También se conocerán las temperaturas pinch y el problema se podrá dividir en subredes. Más específicamente, si hay NL-1 puntos pinch, los K intervalos de temperatura se podrán dividir en NL conjuntos de intervalos por encima y por debajo de cada punto pinch que definen los límites de las subredes. Los subconjuntos de intervalos de temperatura correspondientes a cada subred l se denominarán  $SN_l, l=1,2,\dots,NL$ .

Para satisfacer las mínimas necesidades de servicios, solo se permitirá intercambiar calor a las corrientes dentro de la subred ya que si no se transferiría calor a través de los puntos pinch aumentando así el consumo de servicios. Por eso, es conveniente denominar como  $H_l \subseteq \hat{H}$  y  $C_l \subseteq \hat{C}$  a las corrientes calientes y frías presentes en la subred l. Siguiendo un tratamiento similar al que se realizó cuando se trató el problema de intercambios de calor prohibidos entre ciertas corrientes (Apartado 3.1.2), los calores residuales de las corrientes calientes  $i \in H_l$  serán representados por  $R_{ij}, k \in SN_l, l=1,NL$ , mientras que el calor intercambiado entre las corrientes en la subred será representado por  $Q_{ijk}, i \in H_{lk}, j \in C_{lk}, k \in SN_l$ , donde

$$H_{lk} = \{i \mid i \in H_l, \text{ la corriente } i \text{ está presente en el intervalo } \bar{k} \leq k; \bar{k}, k \in SN_l\}$$

$$C_{lk} = \{j \mid j \in C_l, \text{ la corriente } j \text{ está presente en el intervalo } k \in SN_l\} \quad (3.27)$$

Se puede introducir una variable binaria que solo puede tomar valores 0-1,  $y_{ijl}$ , para indicar la existencia de un intercambio entre las corrientes  $i \in H_l$  y  $j \in C_l$ , en la subred l. Se supone que cada uno de esos intercambios potenciales está asociado a un potencial intercambiador de calor. Como el calor total intercambiado entre el par de corrientes viene dado por la suma de su intercambio de calor tomado sobre los intervalos de la subred, las variables binarias se pueden relacionar con las variables  $Q_{ijk}$  mediante las desigualdades:

$$\sum_{k \in SN_l} Q_{ijk} - U_{ijl} y_{ijl} \leq 0 \quad i \in H_l, j \in C_l, l = 1, 2, \dots, NL \quad (3.28)$$

donde

$$U_{ijl} \geq \min \left\{ \sum_{k \in SN_l} Q_{ik}^{\hat{H}}, \sum_{k \in SN_l} Q_{jk}^{\hat{C}} \right\} \quad (3.29)$$

corresponde al límite superior del calor que se puede intercambiar. Cuando la variable binaria  $y_{ijl}$  en (3.28) toma un valor cero no se puede intercambiar calor pero cuando es uno se puede intercambiar cualquier cantidad de calor que no supere a  $U_{ijl}$ . El problema de minimizar el número de unidades en la red de cambiadores de calor se puede formular como el siguiente problema de programación lineal:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{l=1}^{NL} \sum_{i \in H_l} \sum_{j \in C_l} e_{ijl} y_{ijl} \quad (3.30)$$

sujeto a:

$$\left. \begin{aligned} R_{i,k} - R_{i,k-1} + \sum_{j \in C_{lk}} Q_{ijk} &= Q_{ik}^{\hat{H}} & i \in H_{lk} \\ \sum_{i \in H_{lk}} Q_{ijk} &= Q_{jk}^{\hat{C}} & j \in C_{lk} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &k \in SN_l \\ &l = 1, 2, \dots, NL \end{aligned}$$

$$\sum_{k \in SN_l} Q_{ijk} - U_{ijl} y_{ijl} \leq 0 \quad i \in H_1, j \in C_1; l = 1, 2, \dots, NL$$

$$\left. \begin{array}{l} R_{ik} \geq 0 \quad i \in H_{lk} \\ Q_{ijk} \geq 0 \quad i \in H_{lk} \\ \quad \quad \quad j \in C_{lk} \end{array} \right\} \begin{array}{l} k \in SN_l \\ l = 1, 2, \dots, NL \end{array}$$

$$y_{ijl} = 0, 1 \quad i \in H_1, j \in C_1, l = 1, 2, \dots, NL$$

En la función objetivo (3.30), cada variable binaria  $y_{ijl}$  está multiplicada por un factor de ponderación  $e_{ijl}$  que puede tener en cuenta el coste o preferencia del intercambio entre corrientes. Como esos costes son difíciles de establecer debido a las no linealidades que hay en las temperaturas, es más práctico pensar que esos factores son coeficientes que reflejan preferencia en los intercambios. Si no hay preferencias, los factores pueden ser 1, en cuyo caso el problema dará como solución el número mínimo de unidades. Esta formulación también puede tener en cuenta intercambios prohibidos sin más que establecer las variables  $y_{ijl} = 0 \quad (i, j) \in P, l = 1, 2, \dots, NL$ .

Se trata de un problema de programación lineal donde algunas de las variables solo pueden tomar valores enteros (0 ó 1) mientras que otras son variables reales. Esos problemas se conocen con el nombre de Mixed Integer Linear Programming, o problemas MILP. El problema MILP dado por (3.30) se puede resolver en su totalidad o se puede descomponer en NL subproblemas más pequeños para cada subred.

Es importante darse cuenta de que la solución del problema MILP dado por (3.30) no da la configuración de la red de cambiadores. Pero la solución óptima contiene toda la información necesaria para obtener la red de forma manual. Específicamente, la solución da el par de corrientes involucrado en cada intercambio, la cantidad de calor intercambiada y los intervalos de temperatura donde tiene lugar el intercambio.

En el programa, la solución del problema MILP se ha realizado con la función de Matlab® *intlinprog*, que resuelve problemas MILP.

```
[x, feval, status, output] = intlinprog(fo, M, A, b, Aeq, beq, lb, ub, options)
```

donde  $M$  es el vector de enteros positivos indicando los componentes de la solución  $x$  que deben ser enteros,  $A$  es la matriz de coeficientes de las ecuaciones de desigualdad,  $b$  es el vector de términos independientes de las ecuaciones de desigualdad,  $Aeq$  es la matriz de coeficientes de las ecuaciones de igualdad,  $beq$  es el vector de términos independientes de las ecuaciones de igualdad,  $lb$  y  $ub$  son los límites inferiores y superiores de las variables de optimización y  $fo$  es el vector de coeficientes de las variables de optimización.

En la Tabla A.2 del Apéndice A se muestran los coeficientes de las restricciones de igualdad y desigualdad correspondientes a la ec. (3.30) para el problema de referencia.

En la Figura 3.14 se muestran los resultados de la resolución en forma gráfica para el problema de referencia.

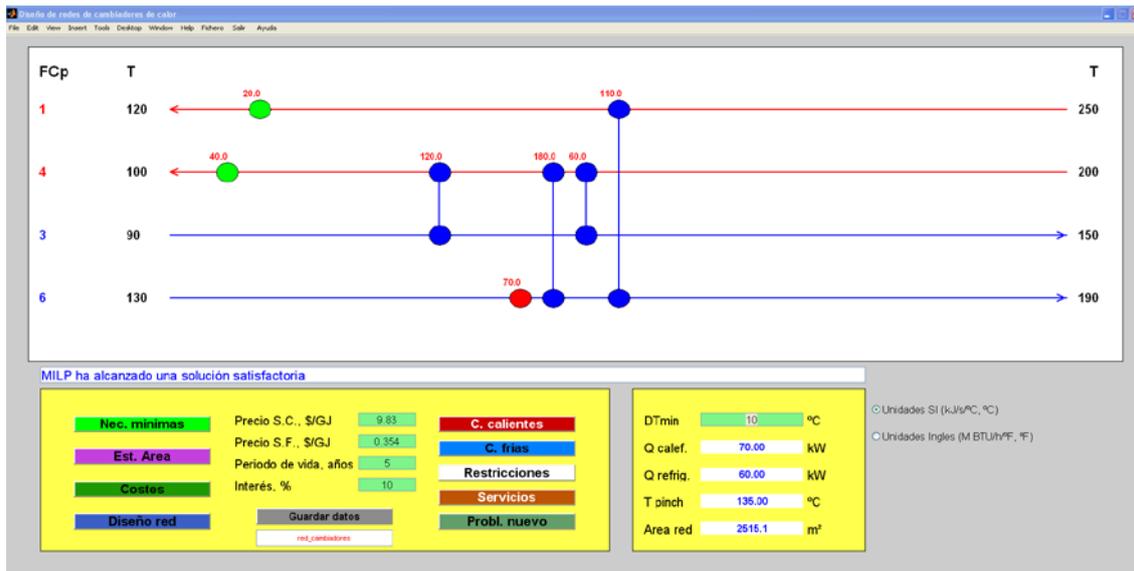


Figura 3.14.- Diagrama con el diseño de la red de cambiadores para el problema de referencia minimizando el número de intercambios de calor.

La solución contempla un número mínimo de 7 intercambios entre las corrientes, indicados en la Tabla 3.3. En la tabla se muestran los resultados del problema de optimización lineal con mezcla de variables enteras del problema de referencia.

Tabla 3.3.- Resultados de la minimización del número de intercambios de calor para el problema de referencia.

Y0101	0
Y0102	1
Y0103	1
Y0201	1
Y0202	1
Y0203	1
Y0301	0
Y0302	1
R0101	49,00 kW
R0102	50,00 kW
R0302	70,00 kW
R0103	0,00 kW
R0203	0,00 kW
R0104	20,00 kW
R0204	40,00 kW
Q010103	0,00 kW
Q010203	110,00 kW
Q020103	60,00 kW
Q020203	180,00 kW
Q030103	0,00 kW
Q030203	70,00 kW
Q010104	0,00 kW
Q020104	120,00 kW
Q010305	20,00 kW
Q020305	40,00 kW

Según esta solución, la corriente caliente 1 intercambia calor, 110 kW, con la segunda corriente fría (la nº 4) en el intervalo de temperaturas nº 3. La corriente caliente 2 intercambia calor, 60 kW, con la primera corriente fría (la nº 3) en el intervalo de temperaturas nº 3. La corriente caliente 2 intercambia calor, 180 kW, con la segunda corriente fría (la nº 4) en el intervalo de temperaturas nº 3. El servicio caliente intercambia calor, 70 kW, con la segunda corriente fría (la nº 4) en el tercer intervalo de temperaturas. La corriente caliente 2 intercambia calor, 120 kW, con la primera corriente fría (la nº 3) en el cuarto intervalo de temperaturas. La corriente caliente 1 intercambia calor, 20 kW, con el servicio frío en el quinto intervalo de temperaturas y la corriente caliente 2 intercambia calor, 40 kW, con el servicio frío en el quinto intervalo de temperaturas.

Como se ha indicado antes, la solución no da la configuración de la red de cambiadores, pero contiene toda la información necesaria para obtener la red de forma manual. En este problema de referencia, los intercambios de calor en los diferentes intervalos de temperatura, según la solución óptima, corresponden a los mostrados en la Figura 3.15. Esta figura se ha obtenido de forma manual a partir de la información dada en la Tabla 3.3. Los intercambios de calor son los calculados por el programa pero para ello se ha tenido que dividir la segunda corriente caliente de forma que el FCp de esa corriente en el cambiador 3 es 1 kW/°C y el FCp de esa corriente en el cambiador 2 es 3 kW/°C. Del mismo modo, el FCp de la segunda corriente fría se ha tenido que dividir de forma que la corriente fría que pasa por el cambiador 1 tiene un FCp de 2,276 kW/°C y la que pasa por el cambiador 2 tiene un FCp de 3,724 kW/°C. El área total de los cambiadores es 2830,3 m<sup>2</sup>, próximo a los 2515,1 m<sup>2</sup> que se habían estimado en el apartado 3.2

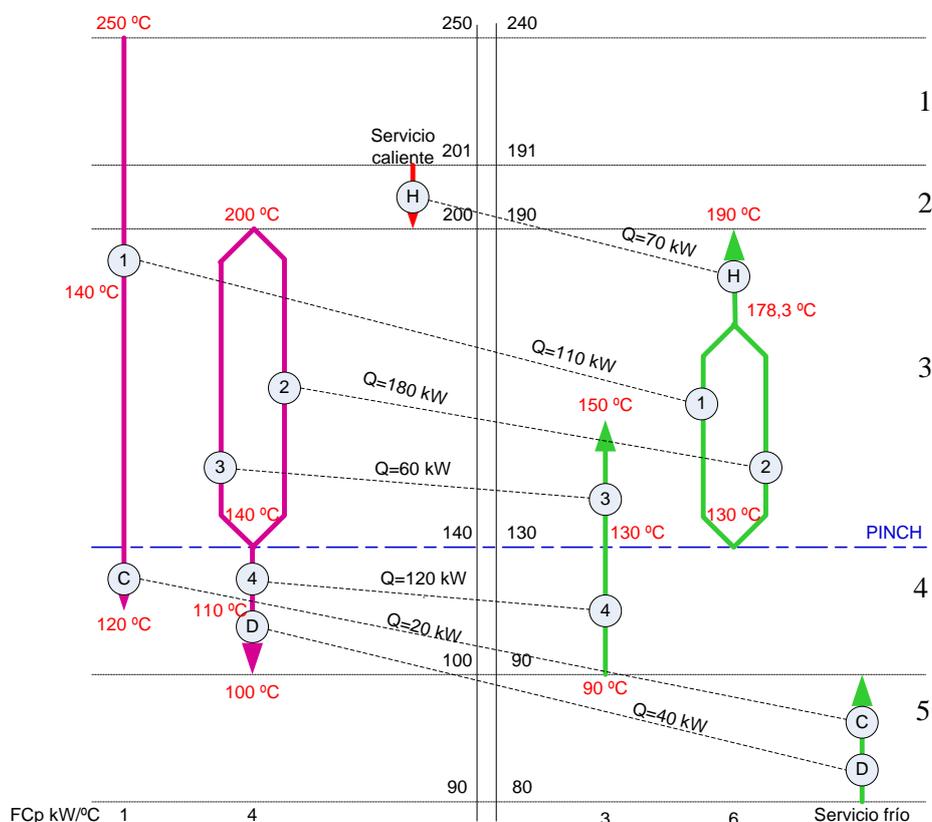


Figura 3.15.- Solución de la red de cambiadores para el problema de referencia.

### 3.4.2. MÉTODO BASADO EN REGLAS HEURÍSTICAS

El diseño final de la red de cambiadores de calor se puede realizar mediante un método alternativo al utilizado en el apartado 3.4.1. Este método se basa en reglas heurísticas intentando seguir un algoritmo que reproduzca las etapas que se llevarían a cabo de forma manual.

Para diseñar la red, se parte de los datos de las corrientes calientes y frías que ya se han introducido en apartados anteriores:  $FC_p$ , temperatura de entrada y temperatura de salida. Otro parámetro de entrada es el valor de la temperatura pinch (si la hubiera), calculada previamente. En el caso donde sí exista temperatura pinch, los datos vienen dados por cuatro matrices distintas.

En primer lugar se realizará el diseño por encima de la temperatura pinch (si la hubiera) y posteriormente por debajo de la temperatura pinch.

#### 3.4.2.1.- Diseño por encima de la temperatura pinch

Se calculan las cantidades de calor de las que disponen las corrientes frías y calientes, desde la temperatura pinch hasta las temperaturas iniciales en el caso de las corrientes calientes y hasta las temperaturas finales en el caso de las corrientes frías.

$$\begin{aligned}\Delta H_i &= (FC_p)_i \cdot \Delta T, & \Delta T &= T_{e_i} - T_{\text{pinch}}, & i &\in H \\ \Delta H_j &= (FC_p)_j \cdot \Delta T, & \Delta T &= T_{f_j} - T_{\text{pinch}}, & j &\in C\end{aligned}\quad (3.31)$$

En el caso del problema de referencia, las dos matrices se muestran en la Tabla 3.4

Tabla 3.4.- Información de las corrientes calientes y frías por encima de la temperatura pinch para el problema de referencia.

Corrientes calientes				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
1	1	250	140	110
2	4	200	140	240
Corrientes frías				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
1	3	130	150	60
2	6	130	190	360

En la Figura 3.16 se muestra el diagrama de flujo para el diseño de la red de cambiadores.

En la Figura 3.3 puede verse que todas las corrientes calientes y frías están al nivel de la temperatura pinch, por lo que en este caso las corrientes mantienen el mismo ordenamiento que el dado en la Tabla 3.4. Las dos corrientes que ocupan la primera posición en las corrientes calientes y frías están al nivel de la temperatura pinch, por tanto para poder intercambiar calor deberá cumplirse la condición de que el FCp de la corriente caliente sea menor o igual que el de la corriente fría. En este caso sí se cumple

la condición por lo que puede intercambiarse calor entre esas dos corrientes. Entonces, el programa realiza los cálculos mostrados en el diagrama de flujo de la Figura 3.17.

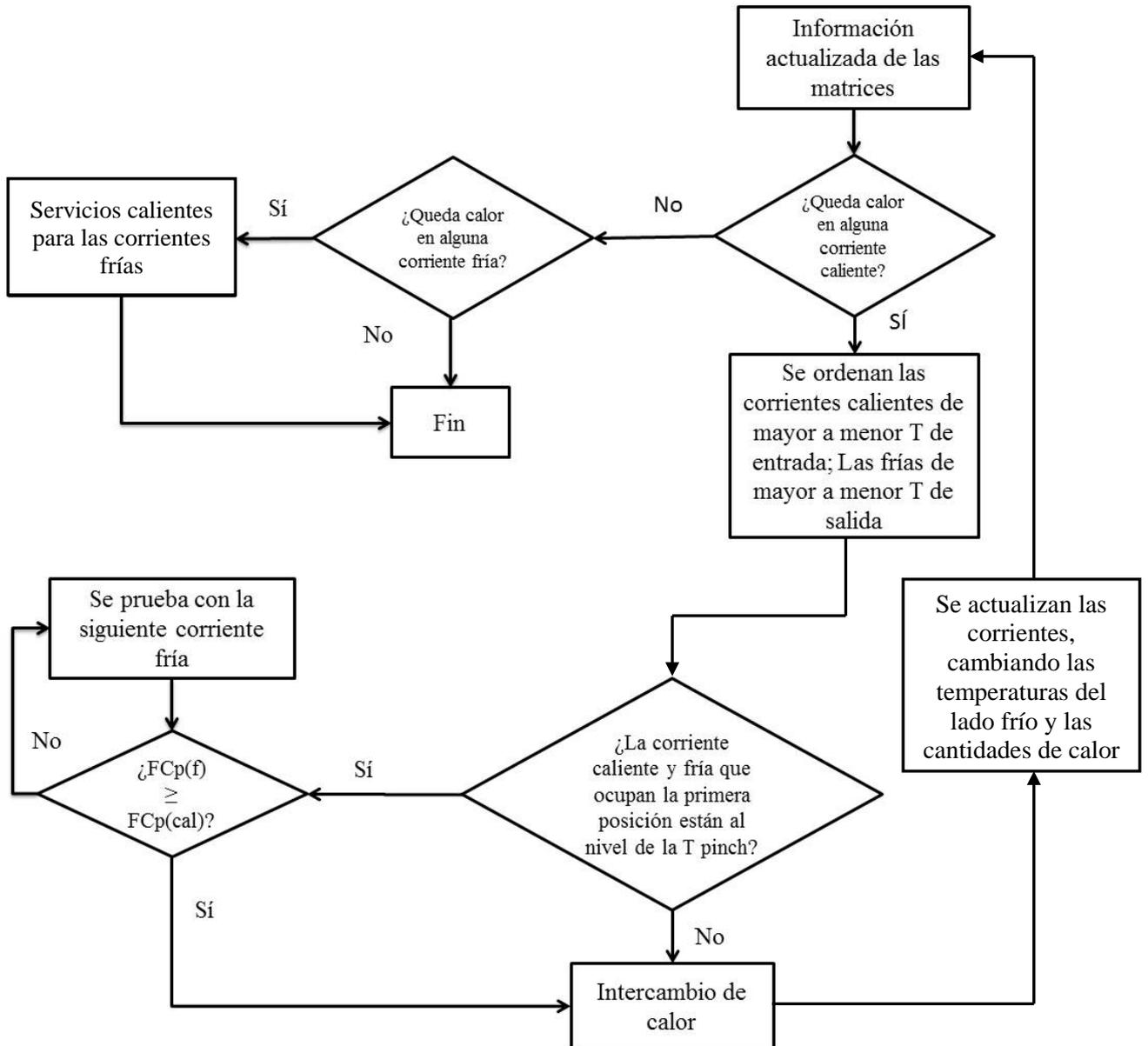


Figura 3.16.- Diagrama de flujo para el diseño de la red de cambiadores por encima de la temperatura pinch.

La información del intercambio se guarda en una nueva matriz, mostrada en la Tabla 3.5 para el primer intercambio correspondiente al problema de referencia.

Tabla 3.5.- Matriz para el primer intercambio de calor en el problema de referencia.

Nº	Nº cal.	Nº fría	Q, kW	T <sub>e</sub> c. cal., °C	T <sub>s</sub> c. cal., °C	T <sub>e</sub> c. fría, °C	T <sub>s</sub> c. fría, °C
1	1	1	60	240	140	130	150

A continuación se actualizan las matrices conteniendo los datos de las corrientes frías y calientes, y se ordenan siguiendo el criterio antes comentado. En la Tabla 3.6 se muestra la matriz actualizada tras el primer intercambio.

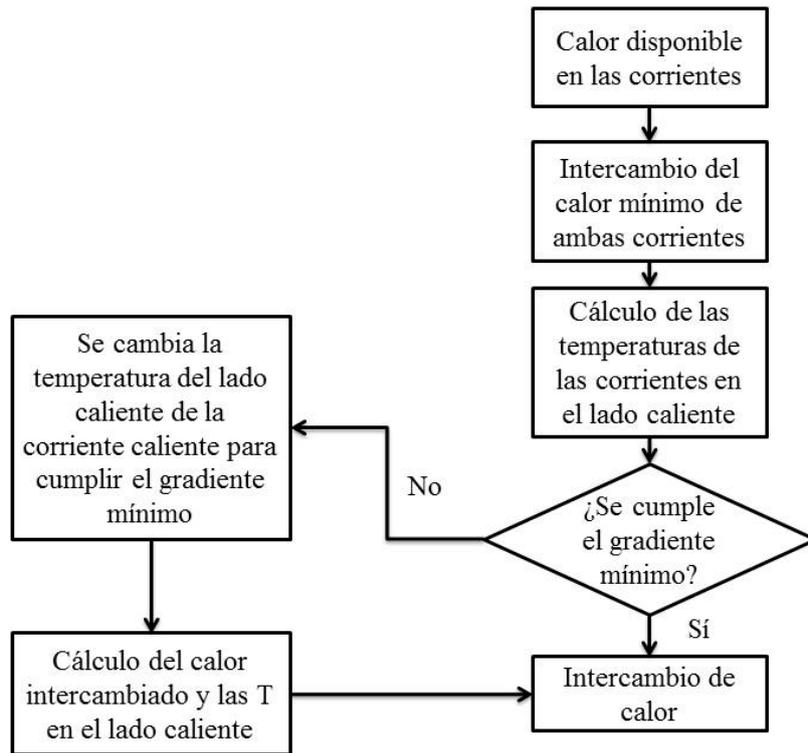


Figura 3.17.- Diagrama de flujo para realizar el intercambio de calor entre una corriente caliente y una fría por encima de la temperatura pinch.

Tabla 3.6.- Actualización y ordenamiento tras el primer intercambio en el problema de referencia.

Corrientes calientes				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
2	4	200	140	110
1	1	250	200	50
Corrientes frías				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
2	6	130	190	360
1	3	150	150	0

Siguiendo el algoritmo mostrado en la Figura 3.16, se cambiará calor entre la corriente nº 2 caliente y la corriente nº 2 fría. En este caso las dos corrientes están al nivel de la temperatura pinch y se cumple la condición de que FCp de la corriente caliente es menor o igual que el de la fría, por lo que puede intercambiarse una cantidad de calor igual a la menor de la disponible en las dos corrientes, 240 kW, resultando en el cambiador de calor mostrado en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7.- Matriz para el segundo intercambio de calor en el problema de referencia.

Nº	Nº cal.	Nº fría	Q, kW	Te c. cal., °C	Ts c. cal., °C	Te c. fría, °C	Ts c. fría, °C
2	2	2	240	200	140	130	170

A continuación se actualizan las matrices conteniendo los datos de las corrientes frías y calientes, y se ordenan siguiendo el criterio antes comentado (Tabla 3.8). El algoritmo sigue hasta que las cantidades de calor disponibles en todas las corrientes calientes son cero.

Tabla 3.8.- Actualización y ordenamiento tras el segundo intercambio en el problema de referencia.

Corrientes calientes				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
1	1	250	200	50
2	4	200	200	0
Corrientes frías				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
1	3	170	190	80
2	6	150	150	0

Una vez que las corrientes calientes han cedido todo su calor, el calor que necesitan las corrientes frías se obtiene mediante un servicio caliente. El resultado final se muestra en la Figura 3.18.

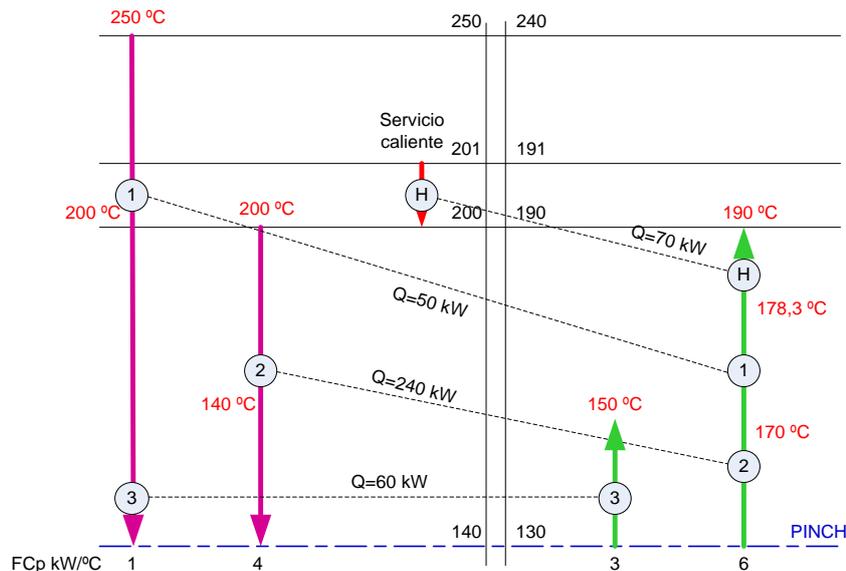


Figura 3.18.- Red de cambiadores de calor por encima de la temperatura pinch para el problema de referencia.

### 3.4.2.2.- Diseño por debajo de la temperatura pinch

Se calculan las cantidades de calor de que disponen las corrientes frías y calientes, desde la temperatura pinch hasta las temperaturas finales en el caso de las corrientes calientes y hasta las temperaturas iniciales en el caso de las corrientes frías.

$$\begin{aligned}\Delta H_i &= (FC_p)_i \cdot \Delta T, \quad \Delta T = T_{pinch} - T_{h,s} \quad i \in H \\ \Delta H_j &= (FC_p)_j \cdot \Delta T, \quad \Delta T = T_{pinch} - T_{c,s} \quad j \in C\end{aligned}\quad (3.32)$$

En el caso del problema de referencia, las dos matrices se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9.- Información de las corrientes calientes y frías por debajo de la temperatura pinch para el problema de referencia.

Corrientes calientes				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
1	1	140	120	20
2	4	140	100	160
Corrientes frías				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
1	3	90	130	120

En la Figura 3.19 se muestra el diagrama de flujo para el diseño de la red de cambiadores por debajo de la temperatura pinch. Pueden apreciarse las diferencias respecto del diagrama mostrado en la Figura 3.16 para el diseño por encima de la temperatura pinch.

En la Figura 3.3 puede verse que todas las corrientes calientes y frías están al nivel de la temperatura pinch, por lo que en este caso las corrientes mantienen el mismo ordenamiento que el dado en la Tabla 3.9. Las dos corrientes que ocupan la primera posición en las corrientes calientes y frías están al nivel de la temperatura pinch, por tanto para poder intercambiar calor deberá cumplirse la condición de que el FCp de la corriente caliente sea mayor o igual que el de la corriente fría. Esta condición no se cumple, por tanto se comprueba la condición para la siguiente corriente fría. Para esta segunda corriente la condición se cumple. Entonces, el programa realiza los cálculos mostrados en el diagrama de la Figura 3.20.

Por debajo de la temperatura pinch se tiene un primer cambiador que se muestra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10.- Matriz para el primer intercambio de calor por debajo de la temperatura pinch en el problema de referencia.

Nº	Nº cal.	Nº fría	Q, kW	Te c. cal., °C	Ts c. cal., °C	Te c. fría, °C	Ts c. fría, °C
4	2	1	120	140	110	90	130

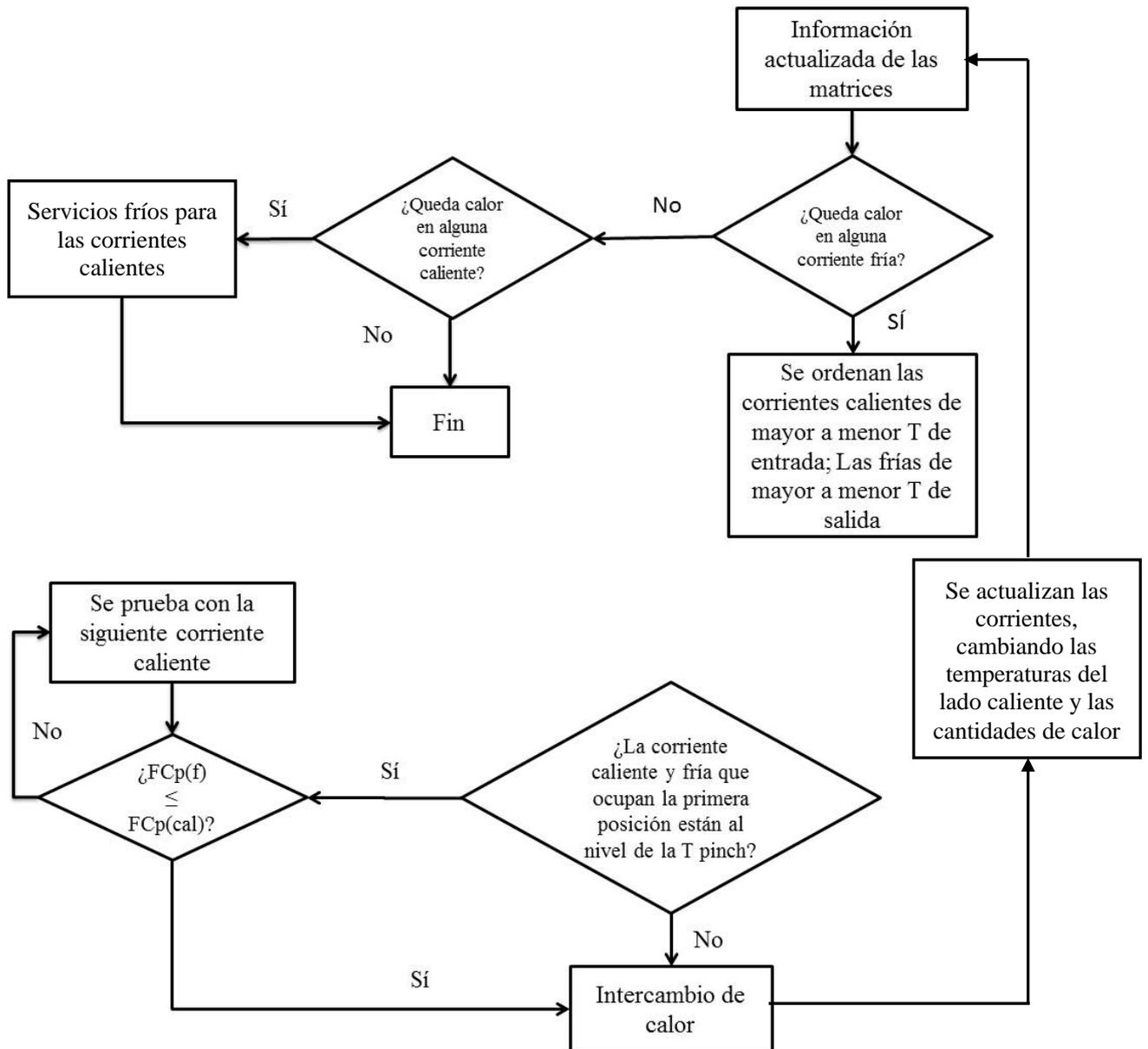


Figura 3.19.-Diagrama de flujo para el diseño de la red de cambiadores por debajo de la temperatura pinch.

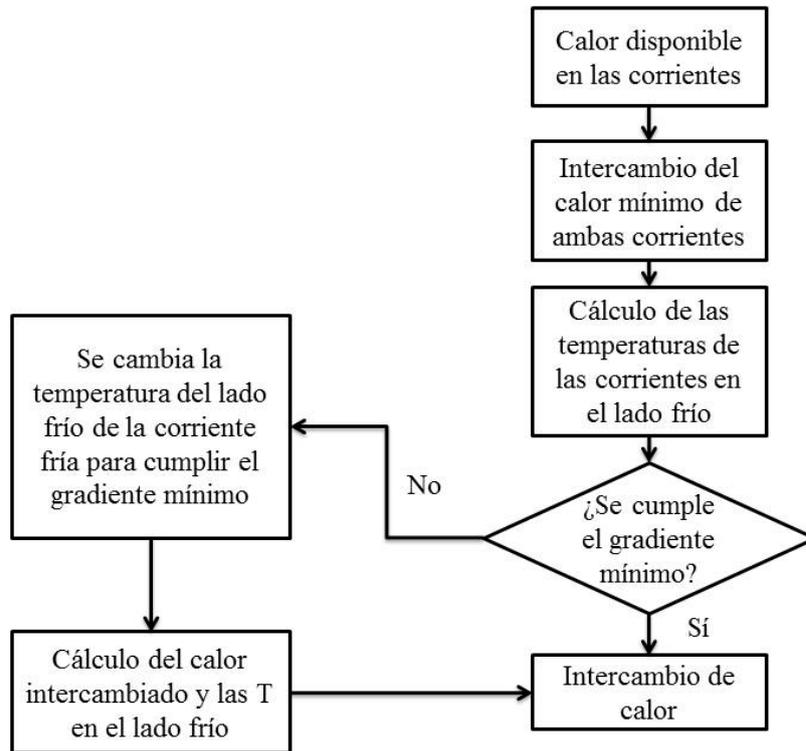


Figura 3.20.- Diagrama de flujo para realizar el intercambio de calor entre una corriente caliente y una fría por debajo de la temperatura pinch.

A continuación se actualizan las matrices conteniendo los datos de las corrientes frías y calientes, y se ordenan siguiendo el criterio antes comentado. En la Tabla 3.11 se muestra la matriz actualizada tras el primer intercambio.

Tabla 3.11.- Actualización y ordenamiento tras el primer intercambio de calor por debajo de la temperatura pinch en el problema de referencia.

Corrientes calientes				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
1	1	140	120	20
2	4	110	100	40
Corrientes frías				
Nº	FCp, kW/°C	Te, °C	Ts, °C	Q, kW
1	3	130	130	0

Como las corrientes frías no pueden recibir más calor, no se puede intercambiar calor entre las corrientes frías y calientes, por lo que las dos corrientes calientes tendrán que cederlo a un servicio frío.

En la Figura 3.21 se muestra la red de intercambiadores de calor.

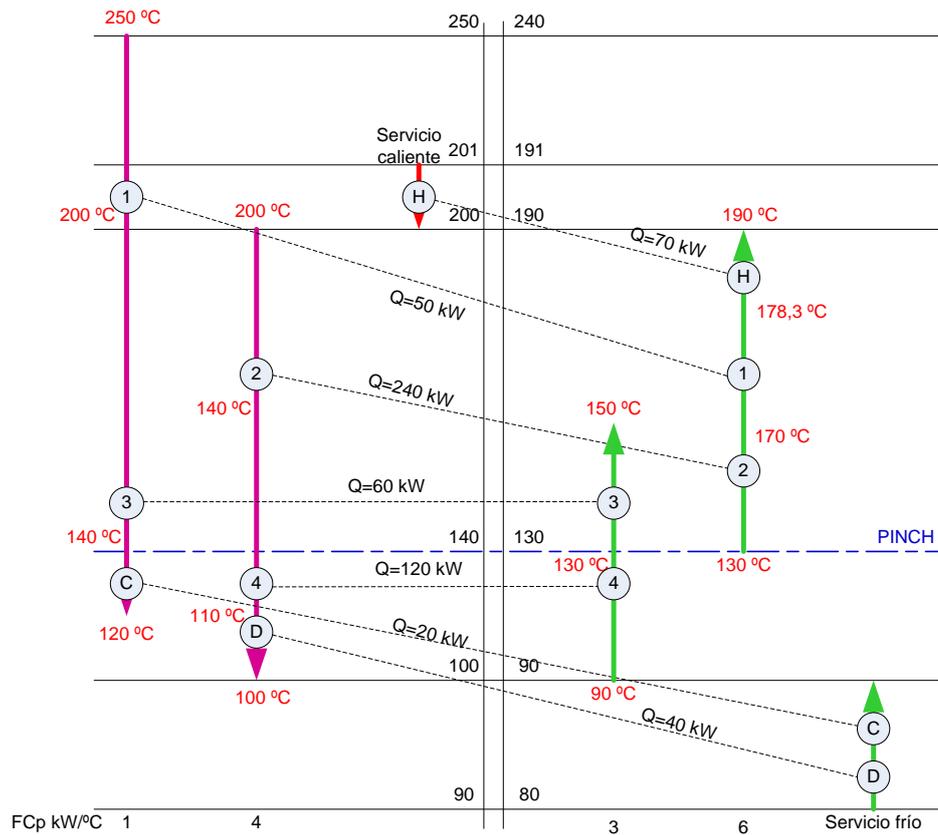


Figura 3.21.- Red final de cambiadores de calor para el problema de referencia usando reglas heurísticas.

Sumando el área calculada para cada cambiador de calor, se tiene un valor de 2695,7 m<sup>2</sup>, muy próximo a los 2515,1 m<sup>2</sup> que se habían estimado en el apartado 3.2.

En el Apéndice B se muestran los resultados grabados por el programa en el fichero de resultados en el caso del problema de referencia.

## 4.- VALIDACIÓN

A continuación se van a presentar varios problemas para validar los resultados del programa creado. Los problemas corresponden a diferentes grados de dificultad. En unos no hay temperatura pinch y en otros habrá que dividir corrientes.

### 4.1. PROBLEMA 1

Los datos iniciales del problema se muestran en la Tabla 4.1. Se supone un gradiente mínimo de temperatura de 15 °C.

Tabla 4.1.- Datos del Problema 1.

Corriente	FC <sub>p</sub> , MW/°C	T de entrada, °C	T de salida, °C	h, kW/m <sup>2</sup> /°C
<b>1, caliente</b>	3	170	60	10
<b>2, caliente</b>	1,5	150	30	8
<b>3, fría</b>	2	20	135	6
<b>4, fría</b>	4	80	140	8

Las mínimas necesidades energéticas son 42,5 MW de calefacción y 82,5 MW de refrigeración. La temperatura pinch es 87,5 °C. Si se supone que se usa como servicio caliente vapor de agua a 155 °C ( $h = 30 \text{ kW/m}^2/\text{°C}$ ) y como servicio frío agua a 15 °C que se puede calentar hasta 30 °C ( $h = 10 \text{ kW/m}^2/\text{°C}$ ), la estimación del área de la red es 5453,8 m<sup>2</sup>.

La solución alcanzada resolviendo el problema MILP muestra que el número mínimo de intercambios entre corrientes debe ser la corriente caliente 1 con la fría 3, la corriente caliente 2 con la fría 3, la corriente caliente 2 con la fría 4, además de ceder calor la corriente 1 al servicio frío y recibir calor la corriente fría 4 del servicio caliente.

El diseño de la red proporciona la solución mostrada en la Figura 4.1 cuando se usa la opción de diseño correspondiente al mínimo número de intercambios de calor. El número de cambiadores de calor es 8, cuando el número mínimo de cambiadores es de 5 y de 7 para las mínimas necesidades energéticas.

El área global de los intercambiadores de calor es 5566,2 m<sup>2</sup>, muy próxima a los 5453,8 m<sup>2</sup> estimados previamente.

La solución alcanzada por el programa usando el método de diseño alternativo basado en reglas heurísticas se muestra en la Figura 4.2.

En este caso el número de cambiadores de calor ha sido de 7, que coincide con el número mínimo que satisfacen las mínimas necesidades energéticas. El área de la red es de 5585,1 m<sup>2</sup> muy próxima a los 5453,8 m<sup>2</sup> estimados previamente.

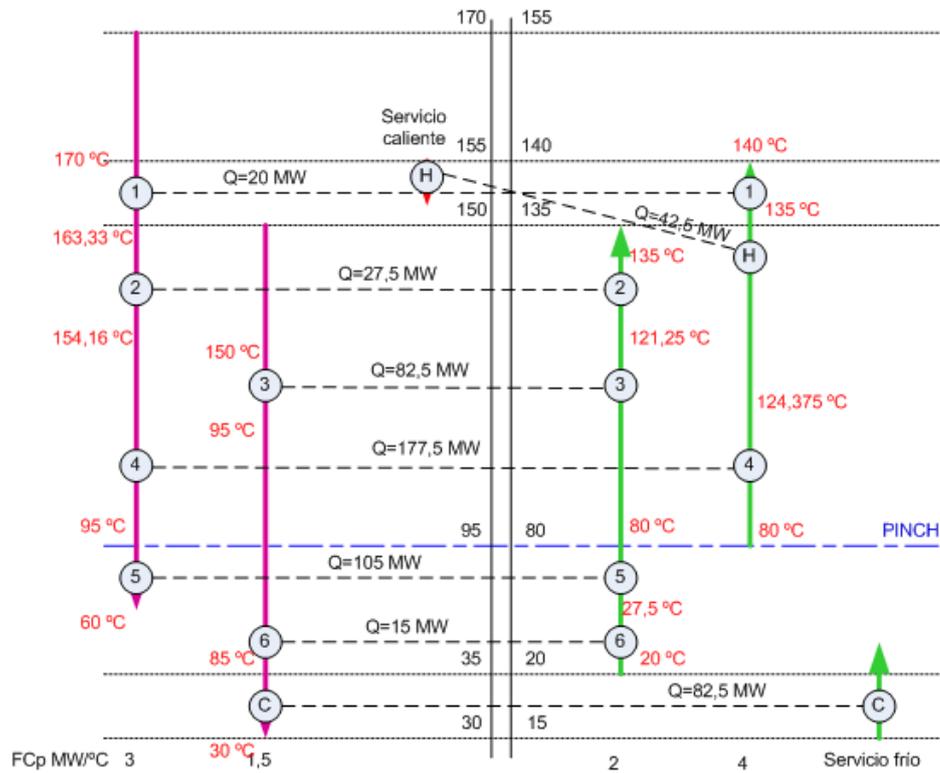


Figura 4.1.- Solución de la red de cambiadores para el Problema 1 resolviendo la formulación MILP.

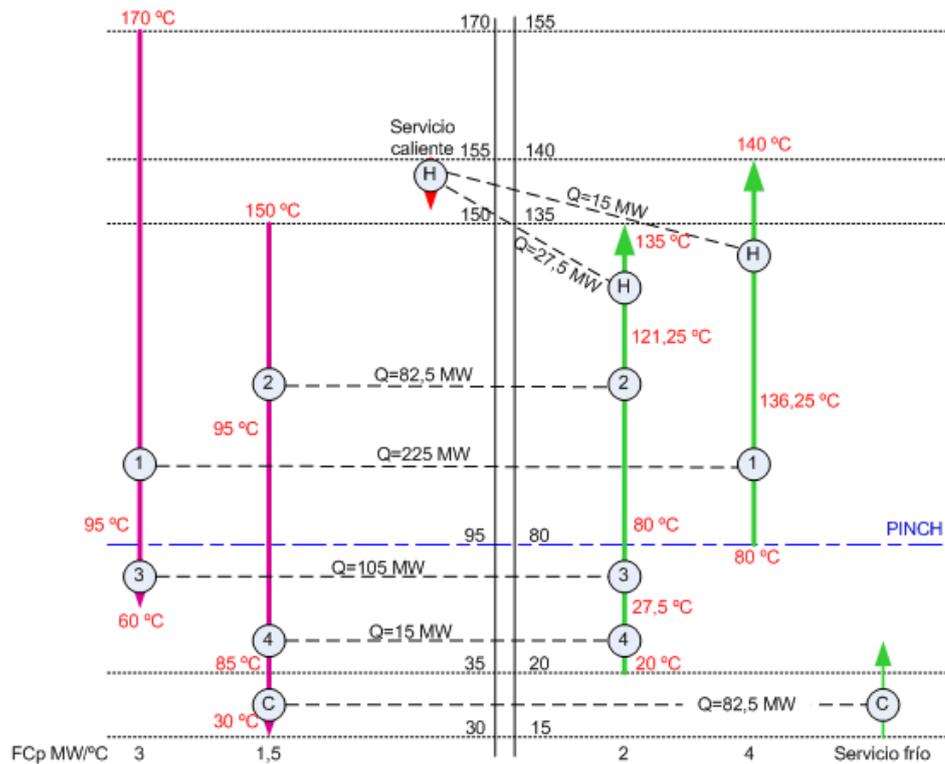


Figura 4.2.- Solución de la red de cambiadores para el Problema 1 usando reglas heurísticas.

## 4.2. PROBLEMA 2

Los datos iniciales del problema se muestran en la Tabla 4.2. Se supone un gradiente mínimo de temperatura de 20 °C.

Tabla 4.2.- Datos del Problema 2.

Corriente	FC <sub>P</sub> , kW/°C	T de entrada, °C	T de salida, °C	h, kW/m <sup>2</sup> /°C
1, caliente	16,68	220	100	1
2, caliente	20	380	180	1
3, fría	14,42	40	220	1
4, fría	11,5	140	400	1

Las mínimas necesidades energéticas son 460 kW de calefacción y 876 kW de refrigeración. La temperatura pinch es 370 °C. Si se supone que se usa como servicio caliente un fluido a 420 °C ( $h = 1 \text{ kW/m}^2/\text{°C}$ ) y como servicio frío un fluido a 60 °C que se puede calentar hasta 80 °C ( $h = 1 \text{ kW/m}^2/\text{°C}$ ), la estimación del área de la red es 219,8 m<sup>2</sup>.

La solución alcanzada resolviendo el problema MILP muestra que el número mínimo de intercambios entre corrientes debe ser la corriente caliente 1 con la fría 3, la corriente caliente 2 con la fría 3, la corriente caliente 2 con la fría 4, además de ceder calor la corriente 1 al servicio frío y recibir calor la corriente fría 4 del servicio caliente.

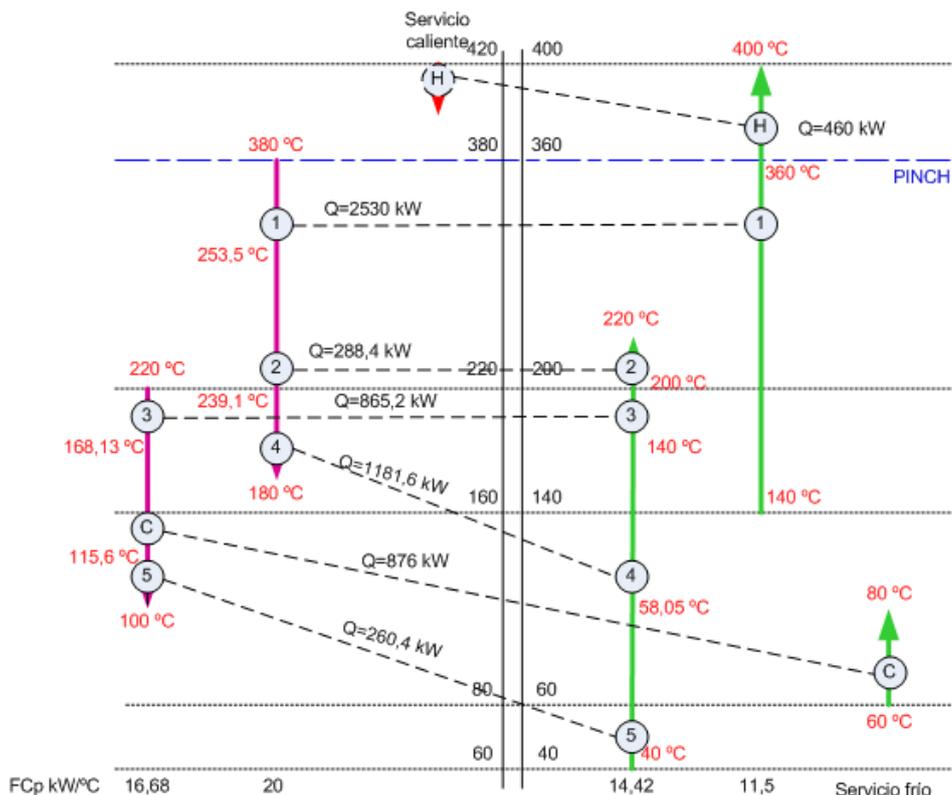


Figura 4.3.- Solución de la red de cambiadores para el Problema 2.

El diseño de la red proporciona la solución mostrada en la Figura 4.3 una vez agrupados algunos de los intercambios de calor dados en los diferentes intervalos de temperatura. El número de cambiadores de calor es 7, cuando el número mínimo de cambiadores es de 5 para las mínimas necesidades energéticas.

El área global de los intercambiadores de calor es  $262,4 \text{ m}^2$ , muy próxima a los  $219,8 \text{ m}^2$  estimados previamente.

La solución alcanzada por el programa usando el método de diseño alternativo basado en reglas heurísticas se muestra en la Figura 4.4.

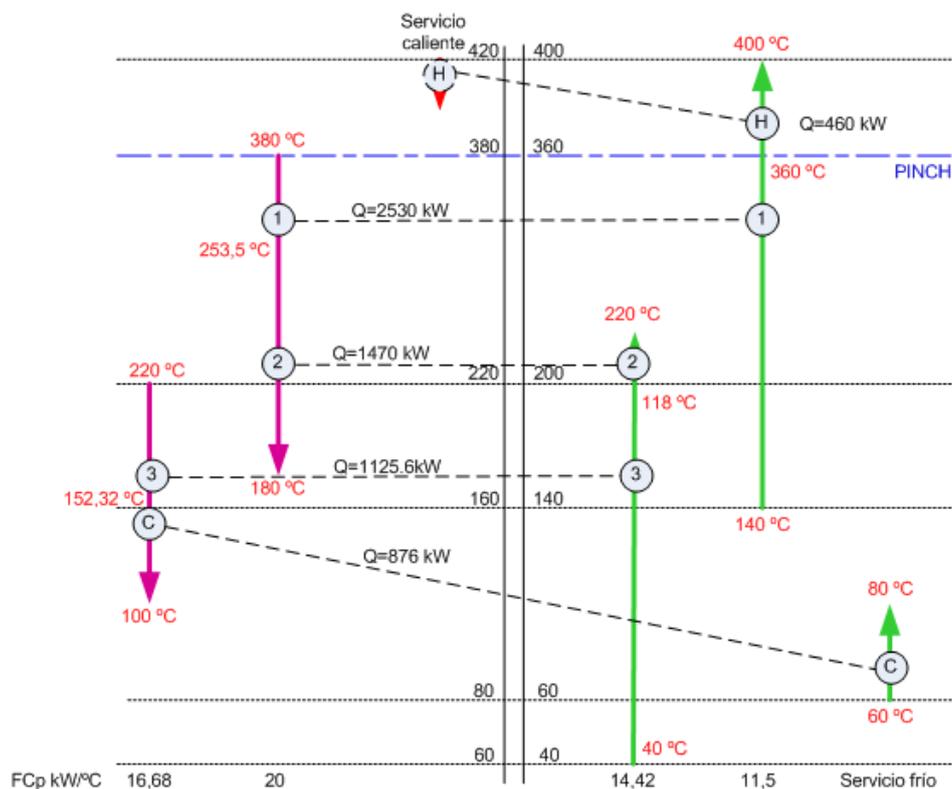


Figura 4.4.- Solución de la red de cambiadores para el Problema 2 usando reglas heurísticas.

En este caso el número de cambiadores de calor ha sido de 5, que coincide con el número mínimo que satisfacen las mínimas necesidades energéticas. El área de la red es de  $235,9 \text{ m}^2$  muy próxima a los  $219,8 \text{ m}^2$  estimados previamente.

### 4.3. PROBLEMA 3

Los datos iniciales del problema se muestran en la Tabla 4.3. Se supone un gradiente mínimo de temperatura de 20 °C.

Tabla 4.3.- Datos del Problema 3.

Corriente	FC <sub>P</sub> , kW/°C	T de entrada, °C	T de salida, °C	h, kW/m <sup>2</sup> /°C
1, caliente	3,15	480	250	0,5
2, caliente	2,52	400	150	0,6
3, fría	2,16	100	400	0,4
4, fría	2,45	150	360	0,6
5, fría	2,47	200	400	0,2

Las mínimas necesidades energéticas son 302 kW de calefacción y 0 kW de refrigeración. No hay temperatura pinch. Si se supone que se usa como servicio caliente un fluido a 420 °C ( $h = 2 \text{ kW/m}^2/\text{°C}$ ), la estimación del área de la red es 105,4 m<sup>2</sup>.

La solución alcanzada resolviendo el problema MILP muestra que el número mínimo de intercambios entre corrientes debe ser la corriente caliente 1 con la fría 3, la corriente caliente 1 con la fría 4, la corriente caliente 2 con la fría 3, la corriente caliente 2 con la fría 5, además de recibir calor la corriente fría 5 del servicio caliente.

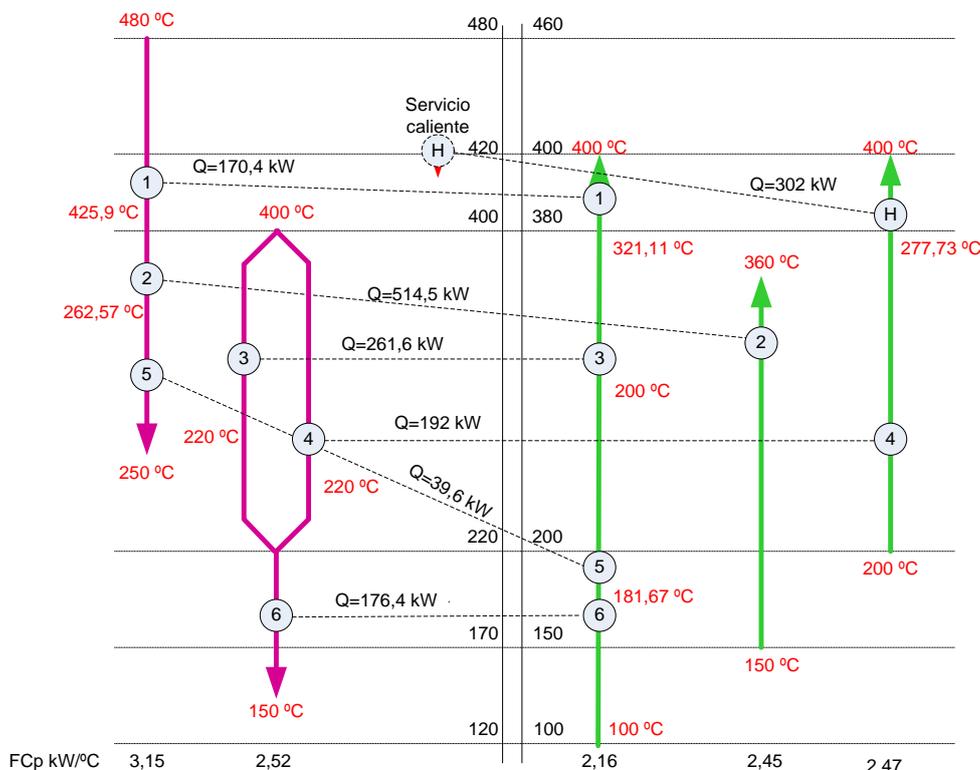


Figura 4.5.- Solución de la red de cambiadores para el Problema 3.

El diseño de la red proporciona la solución mostrada en la Figura 4.5 una vez agrupados algunos de los intercambiadores de calor dados en los diferentes intervalos de temperatura y dividida la corriente caliente 2 con FCp de 1,45 kW/°C y 1,07 kW/°C respectivamente. El número de cambiadores de calor es 7, cuando el número mínimo de cambiadores es de 5 para las mínimas necesidades energéticas.

El área global de los intercambiadores de calor es 114 m<sup>2</sup>, muy próxima a los 105,4 m<sup>2</sup> estimados previamente.

La solución alcanzada por el programa usando el método de diseño alternativo basado en reglas heurísticas se muestra en la Figura 4.6.

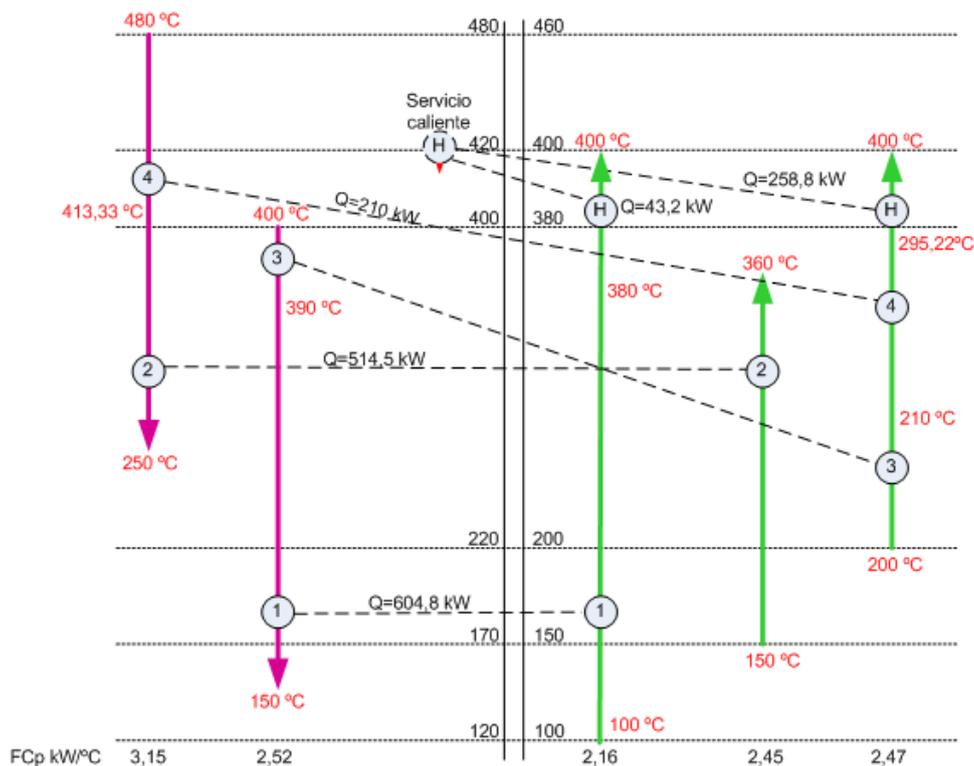


Figura 4.6.- Solución de la red de cambiadores para el Problema 3 usando reglas heurísticas.

En este caso el número de cambiadores de calor ha sido de 6, cuando el número mínimo de cambiadores es de 5 para las mínimas necesidades energéticas. El área de la red es de 164,6 m<sup>2</sup>, no muy alejada de los 105,4 m<sup>2</sup> estimados previamente.

#### 4.4. PROBLEMA 4

Los datos iniciales del problema se muestran en la Tabla 4.4. Se supone un gradiente mínimo de temperatura de 10 °C.

Tabla 4.4.- Datos del Problema 4.

Corriente	FC <sub>P</sub> , kW/°C	T de entrada, °C	T de salida, °C	h, kW/m <sup>2</sup> /°C
<b>1, caliente</b>	100	327	40	0,50
<b>2, caliente</b>	16	220	160	0,40
<b>3, caliente</b>	60	220	60	0,14
<b>4, caliente</b>	400	160	45	0,30
<b>5, fría</b>	100	100	300	0,35
<b>6, fría</b>	70	35	164	0,70
<b>7, fría</b>	350	85	138	0,50
<b>8, fría</b>	60	60	170	0,14
<b>9, fría</b>	200	140	300	0,60

Las mínimas necesidades energéticas son 17280 kW de calefacción y 25000 kW de refrigeración. La temperatura pinch es de 155 °C. Si se supone que se usa como servicio caliente un fluido que entra a 330 °C y sale a 250 °C ( $h = 0,5 \text{ kW/m}^2/\text{°C}$ ) y como servicio frío agua que entra a 15 °C y sale a 30 °C ( $h = 0,5 \text{ kW/m}^2/\text{°C}$ ), la estimación del área de la red es 32441,5 m<sup>2</sup>.

La solución alcanzada resolviendo el problema MILP muestra que el número mínimo de intercambios entre corrientes debe ser la corriente caliente 1 con la fría 5, la corriente caliente 1 con la fría 8, la corriente caliente 1 con la fría 9, la corriente caliente 1 con el servicio frío, la corriente caliente 2 con la fría 9, la corriente caliente 3 con la fría 5, la corriente caliente 3 con la fría 6, la corriente caliente 4 con la fría 6, la corriente caliente 4 con la fría 7, la corriente caliente 4 con la fría 9, la corriente caliente 4 con el servicio frío y el servicio caliente con la corriente fría 9.

El diseño de la red proporciona la solución mostrada en la Figura 4.7 una vez agrupados algunos de los intercambios de calor dados en los diferentes intervalos de temperatura y dividida la corriente caliente 2 con FC<sub>p</sub> de 1,45 kW/°C y 1,07 kW/°C respectivamente. El número de cambiadores de calor es 31, cuando el número mínimo de cambiadores es 10 y 15 para las mínimas necesidades energéticas.

El área global de los intercambiadores de calor es 114 m<sup>2</sup>, muy próxima a los 32441,5 m<sup>2</sup> estimados previamente.

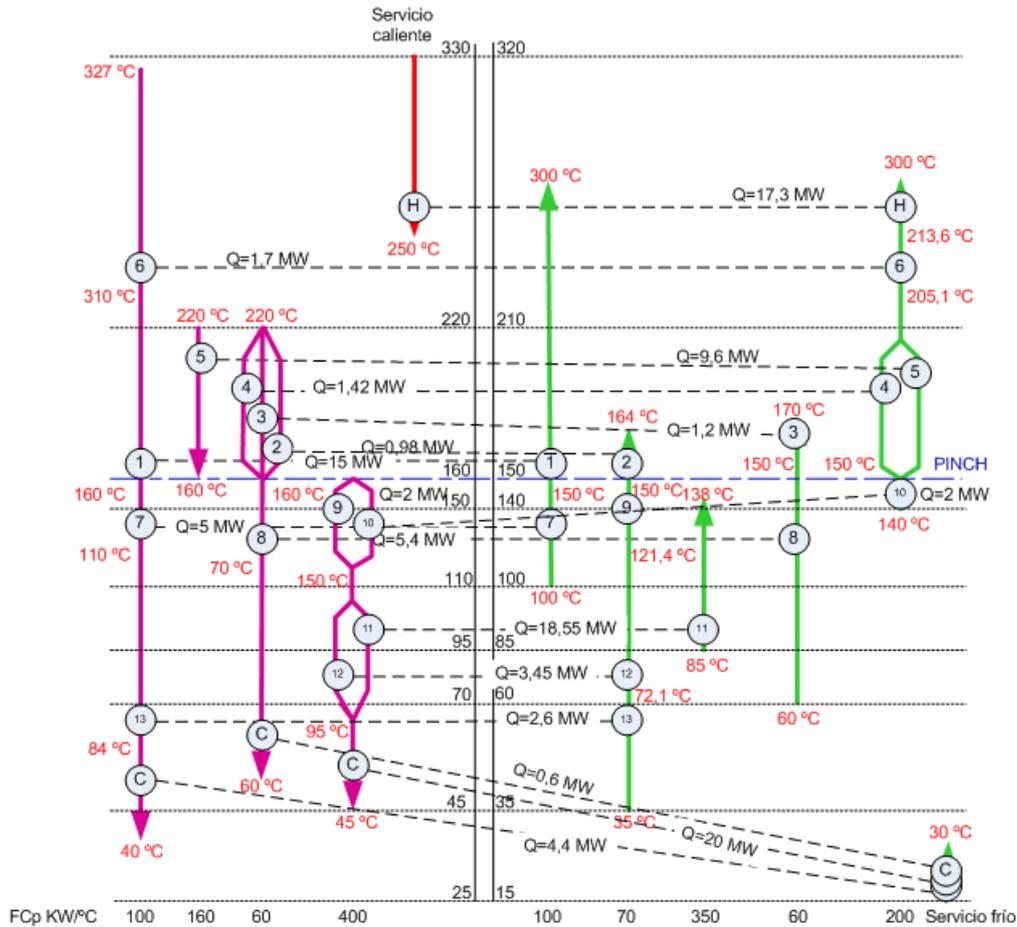


Figura 4.7.- Solución de la red de cambiadores para el Problema 4.

El algoritmo de diseño alternativo basado en reglas heurísticas no consiguió una solución para este problema.

Una posible solución basada en reglas heurísticas teniendo en cuenta que se deben dividir corrientes es la que se muestra en la Figura 4.8.

En este caso el número de cambiadores de calor ha sido de 17, cuando el número mínimo de cambiadores es 10 y 15 para las mínimas necesidades energéticas. El área de la red es de 39036,8 m<sup>2</sup> no muy alejada de los 32441,5 m<sup>2</sup> estimados previamente. Es evidente que los cambiadores 1 y 7 de la red de la Figura 4.8 pueden agruparse en un único cambiador con un intercambio de calor de 20 MW, lo que dejaría una red con 16 cambiadores de calor, muy cerca del mínimo esperado para satisfacer las mínimas necesidades energéticas.

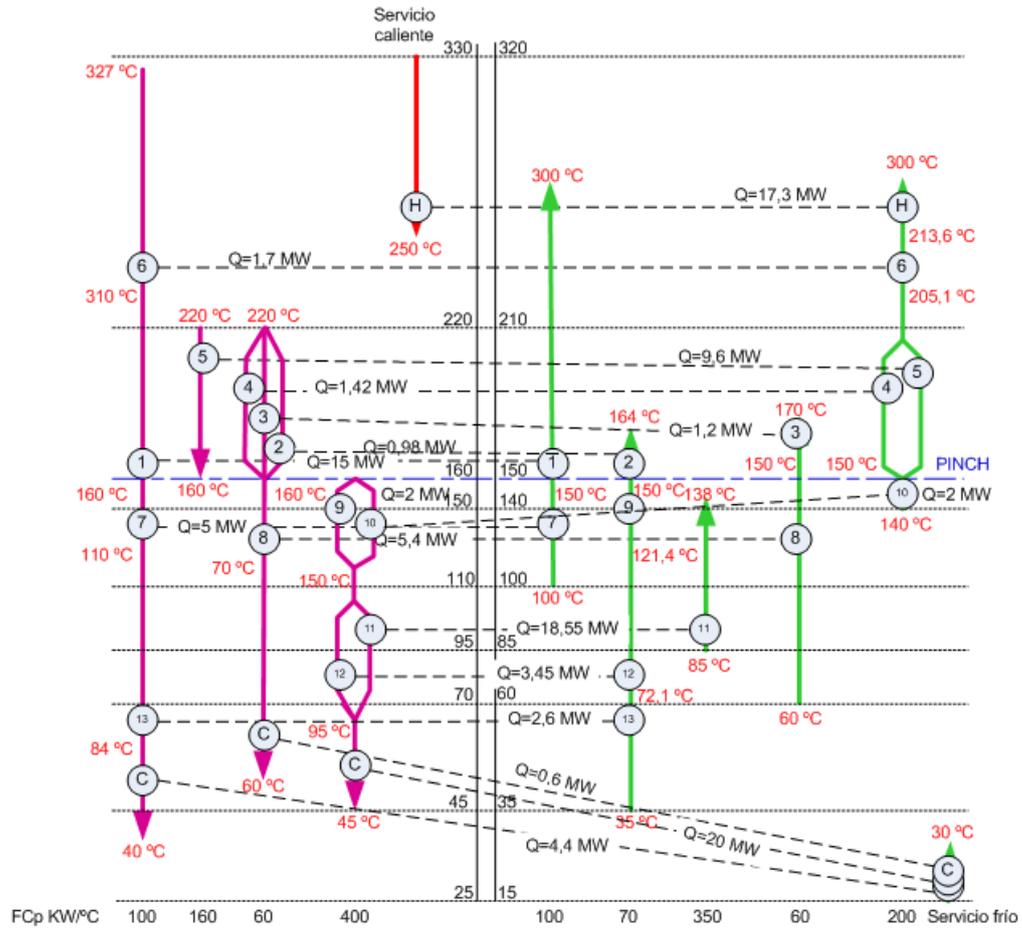


Figura 4.8.- Solución de la red de cambiadores para el Problema 4 usando reglas heurísticas.

## 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

### 5.1. RESUMEN

En la memoria del trabajo fin de grado se ha analizado el problema de la integración energética de corrientes de proceso con el objetivo crear una herramienta capaz de establecer unos objetivos que sirvan para evaluar el diseño global de un proceso y para diseñar posteriormente la red de cambiadores de calor que satisfagan esos objetivos.

En primer lugar se ha realizado un extenso análisis bibliográfico en relación con los objetivos del trabajo. El análisis sigue una secuencia histórica en la que se van mostrando los avances en el tema de forma que se dispone de los antecedentes para abordar los objetivos planteados.

Se ha optado por desarrollar un programa de cálculo secuencial en el que se van cumpliendo diferentes objetivos. Los objetivos han sido:

- Determinación de las mínimas necesidades energéticas dado un gradiente mínimo de temperatura, incluyendo posibles restricciones a priori en el intercambio de calor entre diversas corrientes calientes y frías.
- Poder determinar el nivel de temperatura de los servicios con objeto de poder elegir el servicio más adecuado a las necesidades.
- Estimar el área de la red de cambiadores con el objetivo de realizar una estimación económica tanto del coste de los servicios como de los equipos (inmovilizado).
- Estimar el área y el coste en función del gradiente mínimo de temperatura para poder así evaluar la elección del valor más adecuado del gradiente de temperatura.
- Diseñar una red de cambiadores de calor que cumpla los objetivos de mínimas necesidades energéticas y mínimo coste.

Para el primer objetivo se ha usado el método de intervalos de temperatura explicado en el Apartado 3.1, de forma que todas las corrientes calientes están agrupadas en cada intervalo de temperatura, lo mismo que las corrientes frías para cada intervalo de temperatura. Se han planteado los balances de calor para cada intervalo de temperaturas y la solución al problema se transforma en la solución de un problema de programación lineal donde se minimiza la cantidad de calefacción de forma que se cumplan las relaciones de igualdad dadas por los balances de calor en cada intervalo. En el caso de restricciones, los balances de calor se han realizado para cada intervalo y dentro de cada intervalo para cada conjunto de corrientes calientes, agrupando todas aquellas que no tienen restricciones.

Una vez calculadas las mínimas necesidades de calefacción y/o refrigeración se calcula la temperatura pinch si la hubiera y se representan gráficamente las curvas compuestas de temperatura-entalpía para el conjunto de corrientes calientes y el conjunto de corrientes frías. De la misma forma, se calculan los valores para representar de forma gráfica la gran curva compuesta, que se utiliza para evaluar cuales son los niveles de temperatura más convenientes a la hora de elegir los servicios calientes y/o fríos.

El siguiente paso ha sido implementar el método de Townsend y Linnhoff (1984) para estimar el área de la red de cambiadores. Para ello se parte de los resultados vistos

gráficamente en forma de curvas de temperatura-entalpía para el conjunto de corrientes calientes y frías. Se supone que el intercambio de calor en cada intervalo de temperatura es en vertical, obteniéndose así el área de intercambio global para cada intervalo de temperatura.

Posteriormente se abordó la implementación del cálculo del coste de operación anual equivalente de la red de cambiadores. Para ello se necesita el área de intercambio, a partir de la cual se calcula el coste de los equipos, y las necesidades energéticas, a partir de las cuales se obtiene el coste de operación anual. Dado una rentabilidad exigida a la inversión (coeficiente de actualización) y un periodo de la inversión, se calcula el coste de operación anual anualizando los costes del capital. Los cálculos se realizan para diferentes valores del gradiente mínimo de temperatura en la red de cambiadores. De esa forma se puede estimar el gradiente de temperatura óptimo.

Los resultados se graban en un fichero que, además de mostrar los datos de entrada, y las mínimas necesidades energéticas, muestra en forma de tablas todos los gráficos generados (niveles de temperatura, diagramas de temperatura-entalpía para el conjunto de corrientes calientes y frías, gran curva compuesta, cálculos del área para cada intervalo de temperatura, tabla de necesidades energéticas, costes de servicios, costes de inmovilizado y costes de operación anual equivalente en función del gradiente mínimo, etc.).

Una vez implementadas esas herramientas, se pasó a desarrollar el diseño de la red de cambiadores que cumpliera con los objetivos planteados hasta el momento. Se han estudiado dos métodos alternativos: i) el método planteado por Papoulias y Grossmann (1983) de minimización del número de intercambios de calor y ii) el algoritmo desarrollado en este trabajo fin de grado a partir de reglas heurísticas.

En el primer método se ha implementado un problema de programación lineal denominado Mixed Integer Linear Programming (MILP), donde la función objetivo a minimizar es la suma de unas variables enteras (pueden tomar valores 1 ó 0) que representan los posibles intercambios de calor entre todas las corrientes calientes y todas las corrientes frías. Esas variables pueden estar multiplicadas por unos coeficientes que pueden representar la probabilidad de favorecer o no unos determinados intercambios a priori. El problema tiene unas restricciones de igualdad formadas por los balances de calor para cada corriente caliente presente en cada uno de los intervalos de temperatura. Además se establecen unas restricciones de desigualdad dadas por los balances de calor que limitan el calor total intercambiado entre cada par de corrientes en los diferentes intervalos de temperatura. El programa genera todos los coeficientes y resuelve el problema MILP usando una función específica de Matlab®

Para implementar el otro método se han creado unos algoritmos basados en reglas heurísticas, partiendo de que el problema se divide en dos partes: por encima y por debajo de la temperatura pinch. La red resultante suele ser diferente a la obtenida mediante el método anterior.

Finalmente, se ha realizado la validación del programa, probando diversos problemas encontrados en la bibliografía. Se han elegido casos que cubren distintas posibilidades: que el sistema tenga temperatura pinch, lo que implica necesidades de calefacción y refrigeración, que no haya temperatura pinch, lo que significa que no hay calefacción o no hay refrigeración, que sea obligatorio o no dividir corrientes, etc.

En todos los casos, se han calculado las necesidades energéticas, se ha estimado el área dado un gradiente mínimo de temperatura a priori y se ha diseñado la red de cambiadores mediante los dos métodos alternativos implementados, comparando el área de la red calculada a partir del área individual de sus intercambiadores de calor con el área estimada de la red antes de diseñarla.

## 5.2. CONCLUSIONES

Tras la realización del trabajo fin de grado se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El programa desarrollado es capaz de calcular las mínimas necesidades de calefacción y refrigeración en la integración de corrientes de proceso tanto si éstas no tienen restricciones como si hay restricciones a priori que impidan intercambiar calor entre determinadas corrientes. La solución ha sido la correcta para cualquiera de los problemas planteados.
- El área estimada para la red de cambiadores de calor siguiendo el método propuesto por Townsend y Linnhoff (1984) da valores similares al área obtenida una vez diseñada la red y sumada el área de cada uno de los cambiadores de calor.
- El método de Papoulias y Grossmann (1983) alcanza la solución en todos los casos planteados. No define la estructura de la red de forma automática y hay que realizar cálculos posteriores para determinar las corrientes que deben dividirse y donde deben dividirse.
- El problema MILP creado para diseñar la red de cambiadores de calor puede tener varias soluciones y no se dispone de un mecanismo claro para dirigir la solución ni para establecer si alguna solución es superior. Para ello se puede hacer uso de factores de ponderación que penalicen o favorezcan determinados intercambios, pero es prácticamente imposible determinar qué factores son los más adecuados.
- El método de diseño basado en resolver el problema MILP minimiza el número de intercambios de calor entre corrientes, pero eso puede significar o no el mínimo número de intercambiadores de calor dependiendo del método usado para generar la estructura de la red a partir de la solución del problema MILP.
- El algoritmo creado basado en reglas heurísticas es capaz de diseñar una red de cambiadores que satisfaga las mínimas necesidades de calefacción y/o refrigeración siempre que no sea necesario dividir corrientes.

De cara al futuro, para seguir desarrollando este programa habría que dar los siguientes pasos:

- Tras resolver el problema MILP, para automatizar el diseño de la red de cambiadores de calor habría que crear un modelo de programación no lineal siguiendo los métodos de Floudas y cols. (1986) y de Saboo y cols. (1986) para desarrollar una red basada en una superestructura que parta de las cargas térmicas e intercambios de calor entre corrientes obtenidos en el problema MILP resuelto previamente.

- Seguir progresando en el desarrollo del algoritmo creado basado en reglas heurísticas para diseñar redes de cambiadores de calor en las que una o más corrientes deban dividirse para satisfacer las mínimas necesidades energéticas.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, S., Linnhoff, B., Smith, R., 1990. Cost Optimum Heat Exchanger Networks-2. Targets and Design for Detailed Capital Cost Models. *Comput. Chem. Eng.*, 14(7) 751-767.
- Biegler, L.T., Grossmann, I.E., Westerberg, A.W., 1997. *Systematic Methods of Chemical Process Design*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Boland, D., Linnhoff, B., 1979. The preliminary design of networks for heat exchange by systematic methods. *The Chem. Engr.* April, 9-15.
- Cerda, J., Westerberg, A.W., 1983. Synthesizing Heat Exchanger Networks Having Restricted Stream/Stream Matches Using Transportation Problem Formulations. *Chem. Eng. Sci.*, 38(10), 1723-1740.
- Cerda, J., Westerberg, A.W., Mason, D., Linnhoff, B., 1983. Minimum Utility Usage in Heat Exchanger Network Synthesis. *Chem. Eng. Sci.*, 38(3), 373-387.
- Ciric, A.R., Floudas, C.A., 1991. Heat Exchanger Network Synthesis without Decomposition. *Comput. Chem. Eng.*, 15(6), 385-396.
- Ciric, A.R., Floudas, C.A., 1990. Application of the Simultaneous Match-Network Optimization Approach to the Pseudo-Pinch Problem. *Comput. Chem. Eng.*, 14(3), 241-250.
- Colbert, R.W., 1982. Industrial Heat Exchange Networks. *Chem. Eng. Prog.*, 78(7), 47-54.
- Daichendt, M.M., Grossmann, I.E., 1994a. A Preliminary Screening Procedure for MINLP Heat Exchanger Network Synthesis Using Aggregated Models. *Chem. Eng. Res. Des.*, 72(A), 357-363.
- Daichendt, M.M., Grossmann, I.E., 1994b. Errata-A Preliminary Screening Procedure for MINLP Heat Exchanger Network Synthesis Using Aggregated Models. *Chem. Eng. Res. Des.*, 72(A), 708-709.
- Daichendt, M.M., Grossmann, I.E., 1994c. Preliminary Screening Procedure for the MINLP Synthesis of Process Systems-I. Aggregation and Decomposition. *Comp. Chem. Eng.*, 18(8), 663-677.
- Dolan, W.B., Cummings, P.T., Van, M.D.L., 1989. Process Optimization via Simulated Annealing: Application to Network Design. *AIChE J.*, 35(5), 725-736.
- Floudas, C.A., Ciric, A.R., 1989. Strategies for Overcoming Uncertainties in Heat Exchanger Network Synthesis. *Comput. Chem. Eng.*, 13(10), 1133-1152.
- Floudas, C.A., Ciric, A.R., 1990. Corrigendum-Strategies for Overcoming Uncertainties in Heat Exchanger Network Synthesis. *Comput. Chem. Eng.*, 14(8), I.
- Floudas, C.A., Ciric, A.R., Grossmann, I.E., 1986. Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations. *AIChE J.*, 32(2), 276-290.
- Frausto, S., Rico, V., Jiménez, A., Hernández, S., 2003. MINLP synthesis of heat exchanger networks considering pressure drop effects. *Comput. Chem. Eng.*, 27, 1143-1152.

- Furman, K.C., Sahinidis, N.V., 2002. A Critical Review and Annotated Bibliography for Heat Exchanger Network Synthesis in the 20th Century. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41, 2335-2370.
- Galli, M.R., Cerda, J., 1998a. A Designer-Controlled Framework for the Synthesis of Heat Exchanger Networks involving Non-Isothermal Mixers and Multiple Units over Split Streams. *Comput. Chem. Eng.*, 22(Suppl.), S813-S816.
- Galli, M.R., Cerda, J., 1998b. Synthesis of Structural-Constrained Heat Exchanger Networks-I. Series Networks. *Comput. Chem. Eng.*, 22(7-8), 819-839.
- Galli, M.R., Cerda, J., 1998c. Synthesis of Structural-Constrained Heat Exchanger Networks-II. Split Networks. *Comput. Chem. Eng.*, 22(7-8), 1017-1035.
- Gundersen, T., Grossmann, I.E., 1990. Improved Optimization Strategies for Automated Heat Exchanger Network Synthesis Through Physical Insights. *Comput. Chem. Eng.*, 14(9), 925-944.
- Gundersen, T., Naess, L., 1988. The Synthesis of Cost Optimal Heat Exchanger Networks. *Comput. Chem. Eng.*, 12(6), 503-530.
- Gundersen, T., Duvold, S., Hashemi-Ahmady, A., 1996. An Extended Vertical MILP Model for Heat Exchanger Network Synthesis. *Comput. Chem. Eng.*, 20(Suppl.), S97-S102.
- Hohmann, E.C., 1971. Optimum Networks for Heat Exchange. PhD. Dissertation, University of Southern California, Los Angeles, CA.
- Hwa, C.S., 1965. Mathematical Formulation and Optimization of Heat Exchanger Networks Using Separable Programming, *AIChE-ICHEME Symposium Series 4* (pp. 101-106). AIChE. New York.
- Jezowski, J., Friedler, F., 1992. A Simple Approach for Maximum Heat Recovery Calculations. *Chem. Eng. Sci.*, 47(6), 1481-1494.
- Jezowski, J., 1994a. Heat Exchanger Network Grassroot and Retrofit Design. The Review of the State-of-the-Art: Part I. Heat Exchanger Network Targeting and Insight Based Methods of Synthesis. *Hung. J. Ind. Chem.*, 22, 279-294.
- Jezowski, J., 1994b. Heat Exchanger Network Grassroot and Retrofit Design. The Review of the State-of-the-Art: Part II. Heat Exchanger Network Synthesis by Mathematical Methods and Approaches for Retrofit Design. *Hung. J. Ind. Chem.*, 22, 295-308.
- Jones, S.A., 1987. Methods for the Generation and Evaluation of Alternative Heat Exchanger Networks. Ph.D. Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- Kesler, M.G., Parker, R.O., 1969. Optimal Networks of Heat Exchange. *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 65(92), 111-120.
- Li, Y., Motard, R.L., 1986. Optimal Pinch Approach Temperature in Heat-Exchanger Networks. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 25(4), 577-581.
- Linnhoff, B., Ahmad S., 1990. Cost Optimum Heat Exchanger Networks-1. Minimum Energy and Capital using Simple Models for Capital Cost. *Comput. Chem. Eng.*, 14(7) 729-750.
- Linnhoff, B., Flower, J.R., 1978a. Synthesis of Heat Exchanger Networks-I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks. *AIChE J.*, 24(4), 633-642.

- Linnhoff, B., Flower, J.R., 1978b. Synthesis of Heat Exchanger Networks-II. Evolutionary Generation of Networks with Various Criteria of Optimality. *AIChE J.*, 24(4), 642-654.
- Linnhoff, B., Hindmarsh, E., 1983. The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks. *Chem. Eng. Sci.*, 38(5) 745-763.
- Linnhoff, B., Mason, D.R., Wardle, I., 1979. Understanding heat exchange networks. *Comput. Chem. Engng.*, 3, 295-302.
- Linnhoff, B., Turner, J.A., 1981. Heat-recovery networks: new insights yield big savings. *Chem. Engng.*, 88, 56-70.
- Linnhoff, B., Vredeveld, D.R., 1984. Pinch Technology Has Come of Age. *Chem. Eng. Prog.*, 80(7), 33-40.
- Linnhoff, B., 1993. Pinch Analysis- S State-of-the-Art Overview. *Chem. Eng. Res. Des.*, 71(A), 503-522.
- Masso, A.H., Rudd, D.F., 1969. The Synthesis of System Designs-II. Heuristic Structuring. *AIChE J.*, 15(1), 10-17.
- McGilliard, R.L., Westerberg, A.W., 1972. Structural Sensitivity Analysis in Design Synthesis. *Chem. Eng. J.*, 4, 127-138.
- Papoulias, S.A., Grossmann, I.E., 1983. A Structural Optimization Approach in Process Synthesis-II. Heat Recovery Networks. *Comput. Chem. Eng.*, 7(6), 707-721.
- Ponce, J.M., Jiménez, A., Grossmann, I.E., 2008. Optimal synthesis of heat exchanger networks involving isothermal process streams. *Comput. Chem. Eng.*, 32, 1918-1942.
- Rév, E., Fonyó, Z., 1986a. Hidden and Pseudo Pinch Phenomena and Relaxation in the Synthesis of Heat-Exchange Networks. *Comput. Chem. Eng.*, 10(6), 601-607.
- Rév, E., Fonyó, Z., 1986b. Additional Pinch Phenomena Providing Improved Synthesis of Heat Exchange Networks. *Hung. J. Ind. Chem.*, 14, 181-201.
- Rudd, D.F., 1968. The Synthesis of System Designs: I. Elementary Decomposition Theory. *AIChE J.*, 14(2), 343-349.
- Saboo, A.K., Morari, M., Colberg, R.D., 1986. RESHEX: An interactive software package for the synthesis and analysis of resilient heat-exchanger networks – II. *Comput. Chem. Eng.*, 10(6), 591-599.
- Seider, W.D., Seader, J.D., Lewin, D.R., 1999. *Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation*. John Wiley & Son, New York.
- Smith, R.(1995). *Chemical Process Design*. McGraw-Hill, New York.
- Suaysompol, K., Wood, R.M., 1991. The Flexible Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks Part I: Heuristic Guidelines for Free Hand Designs. *Chem. Eng. Res. Des.*, (69(6), 458-464.
- Ten Broeck, 1944. Economic Selection of Exchanger Sizes. *Ind. Eng. Chem.*, 36(1), 64-67.
- Tjoe, T.N., Linnhoff, B., 1986. Using Pinch Technology for Process Retrofit. *Chem. Eng.*, 93(4), 47-60.
- Townsend, D.W., Linnhoff, B., 1984. Surface Area Targets for Heat Exchanger Networks. *ICHEME Annual Research Meeting*, Bath, UK.

- Trivedi, K.K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., 1989a. Synthesis of Heat Exchanger Networks Featuring Multiple Pinch Points. *Comput. Chem. Eng.*, 13(3), 291-294.
- Trivedi, K.K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., 1989b. A New Dual-Temperature Design Method for the Synthesis of Heat Exchanger Networks. *Comput. Chem. Eng.*, 13(6), 667-685.
- Turton, R., Bailie, R.C., Whiting, W.B., Shaeiwitz, J.A., 2003. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, 2nd ed. Prentice Hall PTR.
- Umeda, T., Itoh, J., Shiroko, K., 1978. Heat Exchange System Synthesis. *Chem. Eng. Prog.*, 74(7), 70-76.
- Westbrook, G., 1961. Use this Method to Size Each Stage for Best Operation. *Hydrocarbon Process. Pet. Refin.*, 40(9), 201-206.
- Wood, R.M., Suaysompol, K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., Trivedi, K.K., 1991. A New Option for Heat Exchanger Network Design. *Chem. Eng. Prog.*, 87(9), 38-43.
- Yee, T.F., Grossmann, I.E., 1990. Simultaneous Optimization Models for Heat Integration-II. Heat Exchanger Network Synthesis. *Comput. Chem. Eng.*, 14(10), 1165-1184.
- Yee, T.F., Grossmann, I.E., Kravanja, Z., 1990. Simultaneous Optimization Models for Heat Integration-I. Area and Energy Targeting and Modeling of Multi-Stream Exchangers. *Comput. Chem. Eng.*, 14(10), 1151-1164.
- Yuan, X., Piboleau, L., Doménech, S., 1989. Experiments in Process Synthesis via Mixed-Integer Programming. *Chem. Eng. Process.*, 25(2), 99-116.
- Zhu, X.X., 1995. Automated Synthesis of HENs Using Block Decomposition and Heuristic Rules. *Comput. Chem. Eng.*, 19(Suppl.), S155-S160.
- Zhu, X.X., 1997. Automated Design Method for Heat Exchanger Network using Block Decomposition and Heuristic Rules. *Comput. Chem. Eng.*, 21(10), 1095-1104.
- Zhu, X.X., O'Neill, B.K., Roach, J.R., Wood, R.M., 1995a.) A New Method for Heat Exchanger Network Synthesis Using Area Targeting Procedures. *Comput. Chem. Eng.*, 19(2), 197-222.
- Zhu, X.X., O'Neill, B.K., Roach, J.R., Wood, R.M., 1995b. A Method for Automated Heat Exchanger Synthesis Using Block Decomposition and Non-Linear Optimization. *Chem. Eng. Res. Des.*, 73(A), 919-930.
- Zhu, X.X., O'Neill, B.K., Roach, J.R., Wood, R.M., 1995c. Area Targeting Methods for the Direct Synthesis of Heat Exchanger Networks with Unequal Film Coefficients. *Comput. Chem. Eng.*, 19(2), 223-239.

**APENDICE A**

Tabla A.1.- Coeficientes de las restricciones de igualdad correspondientes a la ec. (3.14) del problema de referencia.

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 R_{h1} \\
 R_{h2} \\
 R_{h3} \\
 R_{h4} \\
 R_{h5} \\
 R_{h6} \\
 R_{11} \\
 R_{12} \\
 R_{13} \\
 R_{14} \\
 R_{15} \\
 Q_{h22} \\
 Q_{1c3} \\
 Q_{h23} \\
 Q_{hc3} \\
 Q_{1c4} \\
 Q_{hc4} \\
 Q_{1c5} \\
 Q_{hc52}
 \end{matrix}
 *
 =
 \begin{bmatrix}
 50 \\
 0 \\
 40 \\
 160 \\
 20 \\
 80 \\
 20 \\
 80 \\
 20 \\
 80 \\
 0 \\
 80 \\
 240 \\
 120 \\
 60 \\
 60 \\
 60
 \end{bmatrix}$$





**APENDICE B**

Fichero de resultados generado por el programa para el problema de referencia

INTEGRACION ENERGÉTICA DE CORRIENTES CALIENTES Y FRIAS  
\*\*\*\*\*

Diferencia mínima de temperatura = 10.0 °C

Datos de las corrientes calientes

FCp (kW/°C)	T entrada (°C)	T salida (°C)	Coef. h (kW/m <sup>2</sup> /°C)
1.00	250.0	120.0	0.01
4.00	200.0	100.0	0.10

Datos de las corrientes frías

FCp (kW/°C)	T entrada (°C)	T salida (°C)	Coef. h (kW/m <sup>2</sup> /°C)
3.00	90.0	150.0	0.10
6.00	130.0	190.0	0.01

Datos para generar el diagrama de intervalos de temperatura

Número de intervalos de temperatura = 5

Intervalo	Rango de temperaturas (°C)	Exceso de calor (kW)
1	250.0 - 200.0	50.0
2	200.0 - 160.0	-40.0
3	160.0 - 140.0	-80.0
4	140.0 - 120.0	40.0
5	120.0 - 100.0	20.0

Temperatura pinch-Caliente = 140.0 (°C)

Temperatura pinch-Fría = 130.0 (°C)

Necesidades de servicio caliente = 70.0 (kW)

Necesidades de servicio frío = 60.0 (kW)

Datos para el diagrama Temperatura-Entalpía

Temperatura (°C)	H corriente caliente (kW)	Temperatura (°C)	H corriente fría (kW)
100.0	0.0	90.0	60.0
120.0	80.0	110.0	120.0
140.0	180.0	130.0	180.0
160.0	280.0	150.0	360.0
200.0	480.0	190.0	600.0
250.0	530.0	240.0	600.0

Necesidades energéticas, área y coste de la red

$\Delta T_{min}$ °C	Calefacción kW	Enfriamiento kW	Tpinch °C	Area m <sup>2</sup>	COAE 1000\$/año
5.0	45	35	132.5	3389.0	88
7.5	57.5	47.5	133.8	2892.4	85
10.0	70	60	135.0	2544.7	84
12.5	82.5	72.5	136.3	2279.4	84

15.0	95	85	137.5	2068.9	85
17.5	107.5	97.5	138.8	1895.9	86
20.0	120	110	140.0	1750.3	88
22.5	132.5	122.5	141.3	1625.5	89
25.0	145	135	142.5	1516.9	91
27.5	157.5	147.5	143.8	1421.3	93
30.0	170	160	145.0	1336.3	96
32.5	182.5	172.5	146.3	1260.1	98
35.0	195	185	147.5	1191.4	101
37.5	207.5	197.5	148.8	1129.9	103
40.0	220	210	150.0	1074.5	106
42.5	232.5	222.5	151.3	1023.7	109
45.0	245	235	152.5	976.8	112
47.5	257.5	247.5	153.8	933.3	115
50.0	270	260	155.0	892.7	118
52.5	282.5	272.5	156.3	854.8	121
55.0	295	285	157.5	819.3	124

## Datos de los servicios

	FCp (kW/°C)	T entrada (°C)	T salida (°C)	Coef. h (kW/m <sup>2</sup> /°C)
Servicio caliente:	70.00	201.0	200.0	0.10
Servicio frio:	6.00	80.0	90.0	0.10

## Estimación del área de la red de cambiadores:

k	ΔTml	C1	C2	C3	F1	F2	F3	Area
1	22.4	0.0	60.0	0.0	0.0	0.0	60.0	53.6
2	24.2	0.0	20.0	0.0	20.0	0.0	0.0	16.6
3	15.7	20.0	80.0	0.0	100.0	0.0	0.0	241.5
4	16.7	36.0	144.0	0.0	60.0	120.0	0.0	1053.5
5	28.0	24.0	96.0	0.0	0.0	120.0	0.0	549.5
6	24.2	1.0	0.0	70.0	0.0	71.0	0.0	326.7
7	35.8	49.0	0.0	0.0	0.0	49.0	0.0	273.9
Area total =								2515.1 (m <sup>2</sup> )

## Diseño de la red de cambiadores

Intercambio	Caliente	Fría
1	1	2
2	1	3
3	2	1
4	2	2
5	2	3
6	3	2

Camb.	Q(kW)	Cal.	FCp(kW/°C)	T1(°C)	T2(°C)	Fría	FCp(kW/°C)	T3(°C)	T4(°C)
1	110.0	1	1.00	250.00	140.00	2	6.00	190.00	171.67
2	60.0	2	4.00	200.00	185.00	1	3.00	150.00	130.00
3	180.0	2	4.00	185.00	140.00	2	6.00	171.67	141.67
4	70.0					2	6.00	141.67	130.00
5	120.0	2	4.00	140.00	110.00	1	3.00	130.00	90.00
6	20.0	1	1.00	140.00	120.00				
7	40.0	2	4.00	110.00	100.00				

## Solución del problema de diseño

---

y0101	0.00
y0102	1.00
y0103	1.00
y0201	1.00
y0202	1.00
y0203	1.00
y0301	0.00
y0302	1.00
R0101	49.00 kW
R0102	50.00 kW
R0302	70.00 kW
R0103	0.00 kW
R0203	0.00 kW
R0104	20.00 kW
R0204	40.00 kW
Q010103	0.00 kW
Q010203	110.00 kW
Q020103	60.00 kW
Q020203	180.00 kW
Q030103	0.00 kW
Q030203	70.00 kW
Q010104	0.00 kW
Q020104	120.00 kW
Q010305	20.00 kW
Q020305	40.00 kW